
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Spatialisation de l'implantation de
nouveaux réservoirs d'eau autour de
Pondichéry à l'aide de la télédétection

Institut française à Pondichéry

11, St Louis St, White Town, Puducherry,
605001, Inde

Tuteur entreprise :

Samuel CORGNE

Directeur du département de géomatique

Tuteur académique :

Mathilde GRALEPOIS

Alexis BURGER

IUT

2024-2025

Sommaire

1. Présentation de la structure d'accueil	3
2. Ma mission au sein de l'IFP	6
3. Déroulement de la mission	7
4. Présentation du livrables de mission	24
5. Retour réflexif sur l'expérience	25
Annexe	27
Bibliographie	36
Table des Figures	37
Table des Matières	39

1. Présentation de la structure d'accueil



Figure 1 : Façade de l'IFP

Source : Botanist~tawiki disponible sur Wikipedia

1.1. Fondement de l'IFP

L'institut française de Pondichéry (IFP) est un institut de recherche placé sous la co-tutelle du ministère des affaires étrangères et du centre nationale de recherches scientifique (CNRS). Avec le centre des sciences humaine (CSH) basé à New Delhi, il s'inscrit dans les recherches « savoir et monde indien » du CNRS. L'IFP a pour objectif l'étude de la société indienne et à la conservation du patrimoine culturel et naturel de l'Inde. En effet depuis 2005, la collection des manuscrits shivaïote gravé sur des feuilles de palmiers est inscrit au programme « mémoire du monde » de l'UNESCO [1]. Avec cette collection de 8600 parchemins conservé et entretenu, la bibliothèque de l'IFP connaît une renommé international dans la recherche en indologie. Considéré comme un trésor du patrimoine oral et écrit de la culture prémoderne indienne, elle abrite des manuscrit principalement des manuscrit du XVIIIe siècle mais aussi certain vieux de plus de deux milles ans [2]. Bien plus qu'un instrument diplomatique, comme toutes les autres unités mixtes des instituts de recherches à l'étranger (UMIFRE), l'IFP permet la propagation de la pensée scientifique par des séminaires destinées aux expatriés ou aux locaux. Ainsi, l'IFP est un instrument de partage d'expertise entre nos deux cultures.

1.2. Histoire de l'IFP

L'IFP a été fondé en 1955 après les accords entre l'Inde et la France sur l'incorporation des possession des territoires de Pondichéry, Karikal, Mahé et Yanaon. Sous la volonté des chercheurs français de construire un grand institut d'indologie, l'ancien édifice colonial (Figure 1), d'abord une résidence commerciale, puis lors de sa passation au domaine public au XIXe, abritant les services publics, les trésors publics et la perceptions avant de devenir l'Institut de recherche que l'on connaît. Témoignant du pacifisme de cette entente bilatérale, l'IFP est un symbole d'une solution amical obtenue par la négociation. Ainsi, le premier ministre indien de

l'époque, Nehru, lors de sa visite à Pondichéry le 4 octobre 1955, il visite en premier lieu l'IFP pour symboliser l'importance qu'accorde le gouvernement indien à l'institut et son attachement à la préservation de l'identité française à Pondichéry [1]. Jusqu'à nos jours, il est a constaté une certaine sympathie entre les gouvernements indiens et français avec d'innombrable accord commerciaux comme la vente de rafale ou la fabrication de centrale nucléaire, mais aussi de la population envers notre culture et une curiosité saine de la découvrir.

1.3. Organisation de l'IFP

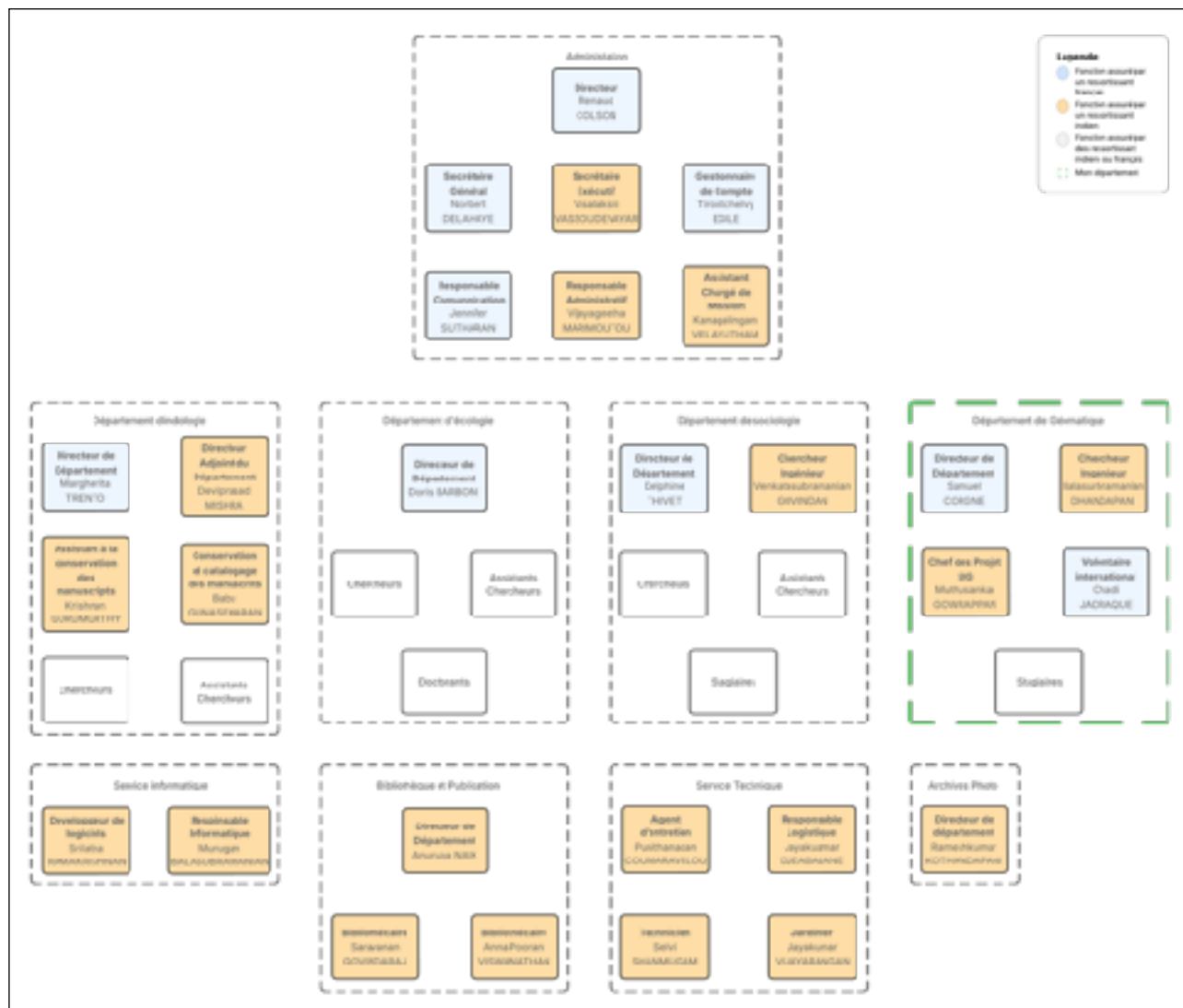


Figure 2 : Organigramme de l'institut française de Pondichéry
Source : Alexis BURGER, réalisé à partir du site de l'IFP et des observations

Pour étudier la société indienne, l'IFP est composé de quatre départements : L'indologie, l'écologie, la sociologie et la géomatique. (Figure 2)

L'indologie se concentre sur la préservation, la conservation, la traduction et l'étude des manuscrits shivaïtes. Le département d'indologie est le premier à être fondé lors de la fondation de l'IFP, il se situe dans l'aile gauche du deuxième étage (voir Figure 1), où l'on retrouve la salle d'archive de conservation des manuscrits (Figure 3). Lors de mon séjour, une exposition sur l'étude des matériaux de conservation de ces manuscrits était réalisée en collaboration avec l'université de Hambourg, montrant le rayonnement de ces archives à l'international.



Figure 3 : Archive des manuscrits shivaïtes de l'IFP
Source : Alexis BURGER

Le département d'écologie est le second à avoir été. Il a l'objectif de documenter les conditions environnementales et leur évolution de l'Inde du Sud. Il se concentre sur des recherches multidisciplinaires dans les domaines de l'écologie forestière, la taxonomie du végétale, la paléoécologie et l'étude des services de pollinisation.

Le département de sociologie s'intéresse au domaine du développement rural et de la gestion des ressources naturelles. Il regroupe ainsi huit disciplines dont la géographie, la sociologie, l'économie, l'anthropologie, l'histoire, l'archéologie, la langue et la littérature tamoules, et le droit. Le département est le plus important de l'IFP. Il coordonne une trentaine de projets interdisciplinaires avec les autres pôles de l'IFP, traitant de la culture tamoule moderne. Il gère aussi l'Observatoire des Dynamiques Rurales et des Inégalités en Inde du Sud (ODRIIS), une vaste campagne de questionnaires aux près de deux cents familles pour analyser l'évolution de leur travail, de l'agriculture, de la finance et des mobilités. Il se concentre de questionner toujours les mêmes familles pour ainsi suivre leur évolution, tout en rajoutant une cinquantaine de nouvelles familles à chaque tirage pour ajuster l'âge moyen des interviewés à la moyenne nationale dans un souci de représentation de la population.



*Figure 4 : Salle d'exposition entre le département d'indologie et de sociologie
Source : Alexis BURGER, 2025*

Le département de géomatique est le plus récent et le plus petit, fondé qu'en 2022. Il analyse les interactions entre dynamiques environnementales et organisation sociale. Les travaux du département s'organisent autour de trois axes principaux : le suivi de l'évolution de la végétation terrestre et côtière, l'évaluation de la vulnérabilité des environnements humains et naturels face aux pressions liées aux changements climatiques et aux activités anthropiques, et le développement d'outils numériques pour la gestion, l'analyse et le partage des données scientifiques [1].

L'IFP possède donc un ensemble de départements qui peuvent traiter de sujets interdisciplinaires entre eux. De cette interdisciplinarité, quatre grands sujets sont étudiés : la forêt, les côtes, les manuscrits et l'agroécosystème.

2. Ma mission au sein de l'IFP

2.1. Description de la mission

Le projet PATAMIL, soutenu par l'IFP, combine recherche scientifique, action de terrain et échanges interculturels afin d'améliorer les systèmes alimentaires en France et en Inde. Mon stage s'inscrit dans cette dynamique en mobilisant les outils de la géomatique (analyse spatiale, traitement d'images satellites, production de cartes thématiques) pour générer des données géoréférencées permettant d'identifier et de caractériser les ressources en eau.

Ces résultats nourrissent les réflexions sur la gestion durable des territoires et la sécurité

alimentaire, tout en renforçant l'expertise technique et scientifique du département de géomatique de l'IFP.

Mon travail contribue également aux objectifs plus larges de l'IFP, centrés sur l'étude des dynamiques sociales et environnementales de l'Inde contemporaine. Plus spécifiquement, ma mission visait à définir des critères d'implantation de nouveaux réservoirs en croisant dimensions hydrologiques, topographiques et sociales, afin d'apporter un appui scientifique aux politiques de gestion de l'eau et d'aménagement durable.

2.2. Mes attentes de la mission

L'approche retenue reposait sur la télédétection pour localiser les réservoirs et estimer leurs caractéristiques (taille, volume, périmètre...). À partir de ces données, mon intuition était de s'inspirer des modèles gravitaires avec les charges de potentiels et de faire une analogie avec la consommation en eau. Il a fallu délimiter les zones d'influence des réservoirs (surfaces potentiellement irriguées) et de les comparer aux zones en demande (urbaines et agricoles).

Un indicateur a ensuite été élaboré afin de qualifier l'intérêt d'une zone pour l'implantation de réservoirs, en le combinant avec d'autres critères dérivés du modèle numérique de terrain (MNT) et de la pédologie (l'étude des sols). Cette intégration permet de hiérarchiser les zones prioritaires pour la construction de nouveaux réservoirs.

2.3. Intérêt de la mission

L'enjeu central était de quantifier et spatialiser la demande en eau afin de définir des priorités dans la construction de réservoirs. L'approche retenue, fondée sur des critères multiples (hydrologiques, topographiques et sociaux), a permis d'élaborer une méthode transposable et généralisable.

Son intérêt réside dans sa capacité à s'appliquer à différentes échelles : précise à l'échelle locale mais également extensible à l'ensemble du Tamil Nadu. Elle constitue donc un outil d'aide à la décision pour la gestion durable de l'eau et l'aménagement du territoire.

3. Déroulement de la mission

Ma mission s'inscrivait dans une dynamique collective, en articulation avec les travaux de trois autres stagiaires de Polytech Tours (Tristan Le Pape, Manon Couderc, Estelle Chartier), travaillant respectivement sur la télédétection, l'hydrologie des réservoirs et leur évolution temporelle.

Le stage s'est déroulé en deux temps. Une phase commune d'un mois, consacrée à l'apprentissage de la télédétection et des outils associés et une phase individuelle, centrée sur mes objectifs propres : spatialiser les zones favorables à l'implantation de nouveaux réservoirs.

Un colloquium final à l'IFP a permis de présenter nos résultats et d'en discuter collectivement avec les chercheurs.

3.1. Apprentissage de la télédétection

L'entrée dans la mission a reposé sur un exercice pratique de télédétection appliqué aux réservoirs, utilisant les images Sentinel-2. Cet apprentissage a permis de mesurer à la fois les potentialités et les limites de l'approche. La télédétection offre une couverture étendue et une méthode automatisable, mais reste sujette aux incertitudes liées au seuillage et aux contraintes des capteurs optiques (données inutilisables en cas de forte nébulosité).

Pour dépasser ces limites, j'ai développé une méthode de synthèse temporelle : en combinant toutes les images disponibles sur un mois, il est possible de suivre l'évolution annuelle de la surface des réservoirs. Cette approche ouvre la voie à un suivi plus robuste de la dynamique des

ressources en eau, dont Manon a utilisé pour étudier l'évolution des lacs Osudu et Kanagan. (J'ai mis en annexe l'ébauche de mon rapport sur ma méthode de synthèse temporelle)

3.2. Spatialisation de l'implantation de nouveaux réservoirs

La spatialisation de l'implantation de nouveaux réservoirs repose sur la traduction de trois critères clés (consommation en eau, topographie, pédologie) en indicateurs normalisés compris entre 0 et 1. Ces indicateurs sont ensuite moyennés afin de produire un indice global d'intérêt pour l'implantation de nouveaux réservoirs. Ce choix méthodologique permet de comparer des variables de nature différente sur une base commune et de les combiner de manière flexible.

