



Année universitaire 2024-2025

Eau, agriculture et résilience

Analyse du rôle des réservoirs dans le Tamil Nadu

Dans quelle mesure les réservoirs à ciel ouvert peuvent-ils répondre aux besoins actuels en irrigation dans le Tamil Nadu ?

Présenté par **Manon COUDERC**

Rapport rendu le 31 juillet 2025

Sous la direction de **Samuel CORGNE**, Responsable du département géomatique à l'Institut Français de Pondichéry et **Laura VERDELLI**, enseignante-chercheuse à l'école Polytechnique de l'Université de Tours.

This report evaluates the relevance of open-air reservoirs in Tamil Nadu for supporting current agricultural water needs. Combining remote sensing, hydrometeorological data, hydrological modelling and field observations, the study focuses on two reservoirs: Osudu (rural environment) and Kanagan (peri-urban environment). The analysis reveals contrasting hydrological responses to rainfall, depending on catchment size and land use. Available water volumes are compared with the irrigation needs of local crops. The findings show that well-positioned reservoirs, such as Osudu, can meet agricultural demand even during the dry season. The study highlights the need to reintegrate open-air reservoirs into local water management strategies in the context of increasing water scarcity and climate change.

Ce travail étudie la pertinence actuelle des réservoirs à ciel ouvert dans le Tamil Nadu, en particulier dans leur capacité à répondre aux besoins en irrigation agricole. Grâce à une approche combinant télédétection, données hydrométéorologiques, modélisation hydrologique et observations de terrain, deux réservoirs ont été analysés : Osudu (zone rurale) et Kanagan (zone périurbaine). L'étude met en évidence une dynamique différenciée de remplissage et de réponse aux précipitations, corrélée à la taille du bassin versant et à l'occupation du sol. Les volumes d'eau disponibles sont comparés aux besoins en irrigation selon les cultures recensées localement. Les résultats suggèrent que des réservoirs bien localisés, comme Osudu, peuvent répondre aux besoins agricoles même en saison sèche. Ce rapport se place dans une optique de réintégration des réservoirs dans les stratégies de gestion territoriale de l'eau, notamment dans un contexte de changement climatique et de raréfaction des ressources hydriques.

Table des matières

Introduction	3
La place des réservoirs dans l'agriculture en Inde du sud	3
Définition, fonctions et usages	3
Des pratiques traditionnelles... ..	4
... à un abandon progressif	4
Méthode	5
Périmètre d'étude et données	5
Réponse hydrologique	7
Détection des surfaces en eau (télédétection).....	7
Extraction des données pluviométriques quotidiennes	11
Modélisation des volumes entrants	11
Délimitations des bassins versants	12
Données pluviométriques moyennes	12
Détermination du coefficient de ruissellement	12
Identification des usages et besoins agricoles	13
Observations de terrain : type de cultures	13
Estimation des besoins en eau des cultures	14
Calcul de la production agricole théorique	15
Osudu et Kanagan : des réservoirs aux dynamiques contrastées.....	15
Des réponses hydrologiques différenciées	16
Osudu persiste alors que Kanagan s'efface	16
Des précipitations cohérentes avec le régime des moussons	18
Une réaction décalée pour Osudu et immédiate pour Kanagan	20
Des volumes d'eau entrant du simple au triple.....	21
Osudu : un réservoir aux forts usages agricoles.....	23
Des cultures centrées sur les céréales.....	23
Un réservoir capable de soutenir l'agriculture locale	24
Conclusion	26
Références.....	28

Introduction

« *Quand le puits est à sec, on connaît la valeur de l'eau.* » – Benjamin Franklin. Ce proverbe prend tout son sens dans les campagnes du Tamil Nadu, où l'épuisement des nappes par le pompage pourrait remettre en valeur les réservoirs à ciel ouverts.

Bien que l'agriculture et la foresterie soient bien adaptées aux conditions climatiques moyennes, elles se révèlent fortement sensibles aux changements climatiques. Si la température joue un rôle déterminant dans le rendement des cultures dans les latitudes froides, en dehors de ces zones, les précipitations constituent la variable régionale la plus importante pour la production agricole. L'agriculture pluviale est particulièrement vulnérable à la variabilité des précipitations dans les régions arides, semi-arides, méditerranéennes ou de mousson, comme le Tamil Nadu. Les déficits en humidité du sol limitent la croissance, surtout dans les zones agricoles non irriguées. (Geethalakshmi & Dheebakaran, 2008)

Malgré une demande en eau de plus en plus importante dans le Tamil Nadu liée à croissance démographique et à l'augmentation des besoins par personne (Tamil Nadu State of Environment and Related Issues, 2025), les réservoirs à ciel ouverts, outils pourtant millénaires de la gestion de l'eau dans la région, sont délaissés au profit du pompage dans les nappes phréatiques. Il s'agit dans ce travail de déterminer ce que pourraient apporter ces réserves en eau, c'est-à-dire déterminer **dans quelle mesure les réservoirs à ciel ouvert répondraient aux besoins en eau actuels pour l'irrigation.**

Ce rapport s'articule autour de trois parties : une revue de littérature pour présenter le contexte et les enjeux des réservoirs, une description de la méthode et des outils utilisés, puis une analyse des résultats obtenus.

La place des réservoirs dans l'agriculture en Inde du sud

Le climat du Tamil-Nadu est un climat tropical sec selon la classification de Köppen ; les épisodes de sécheresse alternent à ceux de pluies concentrées pendant les périodes de mousson avec un retour d'un an. La température oscille entre 21°C et 37°C et moyenne et les précipitations moyennes vont de 5mm au mois de mars à 420mm en novembre. L'essentiel des précipitations provient de dépressions et de cyclones tropicaux développés dans la baie du Bengale, ce qui explique l'énorme variabilité des précipitations annuelles avec, par exemple, à Pondichéry entre 2600 mm en 1943 et 620 mm en 1952. Ce climat tantôt hyper-humide tantôt extrêmement sec a poussé la population à trouver des outils adaptés et c'est ainsi que sont nés les réservoirs à ciel ouvert (Blasco & Legris, 1973) (Verdelli, Maliet, & Chollet).

Définition, fonctions et usages

Les réservoirs d'eau (ou *water tanks*) sont des systèmes de collecte de l'eau basés sur une gestion locale et décentralisée. Ce sont des dispositifs construits pour faire face aux pénuries d'eau causées par le régime des pluies de mousson qui concentre toutes les précipitations sur quelques mois par an. De petits barrages en terre sont construits par les habitants et lors de la saison des pluies, ces digues retiennent l'eau qui ruisselle sur les pentes et la stockent pour assurer l'irrigation de l'agriculture le reste de l'année.

Les réservoirs servent encore de nombreuses fins et leur rôle va au-delà de l'irrigation avec des fonctions écologiques, économiques et socio-culturelles (Figure 1) (Ariza, Galan, & Serrano, 2007).

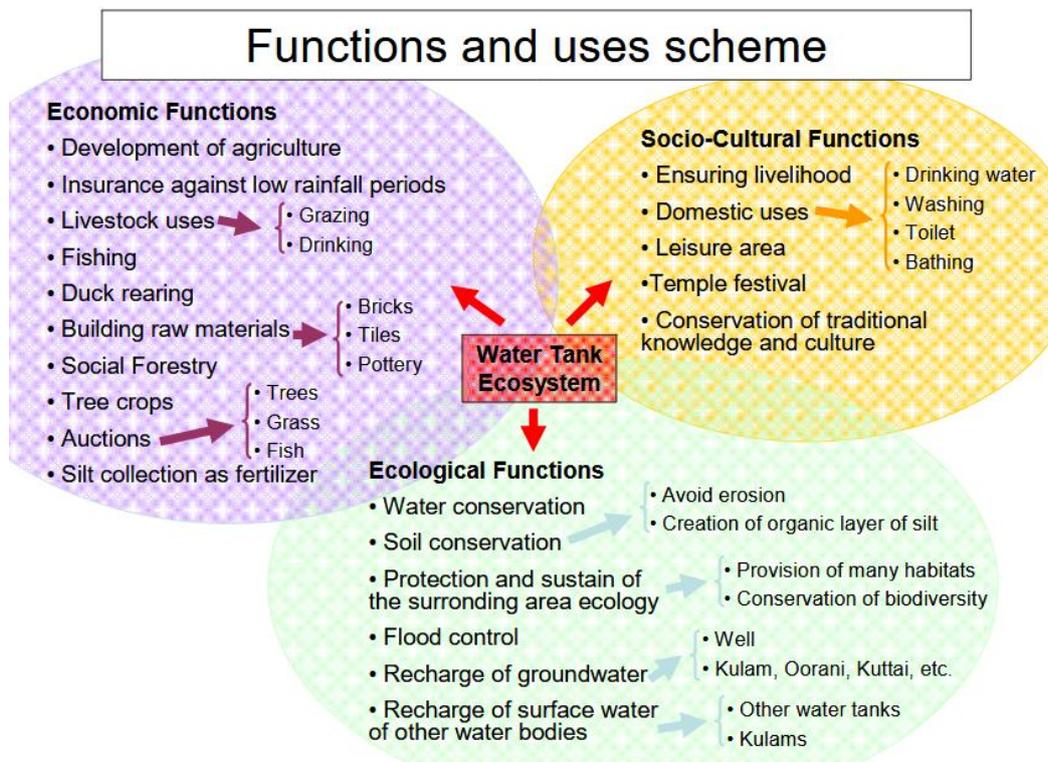


Figure 1 : Schéma des fonctions et usages (Ariza, Galan, & Serrano, 2007)

Des pratiques traditionnelles...

L'irrigation grâce aux réservoirs contribue de manière significative à la production agricole dans certaines parties de l'Asie du Sud et du Sud-Est. Dans le sud de l'Inde et au Sri Lanka les réservoirs ont une longue histoire et la majorité de ceux-ci ont été construits au cours des siècles passés. Ces outils millénaires ont été une source importante d'irrigation, surtout dans le sud de l'Inde. Présents dans chaque village et hameaux du Tamil Nadu, ce sont des biens communs appartenant à chaque villageois qui a en retour pour rôle de l'entretenir. Bien que système d'irrigation en réservoir ait une signification particulière pour un grand nombre d'agriculteurs marginaux et à petite échelle dépendant essentiellement de l'irrigation en réservoir, il est tombé en désuétude à la suite de bouleversements successifs. (Palanisami, 2006) (Durand, 2017).

... à un abandon progressif

Lors de la colonisation britannique, l'eau fut appréhendée comme une ressource permettant de contrôler un Etat et de réaliser des profits. Dès lors, la gestion des réservoirs fut centralisée par l'administration anglaise, entraînant le désintérêt des villageois pour ces derniers qui furent par conséquent moins entretenus. A la suite de cette centralisation, la révolution verte commencée dans les années 1970 exerça une forte influence sur les politiques indiennes de l'eau comme la subvention à l'approvisionnement en électricité pour l'extraction des eaux souterraines utilisées dans l'agriculture. Ainsi, de nouveaux moyens techniques (barrages, pompes et forages) permirent d'augmenter le rendement des terres agricoles et ainsi de reléguer les tanks au rang d'accessoire pour l'irrigation. Ces deux changements (la centralisation et le remplacement) ont

déclenché une pratique appelée '*accaparement*' pouvant se définir comme toute action, activité ou éléments diminuant la capacité de stockage d'un tank, ou bien sa faculté d'assurer l'approvisionnement de son lit. Interdit par la loi, l'accaparement des tanks est pourtant réalisé et contribue à leur déclin. Cette pratique entraîne de nombreux conflits entre les différents acteurs concernés par les tanks. (Durand, 2017)

Aujourd'hui, la surexploitation massive des ressources en eau souterraine entraînée par la ferveur politique cause l'assèchement progressif des puits et la multiplication des coupures d'électricité liées à une consommation croissante due au pompage de l'eau à des profondeurs toujours plus grandes (Pascale, 2022).

Dans ce contexte, la réhabilitation des réservoirs dans l'objectif de retrouver leur fonction première liée au stockage de l'eau pour l'agriculture prend son sens dans la mesure où elle pourrait soulager les nappes phréatiques surexploitées et contribuer à une gestion plus responsable de la ressource en eau.

Méthode

L'objectif de cette démarche est d'évaluer dans quelle mesure les réservoirs à ciel ouvert, et notamment ceux d'Osudu et Kanagan, permettent de répondre aux besoins en eau pour l'agriculture locale. La méthode proposée combine plusieurs approches : la détection des surfaces en eau pour les caractéristiques hydrologiques, l'estimation des apports en eau via la pluviométrie, la caractérisation des usages agricoles à partir d'observations de terrain, et enfin le croisement entre offre et demande en eau. Cette approche intégrée permet de mettre en relation les caractéristiques hydrologiques des réservoirs avec les dynamiques agricoles qui les entourent pour les réservoirs choisis.

Périmètre d'étude et données

Cette étude porte sur les réservoirs d'Osudu et de Kanagan, situés dans l'État du Tamil Nadu, au sud-est de l'Inde, à proximité immédiate de la ville de Pondichéry (Figure 2). Déjà étudiés dans le cadre du projet PATAMIL, notamment d'un point de vue sociologique, ces réservoirs font ici l'objet d'une approche hydrologique et agricole complémentaire.

