
Rapport de stage

4^{ème} année]

Stage de recherche

Institut français de Pondichéry
11 Saint Louis Street, Pondichéry, 605 001, Inde



Tuteur entreprise : Samuel Corgne
Directeur département géomatique

Tristan Le Pape
UIT
2024-2025

Tuteur académique :
Laura Verdelli

Sommaire

Présentation de la structure d'accueil (2-4)

Présentation de la mission (5-7)

Déroulé de la mission (7-12)

Retour critique sur l'expérience (12-20)

Conclusion générale (20)

Annexe (22-55)

Présentation de la structure d'accueil

Avant d'aborder plus en détail le projet dans lequel s'inscrit la mission de stage, il convient de préciser les éléments administratifs et institutionnels de l'Institut français de Pondichéry, afin de mieux situer son cadre d'action.

Nom et statut juridique

L'Institut français de Pondichéry (IFP) est une Unité Mixte des Instituts Français de Recherche à l'Étranger (UMIFRE 21), placée sous double tutelle du Ministère français de l'Europe et des Affaires étrangères et du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

Secteurs d'activité et missions principales

L'Institut français de Pondichéry (IFP) est structuré autour de quatre pôles scientifiques complémentaires : l'indologie, les sciences sociales, l'écologie et la géomatique. Cette organisation reflète une volonté d'articuler des approches disciplinaires variées afin de produire des analyses croisées sur les dynamiques culturelles, sociales et environnementales de l'Inde du Sud.

Le Département d'indologie, historiquement fondé en premier, se concentre sur l'étude des textes anciens, des langues classiques (sanskrit et tamoul) et des pratiques religieuses. Il joue également un rôle de conservation, en numérisant et valorisant des documents patrimoniaux rares.

Le Département des sciences sociales analyse les transformations de la société indienne contemporaine à partir d'enquêtes de terrain. Ses thématiques incluent la mobilité sociale, l'urbanisation, les rapports de genre, la gouvernance locale et les politiques publiques.

Le Département d'écologie étudie les systèmes naturels et agricoles dans une perspective de long terme. Il s'intéresse aux dynamiques de biodiversité, aux usages des sols et aux effets du changement climatique, en combinant observations de terrain et séries de données écologiques.

Enfin, le Département de géomatique développe des outils d'analyse spatiale (SIG, télédétection, modélisation) pour interpréter les relations entre phénomènes environnementaux et humains. Il intervient à la fois en soutien aux autres départements et dans le cadre de projets autonomes. C'est dans ce dernier département qu'a été réalisée ma mission.

Localisation géographique

L'IFP est implanté à Pondichéry, en Inde, dans le quartier historique de White Town, au 11, Saint Louis Street, 605001.

Taille et organisation interne

Il y a environ 150 personnes travaillant à l'IFP, même si un chiffre précis n'est pas possible à obtenir puisqu'il y a beaucoup de brassage entre les stagiaires et les chercheurs entrants et sortants. L'institut fonctionne autour de quatre départements scientifiques et dispose d'équipes dédiées aux collections, à la numérisation et à l'archivage.

Organisation hiérarchique et direction

L'organisation de l'Institut français de Pondichéry repose sur une structure articulée autour de quatre départements scientifiques, appuyés par des services administratifs, techniques et logistiques. Cette répartition garantit à la fois la spécialisation des travaux de recherche et leur coordination opérationnelle.

Chaque département dispose de ses propres équipes, mais la collaboration interdisciplinaire est encouragée, notamment à travers des projets partagés ou des échanges de compétences. Le Département de géomatique illustre bien cette dynamique : bien que mon stage ait été centré sur des outils d'analyse spatiale, j'ai également collaboré avec le Département des sciences sociales pour élaborer un questionnaire lié aux usages des réservoirs.

Un organigramme simplifié (Figure 1) présente cette organisation interne :

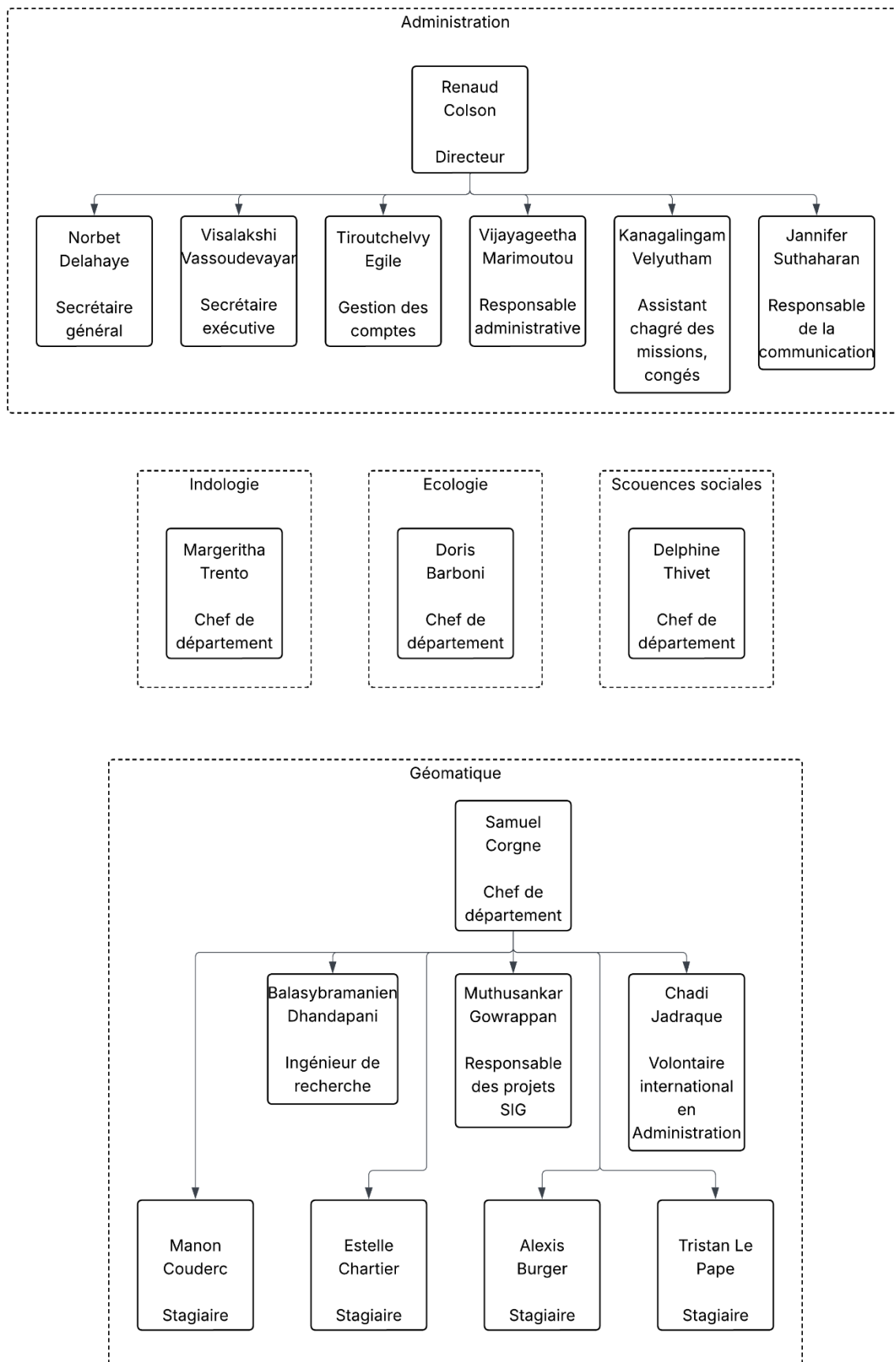


Figure 1 : Organigramme simplifié de l'IFP

Historique

L'Institut français de Pondichéry (IFP), fondé en 1955 dans le cadre du Traité de cession des établissements français en Inde, a été conçu dès l'origine comme un centre d'étude de la civilisation indienne, avec une attention particulière portée à l'histoire et aux religions de l'Inde du Sud. Sous l'impulsion de son premier directeur, Jean Filliozat, l'Institut a rapidement acquis une reconnaissance scientifique internationale dans le champ de l'indologie.

À partir des années 1960, l'IFP a progressivement élargi son périmètre disciplinaire. L'intégration d'une cellule dédiée à l'environnement a marqué le point de départ du futur Département d'écologie, centré sur l'analyse des écosystèmes du sud de l'Inde — notamment dans les Ghâts occidentaux, région majeure de biodiversité. Cette évolution a permis d'ancrer l'Institut dans des problématiques contemporaines telles que l'évolution des sols, la végétation et les effets du changement climatique. En 1988, la création du Département des sciences sociales a introduit une nouvelle orientation vers l'analyse des transformations socio-économiques de l'Inde contemporaine, renforçant ainsi l'approche interdisciplinaire de l'Institut.

Dans les années 1990, la volonté d'intégrer les outils numériques et l'analyse spatiale a conduit à la création d'un Laboratoire de géomatique, devenu en 2022 un département à part entière. Ce pôle apporte une lecture territoriale aux phénomènes étudiés par les autres départements, en mobilisant des technologies telles que les SIG, la télédétection ou la modélisation spatiale.

Enfin, l'IFP s'appuie sur une bibliothèque de référence de plus de 70 000 ouvrages, accessible sous conditions, qui constitue une ressource documentaire majeure pour les chercheurs, tant indiens qu'internationaux.

Public visé et partenariats institutionnels

L'Institut français de Pondichéry s'inscrit dans un écosystème académique à double échelle : il constitue à la fois un acteur central de la recherche française en Asie du Sud et un partenaire pleinement intégré au paysage scientifique indien. Son public cible est majoritairement composé de chercheurs, doctorants, étudiants et enseignants-chercheurs, en France comme en Inde.

L'IFP entretient des partenariats institutionnels solides, notamment avec la Pondicherry University, le Centre de Sciences Humaines (CSH) de New Delhi, le CNRS et plusieurs établissements français et indiens. Ces collaborations prennent la forme de projets conjoints, de publications collectives, de séminaires, mais aussi de dispositifs de mobilité pour les chercheurs et les étudiants.

Au-delà de ses missions scientifiques, l'Institut joue un rôle d'interface entre les deux pays, en soutenant une coopération bilatérale durable fondée sur le partage des savoirs, la valorisation du patrimoine scientifique et culturel, et l'échange d'expertises.

Présentation de la mission

Pour mieux comprendre les enjeux de la mission qui m’a été confiée, il est essentiel de replacer mon travail dans le cadre plus large du projet de recherche PATAMIL, auquel il contribue directement. Le contexte scientifique et partenarial de ce programme éclaire les objectifs et la méthode du stage.

Contexte général et justification de la mission

Ce stage s’inscrit dans le cadre du projet de recherche PATAMIL, porté conjointement par la Région Centre-Val de Loire et l’Institut français de Pondichéry (IFP). Initié en 2022, ce programme vise à promouvoir des systèmes alimentaires locaux et équitables à Pondichéry et dans les Jawadhi Hills, en mobilisant une approche participative et interdisciplinaire. Il associe des partenaires académiques et associatifs français et indiens, autour de thématiques telles que l’agroécologie, la valorisation du patrimoine alimentaire, l’entrepreneuriat féminin et les cultures de millets.

Dans ce contexte, mon stage au sein du département de géomatique a contribué à une dimension encore peu explorée du projet : l’analyse des ressources en eau à travers les outils de télédétection. L’objectif était de développer une méthode de cartographie des réservoirs à ciel ouvert à partir d’images radar Sentinel-1, afin de mieux comprendre leur dynamique saisonnière et leur rôle dans la résilience des systèmes agroalimentaires locaux.

L’enjeu est d’autant plus crucial que l’Inde du Sud, et particulièrement le Tamil Nadu, fait face à une pression croissante sur ses ressources hydriques, liée à l’urbanisation, à l’intensification agricole et au changement climatique. Les réservoirs traditionnels (eri ou tanks), longtemps au cœur de la gestion de l’eau, sont aujourd’hui insuffisamment suivis à l’échelle régionale en raison de leur morcellement, de leur variabilité hydrologique et de l’absence d’inventaires actualisés.

La mission a donc consisté à concevoir une méthode reproductible permettant de détecter et suivre ces réservoirs à l’aide d’imagerie satellite, en s’appuyant sur les compétences du département de géomatique dans le traitement spatial des phénomènes environnementaux. Elle visait à produire des indicateurs utiles à la gestion locale de l’eau, tout en s’insérant dans une réflexion plus large sur les politiques de résilience territoriale.

Le choix des villes autour de Pondichéry comme zone d’étude (cf. figure 2) répondait à des impératifs à la fois scientifiques et pratiques : diversité typologique des réservoirs, pertinence hydrologique, et accessibilité logistique pour d’éventuelles validations de terrain.

Carte de la zone d'étude



Crédits : Tristan Le Pape

Données : Geofabrik

Figure 2 : Carte représentant la zone d'étude

La mission s'inscrit à la fois comme une mise en pratique des outils d'analyse géospatiale et comme une contribution à la compréhension des réservoirs traditionnels, souvent négligés dans les politiques publiques. Elle a pour finalité de produire des outils d'aide à la décision adaptés aux besoins des chercheurs et des acteurs de la gestion de l'eau.

Objectifs de la mission

La mission visait à combler un déficit de connaissance sur les réservoirs à ciel ouvert dans les zones rurales et périurbaines du Tamil Nadu, où ces infrastructures, bien qu'historiquement centrales pour la gestion de l'eau, restent peu documentées et rarement intégrées aux politiques de gestion hydrique. Elle consistait à développer une méthode d'analyse géospatiale adaptée au contexte local, en mobilisant des images satellitaires pour caractériser les dynamiques saisonnières des réservoirs. L'objectif était double : produire des indicateurs utiles à la prise de décision et structurer un protocole

reproductible, transférable à d'autres territoires confrontés à des enjeux similaires. Ce travail s'inscrivait dans la continuité des objectifs du projet PATAMIL, en apportant un éclairage spatial sur la disponibilité en eau, facteur déterminant pour la résilience des systèmes agroalimentaires.

Positionnement de la mission dans l'équipe

Ma mission s'est déroulée au sein du département de géomatique de l'Institut français de Pondichéry, sous la supervision de Samuel Corgne et avec l'appui ponctuel de Laura Verdelli. L'encadrement combinait un suivi technique régulier et une ouverture critique sur les enjeux sociaux et politiques liés à la gestion de l'eau.

Ce stage s'inscrivait dans une dynamique collective, en lien avec les travaux parallèles menés par d'autres chercheurs et stagiaires sur les réservoirs, leur patrimonialisation et leur réhabilitation. Cette interdisciplinarité appliquée a enrichi le projet, en croisant expertise géospatiale et ancrage territorial. Ma contribution a porté sur la conception et la validation d'une chaîne de traitement multi-temporelle d'images radar Sentinel-1, visant à produire des indicateurs hydrologiques spatialisés. J'ai travaillé en autonomie sur l'ensemble du processus : traitement des données, analyse spatiale, production cartographique et formalisation des résultats, en mobilisant des outils tels que SNAP, QGIS, ArcGIS Pro et Python.

Les échanges réguliers avec mon tuteur ont permis un pilotage méthodique par étapes, favorisant à la fois la rigueur technique et l'adaptation progressive des outils au contexte local. Cette expérience m'a permis de consolider des compétences avancées en télédétection, tout en évoluant dans un environnement de recherche international, attentif aux interactions entre méthodes, usages et réalités de terrain.

Cahier des charges et livrables attendus

La mission reposait sur un cahier des charges défini en amont avec le département de géomatique de l'IFP. Elle visait à concevoir une méthode opérationnelle et reproductible pour détecter, caractériser et analyser les réservoirs à ciel ouvert dans une zone test du Tamil Nadu, à partir d'images radar Sentinel-1.

Trois volets structurants ont guidé le travail. Le premier portait sur le développement d'une chaîne de traitement complète des images satellitaires : prétraitement, classification binaire, extraction de variables hydrologiques, et documentation formalisée du protocole. Le deuxième consistait à établir une typologie des réservoirs en fonction de leur stabilité saisonnière, en comparant leur extension en saison sèche et humide. Le troisième concernait la production cartographique et l'analyse spatiale, avec pour objectif de générer des représentations lisibles à différentes échelles, utiles à l'aide à la décision.

Deux rapports distincts étaient attendus : un rapport de recherche pour le projet PATAMIL, et le présent rapport pour Polytech. Le rapport de recherche (cf. annexe) détaille l'ensemble des traitements techniques et les figures cartographiques associées. Le livrable final incluait également les données produites (images vectorielles, scripts Python), des supports cartographiques, ainsi qu'un questionnaire destiné à alimenter de futures enquêtes qualitatives.

Au-delà des livrables techniques, cette mission s'inscrivait dans une logique exploratoire : tester des outils, affiner une méthode et préparer des pistes de réutilisation dans d'autres contextes hydrologiques similaires.

Déroulé de la mission

La section suivante retrace les principales étapes du stage, depuis la phase initiale de prise en main des outils jusqu'à la production finale des résultats. Elle présente la progression méthodique mise en œuvre, les ajustements opérés en réponse aux contraintes rencontrées, ainsi que les échanges structurants avec l'équipe encadrante.

Introduction

Le début du stage a été consacré à la construction progressive d'un socle méthodique, nécessaire pour aborder les traitements géospatiaux attendus par le projet. Cette phase d'appropriation a permis d'articuler compréhension théorique des enjeux de la télédétection et prise en main des outils logiciels.

Une revue de littérature ciblée m'a permis de consolider les fondements techniques de la mission : fonctionnement des capteurs optiques et radar, chaînes de traitement, et indicateurs hydrologiques. Cette démarche a également mis en lumière les limites fréquemment rencontrées, notamment les effets de la nébulosité et les incertitudes liées au seuillage. En parallèle, j'ai investi les environnements logiciels clés du stage. SNAP a constitué l'outil principal pour le traitement des images radar Sentinel-1, tandis que QGIS a été mobilisé pour l'analyse spatiale, la gestion des couches vectorielles et la production cartographique. La complémentarité entre ces deux logiciels a structuré ma méthode. Enfin, des formations internes, encadrées par mon tuteur, ont permis de relier les aspects techniques aux enjeux plus larges de reproductibilité, d'automatisation et de transférabilité des méthodes. Elles ont aussi facilité mon intégration dans l'équipe et amorcé un dialogue scientifique régulier. Cette phase préparatoire a ainsi posé les bases conceptuelles et pratiques indispensables au développement de la chaîne de traitement multi-temporelle mise en œuvre par la suite.

Traitement des données Sentinel-2

La méthode mise en place au cours du stage a évolué par étapes, en s'adaptant aux contraintes du terrain et aux propriétés des données disponibles. La première phase a consisté à tester les potentialités de l'imagerie optique.

Choix méthodique initial

Dans un premier temps, la mission a exploré les images optiques de Sentinel-2, choisies pour leur résolution spatiale fine et leur richesse spectrale. Cette phase s'inscrivait dans une démarche comparative visant à tester la pertinence de différentes sources d'imagerie pour la détection automatisée des réservoirs à ciel ouvert, dans un contexte tropical caractérisé par une forte variabilité climatique.