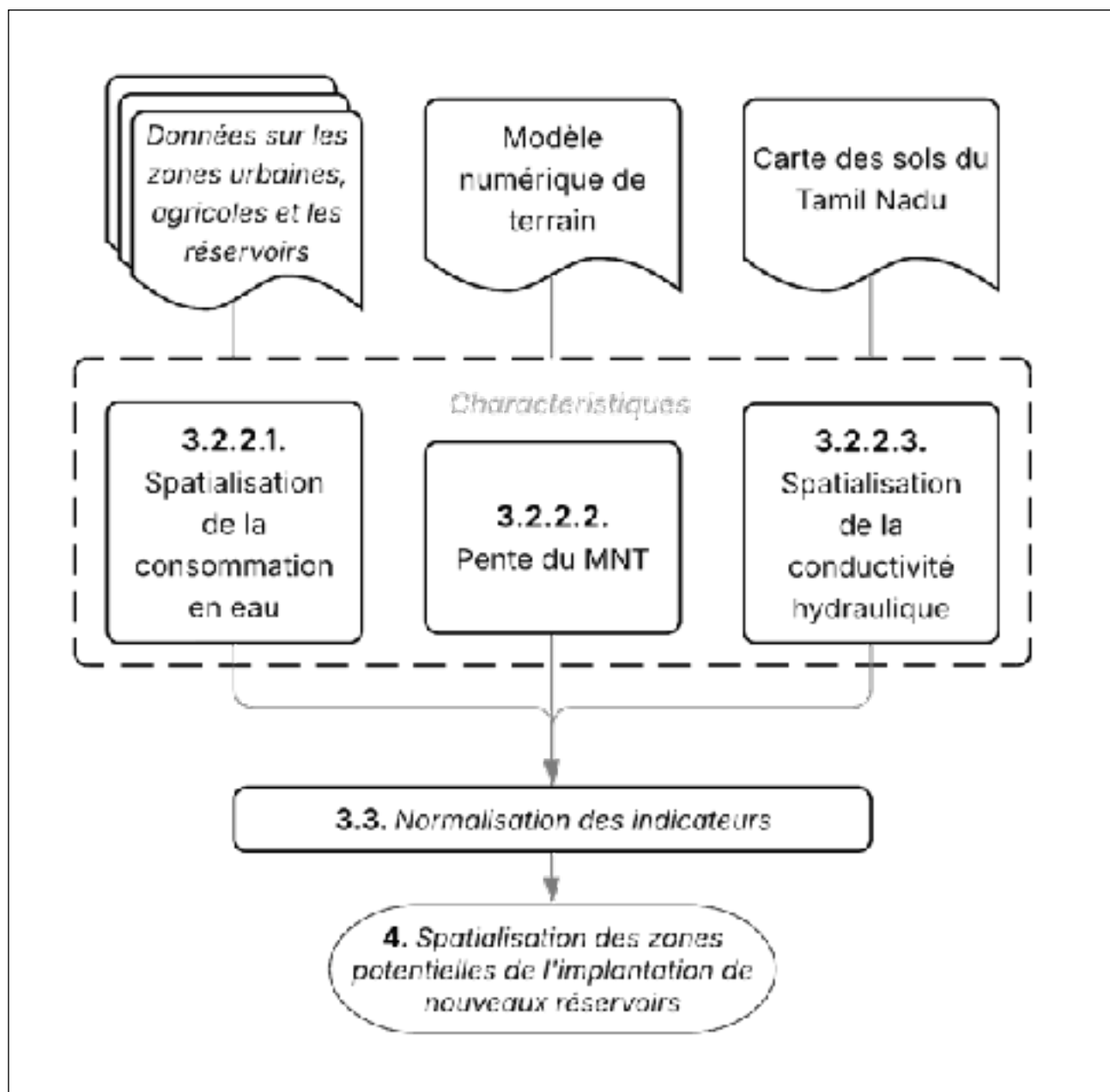


Figure 5 : Logigramme de la méthode
Source : Alexis BURGER

3.2.1. Site d'étude et données

Site d'étude

Limiter l'analyse au seul district de Pondichéry n'aurait pas de sens, car celui-ci est enclavé dans le Tamil Nadu et fortement dépendant de son environnement régional (Source : Pondycan!). J'ai donc choisi d'étendre l'étude aux villes entourant Pondichéry, en incluant une partie des Jawhadu Hills et des Kalvaryan Hills Forest. Ce périmètre offre deux avantages méthodologiques : il capture une diversité d'occupations du sol (zones urbaines, agricoles, forestières) ; il couvre une grande partie du bassin versant de la rivière voisine de Pondichéry, tout en restant inclus dans la tuile des images radar exploitées. Ce choix résulte d'une contrainte technique (liée à la couverture radar), mais il garantit une représentativité spatiale suffisante.



Figure 6 : Délimitation du terrain d'étude

Source : Alexis BURGER, 2025 réalisé à partir des données de Geofabrik

Données mobilisées

- Villes : Geofabrik (<https://download.geofabrik.de/>)
- Réservoirs : extraction par télédétection (Travaux de Tristan)
- Cultures : ESA WorldCover (<https://esa-worldcover.org/en>)
- MNT : Copernicus 30 (<https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3>)

3.2.2. Caractérisation des critères

Afin de définir l'intérêt de l'implantation de nouveaux réservoirs, il est nécessaire de combiner plusieurs dimensions complémentaires. J'ai ainsi choisi d'intégrer trois grands critères : un critère hydrologique, un critère topologique et un critère pédologique.

Le critère hydrologique correspond à la consommation en eau, qui permet d'identifier les zones de forte demande, qu'il s'agisse de zones agricoles ou urbaines. Le critère topologique se base sur l'inclinaison du sol : plus la pente favorise le ruissellement, plus l'eau collectée peut être stockée si un réservoir est installé dans la zone. Enfin, le critère pédologique prend en compte la composition et la perméabilité des sols, car certains types de sols facilitent l'infiltration et le stockage, tandis que d'autres limitent la rétention d'eau.

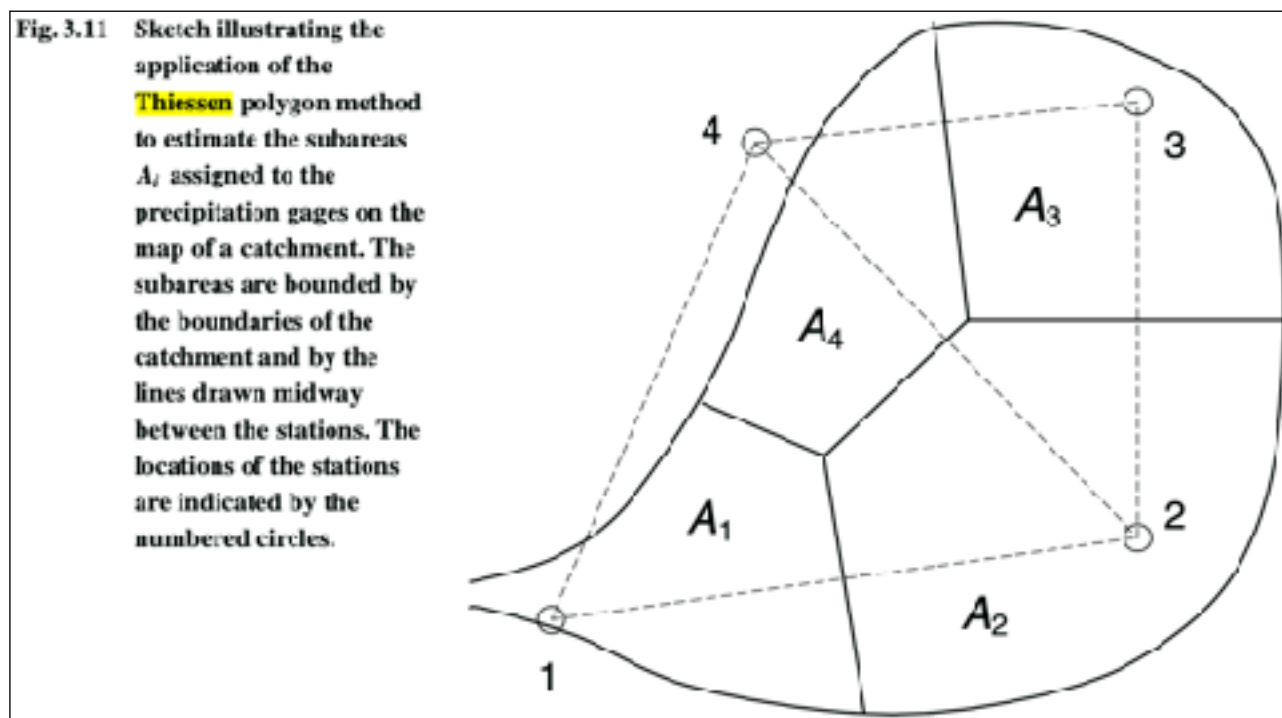
3.2.2.1. Spatialisation de la consommation d'eau

La région étudiée est en situation de stress hydrique. Les données officielles sur la consommation d'eau des villes et des zones agricoles sont absentes ou peu fiables, en raison d'une forte réticence à communiquer sur ce sujet sensible. J'ai donc choisi de recourir à des estimations indirectes basées sur la télédétection et des données démographiques ou agricoles.

3.2.2.1.1. Estimation de la consommation annuel en eau des zones urbaines

Il est possible d'estimer la consommation en eau des zones urbaines en combinant la consommation journalière moyenne par habitant en Inde, la densité de population urbaine, et la surface occupée par les zones urbanisées. Les centroïdes des villes peuvent être obtenus à partir des données de Geofabrik, tandis que l'occupation du sol est fournie par l'ESA. Cependant, cette dernière donne une surface artificialisée qui ne correspond pas nécessairement aux limites administratives des villes.

La méthode des polygones de Thiessen, couramment utilisée en hydrologie, permet d'estimer l'aire d'influence de points tels que des stations météorologiques. Elle consiste à prendre comme frontière entre deux points la médiatrice du segment les reliant. En appliquant cette méthode à un ensemble de points, on obtient une partition de l'espace en zones d'influence distinctes (voir Figure 7).



*Figures 7 : Schéma illustrant l'application de la méthode des polygones de Thiessen
Source : Wilfried BRUTSAERT, 2005*

En extrayant les zones artificialisées du terrain d'étude, il est alors possible d'appliquer la méthode des polygones de Thiessen aux centroïdes des villes, afin de répartir la surface artificialisée entre ces différents points. Cela permet d'obtenir une estimation spatiale de la surface attribuée à chaque ville. La figure 8 montre le résultat du découpage.

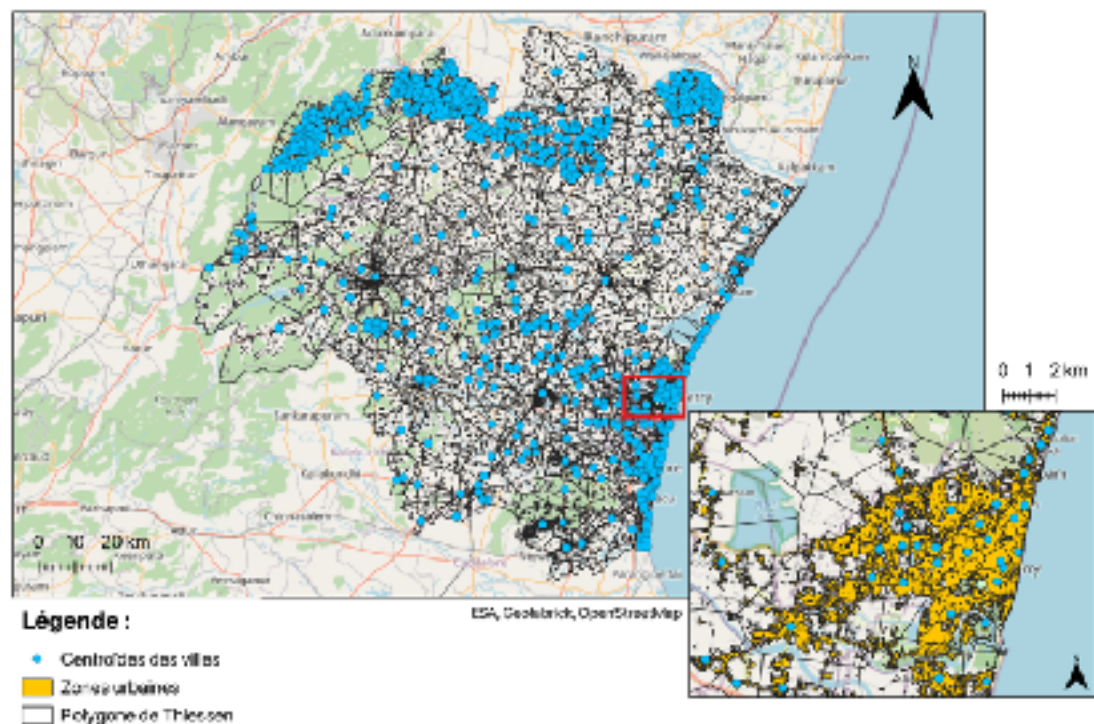


Figure 8 : Découpage de la surface artificialisée via les polygones de Thiessen
Source : Alexis BURGER, 2025

À partir de cette estimation de surface, il suffit d'appliquer la densité de population ainsi que la consommation moyenne correspondant au type de zone urbaine considérée.

Ces valeurs sont ensuite associées à chaque centroïde, fournissant ainsi une estimation ponctuelle de la consommation en eau des zones urbanisées. En l'absence de données précises sur la densité de population de toutes les villes présentes dans le terrain d'étude, il a été décidé d'utiliser celle de Pondichéry, soit 12 568 habitants/km² (Office of the Registrar General & Commissioner, Census of Indian population, 2011, <https://censusindia.gov.in/census.website/data/population-finder>, <https://www.census2011.co.in/data/town/804036-puducherry-puducherry.html>), car elle est relativement élevée et permet d'obtenir une estimation prudente par excès. Concernant la consommation journalière en eau, le ministère du logement et des affaires urbaines recommande une consommation moyenne de 135 L/jour/personne en zone urbaine contre 55 L/jour/personne en zone rurale (Ministry of Jal Shakti, Per Capita Availability of Water, 2020n, <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1604871>).

