

Institut français de Pondichéry

Etude de la soutenabilité des réservoirs à ciel ouvert dans les 30 prochaines années.

Estelle Chartier
31/07/2025

Table des matières

Etat de l'art.....	2
Définition et fonctionnement d'un réservoir à ciel ouvert.....	2
Historique des réservoirs en Inde : entre appropriation locale et centralisation étatique	3
Fonctions et enjeux contemporains des réservoirs à ciel ouvert.....	3
Objectifs.....	4
Sites d'étude et données utilisées.....	5
Présentation des sites d'étude : les réservoirs d'Osudu et de Kanagan.....	5
Présentation détaillée des sources de données	6
Méthode	9
Résultats	10
Limites et perspectives.....	12
Annexe 1 :	15

Etat de l'art

Définition et fonctionnement d'un réservoir à ciel ouvert

Un réservoir à ciel ouvert est une structure hydraulique de surface conçue pour capter, stocker et gérer les eaux de ruissellement, principalement issues des précipitations. Ces systèmes, largement utilisés dans les régions semi-arides, remplissent plusieurs fonctions hydrologiques, agricoles et socio-environnementales.

Le fonctionnement d'un réservoir à ciel ouvert repose sur un ensemble d'éléments structuraux clés, comme illustré dans la figure ci-dessous. L'eau de pluie est d'abord acheminée vers le réservoir par un canal d'entrée (inlet channel), qui capte le ruissellement provenant du bassin versant. Le réservoir principal sert de zone de stockage temporaire de l'eau. Sa capacité est dépendante à la fois de sa superficie, de sa profondeur et de la topographie environnante.

Sur le plan structurel, le réservoir est généralement fermé en aval par une digue ou levée de terre (embankment ou bund), souvent renforcée par des dispositifs de soutènement afin de limiter l'érosion. Un trop-plein (spillway) est intégré à la digue pour permettre l'évacuation contrôlée des excès d'eau en période de fortes précipitations, évitant ainsi la surcharge et les risques de rupture.

Le fond du réservoir est sujet à l'accumulation de sédiments (silt layer), résultant du transport de particules fines par les eaux de ruissellement. Cette sédimentation progressive peut réduire la capacité de stockage et nécessite des opérations périodiques pour retirer le surplus. Un système de sortie (outlet) permet la distribution de l'eau stockée, notamment à des fins agricoles ou domestiques.

Ces structures présentent l'avantage d'être peu coûteuses, facilement intégrables dans les paysages ruraux, et adaptables aux ressources et aux savoir-faire locaux. Leur efficacité repose cependant sur un entretien régulier et une gestion collective appropriée.

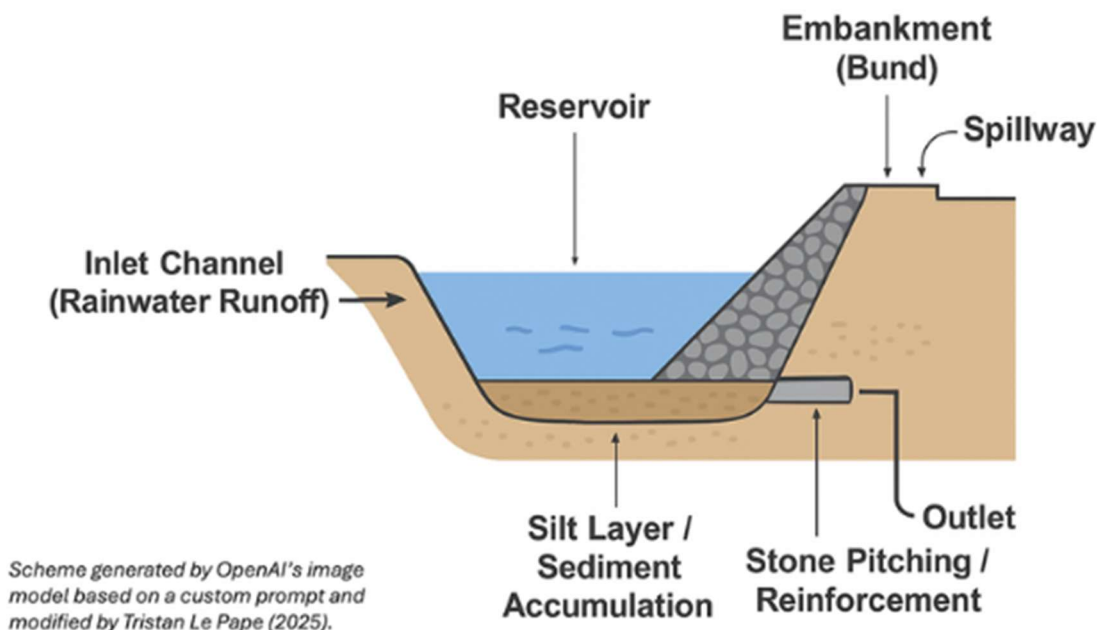


Figure 1

Historique des réservoirs en Inde : entre appropriation locale et centralisation étatique

Les réservoirs à ciel ouvert, représentent un héritage hydraulique ancestral dans les régions rurales de l'Inde, particulièrement dans le sud du pays. Avant la colonisation britannique, ces structures étaient considérées comme des biens communs, entretenus de manière locale et décentralisée par les communautés villageoises. Cette gestion collective permettait une régulation fine des ressources hydriques en fonction des besoins agricoles, domestiques et rituels, tout en assurant une pérennité de l'ouvrage à travers des mécanismes d'entretien communautaire (Durand, 2017).