Acquisition et limites du prétraitement

La zone d'étude, centrée sur Pondichéry et ses environs, a été sélectionnée pour sa diversité hydrologique et sa représentativité des dynamiques rurales et périurbaines du sud de l'Inde. Les images ont été choisies selon un critère saisonnier, afin de capturer des états hydrologiques contrastés.

Le traitement des images a rapidement révélé plusieurs contraintes. La correction atmosphérique, indispensable pour exploiter les indices spectraux, s'est montrée instable, nécessitant des traitements locaux complexes. Le masquage des nuages, essentiel dans un climat humide, a souffert d'un manque de précision, notamment pour les nuages fins ou diffus. Enfin, les différences de résolution entre bandes ont exigé un rééchantillonnage systématique, complexifiant encore l'automatisation et augmentant les temps de calcul.

Premiers traitements et constats méthodiques

Une première série de tests a été menée à partir de l'indice NDWI, calculé sur quatre images représentatives. Cet indice est utilisé pour détecter les surfaces en eau. Le seuillage visuel a permis une détection partielle des zones en eau, mais les résultats se sont révélés instables et sensibles aux conditions atmosphériques. Cette phase exploratoire a confirmé les limites structurelles de l'imagerie optique dans ce contexte : forte sensibilité aux perturbations environnementales.

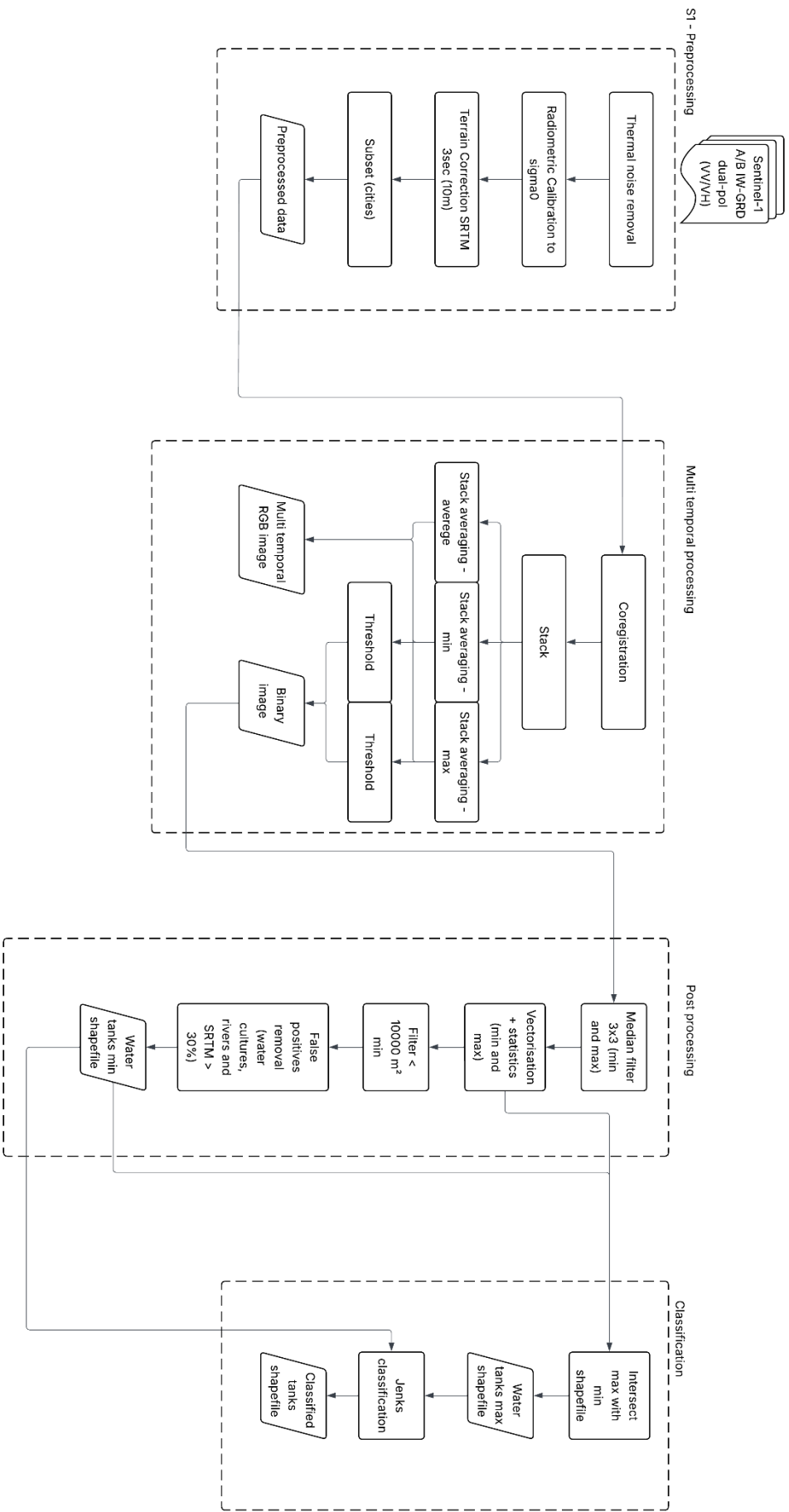
Tentatives d'automatisation et validation

Pour dépasser ces limites, une chaîne de traitement automatisée a été développée via un script Python couplé à SNAP, afin de structurer le processus de manière reproductible. En parallèle, une méthode de seuillage automatique (Otsu) a été testée en collaboration avec une autre stagiaire, dans l'objectif de définir un seuil objectif de détection à partir des histogrammes NDWI. Toutefois, les résultats sont restés instables sur les scènes hétérogènes.

Des jeux de référence manuels ont permis d'évaluer les performances des classifications via des indicateurs de concordance, dont l'indice de Kappa. Les résultats ont mis en évidence une sous-détection récurrente dans les zones végétalisées ou partiellement ombragées, confirmant les limites méthodiques de l'optique dans ce type d'environnement. Ces analyses ont orienté la suite du travail vers une approche fondée sur l'imagerie radar. Les étapes et scripts liés à cette phase exploratoire sont disponibles en détail dans le rapport de recherche en annexe.

Traitement des données Sentinel 1

La méthode développée repose sur une chaîne de traitement rigoureusement structurée, depuis le prétraitement des images jusqu'à la production d'indicateurs hydrologiques. Le logigramme ci-dessous (Figure 3) synthétise les étapes de traitement mises en œuvre pour analyser les données Sentinel-1. Pour un aperçu détaillé de la chaîne de traitement, ainsi que les paramètres techniques utilisés, se référer au rapport de recherche (annexe).



Analyse radar des réservoirs : méthode et justification

Face aux limites rencontrées avec les images optiques (instabilité spectrale, masques nuageux peu fiables, difficulté d'automatisation) la mission a évolué vers une approche fondée sur l'imagerie radar Sentinel-1. Ce basculement s'inscrit dans une logique d'adaptation méthodique, guidée par les contraintes climatiques locales et la nécessité d'assurer un suivi hydrologique robuste.

Contrairement aux capteurs optiques, les images radar à synthèse d'ouverture (SAR) sont insensibles à la couverture nuageuse et permettent des acquisitions indépendantes des conditions de lumière. Elles sont particulièrement adaptées à la détection des plans d'eau, grâce à leur sensibilité aux propriétés physiques des surfaces : les zones en eau renvoient peu de signal radar (faible rétrodiffusion), ce qui les rend facilement détectables sur les scènes.

Construction de la chaîne de traitement

L'analyse s'est appuyée sur une sélection multi-temporelle d'images Sentinel-1 couvrant l'année 2024, selon les principales phases hydrologiques (saison sèche, pré- et post-mousson). Le prétraitement a suivi une procédure standardisée dans SNAP, incluant calibration, correction géométrique et filtrage du speckle.

Une méthode de classification binaire eau/non-eau a ensuite été développée. Deux approches de seuillage ont été testées : une méthode empirique manuelle, fondée sur des histogrammes de scènes de référence, et la méthode automatique d'Otsu, plus rapide mais moins stable dans les cas complexes. Ces classifications ont permis de générer, pour chaque date, une carte binaire, combinée ensuite en série temporelle afin d'extraire les surfaces maximales et minimales par réservoir. Un indice de stabilité hydrologique a ainsi pu être calculé, traduisant la fréquence annuelle de présence en eau.

Validation et résultats

Les performances du traitement radar ont été évaluées à partir d'un jeu de référence issu de la phase optique, à l'aide d'indicateurs standards (indice de Kappa, matrices de confusion, taux d'omission/commission). Les résultats ont confirmé la meilleure stabilité temporelle des classifications radar, ainsi que leur moindre sensibilité aux perturbations liées à la végétation ou aux bords de réservoirs.

Cette approche radar s'est révélée plus adaptée aux conditions tropicales du Tamil Nadu, et offre une base fiable pour une analyse saisonnière des ressources en eau dans une perspective d'aide à la décision.

Présentations

Tout au long du stage, plusieurs temps de restitution ont permis d'inscrire mon travail dans une dynamique collective. Réunions internes, échanges informels et présentations intermédiaires ont favorisé un dialogue méthodique continu avec l'équipe du département de géomatique.

Une présentation à mi-parcours a permis de revenir sur les limites rencontrées avec les données optiques et d'ouvrir la discussion sur des solutions alternatives, notamment l'exploration des images radar. Les retours critiques de mon tuteur et des autres membres de l'équipe ont conduit à des ajustements méthodiques concrets : intégration de filtres de post-traitement, fusion de méthodes de seuillage, adaptation des seuils aux spécificités locales.

Ces échanges ont également donné lieu à un partage de ressources : scripts Python, outils d'automatisation, visualisations cartographiques et références bibliographiques. Ce travail collaboratif, formel ou informel, a contribué à renforcer la robustesse technique du protocole, tout en facilitant son ancrage dans les pratiques de l'équipe.

Au-delà des apports scientifiques, ces interactions ont constitué une expérience formatrice sur le plan humain, en me permettant d'évoluer dans un environnement où l'échange de savoirs et la révision critique occupent une place centrale.

Conclusion et perspective

En conclusion, cette mission m'a permis de concevoir et tester une méthode robuste de détection hydrologique à partir de données Sentinel-1. Malgré certaines limites techniques, les résultats obtenus sont exploitables et peuvent servir de base à de futurs travaux dans le cadre de PATAMIL. À terme, des perspectives telles que la fusion optique/radar, le recours à des méthodes de deep learning ou la consolidation des phases de validation ouvrent des pistes prometteuses pour améliorer la fiabilité et l'évolutivité de la méthode.

Réflexion critique sur l'expérience

Après avoir présenté les objectifs, la méthode et les résultats du stage, cette dernière partie propose une réflexion plus personnelle sur le déroulement de l'expérience. Elle revient sur les conditions d'accueil, les difficultés rencontrées, les compétences acquises, ainsi que l'évolution de ma posture professionnelle.

Accueil, conditions de travail et ressenti général

Accueil, cadre de travail et accompagnement

Dès mon arrivée à Pondichéry, j'ai bénéficié d'un accueil chaleureux et d'une intégration fluide, facilitée par le soutien logistique et humain des membres de l'Institut français de Pondichéry. La proximité géographique avec l'IFP et l'efficacité du réseau local m'ont permis de trouver rapidement un logement, simplifiant ainsi mon installation.

Au sein du département de géomatique, l'ambiance de travail s'est révélée particulièrement bienveillante. L'équipe a su instaurer un climat de confiance et de partage, dans lequel les nouveaux arrivants sont accompagnés tant sur les plans professionnels que culturels. Cette culture de l'accueil a fortement contribué à mon intégration et à ma motivation dès les premiers jours.

Tout au long du stage, j'ai bénéficié d'un accompagnement attentif de la part de mes référents, Samuel Corgne et Laura Verdelli. Leurs conseils méthodiques, leur disponibilité constante et leur capacité à ouvrir des perspectives critiques ont grandement enrichi ma démarche. Samuel a notamment su transmettre son enthousiasme pour la recherche en géomatique, ce qui a nourri ma curiosité de manière continue.

Conditions matérielles

Les premières semaines ont été marquées par des conditions de travail modestes, liées à un manque temporaire de place dans les bureaux. Nous avons d'abord été installés dans un espace commun peu ergonomique, avant d'intégrer un bureau plus calme et fonctionnel à partir du premier mois. Ce nouvel environnement a favorisé ma concentration et la qualité du travail. Nous avons ensuite changé une dernière fois de bureau pour cause de travaux. Nous nous sommes installés dans un bureau du département des sciences humaines. Leur aide a été sollicitée quelques fois et a toujours été pertinente.

Sur le plan technique, le matériel mis à disposition était globalement satisfaisant, bien que limité pour les traitements lourds liés aux données radar. Un écran secondaire a facilité la manipulation cartographique, mais mon ordinateur personnel a souvent freiné l'avancement du traitement. Malgré quelques coupures d'Internet, l'ensemble des ressources est resté accessible dans de bonnes conditions. L'électricité et la climatisation étaient généralement stables, ce qui a permis de travailler efficacement malgré les fortes chaleurs.

L'organisation du travail à l'IFP repose sur une grande autonomie. La flexibilité des horaires m'a permis d'adapter mes journées aux phases de traitement et aux besoins du projet, tout en respectant les échéances. Les échanges avec mon tuteur, souvent informels mais toujours pertinents, ont rythmé la progression du stage et permis une validation régulière des orientations méthodiques.

Adaptation personnelle

L'adaptation à la vie quotidienne à Pondichéry s'est faite de manière fluide. La ville offre un cadre de vie agréable, propice à l'exploration culturelle et personnelle. Les possibilités de déplacement le week-end, la proximité du lieu de stage et l'ambiance détendue ont facilité une immersion rapide.

Au-delà de l'aspect professionnel, cette expérience a été marquante sur le plan humain. L'exposition à des réalités sociales différentes m'a conduit à ajuster mes référentiels et à développer une posture plus attentive aux contextes locaux. Cette évolution dans ma compréhension des enjeux humains constitue un apport complémentaire aux compétences techniques développées.

Bilan global

Mon ressenti est extrêmement positif. Le stage s'est déroulé dans un environnement de travail dynamique, propice au développement de compétences techniques et relationnelles. Il a renforcé mon autonomie, ma capacité d'adaptation et mon goût pour la recherche appliquée. L'IFP s'est révélé être un espace de formation à la fois technique et personnelle, dans lequel j'ai pu progresser en compétence, affiner ma posture professionnelle et vivre une expérience humaine forte.

Cette mission a représenté une étape importante de mon parcours, en lien avec mes intérêts professionnels.

Retour sur la démarche de travail et les méthodes mobilisées

La démarche méthodique mise en œuvre au cours du stage s'est construite de manière progressive, dans un contexte marqué par plusieurs incertitudes : absence de protocole établi, complexité des données satellitaires, et nécessité d'adapter les outils aux réalités locales. Plutôt que de suivre une procédure existante, j'ai opté pour une approche empirique fondée sur l'expérimentation, l'analyse critique des résultats et la formalisation progressive d'un protocole adapté.

Le basculement des images optiques vers les données radar a constitué un tournant structurant. Ce choix, dicté par les contraintes climatiques et les limites de fiabilité observées sur Sentinel-2, a marqué le passage d'une logique exploratoire à une logique de stabilisation méthodique. L'ensemble des étapes, depuis le prétraitement jusqu'à la classification, a été documenté rigoureusement : logigrammes, scripts Python, paramètres de seuillage et procédures de traitement ont été archivés dans une optique de traçabilité et de transférabilité.

La validation des classifications s'est appuyée sur une méthode supervisée, utilisant des jeux de référence créés manuellement dans QGIS. L'évaluation des performances, via l'indice de Kappa et les matrices de confusion, a permis de qualifier les marges d'erreur et d'identifier les situations où le protocole devait être ajusté (zones végétalisées, bords irréguliers, scènes bruitées).

Ces choix méthodiques ont été discutés en profondeur lors de présentations intermédiaires, qui ont constitué des moments très précieux de retour critique. Les retours de l'équipe, et notamment de chercheurs expérimentés, ont souligné la cohérence de la méthode développée, sa robustesse technique et son potentiel de réutilisation. Il m'a ainsi été recommandé de détailler avec précision le protocole dans le rapport, pour permettre au département de s'en saisir dans le cadre d'autres projets. En définitive, cette démarche ne s'est pas limitée à l'application de techniques connues, mais à la construction progressive d'une méthode adaptée à un territoire, à des données et à des objectifs spécifiques. Ce processus d'ajustement, de validation croisée et de formalisation a constitué l'un des apports les plus formateurs du stage.

Analyse critique des résultats obtenus

Les résultats produits au cours du stage ont permis d'atteindre les objectifs initiaux, tout en soulevant plusieurs niveaux d'interprétation critique, tant sur le plan technique que spatial. Les classifications issues des images radar Sentinel-1 ont abouti à des cartes cohérentes, révélant des dynamiques saisonnières nettes dans les réservoirs du Tamil Nadu. L'indice de stabilité hydrologique calculé sur l'année a permis de construire une typologie fonctionnelle, distinguant les réservoirs stables des réservoirs saisonniers. À partir de l'indice de stabilité calculé sur l'année 2024, une typologie des réservoirs a été établie. La carte suivante (Figure 4) illustre cette classification spatiale, en distinguant

les réservoirs pérennes, partiellement saisonniers ou totalement asséchés. Le protocole de construction de la typologie figure dans le rapport de recherche en annexe.