Le réservoir d'Osudu, le plus vaste des deux, est localisé au nord-ouest de Pondichéry et se distingue par sa superficie étendue. Le réservoir de Kanagan, plus petit, se trouve plus au sud, en zone périurbaine. Leur position respective dans le paysage, au sein de zones à forte dynamique urbaine et agricole, en fait des sites particulièrement pertinents pour évaluer l'impact des pluviométries saisonnières sur la ressource en eau stockée.

Terrain d'étude : réservoirs Osudu et Kanagan

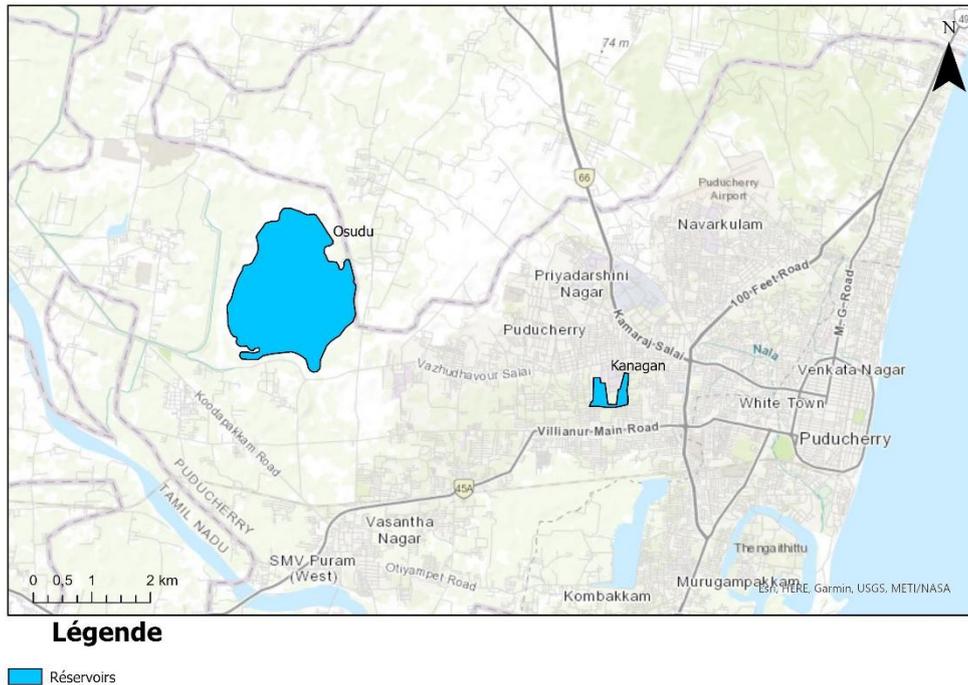


Figure 2 : Emplacement de la zone d'étude

Cette étude intègre plusieurs ensembles de données pour analyser les processus hydrologiques et agricoles au sein des bassins versants des lacs Kanagan et Osudu.

L'imagerie satellite, principalement Sentinel-2, est employée pour mesurer l'évolution des surfaces en eau. Le modèle numérique de terrain issu des données du satellite Copernicus est utilisé pour délimiter les bassins versants des lacs ainsi que pour adapter le ruissellement aux pentes. Les données pluviométriques se déclinent en deux types : les CHIRPS (*Climato Hazard Center UC Santa Barbara*) sont des données mondiales à long terme fournissant une base pour comprendre les modèles de précipitations tandis que les TN-SMART (*Tamil Nadu System for Multi-hazard potential impact assessment Alert emergency Response planning and Tracking*) sont des données locales plus représentatives de la réalité. Enfin, l'impact des précipitations sur le ruissellement est modulé davantage par les données d'occupation du sol, qui ont été dérivées de l'imagerie des satellites Sentinel-1 et Sentinel-2.

La Figure 3 synthétise l'ensemble des données utilisées.

Nom	Sources	Année	Objectif	Lien
Images Sentinel-2	Géodes CNES	2024	Mesurer la surface des réservoirs grâce à la télédétection	https://geodes-portal.cnes.fr/
Modèle numérique de terrain	Copernicus 30	2015	Déterminer les bassin versants des réservoirs et l'influence de la pente sur le ruissellement	https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3
Pluviométrie annuelle	TN Smart	2023 2024	Déterminer la réponse hydrologique	https://beta-tnsmart.rimes.int/ind

				ex.php/Rainfall/daily_data
Pluviométrie moyenne	CHIRPS	1995-2014	Déterminer les volumes entrants moyens	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
Occupation du sol	ESA, Sentinel-1 et Sentinel 2	2021	Évaluer l'occupation des sols et leur impact sur réponses hydrologiques	https://esa-worldcover.org/en

Figure 3 : Sources des données utilisées

Réponse hydrologique

La réponse hydrologique a pour objectif d'évaluer le délai de réaction entre les pluies et le remplissage effectif des réservoirs. Pour cela, deux séries temporelles sont comparées à l'aide d'une analyse de corrélation de Pearson avec différents décalages temporels : les précipitations et l'évolution des surfaces en eau extraites grâce à la télédétection.

Détection des surfaces en eau (télédétection)

La télédétection est une technique qui, par l'acquisition le traitement et l'interprétation d'images satellites, permet d'obtenir des renseignements sur la surface terrestre sans contact direct avec celle-ci. Les images brutes sont obtenues en utilisant l'énergie acquise par des capteurs montés sur des vecteurs comme des drones, des avions ou des satellites. La télédétection met en œuvre des procédés pour transformer l'image en données géolocalisées, notamment en couches exploitables dans les systèmes d'information géographique. Cette technique est essentielle pour mesurer et gérer les ressources et infrastructures. Elle permet également de comprendre les catastrophes naturelles pour y faire face ainsi que de surveiller l'utilisation des terres et les effets du changements climatiques (Gouvernement du Canada, 2025) (Géoconfluences, 2025).

Comme le site d'étude ne comporte que deux réservoirs, la télédétection est utilisée à l'échelle locale afin de visualiser l'évolution temporelle de la surface de ceux-ci et d'extraire leur signature temporelle. La détection et la classification sur une plus grande échelle ont été approfondies par Tristan Le Pape.

Le processus montré en Figure 4, est appliquée aux images optiques Sentinel-2 et permet de cartographier l'ensemble des réservoirs sur une zone. Un zoom sera effectué plus tard pour ne garder que les réservoirs retenus.

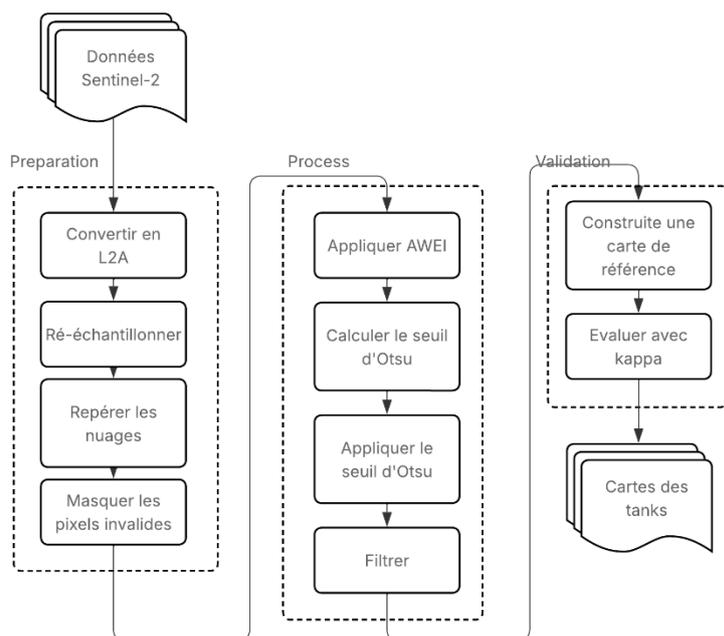


Figure 4 : Cartographier les réservoirs grâce à la télédétection

Préparation

La préparation des données a pour objectif principal de masquer les nuages. En effet, les capteurs étant optiques, aucune image ne peut être réalisée de nuit et les ondes sont bloquées par les nuages, ce qui ne permet pas de voir ce qu'il y a en dessous.

Pour cela, l'image est d'abord rééchantillonnée, c'est-à-dire qu'on donne la même résolution spatiale (10 mètres) à chacune des treize bandes détaillées en Figure 5

Bande	Couleur	Longueur d'onde (nm)	Résolution spatiale (m)
B01	Bleu profond	443	60
B02	Bleu	490	10
B03	Vert	560	10
B04	Rouge	663	10
B05	Rouge profond	705	20
B06	Rouge profond	740	20
B07	Rouge profond	783	20
B08	Proche Infrarouge	842	10
B08A	Proche Infrarouge	865	20
B09	Proche Infrarouge	945	60
B10	Infrarouge court	1375	60
B11	Infrarouge court	1610	20
B12	Infrarouge court	2190	20

Figure 5 : Spécification des bandes Sentinel-2 (Sur, Kumar, & Pateriya, 2021)

Les nuages et leurs ombres sont un facteur bloquant pour le traitement d'image et sont filtrés. La valeur NaN (*Not a Number*) leur est attribuée afin qu'ils ne soient plus pris en compte dans la suite du traitement.

Traitement

Certains indices permettent de faire ressortir les surfaces en eau par rapport au reste du paysage, considéré alors comme l'arrière-plan.

Le MNDWI (*indice d'eau par différence normalisée* ou *Modified Normalised Difference Water Index*) (McFeeters, 1996) (EOS Data Analytics, 2024).

$$(1) \text{MNDWI} = \frac{\text{Vert} - \text{Infrarouge Court}}{\text{Vert} + \text{Infrarouge Court}}$$

L'AWEI (*Indice d'Extraction de l'Eau Automatisé* ou *Automated Water Extraction Index*) (Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2014).

$$(2) \text{AWEI}_{nsh} = 4 * (\text{Vert} - \text{IR court}) - (0,25 * \text{IR proche} - 2,75 * \text{IR court})$$

$$(3) \text{AWEI}_{sh} = \text{Bleu} + 2,5 * \text{Vert} - 1,5 * (\text{IR proche} + \text{IR court}) - 0,25 * \text{IR court}$$

Le MNDWI (1) est l'indice le plus couramment utilisé. Le AWEI, plus rare se décline en deux versions : l'équation (2) est faite pour les environnements urbains, là où les surfaces des toits sont nombreuses alors que l'équation (3) est particulièrement adaptée aux zones avec des ombres et des surfaces sombres (Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2014).

Chacun de ces trois indices fait ressortir certains éléments spécifiques (Figure 6) mais c'est finalement le AWEI_{sh} (3) qui a été retenu pour ses résultats de validation nettement meilleurs.

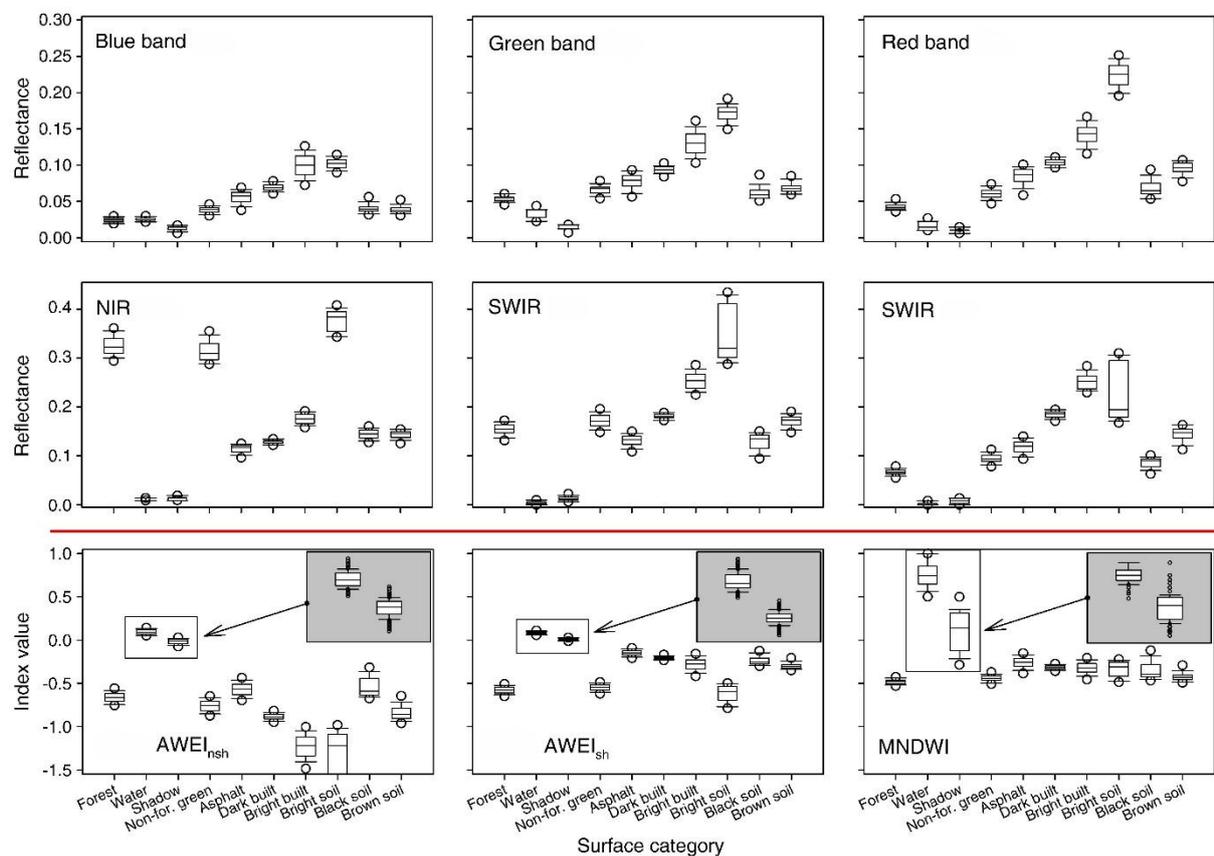


Figure 6 : Distributions de réflectance des pixels purs des principaux types de couverture terrestre (Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2014), modifié par Manon Couderc

Comme les surfaces en eau ont été mise en valeurs par rapport à l'arrière-plan, elles sont désormais extraites grâce à la méthode d'Otsu qui sépare les pixels en deux classes : ceux représentant une surface d'eau et ceux représentant de la non-eau (Sur, Kumar, & Pateriya, 2021) (Yang, et al., 2020). La Figure 7 illustre ce passage de mise en valeur à séparation binaire en deux classes. Le code python utilisé pour appliquer la méthode Otsu et effectuer cette séparation est en Annexe 1.

