

Faculté des bioingénieurs

Etude de l'impact du projet Arenal - PRAT sur la dynamique sédimentaire des fleuves Tempisque et Bebedero et du golfe de Nicoya

Auteur : Martin Boulanger

Promoteur(s) : Pr. Marnik Vanclooster, Dr. Alice Alonso

Lecteur(s) : Pr. Charles Biolders, Pr. Mathieu Javaux

Année académique 2023-2024

Master [120] : Bioingénieur en sciences et technologie de

l'environnement : spécialité, Ingénierie du développement durable

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Marnik Vanclooster, mon promoteur, et à Alice Alonso, ma co-promotrice, pour leurs conseils avisés, leur disponibilité et leur soutien tout au long de l'année. Nos réunions hebdomadaires ont été essentielles pour clarifier ma vision et orienter mes recherches dans le cadre de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les lecteurs de cette thèse, Mathieu Javaux et Charles Bielders pour leur expertise, leur intérêt et le temps qu'ils ont consacré à la lecture de mon travail.

Enfin, un merci particulier à mes parents pour l'aide qu'ils m'ont apportée dans la réalisation de ce mémoire et pour leur présence et leur soutien tout au long de mes études.

Enfin, je remercie Jeanne pour sa relecture attentive et ses précieuses suggestions qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce document.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Objectifs	3
3	Description de la zone d'étude	4
3.1	Le bassin versant Tempisque - Bebedero	4
3.1.1	Climat.....	5
3.1.2	Occupation des sols.....	7
3.1.3	Types de sols.....	7
3.2	Le Projet Arenal – PRAT	7
3.2.1	Projet Arenal et complexe hydroélectrique Arena-Dengo-Sandilal (ARDESA)	7
3.2.2	Projet d'Irrigation Arenal-Tempisque, PRAT	8
3.3	Le Parc National de Palo Verde.....	9
4	Etat de l'art	11
4.1	Charge sédimenteuse dans les cours d'eau.....	11
4.1.1	Facteurs affectant la charge sédimenteuse.....	11
4.1.2	La région Tempisque – Nicoya	18
4.2	Utilisation de l'imagerie satellite pour caractériser la dynamique sédimentaire dans les masses d'eau	22
4.2.1	Produits	22
4.2.2	Algorithmes	23
5	Matériel et méthodes	28
5.1	Contexte hydro-climatique et agricole du bassin versant Tempisque-Bebedero	28
5.1.1	Données.....	28
5.1.2	Calcul des débits des rivières Tempisque et Bebedero	30
5.2	Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero.....	38
5.2.1	Google Earth Engine	38
5.2.2	Imagerie satellite	38
5.2.3	Pré-traitement d'images	41
5.2.4	Traitement d'images.....	43
5.3	Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant	47
5.3.1	Calcul de l'érosion à l'échelle du bassin versant Tempisque-Bebedero.....	47
6	Résultats.....	50

6.1	Contexte hydro-climatique du bassin versant Tempisque-Bebedero	50
6.1.1	Représentation conceptuelle du régime hydrologique et du transports hypothétiques des sédiments agricoles dans la zone d'étude.....	50
6.1.2	Analyse comparative de la variabilité temporelle des débits	53
6.2	Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero	56
6.2.1	Dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya	56
6.2.2	Dynamique temporelle de la concentration et de la charge sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero	60
6.3	Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant	65
7	Discussion.....	66
7.1	Contexte hydro-climatique du bassin versant Tempisque-Bebedero	66
7.1.1	Analyse comparative de la variabilité temporelle des débit	66
7.2	Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero	71
7.2.1	Dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya	72
7.2.2	Dynamique temporelle de la concentration et de la charge sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero	73
7.3	Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant	75
7.3.1	Interprétation des résultats de l'USLE	75
7.3.2	Incertitudes des résultats de l'USLE	76
7.3.3	Impact de l'irrigation agricole sur l'érosion des sols dans le bassin versant Tempisque-Bebedero	76
7.3.4	Conséquences positives et négatives du projet Arenal-PRAT sur le bassin versant Tempisque-Bebedero	77
7.3.5	Données manquantes et perspectives futurs	79
8	Conclusion.....	80
I.	Bibliographie	81
II.	Annexe.....	I

Table des figures

Figure 3-1 : Représentation du bassin versant de la rivière Tempisque et Bebedero, Costa Rica.	4
Figure 3-2 : Diagramme ombrothermique reflétant les précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Guanacaste, Costa Rica. Moyennes des mesures prises entre 1991 et 2021(Climata-Data, 2021).	5
Figure 3-3 : Carte des précipitations annuelles moyennes interpolées par CHIRPS V2.0 (1981-2017) pour le bassin versant Tempisque-Bebedero (Venegas-Cordero et al., 2021).....	6
Figure 3-4 : Représentation du projet Arenal à savoir le complexe hydroélectrique Arenal-Dengo-Sandilal ayant pour source le lac Arenal et le Côte.	8
Figure 3-5 : Représentation du projet Arenal – PRAT avec le complexe hydroélectrique ARDESA qui alimente le réseau d’irrigation dans le bassin versant Tempisque – Bebedero.....	9
Figure 4-1 : Variabilité temporelle sur huit ans (2010-2018) des précipitations dans le bassin versant de la rivière Kabeli au Népal, du débit et de la concentration en sédiments de la rivière Kabeli. La concentration de sédiments est sur une échelle logarithmique. (Ghimire et al., 2024)	14
Figure 4-2 : Variabilité interannuelle de (a) la charge sédimentaire et (b) du ruissellement à la station de jaugeage d'Obidos de 1996 à l'année hydrologique 2018. Les lignes de régression dans les moitiés antérieures (1996-2007) et postérieures (2007-2018) de la période d'étude sont indiquées sont représentées en rouge et en bleu, respectivement. (Li et al.,2020)	16
Figure 4-3 : Influence des barrages sur le tri granulométrique des sédiments en amont de l'ouvrage (Frémion, 2017)	17
Figure 4-4 : Sédimentation totale (inorganique + organique) à court terme le long du gradient intertidal : bas (LI), moyen(MI) et supérieur (UI). La moyenne de la sédimentation a été calculée pour la rivière Tempisque et Bebedero. Le débit moyen de la rivière correspond à la rivière Tempisque, et les précipitations sont données pour la période d'échantillonnage : juillet 1998-juin 1999 (Delgado-sanchez, 2001).	19
Figure 4-5 : Signature spectral de l'eau, les sédiments, la matière organique dissoute colorée et la chlorophylle (Pisanti et al., 2022)	24
Figure 5-1 : Répartition des principales stations de mesures du niveau et du débit des rivières ainsi que des précipitations dans le bassin versant Tempisque - Bebedero	30
Figure 5-2 : Décomposition de Fourier rapide du niveau d'eau mesuré de la rivière Tempisque (gauche) et Bebedero (droite)	32
Figure 5-3 : Séries temporelles du niveau d'eau mesuré de la rivière Tempisque (haut) et Bebedero (bas) (WL), I, du niveau d'eau après l'application d'un lissage par moyenne mobile	

sur une période glissante de 30 jours (WLM), des oscillations solaires annuelle et semi-annuelle (SA+SSA) et du niveau d'eau subtidale ($ST = WLM - SA - SSA$)	33
Figure 5-4 : Couverture temporelle des missions de Landsat 5, 6, 7, 8 et 9	38
Figure 5-5 : Etapes de pré-traitement - le code couleur correspond aux étapes appliquées aux différentes collections. Les étapes en noir sont communes à toutes les collections	41
Figure 5-6 : Image du golf de Nicoya prise par Landsat 7 datant de novembre 2009 avec le SLC désactivé.....	41
Figure 5-7 : images brutes Sentinel 2 de l'embouchure de la rivière Tempisque dans le golfe de Nicoya.	43
Figure 5-8 : Résultats de l'application d'algorithmes de calcul de concentrations en sédiments (SSC [mg/l]) sur trois images du golfe de Nicoya (Landsat 5 : algorithme [3], Landsat 8 : algorithme [6], Sentinel 2 : algorithme [8]).....	44
Figure 5-9 : Résultats du clustering appliqué sur trois images du golfe de Nicoya provenant des missions Landsat 5, 8 et Sentinel 2 sur base des résultats du calcul des concentrations en sédiments (SSC [mg/l]) à partir d'algorithme.	46
Figure 6-1 : Représentation conceptuelle du régime hydrologique lié au projet Arenal – PRAT et du transport hypothétique des sédiments issus de l'érosion des sols agricoles irriguées dans le bassin versant Tempisque - Bebedero.....	52
Figure 6-2 : Moyennes des précipitations mensuelles cumulées, calculées à partir des données recueillies par les stations de mesure dans le bassin versant Tempisque-Bebedero et moyennes mensuelles des débits de la rivière Santa Rosa, Corobici (avant et après 1980), du canal principal Ouest et du canal principal Sud De la rivière Bebedero et Tempisque. Pour les rivières les axes des y correspond aux débits en [m^3/s]	53
Figure 6-3 : Débit estimé de la rivière Tempisque avec la formule de Manning-Strickler, débit mesuré du canal Sud et précipitations mesurés par la station Canas au cours du temps	55
Figure 6-4 : Débit estimé de la rivière Bebedero avec la formule de Manning-Strickler, débit mesuré du canal Sud et précipitations mesurés par la station Canas au cours du temps	55
Figure 6-5 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Sentinel-2 avec le décompte mensuel du nombre d'images.....	56
Figure 6-6 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Landsat 8 et 9 avec le décompte mensuel du nombre d'images.....	57
Figure 6-7 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Landsat 5 et 7 avec le décompte mensuel du nombre d'images.....	58