Réservoirs à ciel ouvert autour de Pondichéry

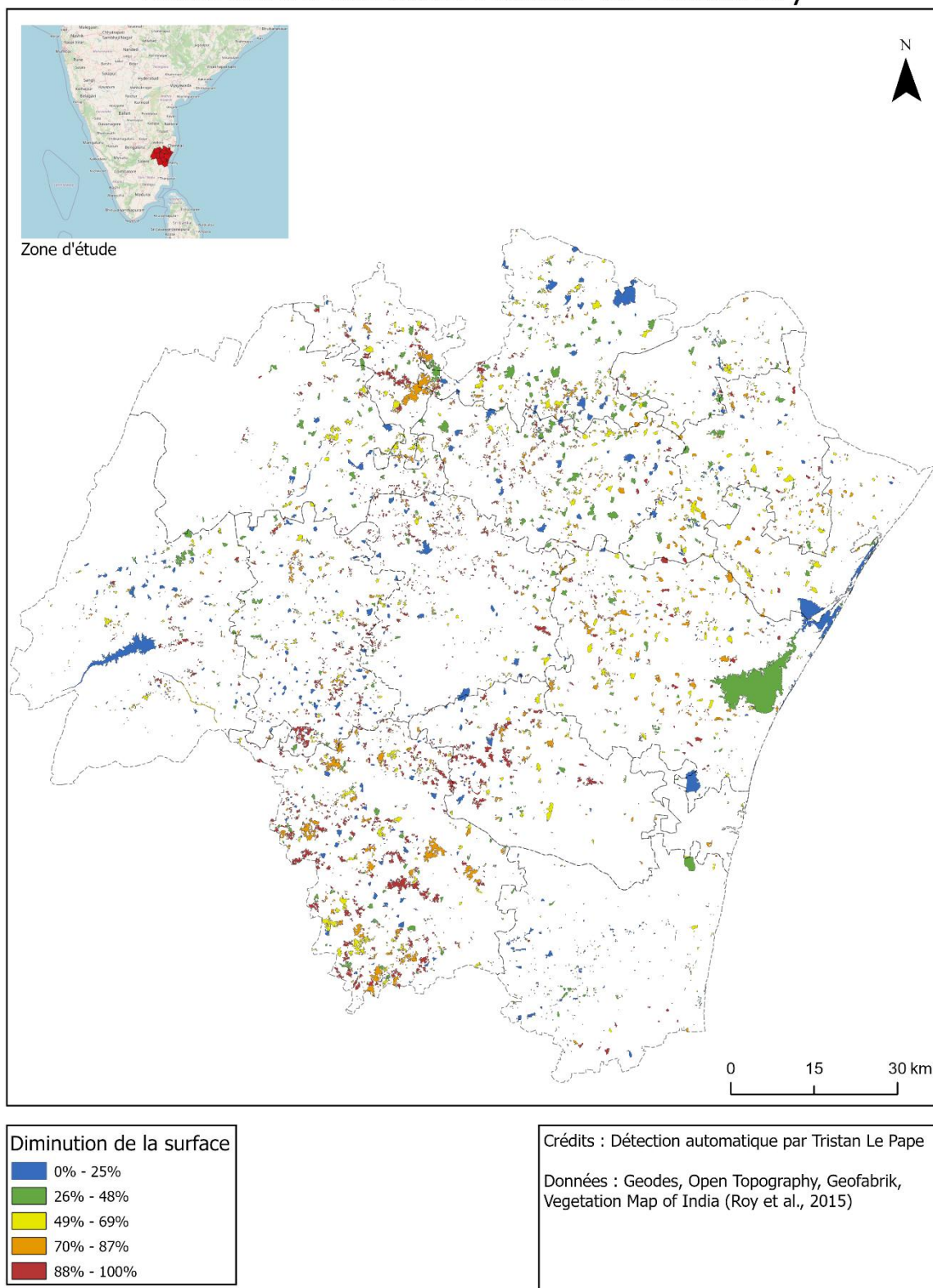


Figure 4 : Carte de typologie des réservoirs selon leur stabilité hydrologique

Cependant, ces résultats doivent être replacés dans le cadre de certaines limites. Les seuils de classification – qu'ils soient calculés automatiquement (Otsu) ou définis de manière empirique – se révèlent sensibles à des éléments locaux perturbateurs : bruit résiduel, végétation flottante, ombrages partiels ou constructions riveraines peuvent altérer la lecture du signal radar, en particulier dans les zones de transition ou sur les petits réservoirs peu profonds. De plus, la résolution spatiale des images (10 m) reste adaptée à une approche régionale, mais limite la précision de détection pour les petites structures hydrauliques comme les canaux ou les réservoirs fragmentés. La géométrie des objets détectés est parfois approximative, ce qui réduit la pertinence des cartes pour des usages à très fine échelle ou pour des interventions localisées.

La validation par cartes de référence manuelles et indicateurs statistiques (matrices de confusion, indice de Kappa) a permis d'estimer les performances du protocole. Néanmoins, cette validation reste partielle, faute de données de terrain ou d'images à très haute résolution. Les cartes de référence elles-mêmes impliquent une part d'interprétation, ce qui introduit une incertitude résiduelle dans l'évaluation des erreurs.

Malgré ces limites, les résultats présentent une utilité opérationnelle réelle. En complément de la typologie individuelle, une carte interpolée de stabilité hydrologique a été produite afin d'identifier des tendances régionales et de guider des interventions ciblées. La Figure 5 propose une lecture synthétique de ces gradients de stabilité.

Indice de stabilité des réservoirs autour de Pondichéry

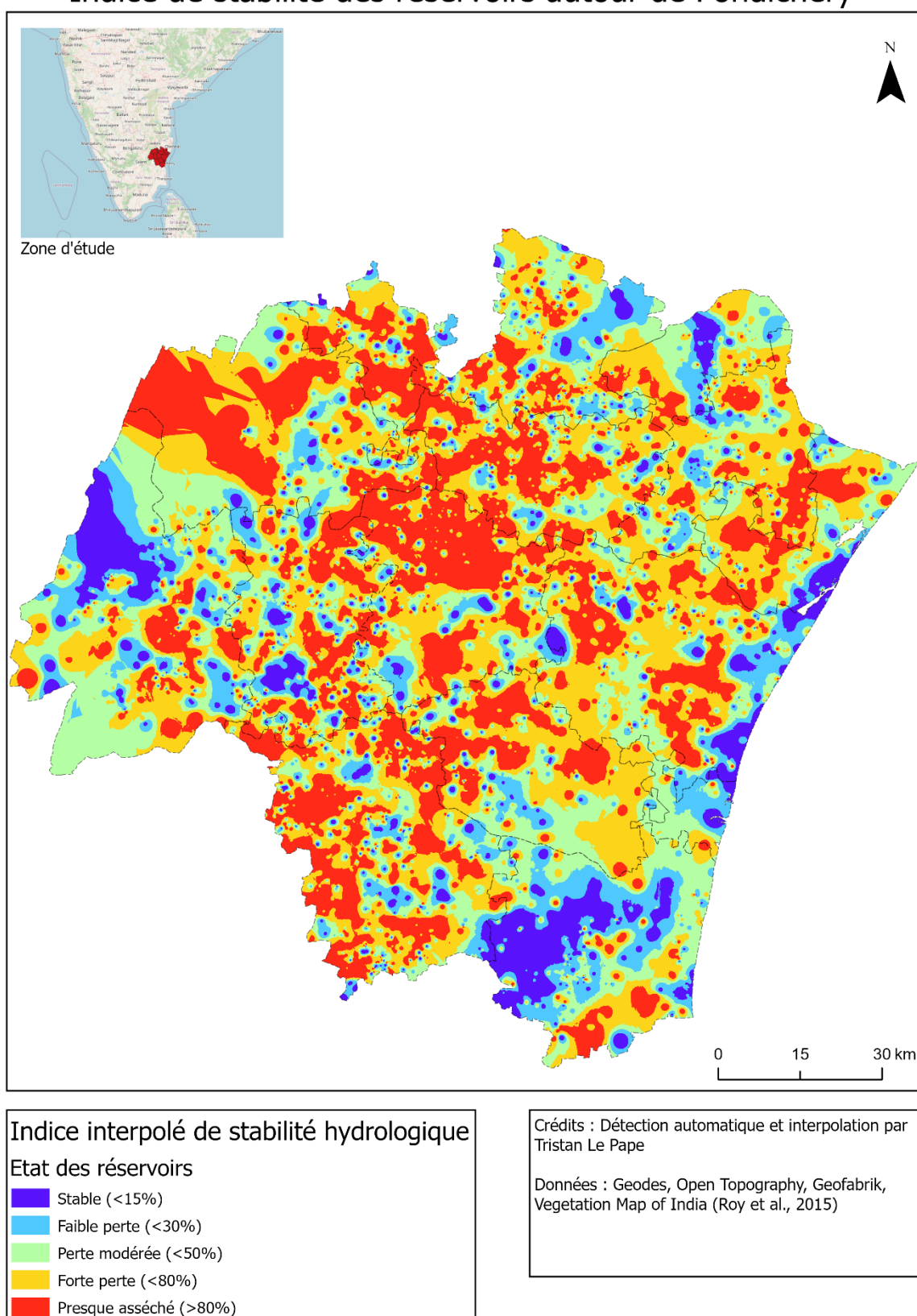


Figure 5 : Carte interpolée de stabilité hydrologique des réservoirs

Intégrées au projet PATAMIL, ces cartes offrent un appui concret à la gestion locale de l'eau et à la planification agroécologique.

Enfin, au-delà des livrables cartographiques, l'un des apports majeurs du stage réside dans la méthode développée. Conçue pour être théoriquement reproductible, transférable et évolutive, elle constitue une base solide pour d'autres projets de recherche ou d'expertise, à condition d'être adaptée au contexte d'application.

Ces résultats confirment la faisabilité d'un suivi saisonnier basé sur l'imagerie radar, avec une précision relativement satisfaisante dans le contexte d'une partie du Tamil Nadu.

Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre

Comme dans tout travail de recherche appliquée mobilisant des outils numériques complexes, la mission a été confrontée à plusieurs difficultés techniques, méthodiques et organisationnelles. Loin d'être des freins bloquants, ces obstacles ont constitué des occasions d'apprentissage décisives.

La première limite a été matérielle : l'ordinateur mis à disposition ne disposait pas de la puissance de calcul suffisante pour assurer un traitement fluide des images radar, notamment lors du prétraitement sous SNAP ou de la génération d'agrégats multi-temporels. Pour contourner cette contrainte, j'ai fragmenté les traitements par lot, optimisé mes scripts Python, et adapté les paramètres de traitement aux capacités disponibles.

Dès la phase initiale sur Sentinel-2, des difficultés sont également apparues : l'outil Sen2Cor, utilisé pour la correction atmosphérique, était instable en ligne, et son installation locale a nécessité plusieurs ajustements. Par ailleurs, les masques nuageux générés automatiquement se sont révélés imprécis, remettant en question la fiabilité des classifications NDWI. Ces échecs répétés ont conduit à un repositionnement méthodique majeur vers les images radar de Sentinel-1.

Ce changement d'approche n'a toutefois pas supprimé toutes les difficultés. L'interprétation des valeurs de rétrodiffusion radar, sensibles à la nature des surfaces et aux conditions d'acquisition, a exigé un temps d'apprentissage important. Les méthodes de seuillage testées (Otsu, K-means) ont parfois produit des résultats instables, en particulier sur des scènes hétérogènes. Pour renforcer la robustesse des classifications, j'ai croisé différentes approches et confronté systématiquement les résultats à des cartes de référence manuelles.

À ces défis techniques se sont ajoutées des contraintes organisationnelles. Le manque d'espace de travail en début de stage, avec une installation temporaire dans un espace peu adapté, a affecté la concentration et le confort de travail. Cette situation m'a poussé à m'adapter rapidement, en développant une meilleure tolérance aux imprévus matériels et en affinant ma capacité à maintenir la qualité du travail dans des conditions sous-optimales.

Plusieurs leviers ont permis de dépasser ces obstacles : le soutien régulier de mes encadrants, les échanges techniques avec d'autres membres de l'équipe, et la mobilisation de ressources externes (forums, documentation, articles spécialisés). Ces ajustements progressifs m'ont permis de structurer une démarche plus souple, plus rigoureuse, et plus résiliente. J'en retire une meilleure maîtrise des outils, mais aussi une posture professionnelle plus ancrée dans la réalité des projets de terrain, où l'adaptation continue fait partie intégrante du processus scientifique.

Compétences développées

Le stage réalisé à l'Institut français de Pondichéry m'a permis de développer un ensemble de compétences diversifiées, allant au-delà de la seule maîtrise d'outils techniques. Il a constitué une expérience d'autonomisation, dans un contexte interculturel exigeant, mais stimulant.

Compétences techniques

Sur le plan technique, j'ai consolidé ma maîtrise des principaux outils de traitement de données géospatiales. J'ai approfondi l'usage de SNAP, en configurant des chaînes de traitement radar complètes (calibration, filtrage, correction géométrique, classification), et développé des automatismes dans l'analyse multi-temporelle. Parallèlement, j'ai renforcé mes compétences sur QGIS, en automatisant des traitements vectoriels et en produisant des visualisations cartographiques lisibles, adaptées aux objectifs du projet.

En programmation Python, j'ai perfectionné ma capacité à manipuler des matrices de données, à structurer des scripts reproductibles, et à mobiliser des bibliothèques spécialisées (GDAL, NumPy, Matplotlib). Cette double compétence raster / vecteur m'a permis de construire un protocole robuste, alliant précision algorithmique et lisibilité cartographique.

Méthode scientifique

Au-delà des outils, j'ai acquis une méthode de travail rigoureuse, structurée autour de la reproductibilité, de la validation et de la documentation. Chaque étape du traitement a été soigneusement consignée, testée, puis ajustée, afin d'assurer la transparence du protocole et sa possible réutilisation. Ce souci de traçabilité m'a sensibilisé à l'exigence formelle des projets scientifiques et à l'importance de rendre son travail compréhensible et vérifiable par d'autres.

J'ai appris à mobiliser des ressources variées (littérature scientifique, forums spécialisés, scripts partagés) pour affiner mes choix méthodiques et répondre à des contraintes techniques parfois complexes.

Compétences transversales

Ce stage a également renforcé mes aptitudes organisationnelles : travail en autonomie, gestion du temps, planification sans cadre rigide, prise de décision argumentée. J'ai appris à formuler clairement des résultats complexes, à travers des présentations orales, des supports visuels ou des rapports structurés. Les retours réguliers de collègues expérimentés m'ont permis d'adopter une posture réflexive sur ma propre pratique, et d'ajuster mes méthodes en conséquence.

Évolution personnelle

Enfin, cette expérience m'a confronté à un cadre interculturel riche, dans lequel j'ai dû adapter mes modes de communication et de collaboration. Cette immersion m'a amené à adapter mes méthodes d'analyse et de communication à un contexte culturel différent, en prenant le temps d'observer et de comprendre avant de proposer des actions. Cette capacité d'adaptation relationnelle et intellectuelle constitue aujourd'hui, à mes yeux, un atout précieux pour évoluer dans des environnements de travail pluriels, en France comme à l'international.

Perspectives de poursuite et réutilisation du travail

Les méthodes et résultats obtenus ne marquent pas une finalité, mais posent les bases d'une méthode évolutive, pensée pour être enrichie et adaptée à divers contextes. Un soin particulier a été porté à la reproductibilité du protocole : structuration des scripts, documentation détaillée, archivage rigoureux des données. Cette rigueur a pour objectif de faciliter la réutilisation du travail, tant au sein du département de géomatique que par les partenaires du projet PATAMIL, dans des contextes spatiaux, temporels ou analytiques variés.

Valorisation à court terme

À court terme, la méthode développée pourrait contribuer à la mise à jour des inventaires existants des réservoirs, en facilitant l'identification de plans d'eau oubliés ou en déclin. Les cartes de stabilité hydrologique produites peuvent également servir de base pour planifier des vérifications de terrain, des enquêtes qualitatives ou des relevés techniques. Une évolution possible consisterait à intégrer des données complémentaires (cultures en aval, infrastructures, usages agricoles) afin d'approfondir l'analyse dans une optique de diagnostic territorial.

Pistes d'évolution à moyen terme

À moyen terme, plusieurs pistes d'amélioration technique peuvent être envisagées. La fusion des données optiques et radar permettrait de combiner la richesse spectrale et la robustesse temporelle des deux capteurs. Par ailleurs, l'intégration de méthodes d'apprentissage automatique (deep learning) pourrait automatiser la classification sur de longues séries temporelles et détecter des motifs hydrologiques récurrents. Bien qu'elles nécessitent des bases d'apprentissage, ces approches offrent des perspectives intéressantes d'automatisation et d'amélioration de la précision.

Intégration au projet PATAMIL et prolongements personnels

Le travail réalisé peut aussi nourrir les réflexions stratégiques du projet PATAMIL, notamment sur la résilience des systèmes agroalimentaires locaux. En croisant les données hydrologiques avec les pratiques agricoles, il devient possible d'éclairer les liens entre accès à l'eau et stratégies de subsistance. Dans ce cadre, mon travail pourrait servir de socle technique pour la mise en place d'outils de diagnostic ou d'aide à la décision, en lien avec les partenaires locaux.

Enfin, sur le plan personnel, ce stage a ouvert un champ de réflexion que je souhaite approfondir. Le lien entre télédétection, dynamiques rurales et politiques territoriales est un domaine riche, à la croisée de plusieurs disciplines. J'envisage d'orienter mon prochain stage dans ce domaine l'année prochaine.

Projection professionnelle et orientation personnelle

Cette expérience de stage a joué un rôle dans l'évolution de ma réflexion, tant académique que professionnelle. Elle m'a permis de consolider certains intérêts, d'en découvrir de nouveaux, mais aussi de reconsidérer mes priorités en me confrontant à des problématiques concrètes, dans un contexte scientifique et interculturel exigeant.

Apports académiques et disciplinaires

Sur le plan académique, le stage a confirmé mon intérêt pour la géomatique et, plus largement, pour l'analyse de données spatiales appliquée aux enjeux territoriaux et environnementaux. J'ai découvert avec enthousiasme le potentiel analytique des outils de télédétection, ainsi que le plaisir intellectuel que procure la construction progressive d'une méthode rigoureuse. Cette expérience m'a permis de constater que, lorsqu'elle est bien structurée, la recherche appliquée combine rigueur méthodique et utilité concrète.

Au contact du projet PATAMIL, j'ai également pris conscience de l'importance de relier les données à leur ancrage territorial. Cette dimension m'a sensibilisé à la nécessité de faire dialoguer outils techniques et réalités sociales, notamment dans des contextes de transition environnementale. Elle a renforcé mon intérêt pour les approches combinant géomatique et sciences sociales, ainsi que pour les méthodes intégrées articulant analyse spatiale et enjeux territoriaux.

Évolution de la posture et ouverture interculturelle

Au-delà des apprentissages techniques, cette immersion m'a fait évoluer dans ma posture professionnelle. Travailler au sein d'une institution française implantée en Inde m'a confronté à d'autres logiques de pensée, à des codes culturels différents, mais aussi à des inégalités visibles au quotidien. Ces décalages m'ont appris à écouter, à observer avant d'agir, à remettre en question mes propres repères. Cette expérience a renforcé ma capacité d'adaptation, ma sensibilité aux contextes locaux, et mon attention aux dimensions éthiques et sociales du travail scientifique.

Perspective et projection

À l'issue de ce stage, je me sens mieux préparé pour construire mon projet professionnel. J'aspire à un métier qui combine rigueur scientifique, utilité sociale, travail collectif et autonomie. Ce stage m'a montré l'intérêt de travailler dans un cadre collaboratif favorisant l'expérimentation et l'apprentissage continu. Elle a également ouvert des pistes que je souhaite approfondir : la mise en relation entre données spatiales et dynamiques rurales, la recherche interdisciplinaire appliquée, et le développement d'outils d'aide à la décision ancrés dans les réalités de terrain.

En somme, ce stage n'a pas seulement représenté une étape académique, mais une expérience intellectuelle et personnelle. Il m'a permis de mieux cerner mes compétences, mes aspirations, ainsi que les valeurs que je souhaite porter dans ma future orientation professionnelle.

Conclusion générale

Le stage réalisé à l'Institut français de Pondichéry, dans le cadre du projet PATAMIL, m'a permis de développer une méthode rigoureuse et reproductible de détection des réservoirs à ciel ouvert, fondée sur l'analyse multi-temporelle d'images Sentinel-1. Cette approche, construite progressivement face aux contraintes techniques et climatiques du terrain, a conduit à la production d'un protocole complet : traitement radar, classification binaire, extraction d'indicateurs hydrologiques et cartographie typologique.