L'arrivée du pouvoir colonial britannique a marqué un changement profond de paradigme dans la gouvernance de ces infrastructures. L'administration impériale a progressivement introduit une gestion centralisée, attribuant la propriété et la responsabilité des réservoirs à l'État colonial, au détriment des logiques locales de gouvernance. Ce processus de nationalisation a engendré une rupture dans les dynamiques de responsabilité communautaire, contribuant à une forme de désengagement progressif des populations locales. L'introduction de moyens techniques modernes, comme les forages et les systèmes de pompage, a par ailleurs accentué le désintérêt pour les réservoirs traditionnels, perçus comme obsolètes face à des solutions plus mécanisées, bien que souvent moins durables à long terme.

Fonctions et enjeux contemporains des réservoirs à ciel ouvert

Aujourd'hui, les réservoirs à ciel ouvert conservent une fonctionnalité plurielle, au croisement des dimensions écologiques, économiques et socio-culturelles. Comme le montre le schéma ci-dessous (voir Figure X), leur rôle va bien au-delà du simple stockage d'eau. Sur le plan écologique, ils participent à la conservation des sols, à la recharge des nappes phréatiques, à la régulation des crues, et à la préservation de la biodiversité locale (Ariza, Galan, Serrano, 2007). Ils jouent également un rôle important dans la lutte contre l'érosion et la création d'habitats pour de nombreuses espèces, en particulier dans des écosystèmes fragiles.

Sur le plan économique, ces réservoirs soutiennent l'agriculture de subsistance, offrent une assurance contre les périodes de sécheresse, et sont à l'origine d'activités connexes telles que la pêche, l'élevage ou encore la production de matériaux de construction (Palanisami, 2006). D'un point de vue socio-culturel, ils représentent des espaces de vie communautaire, intégrés aux rituels religieux et aux pratiques sociales locales. Leur valorisation passe alors non seulement par des politiques de réhabilitation technique, mais aussi par une reconnaissance de leur rôle culturel et symbolique dans l'organisation des sociétés rurales.

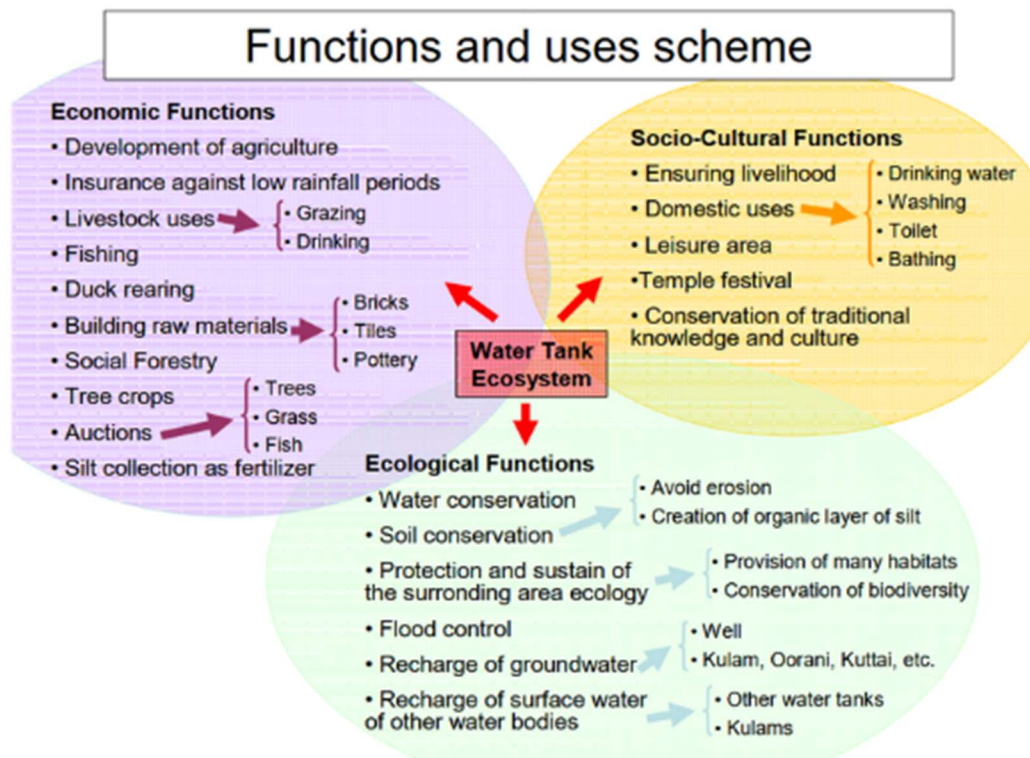


Figure 2

Objectifs

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer les impacts potentiels du réchauffement climatique, en particulier les évolutions de la pluviométrie, sur le fonctionnement de deux réservoirs à ciel ouvert situés dans le sud de l'Inde : Kanagan et Osudu. Dans un contexte de changement climatique global, la disponibilité et la gestion de l'eau deviennent des enjeux majeurs pour la durabilité des ressources hydriques locales, en particulier dans les zones soumises à une forte variabilité interannuelle des précipitations.