3.2.2.1.2. Estimation de la consommation annuel en eau des zones agricoles

L'utilisation des données d'occupation du sol (MuthuSankar et al., 2015) combinée aux estimations de la quantité d'eau nécessaire à la production d'un kilogramme de riz et au rendement moyen dans le Tamil Nadu (Surendran et al., 2021) permet d'estimer la consommation d'eau des zones agricoles.

Il est possible d'estimer la consommation de toutes ces parcelles en supposant que toutes les cultures sont des rizières, car elles occupent un quart (26%) des terres agricoles, avec presque la moitié de ses cultures qui sont immergées (46%). (Frédéric Landy & Aurélie Varrel, 2015). Ainsi, il reste à multiplier la surface chacune des parcelles avec le facteur entre 20-30 000 m³/he. (Pierre HEURTEAUX, 1964).

La spatialisation de cette consommation s'effectue en extrayant les surfaces cultivées à partir des données d'occupation du sol. Afin de segmenter ces zones et de permettre une approche ponctuelle, car le fichier ne contient qu'un seul polygone englobant la majorité des surfaces agricoles, il est nécessaire de subdiviser l'occupation du sol à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen. Contrairement aux zones urbaines, les emplacements précis des parcelles agricoles

étant inconnus, une solution consiste à générer un grand nombre de points aléatoires, représentant une approximation des centroïdes des parcelles réelles. L'application de la méthode des polygones de Thiessen à ces points aléatoires permet de découper la surface agricole en unités spatiales, dont la superficie est mesurable. (Voir figure 9)

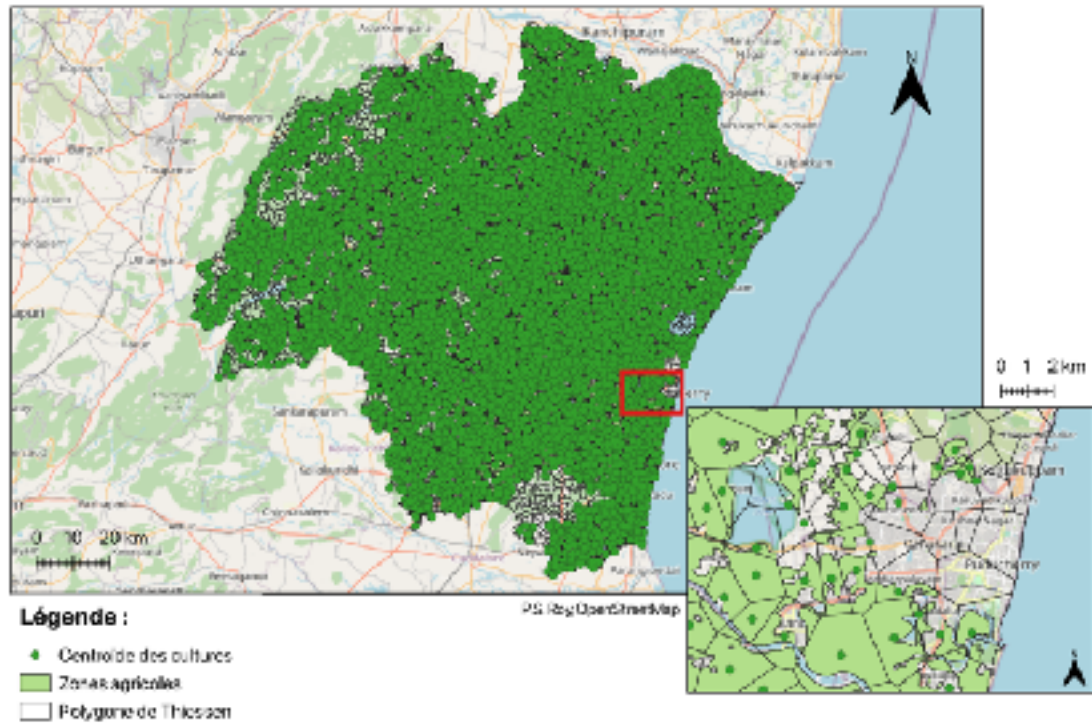


Figure 9 : Découpage de la surface agricole via les polygones de Thiessen
Source : Alexis BURGER, 2025

On peut ainsi attribuer à chaque centroïde une consommation d'eau estimée à l'aide de la formule suivante :

Soit une parcelle agricole i appartenant au terrain d'étude T ,

$$\forall i \in T, C_i = S_i \cdot c_{riz}$$

Où

$$\begin{cases} C_i : \text{Consommation en eau de la parcelle } i \\ S_i : \text{Surface de la parcelle } i \\ c_{riz} : \text{consommation d'eau pour } 1m^2 \text{ de rizi\`ere} \end{cases}$$

Sachant que c_{riz} = conso par kg * production riz par m2

3.2.2.1.3. Estimation de l'eau stocké dans les réservoirs

En partant du principe que les réservoirs télédétektés sont observés à leur capacité maximale (voir figure 10), on peut supposer que le volume d'eau stocké sur une année est équivalent à cette capacité, dans la mesure où l'on néglige les pertes par évapotranspiration et où l'eau est entièrement utilisée pour l'alimentation des zones urbaines et agricoles. Par ailleurs, les réservoirs se remplissent majoritairement pendant la période de la mousson, ce qui permet de considérer que, le reste de l'année, les faibles précipitations compensent à peine les pertes par évapotranspiration, sans contribuer significativement au remplissage.

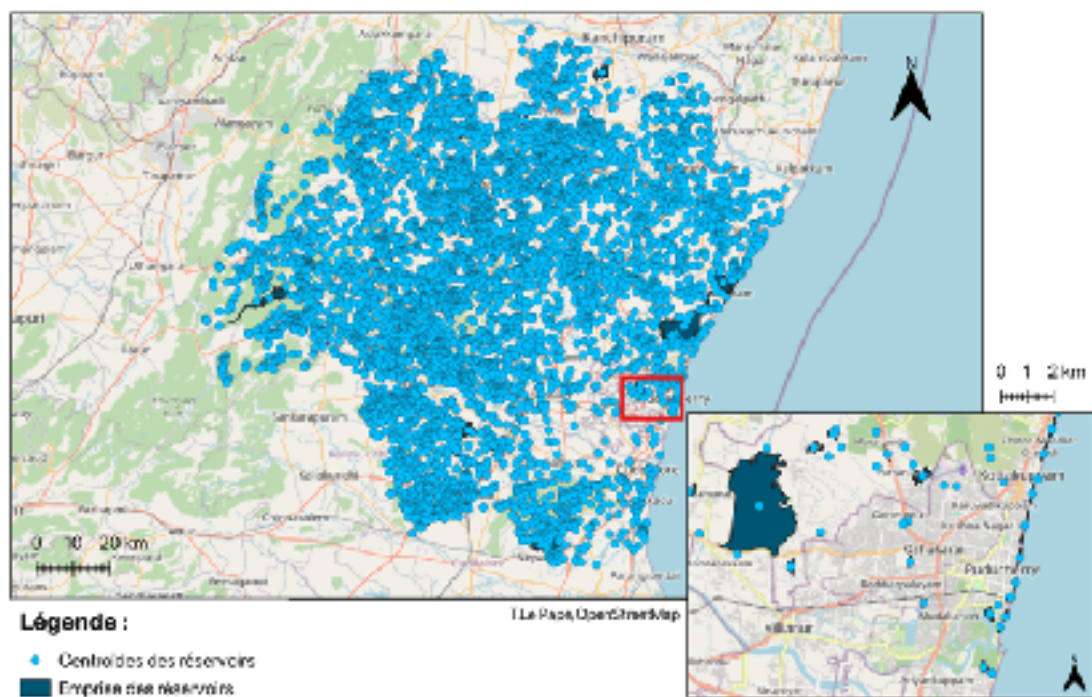


Figure 10 : Réservoirs détectés selon la méthode de Tristan LE PAPE
Source : Tristan LE PAPE, 2025

Pour estimer le volume d'eau stocké dans un réservoir durant une année, nous nous appuyons sur une méthode inspirée de celle d'Ishita *et al.* (2021), qui repose sur la modélisation géométrique du réservoir. Dans leur étude, un réseau de triangles est utilisé pour représenter la surface du lac et en déduire son volume à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Cependant, cette approche a été adaptée, car aucun réseau triangulaire n'était disponible pour notre zone d'étude.

À la place, la grille régulière du MNT, c'est-à-dire un quadrillage de pixels carrés, a été directement utilisée pour approximer le fond du réservoir. Chaque pixel représente une zone de 10×10 m, soit une surface de 100 m^2 .

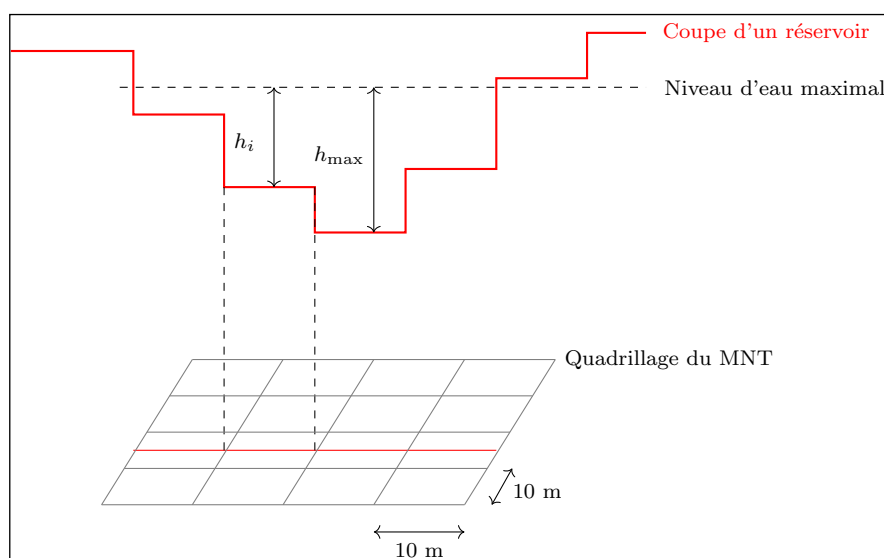


Figure 11 : Schéma de l'estimation du volume d'eau dans un réservoir à l'aide du MNT

Grâce au modèle numérique de terrain (MNT) et pour tout pixel appartenant au réservoir, on veut estimer le volume en eau au-dessus du pixel. Soit un ensemble de pixels i appartenant à un réservoir R , on suppose que l'altitude du bord du réservoir est supposée correspondre à l'altitude maximale du MNT dans la zone concernée, et que le MNT est censé représenter le fond du réservoir.

On définit le volume du réservoir V_R comme la somme de tous les volumes des pixels i appartenant à R . En posant v_i comme le volume au pixel i , on a :

$$v_i = \begin{cases} (h_{\max} - h_i) \times A & \text{si } h_{\max} > h_i \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où $\forall i \in R \begin{cases} h_i : \text{altitude de } i \text{ depuis le MNT} \\ h_{\max} : \text{altitude maximum de } R \\ A : \text{résolution d'un pixel} \end{cases}$

Donc

$$V_R = \sum_{i \in R} v_i = \sum_{i \in R} [(h_{\max} - h_i) \times A]$$

Pour appliquer cette formule à chaque réservoir télédéecté, il est nécessaire d'extraire du raster MNT chacun des pixels d'un réservoir pour ensuite créer un nouveau raster répertoriant tous ses h_i . Ce qui permet de déterminer $h_{\max}$ dans ce réservoir. Connaissant la résolution d'un pixel, il a été possible de connaître leur volume et d'obtenir les v_i , donnant ainsi V_R .

L'estimation du volume d'eau repose sur plusieurs hypothèses simplificatrices qui introduisent des incertitudes.

Tout d'abord, la méthode suppose que le fond du lac est correctement représenté par le MNT, ce qui n'est pas toujours le cas, notamment si la résolution ou la qualité du MNT est insuffisante. Elle néglige la forme réelle du fond du lac, comme les dépressions ou les irrégularités locales, ce qui peut entraîner une sous- ou surestimation du volume.

Ensuite, l'altitude maximale du MNT dans la zone du réservoir est considérée comme le niveau d'eau maximal, ce qui revient à supposer que le lac est toujours plein. Cela ne prend pas en compte les variations interannuelles ou saisonnières du niveau d'eau (hypothèse $V=\text{constante}$), ce qui limite la représentativité temporelle du volume calculé.

Enfin, en l'absence de profils bathymétriques réels, cette méthode reste une estimation théorique : elle fournit un ordre de grandeur mais ne peut être assimilée à une mesure directe.

Pour affiner cette estimation, plusieurs pistes peuvent être envisagées. L'intégration de profils bathymétriques permettrait de mieux représenter la forme réelle du fond des réservoirs. En l'absence de telles données, des méthodes de reconstitution bathymétrique à partir du MNT et d'images satellitaires peuvent être mobilisées.

Par exemple, la simulation du profil bathymétrique à partir de plusieurs DEM et données altimétriques s'est révélée prometteuse dans le suivi des volumes lacustres (Yuan et al., 2024).

De même, l'utilisation conjointe de l'altimétrie satellite et du MNT permettrait d'estimer le niveau d'eau au moment de l'acquisition et ainsi de calculer un volume plus réaliste en fonction du remplissage effectif du réservoir (Xiao et al., 2023).

Enfin, si des données temporelles sur les variations de niveau sont disponibles, il serait pertinent d'introduire une composante dynamique pour estimer l'évolution du volume au cours de l'année.

3.2.2.1.4. Application du filtre gaussien

L'idée est de faire une analogie avec les théories de la relativité générale et de la mécanique céleste pour définir la consommation en eau, comme on peut le voir pour le modèle de Reilly (modélisation de l'attraction des villes) (à partir des cours de H.BAPTISTE, 2025) et les cartes de potentiels en hydrologie et écologie. Cela revient à ce placer dans un système solaire à N corps. Dans ce cas, les points d'attractions sont les zones demandant de l'eau, donc les zones urbaines et agricoles, tandis que les points de répulsions sont les zones stockant de l'eau, donc les réservoirs.

Pour conceptualiser tout cela, le plan est comme un terrain vague avec des collines (réservoirs) et des vallées/cratères (zones agricoles et urbaines). Si on pose une bille qui représente une quantité d'eau, cela montrerait déjà à quel point elle impacte sur son milieu et surtout comment celle-ci est impactée par ses voisins, c'est-à-dire si elle est attirée, repoussée, ... mais surtout de combien ! Ainsi cela permettrait de voir les tensions et pressions qu'exerce une ville, réservoir ou champs sur son territoire. Voir les flux...