Au-delà des résultats techniques, cette mission a renforcé ma capacité à adapter des outils complexes à un contexte local, en tenant compte à la fois des réalités environnementales et institutionnelles. L'ensemble du travail s'inscrit ainsi dans une démarche de recherche appliquée, ancrée dans un territoire précis, mais pensée dès le départ comme transférable et évolutive. Il constitue une base méthodique solide, suffisamment formalisée pour être réutilisée dans d'autres contextes confrontés à des problématiques similaires.

Par ailleurs, les données produites (cartes, scripts, indicateurs) seront prochainement mises à disposition des chercheurs de l'IFP sur leur plateforme en ligne, afin d'encourager leur réutilisation et leur enrichissement. Ce rapport pourra ainsi servir de socle à d'autres travaux plus approfondis, menés par des chercheurs ou étudiants disposant de davantage de temps pour explorer en détail certaines dimensions, qu'elles soient techniques (apprentissage automatique, fusion optique/radar), territoriales (enjeux sociaux, politiques publiques) ou participatives (intégration d'enquêtes de terrain).

Sur le plan personnel, cette expérience m'a permis d'évoluer dans un environnement interculturel stimulant, où j'ai pu expérimenter une posture professionnelle fondée sur la rigueur, l'autonomie et la collaboration. Elle a également consolidé mon intérêt pour les approches intégrant analyse spatiale, enjeux territoriaux et co-construction des savoirs.

En définitive, ce stage constitue une étape structurante de mon parcours. Il m'a permis d'articuler mes compétences techniques à une problématique concrète, tout en ouvrant la voie à de futures explorations, tant académiques que professionnelles, dans le champ de la géomatique appliquée au développement territorial.

Le présent rapport restitue les éléments pédagogiques et réflexifs du stage, tandis que le rapport de recherche (annexe) développe de manière exhaustive la méthode, les scripts utilisés, ainsi que les cartes et figures produites dans le cadre du projet PATAMIL

Table des matières

Sommaire	1
Présentation de la structure d'accueil	2
Nom et statut juridique	2
Secteurs d'activité et missions principales	2
Localisation géographique.....	2
Taille et organisation interne	2
Organisation hiérarchique et direction.....	2
Historique	4
Public visé et partenariats institutionnels	4
Présentation de la mission	5
Contexte général et justification de la mission.....	5
Objectifs de la mission.....	6
Positionnement de la mission dans l'équipe	7
Cahier des charges et livrables attendus	7
Déroulé de la mission	7
Introduction.....	8
Traitement des données Sentinel-2.....	8
Choix méthodique initial	8
Acquisition et limites du prétraitement	8
Premiers traitements et constats méthodiques	8
Tentatives d'automatisation et validation	9
Traitement des données Sentinel 1	9
Analyse radar des réservoirs : méthode et justification	11
Construction de la chaîne de traitement.....	11
Validation et résultats.....	11
Présentations.....	11
Conclusion et perspective	12
Réflexion critique sur l'expérience	12
Accueil, conditions de travail et ressenti général.....	12
Retour sur la démarche de travail et les méthodes mobilisées	13
Analyse critique des résultats obtenus.....	13
Difficultés rencontrées et solutions mises en œuvre	17
Compétences développées	17

Perspectives de poursuite et réutilisation du travail	18
Projection professionnelle et orientation personnelle.....	19
Conclusion générale	20
Table des illustrations	22
Annexe	22
Rapport de recherche demandé par Patamil	22

Table des illustrations

Figure 1 : Organigramme simplifié de l'IFP.....	3
Figure 2 : Carte représentant la zone d'étude.....	6
Figure 3 : Logigramme de la chaîne de traitement Sentinel 1.....	11
Figure 4 : Carte de typologie des réservoirs selon leur stabilité hydrologique	14
Figure 5 : Carte interpolée de stabilité hydrologique des réservoirs	16

Annexe

Rapport de recherche demandé par Patamil

Le document ci-dessous constitue le rapport de recherche complet réalisé en parallèle du présent rapport de stage. Il contient l'ensemble des éléments techniques détaillés, les représentations graphiques, cartes, scripts et figures mentionnés dans le corps du texte.

Analyse géospatiale des réservoirs à ciel ouverts existants et évaluation des besoins en eau



Abstract

Open reservoirs play a central role in water resource management in South India, particularly in the state of Tamil Nadu. However, their documentation remains incomplete, and their monitoring—especially in rural and peri-urban areas—is challenging due to strong seasonal variability, spatial fragmentation, and limited institutional recognition. This study proposes a method for detecting and characterizing reservoirs based on multi-temporal analysis of Sentinel-1 radar imagery, using a SAR dual-polarization configuration (VV/VH). The developed approach relies on a reproducible processing chain combining SNAP, Python, QGIS, and ArcGIS Pro, and incorporates empirically defined thresholds derived from backscatter histograms. The results enable detailed mapping of intra-annual water surface dynamics and identification of reservoirs experiencing significant water loss, which may indicate vulnerability or underuse. In addition, a spatialized typology was constructed by cross-referencing hydrological indicators with criteria drawn from literature on social uses and territorial recognition. The full methodological workflow, summarized in a flowchart, is designed to be transferable to other semi-urban or agricultural contexts with strong seasonality. This approach contributes to improving diagnostic tools and decision-making support for differentiated management of reservoirs, by integrating satellite data with territorial knowledge.

Résumé

Les réservoirs à ciel ouvert jouent un rôle central dans la gestion des ressources en eau en Inde du Sud, notamment dans l'État du Tamil Nadu. Toutefois, leur recensement reste incomplet et leur suivi, particulièrement en milieu rural et périurbain, demeure difficile en raison de leur grande variabilité saisonnière, de leur fragmentation spatiale et de leur faible reconnaissance institutionnelle. Cette étude propose une méthode de détection et de caractérisation des réservoirs fondée sur l'analyse multi-temporelle d'images radar Sentinel-1, en configuration SAR à double polarisation (VV/VH). L'approche développée repose sur une chaîne de traitement reproductible associant SNAP, Python, QGIS et ArcGIS Pro, intégrant des seuils empiriques définis à partir d'histogrammes de rétrodiffusion. Les résultats permettent de cartographier finement la dynamique intra-annuelle des plans d'eau et d'identifier les réservoirs à forte perte de surface, susceptibles d'être vulnérables ou sous-valorisés. En complément, une typologie spatialisée a été construite en croisant les indicateurs hydrologiques avec des critères issus de la littérature sur les usages sociaux et les logiques de reconnaissance territoriale. L'ensemble du dispositif méthodologique, représenté sous forme de logigramme, est conçu pour être reproductible dans d'autres contextes semi-urbains ou agricoles à forte saisonnalité. Cette approche contribue à renforcer les outils de diagnostic et d'aide à la décision pour la gestion différenciée des réservoirs, en articulant données satellitaires et connaissances territoriales.

Sommaire

Résumé (1-2)
Introduction (3)
Etat de l'art (3-8)
Méthode (8-18)
Résultats (18-25)
Limites et perspectives (25-26)
Conclusion (26-27)
Annexe (32-43)

Introduction

La gestion durable des ressources en eau constitue un enjeu crucial dans les régions tropicales et subtropicales, particulièrement en Inde du Sud, où les réservoirs à ciel ouvert (*tanks*) jouent un rôle hydrologique, agricole et socio-économique majeur. Dans l'État du Tamil Nadu, ces infrastructures traditionnelles, conçues pour capter les eaux de pluie, sont essentielles au stockage et à la distribution de l'eau en milieu rural. Leur diversité spatiale et fonctionnelle reflète des dynamiques naturelles, anthropiques et institutionnelles complexes (Vaidyanathan, 2001 ; Mosse, 2003).

Cependant, le manque d'inventaires actualisés rend difficile le suivi de ces structures à l'échelle régionale. L'ouverture croissante des données d'observation de la Terre, encouragée par des initiatives scientifiques, a facilité l'essor de la surveillance environnementale (Wulder & Coops, 2014). Les données satellitaires, et en particulier les images radar Sentinel-1, apportent une réponse à cette lacune en permettant la détection des plans d'eau, même sous couverture nuageuse. Grâce à des indices comme le SDWI et à des traitements automatisés sur Google Earth Engine, il est désormais possible de cartographier les variations de surface liées aux saisons ou aux usages agricoles, dans une approche reproductible et transférable (Sun et al., 2020 ; Tian et al., 2022).

Pour autant, l'application de ces méthodes au Tamil Nadu exige une adaptation aux spécificités locales : les *tanks* y sont souvent de faible profondeur, fragmentés et soumis à des usages multiples. Une lecture strictement technique ne suffit donc pas. Les dynamiques sociales, les perceptions locales et les trajectoires d'abandon ou de réhabilitation conditionnent fortement leur fonctionnement (Mosse, 2003 ; Roume, 2021).

Cette étude propose une approche intégrée, centrée sur l'analyse spatio-temporelle par télédétection et le développement d'une méthode reproductible d'inventaire des réservoirs. Bien que le lien entre ces structures hydrauliques et les dynamiques sociales soit essentiel, il n'a pu être exploré en profondeur dans ce travail. Il constitue toutefois une piste importante pour de futurs approfondissements.

Etat de l'art

Cette partie présente un état des connaissances actuelles sur ces réservoirs, en insistant à la fois sur leur rôle passé et présent, les dynamiques sociales qui les entourent, et les outils mobilisés pour leur observation, notamment via la télédétection.

Les réservoirs

La forme des réservoirs, leur fonctionnement et leur ancrage dans les pratiques locales méritent une attention particulière. Pour bien les comprendre, il est nécessaire de retracer leur origine, leur développement et leur intégration dans les systèmes agricoles et sociaux.

Histoire des réservoirs

Les réservoirs à ciel ouvert du sud de l'Inde, désignés localement par les termes *eri* (en tamoul) ou *tanks* (en anglais), sont des aménagements hydrauliques multi-séculaires, étroitement liés aux sociétés rurales et agraires. Leur origine remonte à plusieurs siècles avant notre ère, mais leur expansion structurée s'est accélérée à partir du IX^e siècle sous les dynasties Chola, Pandya et Nayak, qui mirent en place des systèmes hydrauliques en cascade (*cascade systems*) pour maximiser la collecte et la redistribution de l'eau pluviale le long des lignes de drainage (Vaidyanathan, 2001 ; Mosse, 2003 ; Ludden, 1985 ; Stein, 1980).

Les savoir-faire constructifs étaient adaptés aux conditions locales et souvent intégrés au relief naturel, ce qui favorisait la durabilité des ouvrages (Shah, 2003). Ces réservoirs n'étaient pas de simples

infrastructures techniques : ils étaient indissociables de la gouvernance communautaire locale, notamment à travers le système du *kudimaramath*, qui reposait sur l'entretien coopératif par les usagers eux-mêmes, souvent coordonnés par les institutions de village ou des castes spécialisées (Agrawal, 2001 ; Cullet, 2012 ; Mosse, 2003). Ce modèle de gestion décentralisée assurait une relative efficacité et résilience aux systèmes hydrauliques, comme l'ont démontré plusieurs études rétrospectives (Chopra & Gulati, 2001 ; Sengupta, 1993).

Définition et fonctionnement des réservoirs

Un réservoir à ciel ouvert correspond à une dépression aménagée pour recueillir les eaux de ruissellement, essentiellement issues des précipitations. La structure typique comprend un bassin de stockage, une digue en terre battue, un déversoir et un système de drainage aval (Balooni & Singh, 2007 ; Kumar & Singh, 2001). Dans le contexte indien, ces réservoirs présentent des caractéristiques communes : faible profondeur (1 à 3 m), forme irrégulière, grande diversité de superficies (moins d'un hectare à plusieurs dizaines), et forte sensibilité à l'évaporation et à l'ensablement (IWMI, 2007 ; Palanisami et al., 2010).

Leur fonctionnement repose sur le remplissage pendant les saisons de mousson, principalement entre octobre et décembre dans le Tamil Nadu, suivi d'une restitution lente durant la saison sèche. En plus de l'irrigation, ils remplissent des fonctions écologiques essentielles : recharge des aquifères, soutien aux zones humides, régulation thermique et maintien de la biodiversité (Venot et al., 2017 ; Shah & Raju, 2004 ; Kumar et al., 2020). Leur efficacité dépend néanmoins de la connectivité hydraulique, du respect des règles d'usage et de l'entretien régulier – sans quoi leur dégradation est rapide (Batchelor et al., 2003 ; Rajasekaran, 2015).

Usages sociaux, saisonnalité et reconnaissance des réservoirs

Les réservoirs à ciel ouvert occupent une place centrale dans le tissu social et culturel des campagnes indiennes. Lorsqu'ils sont remplis, ils remplissent une pluralité de fonctions : au-delà de leur rôle hydraulique (irrigation, eau domestique), ils deviennent des lieux d'usage collectif, de sociabilité quotidienne, de pratiques religieuses ou encore d'activités économiques comme la pêche artisanale (Mosse, 2003 ; Palanisami et al., 2009 ; Guezal, 2017). Certains *tanks* sont associés à des divinités locales ou à des événements du calendrier agraire, renforçant leur statut symbolique dans le paysage (Bakker, 2001). De nombreux travaux soulignent ainsi que les réservoirs à ciel ouvert ne peuvent être réduits à leur seule fonction hydrologique. Ils s'inscrivent dans des territoires, des mémoires et des rapports sociaux qui déterminent en grande partie leur fonctionnement, leur reconnaissance et leur entretien. Ces dimensions sociales, bien que largement documentées dans la littérature, restent souvent absentes des approches purement techniques. Leur intégration dans les outils d'analyse spatiale apparaît comme un enjeu central pour développer des politiques de gestion adaptées et équitables.

Cependant, ces usages évoluent fortement selon la saison. Lorsqu'ils s'assèchent, notamment pendant les mois les plus chauds, les réservoirs perdent leur lisibilité hydraulique. Ils sont parfois perçus comme des espaces vacants, ce qui les expose à des occupations alternatives : pâturages, terrains vagues, dépotoirs, voire constructions informelles (Roume, 2021). Cette discontinuité physique entraîne ce que certains auteurs qualifient de *perte de mémoire hydraulique* (Roume, 2021 ; Reddy, 2002), un oubli collectif de leur vocation initiale. Ce phénomène fragilise les mécanismes locaux d'entretien et de gouvernance, déjà affaiblis par la modernisation agricole et l'expansion des forages privés (Reddy, 2002 ; Narain, 2014 ; Richard-Ferroudji et al., 2023).

La saisonnalité affecte aussi les conditions de vie de manière différenciée. Les populations les plus vulnérables – en particulier les femmes, souvent responsables de l'approvisionnement en eau – doivent parcourir de plus longues distances en période de sécheresse (Agarwal, 1997 ; Palanisami et al., 2010). Les petits producteurs agricoles, tributaires des ressources locales, voient leurs récoltes compromises et adaptent leurs pratiques, parfois en renonçant à certaines cultures (Janakarajan et al., 2001). Malgré leur caractère temporaire, ces réservoirs jouent un rôle essentiel dans la recharge des

nappes, la régulation des crues, la résilience climatique et la préservation de la biodiversité (IWMI, 2007 ; Venot et al., 2017). Leur intégration dans les politiques locales de gestion de l'eau demeure donc un enjeu stratégique.

La télédétection

La compréhension des dynamiques hydrologiques des réservoirs ne peut se limiter à des observations de terrain, souvent limitées dans le temps et l'espace. Pour répondre aux enjeux de suivi à grande échelle et sur le long terme, des outils d'observation systématique, comme la télédétection, se sont imposés ces dernières années. Cette section présente les principes fondamentaux de la télédétection, ses apports spécifiques pour le suivi des plans d'eau, ainsi que les méthodes qui permettent d'en faire un outil reproductible et transférable.

Définition et principes

La télédétection regroupe les techniques d'acquisition d'informations sur la surface terrestre à partir d'instruments déportés, généralement embarqués sur des satellites ou des aéronefs. Elle repose sur l'analyse de la réponse électromagnétique des surfaces, soit par réflexion de la lumière (capteurs optiques), soit par émission et mesure de la rétrodiffusion d'un signal radar (capteurs actifs). Les données obtenues sont transformées en images exploitables via des traitements numériques adaptés aux objectifs d'analyse (Campbell & Wynne, 2011).

Les capteurs radar, comme ceux embarqués à bord des satellites Sentinel-1A/B de l'Agence spatiale européenne (ESA), émettent en bande C, une gamme de fréquences du spectre micro-ondes centrée autour de 5,4 GHz (longueur d'onde d'environ 5,6 cm), particulièrement adaptée à l'observation de la surface terrestre. Cette bande permet une bonne pénétration à travers la végétation clairsemée et offre un compromis intéressant entre résolution et couverture. Les satellites enregistrent ensuite le signal rétrodiffusé par les surfaces terrestres. L'eau libre, en raison de sa surface lisse et peu rugueuse, renvoie très peu d'énergie radar et apparaît donc sombre sur les images. Cette propriété permet une détection fiable des plans d'eau, y compris en présence de couverture nuageuse ou en conditions d'ensoleillement faible (Tian et al., 2022). En outre, la polarisation double (VV et VH) améliore la discrimination entre types de surface, en particulier entre zones en eau, végétation et sol nu.

Intérêt pour le suivi des réservoirs

La télédétection constitue un outil stratégique pour la surveillance des réservoirs à ciel ouvert, en particulier dans les contextes tropicaux caractérisés par une grande variabilité hydrologique et des contraintes d'accès au terrain. Elle a déjà été mobilisée pour cartographier des zones humides ou des habitats aquatiques en Afrique subsaharienne, notamment dans le cadre de la lutte contre les vecteurs de maladies hydriques (Hardy et al., 2019). Elle permet de détecter les changements de surface en eau au fil du temps, d'identifier les périodes de remplissage et d'assèchement, et de caractériser les états hydrologiques saisonniers des réservoirs.

Des approches basées sur des séries temporelles de données Sentinel-1 ont été utilisées pour cartographier les réservoirs de petite taille, souvent absents des inventaires administratifs. L'usage d'indices comme le SDWI (*Sentinel-1 Dual Polarized Water Index*) ou le *Water Occurrence* permet de quantifier la fréquence de présence de l'eau, donc de distinguer les plans d'eau permanents des structures temporaires (Sun et al., 2020). De manière complémentaire, Yang et al. (2020) ont démontré que les images Sentinel-2, grâce à leur résolution spatiale fine et à leur richesse spectrale, permettent également une estimation précise et mensuelle des surfaces en eau, notamment en contexte tempéré. Leur approche met en évidence l'intérêt de combiner des données radar et optiques pour améliorer la détection des plans d'eau selon les saisons. Le recours à des outils comme Google Earth Engine (GEE) permet d'automatiser ces traitements sur de vastes territoires, tout en garantissant la reproductibilité des résultats. Toutefois, GEE n'a pas été utilisé dans cette étude en raison de ses limitations d'accès

dans la version gratuite, qui restreint les volumes de données traitables et les durées d'exécution des scripts.