Figure 6-8 : Variation mensuelle et indépendamment de l'année de la superficie médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Sentinel 2 et Landsat 8 et 9 avec le décompte mensuel du nombre d'images.....	58
Figure 6-9 : Images composites mensuelles représentant l'occurrence de détection de sédiments par pixel dans le golfe de Nicoya sur base des images individuelles de Sentinel 2	59
Figure 6-10 : Variation mensuelle et indépendamment de l'année de la concentration en sédiments de la médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) dans la rivière Bebedero, basée sur les images Sentinel 2 avec le décompte mensuel du nombre d'images	60
Figure 6-11 : Variation mensuelle et indépendamment de l'année de la concentration en sédiments de la médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) dans la rivière Tempisque, basée sur les images Sentinel 2 avec le décompte mensuel du nombre d'images	61
Figure 6-12 : débit estimé de la rivière Bebedero avec l'équation de Manning-Strickler, mesures ponctuelles des valeurs de concentrations basé sur des images Sentinel 2, moyenne mobile de fenêtre 30 jours pondérée des mesures ponctuelles de concentrations et précipitations cumulée mesurée à la station Canas.....	62
Figure 6-13 : Médiane mensuelle de la charge en sédiments transportée par la rivière Bebedero au cours du temps avec interquartile, calculé sur base des médianes mensuelles du débit estimé de cette rivière et des médianes mensuelles de la concentrations en sédiments de la rivière.....	63
Figure 6-14 : Mesures ponctuelles des valeurs de concentrations basé sur des images Sentinel 2 dans la rivière Tempisque, moyenne mobile de fenêtre 30 jours pondérée des mesures ponctuelles de concentrations et précipitations cumulée mesurée à la station Canas.....	64
Figure 6-15 : Profil érosif du bassin versant Tempisque-Bebedero calculé sur base de l'USLE et précipitations moyennes mesurées par les différentes stations de mesures des précipitations dans le bassin versant (Figure 4 – 1)	65
Figure 7-1 : Moyennes des précipitations mensuelles cumulées, calculées à partir des données recueillies par les stations de mesure dans le bassin versant Tempisque-Bebedero et moyennes mensuelles des débits de la rivière Tempisque mesurés aux stations Guardia, et La Guinea et de la rivière Canas et estimé à partir des données de niveau à la station Tempisque. Pour les rivières les axes des y correspond aux débits en [m ³ /s]	68
Figure 7-2 : Débit de la rivière Tempisque (haut) et Bebedero (bas) avec intervalle de confiance au fil du temps.....	69

Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Comparaison de l'utilisation des sols dans le bassin versant Tempisque – Bebedero entre 1956 et 2000 (Jimenez et al., 2005)	7
Tableau 4-1 : Principaux produits satellites pertinents pour l'étude des sédiments dans les masses d'eau et leurs caractéristiques	22
Tableau 4-2 : Comparaison de différents algorithmes utilisés pour l'étude des sédiments et les caractéristiques liées à leurs développement. Avec : TSM : matière total en suspension, NDTI : Indice de Turbidité Normalisé, SSC : Concentration de Sédiments en Suspension, NIR : Proche Infrarouge, NDSSI : Indice de Sédiments en Suspension Normalisé, VRE : vegetation red edge, MCI : Indice Maximum de Chlorophylle, FUI : Forel-Ule index	26
Tableau 5-1 : Métadonnées de stations de mesures de débit (TWCA) fournies par ICE et de niveau (TSCA) fournies par Organization from Tropical Studies (OTS) de rivières dans le bassin versant Tempisque – Bebedero	29
Tableau 5-2 : Métadonnées de stations de mesures de précipitations fournies par HDX.	29
Tableau 6-1 : résultats médians et intervalles interquartiles de la proportion de sédiments durant la saison sèche sur base des images Landsat 8 et 9	57
Tableau 6-2 : relation entre les précipitations cumulées en début de saison sèche et les dates de débit et concentrations maximales maximale dans la rivière Bebedero	62
Tableau 7-1 : Comparaison de l'érosion moyenne annuelle dans le bassin versant Tempisque-Bebedero en 1956 et en 2000 sur base des résultats de l'USLE	75

1 Introduction

Le bassin versant de la rivière Tempisque-Bebedero, situé dans la partie nord-ouest du Costa Rica, a subi de nombreuses modifications anthropiques depuis les années 1950. Ces changements incluent une expansion significative des terres agricoles jusque dans les années 1970, période durant laquelle une pratique courante était la conversion des zones humides des rives de la rivière Tempisque en terres agricoles (Quirós, 2001). Cette pratique a considérablement augmenté les surfaces disponibles pour la culture de melons, de canne à sucre et de riz principalement (Senara, 2024).

En 1976, le projet Arenal-PRAT a été lancé, comprenant la mise en place d'un complexe hydroélectrique, par la construction de barrages en série, et d'un vaste système de canaux d'irrigation et de drainage, utilisant l'eau en aval du complexe. Ce projet a doublé le volume d'eau naturellement acheminé vers le bassin Tempisque-Bebedero et a favorisé le passage d'une agriculture extensive à une agriculture intensive.

Bien que ce projet ait contribué au développement socio-économique de la région, il a certainement également provoqué des perturbations dans le système hydrologique du bassin et affecté la charge sédimentaire transportée par les rivières.

Les barrages, selon leurs horaires d'ouverture, influencent le débit des rivières en aval, tandis que l'agriculture intensive, exacerbée par l'irrigation, pourrait accroître l'érosion des sols agricoles. Une partie de l'eau d'irrigation pourrait ruisseler ou être drainée à travers les parcelles cultivées et ainsi se diriger vers les rivières en aval des cultures.

Ces perturbations pourraient avoir des conséquences sur les écosystèmes du Parc National de Palo Verde (PVNP), situé au cœur du bassin versant Tempisque-Bebedero. Ce parc est l'un des sites les plus riches en biodiversité et en valeur écologique du Costa Rica (Jimenez, 2001). Son statut au titre de la Convention de Ramsar lui confère une reconnaissance internationale en tant que zone humide d'importance mondiale, renforçant ainsi sa protection, son utilisation durable et sa conservation (Quirós, 2001).

Cependant, le parc subit des dégradations écologiques significatives depuis 40 ans. Les causes sous-jacentes de ces dégradations restent encore largement incomprises. Une hypothèse plausible serait que la sédimentation dans les rivières du bassin versant a augmenté ces dernières décennies. Cette augmentation serait due au projet Arenal-PRAT, notamment à l'érosion intensifiée des sols agricoles causée par l'irrigation et le rejet des eaux usées, chargées en sédiments, dans le système naturel. Une sédimentation élevée entraîne de nombreux effets négatifs sur les écosystèmes : diminution des niveaux d'oxygène disponible, réduction de la photosynthèse, altération de la régulation de la température de l'eau, etc. (Canada, 2007). Une des clés de la dégradation des écosystèmes dans la zone humide pourrait se trouver ici.

La question de recherche abordée dans cette étude est la suivante : "Quelle est l'influence de la mise en opération et de la gestion du projet Arenal-PRAT sur la dynamique sédimentaire dans les rivières Tempisque, Bebedero et le golfe de Nicoya ?"

L'utilisation de l'imagerie satellite a considérablement évolué au cours des dernières années, offrant désormais la possibilité d'étudier la dynamique sédimentaire à grande échelle dans les masses d'eau. De plus, la collecte de données hydro-climatiques dans la zone d'étude, grâce à des campagnes de mesures menées entre 1951 et 2020, permet de corréler ces informations avec les changements observés via les images satellites.

2 Objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'impact de la mise en œuvre du projet Arenal-PRAT, incluant la construction de barrages et de canaux d'irrigation dans le bassin versant Tempisque-Bebedero, sur la dynamique sédimentaire des rivières Tempisque, Bebedero et le golfe de Nicoya. Pour répondre à cet objectif principal, trois objectifs méthodologiques ont été adressés de manière séquentielle :

1. Caractériser le contexte hydro-climatique et agricole du bassin versant Tempisque-Bebedero.
2. Caractériser la dynamique sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero et le golfe de Nicoya
 - a. Analyse de la dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya
 - b. Analyse de la dynamique temporelle intra et interannuelle de la concentration et de la charge sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero
3. Expliquer la dynamique sédimentaire à la lumière du contexte hydro-climatique et agricole du bassin.

L'analyse hydro-climatique intégrera des mesures telles que la pluviométrie, le débit des rivières et le niveau de l'eau. Elle examinera également les liens avec le calendrier agricole et les interactions potentielles avec le projet Arenal-PRAT. Pour ce faire, nous utiliserons les bases de données UF-hydrobase et Humanitarian Data Exchange (HDX).

L'étude de la dynamique sédimentaire se fera à partir d'images satellites issues des missions Landsat 5, 7, 8, 9 et Sentinel 2. La combinaison de ces cinq missions offre une couverture sur les 40 dernières années. L'horizon temporelle considéré dépendra cependant de la qualité des résultats obtenus avec les différentes missions.

3 Description de la zone d'étude

3.1 Le bassin versant Tempisque - Bebedero

Le bassin versant Tempisque-Bebedero se trouve dans la partie nord-ouest du Costa Rica, englobant une grande partie de la province de Guanacaste et une portion de la province d'Alajuela. Il est délimité à l'ouest par la péninsule de Nicoya et l'océan Pacifique. Au nord et à l'est, le bassin est bordé par la cordillère volcanique de Guanacaste, qui sépare le versant du Pacifique de celui des Caraïbes (Figure 3-1).

Le nom du bassin provient des rivières Tempisque et Bebedero, principaux cours d'eau drainant cette région. La rivière Bebedero conflue avec la rivière Tempisque juste avant leur embouchure dans le golfe de Nicoya (Figure 3-1). Le bassin de la rivière Tempisque couvre une superficie de 3 405 km². En ajoutant celui de la rivière Bebedero, la superficie totale atteint 5 455 km², ce qui en fait le plus grand bassin versant du pays.

Le bassin est divisé en trois sections : la partie supérieure, couverte de forêt, située dans la cordillère volcanique de Guanacaste; la partie moyenne, avec des terrains ondulés consacrés à l'agriculture; et la partie inférieure, composée de plaines et de marais sujets à des inondations. C'est dans cette dernière partie qu'on retrouve le Parc National de Palo Verde (PVNP).