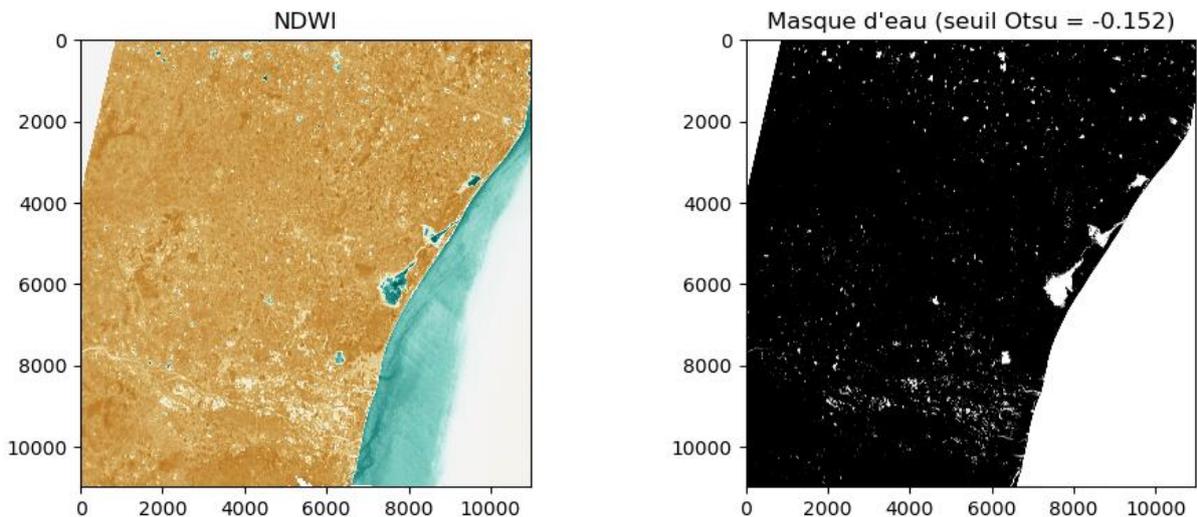


Figure 7 : Exemple de seuillage par la méthode Otsu

Finalement un filtre médian 3x3 est appliqué pour obtenir une image de meilleure qualité en enlevant le bruit et les pixels isolés.

Validation

Pour valider les résultats obtenus, une carte de référence est créée en détournant à la main 500 polygones d'eau et 500 de non-eau. Le kappa de Cohen (κ) mesure la congruence entre nos observations manuelles et celle du processus en tenant compte du facteur chance avec le script en Annexe 2.

Si les deux observations sont totalement en accord, $\kappa = 1$. Si elles sont totalement en désaccord (ou en accord dû uniquement au hasard), $\kappa \leq 0$. Les résultats des comparaisons peuvent être exprimés dans un tableau de confusion (Figure 8).

		Prédit	
		Positif	Négatif
Réel	Positif	Vrai positif	Faux négatif
	Négatif	Faux positif	Vrai négatif

Figure 8 : Matrice de confusion kappa

Synthèse

La technique de synthèse mise en place mais non utilisée par Alexis Burger, consiste à rendre les nuages transparents et à empiler les images d'un même mois afin d'en obtenir une image finale la plus complète possible représentant la situation non plus quotidienne mais mensuelle.

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 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. 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 images mensuelles issues de la synthèse sont recadrées pour ne conserver que les réservoirs retenus et les pixels sont dénombrés, chacun couvrant une surface de 100 m² (Annexe 4) le nombre de pixels représentant de l'eau est extrait pour déterminer la surface du réservoir pour chaque mois, sachant que chaque pixel représente une surface réelle de 10 mètres par 10 mètres.

L'évolution des surfaces dépend de la pluviométrie locale, avec laquelle elle doit être comparée.

Extraction des données pluviométriques quotidiennes

Les données pluviométriques locales sont extraites de la plateforme TN-SMART, qui fournit des mesures quotidiennes de précipitations pour l'ensemble des stations météorologiques du Tamil Nadu. Chaque réservoir est associé à la station météorologique la plus représentative de sa pluviométrie, grâce aux polygones de Thiessen / Voronoï (Peters, 2024). Cette méthode partitionne l'espace en cellules, chacune étant constituée des points géographiquement les plus proches d'une station donnée (Géoconfluences, 2022). Une fois la station de référence identifiée pour chaque réservoir, les séries chronologiques de précipitations sont extraites directement depuis le site de TN-SMART et traitées à l'aide d'un script Python (Annexe 5).

Pour évaluer la validité des données utilisées, le test de Kruskal-Wallis est réalisé entre les données de la station sélectionnée et celles de ses voisines immédiates. L'hypothèse nulle postulant l'appartenance des échantillons à une même population ne doit pas être rejetée ; cela garantirait que les différences observées relèvent de la variabilité naturelle des précipitations et non d'un biais systématique (Serrihni, 2024).

Finalement, l'analyse de corrélation de Pearson permet d'évaluer la relation entre les surfaces et les pluies en fonction du temps. Cette analyse appliquée sur différents décalages temporels permet de connaître le délai entre la tombée de la pluie et le remplissage effectif du réservoir, affectant les volumes disponibles.

Modélisation des volumes entrants

L'analyse du volume d'eau entrant dans les réservoirs permet d'évaluer leur contribution potentielle à l'irrigation agricole. En lien avec les précipitations et les caractéristiques de l'occupation du sol, cette partie vise à estimer les apports annuels en eau, afin d'en déduire leur potentiel pour répondre aux besoins en irrigation. L'approche (Figure 9) repose sur la modélisation du ruissellement et sur la pluviométrie à l'échelle des bassins versants alimentant les réservoirs, à partir de données satellitaires et climatologiques traitées sous SIG.

L'évapotranspiration, l'infiltration profonde et les pertes par fuite n'ont pas été intégrées dans l'estimation du volume d'eau.

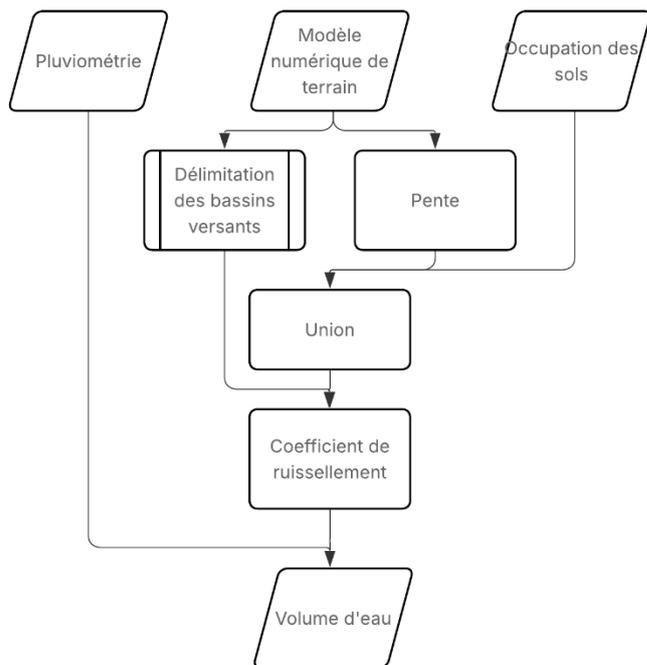


Figure 9 : Processus de modélisation des volumes d'eau entrants

Délimitations des bassins versants

La délimitation des bassins versants et l'obtention de leur surface se fait à partir du modèle numérique de terrain avec un traitement SIG comme détaillé en Figure 10 (Peters, 2024).



Figure 10 : Processus de délimitation de bassin versant

Données pluviométriques moyennes

Utiliser les données moyennes pluriannuelles CHIRPS entre 1995 et 2014 plutôt que des données issues d'une seule année permet de lisser les variations interannuelles liées à des événements climatiques exceptionnels ou à des irrégularités ponctuelles et d'obtenir des volumes plus représentatifs.

Les données CHIRPS ont été extraites par Estelle Chartier (page 9).

Détermination du coefficient de ruissellement

La méthode appliquée pour déterminer le coefficient de ruissellement est inspirée de la technique SCS-CN (*Soil Conservation Service-Number*), développée par l'USDA (*United States Department of Agriculture*) en 1969. La méthode SCS-CN propose des formules empiriques, ainsi que des tableaux et courbes établis pour différents types de sols, d'utilisations des terres et de conditions hydrologiques (Satheeshkumar, Venkateswaran, & Kannan, 2017) (Mulu, et al., 2025).

Cette estimation a pour objectif de donner un ordre de grandeur en supposant que les précipitations sont uniformes au sein de chaque bassin.

Les coefficients de ruissellement (Figure 11) ont été approximés à partir de la littérature existante, faute de données pédologiques locales exploitables. Pour avoir des valeurs réellement représentatives, des mesures de terrain seraient nécessaires.

		Pente (%)		
		<5	5 – 15	>15
Occupation du sol	Arbres	0,02	0,07	0,15
	Arbustes et broussailles	0,10	0,20	0,40
	Herbacées	0,10	0,25	0,50
	Terres cultivées	0,045	0,13	0,29
	Zone artificialisée	0,90	0,90	0,90
	Sols nus / peu végétalisés	0,20	0,25	0,45
	Eaux	0	0	0
	Zones humides	0,05	0,05	0,05

Figure 11 : Coefficient de ruissellement en fonction du type de sol et de la pente (Chow & Maidment, 1988) (Viessmen & Lewis, 2003) (United States Department of Agriculture, 1986) (Zhai, Hou, Zhang, & Chen, 2023) (Susilawati, 2016) (Yanti, 2018) (Landemaine, 2023)

Ainsi on obtient pour le volume brut entrant :

$$\text{Volume brut entrant} = \text{Surface} \times \text{Hauteur de pluie} \times \text{Coefficient de ruissellement}$$

Le volume d'eau entrant total et sa répartition dans l'année doit être confronté aux besoins engendrés par les usages agricoles.

Identification des usages et besoins agricoles

Cette étape repose sur une approche de terrain couplée à des analyses spatiales afin de caractériser les usages agricoles autour des réservoirs, estimer les besoins en eau des cultures, et évaluer la capacité des réservoirs à y répondre.

Observations de terrain : type de cultures

Dans un premier temps, une campagne de terrain est réalisée autour d'un réservoir, dans une zone d'un kilomètre autour des berges. La zone d'étude est découpée en grille régulière de 500 mètres par 500 mètres, permettant un échantillonnage spatial systématique. Sur le terrain, chaque cellule est visitée individuellement et les types de culture dominant et secondaire sont relevés. Les coordonnées GPS des centres de chaque cellule sont utilisées pour faciliter le repérage lors des déplacements.

Par exemple, le découpage du terrain pour Osudu se présente sous la forme de 64 carrés, de 500 mètres par 500 mètres et répartis de manière régulière autour du réservoir, dans une bande tampon d'un kilomètre. Ce quadrillage est conçu afin de faciliter le repérage sur le terrain et d'assurer une couverture homogène de la zone d'étude comme présenté sur la Figure 12.