Les avantages sont multiples : accès libre aux données, fréquence de revisite élevée (6 jours), indépendance vis-à-vis de la couverture nuageuse, et compatibilité avec des outils SIG. Comparée aux mesures de terrain, la télédétection présente des atouts significatifs en termes de coût, de couverture et de régularité temporelle. Alors que les enquêtes de terrain nécessitent des ressources humaines importantes, des moyens logistiques et du temps, les images satellites permettent une observation synchrone de zones étendues, sans contraintes géographiques ou politiques. L'intérêt de croiser plusieurs sources satellitaires a également été souligné pour estimer le cycle hydrologique régional avec plus de fiabilité (Pan et al., 2008).

De plus, dans les contextes où l'accès est limité (zones isolées, instables ou sensibles), la télédétection constitue parfois la seule méthode viable pour obtenir des données fiables (Roy et al., 2014 ; Pan et al., 2008). Elle permet également de créer des séries temporelles homogènes, ce qui est essentiel pour suivre l'évolution des dynamiques hydrologiques dans le temps. En complément, les observations de terrain peuvent être utilisées à des fins de validation, mais leur usage exclusif est souvent limité par leur échelle locale et leur caractère ponctuel. La combinaison des deux approches, télédétection et terrain, permet donc de tirer parti de leurs complémentarités respectives, comme le soulignent Tulbure et al. (2016) dans le cadre du suivi longue durée des plans d'eau.

Construction de méthodes reproductibles

La reproductibilité constitue un critère fondamental dans l'évaluation des méthodes de télédétection. Elle repose sur la documentation rigoureuse des paramètres utilisés (type de données, période d'acquisition, indices mobilisés, seuils de classification), ainsi que sur l'emploi d'outils ouverts ou largement diffusés, permettant de répéter les analyses dans d'autres contextes géographiques ou temporels.

Dans le cadre de cette étude, la méthode a été conçue à partir d'une chaîne de traitement associant les logiciels SNAP (ESA), Python et QGIS, en s'appuyant sur des standards reconnus dans la littérature (Tian et al., 2022 ; Ottinger et al., 2016). Cette approche repose sur des étapes bien définies : prétraitement systématique des images SAR, construction d'indicateurs statistiques, classification binaire, puis post-traitement vectoriel. Le tout a été documenté étape par étape afin de pouvoir être appliqué à d'autres zones du Tamil Nadu ou transposé à d'autres régions aux caractéristiques similaires.

Par ailleurs, plusieurs auteurs soulignent l'intérêt de combiner les méthodes automatisées avec des formes de validation qualitative : interprétation manuelle (dans QGIS, ArcGIS), retour terrain ou collecte participative via GPS ou applications mobiles (Gao, 2019). Cette hybridation entre techniques numériques et connaissances locales renforce la fiabilité des résultats tout en favorisant leur appropriation par les acteurs du territoire.

Cette dernière section propose une mise en perspective critique du travail réalisé. Elle identifie d'une part les principales limites rencontrées au cours du projet, qu'elles soient d'ordre méthodologique, technique ou contextuel, et d'autre part les pistes d'amélioration et de prolongement envisageables pour des travaux futurs. L'objectif est d'apporter un regard réflexif sur la démarche adoptée et d'ouvrir des perspectives pour renforcer la robustesse, la transférabilité et l'utilité des résultats.

À partir des constats posés dans la littérature, une méthodologie spécifique a été élaborée pour répondre à la problématique.

Méthode

La méthode développée dans cette étude vise à détecter, classer les réservoirs à ciel ouvert, puis à confronter ces résultats avec les perceptions locales. L'objectif est de proposer des recommandations pour l'amélioration ou la création de nouvelles installations hydrauliques adaptées au contexte local.

Cette approche méthodologique repose sur un traitement multi-temporel d'images radar Sentinel-1 en configuration SAR à double polarisation (VV/VH), c'est-à-dire combinant une polarisation verticale émise et reçue (VV) et une polarisation verticale émise mais horizontale reçue (VH). Cette configuration permet d'améliorer la capacité de discrimination entre types de surfaces, notamment entre l'eau, la végétation et le sol nu, en tirant parti de différences de rétrodiffusion selon les orientations des ondes (Tian et al., 2022).

La chaîne de traitement adoptée, synthétisée dans la Figure 10, a été construite à partir des recommandations de la littérature récente (Tian et al., 2022 ; Ottinger et al., 2016), et a été adaptée aux spécificités de la zone d'étude en s'appuyant également sur l'expertise méthodologique de Samuel Corgne (2025). Le traitement des données a été réalisé à l'aide d'un ensemble d'outils complémentaires : SNAP (ESA) pour les prétraitements radar, Python pour les analyses statistiques, ArcGIS Pro et QGIS pour les traitements vectoriels et les représentations cartographiques.

En complément de l'analyse géospatiale, des éléments qualitatifs issus de la littérature ont été mobilisés pour contextualiser les usages et les dynamiques sociales associées aux réservoirs. Ces éléments n'ont pas été approfondis par une enquête de terrain, mais constituent une base utile pour de futures recherches centrées sur les perceptions locales et les pratiques d'entretien.

Zone d'étude et données utilisées

La zone d'étude couvre quatorze communes situées dans les environs de Pondichéry, incluant également la ville elle-même cf. Figure 1. Ce périmètre a été défini de manière à limiter l'étendue spatiale de l'analyse tout en intégrant des contextes hydrologiques variés (zones urbaines, rurales, périurbaines). Cette délimitation permet de réduire le volume de données à traiter pour l'analyse radar multi-temporelle, tout en couvrant différents types de réservoirs à ciel ouvert. Elle répond également à des considérations logistiques, les distances restant compatibles avec d'éventuelles vérifications de terrain.

Carte de la zone d'étude



Crédits : Tristan Le Pape

Données : Geofabrik

Figure 6 : Villes composant la zone d'étude

Les images utilisées proviennent de la constellation Sentinel-1A/B, en mode Interferometric Wide Swath (IW), qui permet de couvrir de larges zones (250 km de largeur) avec une résolution spatiale adaptée à l'analyse environnementale (environ 10 m). Ce mode est conçu pour combiner une large couverture géographique avec une fréquence de revisite élevée, ce qui le rend particulièrement adapté à la surveillance hydrologique. Les images sont fournies en format GRD (Ground Range Detected), c'est-à-dire des produits de niveau intermédiaire déjà corrigés géométriquement, mais encore sujets à des effets radiométriques nécessitant un prétraitement complémentaire. Elles sont acquises en polarisation duale (VV et VH) : la polarisation VV correspond à une émission et une réception verticales, tandis que VH désigne une émission verticale et une réception horizontale. Cette configuration duale permet de mieux distinguer les types de surfaces. La polarisation VH est privilégiée dans cette étude car elle offre un contraste plus marqué entre l'eau libre, la végétation et le sol nu, ce qui facilite la détection des plans d'eau (Tian et al., 2022).

La période d'étude couvre l'année 2024, afin de capturer les dynamiques saisonnières des réservoirs. Toutefois, les images de janvier 2024 ont présenté une anomalie lors de leur empilement multi-temporel, générant des valeurs nulles (NaN) après traitement. Cette erreur semble liée à une incompatibilité dans les métadonnées, bien que la cause exacte n'ait pas été identifiée. Par conséquent, les images de janvier n'ont pas été utilisées.

En complément des données Sentinel-1, plusieurs couches d'informations ont été mobilisées pour affiner les traitements. Une carte d'occupation du sol issue de la *Vegetation Map of India* (Roy et al., 2015) a été utilisée comme masque pour exclure certaines classes, notamment les cultures irriguées, susceptibles d'interférer avec la classification des plans d'eau. Un modèle numérique de terrain (MNT) extrait de la plateforme *Open Topography* a permis de calculer la pente et de détecter d'éventuelles ombres radar ou artefacts topographiques, conformément aux recommandations de Schumann & Bates (2018). Enfin, une carte vectorielle des principaux cours d'eau a été téléchargée via *Geofabrik* (données OpenStreetMap) afin d'écarter les linéaires fluviaux non pertinents pour l'inventaire des réservoirs.

1. Repérer les réservoirs

La première étape de la méthode consiste à détecter les réservoirs avant de leur soumettre une classification.

Prétraitement des données

Le prétraitement a été effectué selon une chaîne standardisée, comprenant quatre étapes successives :

- Suppression du bruit thermique (*Thermal Noise Removal*), afin d'éliminer les artefacts liés aux interférences de fond du capteur.
- Calibration radiométrique en sigma nought (σ^0), qui permet de convertir les valeurs de rétrodiffusion en unités physiques comparables entre les scènes.
- Correction topographique (*Terrain Correction*) à l'aide du modèle numérique d'élévation SRTM 3" (résolution ~ 10 m), afin de géoréférencer les images de manière précise et d'éliminer les distorsions dues au relief.
- Extraction d'une sous-zone géographique correspondant à l'aire d'étude définie, incluant 15 villes aux alentours de Pondichéry. Il s'agit de Puducherry, Cuddalore, Cheyyur, Madurantakam, Uttiramerur, Arani, Chengam, Polur, Tiruvannamalai, Tiruvettipuram, Vandavasi, Gingee, Tindivanam, Tirukkoyilur et Viluppuram. Ces villes ont été retenues parce qu'elles sont toutes contenues dans la tuile radar de sentinel 1.

Traitement multi-temporel

Les images prétraitées ont été co-enregistrées de manière à constituer un empilement temporel homogène (*stack*), permettant l'analyse des variations de rétrodiffusion à différentes dates.

À partir de cet empilement, plusieurs images statistiques ont été générées :

- Image du minimum (min) : capture les valeurs les plus faibles de rétrodiffusion, typiques des surfaces en eau lisses. Ainsi les réservoirs apparaîtront avec leur surface maximale.
- Image du maximum (max) : capture les valeurs les plus grandes de rétrodiffusion. Ainsi les réservoirs apparaîtront avec leur surface minimale, utile pour identifier les zones périodiquement inondées.

À partir des images statistiques générées, plusieurs représentations ont été construites pour faciliter la classification visuelle et automatisée :

- Images binaires : elles sont obtenues en appliquant un seuil de rétrodiffusion, c'est-à-dire une valeur limite permettant de séparer les pixels correspondant à de l'eau (faible rétrodiffusion) des autres types de surface. Ce processus de seuillage produit une classification binaire : chaque pixel est alors codé comme "eau" ou "non-eau".
- Image RGB multi-temporelle : assemblage des couches min, mean et max, codées respectivement en R, G et B, permettant de visualiser en couleur les dynamiques hydrologiques spatiales des réservoirs, cf. figures 2 et 3.

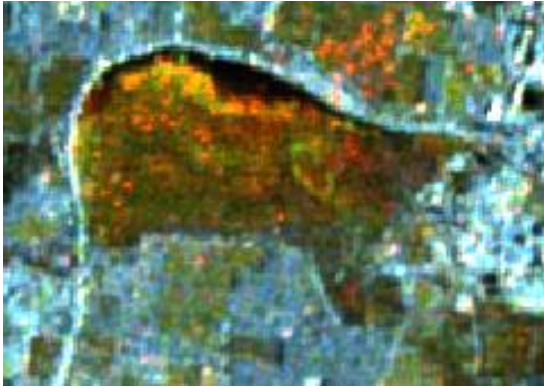


Figure 7 : Exemple de réservoir presque asséché



Figure 8 : Exemple de réservoir toujours plein

Les seuils ne peuvent pas être définis automatiquement à l'aide de la méthode d'Otsu, en raison de la forme de l'histogramme de rétrodiffusion, qui n'est généralement pas bimodale (cf. Figures 4) dans le cas des images radar Sentinel-1 couvrant de vastes zones majoritairement terrestres. La figure 4 montre une distribution unimodale, avec une anomalie localisée autour de -50 dB, probablement liée à un artefact de traitement.

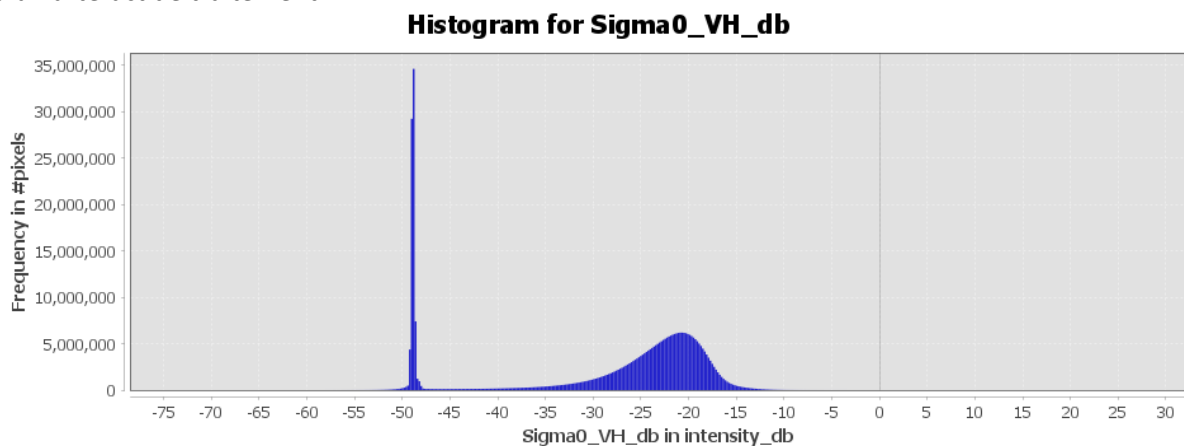


Figure 9 : Histogramme de la synthèse min

La méthode Otsu est pourtant bien adaptée aux images optiques ou aux scènes fortement contrastées (Sun et al., 2020 ; Yang et al., 2020). Dans cette étude, les seuils ont donc été définis empiriquement, à partir de l'analyse des histogrammes et en s'appuyant sur des valeurs couramment utilisées dans la littérature. Il est en effet fréquent de retenir un seuil autour de -30 dB pour détecter les zones d'eau dans les images *min*, et -17 dB pour identifier les zones à forte rétrodiffusion dans les images *max* (Ottinger et al., 2021 ; Sur et al., 2021 ; Tian et al., 2022).

Post traitement

Les images ont ensuite été découpées afin de réduire les temps de calcul. Le découpage des images statistiques a été réalisé à l'aide d'un script Python automatisant la reprojection en EPSG:32644, suivie d'un masquage spatial à l'aide d'un shapefile des villes de la zone d'étude (cf. Script 1 – Reprojection et découpage d'un raster selon un shapefile, en annexe). Les images binaires ont été lissées à l'aide d'un filtre médian 3×3 pour supprimer les irrégularités ponctuelles. Les images binaires ont ensuite été vectorisées en polygones, avant application d'un filtre de surface pour éliminer les très petits objets. Cette étape a été réalisée via un script Python dédié (cf. Script 2 – Vectorisation d'un raster binaire avec filtrage, en annexe). Un filtrage supplémentaire a été réalisé pour exclure les polygones fortement superposés aux zones cultivées ou aux cours d'eau, via des croisements spatiaux systématisés dans Python (cf. Script 3 – Filtrage spatial avec couches auxiliaires, en annexe).

Afin d'obtenir une carte finale comprenant les variations des réservoirs, deux jeux de résultats ont été calculés : min et max.

Un premier jeu de résultats, dit "Water tanks min", a été extrait à partir de l'image min. À cette étape, les objets de petite taille (inférieurs à 10 000 m²) ont été éliminés afin de réduire le bruit de classification. Un filtrage des faux positifs a été réalisé par croisement avec des couches vectorielles d'occupation du sol (cultures irriguées, rivières). Un croisement a aussi été fait avec un modèle numérique de terrain pour supprimer les polygones détectés comme eau alors qu'ils étaient des ombres de montagnes. Les objets dont plus de 30 % de la surface chevauchaient ces classes ont été supprimés. Ce seuil a été fixé de manière empirique, à l'issue de tests itératifs visant à limiter l'influence des données obsolètes sur la classification. En effet, la carte d'occupation des sols utilisée, bien que détaillée, date de 2015 ; il est donc probable que les zones agricoles aient connu des évolutions significatives depuis, rendant certaines informations partiellement obsolètes.

2. Classifier les réservoirs

Classification

Ensuite, un second jeu de résultats, intitulé Water tanks max, a été généré à partir de l'image statistique max. Contrairement à l'image min, le seuil de surface minimale de 10 000 m² n'a pas été appliqué à ce stade, car il aurait conduit à exclure de nombreux réservoirs fortement asséchés, dont la surface résiduelle devient très réduite en saison sèche. Les polygones issus de l'image min (correspondant aux surfaces maximales détectées) ont été utilisés comme emprise de référence. Ces polygones ont été ré-appliqués à l'image max, et un comptage des pixels à faible rétrodiffusion a été effectué à l'intérieur de chaque entité vectorielle. Ce calcul permet d'estimer la surface occupée par l'eau dans chacun des réservoirs au moment de leur remplissage minimal, et donc de caractériser leur niveau d'assèchement relatif. Pour garantir la cohérence géométrique entre les images min et max, une opération d'intersection et de regroupement par identifiant a été réalisée sur les deux jeux de données vectoriels (cf. Script 4 – Intersection et dissolution des réservoirs max, en annexe).

La comparaison des surfaces maximales et minimales a permis de calculer la perte relative pour chaque réservoir. Un script Python a été utilisé pour associer les deux géométries, calculer l'union et estimer le pourcentage de perte (cf. Script 5 – Analyse de l'évolution des surfaces en eau, en annexe). Une classification a été réalisée à l'aide de la méthode des Jenks Natural Breaks (Serrihni 2024), permettant de regrouper les réservoirs selon leur dynamique hydrologique au cours de l'année :

- Perte < 25% : le réservoir est « stable »
- Perte < 48% : le réservoir a une « faible perte »
- Perte < 69% : le réservoir a une « perte modérée »
- Perte < 87% : le réservoir a une « forte perte »
- Perte > 88% : le réservoir est « presque asséché »

On obtient ainsi trois vecteurs, le premier correspond à la surface maximale des réservoirs sur l'année, le deuxième correspond à la surface minimale et le dernier correspond à l'évolution temporelle.

Une seconde carte a été créée représentant les zones continues dans lesquelles les réservoirs de mêmes types sont regroupés (cf. Figure 7). Une interpolation spatiale a été réalisée afin de produire une surface continue représentant la stabilité hydrologique des réservoirs à ciel ouvert. L'objectif était de transformer un ensemble de données ponctuelles (issues de la conversion de polygones de réservoirs en centroïdes) en une surface raster lissée, permettant d'analyser la répartition géographique des zones stables ou instables. L'interpolation repose sur l'hypothèse de continuité spatiale, selon laquelle des entités proches dans l'espace sont plus susceptibles de présenter des valeurs similaires que des entités éloignées (première loi de la géographie de Tobler). La valeur estimée en un point donné est calculée comme une moyenne pondérée des valeurs des points environnants connus. La pondération est inversement proportionnelle à la distance, de manière à accorder plus d'influence aux points les plus proches.

L'outil IDW d'ArcGIS Pro a été utilisé avec les réglages suivants :

- Champ de valeur : une variable numérique issue de la classification hydrologique des réservoirs (de 0 à 4),
- Nombre de voisins : 12 points maximum par cellule,
- Paramètre de puissance (Power) : 2,
- Taille de cellule : 10 mètres, choisie pour concilier finesse de résolution et performance de traitement.