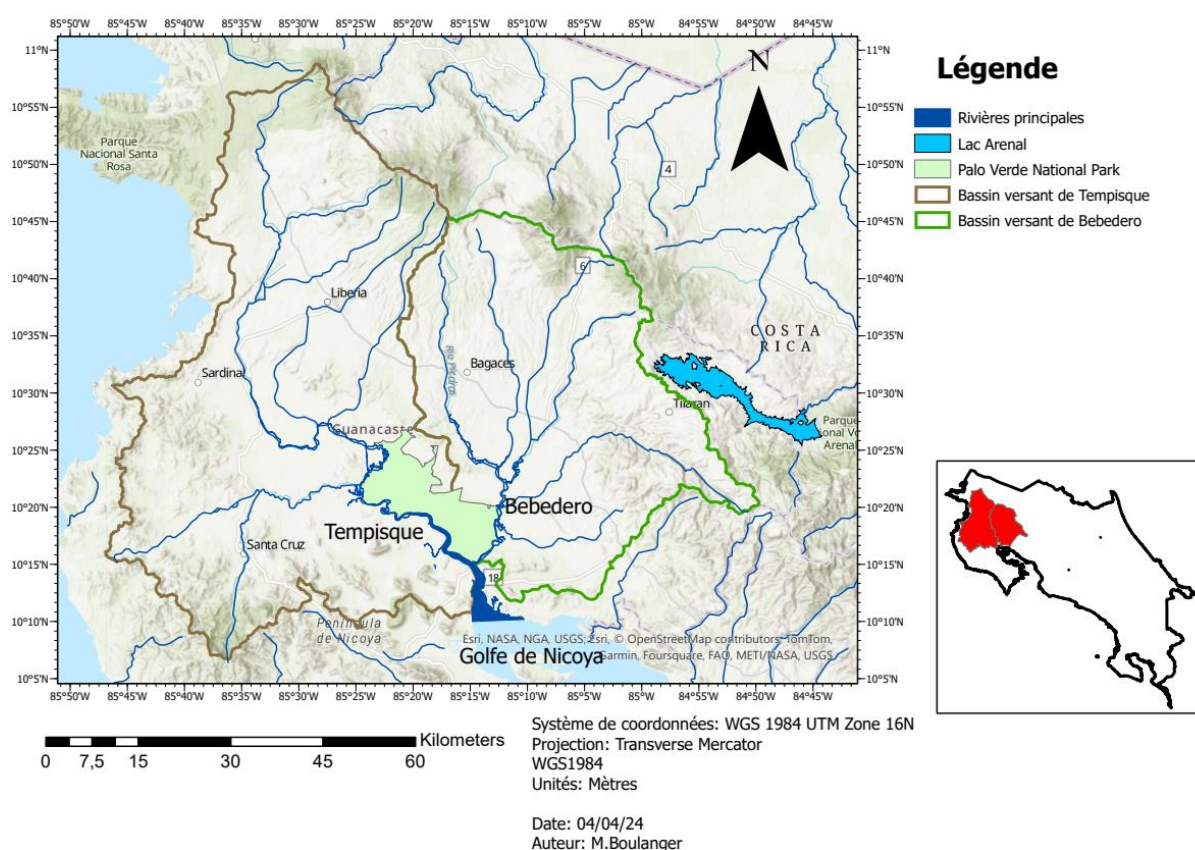


Figure 3-1 : Représentation du bassin versant de la rivière Tempisque et Bebedero, Costa Rica.

Les rivières Tempisque et Bebedero prennent leur source dans les montagnes de la cordillère de Guanacaste, respectivement au niveau du volcan Orosi et du volcan Tenorio. La rivière Tempisque est le troisième fleuve le plus étendu du Costa Rica, s'étendant sur environ 144 kilomètres avant de se jeter dans le golfe de Nicoya. La rivière Bebedero, un affluent de la Tempisque, mesure 40 km de long et conflue avec celle-ci juste avant l'estuaire dans le golfe (Birkel & Sánchez-Murillo, 2017).

3.1.1 Climat

La zone est caractérisée par un climat tropical humide et sec, avec une température moyenne annuelle avoisinant les 25,5 °C. On observe une variation saisonnière, bien que de faible amplitude, avec des températures maximales en avril et les plus basses entre septembre et décembre. La région distingue clairement une saison des pluies et une saison sèche, correspondant respectivement à l'été et à l'hiver. Environ 95 % des précipitations annuelles se concentrent entre mai et novembre. Durant la saison des pluies, les précipitations varient entre 150 et 315 mm, avec un léger fléchissement en juillet et août. Pendant la saison sèche, elles oscillent plutôt entre 0 et 60 mm par mois (Climate-Data, 2021) (Figure 3-2).

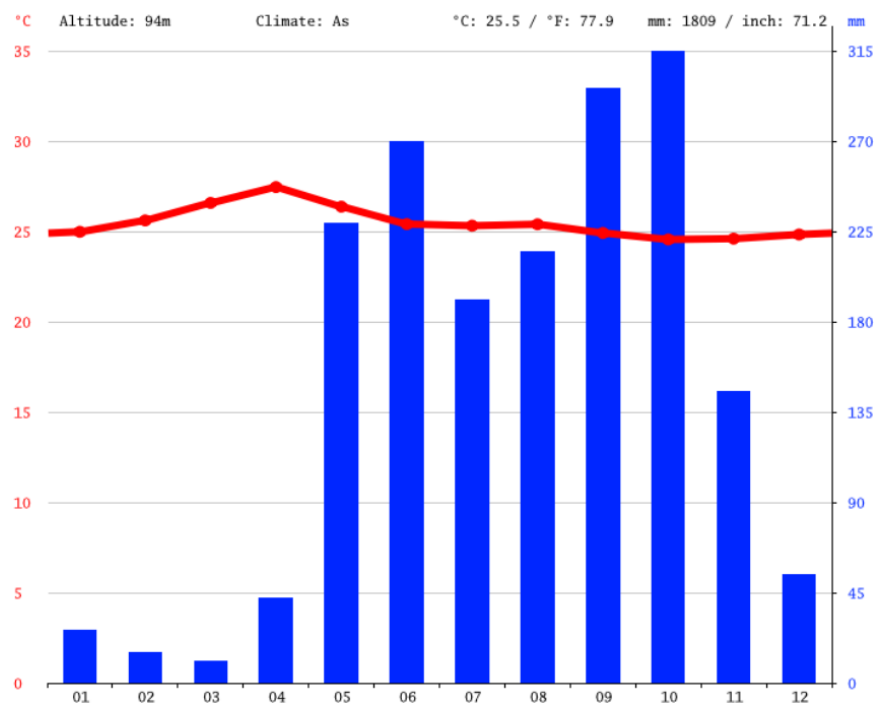


Figure 3-2 : Diagramme ombrothermique reflétant les précipitations et températures moyennes mensuelles dans la région de Guanacaste, Costa Rica. Moyennes des mesures prises entre 1991 et 2021 (Climate-Data, 2021).

Les rivières du bassin versant Tempisque-Bebedero subissent de considérables variations de débit dues à l'alternance marquée entre la saison sèche et la saison des pluies. Durant la saison des pluies, l'intensité des précipitations provoque fréquemment le débordement de nombreuses rivières (Carpén, s. d.).

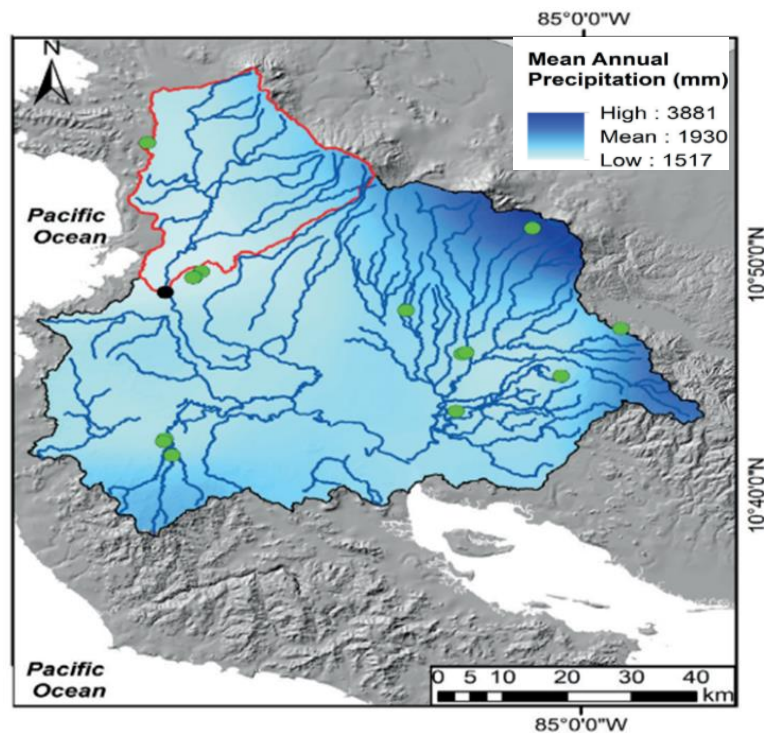


Figure 3-3 : Carte des précipitations annuelles moyennes interpolées par CHIRPS V2.0 (1981-2017) pour le bassin versant Tempisque-Bebedero (Venegas-Cordero et al., 2021)

Comme le montre la Figure 3-3 les précipitations sont plus importantes dans la partie nord-est du bassin versant. En fait, la partie supérieure du bassin est influencée par le climat caribéen. La région bénéficie ainsi de l'influence des alizés de l'est, qui transportent l'humidité de l'océan Atlantique vers l'intérieur des terres. Lorsque ces alizés rencontrent la cordillère volcanique de Guanacaste, dans le nord-est du bassin, près de la ligne de partage des eaux, l'air est forcé de s'élever, ce qui provoque des précipitations par refroidissement. Cet effet est dû au fait que la cordillère culmine à 1910 m au-dessus du niveau de la mer, avec une altitude moyenne d'environ 1000 m, contre 260 m en moyenne dans l'ensemble du bassin versant. Les précipitations dans cette zone sont donc assez régulières et abondantes toute l'année. La partie basse du bassin est quant à elle influencée par le climat de l'océan Pacifique, responsable des moussons d'été, ce qui provoque une saison sèche et des pluies bien marquées (Venegas-Cordero et al., 2021).