Points de relevé terrain autour du réservoir Osudu

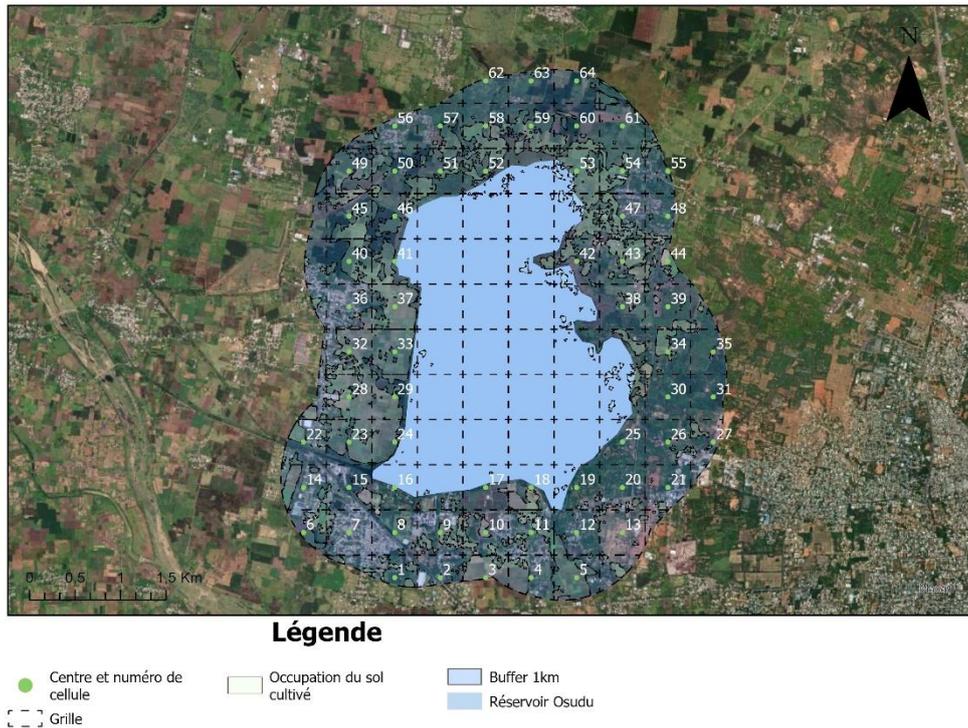


Figure 12 : Points de relevés terrain du réservoir Osudu

Afin de calculer la surface agricole présente dans chaque cellule, l'occupation agricole des sols est extraite à partir de la couche globale d'occupation du sol, puis spatialement découpée selon la grille d'échantillonnage afin de calculer la surface agricole présente dans chaque cellule. Lorsque des cultures secondaires étaient identifiées sur le terrain, leur surface est estimée de manière standardisée à 1/16 de la surface agricole totale de la cellule.

Estimation des besoins en eau des cultures

Par la suite, une base de données (Figure 13) est constituée et croisée avec les volumes d'eau disponibles estimés mensuellement. Une modélisation simple du bilan *irrigation - eau disponible* est réalisée afin d'estimer, à l'échelle mensuelle, la capacité des réservoirs à satisfaire les besoins en irrigation des cultures repérées.

Type de culture	Besoin en eau par cycle (mm)	Nombre de cycles dans l'année	Périodes d'irrigation		Source
			1 ^{er} cycle	2 ^{ème} cycle	
Noix de coco	1000	-	Toute l'année	-	(Kerala Agricultural University, 2019)
Banane	1200	-	Toute l'année	-	(Tamil Nadu Agricultural University, 2025) (Inayatali & Suryanarayana, 2016)
Millet	250	2	Juin Aout	Octobre Décembre	(Tamil Nadu Agricultural University, 2025) (Sivasakthi & Devi, 2023)
Riz	1500	2	Juin Juillet Aout	Novembre Décembre Janvier	(Government of Tamil Nadu, State Planning Commission, 2023)

Figure 13 : Besoins hydriques, fréquence annuelle et périodes d'irrigation des cultures

Calcul de la production agricole théorique

Enfin, une estimation du potentiel de production agricole est envisagée sur la base de coefficients de rendement moyens par culture (Figure 14).

Type de culture	Rendement (tonne/hectare)	Source	Besoins moyens (t/pers/an)	Source
Noix de coco	10,9	(Directorate of Economics and Statistics, 2024)	0,00616	(Food and Agriculture Organization of the United Nation, 2022)
Banane	37,98		0,01929	
Petit Millet	1		0,00738	
Riz	3,29		0,09898	

Figure 14 : Rendements agricoles et besoins par personne

Dans cette étude, les cultures non nourricières telles que la canne à sucre, le filao, l'acacia et le teck ne sont pas prises en compte dans l'évaluation des besoins en irrigation. Deux raisons principales justifient ce choix. D'une part, l'analyse se concentre exclusivement sur la capacité des réservoirs à soutenir la production alimentaire locale, ce qui exclut de fait les cultures à vocation non nourricière. D'autre part, ces espèces arborées ou industrielles sont majoritairement reconnues pour leur résistance à la sécheresse et leur faible dépendance à l'irrigation, notamment dans les contextes tropicaux. Leur exclusion permet ainsi de cibler plus précisément les cultures à forts besoins hydriques et à enjeu alimentaire direct.

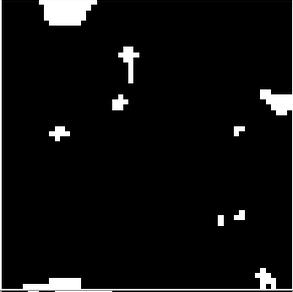
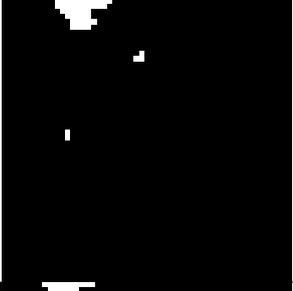
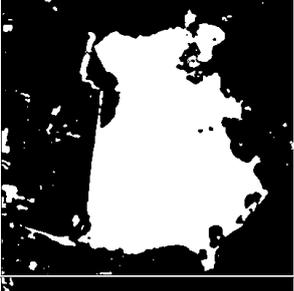
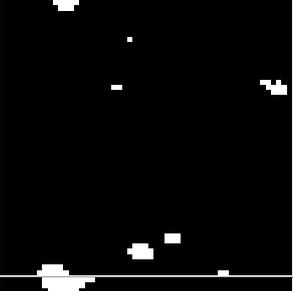
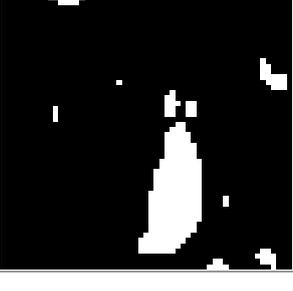
Osudu et Kanagan : des réservoirs aux dynamiques contrastées

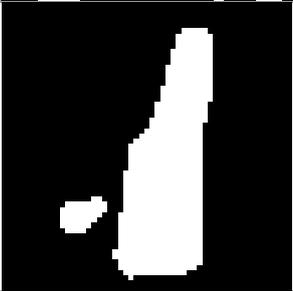
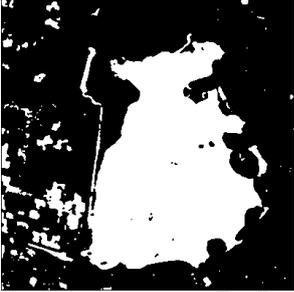
Cette section présente les résultats issus des différentes étapes du travail, depuis l'analyse de la dynamique des surfaces en eau jusqu'à l'évaluation des usages agricoles autour des réservoirs. Ces résultats permettent de caractériser la réponse hydrologique des réservoirs étudiés, d'identifier les cultures présentes sur les pourtours immédiats, et d'estimer leur capacité à répondre aux besoins en irrigation.

Des réponses hydrologiques différenciées

Osudu persiste alors que Kanagan s'efface

L'analyse temporelle des surfaces en eau des réservoirs permet de visualiser leur comportement hydrologique au fil de l'année. La Figure 15 illustre, à travers une série d'images Sentinel-2, l'évolution mensuelle de la surface en eau pour les réservoirs d'Osudu et de Kanagan en 2024. Elle permet d'apprécier visuellement les dynamiques de remplissage et de comparer les comportements respectifs de ces deux réservoirs, aux dynamiques contrastés.

Mois	Osudu	Surface (km ²)	Kanagan	Surface (km ²)
Janvier		7,11	Pas d'image sans nuages	-
Février		7,14		Lac très peu rempli (Figure 16) ≈ 0
Mars		6,62		Lac très peu rempli (Figure 16) ≈ 0
Avril		5,76		Lac très peu rempli (Figure 16) ≈ 0
Mai		5,33		0,29

Jun		5,58		0,47
Juillet	Confusion du réservoir avec des nuages	-		0,84
Aout		5,78		0,62
Septembre		5,32		0,84
Octobre		5,58		0,75
Novembre		5,12		0,62

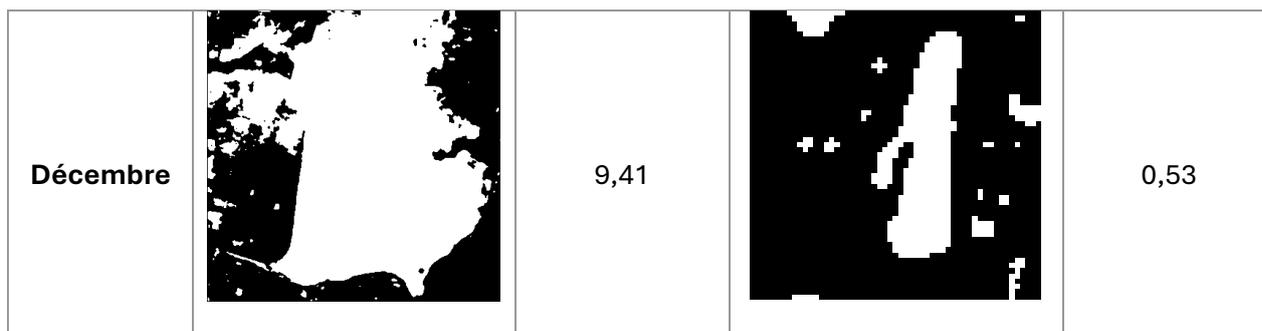


Figure 15 : Evolution en image de l'évolution de la surface des réservoirs Osudu et Kanagan

Pour le réservoir Kanagan, les images issues de la télédétection ne montrent aucune présence d'eau en février, mars et avril. D'après les résultats de Tristan Le Pape (page 19), le réservoir Kanagan perd en effet jusqu'à 88% de sa surface maximale. En vérifiant avec les images satellites brutes (Figure 16), on remarque que le réservoir est effectivement de la même couleur que les champs environnants. Cela peut s'expliquer par une très faible quantité d'eau qui ne laisse voir que les algues et la vase. Une façon de valider cette hypothèse serait d'aller sur le terrain ces mois-ci pour constater ou non l'absence d'eau.



Figure 16 : Remplissage de Kanagan en février, mars et avril

Le réservoir Osudu reste présent toute l'année avec une diminution de sa surface de 17% (Tristan Le Pape). En décembre 2024, sa surface s'est avérée particulièrement importante à cause du passage du cyclone Fengal qui a engendré des précipitations très importantes.

Des précipitations cohérentes avec le régime des moussons

Grâce aux polygones de Thiessen, on identifie la station VANUR comme la plus représentative de la pluviométrie, autant pour le bassin versant du réservoir Osudu que Kanagan (Figure 17).

Couverture spatiale des stations pluviométriques autour des bassins versants d'Osudu et Kanagan

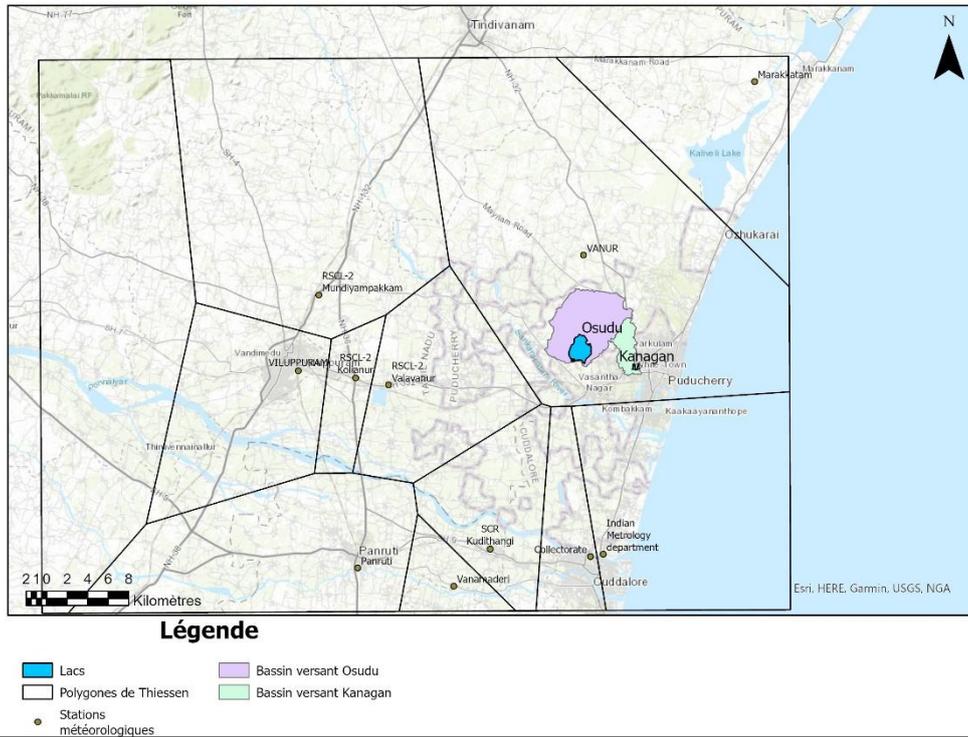


Figure 17 : Carte de la couverture spatiale des stations pluviométriques autour des bassins versants d'Osudu et Kanagan

Après extraction des données pluviométriques (Figure 18), on remarque une saisonnalité marquée : la distribution montre deux pics de précipitations, l'un en fin d'année 2023, particulièrement en octobre et novembre et un second épisode significatif au second semestre 2024, notamment en août et décembre. À l'inverse, la première moitié de 2024 (janvier à mai) se caractérise par une sécheresse quasi totale. Cette répartition reflète les deux principales moussons affectant la région : la mousson du Sud-Ouest (mai à septembre), faiblement marquée en 2024, et la mousson du Nord-Est (octobre à décembre), plus intense. La phase sèche en début 2024 coïncide avec une période de faible recharge des réservoirs, ce qui peut poser des problèmes en matière de disponibilité en eau pour l'agriculture.