Conformément à la documentation (Esri, 2024), la valeur d'une cellule interpolée est toujours comprise entre les valeurs minimales et maximales des points d'entrée. L'IDW ne génère donc pas de pics ou de creux artificiels, ce qui garantit la stabilité de l'interpolation.

Selon Watson & Philip (1985), l'IDW donne de bons résultats lorsque l'échantillonnage est suffisamment dense et régulier au regard de la variabilité spatiale du phénomène étudié. Dans le cas contraire, la surface interpolée peut ne pas représenter fidèlement les variations locales. C'est pourquoi l'IDW est particulièrement adapté à des environnements homogènes et des données bien réparties, comme c'est le cas ici. Enfin, l'IDW suppose une influence isotropique des points, ce qui signifie qu'il ne prend pas en compte les barrières physiques ou les directions préférentielles de propagation. Il est donc peu adapté aux surfaces influencées par des effets topographiques ou hydrogéologiques marqués, à moins d'utiliser des entités d'interruption (barrières), une option non retenue ici compte tenu de la nature des données.

Validation

Pour évaluer la fiabilité de la classification automatisée, une comparaison est réalisée entre l'image obtenue et une image de référence (généralement une interprétation manuelle ou un produit validé). La métrique utilisée est le coefficient de Kappa, qui mesure la concordance entre deux classifications tout en tenant compte des accords dus au hasard. Cet indice est plus informatif qu'un simple taux de réussite (accuracy), car il corrige l'effet d'une répartition inégale des classes. Cette opération a été réalisée à l'aide d'un script développé par Manon. Le Kappa se calcule à partir d'une matrice de confusion croisant les classes prédites et les classes de référence. Il est défini par la formule :

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Où :

- P_o est la proportion d'accord observée,
- P_e est la proportion d'accord attendue par hasard.

Les valeurs du coefficient de Kappa se situent entre -1 et 1 :

- $K = 1$: correspondance parfaite,

- $K = 0$: concordance équivalente au hasard,
- $K < 0$: désaccord systématique.

Le calcul est effectué sur Python. Pour faire cela une carte a été créée à la main. 500 polygones ont été détournés représentants de l'eau et 500 représentants de la non-eau. Et ce, pour la période sèche et humide.

Discussions

Initialement, le travail s'était orienté vers l'utilisation de Sentinel-2, en raison de sa richesse spectrale. Bien que non détaillée dans le présent rapport, cette approche optique, fondée sur le calcul d'indices spectraux comme AWEI, a permis d'élaborer une méthode reproductible. Les histogrammes bimodaux des images optiques facilitent en effet l'application automatique de la méthode de seuillage d'Otsu. Une analyse approfondie de cette méthode sera présentée dans le rapport parallèle de M, qui développera davantage. Toutefois, la forte couverture nuageuse pendant la mousson limitait considérablement le nombre d'images exploitables. Ce constat a motivé le recours aux données Sentinel-1, insensibles aux conditions météorologiques et plus adaptées à un suivi temporel régulier. Néanmoins, l'application de la méthode d'Otsu sur les données radar s'est révélée inefficace, en raison de la faible proportion de zones en eau dans les scènes. L'ajustement manuel du seuil est alors nécessaire, ce qui compromet la reproductibilité de la méthode.

En conclusion, Sentinel-1 se prête mieux à une analyse temporelle grâce à sa régularité, tandis que Sentinel-2 s'avère plus pertinent pour des analyses ponctuelles et détaillées. L'intégration des deux types de données constituerait une approche particulièrement prometteuse, déjà largement documentée dans la littérature scientifique.

3. Proposer des améliorations

Au-delà de la détection et de la classification des réservoirs à ciel ouvert, cette étude vise à mettre en relation les résultats issus de l'analyse d'images radar avec les connaissances existantes sur les usages, les fonctions et les vulnérabilités des tanks, telles que décrites dans la littérature scientifique (cf. [section 1.3 de l'état de l'art](#)). Cette démarche s'inscrit dans une perspective exploratoire : il ne s'agit pas de formuler des recommandations normatives, mais de produire des représentations cartographiques susceptibles de faciliter l'identification de profils-types de réservoirs, ainsi que l'analyse de leur répartition géographique à l'échelle locale.

Pour cela, une typologie a été construite à partir de critères récurrents identifiés dans les travaux existants. Ces critères prennent en compte, d'une part, la dynamique hydrologique observée à partir des images radar – notamment la saisonnalité du remplissage, la surface maximale détectée, et l'ampleur de la perte de surface en période sèche – et, d'autre part, le contexte d'insertion spatiale des réservoirs, en particulier leur proximité avec des zones habitées ou cultivées. Ces éléments ont été croisés avec les entités vectorielles issues des traitements sur les images Sentinel-1 (min et max), au sein du logiciel QGIS.

Deux produits cartographiques ont ainsi été générés. Le premier correspond à une carte typologique des réservoirs, où chaque entité est associée à une catégorie définie à partir des critères mentionnés (par exemple : réservoir stable, réservoir fortement saisonnier en zone agricole, petit réservoir temporaire en marge urbaine, etc.). Le second est une carte de répartition spatiale des différents types identifiés, permettant de repérer d'éventuelles concentrations, absences, régularités ou ruptures territoriales dans la distribution des réservoirs selon leurs caractéristiques.

L'objectif de cette étape est de fournir des outils d'aide à la lecture spatiale des dynamiques hydrologiques locales, en lien avec les connaissances empiriques accumulées dans la littérature. Ces éléments pourront, dans un second temps, alimenter une réflexion sur les enjeux de reconnaissance, de gestion ou de valorisation différenciée des réservoirs, selon leur profil et leur ancrage territorial. Il convient de souligner que cette démarche reste exploratoire, fondée exclusivement sur des critères

reproductibles, et qu'elle ne repose pas à ce stade sur une validation de terrain ni sur une concertation avec les acteurs locaux.

La méthodologie décrite précédemment a été appliquée à un ensemble d'images Sentinel-1 couvrant l'année 2024, dans une zone d'étude centrée sur la région de Pondichéry. La section suivante présente les principaux résultats issus du traitement des données, de la classification des réservoirs, puis de leur interprétation cartographique.

Résultats

Cette section présente les résultats issus du traitement des images radar Sentinel-1, de la classification multi-temporelle et des croisements spatiaux réalisés à partir des couches auxiliaires. L'objectif est de documenter la dynamique hydrologique des réservoirs à ciel ouvert dans la zone d'étude, d'évaluer leur comportement saisonnier, et d'en proposer une typologie spatialisée.

Visualisation et interprétation cartographique des réservoirs

Les cartes présentées ci-après illustrent les résultats issus de la classification des réservoirs à ciel ouvert dans la zone d'étude. Elles permettent de visualiser l'état hydrologique des réservoirs au cours de l'année 2024, en distinguant leur surface maximale (en saison humide), la dynamique de variation des tanks ainsi que des zones où de nouvelles installations sont recommandées. Les cartes thématiques issues de l'interpolation spatiale offrent une lecture synthétique de la stabilité hydrologique à l'échelle régionale. Ces représentations constituent une base utile pour l'aide à la décision, notamment en vue de l'implantation de nouveaux réservoirs ou de la priorisation des efforts de réhabilitation.

Afin d'illustrer plus concrètement les résultats obtenus à l'échelle locale, un zoom a été réalisé sur deux réservoirs emblématiques : Osudu et Kanagan, situés dans la région de Pondichéry. Le choix de ces deux sites n'est pas anodin : il s'inscrit dans la continuité du projet de recherche Water Pondy, mené antérieurement sur ce territoire, et ayant déjà documenté leurs caractéristiques hydrologiques et sociales. Ce lien permet de croiser les résultats de la présente analyse radar avec des connaissances qualitatives existantes, et de mieux comprendre les trajectoires différenciées de ces deux réservoirs.

Osudu et Kanagan

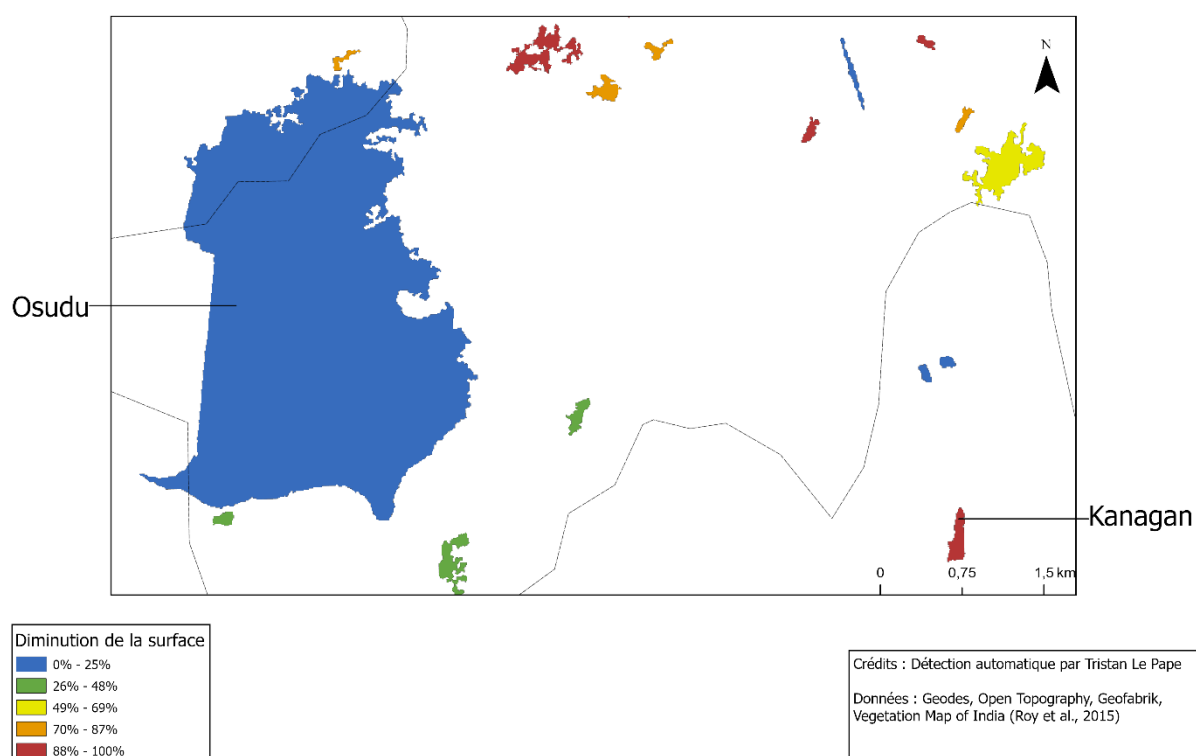


Figure 10 : Extrait de la classification des réservoirs qui contient Osudu et Kanagan

La figure 5 présente un extrait de la carte de classification hydrologique des réservoirs, centrée sur deux structures emblématiques de la région de Pondichéry : Osudu et Kanagan, qui feront l'objet d'analyses plus approfondies dans les travaux de Manon. C et Estelle. C. Cette carte est issue de la typologie fondée sur la perte relative de surface en eau observée entre les images *min* et *max*, ce qui permet d'évaluer le comportement saisonnier de chaque réservoir.

Au niveau local, le réservoir d'Osudu apparaît comme relativement stable, avec une perte de surface inférieure à 20 %. Cette stabilité peut être interprétée comme un indicateur de bonne rétention saisonnière. Situé en zone périurbaine, Osudu bénéficie par ailleurs d'une attention croissante en matière de valorisation écologique et patrimoniale (Mathevet et al., 2020). À l'inverse, Kanagan est classé comme « presque asséché », avec une perte supérieure à 85 %. Il illustre une trajectoire typique des réservoirs saisonniers en marge urbaine, exposés à une combinaison de pressions foncières, de désengagement institutionnel et de perte d'entretien collectif (Guezal, 2017).

Au-delà de ces deux cas, la carte met en évidence une forte hétérogénéité spatiale dans les comportements hydrologiques des réservoirs. On observe notamment une concentration de réservoirs *stables* dans les zones agricoles encore actives ou à proximité d'infrastructures d'irrigation modernes, tandis que les réservoirs *fortement saisonniers* ou *presque asséchés* se répartissent plus largement dans les zones périurbaines ou en marge des bassins versants. Cette répartition suggère un lien entre contexte d'usage, niveau d'entretien et capacité de rétention, qui pourrait faire l'objet d'une analyse croisée plus approfondie. La carte offre ainsi une première lecture spatiale des dynamiques de dégradation ou de résilience des réservoirs dans la région étudiée.

Réservoirs à ciel ouvert autour de Pondichéry

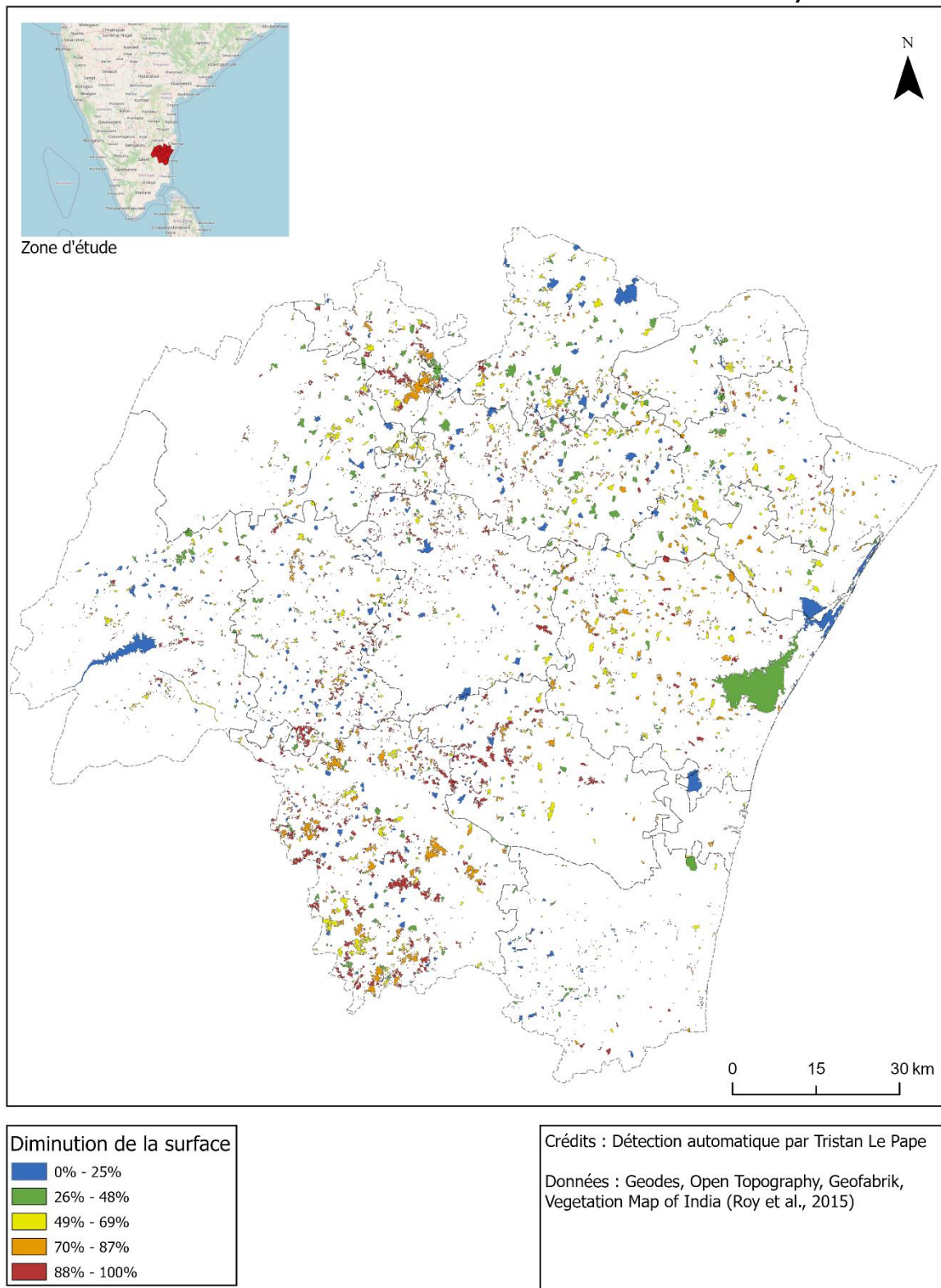


Figure 11 : Carte finale des réservoirs

La figure 6 présente l'ensemble des réservoirs détectés dans la zone d'étude à partir des images radar Sentinel-1, classés selon leur dynamique hydrologique annuelle. Chaque entité est représentée en

fonction de sa surface maximale atteinte en saison humide, ainsi que du taux de perte de surface en eau observé pendant la période sèche. La légende cartographique distingue ainsi plusieurs types de comportements : les réservoirs à remplissage constant ou partiel apparaissent dans des teintes de bleu (du clair au foncé), ceux à forte variabilité ou à assèchement quasi complet sont représentés en rouge et orange, tandis que les cas intermédiaires, caractérisés par des pertes modérées, se situent dans des gammes de jaune.

Au-delà de l'aspect visuel, cette carte offre une lecture spatialisée de l'état hydrologique des *tanks* à l'échelle régionale. Elle met en évidence une forte concentration de réservoirs stables dans les zones agricoles du centre-ouest de la zone d'étude, là où l'irrigation gravitaire reste en partie fonctionnelle. À l'inverse, les réservoirs classés comme instables ou presque asséchés sont majoritairement localisés en périphérie urbaine, ou dans des zones à usage mixte où l'entretien semble plus irrégulier. Cette répartition souligne un gradient fonctionnel et institutionnel entre réservoirs encore insérés dans des systèmes agricoles actifs et ceux en voie d'abandon ou de déconnexion hydrologique.

On observe également certaines zones, notamment dans le nord-est de la zone d'étude, où des groupes de réservoirs présentent des dynamiques divergentes malgré leur proximité spatiale. Ce phénomène pourrait traduire des différences locales en termes de topographie, de pratiques d'entretien, ou d'accès différencié aux ressources en eau souterraine. La carte constitue ainsi un outil utile pour repérer non seulement les réservoirs les plus vulnérables, mais aussi les écarts internes entre bassins versants, révélateurs de disparités sociales, techniques ou institutionnelles. Ces premiers résultats appellent à une analyse croisée avec les formes de gouvernance locale et les trajectoires d'aménagement.