Afin de répondre à cette problématique, deux sous-objectifs méthodologiques ont été définis :

1. Reconstituer les données de pluviométrie pour la période 1995-2014

Cette étape vise à établir une base historique fiable de données climatiques pour chacun des deux réservoirs. L'estimation des précipitations sur cette période constitue un référentiel essentiel,

permettant de caractériser le régime pluviométrique passé et d'identifier les tendances et anomalies locales. Ces données serviront également de base de comparaison pour l'analyse prospective à l'aide des projections climatiques fournies par les scénarios du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

2. Projeter l'évolution de la pluviométrie pour la période 2041-2060 selon les scénarios du GIEC

Le second objectif consiste à modéliser la pluviométrie future sur les deux sites d'étude à l'horizon 2041-2060, en mobilisant les quatre scénarios climatiques du GIEC (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). Cette projection permettra d'évaluer les variations potentielles des apports hydriques et, par conséquent, d'anticiper les conséquences hydrologiques et de gestion sur les réservoirs étudiés. Elle vise à fournir des éléments d'aide à la décision pour les acteurs locaux en matière d'adaptation et de résilience des systèmes de gestion de l'eau.

Sites d'étude et données utilisées

Présentation des sites d'étude : les réservoirs d'Osudu et de Kanagan

Les réservoirs à ciel ouvert d'Osudu et de Kanagan sont localisés dans le territoire de Puducherry, au sud-est de l'Inde, dans une zone soumise à un climat tropical semi-aride, fortement influencé par la mousson du nord-est. Ces réservoirs traditionnels constituent des infrastructures hydrauliques ancestrales ayant pour fonction principale la rétention et la régulation des eaux de ruissellement, tout en jouant un rôle crucial dans le soutien aux activités agricoles, la recharge des nappes phréatiques et la préservation des écosystèmes locaux.

Le lac d'Osudu, le plus vaste des deux, se distingue par sa valeur écologique élevée : il est classé comme zone humide protégée en raison de la richesse de sa biodiversité, notamment. Cependant, il subit une pression urbaine croissante, liée à l'expansion de la ville de Puducherry, qui affecte ses fonctions écologiques et hydrologiques. À l'inverse, le réservoir de Kanagan est situé dans un environnement rural, avec une dépendance forte des populations locales à l'égard des ressources en eau pour l'irrigation, l'élevage et l'usage domestique. Il constitue un élément stratégique de résilience hydrique, notamment en période de déficit pluviométrique.

Ces deux sites ont été choisis pour leur complémentarité territoriale (urbain/rural), leur représentativité des réservoirs traditionnels du sud de l'Inde, et leur vulnérabilité face aux changements climatiques, en particulier à la variation des régimes de précipitations.

Les réservoirs d'Osudu et de Kanagan s'inscrivent dans des dynamiques socio-environnementales complexes. Sur le plan écologique, ils assurent des fonctions essentielles : régulation du cycle de l'eau, recharge des aquifères, atténuation des crues, conservation des sols et préservation de la biodiversité. Sur le plan social et économique, ils soutiennent des systèmes de subsistance rurale, sécurisent les activités agricoles, et constituent des lieux de pratiques rituelles, culturelles et communautaires. Ces fonctions sont particulièrement sensibles aux perturbations induites par le changement climatique, qui accentue les tensions sur les ressources hydriques locales.

Dans ce contexte, l'étude vise à mieux comprendre l'impact des évolutions climatiques futures, notamment en matière de pluviométrie, sur le fonctionnement et la durabilité de ces deux systèmes hydrauliques.

Présentation détaillée des sources de données

Dans le cadre de cette étude, plusieurs jeux de données ont été mobilisés afin de permettre une évaluation fine de l'évolution de la pluviométrie et de son impact sur les réservoirs d'Osudu et de Kanagan. Ces données proviennent de sources fiables et validées par la communauté scientifique internationale, et répondent à des objectifs méthodologiques spécifiques dans le traitement temporel et spatial des variables climatiques et environnementales.