Enfin, l'Oscillation australe El Niño (ENSO) exerce un impact notable sur le climat du Costa Rica. Le phénomène El Niño est à l'origine d'une variabilité interannuelle marquée au niveau des précipitations. Durant un épisode d'ENSO, les précipitations sont fortement réduites. La région de Guanacaste subit alors une augmentation des températures et des conditions de sécheresse plus sévères pendant la saison sèche, engendrant des pénuries d'eau et des défis accrus pour l'agriculture. Les études indiquent que les changements climatiques pourraient accentuer ces effets d'ENSO dès la fin du 21^e siècle (Hund et al., 2021).

3.1.2 Occupation des sols

Comme l'indique le Tableau 3-1, la couverture terrestre des sols dans le bassin a connu des changements importants au cours des cinq dernières décennies. Ce changement d'occupation des sols est principalement dû à la conversion des forêts en terres agricoles durant la période d'agriculture extensive entre les années 1950 et 1970. Cependant, la mise en place du projet Arenal-PRAT et le passage à un système d'agriculture intensif ont encouragé la conversion de davantage de terres en zones agricoles (Jiménez et al., 2005).

Tableau 3-1 : Comparaison de l'utilisation des sols dans le bassin versant Tempisque – Bebedero entre 1956 et 2000 (Jimenez et al., 2005)

Utilisation des sols	Superficie en 1956 [%]	Superficie en 2000 [%]
Mangroves	1.3	0.6
Zone humide	9.4	6.6
Forêt	39.8	24.6
Agriculture	0	24.7
Pature	49	42.3
Zone urbaine	0.2	0.7
Masse d'eau	0.3	0.5

3.1.3 Types de sols

Les quatre principaux types de sols dans le bassin versant Tempisque-Bebedero sont les Inceptisols (56%), les Entisols (34%) et les Mollisols et Vertisols (un peu moins de 10%). Les Mollisols, très fertiles et riches en matière organique, sont particulièrement favorisés pour l'agriculture (Guzmán Arias & Calvo-Alvarado, 2012). L'agriculture représentant environ 25% de la couverture terrestre du bassin versant Tempisque-Bebedero, les autres types de sols sont également cultivés (Figure D-1).

3.2 Le Projet Arenal – PRAT

Autrefois, les variations intra-annuelles des précipitations limitaient l'activité agricole pendant la saison sèche. En doublant le volume d'eau acheminé vers le bassin Tempisque-Bebedero, le projet ARENAL – PRAT a profondément modifié le régime hydrologique du bassin versant Tempisque-Bebedero.

3.2.1 Projet Arenal et complexe hydroélectrique Arena-Dengo-Sandilal (ARDESA)

Le projet Arenal a débuté en 1974 avec la construction du barrage Arenal, entraînant la submersion de la vallée préexistante et la création du lac Arenal, un réservoir artificiel d'une superficie de 87 km². Initialement, le lac était plus petit et naturel. L'inauguration de la centrale électrique d'Arenal, dotée d'une capacité de 157 mégawatts, a eu lieu après cinq ans de travaux. Par la suite, la centrale de Dengo, avec une capacité de 174 MW, a été mise en service trois ans plus tard, et la centrale de Sandilal, d'une capacité de 32 MW, en 1992. L'ensemble de ces installations possède une capacité totale de 363,37 MW, représentant ainsi 10,3 % de la capacité de production électrique nationale (Quirós & Hernández, 1997).

La configuration actuelle du complexe hydroélectrique Arenal-Dengo-Sandilal (ARDESA) est illustrée dans la Figure 3-4. La carte de localisation permet de situer le projet dans le bassin versant Tempisque-Bebedero. La centrale d'Arenal reçoit son approvisionnement en eau par une conduite issue du lac Arenal. Il est important de noter le rôle complémentaire du lac Cote, situé en amont, qui alimente le système via une canalisation reliant les deux lacs. Après avoir été utilisée à la centrale d'Arenal, l'eau est déversée dans la rivière Santa Rosa, puis dirigée vers les centrales de Dengo et de Sandilal.

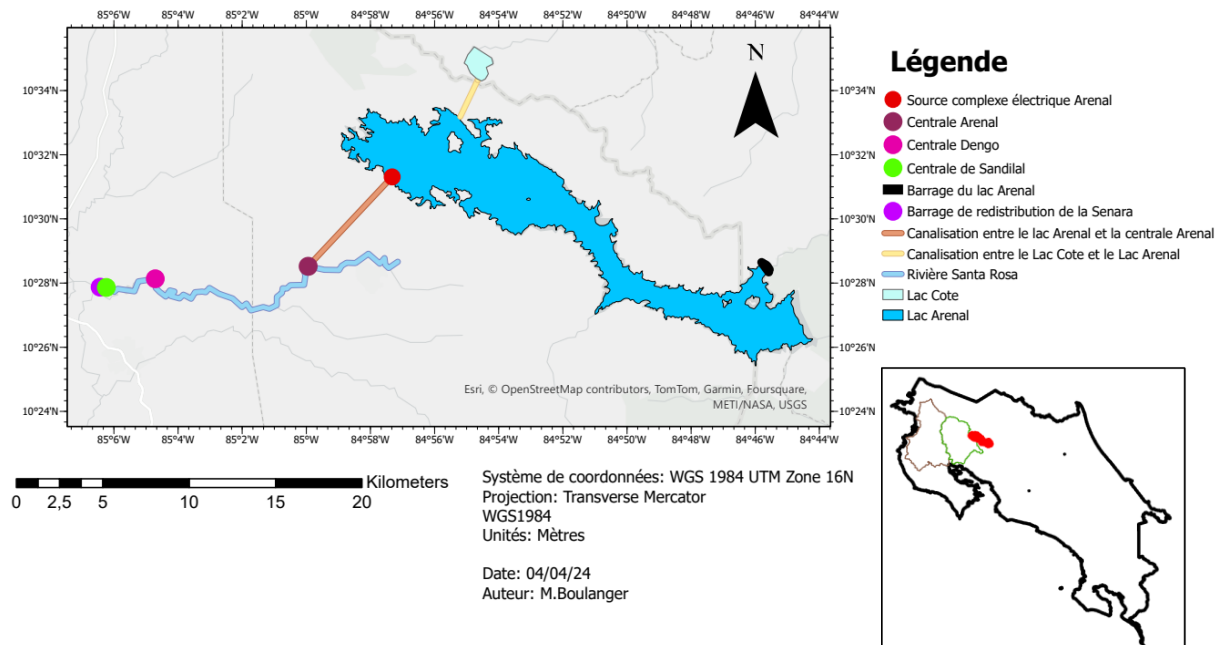


Figure 3-4 : Représentation du projet Arenal à savoir le complexe hydroélectrique Arenal-Dengo-Sandilal ayant pour source le lac Arenal et le Cote.

3.2.2 Projet d'Irrigation Arenal-Tempisque, PRAT

Le Projet d'Irrigation Arenal-Tempisque, connu sous l'acronyme PRAT, est une initiative destinée à développer un réseau d'irrigation agricole dans le bassin versant Tempisque – Bebedero.

Les motivations derrière la mise en place de projet sont les suivantes :

- Maximiser l'utilisation des eaux d'Arenal pour l'agriculture.
- Encourager le développement agricole en transitionnant de l'agriculture pluviale extensive à l'agriculture intensive irriguée.
- Améliorer les conditions socio-économiques de la région.

Les travaux de construction, démarrés en 1985, couvrent aujourd'hui 29 500 hectares de terres agricoles irriguées. Ces travaux résultent de différentes étapes de construction financé progressivement par l'Etat dont la dernière date de 2018, ayant pour but d'augmenter la surface irriguée

Le réseau est principalement alimenté par les eaux des bassins d'Arenal et de Cote, notamment grâce au barrage construit sur le lac Arenal, qui a contribué à la création du lac artificiel Arenal. Un canal souterrain assure le drainage des eaux du lac Cote vers le lac Arenal. La région bénéficie en moyenne de 4260 mm de précipitations annuelles, influencé par le climat caribéen (Section 3.1.1), un volume considérable comparé aux 1800 mm du bassin

Tempisque. Comme illustré dans la Figure 3-5, l'eau du lac Arenal est dirigée via un conduit et la rivière Santa Rosa vers le système d'irrigation. C'est durant ce transfert que l'eau passe à travers le complexe hydroélectrique ARDESA (Figure 3-4), avant de rejoindre les canaux d'irrigation principaux Sud et Ouest qui distribuent l'eau à l'ensemble du réseau (Figure 3-5).