La carte des champs d'influence de l'eau est comme un terrain vallonné. Lorsqu'on cherche un endroit où mettre un réservoir, c'est lorsque la bille tombe dans un point d'équilibre, c'est-à-dire que la tangente en ce point est nulle (en physique grave cela aurait été dériver de la vitesse).

$$\forall M \in \mathbb{R}^2 \mid M = (x_M; y_M), \mathcal{C}(M) = k \cdot \sqrt{X(M)^2 + Y(M)^2}$$

Où

$$\begin{cases} k \in \mathbb{K} \\ X(M) = \sum_{i=0}^N = \left[\frac{m_i}{d_{iM}} \cdot (x_i - x_M) \right] \\ Y(M) = \sum_{i=0}^N = \left[\frac{m_i}{d_{iM}} \cdot (y_i - y_M) \right] \\ N = \dim(\{\text{réservoirs} + \text{villes} + \text{champs}\}) \end{cases}$$

(Alexis BURGER réalisé à partir du cours de Jean-julien FLECK, 2022)

Pour simplifier cette approche, Il est possible d'utiliser un filtre gaussien. Il est régulièrement utilisé dans le traitement d'image (CLÉMENT, 2025) et en hydrologie (Piao et Park, 2023) (Kalu et al., 2024).

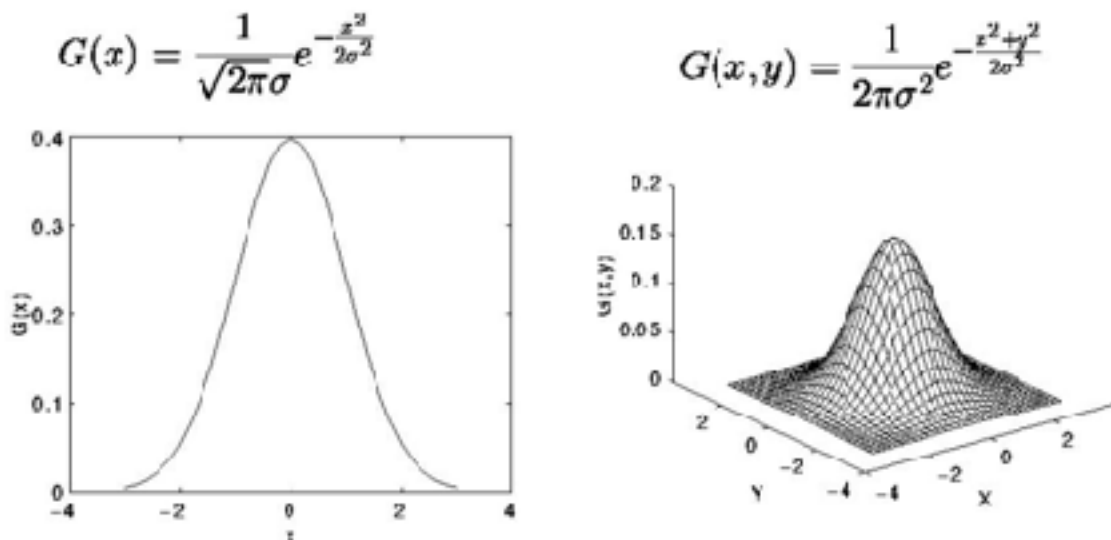


Figure 12 : Le formule et schéma du filtre gaussien
Source : Maïtine Bergounioux, 2010

En modélisation de champs gravitationnels, le filtre gaussien sert à lisser les données et à réduire le bruit, ce qui facilite l'analyse et la mise en évidence des tendances générales. Il agit en appliquant une moyenne pondérée, donnant plus d'importance aux valeurs proches du centre de la gaussienne. Le choix de l'écart type (σ) est déterminant : trop faible, il conserve le bruit ; trop large, il efface les détails importants. Ainsi, ce paramètre doit être ajusté avec soin selon les objectifs de l'étude.

Par exemple, dans la modélisation du champ gravitationnel terrestre, le filtre gaussien permet de gommer les variations locales dues au relief (montagnes, vallées) pour mieux révéler les grandes tendances comme l'aplatissement aux pôles ou certaines anomalies internes. Cependant, un filtrage excessif entraîne une perte d'information fine, des artefacts en bordure de zone étudiée, et peut être inadapté si le champ présente des variations directionnelles (anisotropies).

En résumé, le filtre gaussien est un outil puissant de simplification et de lissage, à condition de choisir un paramètre de lissage adapté. Pour cela en supposant que le territoire ne peut pas être neutre, Il est possible de trouver un sigma adapté. Il suffit d'assimiler le terrain d'étude comme un énorme cercle d'un rayon R. Ainsi, on peut définir sigma comme la division entre R et le nombre total de centroïde pris en compte.

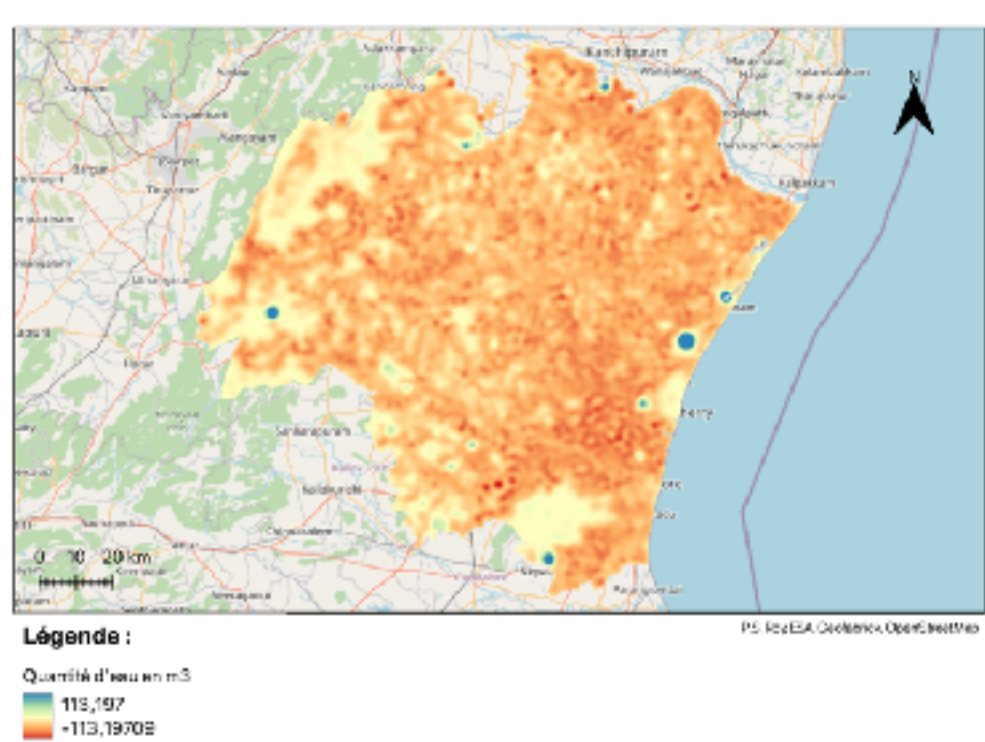


Figure 13 : Spatialisation de la consommation en eau
 Source : Alexis BURGER, 2025

En appliquant le filtre gaussien sur la réunion de tous les centroïdes, on obtient la figure 13. Cette figure met en évidence les zones avec la plus grosse demande en rouge, de celle où l'eau est présente en bleu. De plus, il est possible de quantifié le besoin en fonction de chacun des trois types de centroïdes (ville, culture, réservoir) avec ma méthode. (Figure 14)

	Zone agricole	Zone urbaine	Réservoir
Volume d'eau total	6 800 000 000 m ³	780 000 000 m ³	830 000 000 m ³

Figure 14 : Tableau des volumes d'eau total stockés ou demandés sur l'ensemble du terrain d'étude durant une année

3.2.2.2. Critère Topologique

La pente du terrain obtenue grâce au MNT (Figure 15) constitue un premier critère topographique pertinent. En effet, la pente influence directement la dynamique de l'eau : plus un sol est incliné, plus l'eau ruisselle rapidement en surface, ce qui accroît le volume d'eau mobilisable. Dans cette logique, les zones en pente représentent des secteurs intéressants pour l'implantation d'un réservoir, car elles concentrent naturellement les écoulements vers l'aval, augmentant ainsi la quantité d'eau stockable. Par ailleurs, un terrain présentant une pente adaptée facilite la mise en place d'un réservoir en limitant les besoins en terrassement ou en aménagements lourds, puisque la topographie contribue déjà à la formation d'une cuvette naturelle. Ainsi, la pente apparaît comme un indicateur simple mais efficace pour intégrer la dimension topographique dans la modélisation des sites potentiels d'implantation.

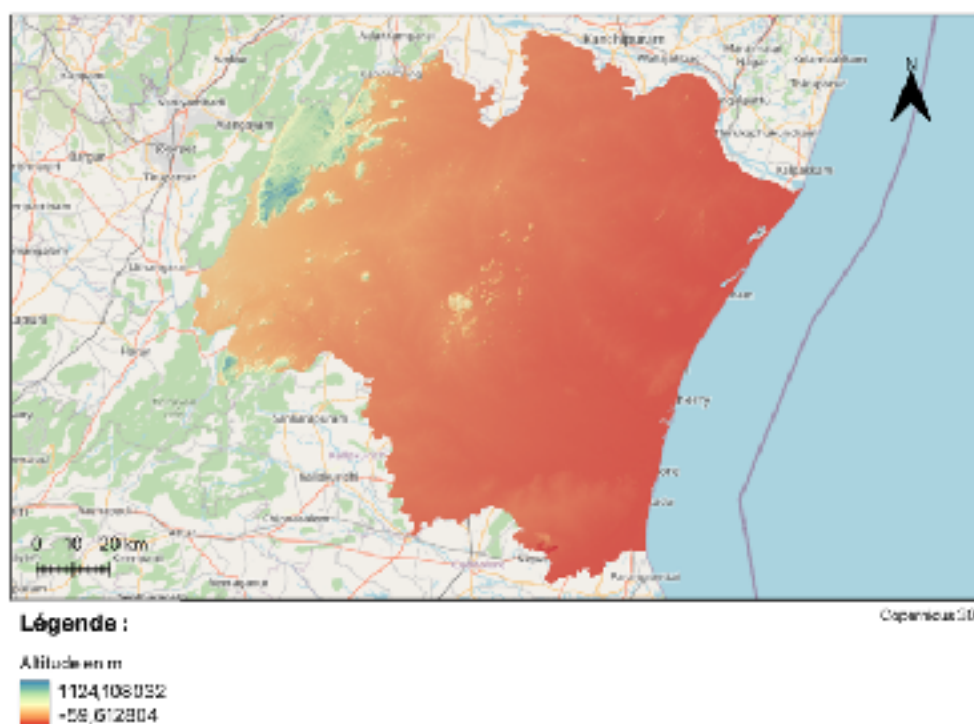


Figure 15 : Modèle numérique de terrain

Source : Alexis BURGER, 2025 réalisé à partir des données de Copernicus 30

L'utilisation du logiciel QGIS permet de calculer automatiquement la pente à partir du MNT, pour l'ensemble de la zone d'étude. La pente est exprimée en pourcentage, ce qui correspond au dénivelé rapporté à une distance horizontale de 100 m. L'échelle obtenue varie de 0 % (zones plates) à 185 % (zones très raides), et peut être facilement représentée cartographiquement (Figure 16). Cette approche présente plusieurs avantages : elle est rapide, reproductible et entièrement automatisable, ce qui la rend adaptée à des analyses à grande échelle. De plus, elle fournit une approximation cohérente de la topographie, suffisante pour un premier niveau d'évaluation des sites potentiels. Toutefois, il faut garder à l'esprit que cet indicateur reste une simplification, car la pente seule ne permet pas de rendre compte de la complexité des dynamiques hydrologiques.



Figure 16 : Pente dérivé du MNT
Source : Alexis BURGER, 2025

Il serait néanmoins intéressant d'approfondir cette analyse en intégrant des critères plus complexes que la pente brute. Par exemple, calculer la taille du bassin versant associé à chaque pixel permettrait de mieux évaluer la capacité de collecte et de concentration des eaux de surface, et donc d'identifier les zones réellement favorables à l'accumulation. De telles approches nécessitent cependant davantage de données et une puissance de calcul supérieure, notamment pour simuler les écoulements et délimiter les zones contributives. Une autre piste serait de combiner la pente avec d'autres paramètres topographiques, comme la courbure du terrain ou l'exposition, afin d'affiner l'évaluation. Ces améliorations permettraient de dépasser la simple cartographie descriptive pour tendre vers une modélisation plus fine des potentialités d'implantation des réservoirs.

3.2.2.3. Critère pédologique

D'après la formule de Darcy, couramment utilisée pour exprimer la vitesse de circulation de l'eau dans les sols perméables, l'infiltration dépend de la conductivité hydraulique. Celle-ci traduit la capacité d'un sol à laisser passer l'eau à travers ses pores. Plus la conductivité est élevée, plus l'infiltration est importante, ce qui signifie que le sol peut absorber et redistribuer rapidement l'eau. À l'inverse, une conductivité faible traduit un sol peu perméable, dans lequel l'eau stagne ou ruisselle davantage en surface. Ainsi, la conductivité hydraulique constitue un bon indicateur pour traduire le critère pédologique, car elle permet de comparer les différents types de sols du terrain d'étude et d'identifier les zones les plus adaptées à l'installation de réservoirs, c'est-à-dire celles où l'eau peut être retenue de manière optimale.