Ces données permettent de mettre en évidence la forte dépendance des réservoirs à ces événements pluviométriques concentrés dans le temps. Elles soulignent aussi l'importance d'un stockage efficace de l'eau lors des périodes de crue, afin de pallier les déficits hydriques durant les mois secs.

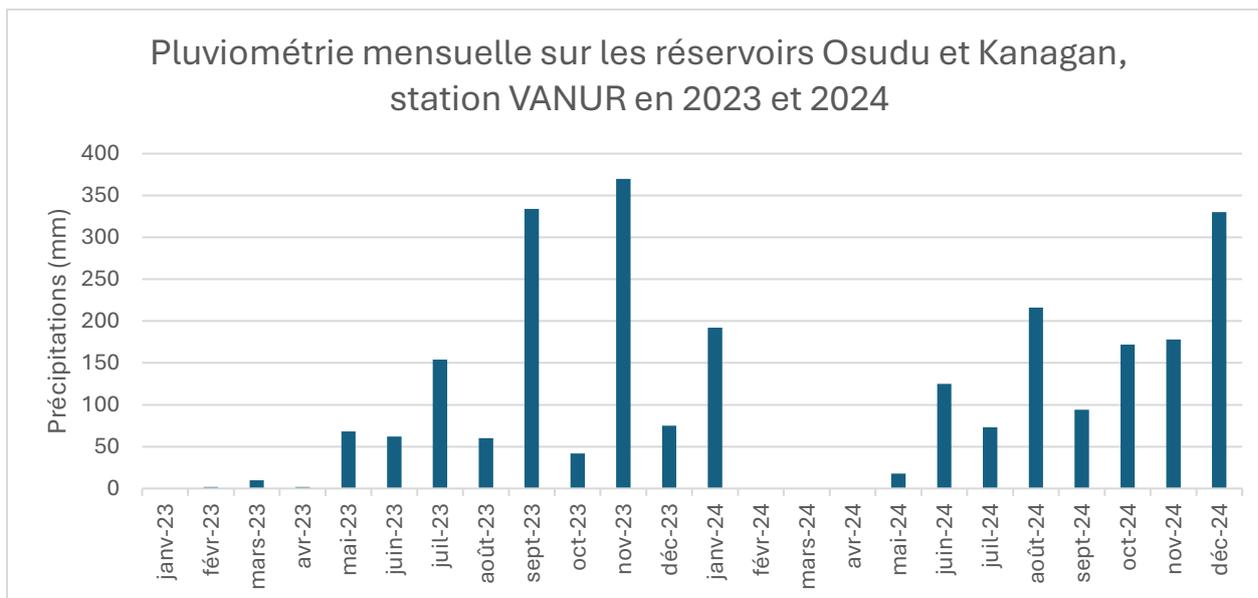


Figure 18 : Pluviométrie sur les réservoirs Osudu et Kanagan en 2023 et 2024 ; Station VANUR ; Données TN-Smart

Le test de Kruskal-Wallis est effectué pour les données quotidiennes sur la station VANUR et ses voisines RSCL-2 Valavanur, Marakkanam, RSCL-2 Mundiampakkam et Indian Metrology Department. Le test met en avant une p-valeur de 0,300, supérieure à 0,05, ce qui signifie que les échantillons proviennent de la même population. Cela revient à dire qu'aucune différence significative n'est détectée entre les différentes stations et que la station VANUR est cohérente avec ses voisines.

Les évolutions surfacique et pluviométriques sont donc prêtes à être comparées avec l'analyse de corrélation de Pearson.

Une réaction décalée pour Osudu et immédiate pour Kanagan

Les résultats de l'analyse statistique menée pour déterminer le temps de réponse hydrologique grâce au coefficient de Pearson sont détaillés dans la Figure 19. Les comparaisons des séries temporelles (Annexe 3) sont faites avec un décalage allant jusqu'à quatre mois.

	M0	M+1	M+2	M+3	M+4
OSUDU	0,44	-0,01	0,58	0,46	0,44
KANAGAN	0,59	0,47	0,08	-0,54	-0,57

Figure 19 : Coefficient de corrélation de Pearson entre la pluie et la surface des réservoirs

Les corrélations entre précipitation et surface en eau des deux réservoirs témoignent d'une dynamique différenciée. Pour Osudu, la corrélation maximale ($r = 0,58$) est atteinte avec un décalage de deux mois alors que pour Kanagan ($r = 0,59$) elle est atteinte sans décalage, c'est-à-dire avec les précipitations du mois courant.

Osudu, dont le bassin versant couvre $38,5 \text{ km}^2$, est situé dans un environnement à dominante agricole et forestière. Le décalage temporel observé suggère un temps de concentration plus long, probablement lié à la taille du bassin, à la présence de sols plus perméables et à une couverture végétale dense, qui ralentissent le ruissellement et favorisent l'infiltration et le stockage dans les sols. À l'inverse, Kanagan, avec son bassin versant de $8,4 \text{ km}^2$ en zone péri-urbaine, réagit plus rapidement aux précipitations, ce qui peut être dû à une imperméabilisation plus forte, une surface moindre, et un drainage plus direct des eaux vers le réservoir.

Des volumes d'eau entrant du simple au triple

Les bassins versants des réservoirs Osudu et Kanagan représentés sur la Figure 20 font respectivement 38,5 km² et 8,4 km².

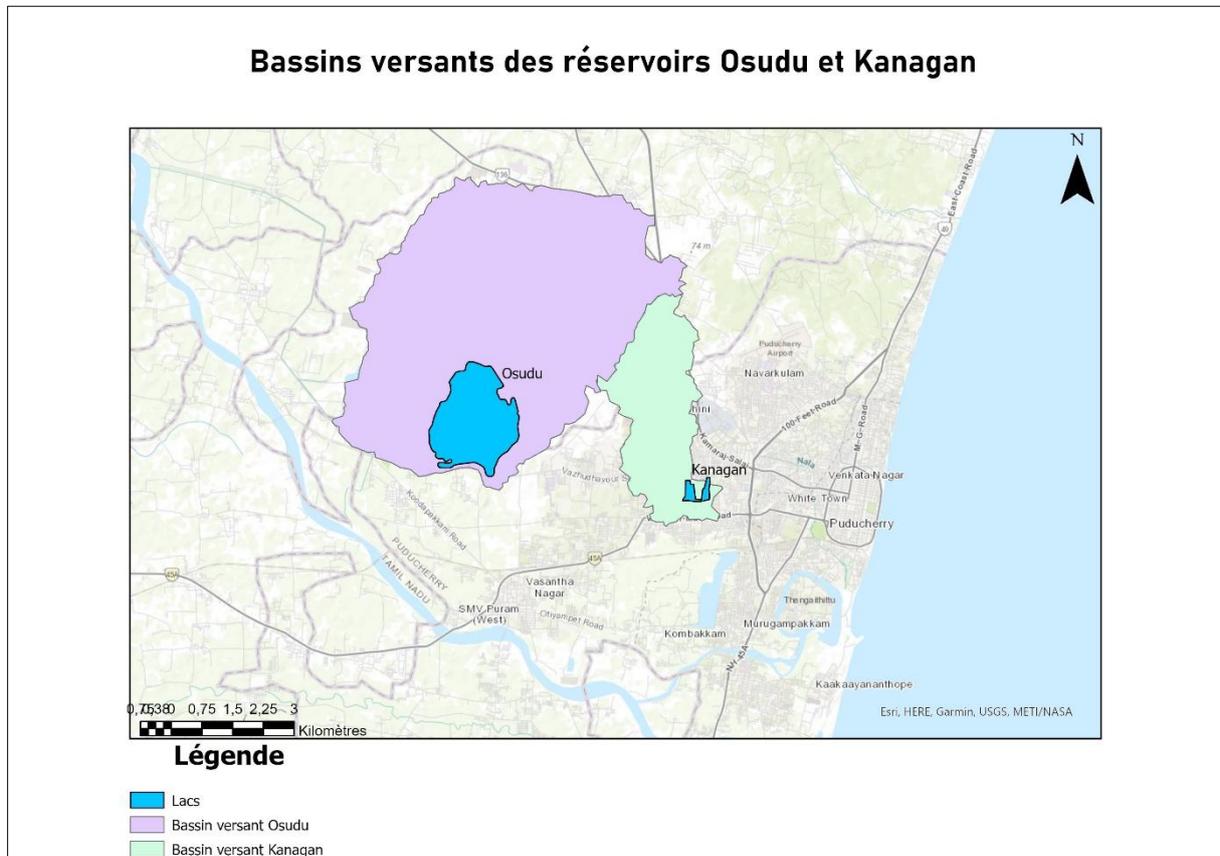


Figure 20 : Bassins versants des réservoirs Osudu et Kanagan

Les précipitations moyennes CHIRPS (Figure 21) présentent tout comme les données TN-SMART, une saisonnalité marquée avec comme témoignage des deux moussons, les importantes quantités d'eau tombées en aout, octobre et novembre. La période janvier-mai reste sèche avec moins de 50 millimètres de pluie.

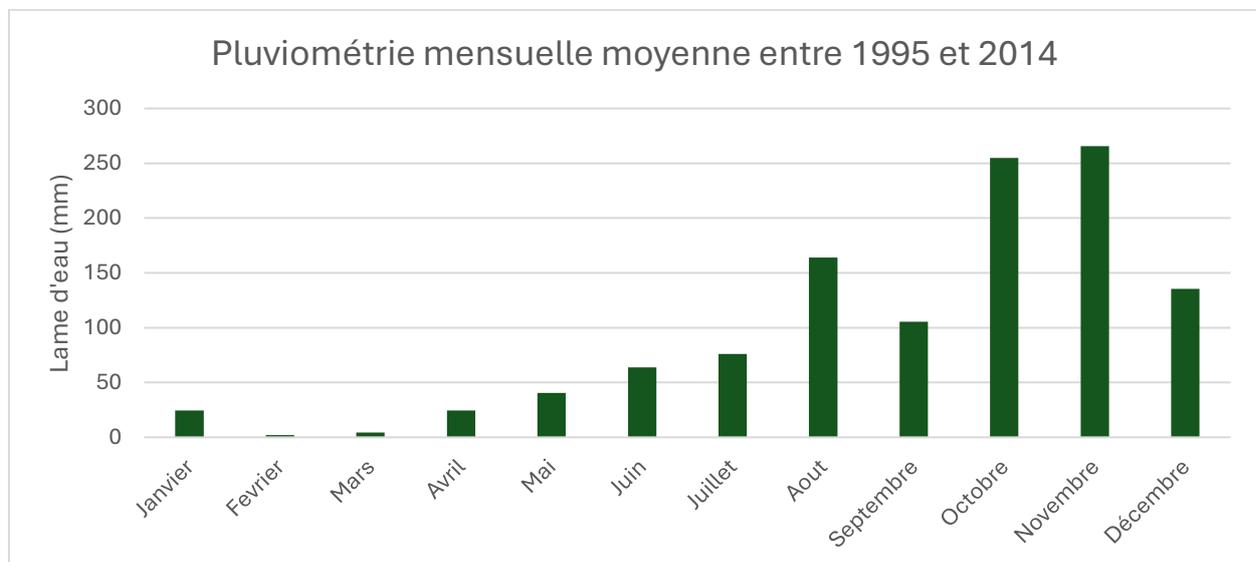


Figure 21 : Pluviométrie mensuelle moyenne entre 1995 et 2014, Données CHIRPS

L'occupation des sols (Figure 22) et la pente issue du modèle numérique de terrain sur les bassins versants permettent de déterminer les coefficients de ruissellement d'Osudu et Kanagan, soit respectivement 0,249 et 0,303. Ces résultats sont cohérents avec l'occupation du sol : le bassin versant Osudu se situe dans une zone agricole et forestière, des sols qui retiennent mieux l'eau que les surfaces artificialisées très présentes autour de Kanagan.