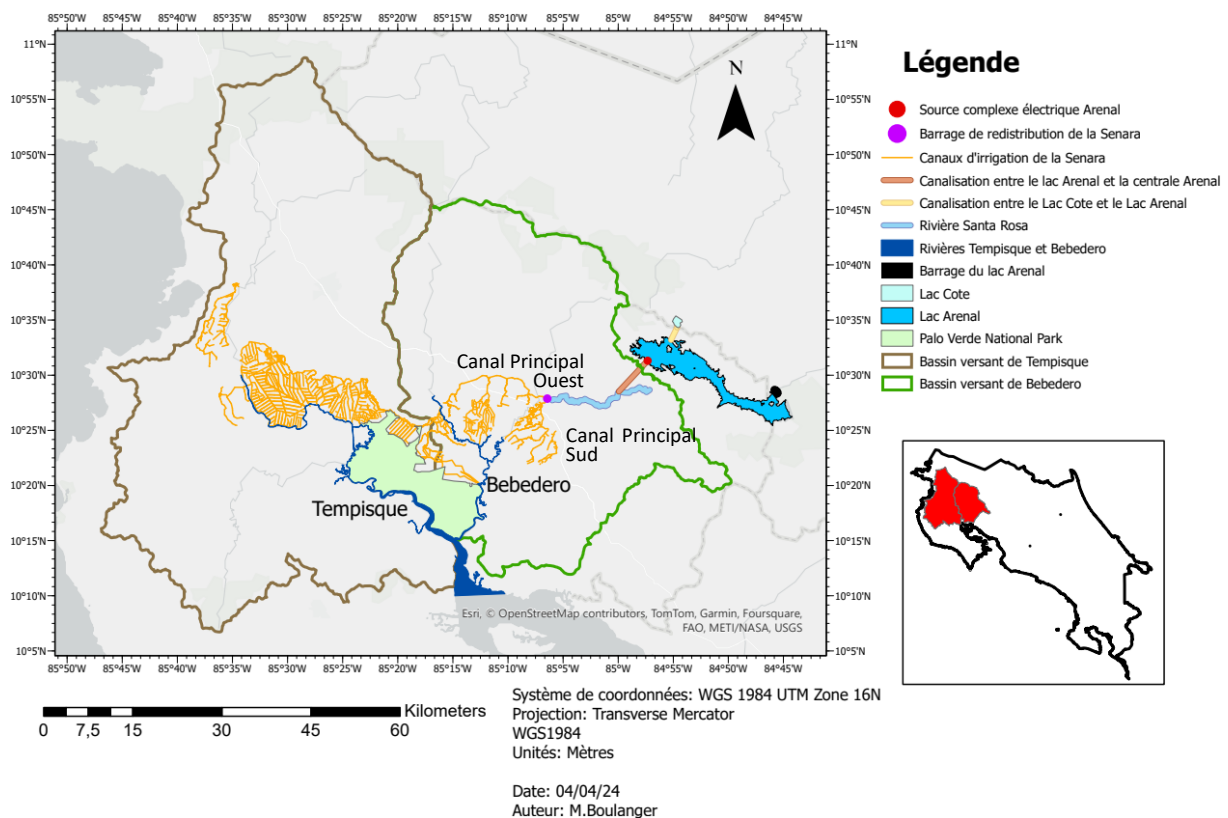


Figure 3-5 : Représentation du projet Arenal – PRAT avec le complexe hydroélectrique ARDESA qui alimente le réseau d'irrigation dans le bassin versant Tempisque – Bebedero.

Actuellement, le complexe hydroélectrique ARDESA utilise environ 1,3 milliard de m³ d'eau pour la production d'électricité. Cette quantité représente le double de l'eau naturellement présente dans le bassin versant Tempisque-Bebedero. De ce volume total, 960 millions de m³, soit environ 66%, sont redirigés vers le réseau d'irrigation d'Arenal. Parmi cette proportion, les deux tiers de l'eau sont acheminés par le canal Ouest, tandis que le tiers restant est distribué via le canal Sud. Une étude de la distribution mensuelle des débits moyens au sein du complexe Arenal-PRAT montre une diminution de l'ouverture des vannes du barrage de redistribution de la Senara (Figure 3-5) durant la saison des pluies. Par conséquent, le débit dirigé vers les canaux d'irrigation tend également à réduire pendant cette période. Cette gestion modulée des débits est en réponse directe aux variations saisonnières des besoins en irrigation, qui décroissent avec l'accroissement des précipitations naturelles. Le surplus d'eau non utilisé, conservé potentiellement, pourrait servir à remplir un futur réservoir sur la rivière Piedras, projet envisagé pour alimenter le projet PAACUME (Senara, 2024).

3.3 Le Parc National de Palo Verde

Le PVNP est une zone protégée reconnue par son statut au titre de la Convention de Ramsar, faisant partie du bassin versant Tempisque-Bebedero (Figure 3-5). Cependant, le parc subit des dégradations écologiques significatives depuis 40 ans. Aujourd'hui, ces dégradations sont principalement attribuées aux changements de végétation du parc. Auparavant caractérisées par des eaux libres et une végétation basse et émergente, de nombreuses zones du parc sont

désormais dominées par un peuplement de quenouilles hautes (*Typha domingensis*), du petit arbre (*Parkinsonia aculeata*) et de l'arbuste (*Mimosa pigra*). Cela conduit à une perte de la biodiversité locale et réduit la valeur de l'habitat pour la sauvagine, les oiseaux d'eau, les poissons, les amphibiens et les invertébrés.

Les causes sous-jacentes de ces dégradations restent encore largement incomprises. Une hypothèse couramment avancée est que l'abandon progressif de l'élevage bovin dans la région a contribué à la succession naturelle et à l'augmentation du nombre de ces espèces invasives (Osland et al., 2011). Une autre hypothèse est que les zones en aval des activités agricoles intensives causées par le projet Arenal-PRAT reçoivent un excès de nutriments et sont sujettes à des perturbations hydrologiques, favorisant ainsi le développement de ces espèces invasives (Alonso, 2017; Murcia et al., 2012).

Enfin, l'hypothèse testée dans cette étude est que la sédimentation dans les rivières du bassin versant a augmenté ces dernières décennies. Cette augmentation serait due à l'érosion intensifiée des sols agricoles et au rejet des eaux usées issues de l'irrigation, chargées en sédiments, dans le système naturel. Une sédimentation élevée provoque de nombreux effets négatifs sur les écosystèmes : diminution des niveaux d'oxygène disponible, réduction de la photosynthèse, altération de la régulation de la température de l'eau, etc. (Canada, 2007). Une des clés de la dégradation des écosystèmes dans la zone humide se trouve peut-être ici.

4 Etat de l'art

Cette analyse commencera par un examen détaillé des facteurs naturels et anthropiques influençant la charge sédimentaire dans les cours d'eau. La section se conclura par une revue des connaissances actuelles concernant la sédimentation dans les rivières Tempisque et Bebedero, ainsi que dans le golfe de Nicoya, et les éventuels liens hypothétiques avec le projet Arenal – PRAT.

L'étude s'intéressera ensuite aux outils satellitaires actuellement utilisés pour l'analyse de la dynamique sédimentaire. Les avancées technologiques, notamment l'utilisation de satellites tels que Landsat, Sentinel-2, Sentinel-3 et MODIS, ont révolutionné notre capacité à observer et étudier ces dynamiques à différentes échelles temporelles. Cet état de l'art inclura une discussion sur les données disponibles, les incertitudes associées et les algorithmes employés pour l'analyse des mouvements des sédiments.

4.1 Charge sédimenteuse dans les cours d'eau

4.1.1 Facteurs affectant la charge sédimenteuse

La charge sédimentaire transportée dans les cours d'eau à travers le monde résulte des processus d'érosion des sols. L'érosion des sols et le transport sédimentaire dans les rivières sont influencés par une multitude de facteurs environnementaux, à la fois naturels et anthropiques.

Facteurs naturels

Les principaux facteurs naturels influençant l'intensité de l'érosion des sols dans une région comprennent le climat, l'hydrologie (principalement déterminée par les précipitations), la topographie, la géologie, la couverture terrestre et les activités biologiques (Zhao et al., 2021).

Climat

Au niveau climatique, les précipitations constituent généralement le facteur dominant, suivies par la température et le vent. L'impact des gouttes de pluie sur le sol exerce une force pouvant, en fonction de l'intensité et de la taille des gouttes, détacher les particules de sol. Ces particules détachées sont ensuite transportées par le ruissellement de surface. L'intensité du ruissellement, influencée par l'intensité des pluies, contribue également au détachement des particules. L'intensité du ruissellement dépend non seulement de la durée et de l'intensité des précipitations, mais aussi de l'état de saturation des sols. Selon l'étude de (Ramahaimandimby et al., 2023), un décalage moyen de deux mois est observé entre le début de la saison des pluies dans le bassin versant de la rivière Ankavia à Madagascar et le pic hydrique de ruissellement, en raison de la capacité des sols très secs à la fin de la saison sèche à absorber une grande quantité d'eau. De manière plus générale, l'étude de (Nahib et al., 2024a) a quantifié le profil érosif du bassin versant du Citarum en Indonésie en fonction de l'espace, montrant que les zones à hauts risques de précipitations (en moyenne 4000 mm par an) sont sujettes à une érosion beaucoup plus importante (en moyenne 283 tonnes·ha⁻¹·an⁻¹) que les zones à faibles risques (2000 mm par an), avec un taux d'érosion souvent inférieur à 50 tonnes·ha⁻¹·an⁻¹.

Contrairement à d'autres facteurs, la température joue un rôle presque exclusivement indirect sur l'érosion, en étant corrélée à la production de biomasse par son interaction avec les précipitations. L'étude de (L. Wang et al., 2023) a développé une équation de régression linéaire multivariée permettant d'estimer l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) du bassin Heihe en Chine, en prenant en compte des données de précipitations et de température, avec un coefficient de corrélation de 0,39. Le NDVI est un indice sensible à la vigueur et à la quantité de la végétation. Une autre étude menée par (Qian et al., 2022) montre un coefficient de corrélation de 0,48 entre le NDVI du bassin Tarim en Asie centrale, où les précipitations sont abondantes, et les températures mesurées. La température est donc corrélée à la couverture végétale, l'un des principaux facteurs influençant l'érosion des sols.

Enfin, l'étude de (Akhtar et al., 2021) montre que l'érosion éolienne n'a un impact significatif sur l'érosion totale que dans les zones les plus exposées, telles que les régions arides et semi-arides. Selon cette étude, cela est dû au fait que la vitesse critique à partir de laquelle le vent peut commencer à éroder le sol est de 15 km/h et que la couverture végétale agit comme une barrière naturelle.

Topographie

Une étude menée par (Shanshan et al., 2018) a estimé l'effet des gradients de pente sur le taux d'érosion des sols en fonction de différentes cultures, en se basant sur des mesures directes. Les résultats montrent une relation linéaire entre l'augmentation du gradient de pente et l'accroissement du taux d'érosion. Les mécanismes sous-jacents incluent la concentration et l'accélération du ruissellement sur les pentes plus raides, la fragmentation mécanique des sols, et une augmentation du potentiel d'érosion par gravité.