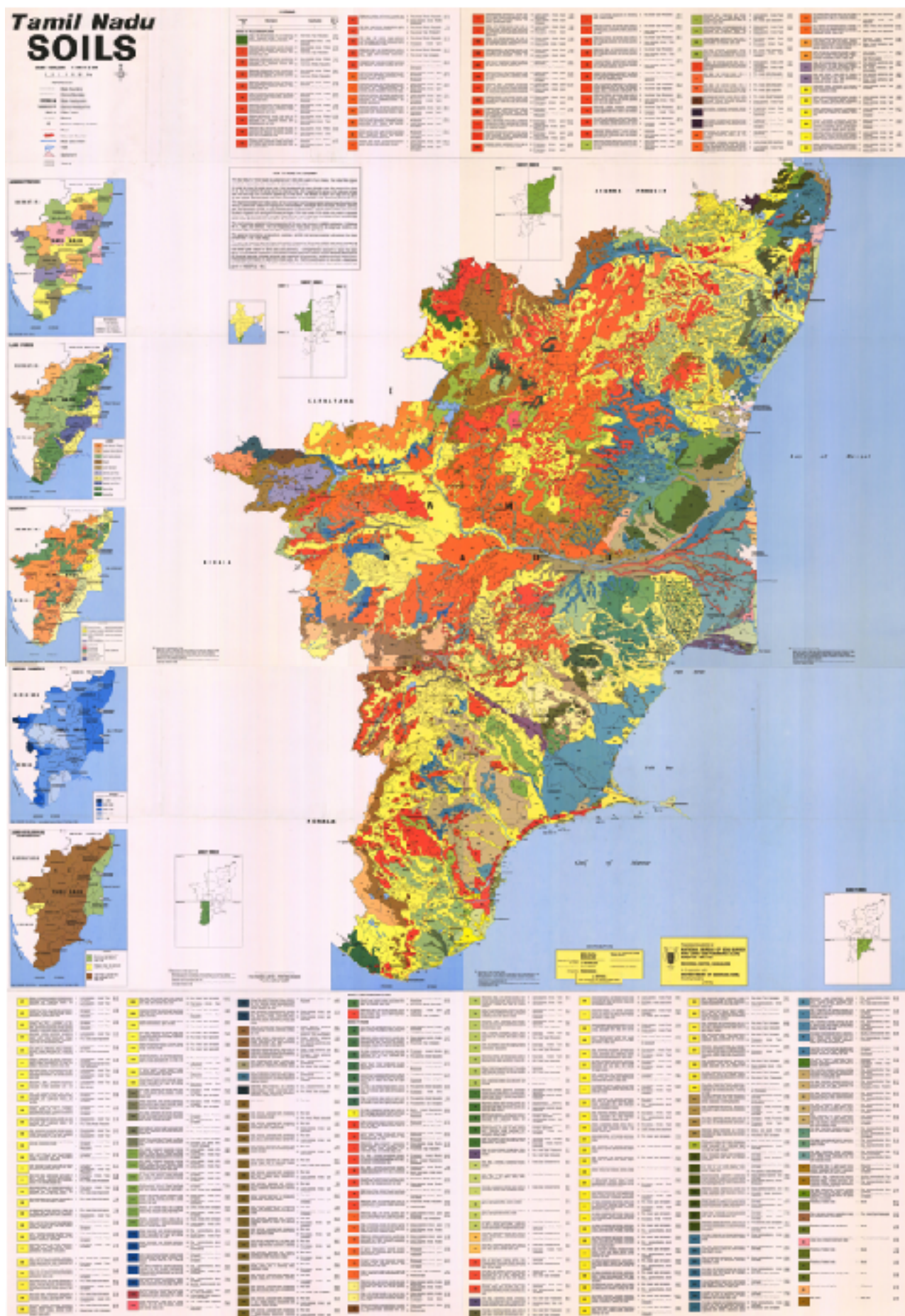


Figure 17 : Carte du sol du Tamil Nadu
Source : ESDAC, 1996

Grâce à la littérature scientifique, il est possible d'établir un tableau des valeurs typiques de conductivité hydraulique pour les principaux sols du Tamil Nadu (Annexe 1 et 2). Par exemple, les sols sableux présentent en général une forte perméabilité, tandis que les sols argileux sont beaucoup moins conducteurs. En croisant ces données avec la carte pédologique de l'État (Figure 17), on peut spatialiser la capacité d'infiltration sur l'ensemble du terrain d'étude. À l'aide d'un programme Python, les couleurs correspondant aux différentes unités de sol sont automatiquement détectées et associées à une valeur de conductivité hydraulique, ce qui permet de produire une image continue du terrain. Dans ce nouvel indice spatial, chaque pixel se voit attribuer une valeur de conductivité, donnant une vision détaillée de l'hétérogénéité pédologique et de son influence sur l'infiltration de l'eau (Figure 18).

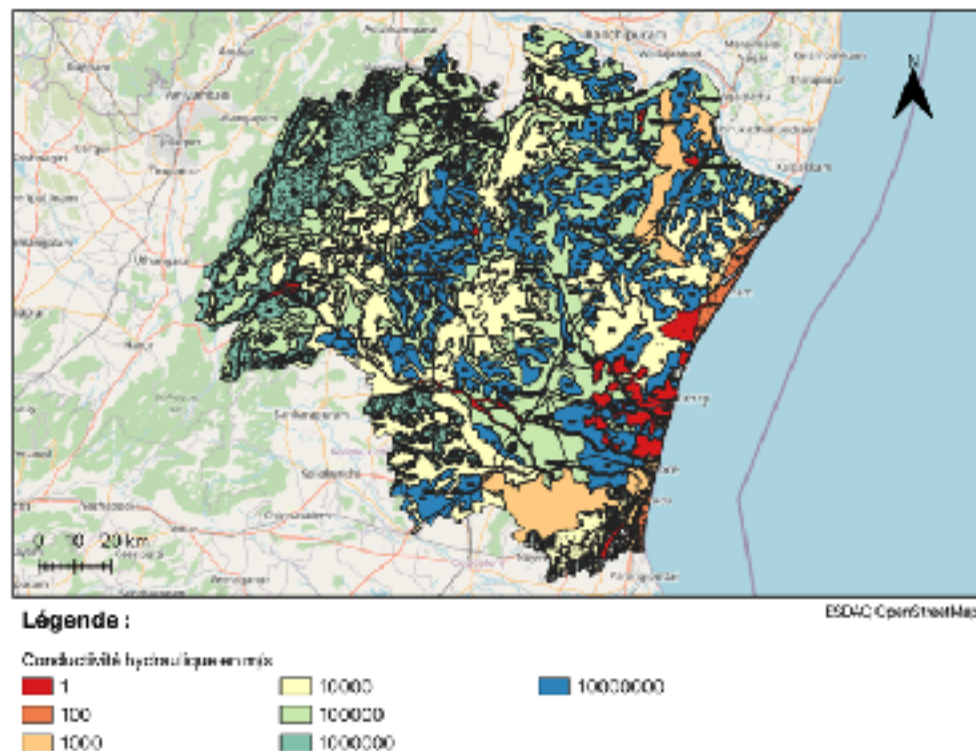


Figure 18 : Carte de zones d'intérêt pour l'installation de réservoirs
Source : Alexis BURGER, 2025

Cependant, cette méthode présente plusieurs limites. La carte pédologique utilisée propose une classification très détaillée, mais les codes couleur employés ne sont pas toujours uniques : certains sols de nature différente sont représentés par des teintes proches ou identiques, ce qui conduit le programme Python à les confondre. Cela entraîne une perte de précision dans l'attribution des conductivités. De plus, comme il s'agit d'une carte numérisée, les éléments textuels (noms des sols, légendes, annotations) sont également détectés par le programme comme des entités colorées, ce qui introduit des erreurs supplémentaires. Enfin, il faut noter que la conductivité hydraulique varie non seulement selon le type de sol, mais aussi selon son état réel sur le terrain (compaction, humidité, pratiques agricoles), des paramètres qui ne sont pas pris en compte dans ce traitement. Ces limites rappellent qu'une validation de terrain serait indispensable pour affiner et fiabiliser l'estimation.

3.3. Normalisation en indicateur logarithmique

La normalisation des valeurs numériques en indices compris entre 0 et 1 permet de comparer directement les différents critères choisis tout en mettant en évidence les zones d'intérêt. Elle permet ainsi de mieux définir la pertinence de l'installation de nouveaux réservoirs. Ensuite, il suffit de calculer la moyenne de tous les indicateurs, ce qui offre un cadre simple et

flexible. Ainsi, il reste possible d'ajouter facilement un critère supplémentaire pour affiner le modèle.

Pour ces trois critères, j'ai décidé d'utiliser des formules logarithmiques, car il a été constaté que leurs distributions de points suivent une répartition non homogène. En effet, une majorité des valeurs se concentre aux alentours de zéro, tandis que plus on se rapproche du maximum, cette concentration diminue en suivant une fonction exponentielle inverse. Les trois formules prennent la forme suivante, afin d'adapter le logarithme aux valeurs minimales et maximales des critères :

$$\forall x \in [-m; M[, \text{ on définit } f(x) = \begin{cases} \frac{\ln(ax+b)+c}{d} & \text{si } x \in [-m; M] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (a, b, c, d, m, M) \in \mathbb{R}^6$$

Cette formule présente l'avantage d'être logarithmique et adaptable en fonction des ensembles de définitions, tout en garantissant que la fonction prenne la valeur 0 pour chacun des critères. Ainsi, pour chacune des trois formules généralisées présentées ci-dessous, des équations et visualisations ont été réalisées à l'aide de l'outil GeoGebra, disponible directement en ligne. En les appliquant, on obtient des cartes normalisées (Figure 19, Figure 20 et Figure 21).

3.3.1. Indicateur de la spatialisation de la consommation en eau

On prend $a = -1$, $b = 1$, $c = 0$ et $d = \ln(e)$

Formule généralisée :

$$\forall x \in [-m; +\infty[, \text{ on définit } f(x) = \begin{cases} \frac{\ln(-x+1)}{\ln(e)} & \text{si } x \in [-m; 0] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{où } \begin{cases} e \in \mathbb{R}_+^* \\ m \in \mathbb{R} \end{cases}$$

En prenant $e=114$ et $m=113$

$$\forall x \in [-113; +\infty[, \text{ on définit } f(x) = \begin{cases} \frac{\ln(-x+1)}{\ln(114)} & \text{si } x \in [-113; 0] \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

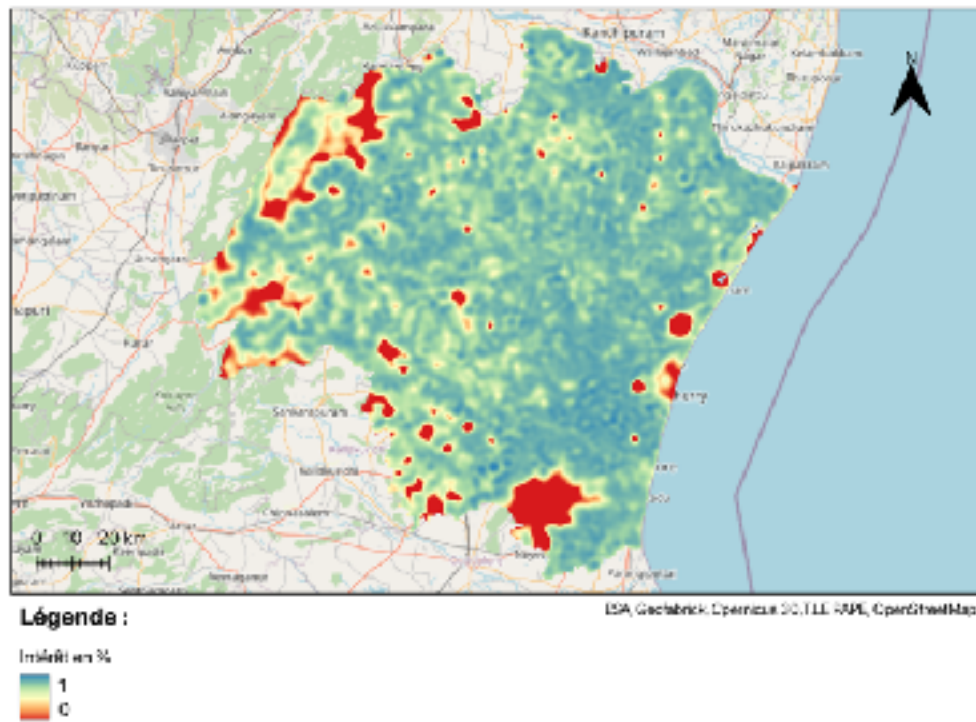


Figure 19 : Carte des zones d'intérêt selon le critère hydrologique
Source : Alexis BURGER, 2025

3.3.2. Indicateur topologique

On prend $a=1$, $b=1$, $c=0$ et $d=\ln(e+1)$

Formule généralisée :

$$\forall x \in [0; +\infty[, \text{ on définit } t(x) = \frac{\ln(x+1)}{\ln(e+1)} \quad \text{où } e \in \mathbb{R}_+^*$$

En prenant $a=185$

$$\forall x \in [0; 185[, \text{ on définit } t(x) = \frac{\ln(x+1)}{\ln(186)}$$

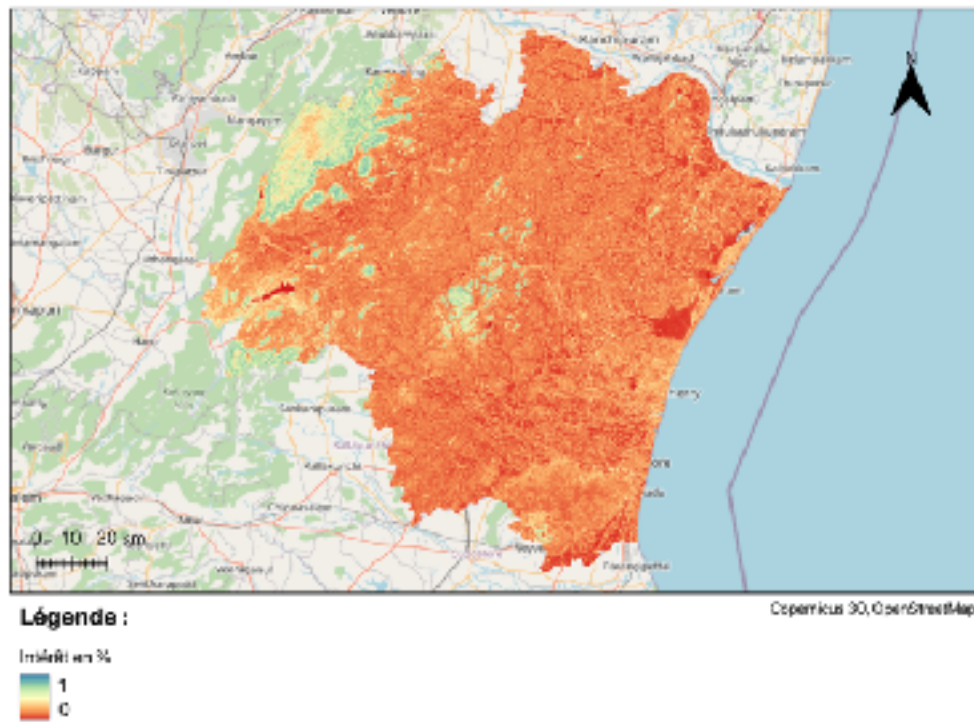


Figure 20 : Carte des zones d'intérêt selon le critère topologique
Source : Alexis BURGER, 2025