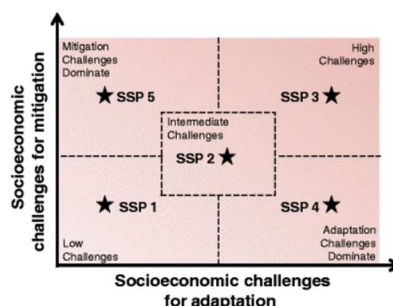
Name	Source	Years	Objectives	Link
Rainfall data CHIRPS	Climate Hazard Center UC Santa Barbara	1995-2014	Determine water inputs and variations related to the seasons	https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps
CLIMATE CHANGE 2023 Synthesis Report	IPCC (GIEC)	2023	Understanding the different SSP scenarios	10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
IPCC WGI Interactive Atlas	IPCC (GIEC)	2023	Estimate rainfall from 2041 to 2060	https://interactive-atlas.ipcc.ch/regional-information
Sentinel-2 data	GEODES	2015-2024	Time signature of the 2 lakes to see the impact of the seasons	https://geodes-portal.cnes.fr/

Figure 3

1. Les données CHIRPS, issues du Climate Hazard Center de l'Université de Californie à Santa Barbara, couvrent la période 1995–2014 et constituent une base pluviométrique historique de haute résolution (0,05°), combinant des observations satellitaires avec des données issues de stations météorologiques au sol. Ce jeu de données est reconnu pour sa robustesse dans les zones tropicales et semi-arides, notamment en Asie du Sud. Dans cette recherche, CHIRPS sert de référence climatique de la période passée, permettant de calibrer les analyses et d'établir une base comparative pour les projections futures. L'objectif est ici de quantifier les apports en eau par saison et d'en dégager les tendances passées propres à chaque bassin.

2. Données du rapport de synthèse du GIEC – Climate Change 2023: Synthesis Report Ce rapport constitue le document de synthèse du sixième cycle d'évaluation du GIEC (AR6), publié en 2023. Il présente une vue intégrée des trajectoires climatiques globales selon différents scénarios socio-économiques (SSP). L'intérêt de ce rapport réside dans la compréhension théorique et structurelle des scénarios d'évolution du monde à long terme (horizon 2100), notamment via l'introduction des SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Dans le cadre de cette étude, ce document sert de référence conceptuelle pour interpréter les dynamiques futures de précipitation selon les choix politiques et économiques globaux.

From: A new scenario framework for climate change research: the concept of shared socioeconomic pathways



The "challenges space" to be spanned by SSPs (based on Kriegler et al. 2012, Fig. 3), divided into five "domains" with one SSP located within each domain, represented by a star

Figure 4

Les cinq SSP sont positionnés dans un espace défini par deux axes : les défis socio-économiques pour l'adaptation (horizontalement), les défis pour l'atténuation des émissions (verticalement).

Les cinq SSP sont définis comme suit [12] :

- **SSP1** : La voie durable et "verte" décrit un monde de plus en plus durable. Les biens communs mondiaux sont préservés, les limites de la nature sont respectées. L'accent est mis sur le bien-être humain plutôt que sur la croissance économique. Les inégalités de revenus entre les États et au sein des États sont réduites. La consommation est orientée vers la minimisation de l'utilisation des ressources matérielles et de l'énergie.
- **SSP2** : La voie "médiane" ou moyenne extrapole le développement mondial passé et actuel vers l'avenir. Les tendances en matière de revenus dans les différents pays divergent considérablement. Il existe une certaine coopération entre les États, mais elle s'étend à peine. La croissance démographique mondiale est modérée et se stabilise dans la seconde moitié du siècle. Les systèmes environnementaux sont confrontés à une certaine dégradation.
- **SSP3** : Les rivalités régionales. Un regain de nationalisme et de conflits régionaux relègue les questions mondiales au second plan. Les politiques se concentrent de plus en plus sur les questions de sécurité nationale et régionale. Les investissements dans l'éducation et le développement technologique diminuent. Les inégalités augmentent. Certaines régions subissent des dommages environnementaux considérables.
- **SSP4** : Inégalité. Le fossé se creuse entre les sociétés développées qui coopèrent au niveau mondial et celles qui stagnent à un stade de développement inférieur, avec de faibles revenus et un faible niveau d'éducation. Les politiques environnementales parviennent à résoudre les problèmes locaux dans certaines régions, mais pas dans d'autres.
- **SSP5** : Développement à partir de combustibles fossiles. Les marchés mondiaux sont de plus en plus intégrés, ce qui entraîne des innovations et des progrès technologiques. Cependant, le développement social et économique est basé sur une exploitation intensifiée des ressources en combustibles fossiles, avec un pourcentage élevé de charbon et un mode de vie à forte intensité énergétique dans le monde entier. L'économie mondiale est en pleine croissance et les problèmes environnementaux locaux, tels que la pollution atmosphérique, sont abordés avec succès.

Le scénario SSP4 représente un monde marqué par des inégalités croissantes, dans lequel les pays riches adoptent rapidement des technologies bas-carbone, tandis que les pays en développement

restent très vulnérables, avec peu d'accès aux innovations climatiques. Cette trajectoire présente un profil asymétrique peu compatible avec les objectifs de représentativité régionale du GIEC, notamment pour les projections de variables physiques comme les précipitations. De plus, le forçage radiatif du SSP4 (6,0 W/m²) n'a pas été systématiquement modélisé pour toutes les variables et tous les modèles CMIP6, ce qui en limite l'exploitation dans les outils standards notamment l'Interactive Atlas du GIEC.

Ainsi, dans cette étude, seuls les scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5 ont été retenus, car ils couvrent un spectre cohérent et complet des futures possibles, allant de la décarbonation rapide à la poursuite de trajectoires intensives en émissions, tout en étant compatibles avec les projections régionales disponibles pour les variables climatiques, notamment la pluviométrie.