Pédologie

L'étude de (Bhandari et al., 2021) a quantifié l'érosion des sols en fonction de leur texture dans le bassin versant de Rangun au Népal. Selon leurs résultats, les sols argileux présentent le potentiel érosif le plus élevé, suivis des sols sableux et des sols limoneux. La taille très fine des particules argileuses facilite leur remobilisation. Les particules sableuses, bien que plus grossières, possèdent un faible pouvoir de rétention d'eau, augmentant ainsi le risque d'érosion. Enfin, les particules des sols limoneux, qui sont fines et présentent une perméabilité modérée, montrent un risque érosif inférieur.

Couverture terrestre

Enfin, l'étude de (Mazour & Roose, 2002) a démontré que, même dans les écosystèmes encore naturels, la couverture végétale joue un rôle essentiel dans la réduction de l'érosion des sols. Leurs résultats, issus 20 parcelles expérimentales installées dans le bassin versant de la Tafna en Algérie, montrent que les forêts, grâce à leur réseau racinaire dense, protègent le sol de manière significativement plus efficace que le matorral (formation buissonnante). L'érosion des sols y est estimée comme étant cinq fois plus faible, avec une moyenne de 0,4 t/ha/an contre 2 t/ha/an pour le matorral.

Combinaison des facteurs

En réalité, c'est la combinaison de tous ces facteurs qui influence le profil érosif du bassin versant et, par conséquent, la charge en sédiments dans les masses d'eau. La majorité de ces facteurs sont interconnectés. Par exemple, le type et la quantité de biomasse d'une zone, influençant l'érodibilité d'un sol, dépendent directement du climat local, du type de sol, de sa teneur en matière organique et de sa structure, elle-même influencée par les activités biologiques et la topographie (les zones de haute altitude ne sont propices qu'à certaines espèces). Il est donc nécessaire de considérer ces facteurs conjointement.

Il est important de noter que le climat, et plus particulièrement les précipitations, sert réellement de moteur à l'érosion des sols, sauf dans les zones très exposées où l'érosion éolienne peut aussi jouer un rôle significatif. Ainsi, dans les zones exemptes d'activités anthropiques, c'est durant les périodes de crues que les cours d'eau présentent généralement les taux de sédimentation les plus élevés. L'étude de (Saad et al., 1999) montre que le taux d'accrétion des sédiments dans les mangroves estuariennes de la rivière Kemaman en Malaisie est de 0,26 cm/mois durant la mousson contre 0,12 cm/mois durant le reste de l'année.

L'étude de (Ghimire et al., 2024) démontre une corrélation significative entre le débit et la concentration en sédiments suspendus de la rivière Kabeli, au Népal, sur la base de données collectées in situ pendant huit ans. Dans cette région, les précipitations lors de la saison des pluies représentent environ 80 % des précipitations annuelles, entraînant une érosion intense des sols. Comme le montre la Figure 4-1, dans cette zone où les sédiments proviennent principalement de sources naturelles, les concentrations en sédiments augmentent de manière significative pendant la saison des pluies.

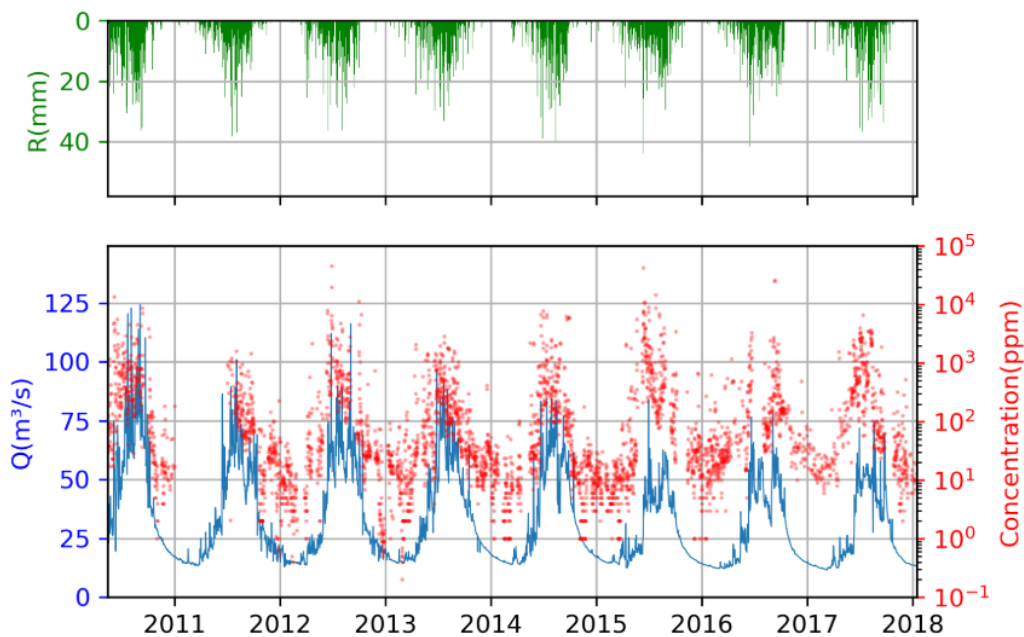


Figure 4-1 : Variabilité temporelle sur huit ans (2010-2018) des précipitations dans le bassin versant de la rivière Kabeli au Népal, du débit et de la concentration en sédiments de la rivière Kabeli. La concentration de sédiments est sur une échelle logarithmique. (Ghimire et al., 2024)

Dans les systèmes naturels, l'intensité de l'érosion est généralement influencée par une combinaison de facteurs, et la variation de cette intensité est principalement expliquée par la distribution annuelle des précipitations.

Facteurs anthropiques

L'Homme a un impact majeur direct sur l'érosion des sols à deux niveaux ; suite aux changements d'occupation des sols (surtout pour la conversion des sols en parcelles agricoles) et à l'érection de structures qui vont perturber les régimes hydrologiques naturels (Yan et al., 2018).

Conversion des sols en parcelles agricoles

L'étude de (dos Santos et al., 2017) a quantifié l'impact érosif de la conversion de 3 hectares de forêt tropicale semi-aride au Brésil en parcelles agricoles pour la culture de l'herbe. Les résultats indiquent une augmentation du ruissellement annuel de plus de 100 %, passant en moyenne de 98,6 mm/an à 197,8 mm/an. L'étude révèle également une augmentation de la charge en sédiments transportés par ce ruissellement, où les deux premiers événements pluvieux après le défrichage ont généré 73 % de la quantité totale de sol érodé annuellement avant la conversion. À une échelle beaucoup plus grande, l'étude (Nahib et al., 2024b) a analysé les changements dans l'érosion des sols et l'utilisation des terres sur une période de 10 ans, de 2010 à 2020, dans le bassin versant du Citarum en Indonésie, couvrant plus de 690 000 hectares. L'étude mentionne une conversion significative des terres en agriculture intensive. À grande échelle, l'érosion des sols est calculée en utilisant des modèles géospatiaux, comme le modèle basé sur l'équation universelle de perte de sol (USLE). Les résultats montrent une augmentation de l'érosion à l'échelle du bassin versant de 16,7 %. En effet, l'USLE identifie la couverture végétale comme un facteur primordial dans le contrôle de l'érosion des sols. Par exemple, dans les zones forestières, la perte de sol estimée n'est que de 1,5 tonne/ha/an, contre 14,95 tonnes/ha/an dans les zones de monoculture.

De manière générale, les pratiques agricoles intensives facilitent le détachement des particules de sol et augmentent la disponibilité des sédiments. Par exemple, des pratiques comme le labourage fréquent, l'application de produits chimiques ou encore la culture en monoculture peuvent respectivement perturber, altérer ou/et réduire la structure du sol. Cela a pour effet d'exposer d'avantage les particules de sol au détachement (Bedolla-Rivera et al., 2023). De plus, l'absence de couverture végétale réduit la rugosité du sol, augmentant ainsi la génération de ruissellement et renforçant la connectivité hydrologique et sédimentaire.

Perturbations des régimes hydrologiques naturels

Effets des barrages sur la sédimentation

La construction de barrages perturbe le flux naturel des sédiments dans les cours d'eau, entraînant une accumulation substantielle dans les réservoirs et réduisant le transport de sédiments en aval. Selon l'étude de (Alexandra, 2018), les barrages retiennent entre 70 et 90 % des sédiments transportés par les cours d'eau, en fonction de la gestion des barrages (ouverture plus ou moins fréquente). Cette affirmation générale est corroborée par diverses études combinant mesures empiriques (Toniolo & Schultz, 2005), modélisations hydrologiques (Vörösmarty et al., 2003), données de télédétection et études de cas (Pacini et al., 2013).

L'étude de (T. Li et al., 2020) menée sur la rivière Amazone de 1996 à 2020 montre une augmentation initiale de la charge sédimentaire transportée dans la rivière jusqu'en 2007, suivie d'une nette diminution jusqu'en 2020. Durant cette période, le ruissellement annuel total est resté constant (Figure 4-2). L'étude attribue la diminution globale du transport sédimentaire à l'érection de barrages en 2007 dans la rivière Madeira, un affluent principal de la rivière Amazone.