3.3.3. Indicateur Pédologique

On prend $a=1$, $b=0$, $c=-\ln(e)$ et $d=\ln(k)$

Formule généralisée :

$$\forall x \in [0; +\infty[, \text{ on définit } p(x) = \begin{cases} \frac{\ln(\log_{10}(x)) - \ln(e)}{\ln(k)} & \text{si } x \in [e; +\infty[\\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{où } (e; k) \in \mathbb{R}_+^{*2}$$

En prenant $e=2$ et $k=5$

$$\forall x \in [0; +\infty[, \text{ on définit } p(x) = \begin{cases} \frac{\ln(\log_{10}(x)) - \ln(2)}{\ln(5)} & \text{si } x \in [2; +\infty[\\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

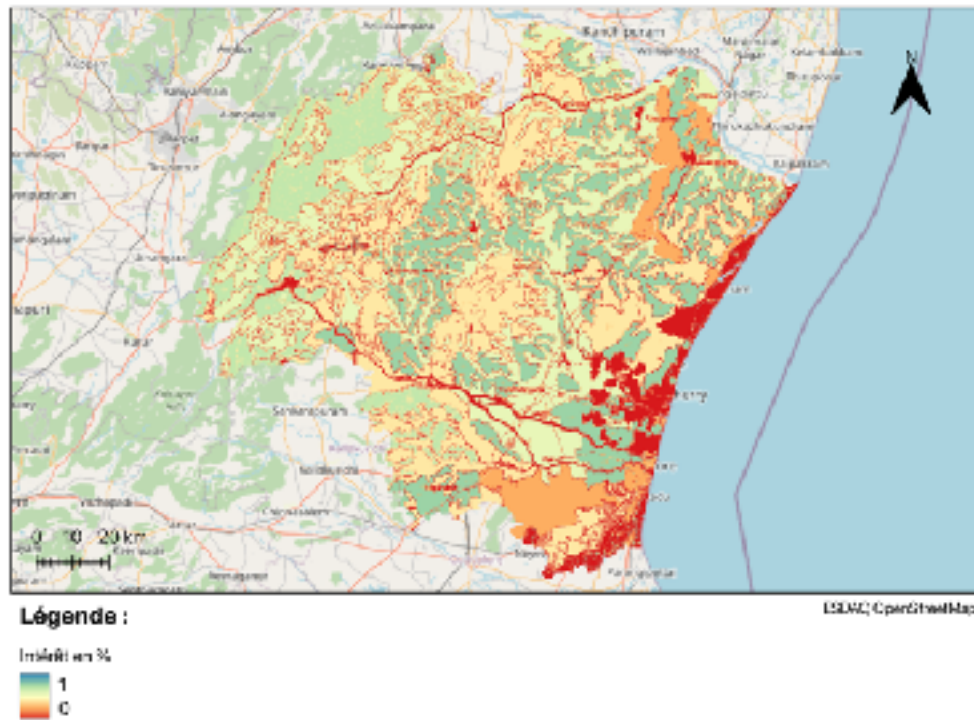


Figure 21 : Découpage de la surface artificialisée via les polygones de Thiessen
Source : Alexis BURGER, 2025

4. Présentation du livrables de mission

Le livrable principal de mon stage était de caractériser les zones les plus favorables à l'implantation de nouveaux réservoirs. Ce travail a conduit à la réalisation d'une carte de spatialisation des sites potentiels ainsi qu'à la rédaction d'un rapport scientifique structuré, destiné à pouvoir évoluer vers un article de recherche.

Pour obtenir ce livrable, j'ai développé une méthode combinant trois critères majeurs — hydrologiques, topographiques et pédologiques — chacun normalisé entre 0 et 1. En faisant la moyenne de ces cartes thématiques, j'ai produit une carte de synthèse des zones d'intérêt (Figure 22). Celle-ci exprime, en pourcentage, le degré d'intérêt d'une zone : au-delà de 50 %, une zone présente un potentiel significatif, et à partir de 75 %, elle devient prioritaire pour l'implantation d'un réservoir.

la difficulté de d'expliquer une intuition et de tenter à obtenir le résultat final. Malgré cela j'ai éprouver une tel satisfaction d'obtenir un résultat en suivant la voie que j'ai choisie, que j'ai envie de me lancer dans d'autres projets pour continuer à apprendre sur les sujets et tenter de modéliser ce qui parait impossible à rationaliser.

L'IFP m'a aussi permis de faire mes premiers pas dans le monde de la recherche en me montrant qu'est-ce que c'est qu'un chercheur, thésard, assistant de recherche,... J'ai pu discuter avec toutes ces personnes sur leurs difficultés, précarité de poste et leur motivation. Je me rends ainsi compte que c'est un monde extrêmement compétitif, solitaire et chronophage mais malgré cela, j'aime la recherche et j'ai envie de me lancer dans ce vaste univers de l'inconnue pour percer les mystères de notre monde. (Et aussi Docteur BURGER cela en jette comme titre).

Pour réellement conclure mon stage, j'aurais souhaité disposer de plus de temps afin de tester plus en profondeur ma méthode. Le temps qui m'a été accordé a uniquement permis d'obtenir le livrable attendu. Ainsi, certaines notions restent encore à approfondir et à développer. Cependant, ce travail pourrait constituer une première étape vers la rédaction d'un article scientifique, si je décide de poursuivre ce sujet.

Annexe

Figure Annexe

Type de sol	Conductivité hydraulique (K, en m/s)	Source	Lien
Sol rouge (Red loam)	1×10^{-5} à 1×10^{-4}	Bouwer (1978), TNAU, USDA Soil Taxonomy	https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-taxonomy
Sol noir (Black cotton soil / Regur)	1×10^{-8} à 1×10^{-6}	BIS 1987; Das, B.M. (2008) Principles of Geotechnical Engineering	https://www.amazon.com/Principles-Geotechnical-Engineering-Braja-Das/dp/0495668109
Sol brun (Brown soil)	1×10^{-6} à 1×10^{-5}	NBSS-LUP reports; TNAU	https://www.nbsslup.in/download-Soil-Reports.php
Sol alluvial	1×10^{-4} à 1×10^{-3}	Todd & Mays (2005), FAO, Central Groundwater Board India	https://www.fao.org/3/t0231e/t0231e00.htm
Sol latéritique	1×10^{-6} à 1×10^{-4}	Ghosh (1971), FAO Soil Bulletin	https://www.fao.org/3/x5871e/x5871e00.htm
Sol sableux côtier	1×10^{-3} à 1×10^{-2}	TNAU; Freeze & Cherry (1979)	https://hydrology.ugr.es/hidraulica/libros/Fundamentals%20of%20Ground%20Water.pdf
Sol gris / salin (coastal saline)	1×10^{-6} à 1×10^{-5}	FAO Irrigation & Drainage Paper 56	https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm
Sol silteux / limoneux	1×10^{-7} à 1×10^{-5}	Rawls et al. (1982), USDA	https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/Rawls-et-al-1982-Estimation-of-Soil-Water-Properties.pdf
Sol argileux (compact)	1×10^{-9} à 1×10^{-7}	Das (2008), Bouwer (1978), Central Ground Water Board	https://www.cgwb.gov.in/Ground-Water.html
Sol mixte (sable-argile)	1×10^{-6} à 1×10^{-4}	TNAU & NBSS-LUP; Rawls et al.	https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-11/Rawls-et-al-1982-Estimation-of-Soil-Water-Properties.pdf

Annexe 1 : Tableau des conductivité hydraulique des sols typiques du Tamil Nadu

Type de sol	Catégorie	Type de sol deviné	Conductivité hydraulique (K, en m/s)	Description
Jaune clair	213	Limoneux	1×10^{-5}	Very deep, well drained, calcareous, loamy soils on nearly level, tank-irrigated lands, slightly eroded; associated with; deep, moderately well drained, clayey soils.
Vert clair	184	Argileux	1×10^{-7}	Moderately shallow, loamy soils on gently sloping lands, moderately eroded; associated with; deep, well drained, clayey soils.

Rouge	168	Mixte	1×10^{-4}	Moderately shallow, well drained, clayey soils on gently sloping lands, severely eroded; associated with; were deep, well drained, gravelly clay soils.
Orange	171	Mixte	1×10^{-6}	Deep, well drained, gravelly clay soils on gently sloping lands, slightly eroded; associated with; deep, well drained, gravelly soils on moderately sloping lands with moderate erosion.
Bleu	259	Calcaire	1×10^{-3}	Very deep, moderately well drained, calcareous, cracking clay soils on nearly level lowlands, slightly eroded; associated with; were deep, moderately well drained, calcareous clayey soils.
Marron 275	275	Mixte calcaire/ argile	1×10^{-4}	Moderately deep, moderately well drained, calcareous, cracks, g clay soils on gently sloping lowlands, slightly eroded; associated with; moderately shallow, moderately well drained, calcareous, cracking clay soils.
Vert fonce	281	Alluvial	1×10^{-3}	Periodically flooded lands
Vert clair	193	Sable côtier	1×10^{-2}	Very deep, somewhat excessively drained, sandy soils on very gently sloping lands, moderately eroded.
Marron fonce 178	178	Mixte roche/ argile	1×10^{-4}	Shallow, somewhat excessively drained, gravelly clay soils on moderately steeply sloping, isolated hills, severely eroded; associated with; rock outcrops.
Blanc		Urbain	1	
Beige	199	Sableux côtier	1×10^{-3}	Very deep, imperfectly drained, sandy soils on nearly level lands, slightly eroded; associated with; deep, poorly drained, loamy soils.
Bleu clair		Lac	1	

Annexe 2 : Tableau combiné en fonction de la description donnée par la carte des Types de sols du Tamil Nadu et des conductivités hydrauliques trouvés

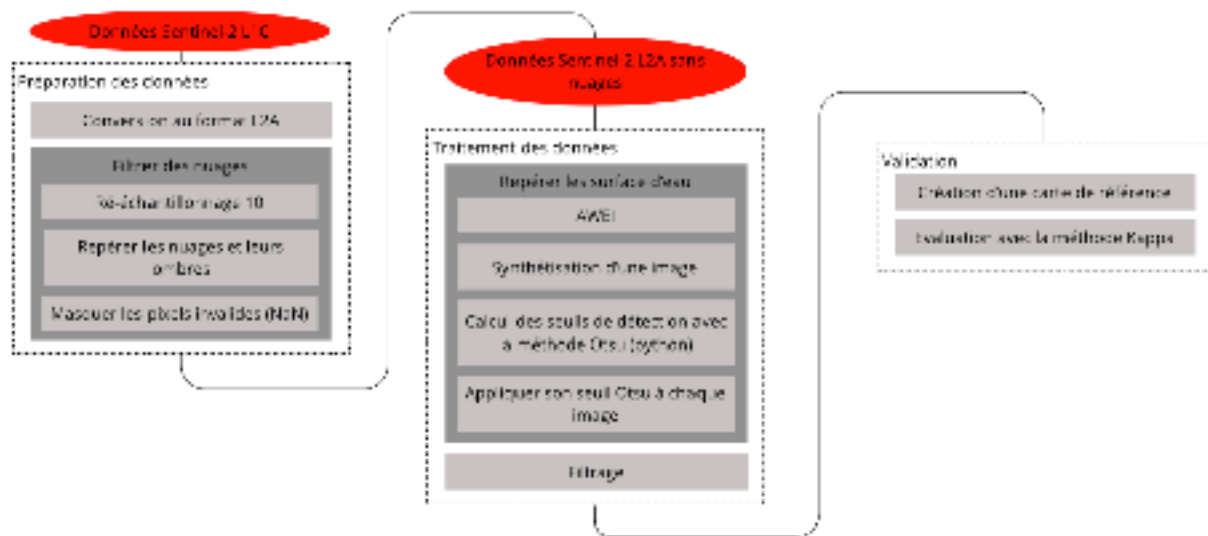
Méthode de synthèse mensuelle d'image Sentinel-2

1. Prétraitement des images

Les images utilisées dans ce processus sont des images satellites Sentinel-2 de niveau L1C de l'année 2024. Elles ont d'abord été prétraitées en L2A à l'aide du module Sen2Cor dans SNAP, puis rééchantillonnées à une résolution spatiale de 10 mètres pour les bandes B2, B3, B8, B11 et B12. Un masque de nuages, généré par Sen2Cor, a ensuite permis de remplacer les zones nuageuses par des valeurs manquantes (NaN). L'indice AWEI (Automated Water Extraction Index) a été calculé à partir de ces données, produisant des images mono-bande, ce qui permet de réduire la taille des fichiers et d'accélérer les traitements.

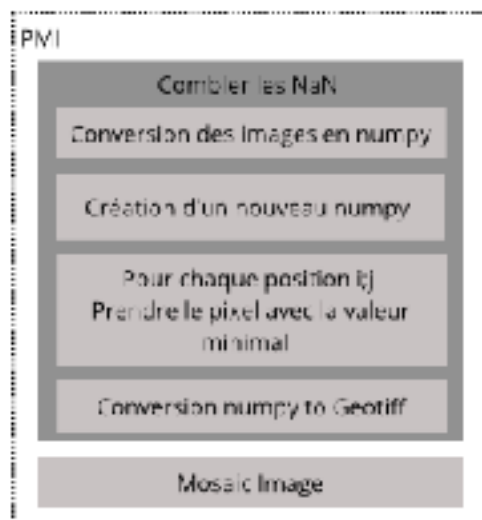
Ce processus a d'abord été appliqué à quatre images du mois de mars de la même zone que celle utilisée dans la méthode initiale, pour lesquelles une validation manuelle des réservoirs était

disponible, facilitant ainsi l'évaluation de la méthode de synthèse avec l'indice Kappa. **La méthode de synthèse n'a pas encore pu être testée sur d'autres mois.**



2. Principe de la méthode de synthèse

Synthétisation d'une image



Le processus de synthèse repose sur la sélection de la valeur minimale de l'indice AWEI pour chaque pixel, parmi toutes les images disponibles pour un même mois. L'utilisation du minimum permet de limiter l'impact des nuages non détectés, ceux-ci étant généralement associés à des valeurs AWEI plus élevées que les plans d'eau ou la terre ferme. Les valeurs manquantes (NaN), introduites lors du masquage nuageux, sont ignorées lors du calcul à l'aide de la fonction `np.nanmin()`.