3. Développé par le Groupe de travail I du GIEC (Working Group I), l'Interactive Atlas constitue un outil de visualisation dynamique des projections climatiques issues des modèles CMIP6. Il permet une exploration régionale et temporelle précise des variables climatiques (température, précipitations, etc.), sur différents scénarios SSP. Pour cette recherche, l'atlas a été mobilisé afin de projeter les variations mensuelles de précipitations sur la période 2041–2060, pour les réservoirs d'Osudu et Kanagan, selon quatre scénarios : SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, et SSP5-8.5. L'objectif est d'anticiper l'évolution des régimes hydrologiques de la période 2041-2060 à l'échelle locale, en comparaison avec la période de référence 1995–2014, et d'évaluer l'impact différencié de chaque trajectoire sur les volumes captés et les saisons d'accumulation.

Comparer à 1995-2014	SSP1 - 2,6	SSP2 - 4,5	SSP3 - 7,0	SSP5 - 8,5
Janvier	11,8%	-0,7%	4,6%	13,6%
Février	1,4%	-11,5%	-8,2%	0,6%
Mars	-6,9%	-8,1%	-16,6%	-7%
Avril	7%	8,7%	-6,8%	0,1%
Mai	4,4%	7%	4,2%	2,2%
Juin	6,7%	-2,2%	0,2%	5,4%
Juillet	6%	7,6%	2,5%	6,7%
Août	9%	9,2%	7,8%	9,6%
Septembre	9,7%	10,3%	12,1%	15,6%
Octobre	2,5%	4,1%	1,3%	7,3%
Novembre	11,8%	8,8%	7,1%	15,1%
Décembre	4,6%	15,8%	1,5%	13,2%

Figure 5

4. Les données Sentinel-2 sont issues du programme Copernicus de l'Agence spatiale européenne (ESA), et sont accessibles via le portail GEODES développé par le CNES. Les images multispectrales Sentinel-2 offrent une résolution spatiale de 10 à 60 mètres selon les bandes, et sont particulièrement pertinentes pour l'observation de la dynamique de surface des plans d'eau. Dans le cadre de cette étude, les

données couvrant la période 2015–2024 ont été exploitées afin d’analyser la signature temporelle et saisonnière des deux réservoirs. L’objectif est de corrélér l’évolution spatiale des étendues d’eau à la variabilité pluviométrique saisonnière, et d’identifier les possibles changements de comportement hydrologique induits par les saisons sèches ou les épisodes extrêmes.

Bandes	Longueur d’onde (nm)	Couleur	Résolution spatiale (m)
B1	442	Bleu	60
B2	492	Cyan	10
B3	559	Vert	10
B4	664	Magenta	10
B5	704	Proche Infrarouge (PIR)	20
B6	740	Proche Infrarouge (PIR)	20
B7	780	Proche Infrarouge (PIR)	20
B8	832	Proche Infrarouge (PIR)	10
B8A	864	Proche Infrarouge (PIR)	20
B9	945	Proche Infrarouge (PIR)	60
B10	1375	Infrarouge moyen	60
B11	1610	Infrarouge moyen	20
B12	2200	Infrarouge moyen	20

Figure 6

Méthode

L’approche méthodologique adoptée dans cette étude repose sur le croisement de données climatiques historiques et prospectives afin d’évaluer les effets potentiels du changement climatique sur la pluviométrie des réservoirs à ciel ouvert d’Osudu et de Kanagan. Elle se décline en trois étapes principales.

1. Extraction et traitement des données historiques (1995–2014)

Les données de précipitations ont été extraites depuis la base CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data), développée par le Climate Hazard Center de l’Université de Californie à Santa Barbara. Ce jeu de données, reconnu pour sa résolution temporelle et spatiale élevée, fournit des estimations quasi-journalières des précipitations à l’échelle mondiale.

À l’aide d’un programme développé en Python (voir annexe 1), les coordonnées géographiques des deux réservoirs ont été utilisées pour isoler les données spécifiques à ces sites. La moyenne journalière des précipitations a été calculée sur l’ensemble de la période 1995–2014, avant d’être agrégée mensuellement. Cette série temporelle constitue la référence historique à laquelle seront appliquées les projections futures.

2. Intégration des scénarios climatiques SSP (2041-2060)

En parallèle, les projections climatiques du GIEC ont été exploitées à partir de l’Atlas interactif du Groupe I du GIEC (WGI Interactive Atlas). Les variations mensuelles de précipitations, exprimées en

pourcentages par rapport à la période 1995-2014, ont été extraites pour chacun des scénarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 et SSP5-8.5. Le scénario SSP4 n'est pas inclus dans cette étude car il est jugé peu pertinent dans le cadre des projections climatiques globales par le GIEC, du fait de son incohérence interne (fortes inégalités sociales combinées à des efforts d'atténuation partiels), et donc moins fréquemment modélisé dans les outils de simulation.