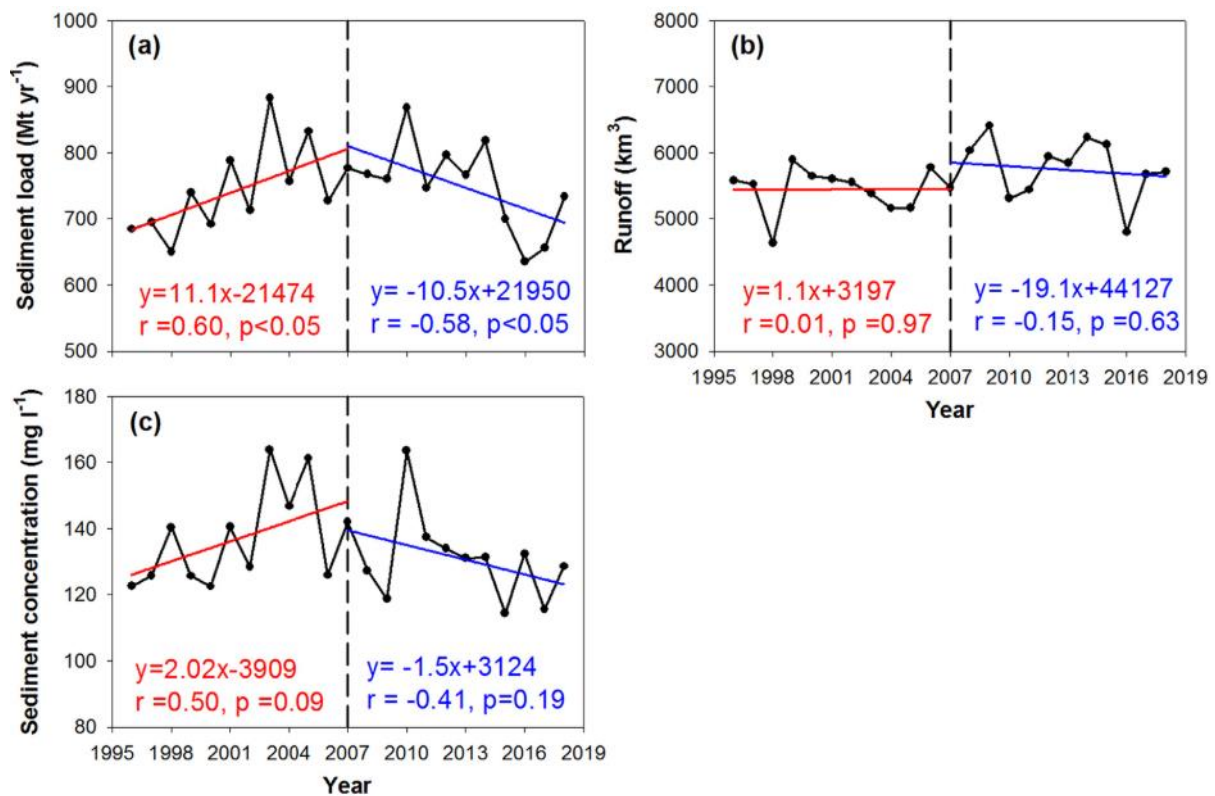


Figure 4-2 : Variabilité interannuelle de (a) la charge sédimentaire et (b) du ruissellement à la station de jaugeage d'Obidos de 1996 à l'année hydrologique 2018. Les lignes de régression dans les moitiés antérieures (1996-2007) et postérieures (2007-2018) de la période d'étude sont indiquées sont représentées en rouge et en bleu, respectivement. (Li et al., 2020)

Une autre étude menée par (S. L. Yang et al., 2005) dans le bassin versant de la rivière Yangtze en Chine montre une diminution globale de la charge sédimentaire transportée par les rivières, due à la construction de plus de 50 000 barrages au cours des cinquante dernières années. Selon leurs estimations, le taux d'accumulation des sédiments dans les réservoirs est de plus de 850 millions de tonnes par an. Ce taux d'accumulation dépasse l'effet d'augmentation du rendement en sédiments dû à la déforestation massive que la zone a connue dans les années 1960, visant à convertir les terres en cultures intensives.

Enfin, (X. Zhang et al., 2016) expliquent qu'en aval des barrages, l'eau appauvrie en sédiments possède une plus grande capacité érosive, cherchant à rétablir son équilibre sédimentaire. L'eau est également généralement relâchée de manière soudaine, ce qui augmente son potentiel érosif. Cet effet peut accélérer l'érosion des lits et des berges. Avant la construction du barrage des Trois Gorges, l'érosion du lit de la rivière Yangtze n'était que de quelques millimètres par an. Cependant, après la construction du barrage, cette érosion a augmenté à près de 8,7 cm par an.

Ségrégation et distribution des sédiments dans les réservoirs

Les barrages modifient les régimes hydrologiques des rivières, alternant entre des conditions dynamiques lorsque les barrages sont ouverts et des conditions plus statiques lorsqu'ils sont fermés. Ce changement de régime entraîne une ségrégation sédimentaire : les particules fines tendent à s'accumuler près du barrage, tandis que les particules plus grossières se déposent plus loin, vers l'extrémité du réservoir Figure 4-3. Cette répartition dépend de la capacité des particules à rester en suspension, influencée par leur taille, leur densité et la vitesse de l'eau. À l'approche du réservoir, où la vitesse de l'eau diminue, les particules les plus denses, nécessitant une vitesse d'eau plus élevée pour rester en suspension, se déposent en premier (Frémion, 2017).

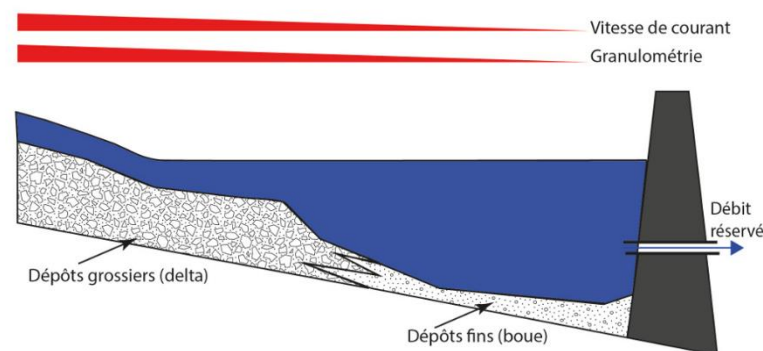


Figure 4-3 : Influence des barrages sur le tri granulométrique des sédiments en amont de l'ouvrage (Frémion, 2017)

Effets de l'agriculture intensive irriguée sur la sédimentation

Contrairement aux effets des barrages sur la sédimentation, l'irrigation des cultures tend à augmenter la sédimentation dans les masses d'eau situées en aval des zones agricoles. Les pratiques d'irrigation intensive peuvent entraîner une érosion accrue des sols agricoles, provoquant la perte de la couche arable fertile. Cet effet est particulièrement marqué dans les systèmes d'irrigation par gravité, où l'eau est appliquée abondamment (Pereira et al., 2023).

Dans leur étude, (Merchán et al., 2018) comparent la sédimentation dans les bassins versants irrigués et non irrigués en Navarre, Espagne. L'étude mentionne que, dans les bassins versants irrigués, il est difficile de distinguer l'érosion induite par des phénomènes naturels (les précipitations) de celle attribuable à l'irrigation. Cependant, les résultats montrent une érosion annuelle à peu près équivalente entre les zones irriguées (en moyenne 360 kg/ha/an) et les zones non irriguées (346 kg/ha/an). L'étude explique que l'irrigation est probablement responsable d'une part importante de la sédimentation, car les bassins irrigués bénéficient de pentes plus douces (3-5 %) contre 7 à 30 % pour les bassins non irrigués, ce qui indique que la sédimentation accrue par des causes naturelles est plus prononcée dans les bassins non irrigués.

Ensuite, l'étude de (Luo et al., 1997) a examiné les différences des effets de la sédimentation entre les zones de pâturages et les terres agricoles irriguées dans les Hautes Plaines du Texas. Les résultats montrent que les zones humides situées en aval des zones agricoles accumulent beaucoup plus de sédiments (sols de sédiments en moyenne de 58 cm) que les zones situées en aval des pâturages (5 cm). Selon eux, cette différence de sédimentation est principalement attribuée à l'utilisation des terres pour les cultures, mais est exacerbée par les pratiques d'irrigation par inondation qui augmentent l'érosion des sols, avec les rangées de cultures orientées dans le sens de la pente agissant comme des canaux de drainage.

4.1.2 La région Tempisque – Nicoya

Penchons-nous maintenant plus spécifiquement sur les connaissances actuelles concernant la sédimentation dans les rivières Tempisque et Bebedero et le golfe de Nicoya, ainsi que sur les liens entre le projet Arenal – PRAT et cette sédimentation.

Le bassin versant Tempisque – Bebedero

Les deux principales rivières du bassin versant, Tempisque et Bebedero, jouent un rôle clé dans le transport des sédiments vers leurs bassins inférieurs, entraînant une accumulation substantielle de particules, particulièrement dans les mangroves, les zones humides avoisinantes et le golfe de Nicoya (Astorga, 2007).

L'étude de (Delgado-sanchez, 2001) est la seule à ce jour à s'être intéressée à la dynamique sédimentaire des rivières Tempisque et Bebedero, en menant une recherche sur plusieurs années, d'avril 1998 à juin 2000. L'expérimentation a été menée dans trois zones d'étude de chaque rivière (Tempisque et Bebedero). La sélection de ces trois zones pour chaque rivière repose sur le fait que l'hydrologie de la région est caractérisée par une marée semi-diurne qui remonte du golfe de Nicoya, inondant les berges des rivières de manière variable en fonction de la distance par rapport à l'estuaire et des amplitudes des marées. Ainsi, trois parcelles de 20 x 15 m ont été établies pour chaque rivière, réparties le long du gradient intertidal : zones intertidales basse (LI), moyenne (MI) et haute (UI). Les zones LI, situées près de l'estuaire, sont donc inondées plus fréquemment et pour de plus longues périodes à chaque cycle de marée que les zones UI.

L'étude a mesuré la sédimentation des rivières Tempisque et Bebedero dans chacune des zones sur la base des dépôts sédimentaires apportés par chaque cycle de marée. Ces mesures ont été prises à l'aide de pièges à sédiments toutes les deux semaines pendant toute la durée de l'étude. Selon Delgado-Sanchez, les résultats sont influencés par le calendrier hydrologique du Costa Rica. Les précipitations et le débit de la rivière Tempisque sont significativement plus importants durant la saison des pluies (de mai à novembre, avec un maximum en octobre). Tandis que la sédimentation est plus élevée pendant la saison sèche pour la rivière Tempisque et ne montre pas de différence significative pour la rivière Bebedero au cours de l'année.

La Figure 4-4 montre l'évolution de la sédimentation moyenne mensuelle de ces deux rivières, révélant que la sédimentation tend (i) à augmenter pendant la saison sèche pour atteindre un maximum en fin de saison dans les zones MI et UI et (ii) est généralement plus importante durant la saison sèche que pendant la saison des pluies. Cependant, une sédimentation importante est également observée dans les trois zones en août, pendant la saison des pluies.