D'autres approches, comme la moyenne ou la médiane, ont également été testées. Bien qu'elles produisent une image plus progressive et parfois plus esthétique, elles se sont révélées plus sensibles au bruit, notamment à celui induit par la présence de bâtiments. Le minimum, en revanche, tend à préserver les pixels d'eau détectés de manière plus fiable.

3. Implémentation technique

Chaque image GeoTIFF mono-bande est d'abord convertie en tableau NumPy afin de faciliter les opérations matricielles. Ces tableaux sont empilés pour former une matrice tridimensionnelle (nombre d'images × hauteur × largeur), sur laquelle le calcul du minimum est appliqué pixel par

pixel, en ignorant les NaN. Ce tableau synthétique est ensuite reconverti au format GeoTIFF, générant ainsi une image mensuelle composite, optimisée pour les analyses temporelles. Le traitement a été réalisé localement en Python, à l'aide des bibliothèques **NumPy**, **Rasterio**, **Matplotlib** et **sklearn.metrics**. Toutefois, une amélioration envisagée serait d'implémenter ce processus sur **Google Earth Engine (GEE)** afin d'automatiser le flux de traitement et de l'étendre à une plus grande échelle spatiale et temporelle. En effet, GEE a accès à la base de données de Sentinel-2, ce qui permettrait d'appliquer la méthode à l'ensemble de l'Inde du sud, voire même à l'ensemble de l'Inde avec des performances adaptées à une telle tâche. Cependant, GEE rendrait notre méthode dépendante aux serveurs de google.

4. Cas particulier des valeurs manquantes

Dans certains cas, aucun pixel valide n'est disponible à une position donnée au cours du mois ; la valeur résultante reste alors NaN dans l'image synthétique. Ce comportement reflète une absence totale d'observations exploitables à cette position, ce qui peut survenir en cas de couverture nuageuse persistante ou d'anomalies dans les données.

5. Limites de la méthode

L'une des principales limites de cette méthode réside dans la nature même de l'indice AWEI : dans certaines conditions, les surfaces sèches peuvent présenter des valeurs plus faibles que les surfaces d'eau. Ainsi, si une image sans nuages correspond à une journée particulièrement sèche, cette dernière peut dominer la synthèse, réduisant la détection réelle de l'étendue d'eau. En comparaison, la moyenne permet un rendu plus progressif, mais elle est plus sujette aux artefacts liés aux constructions ou au bruit atmosphérique.

Résultats

La méthode de synthèse des images a été appliquée à un sous-ensemble de quatre images Sentinel-2 du mois de mars 2024. Bien que sept images soient disponibles pour cette période, seules quatre ont été utilisées pour cette première phase d'analyse, en raison de contraintes liées au temps lors du traitement.

Dans un second temps, cette méthode a été réappliquée sur les mêmes images, mais avec différents paramètres de synthèse (minimum, moyenne, médiane), afin d'évaluer leur efficacité respective dans la suppression des nuages et la restitution fidèle des zones aquatiques.

Application sur le mois de mars

La combinaison des images selon la méthode du minimum permet effectivement de supprimer l'ensemble des zones nuageuses. Les pixels masqués (NaN) sont remplacés par des valeurs valides issues d'autres dates, sans générer d'effets visuels incohérents. L'image composite est globalement homogène, lisible, et les éléments paysagers tels que les réservoirs, routes ou champs sont bien identifiables.