Ces projections représentent différentes trajectoires socio-économiques combinées à divers niveaux d'émissions de gaz à effet de serre. Chaque scénario anticipe une évolution distincte de la pression climatique, influencée par les politiques de développement, les changements technologiques et les comportements sociétaux.

3. Application des projections aux données historiques

Les coefficients de variation mensuels issus des scénarios SSP ont été appliqués aux moyennes mensuelles historiques calculées précédemment. Ce croisement permet d'obtenir des valeurs projetées absolues de précipitations pour la période 2041-2060, simulant ainsi l'impact des différents futurs climatiques possibles sur les réservoirs étudiés.

Les résultats de ce traitement sont présentés dans le tableau ci-dessous, qui illustre les précipitations mensuelles moyennes simulées pour chacun des quatre scénarios, comparées à la moyenne observée sur la période de référence.

	Moyenne 1995-2014	SSP1 - 2,6	SSP2 - 4,5	SSP3 - 7,0	SSP5 - 8,5
Janvier	24,410	27,291	24,239	25,533	27,730
Février	1,948	1,975	1,724	1,788	1,960
Mars	4,524	4,211	4,157	3,773	4,207
Avril	24,550	26,268	26,686	22,880	24,574
Mai	40,526	42,309	43,363	42,228	41,418
Juin	63,899	68,180	62,493	64,027	67,349
Juillet	75,978	80,536	81,752	77,877	81,068
Août	163,931	178,684	179,012	176,717	179,668
Septembre	105,485	115,717	116,350	118,249	121,941
Octobre	254,799	261,169	265,246	258,112	273,400
Novembre	265,769	297,130	289,157	284,639	305,900
Décembre	135,422	141,651	156,818	137,453	153,297

Figure 7

Enfin, les résultats ont été visualisés sous forme de courbes comparatives permettant de représenter graphiquement l'évolution mensuelle des précipitations selon les quatre trajectoires climatiques. Ces visualisations facilitent l'interprétation des différences saisonnières et permettent une analyse intégrée des impacts potentiels du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique des réservoirs d'Osudu et de Kanagan.

Résultats

L'analyse des projections de précipitations pour la période 2041–2060, issues des différents scénarios climatiques du GIEC, permet de dégager plusieurs tendances significatives en lien direct avec la gestion des ressources hydriques dans la région de Pondichéry, notamment au niveau des réservoirs à ciel ouvert d'Oussudu et de Kanagan. Les résultats présentés dans le graphique de la pluviométrie

mensuelle prévisionnelle montrent clairement une augmentation marquée des précipitations pendant la saison de mousson, tandis que les mois correspondant à la saison sèche restent globalement stables, voire connaissent une légère diminution.