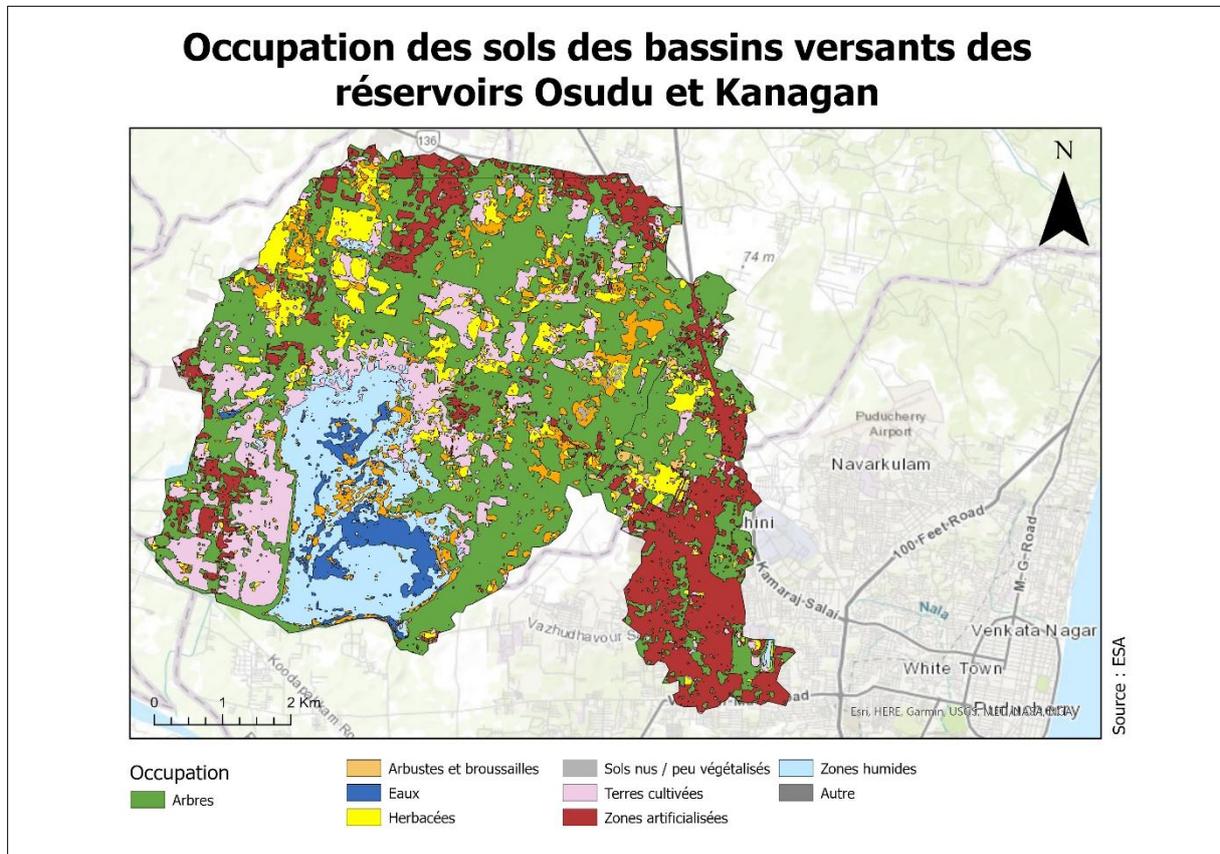


Figure 22 : Occupation des sols des bassins versants des réservoirs Osudu et Kanagan

Finalement, les volumes totaux pour Osudu et Kanagan sur l'année 2024 sont respectivement de 11,13 et 2,96 millions de mètres cubes. En prenant en compte les réponses hydrologiques (instantanée pour Kanagan et deux mois pour Osudu), les volumes entrants dans le lac sont répartis comme sur la Figure 23.

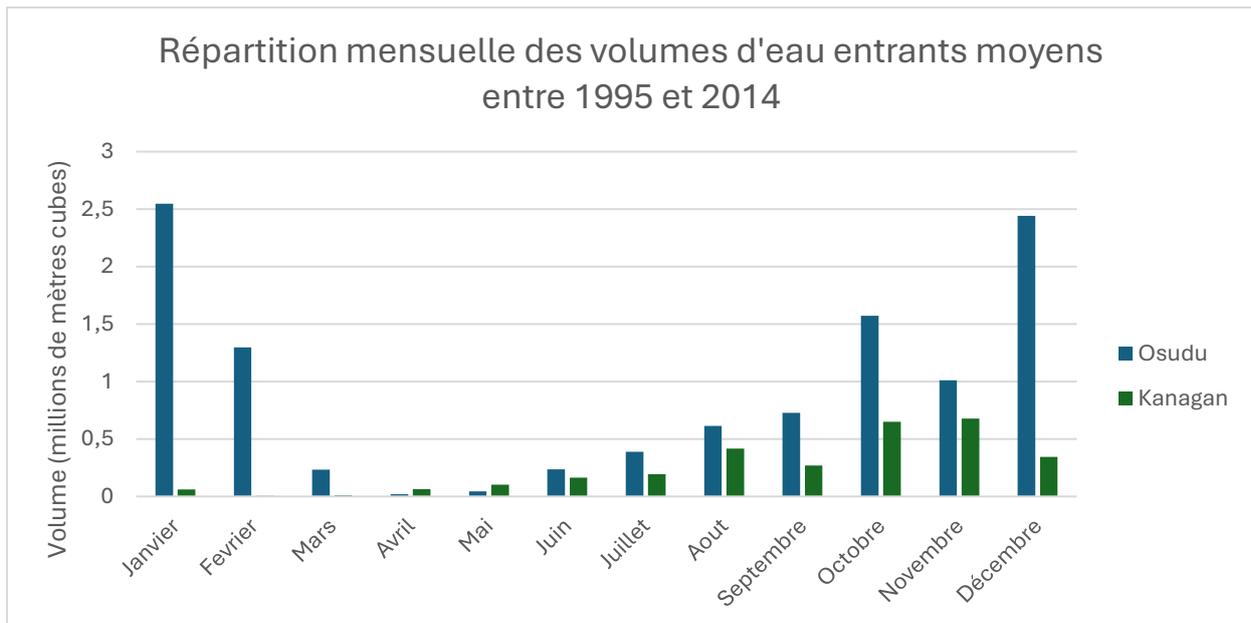


Figure 23 : Répartition mensuelle des volumes d'eau entrants moyens

On remarque que, en particulier à cause de la petite surface de son bassin versant, le volume d'eau drainé par Kanagan est très faible comparé à celui d'Osudu. Son incapacité à drainer un grand volume d'eau et à stocker celle-ci (le réservoir est complètement à sec entre février et avril) expliquent l'abandon de sa fonction agricole.

Osudu : un réservoir aux forts usages agricoles

Dans ce cadre, le repérage des cultures s'est centré sur Osudu puisqu'aucune culture n'a été observée autour du réservoir Kanagan. Cette situation peut s'expliquer par deux facteurs. D'une part, le réservoir est aujourd'hui enclavé dans une zone fortement urbanisée, ce qui limite l'espace disponible pour l'agriculture. D'autre part, comme ce réservoir est saisonnier (Tristan Le Pape), il ne conserve l'eau qu'une partie de l'année, ce qui le rend peu adapté à l'irrigation pendant la saison sèche. Ainsi, sa fonction agricole semble avoir été progressivement abandonnée, peut-être au profit de fonctions sociales ou écologiques. Cette absence de fonction économique agricole contraste fortement avec la situation d'Osudu qui présente une forte activité agricole dans sa périphérie, comme constaté sur le terrain.

Des cultures centrées sur les céréales

Le résumé de relevé de terrain (Figure 24) autour du réservoir d'Osudu montre un équilibre presque parfait entre les cultures nourricières (51 %) et non nourricières (49 %), réparties sur une surface totale de 453,3 hectares. Parmi les cultures nourricières, le millet (18,5 %) et le riz (16,3 %) dominent, suivis par la noix de coco (12,3 %) et la banane (4,1 %). Les cultures non nourricières sont majoritairement représentées par le filao, qui couvre à lui seul 46,3 % de la zone étudiée, tandis que la canne à sucre, l'acacia et le teck occupent des superficies bien plus restreintes.

	Type de culture	Surface (ha)	Part (%)
Culture nourricière	Millet	83,8	18,5
	Riz	73,7	16,3
	Banane	18,49	4,1
	Noix de coco	55,9	12,3
	Total	231,39	51
Culture non nourricière	Canne à sucre	2,70	0,6
	Filao	209,81	46,3
	Acacia	3,4	0,8
	Teck	5,6	1,2
	Total	221,51	49
	TOTAL	453,3	100

Figure 24 : Surface et part des cultures à Osudu

Les superficies notables dédiées au millet et au riz révèlent l'importance des céréales dans les systèmes de culture locaux, tant pour l'alimentation que pour leur adaptation aux cycles de précipitation. Alors que le millet est plutôt bien adapté au climat sec de l'Inde du sud, le riz pose la question de la pertinence des cultures inondées dans des zones où la disponibilité de l'eau reste parfois incertaine.

Un réservoir capable de soutenir l'agriculture locale

L'analyse croisée entre la disponibilité mensuelle de l'eau dans le réservoir Osudu et les besoins hydriques des cultures (Figure 25) révèle une capacité notable du réservoir à soutenir l'agriculture locale actuelle (dans le kilomètre environnant le réservoir). Les volumes d'eau entrants cumulés s'élèvent à 11,13 millions de mètres cubes, largement supérieurs aux besoins en irrigation des cultures nourricières identifiées (millet, riz, banane et cocotier), estimés à environ 2,38 millions de mètres cubes.

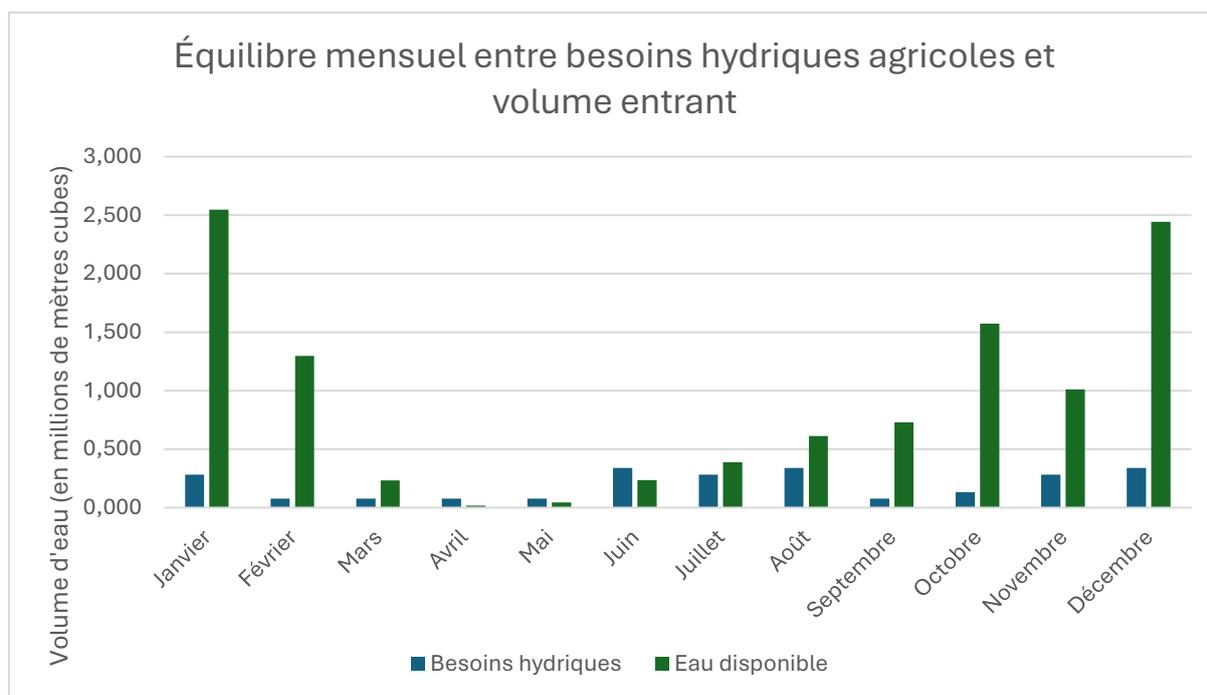


Figure 25 : Équilibre mensuel entre besoins hydriques agricoles et volume entrant

Malgré une saison sèche marquée de janvier à mai, Osudu conserve des volumes d'eau significatifs (entre 5,3 et 7,1 km² de surface), témoignant de sa capacité de stockage. Cette inertie hydrique couvre une grande partie des besoins durant les périodes critiques d'irrigation, en particulier en mars, avril et mai. Ce décalage temporel entre recharge et usage (confirmé par un décalage de deux mois dans la réponse hydrologique) confirme l'utilité du réservoir comme tampon entre offre irrégulière et demande continue.