Recommandations pour de nouvelles installations

La figure 7 représente la répartition géographique des réservoirs à ciel ouvert selon leur état hydrologique au cours de l'année :

Indice de stabilité des réservoirs autour de Pondichéry

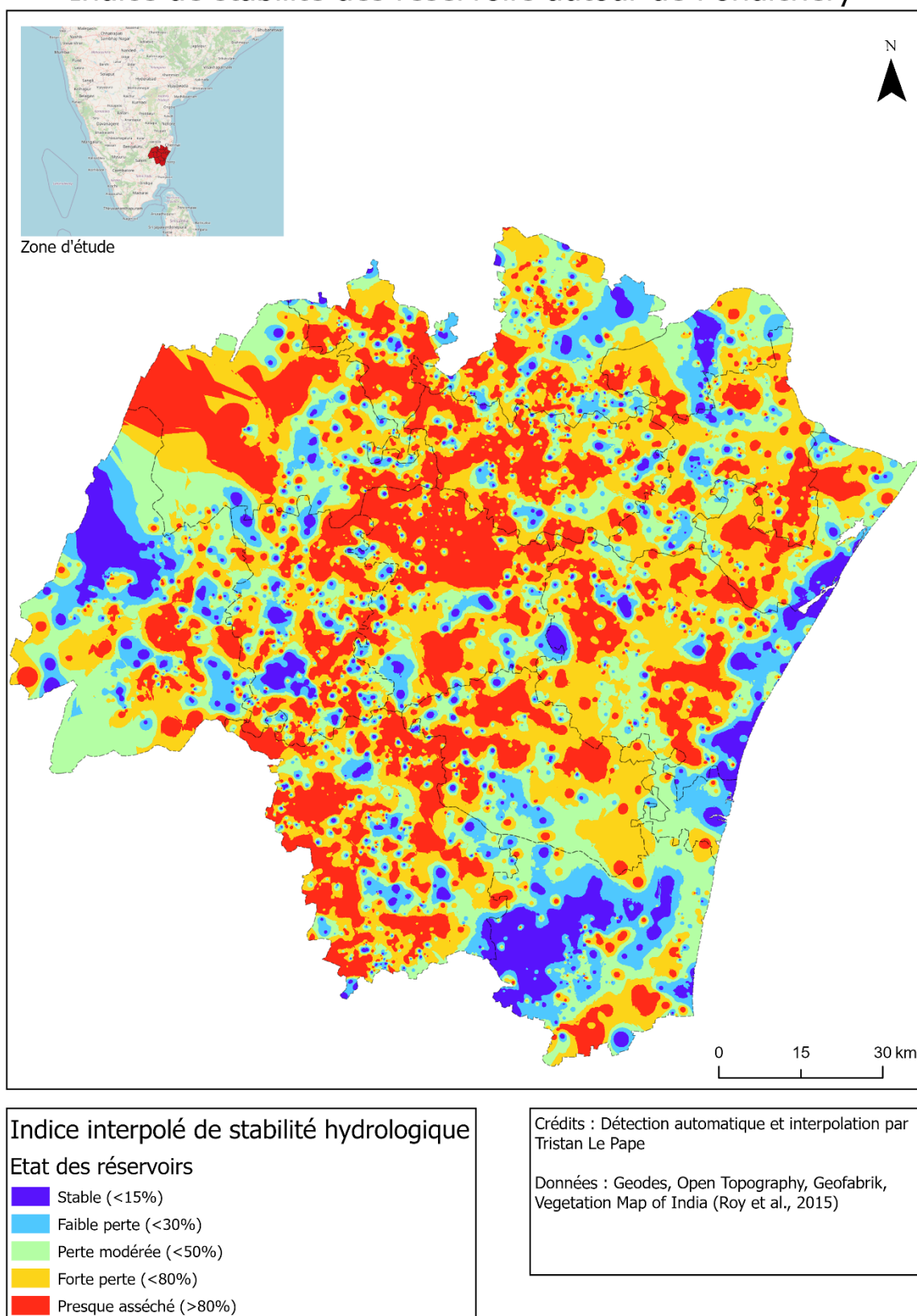


Figure 12 : Carte de la stabilité hydrologique des réservoirs

La figure 7 présente une interpolation spatiale des résultats précédents, selon une méthode d'Inverse Distance Weighting (IDW). Elle permet de dégager des tendances continues à partir de données

ponctuelles (centroïdes des réservoirs), afin d'identifier des zones globalement stables ou instables. On observe que les zones les plus stables (en bleu) se concentrent autour des grands lacs ou dans les vallées bien alimentées, tandis que les zones rouges, plus instables, se situent en périphérie ou dans des secteurs topographiquement défavorables. Cette carte constitue un outil d'aide à la décision, en indiquant les zones où la réhabilitation de réservoirs saisonniers pourrait être priorisée, et celles où de tels efforts seraient moins efficaces à court terme. L'intérêt de cette carte réside dans sa capacité à dépasser la lecture individuelle des réservoirs pour proposer une lecture régionale de la stabilité hydrologique, potentiellement utile pour la planification territoriale.

Indice de Kappa

Un calcul d'indice de Kappa a été effectué pour les valeurs min, sa valeur est de 0.7390. Voici les détails :

Matrice de confusion		
	Préd: Non eau (0)	Préd : Préd: Eau (1)
Réf: Non eau (0)	8170981	45511
Réf: Eau (1)	513373	939175

Figure 13 : Matrice de confusion du calcul de l'indice de Kappa

Catégorie	Valeur absolue	% du total (9 669 040)	% dans la classe réelle
Vrai négatif	8 170 981	84,47 %	99,45 % (des non-eau)
Faux positif	45 511	0,47 %	0,55 % (des non-eau)
Faux négatif	513 373	5,31 %	35,34 % (des eaux)
Vrai positif	939 175	9,71 %	64,66 % (des eaux)

Figure 14 : Résultats de calculs de l'indice de Kappa

La matrice de confusion obtenue compare les résultats de classification avec les données de référence. Elle montre que 8 170 981 pixels ont été correctement identifiés comme zones non eau, tandis que 45 511 pixels ont été à tort classés comme eau. Pour la classe « eau », 939 175 pixels ont été correctement détectés, mais 513 373 pixels correspondant à de l'eau réelle ont été classés comme non-eau.

L'analyse de la matrice met en évidence une excellente capacité du modèle à reconnaître les zones non-eau, avec très peu de confusion. En revanche, la détection des zones d'eau reste moins fiable : plus d'un tiers des surfaces d'eau n'ont pas été identifiées. Cette asymétrie indique une tendance du modèle à sous-détecter les zones d'eau, ce qui peut être lié à des artefacts radar, aux filtres appliqués ou au MNT utilisé pour supprimer les cultures qui date de 2015. L'amélioration future devra cibler cette faiblesse pour rendre la détection plus exhaustive.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre la répartition spatiale et les dynamiques saisonnières des réservoirs à ciel ouvert dans la zone d'étude. Toutefois, certaines limites doivent être soulignées quant à la portée, à la précision et à la généralisation des analyses proposées. La dernière partie du rapport revient sur ces limites, avant d'ouvrir sur quelques perspectives pour des travaux futurs.

Limites et perspectives

Cette dernière section propose une mise en perspective critique du travail réalisé. Elle identifie d'une part les principales limites rencontrées au cours du projet, qu'elles soient d'ordre méthodologique, technique ou contextuel, et d'autre part les pistes d'amélioration et de prolongement envisageables pour des travaux futurs. L'objectif est d'apporter un regard réflexif sur la démarche adoptée et d'ouvrir des perspectives pour renforcer la robustesse, la transférabilité et l'utilité des résultats.

Limites

Plusieurs limites ont été identifiées au cours du travail, à la fois sur les plans méthode, technique et opérationnel. La première concerne la reproductibilité de la méthode employée. En théorie, la classification automatique des surfaces en eau à partir d'images radar repose sur l'application de seuils objectifs, notamment via la méthode d'Otsu. Or, dans ce cas précis, l'histogramme de rétrodiffusion des images traitées présentait une distribution non bimodale, en raison notamment d'artéfacts radar et de valeurs aberrantes issues des images acquises en janvier. L'application directe du seuil calculé par Otsu s'est révélée contre-productive, produisant des cartes binaires saturées (quasi-uniformément classées comme « eau »), rendant les résultats inexploitable. Cette situation a nécessité un ajustement empirique des seuils, fondé sur l'analyse visuelle des histogrammes et une validation croisée avec des images optiques. Bien que cette approche ait permis d'obtenir des résultats plus cohérents, elle introduit une part de subjectivité dans la méthode, ce qui limite sa reproductibilité stricte sans documentation précise des seuils retenus. Ce biais a également entraîné la nécessité d'appliquer des filtres supplémentaires (filtrage spatial, suppression de petits objets, croisement avec des couches de référence), eux-mêmes définis de manière empirique.

La deuxième limite concerne les capacités de traitement informatique. Les images Sentinel-1, en haute résolution, représentent un volume de données considérable (plus de 600 millions de pixels par scène). L'ordinateur mis à disposition ne permettait pas de traiter l'ensemble des opérations dans des délais raisonnables. Certains traitements ont pu être externalisés ponctuellement grâce à l'aide de Samuel Corgne, mais cette solution restait partielle et non systématique.

Une autre limite réside dans la fiabilité des données utilisées. En effet, ma méthode repose sur le fait que les données téléchargées soient exactement fidèles à la réalité. Or ce n'est pas le cas, en particulier pour l'occupation du sol qui est très détaillée et riche mais date de 2015. Il est donc probable que les cultures aient beaucoup évoluées.

Perspectives

Une campagne de terrain aurait sans aucun doute permis de compléter ce travail en apportant des éléments qualitatifs précieux sur les usages locaux, les dynamiques d'entretien ou les conflits d'usage liés aux réservoirs. Le temps limité du stage n'a toutefois pas permis de l'envisager. Des entretiens semi-directifs, par exemple, auraient pu compléter la cartographie par une compréhension fine des représentations sociales associées aux plans d'eau. Un questionnaire a été préparé (cf. annexe 2) mais n'a malheureusement pas pu être testé.

Malgré ces limites, la méthode développée constitue une base opérationnelle robuste, facilement transférable à d'autres territoires. Elle pourra être reprise, adaptée et enrichie dans le cadre de recherches futures. Une amélioration possible consisterait à affiner les algorithmes de classification, notamment par apprentissage supervisé, ou à intégrer des séries temporelles plus longues pour détecter des tendances pluriannuelles. Tulbure et al. (2016) ont d'ailleurs démontré l'intérêt d'une analyse multi-décennale pour le suivi des dynamiques de surface en eau dans les régions semi-arides.

Conclusion

Cette étude a démontré la pertinence d'une approche combinée de télédétection radar (Sentinel-1) et d'analyse vectorielle pour inventorier et caractériser les réservoirs à ciel ouvert dans une zone du Tamil Nadu. Le traitement multi-temporel des données SAR a permis de quantifier avec robustesse la surface maximale et minimale des tanks, et d'établir une typologie de leur stabilité hydrologique au cours de l'année 2024. Malgré les limitations introduites par l'ajustement empirique des seuils et la qualité de certaines données de référence (occupation du sol de 2015), le modèle atteint un coefficient de Kappa de 0,74, attestant d'une fiabilité satisfaisante pour une application à l'échelle régionale.

Par ailleurs, l'articulation de la dimension technique et de la compréhension des usages locaux – bien que non développée ici faute de campagne de terrain – souligne l'importance d'une démarche transdisciplinaire pour assurer la pérennité des infrastructures hydrauliques traditionnelles. Les recommandations proposées (entretien, marquage foncier, valorisation paysagère) s'appuient sur cette double lecture, afin de favoriser la réhabilitation des tanks saisonniers souvent négligés par les politiques publiques.

Table des matières

Abstract	24
Résumé	24
Sommaire	24
Introduction	25
Etat de l'art	25
Les réservoirs	25
Histoire des réservoirs	25
Définition et fonctionnement des réservoirs	26
Usages sociaux, saisonnalité et reconnaissance des réservoirs	26
La télédétection	27
Définition et principes	27
Intérêt pour le suivi des réservoirs	27
Construction de méthodes reproductibles	28
Méthode	28
Zone d'étude et données utilisées	29
1. Repérer les réservoirs	31
Prétraitement des données	31
Traitement multi-temporel	31
Post traitement	33
2. Classifier les réservoirs	33
Classification	33
Validation	34
Discussions	35
3. Proposer des améliorations	35
Résultats	36
Visualisation et interprétation cartographique des réservoirs	36
Recommandations pour de nouvelles installations	39
Indice de Kappa	41

Limites et perspectives	41
Limites	42
Perspectives.....	42
Conclusion	42
Table des illustrations	44
Références	44
Annexes	46

Table des illustrations

Figure 1 : Villes composant la zone d'étude	30
Figure 2 : Exemple de réservoir presque asséché	32
Figure 3 : Exemple de réservoir toujours plein.....	32
Figure 4 : Histogramme de la synthèse min	32
Figure 5 : Extrait de la classification des réservoirs qui contient Osudu et Kanagan	37
Figure 6 : Carte finale des réservoirs	38
Figure 7 : Carte de la stabilité hydrologique des réservoirs	40
Figure 8 : Matrice de confusion du calcul de l'indice de Kappa	41
Figure 9 : Résultats de calculs de l'indice de Kappa	41
Figure 10 : Logigramme complet de la méthode de traitement d'image.....	47
Figure 11 : Questionnaire terrain	50

Références

- Agarwal, B. (1997). *Environmental action, gender equity and women's participation*. Development and Change, 28(1), 1–44.
- Agrawal, A. (2001). *Common property institutions and sustainable governance of resources*. World Development, 29(10), 1649–1672.
- Balooni, K., & Singh, K. (2007). *Managing village common lands: The role of institutions*. Journal of Rural Development, 26(1), 29–55.
- Esri. (2024). *IDW (Spatial Analyst) – ArcGIS Pro documentation*.
- Gao, Q. (2019). *Estimation of water resources on continental surfaces by multi-sensor microwave remote sensing* [Doctoral dissertation, Université Toulouse 3 Paul Sabatier & Universitat Ramon Llull]. TDX.
- Guezal, L. (2017). *Les transformations spatiales du réservoir d'eau Kanagan et leurs conséquences sur les usagers et représentations des habitants* (Mémoire de recherche, 39 pages).
- Hardy, A., Ettritch, G., Cross, D. E., Bunting, P., Liywalii, F., Sakala, J., Silumesii, A., Singini, D., Smith, M., Willis, T., & Thomas, C. J. (2019). *Automatic Detection of Open and Vegetated Water Bodies Using Sentinel-1 to Map African Malaria Vector Mosquito Breeding Habitats*. Remote Sensing, 11(5), 593.
- IWMI – International Water Management Institute. (2007). *Water policy brief: Reviving tanks in dryland India*. IWMI-Tata Water Policy Program.

Janakarajan, S., Llorente, M., & Mollinga, P. (2001). *Managing water resources: Politics, institutions, and technologies*. ZEF Discussion Papers on Development Policy.

Mathevet, R., Targowla, S., Anbarashan, M., Venkatasubramanian, G., Ayyappan, N., & Bautès, N. (2020). *Entre urbanisation et patrimonialisation : le lac d'Oussudu en devenir (Pondichéry, Tamil Nadu), Inde du Sud*. Cahiers d'Outre-Mer, 73(281), 129–162.

Mosse, D. (2003). *The Rule of Water: Statecraft, Ecology and Collective Action in South India*. Oxford University Press.

Ottinger, M., Bachofer, F., Huth, J., & Kuenzer, C. (2021). *Mapping Aquaculture Ponds for the Coastal Zone of Asia with Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series*. Remote Sensing, 14(1), 153.

Palanisami, K., Ranganathan, C. R., & Kadiri, M. G. (2009). *Tank performance and multiple uses in Tamil Nadu*. IWMI-Tata Policy Briefs

Palanisami, K., Meinzen-Dick, R., & Giordano, M. (2010). *Climate change and water supplies: Options for sustaining tank irrigation potential in India*. Economic and Political Weekly, 45(26/27), 183–190.

Pan, M., Wood, E. F., Wójcik, R., & McCabe, M. F. (2008). *Estimation of regional terrestrial water cycle using multi-sensor remote sensing observations and data assimilation*. Remote Sensing of Environment, 112(4), 1282–1294.

Philip, G. M., & Watson, D. F. (1985). *A precise method for determining contoured surfaces*. Australian Petroleum Exploration Association Journal, 22, 205–212.

Reddy, V. R. (2002). *Water security and sustainability through tanks in Andhra Pradesh*. Economic and Political Weekly, 37(26), 2553–2561.

Richard-Ferroudji, A., Landy, F., Mathevet, R., Venkatasubramanian, G., & Verdelli, L. (2023). *Ranimer un patrimoine*. Études Rurales, 211, 76–99.

Roume, A. (2021). *Ressources invisibles et mémoire hydraulique : L'effacement des tanks dans les territoires périurbains du Tamil Nadu*. Géocarrefour, 96(1).

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., ... & Zhu, Z. (2014). *Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research*. Remote Sensing of Environment, 145, 154–172.

Samuel Corgne. (2025).

Schumann, G. J.-P., & Bates, P. D. (2018). *The need for a high-accuracy, open-access global DEM*. Frontiers in Earth Science, 6, 225.

Sun, Z., Luo, J., Yang, J., Yu, Q., Zhang, L., Xue, K., & Lu, L. (2020). *Nation-scale mapping of coastal aquaculture ponds with Sentinel-1 SAR data using Google Earth Engine*. Remote Sensing, 12(18), 3086.

Sur, K., Verma, V. K., & Pateriya, B. (2021). *Surface water estimation at regional scale using hybrid techniques in GEE environment – A case study on Punjab State of India*. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 24, 100625.

Tian, P., Liu, Y., Li, J., Pu, R., Cao, L., Zhang, H., Ai, S., & Yang, Y. (2022). *Mapping Coastal Aquaculture Ponds of China Using Sentinel SAR Images in 2020 and Google Earth Engine*. Remote Sensing, 14(21), 5372.

Tulbure, M. G., Broich, M., Stehman, S. V., & Kommareddy, A. (2016). *Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region*. Remote Sensing of Environment, 178, 142–157.

Vaidyanathan, A. (2001). *Tanks of South India*. Centre for Science and Environment.

Venot, J. P., Bharati, L., Giordano, M., Molle, F., & Rao, H. (2017). *Restoring tanks in India: a critical review of the past and present*. IWMI Working Paper.

Watson, D. F., & Philip, G. M. (1985). *A refinement of inverse distance weighted interpolation*. Geoprocessing, 2, 315–327.

Wulder, M. A., & Coops, N. C. (2014). *Make Earth observations open access*. Nature, 513(7516), 30–31.

Yang, X., Qin, Q., Yésou, H., Ledauphin, T., Koehl, M., Grussenmeyer, P., & Zhu, Z. (2020). *Monthly estimation of the surface water extent in France at a 10-m resolution using Sentinel-2 data*. Remote Sensing of Environment, 244, 111803.