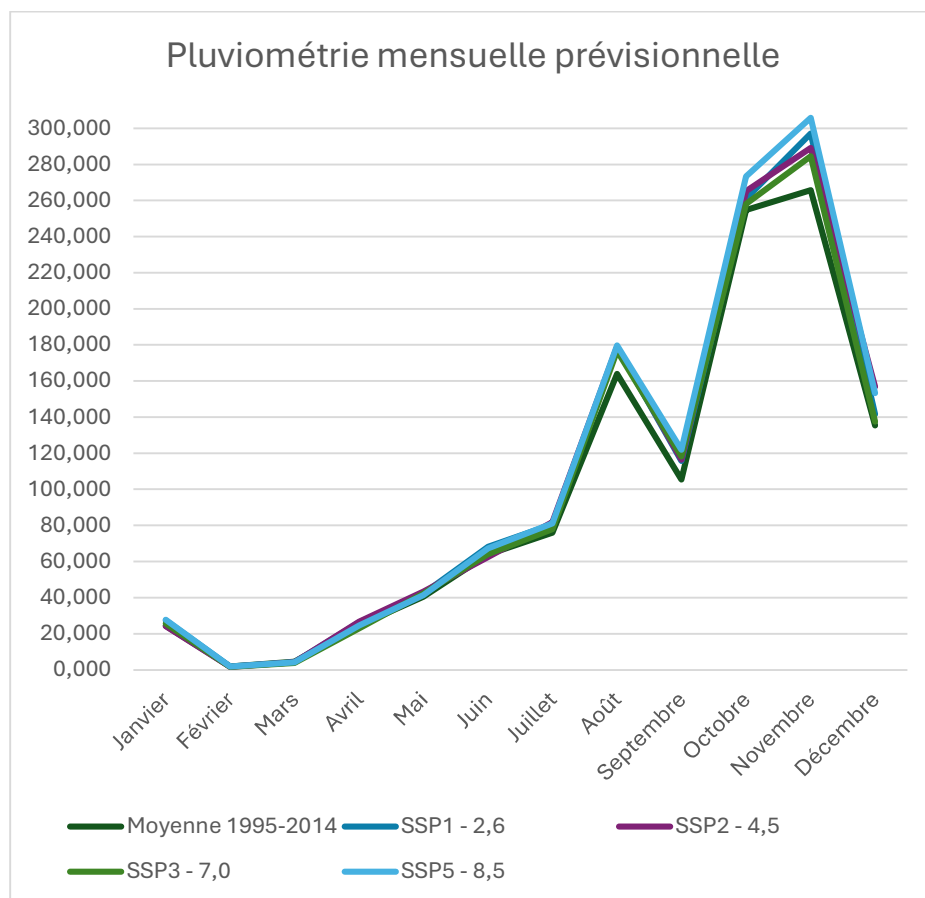


Figure 8

Entre les mois d'août et de novembre, les courbes associées aux différents scénarios convergent toutes vers une hausse des précipitations, plus ou moins marquée selon l'intensité des hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre. Cette tendance est particulièrement visible pour les mois d'octobre et de novembre, avec une progression atteignant jusqu'à 7 % pour octobre et 15 % pour novembre dans le scénario le plus pessimiste (SSP5-8.5), comparé à la moyenne historique 1995–2014. Cette évolution traduit une intensification attendue de la mousson du nord-est, déjà identifiée comme le principal événement pluviométrique dans la région. Cette augmentation de la pluviométrie concentrée sur quelques mois soulève des enjeux majeurs pour la gestion des eaux de surface, en particulier la capacité des réservoirs à absorber des volumes croissants sur une période courte sans engendrer de débordements ni de pertes par ruissellement.

En revanche, les précipitations observées entre février et avril restent similaires ou parfois en baisse dans certains scénarios, notamment SSP3-7.0 et SSP2-4.5. Cette stabilité, voire cette diminution en période sèche, souligne que les vulnérabilités hydriques structurelles de la région en saison sèche persisteront dans les décennies à venir. Cela implique que la quantité d'eau disponible ne sera pas mieux répartie tout au long de l'année, mais davantage concentrée sur la mousson. Cette répartition temporelle inégale accroît le risque de déséquilibres entre périodes d'excès et périodes de pénurie.

Ces résultats, bien qu'ils puissent contredire les attentes initiales, mettent en lumière un fait essentiel : la pluie supplémentaire prévue dans les décennies à venir représente une ressource considérable si

et seulement si elle est captée, stockée et gérée de manière efficace. L'enjeu principal ne réside donc pas uniquement dans l'évolution quantitative des précipitations, mais dans la capacité des infrastructures existantes à s'adapter à cette nouvelle distribution saisonnière. À cet égard, les réservoirs d'Osudu et de Kanagan devront être évalués, réaménagés voire agrandis, afin de répondre à ces nouveaux besoins. Il sera également nécessaire d'améliorer les stratégies de gestion de l'eau à l'échelle régionale pour anticiper les excès, limiter les pertes et garantir une redistribution raisonnée des volumes stockés vers les périodes déficitaires.

La pluie du futur pourrait devenir une ressource stratégique pour Pondichéry, à condition que des mesures d'adaptation soient mises en place dès aujourd'hui. Cela inclut non seulement des actions techniques sur les infrastructures, mais aussi une meilleure planification hydrologique intégrant les projections climatiques à long terme. Les résultats obtenus à travers cette méthodologie, basée sur une extraction fine des données historiques et une application rigoureuse des scénarios du GIEC, démontrent que la planification du stockage et de la régulation de l'eau constituera l'un des piliers essentiels de l'adaptation au changement climatique pour les territoires dépendant des eaux de surface comme ceux d'Osudu et de Kanagan.

Limites et perspectives

La méthodologie employée dans cette étude comporte certaines limites qu'il convient de souligner. Tout d'abord, elle ne prend pas en compte des processus physiques essentiels tels que l'évaporation, qui représente pourtant une perte non négligeable dans le bilan hydrique des réservoirs à ciel ouvert, en particulier dans un contexte tropical comme celui de Pondichéry. De plus, les données utilisées présentent elles-mêmes des incertitudes intrinsèques. Les données CHIRPS, bien que fiables et largement utilisées, sont issues d'une combinaison de mesures satellitaires et de données interpolées à partir de stations météorologiques, ce qui en fait une estimation indirecte des précipitations. De même, les projections climatiques fournies par l'Atlas interactif du GIEC résultent de la moyenne de plusieurs dizaines de modèles climatiques globaux. Ces modèles, bien qu'issus d'une méthodologie robuste, reposent sur des hypothèses socio-économiques complexes et peuvent diverger sensiblement d'un scénario à l'autre. Cela explique en partie les écarts constatés entre les valeurs obtenues dans cette étude et celles présentées directement dans les résultats du GIEC pour les périodes futures.

Par ailleurs, il serait pertinent d'intégrer les résultats des travaux de Manon Couderc portant sur la demande en eau agricole dans les bassins des réservoirs de Kanagan et d'Osudu. Ces études permettraient de compléter l'approche actuelle en croisant les prévisions d'offre en eau avec les dynamiques futures de la demande, et ainsi anticiper plus finement les éventuelles tensions hydriques. En parallèle, l'approche de télédétection développée par Tristan Le Pape constitue une opportunité méthodologique importante. En effet, les réservoirs identifiés dans le cadre de son travail pourraient constituer un échantillon élargi permettant d'appliquer cette méthode à l'échelle régionale, renforçant ainsi la représentativité des résultats obtenus.