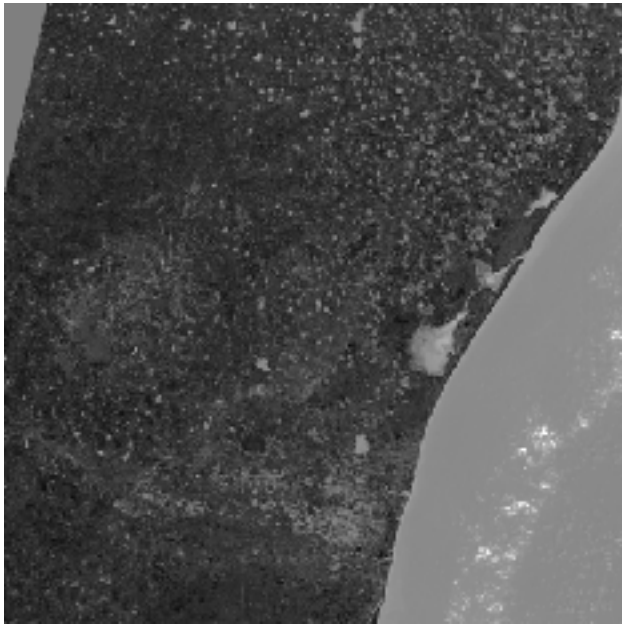


Figure X : 05/03/2024

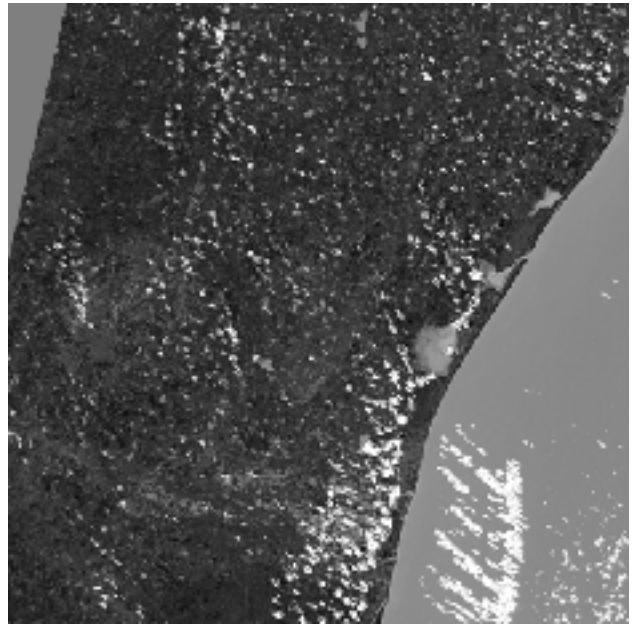


Figure X : 10/03/2024

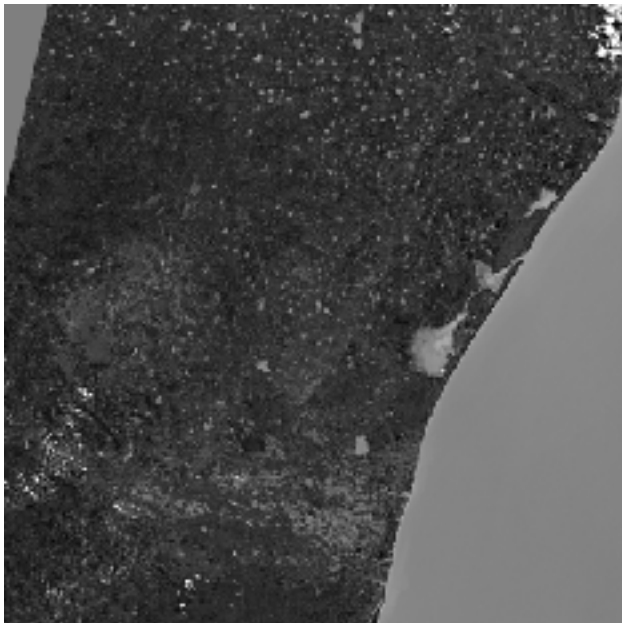


Figure X : 15/03/2024

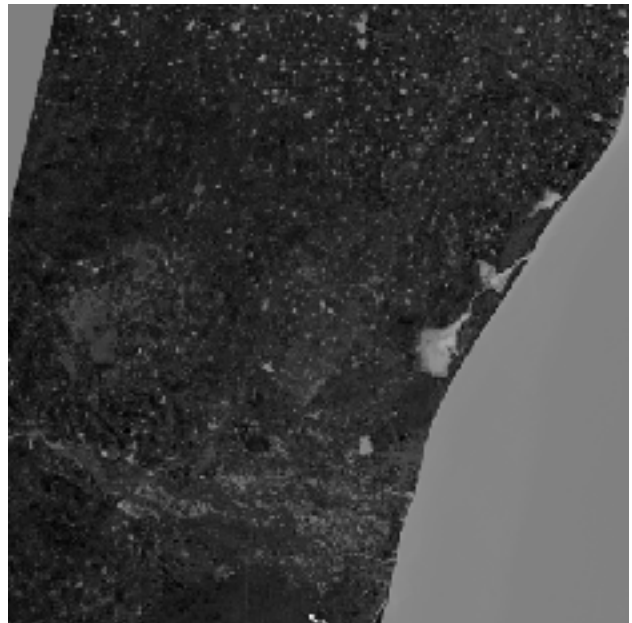


Figure X : 30/03/2024

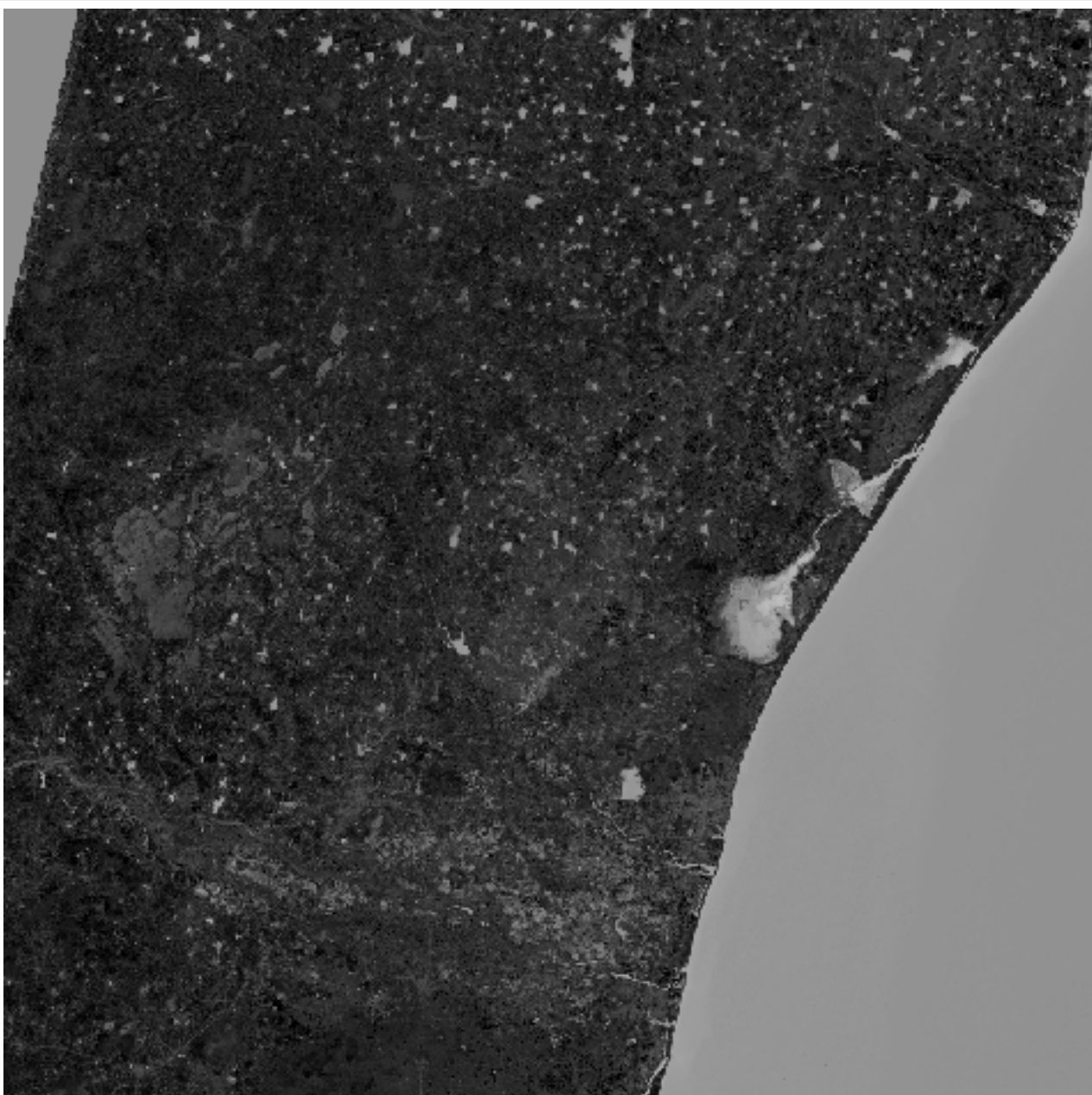


Figure X : Image synthèse du mois de Mars

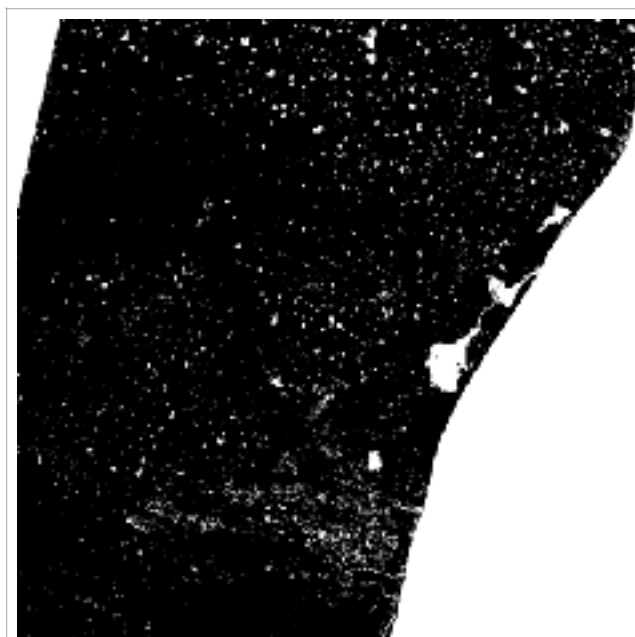


Figure X : Otsu Image synthèse du mois de Mars

Seuil Otsu = -0,339

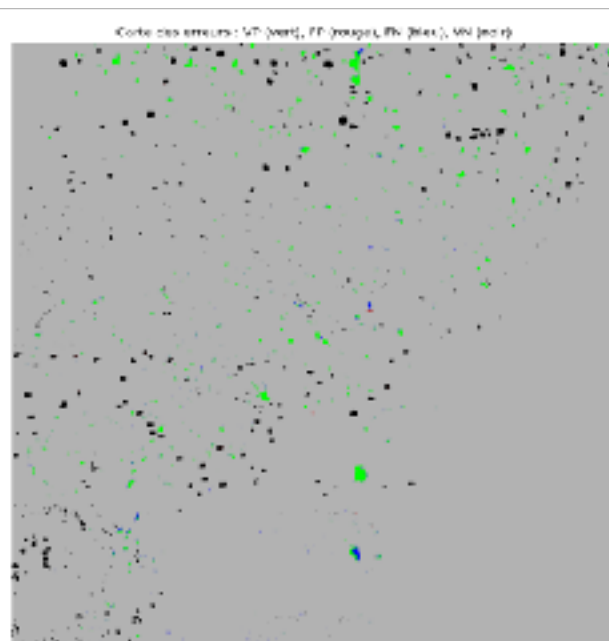


Figure X : Kappa Image synthèse du mois de Mars

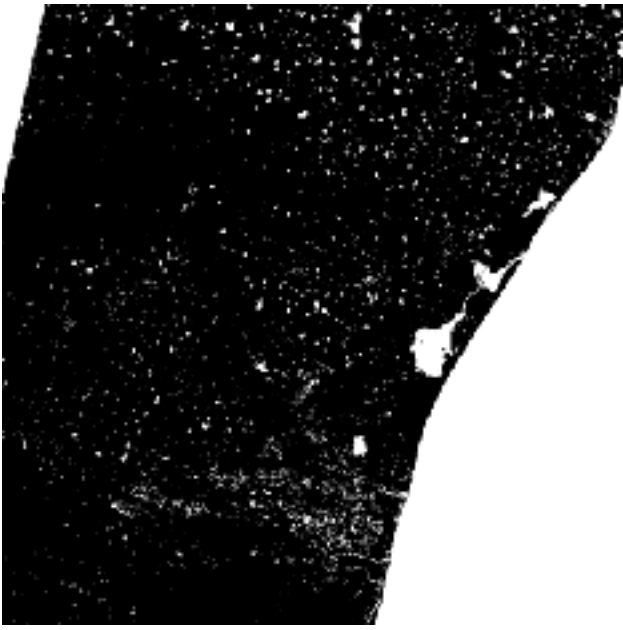
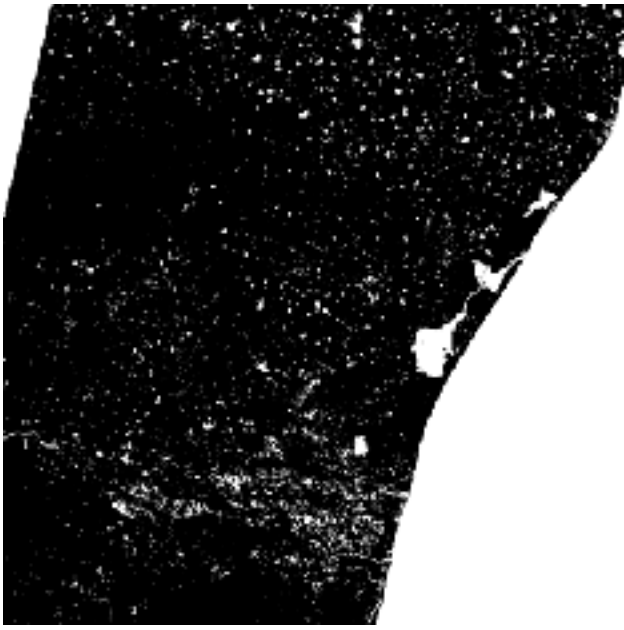
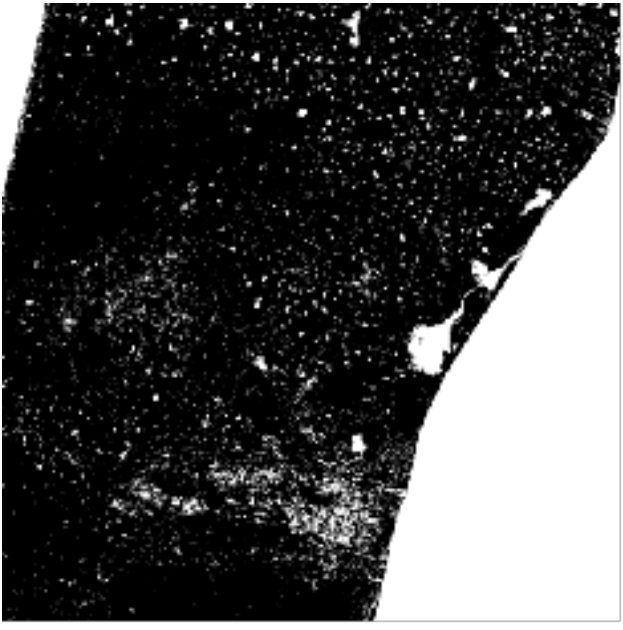
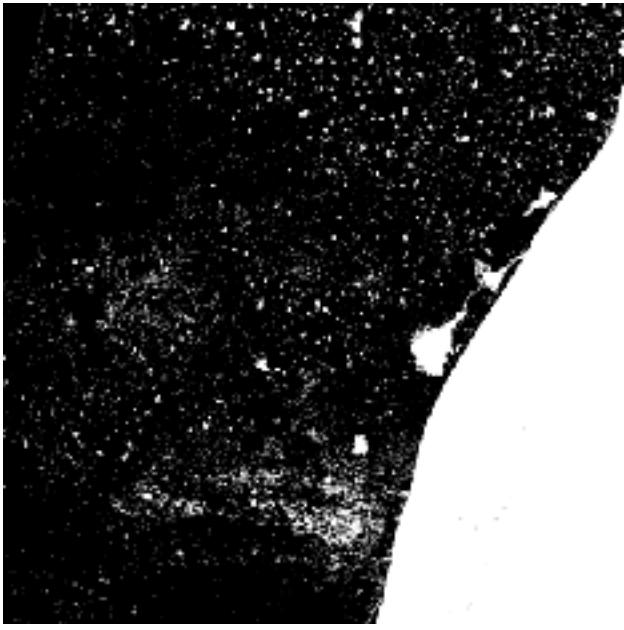
Kappa = 0,8539

	Prédit : non-eau	Prédit : eau
Réel : non-eau	1129825	5198
Réel : eau	139182	760326

Tableau X : tableau de confusion pour l'image synthèse du mois de Mars

L'évaluation de la qualité de détection a été réalisée à l'aide de l'indice de Kappa, en comparant la détection automatique issue de l'image synthétique à un masque de vérité terrain généré manuellement sous QGIS. Le score obtenu est de **0,85**, ce qui est supérieur au seuil de **0,80** généralement considéré comme satisfaisant. Ce résultat valide donc la fiabilité de la méthode de synthèse appliquée avec la stratégie du minimum.

Comparaisons

	
Figure X : Otsu Mars AWEI min	Figure X : Otsu 30/03 AWEI min
K_AWEI = 0,8539	K_30/03 = 0,8765
	
Figure X : Otsu Mars AWEI mean	Figure X : Otsu Mars MNDWI min
K_MEAN = 0,8859	K_MNDWI = 0,6005
	Valeur Kappa

AWEI 30/03	0,8643
Mosaic image AWEI (min)	0,8378
Mosaic image MNDWI	0,6005
Mosaic image AWEI (mean)	0,8787
Mosaic image AWEI (median)	0,8777

Tableau X : tableau de comparaison

Limites

En augmentant le nombre d'images, l'indice Kappa diminue. Plus cette image s'éloigne de la réalité, même si cela reste assez négligeable la baisse de kappa.

Si une image est mal traitée toute la combinaison est corrompue. Pendant longtemps on travaillait avec une image de moins bonne qualité alors l'image qui en est sortie ne détectait moins les villes puisque les bâtiments apparaissaient plus et c'était de vague forme. Ainsi, dans le seul Otsu ils n'apparaissaient pas dans l'utilisation de la valeur minimale alors que pour les valeurs moyennes et médianes le rôle d'une image est beaucoup moins d'importance.

Bibliographie

[1] Wikipédia. (2025). Institut français de Pondichéry. Récupéré de https://fr.wikipedia.org/wiki/Institut_français_de_Pondichéry

[2] CollexPersée. (2025). Collection labellisée : Manuscrits sur feuilles de palme de l'Institut français de Pondichéry. Récupéré de <https://www.collexpersee.eu/focus-sur-la-collection-labellisee-manuscrits-sur-feuilles-de-palmes-de-linstitut-francais-de-pondichery-ifp/>

[3] Institut Français de Pondichéry (IFP). (2025). Site officiel. Récupéré de <https://www.ifpindia.org/>

Brutsaert, W. (2005). Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press.

Budyko, M. I. (1974). Climate and Life. Academic Press.

Census of India. (2011). Population Finder. Office of the Registrar General & Census Commissioner, India. Récupéré de <https://censusindia.gov.in/census.website/data/population-finder>

European Space Agency (ESA). (2020). WorldCover 10m Map 2020. ESA. Récupéré de <https://esa-worldcover.org/en>

Heurteaux, P. (1964). La Terre et la Vie, 18(3), 269-293.

Ishita, R., et al. (2021). Reservoir Volume Estimation Methods. Journal of Hydrology.

Landy, F., & Varrel, A. (2015). L'Inde : du développement à l'émergence. Armand Colin.

Ministry of Jal Shakti. (2020). Per Capita Availability of Water in India. Press Information Bureau (PIB). Récupéré de <https://www.pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1604871>

MuthuSankar, G., et al. (2015). Land Use Classification in Tamil Nadu using Remote Sensing and GIS. Journal of the Indian Society of Remote Sensing.

Surendran, U., et al. (2021). Water Consumption in Tamil Nadu Agriculture. Agricultural Water Management.

Xiao, C., et al. (2023). Satellite Altimetry for Reservoir Monitoring. Remote Sensing of Environment.

Yuan, H., et al. (2024). Bathymetric Reconstruction of Lakes Using DEM and Remote Sensing. Hydrology and Earth System Sciences.

National Bureau of Soil Survey and Land Use Planning (NBSS). (Nagpur, Inde). (2025). Soil Survey Data. Récupéré de https://data.gov.in/sites/default/files/Gazette_Notification_OGDL.pdf

Table des Figures

Figure 1 : Façade de l'IFP	3
Figure 2 : Organigramme de l'institut française de Pondichéry	4
Figure 3 : Archive des manuscrits shivaïtes de l'IFP	5
Figure 4 : Salle d'exposition entre le département d'indologie et de sociologie	6
Figure 5 : Logigramme de la méthode	8
Figure 6 : Délimitation du terrain d'étude	9
Figures 7 : Schéma illustrant l'application de la méthode des polygones de Thiessen	10
Figure 8 : Découpage de la surface artificialisée via les polygones de Thiessen	11
Figure 9 : Découpage de la surface agricole via les polygones de Thiessen	12
Figure 10 : Réservoirs détectés selon la méthode de Tristan LE PAPE	13
Figure 11 : Schéma de l'estimation du volume d'eau dans un réservoir à l'aide du MNT	13
Figure 12 : Le formule et schéma du filtre gaussien	15
Figure 13 : Spatialisation de la consommation en eau	16
Figure 15 : Modèle numérique de terrain	17
Figure 16 : Pente dérivé du MNT	18
Figure 17 : Carte du sol du Tamil Nadu	19
Figure 18 : Carte de zones d'intérêt pour l'installation de réservoirs	20
Figure 19 : Carte des zones d'intérêt selon le critère hydrologique	22
Figure 20 : Carte des zones d'intérêt selon le critère topologique	23
Figure 21 : Découpage de la surface artificialisée via les polygones de Thiessen	24
Figure 22 : Carte de zones d'intérêt pour l'installation de réservoirs	25
Annexe 1 : Tableau des conductivité hydraulique des sols typiques du Tamil Nadu	27
Annexe 2 : Tableau combiné en fonction de la description donnée par la carte des Types de sols du Tamil Nadu et des conductivités hydrauliques trouvés	28

Table des Matières

1. Présentation de la structure d'accueil	3
1.1. Fondement de l'IFP	3
1.2. Histoire de l'IFP	3
1.3. Organisation de l'IFP	4
2. Ma mission au sein de l'IFP	6
2.1. Description de la mission	6
2.2. Mes attentes de la mission	7
2.3. Intérêt de la mission	7
3. Déroulement de la mission	7
3.1. Apprentissage de la télédétection	7
3.2. Spatialisation de l'implantation de nouveaux réservoirs	8
3.2.1. Site d'étude et données	8
3.2.2. Caractérisation des critères	9
3.2.2.1. Spatialisation de la consommation d'eau	10
3.2.2.1.1. Estimation de la consommation annuel en eau des zones urbaines	10
3.2.2.1.2. Estimation de la consommation annuel en eau des zones agricoles	11
3.2.2.1.3. Estimation de l'eau stocké dans les réservoirs	12
3.2.2.1.4. Application du filtre gaussien	14
3.2.2.2. Critère Topologique	17
3.2.2.3. Critère pédologique	18
3.3. Normalisation en indicateur logarithmique	20
3.3.1. Indicateur de la spatialisation de la consommation en eau	21
3.3.2. Indicateur topologique	22
3.3.3. Indicateur Pédologique	23
4. Présentation du livrables de mission	24
5. Retour réflexif sur l'expérience	25
Annexe	27
Figure Annexe	27
Méthode de synthèse mensuelle d'image Sentinel-2	28
Résultats	30

Application sur le mois de mars	30
Comparaisons	34
Limites	35
Bibliographie	36
Table des Figures	37
Table des Matières	39



POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Alexis BURGER
2024-2025

Titre : Spatialisation de l'implantation de nouveaux réservoirs d'eau autour de Pondichéry à l'aide de la télédétection

Sous-titre : Approche multi-critères intégrant données hydrologiques, topographiques et pédologiques

Résumé :

Dans le cadre du projet PATAMIL, ce stage a porté sur l'identification des zones favorables à la construction de nouveaux réservoirs à ciel ouvert dans le Tamil Nadu. À partir d'images satellites et de modèles numériques de terrain, trois critères (hydrologiques, topographiques et pédologiques) ont été traduits en indicateurs, normalisés puis combinés pour produire une carte synthétique d'intérêt. Ce travail aboutit à un premier outil d'aide à la décision pour la gestion durable de l'eau, bien qu'il reste limité par un manque de validations terrain et la nécessité d'approfondir certaines étapes méthodologiques.

Mots Clés : Télédétection, Réservoirs d'eau, Pondichéry, Analyse spatiale, Indicateurs multi-critères, Modèle numérique de terrain (MNT), Gestion durable de l'eau, Spatialisation

Institut française à Pondichéry :

Adresse

Tuteur entreprise :

Samuel CORGNE

Directeur du département de géomatique

Tuteur académique :

Mathilde GRALEPOIS