- ☐ Bakker, K. (2001). Paying for water: Water pricing and equity in England and Wales. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 26(2), 143–164.
- ☐ Batchelor, C., Rama Mohan Rao, M. S., & James, A. J. (2003). Watershed development: A solution to water shortages in semi-arid India or part of the problem? *Land Use and Water Resources Research*, 3(1), 1–10.
- Chopra, K., & Gulati, S. C. (2001). Land degradation and economic sustainability. *Ecological Economics*, 36(2), 181–193.
- Kumar, M. D., & Singh, O. P. (2001). Market instruments for demand management in the face of scarcity and overuse of water in Gujarat, Western India. *Water Policy*, 3(5), 387–403.
- Kumar, P., Lal, R., & Goswami, R. (2020). Rejuvenation of traditional tanks in India: A sustainable approach for water management. *Current Science*, 119(5), 820–828.
- Ludden, D. (1985). *Peasant History in South India*. Princeton University Press.
- Narain, V. (2014). Whose land? Whose water? Water rights, equity and social justice in India. *International Journal of Water Resources Development*, 30(1), 20–33.
- Rajasekaran, K. (2015). Traditional water harvesting systems of South India: Relevance and lessons. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 14(1), 98–106.
- Sengupta, N. (1993). *User-Friendly Irrigation Designs*. Sage Publications.
- Shah, T. (2003). *Water Institutions in India: Structure, Performance and Change*. IWMI-Tata Water Policy Program.
- Shah, T., & Raju, K. V. (2004). Rethinking rehabilitation: socio-ecology of tanks and water harvesting in Rajasthan, north-west India. *Water Resources Development*, 20(3), 353–367.
- Stein, B. (1980). *Peasant State and Society in Medieval South India*. Oxford University Press.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). Guilford Press.
- Pan, M., Wood, E. F., Wójcik, R., & McCabe, M. F. (2008). *Estimation of regional terrestrial water cycle using multi-sensor remote sensing observations and data assimilation*. *Remote Sensing of Environment*, 112(4), 1282–1294.
- Tulbure, M. G., Broich, M., Stehman, S. V., & Kommareddy, A. (2016). *Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region*. *Remote Sensing of Environment*, 178, 142–157.
- Kamal Serrihni. (2024)

Annexes

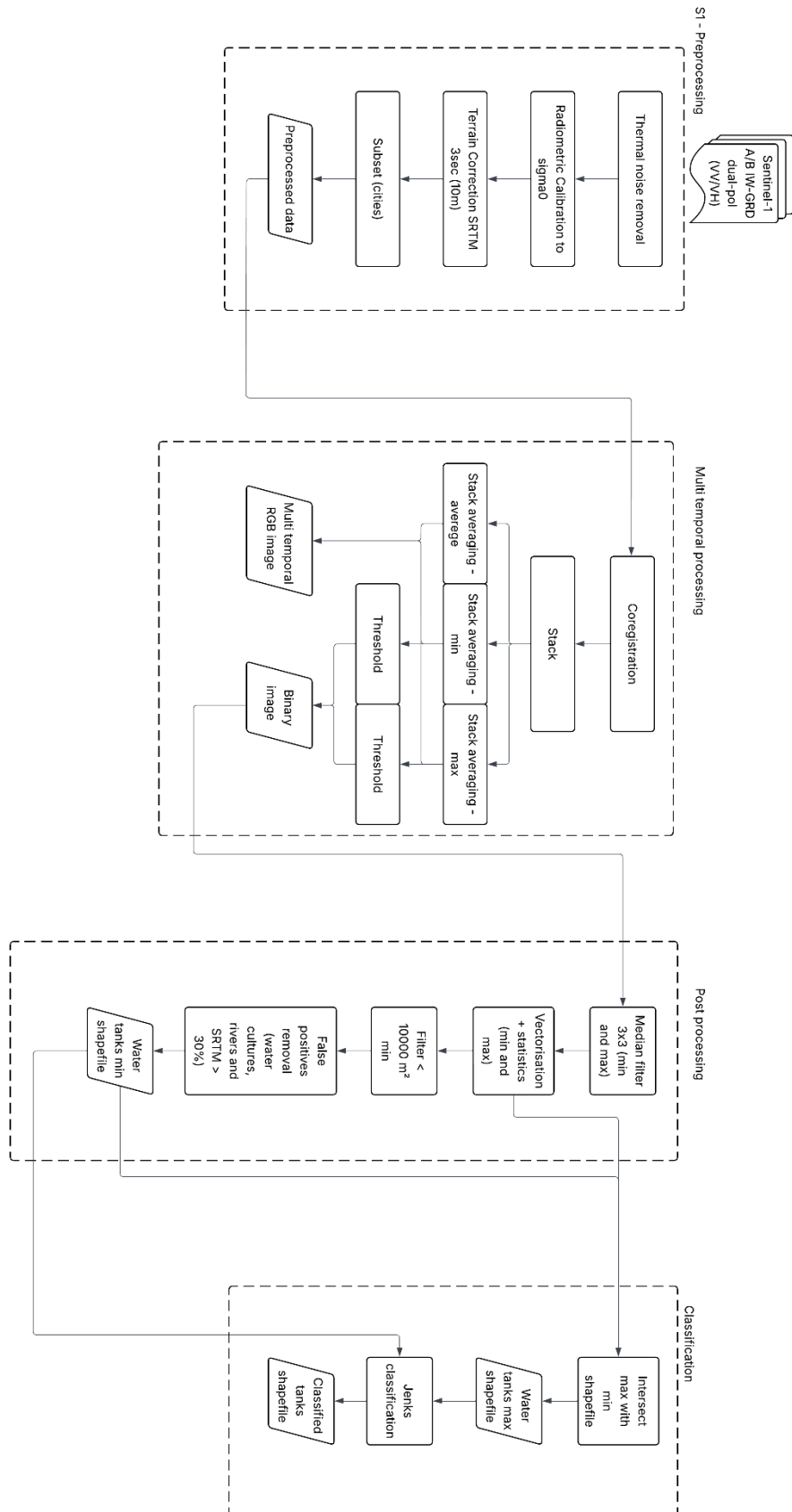


Figure 15 : Logigramme complet de la méthode de traitement d'image

Questionnaire tanks

1. Name or first name (optional)

2. Gender

- ☐ Female
- ☐ Male
- ☐ Other

3. Age

4. Main occupation

- ☐ Farmer
- ☐ Livestock breeder
- ☐ Fisher
- ☐ Employee
- ☐ Unemployed
- ☐ Other

5. Village/locality

6. Do you live near a tank?

- ☐ Less than 1 km
- ☐ More than 1 km
- ☐ Other

7. Do you use this tank?

- ☐ Less than 1 km
- ☐ More than 1 km
- ☐ Other

8. If yes, for what purpose(s)?

- ☐ Irrigation
- ☐ Drinking water
- ☐ Livestock
- ☐ Fishing
- ☐ Other

9. Do you observe seasonal variations in the tank's level?

- ☐ Yes
- ☐ No
- ☐ Don't know
- ☐ Other

10. When the tank is empty, do you experience any difficulties in your daily life?

- ☐ Less than 1 km
- ☐ More than 1 km
- ☐ Other

11. If yes, which ones?

- ☐ Agricultural losses
- ☐ Less domestic water
- ☐ Long distance to fetch water
- ☐ Livestock issues
- ☐ Other

12. When the tank is full, does it improve your situation?

- ☐ Less than 1 km
- ☐ More than 1 km
- ☐ Other

13. If yes, in what way?

- ☐ Better harvests
- ☐ Easier access to water
- ☐ Fishing activity
- ☐ Less effort required
- ☐ Other

14. What alternatives do you use when the tank is empty?

- ☐ Wells
- ☐ Water truck
- ☐ River
- ☐ Buying water
- ☐ None
- ☐ Other

15. Have you ever considered moving because of the lack of water?

- ☐ Yes
- ☐ No
- ☐ Not applicable
- ☐ Other

16. Would you like to add something about this tank or other tanks in the area?

Figure 16 : Questionnaire terrain

Scripts Python utilisés

Reprojection et découpage d'un raster selon un shapefile

```
import rasterio
from rasterio.warp import calculate_default_transform, reproject, Resampling
from rasterio.mask import mask
import geopandas as gpd
import os

# --- Chemins des fichiers (à adapter selon votre environnement de travail) ---
chemin_raster_source =
chemin_raster_reprojete =
chemin_vecteur =
chemin_sortie_final =

# --- Définition du système de coordonnées cible ---
crs_cible = "EPSG:32644" # Exemple : UTM zone 44N, utilisé notamment pour
l'Inde

# --- Étape 1 : Reprojection du raster ---
print("Début de la reprojection...")

with rasterio.open(chemin_raster_source) as src:
    # Calcul des paramètres de transformation vers le nouveau CRS
    transform, width, height = calculate_default_transform(
        src.crs, crs_cible, src.width, src.height, *src.bounds)

    # Mise à jour du profil (métadonnées) du raster
    profil = src.meta.copy()
    profil.update({
        'crs': crs_cible,
        'transform': transform,
        'width': width,
        'height': height
    })

    # Écriture du raster reprojété
    with rasterio.open(chemin_raster_reprojete, 'w', **profil) as dst:
        for i in range(1, src.count + 1): # Boucle sur les bandes du raster
```

```

        reproject(
            source=rasterio.band(src, i),
            destination=rasterio.band(dst, i),
            src_transform=src.transform,
            src_crs=src.crs,
            dst_transform=transform,
            dst_crs=crs_cible,
            resampling=Resampling.nearest # Résampling en mode nearest-
neighbor
        )

print("Reprojection terminée. Fichier enregistré à :",
      chemin_raster_reprojete)

# --- Étape 2 : Découpage du raster selon une couche vecteur ---
print("Début du découpage...")

# Lecture des géométries du shapefile
vecteur = gpd.read_file(chemin_vecteur)
geometries = vecteur.geometry.values # Extraction des géométries

# Application du masque de découpage
with rasterio.open(chemin_raster_reprojete) as src:
    raster_decoupe, transform = mask(src, geometries, crop=True)

    # Mise à jour des métadonnées pour correspondre au raster découpé
    out_meta = src.meta.copy()
    out_meta.update({
        "driver": "GTiff",
        "height": raster_decoupe.shape[1],
        "width": raster_decoupe.shape[2],
        "transform": transform
    })

# Écriture du raster découpé
with rasterio.open(chemin_sortie_final, "w", **out_meta) as dest:
    dest.write(raster_decoupe)

print("Découpage terminé. Le fichier a été enregistré à :",
      chemin_sortie_final)

```

Vectorisation d'un raster binaire avec filtrage

```

import rasterio
import geopandas as gpd
from rasterio.features import shapes
from shapely.geometry import shape
import numpy as np
from pyproj import CRS

def raster_to_vector_with_filter(input_raster, output_vector,
min_area_m2=1000):
    """
    Convertit un raster binaire en entités vectorielles (polygones), puis
    filtre celles
    dont la surface est inférieure à une valeur seuil (en m²).

    Paramètres :
        input_raster (str) : chemin du fichier raster binaire en entrée
    """

```

```

        output_vector (str): chemin de sortie du fichier vectoriel
        (GeoPackage ou shapefile)
        min_area_m2 (int) : surface minimale en m² pour conserver un polygone
    """

    # --- Étape 1 : Lecture du raster ---
    with rasterio.open(input_raster) as src:
        image = src.read(1) # Lecture de la première bande
        mask = image == 1   # Seuls les pixels de valeur 1 seront vectorisés
        transform = src.transform
        src_crs = src.crs or CRS.from_epsg(32644) # Utilisation d'un CRS
        par défaut si absent

    # --- Étape 2 : Vectorisation (extraction des formes depuis le raster) ---
    geometries = []
    for geom, value in shapes(image, mask=mask, transform=transform):
        if value == 1:
            geometries.append(shape(geom)) # Conversion en objets shapely

    # --- Étape 3 : Création d'un GeoDataFrame ---
    gdf = gpd.GeoDataFrame(geometry=geometries, crs=src_crs)

    # --- Étape 4 : Calcul des surfaces (en m²) ---
    gdf['surface_m2'] = gdf.geometry.area

    # --- Étape 5 : Filtrage des objets selon la surface minimale ---
    gdf = gdf[gdf['surface_m2'] >= min_area_m2]

    # --- Étape 6 : Export du fichier vectoriel ---
    gdf.to_file(output_vector, driver="GPKG") # Alternative : "ESRI
    Shapefile"

    print(f" {len(gdf)} objets vectoriels exportés dans : {output_vector}")

# --- Exemple d'appel de la fonction ---
raster_to_vector_with_filter(
    input_raster=,
    output_vector=,
    min_area_m2=10000
)

```

Filtrage spatial avec couches auxiliaires

```

import geopandas as gpd
import os

# === CHEMINS DES FICHIERS ===
chemin_reservoirs =
chemin_cultures =
chemin_rivieres =
chemin_sortie_base

# === SEUILS DE SUPERPOSITION AVEC LES CULTURES (en pourcentage) ===
seuils_superposition = [30]

# === CHARGEMENT DES COUCHES VECTORIELLES ===
print("Chargement des couches...")
gdf_reservoirs = gpd.read_file(chemin_reservoirs)

```

```

gdf_cultures = gpd.read_file(chemin_cultures)
gdf_rivieres = gpd.read_file(chemin_rivieres)

# --- Vérification de la cohérence des systèmes de coordonnées ---
assert gdf_reservoirs.crs == gdf_cultures.crs == gdf_rivieres.crs, "Les
systèmes de projection ne correspondent pas."

# === CALCULS SPATIAUX ===
print("Calcul des surfaces et des intersections...")

# Calcul de la surface de chaque réservoir
gdf_reservoirs["res_area"] = gdf_reservoirs.geometry.area

# Fonction pour calculer la surface d'intersection entre un réservoir et les
cultures
def surface_intersection(geom):
    return gdf_cultures.intersection(geom).area.sum()

# Application de l'intersection à chaque réservoir
gdf_reservoirs["inter_cultures_area"] =
gdf_reservoirs.geometry.apply(surface_intersection)

# Calcul du pourcentage de superposition avec les cultures
gdf_reservoirs["inter_pct"] = (gdf_reservoirs["inter_cultures_area"] /
gdf_reservoirs["res_area"]) * 100

# Union géométrique des rivières (pour les tests d'intersection ultérieurs)
riviere_union = gdf_rivieres.unary_union

# === FILTRAGE MULTI-SEUILS DES RÉSERVOIRS ===
for seuil in seuils_superposition:
    print(f"\n Traitement pour un seuil de superposition de {seuil} %...")

    # Sélection des réservoirs avec faible superposition aux cultures
    gdf_filtrés = gdf_reservoirs[gdf_reservoirs["inter_pct"] <= seuil]

    # Exclusion des réservoirs intersectant une rivière
    gdf_final = gdf_filtrés[~gdf_filtrés.geometry.intersects(riviere_union)]

    # Définition du chemin de sortie
    nom_fichier = f"reservoirs_filtrés_{seuil}pct.shp"
    chemin_sortie = os.path.join(chemin_sortie_base, nom_fichier)

    # Export du résultat final
    print(f" Export du résultat vers : {chemin_sortie}")
    gdf_final.drop(columns=["inter_cultures_area", "inter_pct",
"res_area"]).to_file(chemin_sortie)

print(" \n Traitement terminé pour tous les seuils.")

```

Intersection et dissolution des réservoirs max

```

import geopandas as gpd

# === CHARGEMENT DES COUCHES VECTORIELLES ===
gdf_max = gpd.read_file()
gdf_min = gpd.read_file()

# === VÉRIFICATION ET HARMONISATION DES SYSTÈMES DE COORDONNÉES ===
if gdf_max.crs != gdf_min.crs:

```

```

gdf_min = gdf_min.to_crs(gdf_max.crs)

# === AJOUT D'UN IDENTIFIANT UNIQUE AUX POLYGONES MIN (si nécessaire) ===
if 'minfid' not in gdf_min.columns:
    gdf_min['minfid'] = gdf_min.index

# === INTERSECTION SPATIALE ===
# Coupe les polygones "max" par les polygones "min"
intersection = gpd.overlay(gdf_max, gdf_min[['geometry', 'minfid']],
how='intersection')

# === DISSOLUTION PAR IDENTIFIANT ===
# Regroupe tous les fragments issus d'un même polygone "min"
dissolved = intersection.dissolve(by='minfid', as_index=False)

# === PROJECTION POUR CALCUL DE SURFACE (en mètres carrés) ===
# Passage en projection métrique si ce n'est pas déjà le cas
if not gdf_max.crs.is_projected:
    dissolved = dissolved.to_crs(epsg=32644) # Exemple : UTM zone 44N (Tamil
Nadu)

# Calcul de la surface
dissolved["surface_m2"] = dissolved.geometry.area

# === EXPORT DU RÉSULTAT ===
chemin_sortie =
dissolved.to_file(chemin_sortie, driver="ESRI Shapefile")

print("Intersection, regroupement et calculs terminés.")

```

Analyse de l'évolution des surfaces en eau

```

import geopandas as gpd

# === CHARGEMENT DES COUCHES VECTORIELLES ===
gdf_max = gpd.read_file()
gdf_min = gpd.read_file()

# === VÉRIFICATION ET HARMONISATION DES SYSTÈMES DE COORDONNÉES ===
if gdf_max.crs != gdf_min.crs:
    gdf_min = gdf_min.to_crs(gdf_max.crs)

# === AJOUT D'UN IDENTIFIANT UNIQUE AUX POLYGONES MIN (si nécessaire) ===
if 'minfid' not in gdf_min.columns:
    gdf_min['minfid'] = gdf_min.index

# === INTERSECTION SPATIALE ===
# Coupe les polygones "max" par les polygones "min"
intersection = gpd.overlay(gdf_max, gdf_min[['geometry', 'minfid']],
how='intersection')

# === DISSOLUTION PAR IDENTIFIANT ===
# Regroupe tous les fragments issus d'un même polygone "min"
dissolved = intersection.dissolve(by='minfid', as_index=False)

# === PROJECTION POUR CALCUL DE SURFACE (en mètres carrés) ===
# Passage en projection métrique si ce n'est pas déjà le cas
if not gdf_max.crs.is_projected:
    dissolved = dissolved.to_crs(epsg=32644) # Exemple : UTM zone 44N (Tamil
Nadu)

```

```
# Calcul de la surface
dissolved["surface_m2"] = dissolved.geometry.area

# === EXPORT DU RÉSULTAT ===
chemin_sortie =
dissolved.to_file(chemin_sortie, driver="ESRI Shapefile")

print("Intersection, regroupement et calculs terminés.")
```



POLYTECH[®]
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Tristan Le Pape
2024-2025

Titre Stage de recherche – Analyse géospatiale des réservoirs

Résumé :

Ce travail de stage a consisté à cartographier et analyser les réservoirs à ciel ouvert dans le Tamil Nadu à l'aide d'images radar Sentinel-1. Une méthode automatisée a été développée pour détecter ces réservoirs et évaluer leur stabilité hydrologique sur l'année 2024. L'analyse a mis en évidence de fortes disparités entre réservoirs stables et asséchés, avec un bon niveau de précision. En complément, des recommandations ont été formulées en faveur de la réhabilitation des réservoirs saisonniers, souvent négligés malgré leur rôle essentiel. Le travail fournit un outil utile pour la planification hydrique locale.

Mots Clés : Télédétection, réservoirs à ciel ouvert, Tamil Nadu, hydrologie, classification, SIG, analyse spatiale, cartographie, gestion de l'eau, réhabilitation.

[Entreprise] : Institut français de Pondichéry

Adresse : 11 Saint Louis Street, Pondichéry, 605001 Inde

Tuteur entreprise : Samuel Corgne

Fonction : Directeur département géomatique

Tuteur académique : Laura Verdelli