Dans cette logique d'extension, une piste de recherche prometteuse consisterait à caractériser la signature temporelle des réservoirs d'Osudu et de Kanagan sur la période allant de 2015 à 2024 grâce aux données satellitaires Sentinel-2. Cette analyse permettrait de mieux comprendre l'évolution interannuelle des niveaux d'eau et d'établir des modèles plus précis pour la période 2041-2060. À plus long terme, la méthode développée ici pourrait être automatisée et appliquée à l'ensemble de l'État du Tamil Nadu, notamment dans le cadre de scénarios pour la fin du XXI^e siècle (2080-2100), afin de fournir un outil d'aide à la décision à l'échelle des politiques publiques de gestion de l'eau.

Bibliographie :

- [1] Xiucheng Yang, Qiming Qin, Hervé Yésou, Thomas Ledauphin, Mathieu Koehl, Pierre , Resolution using Sentinel-2 data, *Remote Sensing of Environment*, Volume 244, 2020, 111803, ISSN 0034-4257, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111803>
- [2] Marco Ottinger, Felix Bachofer, Juliane Huth, Claudia Kuenzer, Mapping Aquaculture ponds for the coastal zone of Asia with Sentinel-1 and Sentinel-2 time series, *Remote Sensing*, 2022, Volume 14, 153, <https://doi.org/10.3390/rs14010153>
- [3] Mirela G. Tulbure, Mark Broich, Stephen V. Stehman, Anil Kommareddy, Surface water extend dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region, *Remote Sensing of Environment*, Volume 178, 2016, 142157, ISSN 0034-4257, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>
- [4] Andy Hardy, Georgina Ettritch, Dónall E. Cross, Pete Bunting, Francis Liywalii, Jacob Sakala, Andrew Silumesii, Douglas Singini, Mark Smith, Tom Willis, Chris J. Thomas, Automatic Detection of Open and Vegetated Water Bodies Using Sentinel 1 to Map African Malaria Vector Mosquito Breeding Habitats, *Remote Sensing*, 2019, Volume 11, 593, <https://doi.org/10.3390/rs11050593>
- [5] Peng Tian, Yongchao Liu, Jialin Li, Ruiliang Pu, Luodan Cao, Haitao Zhang, Shunyi Ai, Yunze Yang, Mapping Coastal Aquaculture Ponds of China Using Sentinel SAR Images in 2020 and Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2022, 14, 5372. <https://doi.org/10.3390/rs14215372>
- [6] Zhe Sun, Juhua Luo, Jingzhicheng Yang, Qiuyan Yu, Li Zhang, Kun Xue, Lirong Lu, Nation-Scale Mapping of Coastal Aquaculture Ponds with Sentinel-1 SAR Data Using Google Earth Engine, *Remote Sensing*, 2020, Volume 12, 3086, <https://doi.org/10.3390/rs12183086>
- [7] Koyel Sur, Vipin Kumar Verma, Brijendra Pateriya, Surface water estimation at regional scale using hybrid techniques in GEE environment-A case study on Punjab State of India, *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, Volume 24, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100625>
- [8] Mirela G. Tulbure, Mark Broich, Stephen V. Stehman, Anil Kommareddy, Surface water extent dynamics from three decades of seasonally continuous Landsat time series at subcontinental scale in a semi-arid region, *Remote Sensing of Environment*, 2016, Volume 178, 142157, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.034>
- [9] IPCC, 2023: *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).
- [10] Patrick Bitterman, Eric Tate, Kimberly J. Van Meter, Nandita B. Basu, Water security and rainwater harvesting: A conceptual framework and candidate indicators, *Applied Geography*, Volume 76, 2016, Pages 75-84, ISSN 0143-6228, <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.09.013>
- [11] Ila Chawla, L. Karthikeyan, Ashok K. Mishra, A review of remote sensing applications for water security: Quantity, quality, and extremes, *Journal of Hydrology*, Volume 585, 2020, 124826, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124826>
- [12] <https://www.drias-climat.fr/accompagnement/sections/339>
- [13] <https://www.ifpindia.org/>

[14] C. Claravall, Estimation of water resources on continental surfaces by multi-sensor microwave remote sensing, Universitat Ramon LLULL <http://hdl.handle.net/10803/667771>

Annexe 1 :

```
import xarray as xr
import pandas as pd

# Charger le fichier CHIRPS .nc
ds = xr.open_dataset("chirps-v2.0.2014.days_p05.nc")

# Vérifier les dimensions et variables disponibles
#print(ds)
#print(ds.coords) # pour voir les coordonnées

# Coordonnées de Pondichéry
latitude_target = 11.94
longitude_target = 79.83

# Adapter selon le système de coordonnées du fichier
# Si Longitudes vont de 0 à 360, convertir :
if ds.longitude.max() > 180:
    longitude_target = lon_target % 360

# Extraire le point le plus proche
precip_point = ds.sel(latitude=latitude_target, longitude=longitude_target, method="nearest")

# Convertir en DataFrame
df = precip_point['precip'].to_dataframe().reset_index()

# Exporter au format CSV
df.to_csv("pluviometrie_pondichery_2014.csv", index=False)
```