En somme, la gestion du réservoir Osudu à long terme apparaît justifiée, tant pour son impact direct sur la sécurité alimentaire que pour sa fonction stratégique de stockage face à la variabilité climatique.

En associant les surfaces observées sur le terrain à des rendements moyens issus de la littérature (Figure 26), on estime que le riz et le millet, représentent près de 35 % des surfaces agricoles recensées, permettant à eux seuls une production d'environ 327 tonnes de céréales par an. La banane et la noix de coco, bien que moins présentes, apportent une contribution importante par leur rendement élevé par hectare. Ces chiffres suggèrent que les cultures irriguées participent activement à la sécurité alimentaire locale.

Type de culture	Masse produite (tonne)	Besoins moyens (t/pers/an)	Équivalent population nourrie
Noix de coco	608	0,00616	90686
Banane	702,3	0,01929	36408
Petit Millet	83,8	0,00738	1150
Riz	242,6	0,09898	2451

Figure 26 : Quantités produites

L'étude des cultures autour du réservoir Osudu montre que ce dernier continue de jouer un rôle central dans le fonctionnement agro-hydrologique local. Malgré la pression foncière et les transformations socio-économiques, les cultures irriguées nourricières, en particulier les

céréales, restent bien représentées. Le réservoir permet de maintenir une activité agricole même pendant la saison sèche, grâce à sa capacité de stockage et à son inertie hydrologique.

La capacité du réservoir à couvrir les besoins en irrigation, associée à une production potentielle significative, conforte l'idée que ces infrastructures anciennes, si elles sont entretenues et intégrées dans les politiques locales, peuvent contribuer à une agriculture locale à long terme.

Conclusion

Ce travail a permis de démontrer que les réservoirs à ciel ouvert du Tamil Nadu, et en particulier celui d'Osudu, conservent une pertinence forte pour répondre aux enjeux agricoles contemporains. Grâce à son vaste bassin versant, à ses volumes entrants conséquents et à son inertie hydrique, le réservoir Osudu montre une capacité avérée à répondre aux besoins en irrigation, y compris durant la saison sèche. À l'inverse, Kanagan, plus urbain et saisonnier, illustre les limites d'un système déconnecté des pratiques agricoles. Ces résultats soulignent également la valeur ajoutée des approches croisées mobilisant outils numériques, données ouvertes et observations de terrain, pour mieux comprendre les dynamiques agro-hydrologiques locales. Ils mettent en évidence l'importance de réintégrer les réservoirs dans les stratégies de gestion territoriale de l'eau et montrent que les solutions traditionnelles, lorsqu'elles sont combinées avec des outils modernes, peuvent offrir une puissante réponse aux défis d'aujourd'hui.

Table des figures

Figure 1 : Schéma des fonctions et usages (Ariza, Galan, & Serrano, 2007)	4
Figure 2 : Emplacement de la zone d'étude	6
Figure 3 : Sources des données utilisées	7
Figure 4 : Cartographier les réservoirs grâce à la télédétection	8
Figure 5 : Spécification des bandes Sentinel-2 (Sur, Kumar, & Pateriya, 2021).....	8
Figure 6 : Distributions de réflectance des pixels purs des principaux types de couverture terrestre (Feyisa, Meilby, Fensholt, & Proud, 2014), modifié par Manon Couderc	9
Figure 7 : Exemple de seuillage par la méthode Otsu	10
Figure 8 : Matrice de confusion kappa	10
Figure 9 : Processus de modélisation des volumes d'eau entrants	12
Figure 10 : Processus de délimitation de bassin versant	12
Figure 11 : Coefficient de ruissellement en fonction du type de sol et de la pente (Chow & Maidment, 1988) (Viessmen & Lewis, 2003) (United States Department of Agriculture, 1986) (Zhai, Hou, Zhang, & Chen, 2023) (Susilawati, 2016) (Yanti, 2018) (Landemaine, 2023).....	13
Figure 12 : Points de relevés terrain du réservoir Osudu	14
Figure 13 : Besoins hydriques, fréquence annuelle et périodes d'irrigation des cultures.....	15
Figure 14 : Rendements agricoles et besoins par personne	15
Figure 15 : Evolution en image de l'évolution de la surface des réservoirs Osudu et Kanagan	18
Figure 16 : Remplissage de Kanagan en février, mars et avril	18
Figure 17 : Carte de la couverture spatiale des stations pluviométriques autour des bassins versants autour des bassin versants d'Osudu et Kanagan	19
Figure 18 : Pluviométrie sur les réservoirs Osudu et Kanagan en 2023 et 2024 ; Station VANUR ; Données TN-Smart.....	20
Figure 19 : Coefficient de corrélation de Pearson entre la pluie et la surface des réservoirs	20
Figure 20 : Bassins versants des réservoirs Osudu et Kanagan.....	21
Figure 21 : Pluviométrie mensuelle moyenne entre 1995 et 2014, Données CHIRPS	21
Figure 22 : Occupation des sols des bassins versants des réservoirs Osudu et Kanagan.....	22
Figure 23 : Répartition mensuelle des volumes d'eau entrants moyens	23
Figure 24 : Surface et part des cultures à Osudu	24
Figure 25 : Equilibre mensuel entre besoins hydriques agricoles et volume entrant	25
Figure 26 : Quantités produites	25

Références

- Ariza, P., Galan, E., & Serrano, T. (2007). *Water tanks as ecosystems : Ecosystemic perception of local population for integral management of water tanks in Tamil Nadu, South India*. Barcelona.
- Blasco, F., & Legris, P. (1973). Originalité des climats secs du Sud de l'Inde. *Annales de Géographie*, pp. 129-150.
- Chow, & Maidment. (1988). *Applied Hydrology*.
- Directorate of Economics and Statistics. (2024). *Area, Production, Yield - Reports*. Récupéré sur <https://data.desagri.gov.in/website/crops-apy-report-web>
- Durand, V. (2017). *Accaparement, conflits d'usages et perspectives juridiques concernant les tanks à Pondichéry et dans le Tamil Nadu (Inde)*.
- EOS Data Analytics. (2024, Janvier 01). *NDWI : Indice D'eau De Différence Normalisée*. Récupéré sur EOS Data Analytics: <https://eos.com/fr/make-an-analysis/ndwi/>
- Feyisa, G., Meilby, H., Fensholt, R., & Proud, S. (2014, Janvier). Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environnement*, vol. 140, pp. 23-35.
- Food and Agriculture Organization of the United Nation. (2022). *Food Balances (2010-)*. Récupéré sur FAO: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/FBS>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *Land and Water, Sugarcane*. Récupéré sur <https://www.fao.org/land-water/databases-and-software/crop-information/sugarcane/en/>
- Geethalakshmi, V., & Dheebakaran, G. (2008). Impact of climate change on agriculture over Tamil Nadu. *Climate Change and Agriculture Over India*.
- Géoconfluences. (2022, Octobre). *Polygones de Thiessen ou de Voronoï*. Récupéré sur Géoconfluences: <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/polygones-de-thiessen-ou-de-voronoï>
- Géoconfluences. (2025, Janvier 24). *Téledétection*. Récupéré sur Géoconfluences: <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/teledetection>
- Gouvernement du Canada. (2025, Mars 27). *Tutoriels sur la télédétection*. Récupéré sur Ressources Naturelles Canada: <https://ressources-naturelles.canada.ca/science-data/science-research/geomatics/remote-sensing/remote-sensing-software-tools>
- Government of Tamil Nadu, State Planning Commission. (2023). *Water Ressources*.
- Hardy, A., Ettritch, G., Cross, D., Bunting, P., Liywalii, F., Sakala, J., . . . Thomas, C. (2019, Mars 12). Automatic Detection of Open and Vegetated Water Bodies Using Sentinel 1 to Map African Malaria Vector Mosquito Breeding Habitats. *Remote sensing*.
- Inayatali, & Suryanarayana. (2016). Estimation of crop water requirement and irrigation scheduling using cropwat. *HYDRO 2016*. Pune.

- Jacob, C. (1960, Avril). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales . *Educational and Psychological Measurement*, vol. 20, no 1, pp. 37-46.
- Kerala Agricultural University. (2019). *Coconut*. Récupéré sur KAU Agri-Infotech Portal: <https://www.celkau.in/crops/Plantation%20Crops/Coconut/watermanagement.aspx>
- Landemaine, V. (2023). *Définition de valeurs de coefficient de ruissellement pour le vignoble de Chablis*.
- Landis, J., & Koch, G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, vol. 33, pp. 159-174.
- McFeeters. (1996, Janvier 04). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, pp. 1425-1432.
- Mendham. (2019). A review of nutrient, water and organic matter dynamics of tropical acacias on mineral soils for improved management in Southeast Asia. *Australian forestry*, pp. 45-56.
- Mulu, A., Berihun Kassa, S., Lakew Wossene, M., Minichil Meshesha, T., Almaw Fenta, A., & Buta Hailu, Y. (2025). Runoff estimation using the SCS-CN method and GIS: a case study in the Wuseta watershed, upper blue Nile Basin, Ethiopia. *Discover Water*.
- Otsu. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, 62-66.
- Palanisami. (2006). Sustainable Management of Tank Irrigation Systems in India. *Journal of Developments in Sustainable Agriculture*.
- Pascale, C. (2022). *Cartographie multi-échelle des ressources en eau sur les régions irriguées : une approche par télédétection multi-capteurs*. Toulouse.
- Peters, P. (2024). Cours "Hydrologie et hydraulique générale". Tours.
- Satheeshkumar, S., Venkateswaran, S., & Kannan, R. (2017). Rainfall–runoff estimation using SCS–CN and GIS approach in the Pappiredipatti watershed of the Vaniyar sub basin, South. *Modeling Earth Systems and Environment*.
- Serrihni, K. (2024). Cours de statistiques "TD3 ANOVA". Tours.
- Sivasakthi, & Devi, S. (2023). Water management in millet cultivation in Indian scenario 1. *Sensitizing the millet farming, consumption and nutritional security - challenge and opportunities*. Karaikal.
- Sur, K., Kumar, V., & Pateriya, B. (2021, Septembre 14). Surface water estimation at regional scale using hybrid techniques in GEE environment-A case study on Punjab State of India. *Remote Sensing Application*.
- Susilawati, C. L. (2016, Juillet). The motion for rainwater management in household to improve water resilience in a changing world. *5th International Seminar of HATHI*. Bali.
- Tamil Nadu Agricultural University. (2025). *Crop production : Minor Millets*. Récupéré sur TNAU Agritech Portal: https://agritech.tnau.ac.in/agriculture/minormillets_panivaragu.html

- Tamil Nadu Agricultural University. (2025). *Expert System for Banana*. Récupéré sur TNAU Agritech Portal:
https://agritech.tnau.ac.in/expert_system/banana/irrigationmanagement.html#4
- Tamil Nadu Agricultural University. (2025). *Pulpwood species : Casuarina equisetifolia*. Récupéré sur TNAU Agritech Portal:
https://agritech.tnau.ac.in/forestry/forest_industrial_pulpwood_Casuarina%20equisetifolia.html
- Tamil Nadu State of Environment and Related Issues. (2025). *Water Resources*. Récupéré sur Tamil Nadu State of Environment and Related Issues:
http://www.tnenviis.nic.in/database/tn-enviis_791.aspx
- United States Department of Agriculture. (1986). *Urban Hydrology for Small Watershed*.
- Verdelli, L., Maliet, E., & Chollet, L. (s.d.). *Le cycle urbain de l'eau à Chennai - Entre transition socio-écologique et consolidation du régime dominant*.
- Viessmen, & Lewis. (2003). *Introduction to Hydrology*.
- Yang, X., Qin, Q., Yésou, H., Ledauphin, T., Koehl, M., Grussenmeyer, P., & Zhu, Z. (2020, July). Monthly estimation of the surface water extent in France at 10-m resolution using Sentinel-2 data. *Remote Sensing of Environment*.
- Yanti, R. (2018). The Sustainable of Environmental Carrying Capacity To Support on Food Security (Nagari Sulit Air, X Koto Diatas District, Solok, West Sumatra). *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*.
- Zhai, J., Hou, P., Zhang, W., & Chen, Y. (2023, Avril). Assessment of Water Conservation Services Based on the Method of Integrating Hydrological Observation Data According to Different Ecosystem Types and Regions. *Water*.

Annexe 1 : Méthode Otsu, programme python

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Tue May 6 15:00:59 2025

@author: Manon Couderc
"""
#Importation des bibliothèques
import numpy as np #Permettre de manipuler des matrices et des tableaux
import rasterio #Permettre de lire et écrire sur des formats d'images
géoréférencées (.tif)
import matplotlib.pyplot as plt

# -----
# 1. Charger une image NDWI (GeoTIFF) avec rasterio
# -----
ndwi_image = "2024_04_29_AWEI.tif" # Chemin vers image NDWI
# Lire les métadonnées
with rasterio.open(ndwi_image) as src:
    ndwi = src.read(1).astype(np.float32)

# Remplacer les valeurs aberrantes ou extrêmes par NaN
ndwi[ndwi < -1] = np.nan
ndwi[ndwi > 1] = np.nan

# -----
# 2. Fonction Otsu
# -----
def otsu_intraclass_variance(image, threshold):
    result = []
    for cls_mask in [image >= threshold, image < threshold]: # Divise les
#pixels en deux classes : ceux au dessus (potentiellement de l'eau)
#et ceux en dessous (potentiellement le sol ou la végétation) du seuil
        cls_pixels = image[cls_mask] # Récupère les pixels de chaque classe
        cls_pixels = cls_pixels[~np.isnan(cls_pixels)] # Supprimer les NaN
        # Si la classe contient plus d'un pixel on calcule le poids de la
        #classe et la variance de tous les pixels de la classe,
        #c'est la variance intra-classe pondérée
        if cls_pixels.size > 1: # Éviter les warnings sur la variance
            result.append(np.mean(cls_mask) * np.var(cls_pixels))
    return np.sum(result) # Somme des variances pondérées des deux classes

# -----
# 3. Calcul du seuil optimal d'Otsu
# -----
# Le seuil optimal est celui qui minimise la somme des variances pondérées
# de deux classes
valid_pixels = ndwi[~np.isnan(ndwi)] # Extraire seulement les pixels
valides (pas NaN)
thresholds = np.linspace(np.nanmin(valid_pixels), np.nanmax(valid_pixels),
100) # Créer une série de seuil d'intervalle régulier entre les valeurs les
plus faibles et fortes des pixels de l'image
otsu_threshold = min(thresholds, key=lambda th:
otsu_intraclass_variance(ndwi, th)) # Appliquer la fonction Otsu (2) à
chacun des seuils et garder celui avec la plus faible variance

# -----
# 4. Générer le masque binaire d'eau
# -----
```

```

water_mask = (ndwi >= otsu_threshold).astype(np.uint8) # Convertir le
masque en entier (requis pour raster)
                                                    # 1 = eau, 0 = non-
eau

# -----
# 5. Enregistrer le masque binaire comme GeoTIFF
# -----
#Ouvrer un nouveau fichier géoTIFF en écriture
output_path = "water_mask.tif" # Nommer le masque en sortie
with rasterio.open(
    output_path,
    'w',
    driver='GTiff',
    height=water_mask.shape[0],
    width=water_mask.shape[1], # Garder le même taille que l'image
d'origine
    count=1,
    dtype=rasterio.uint8,
    crs=src.crs, # Garder la même projection que l'image d'origine
    transform=src.transform, # Garder le même géoréférencement que l'image
d'origine
) as dst:
    dst.write(water_mask, 1)

# -----
# 6. Visualisation (facultative)
# -----
plt.figure(figsize=(10, 4)) # Créer une image de 10x4 pouces

# Afficher l'image NDWI
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.imshow(ndwi, cmap="BrBG")
plt.title("AWEI")

# Afficher l'image avec les seuils
plt.subplot(1, 2, 2)
plt.imshow(water_mask, cmap="gray")
plt.title(f"Masque d'eau (seuil Otsu = {otsu_threshold:.3f})") #Indique le
seuil optimal dans le titre

plt.tight_layout()
plt.show()

```

Annexe 2 : Kappa

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed May 14 09:33:00 2025

@author: Manon Couderc
"""
#-----
----
# L'objectif de ce programme est de valider ou non les résultats
obtenus
# par la télédétection des réservoirs d'eau.
# Dans cette optique, on utilise le kappa de Cohen qui permet de
comparer
# l'emprise supposée des réservoirs (.tif, prédiction du modèle) et
leur
# emprise "réelle" détournée à la main (.shp, données terrain)
#-----
----

import rasterio # Lire et manipuler les images géoréférencées
from sklearn.metrics import cohen_kappa_score, confusion_matrix
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

#-----
----
# 1. Charger les rasters (résultat du modèle) ===
raster_pred_path = "pred.tif" # Chemin d'accès
raster_ref_path = "ref.tif"
with rasterio.open(raster_pred_path) as src_pred,
rasterio.open(raster_ref_path) as src_ref :
    pred = src_pred.read(1) # Lire la première bande
    ref = src_ref.read(1)

# Récupérer les métadonnées
# Comparer les taille et les systèmes de coordonnées
if src_pred.shape != src_ref.shape:
    raise ValueError("Erreur : les dimensions des deux rasters ne
correspondent pas.")
if src_pred.transform != src_ref.transform:
    raise ValueError("Erreur : les rasters n'ont pas le même
géoréférencement.")

#-----
----
# 2. Masquer les pixels invalides (NaN ou valeurs de fond)
#On ne garde que les pixels ou les deux rasters sont valides (0 ou 1)
valid_mask = np.isin(pred, [0, 1]) & np.isin(ref, [0, 1])

#-----
----
# 3. Extraire les pixels valides
y_pred = pred[valid_mask]
y_true = ref[valid_mask]

#-----
----
# 4. Calcul du kappa
kappa = cohen_kappa_score(y_true, y_pred)
```

```

print(f"\nKappa de Cohen : {kappa:.4f}")

#-----
----
# 5. Calcul du tableau de confusion
conf_matrix = confusion_matrix(y_true, y_pred)

# Affichage du tableau de confusion
print("\nTableau de confusion :")
print("          Prédit : non-eau   Prédit : eau")
print(f"Réel : non-eau      {conf_matrix[0,0]:>5}
{conf_matrix[0,1]:>5}")
print(f"Réel : eau         {conf_matrix[1,0]:>5}
{conf_matrix[1,1]:>5}")

#-----
----
# 6. Afficher la carte d'erreurs ===
# Créer une carte d'erreur (-1 = NoData, 0 = VN, 1 = FP, 2 = FN, 3 = VP)
error_map = np.full(pred.shape, -1, dtype=np.int8)

# Masquer les pixels invalides
valid_mask = np.isin(pred, [0, 1]) & np.isin(ref, [0, 1])

# Définir les erreurs
vp = (pred == 1) & (ref == 1)
fp = (pred == 1) & (ref == 0)
fn = (pred == 0) & (ref == 1)
vn = (pred == 0) & (ref == 0)

# Remplir la carte
error_map[vp] = 3
error_map[fp] = 1
error_map[fn] = 2
error_map[vn] = 0

# Palette de couleurs : RGB
colors = {
    -1: (0.7, 0.7, 0.7), # gris pour NoData
    0: (0.0, 0.0, 0.0), # noir pour VN
    1: (1.0, 0.0, 0.0), # rouge pour FP
    2: (0.0, 0.0, 1.0), # bleu pour FN
    3: (0.0, 1.0, 0.0), # vert pour VP
}

# Créer une image RGB
rgb_image = np.zeros((*error_map.shape, 3))
for value, color in colors.items():
    rgb_image[error_map == value] = color

# Affichage avec matplotlib
plt.figure(figsize=(10, 10))
plt.imshow(rgb_image)
plt.title("Carte des erreurs : VP (vert), FP (rouge), FN (bleu), VN
(noir)")
plt.axis("off")
plt.show()

```

Annexe 3 : Séries temporelle des surfaces et de la pluviométrie

	Surface (km ²)		Pluviométrie (mm)				
	OSUDU	KANAGAN	M0	M - 1	M - 2	M - 3	M - 4
Janvier	7,12	No data	192	75	370	42	334
Fevrier	7,14	0	0	192	75	370	42
Mars	6,62	0	0	0	192	75	370
Avril	5,77	0	0	0	0	192	75
Mai	5,33	0,29	18	0	0	0	192
Juin	5,59	0,47	125	18	0	0	0
Juillet	No data	0,84	73	125	18	0	0
Août	5,78	0,63	216	73	125	18	0
Septembre	5,32	0,85	94	216	73	125	18
Octobre	5,58	0,75	172	94	216	73	125
Novembre	5,12	0,62	178	172	94	216	73
Décembre	9,41	0,532	330	178	172	94	216

Annexe 4 : Comptage des pixels d'eau

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed May 14 11:29:55 2025

@author: Manon Couderc
"""

#import numpy as np
#import rasterio

#with rasterio.open("2024_03_30_seuil.tif") as src:
#    image = src.read(1)
#    print("Valeurs uniques dans le raster :", np.unique(image))

import rasterio
import numpy as np

# === 1. Charger le fichier raster ===
raster_path = "2024_03_30_seuil.tif" # Remplacer par le nom de ton image
with rasterio.open(raster_path) as src:
    image = src.read(1) # Lecture de la première bande
    nodata = src.nodata # Récupération de la valeur NoData
    (souvent utilisée pour les nuages)

# === 2. Création de masques logiques pour chaque catégorie ===

# Masque NoData (pixels avec la valeur définie comme nodata dans les
métadonnées)
if nodata is not None and not np.isnan(nodata):
    mask_nodata = image == nodata
else:
    mask_nodata = np.isnan(image)

# Masques pour les autres classes, en excluant les nodata
mask_non_eau = (image == 0) & (~mask_nodata)
mask_eau = (image == 1) & (~mask_nodata)
mask_autre = (~mask_nodata) & (~mask_non_eau) & (~mask_eau)

# === 3. Compter les pixels par catégorie ===
count_non_eau = np.sum(mask_non_eau)
count_eau = np.sum(mask_eau)
count_nodata = np.sum(mask_nodata)
count_autre = np.sum(mask_autre)

# === 4. Affichage des résultats ===
print("\n Résultat du comptage des pixels :")
print(f"Non-eau (0) : {count_non_eau} pixels")
print(f"Eau (1) : {count_eau} pixels")
print(f"NoData (nuages) : {count_nodata} pixels")
print(f"Autres valeurs : {count_autre} pixels")
```

Annexe 5 : Extraction des données pluviométrique de TN-SMART

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Wed May 21 10:52:40 2025

@author: Manon Couderc
"""

from selenium import webdriver
from selenium.webdriver.common.by import By
from selenium.webdriver.support.ui import WebDriverWait, Select
from selenium.webdriver.support import expected_conditions as EC
import time

driver = webdriver.Chrome()
driver.get("https://beta-tnsmart.rimes.int/index.php/Rainfall/daily_data")
#lien du site

wait = WebDriverWait(driver, 20) #Laisser le temps à la page de s'ouvrir

# Changer la langue en anglais si nécessaire
try:
    en_button = wait.until(EC.element_to_be_clickable((By.LINK_TEXT,
"En"))))
    en_button.click() #Changer la langue de la page du Tamoul à l'anglais
except:
    pass # Si le bouton n'est pas là, ignorer

# Sélectionner "Rainfall wise"
rainfall_type = Select(wait.until(EC.presence_of_element_located((By.ID,
"type"))))
rainfall_type.select_by_visible_text("Rainfall wise")
time.sleep(3) # attendre que les éléments apparaissent

# Boucle sur les dates
from datetime import datetime, timedelta

start_date = datetime(2023, 1, 1)
end_date = datetime(2023, 12, 31)
current_date = start_date

data = []

while current_date <= end_date:
    try:
        # Recharger les éléments à CHAQUE itération
        rainfall_type =
Select(wait.until(EC.presence_of_element_located((By.ID, "type"))))
        rainfall_type.select_by_visible_text("Rainfall wise")

        date_input = wait.until(EC.presence_of_element_located((By.ID,
"date"))))
        date_input.clear()
        date_input.send_keys(current_date.strftime("%d-%m-%Y"))
        time.sleep(1) # attendre que les éléments apparaissent

        # Cliquer sur Submit
        submit_button = wait.until(EC.element_to_be_clickable((By.XPATH,
"//input[@type='submit' and @value='Submit']")))
        submit_button.click()
```

```

time.sleep(1) # attendre que les éléments apparaissent

# Attendre que le tableau s'affiche (max 10 sec)
table = WebDriverWait(driver, 5).until(
    EC.presence_of_element_located((By.XPATH, "//table[contains(.,
'Raingauge station')]"))
)
# Récupérer la ligne contenant "RSCL-2 Valavanur"
rows = table.find_elements(By.TAG_NAME, "tr")
found = False
for row in rows:
    if "VANUR" in row.text: #Nom de la station météo
        cols = row.find_elements(By.TAG_NAME, "td")
        rainfall = cols[-1].text.strip()
        data.append((current_date.strftime("%Y-%m-%d"), rainfall))
        print(f"{current_date.strftime('%Y-%m-%d')} : {rainfall}
mm")

        found = True
        break
    if not found:
        print(f"Précipitation non trouvée pour la date
{current_date.strftime('%Y-%m-%d')}")
        data.append((current_date.strftime("%Y-%m-%d"), "0"))

# attendre un peu pour ne pas surcharger le site
time.sleep(1)

except:
    print(f"{current_date.strftime('%Y-%m-%d')} : 0 mm (aucune donnée
affichée)")
    data.append((current_date.strftime("%Y-%m-%d"), "0"))

current_date += timedelta(days=1)

# Sauvegarder dans un fichier Excel
import pandas as pd
df = pd.DataFrame(data, columns=["Date", "Précipitations (mm)"])
df.to_excel("valavanur_2024.xlsx", index=False) # Créer le fichier excel
avec les données

driver.quit()

```