Delgado-Sanchez indique que les principales influences sur la sédimentation incluent la fréquence et la durée des inondations, ce qui explique pourquoi la sédimentation est plus importante dans la zone LI que dans la zone UI, ainsi que la concentration totale des sédiments en suspension.

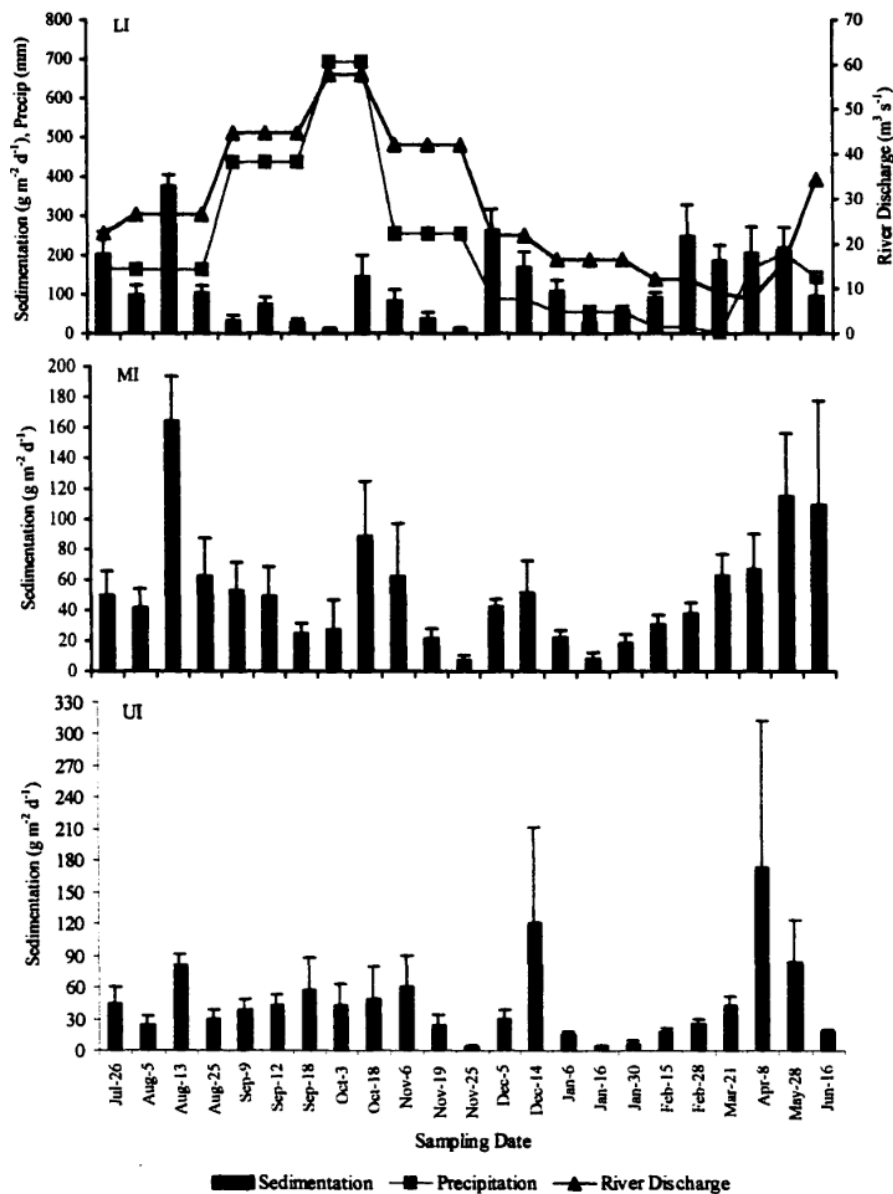


Figure 4-4 : Sédimentation totale (inorganique + organique) à court terme le long du gradient intertidal : bas (LI), moyen (MI) et supérieur (UI). La moyenne de la sédimentation a été calculée pour la rivière Tempisque et Bebedero. Le débit moyen de la rivière correspond à la rivière Tempisque, et les précipitations sont données pour la période d'échantillonnage : juillet 1998-juin 1999 (Delgado-sanchez, 2001).

Enfin, parallèlement aux mesures de sédimentation, (Delgado-sanchez, 2001) a prélevé des échantillons d'eau à différents points le long du cours principal des rivières (huit pendant la saison sèche et 17 pendant la saison des pluies) afin d'analyser la concentration et la composition des matières en suspension dans les rivières Tempisque et Bebedero. Concernant les concentrations, l'étude rapporte une concentration maximale de $12\,880 \pm 2\,280$ mg/l dans la rivière Tempisque et de 810 ± 110 mg/l dans la rivière Bebedero pendant la saison sèche.

Pendant la saison des pluies, cette concentration diminue nettement dans le Tempisque, atteignant un maximum de 320 ± 70 mg/l.

Au niveau de la composition sédimentaire, les analyses de la rivière Tempisque ont révélé une teneur élevée en matière organique, comprise entre 30 et 35 % sur l'ensemble des échantillons. Delgado-Sanchez conclut son étude en émettant l'hypothèse que la sédimentation et les concentrations plus importantes mesurées durant la saison sèche, ainsi que la teneur élevée en matière organique des sédiments, sont dues aux activités agricoles de la région et à l'érosion de ces sols. Toutefois, l'étude rappelle qu'il est essentiel de prendre également en compte la formation naturelle de sols organiques dans cette zone avant de conclure définitivement à un impact direct des pratiques agricoles.

L'étude qualitative récente de (Duarte, 2022) établit un lien clair entre l'augmentation de l'érosion des terres dans le bassin versant de Tempisque et le projet d'irrigation Arenal. Selon cette étude, la construction du projet Arenal et l'intensification de l'agriculture, facilitées par le développement de canaux d'irrigation, semblent être associées à une hausse des concentrations sédimentaires. En saison sèche, l'eau d'irrigation, une fois retournée à la rivière, serait fortement chargée en sédiments.

De même, (Monge & González, 2021) notent que le projet Arenal-PRAT affecte la composition chimique de l'eau, impactant négativement les écosystèmes aquatiques, notamment par la réduction de l'oxygène dissous. Ils précisent que la solubilité de l'oxygène dans l'eau diminue avec l'augmentation de la salinité, un phénomène exacerbé par les altérations hydrologiques induites par le projet Arenal-PRAT.

En outre, ce phénomène observé dans la région étudiée, caractérisé par une augmentation de la concentration en sédiments durant la saison sèche, contraste nettement avec les dynamiques observées dans les zones exemptes d'interventions humaines ou où les apports en sédiments dus à des activités anthropiques sont minimisés (Section 4.1.1).

Enfin, l'étude qualitative de (Castillo & Crisman, 2019) souligne que la conversion des forêts en terres agricoles durant la période d'agriculture extensive entre les années 1950 et 1970 (Section 3.1.2) a contribué à l'augmentation de l'érosion globale des sols en réduisant les protections naturelles contre l'érosion.

Le golfe de Nicoya

Selon l'étude de (Kress et al., 2002), le golfe de Nicoya reçoit un apport significatif d'eau douce des rivières environnantes pendant la saison des pluies. Cet apport entraîne une stratification du golfe, due à la formation de couches d'eau de différentes densités qui ne se mélangent pas facilement, l'eau salée étant plus dense que l'eau douce. Durant cette période, l'eau, chargée en sédiments érodés par les précipitations, voit les sédiments les plus légers rester en suspension plus longtemps en raison de la stratification prononcée des différentes couches d'eau.

Durant la saison sèche, l'étude de (Kress et al., 2002) constate une réduction de l'apport en sédiments dans le golfe de Nicoya, une observation qui contraste avec celles de diverses études menées dans les masses d'eau du bassin versant Tempisque-Bebedero. Cette diminution des processus de sédimentation est attribuée à une réduction des apports d'eau douce. Cependant, l'étude note également une augmentation de l'apport en nutriments, en particulier les nitrates (NO_3 et NO_2) et les phosphates (PO_4) durant cette période. Elle suggère que ces nutriments proviennent souvent de l'utilisation d'engrais chimiques, lesquels sont lessivés des terres agricoles par l'irrigation et les faibles précipitations, indiquant ainsi que l'agriculture intensive dans le bassin versant pourrait jouer un rôle clé dans l'augmentation de cet apport en nutriments.

Effets sur les écosystèmes

Aucune étude n'a jusqu'à présent quantifié de manière précise l'impact du projet Arenal-PRAT sur la dynamique sédimentaire dans les masses d'eau, que ce soit au niveau de la construction de barrages ou de la mise en place d'un réseau d'irrigation pour soutenir l'agriculture intensive, ni les conséquences directes de la sédimentation liée à ce projet sur les écosystèmes locaux.

Cependant, certaines analyses mettent en évidence les conséquences importantes de ce projet sur les écosystèmes de la région Arenal-Tempisque, incluant la modification des habitats aquatiques, la détérioration de la qualité de l'eau, les effets sur la faune et les changements dans la dynamique sédimentaire (*Sistema Costarricense de Información Jurídica*, 2016). Les effets généraux de ces dégradations sont indiqués dans la Section 4.1.1.

4.2 Utilisation de l'imagerie satellite pour caractériser la dynamique sédimentaire dans les masses d'eau

4.2.1 Produits

L'un des principaux avantages de l'imagerie satellite réside dans sa capacité à fournir une vue d'ensemble et à capturer un volume considérable de données de manière régulière et répétitive sur de longues périodes. Cela serait difficile à réaliser avec des moyens aériens ou terrestres conventionnels, tels que l'utilisation de drones ou l'échantillonnage manuel de terrain.

La recherche présentée ici s'appuie exclusivement sur des images provenant de missions spatiales équipées de capteurs optiques et infrarouges. Ces capteurs, de type passif, capturent l'énergie naturellement réfléchie ou émise par la surface terrestre. Cela inclut la lumière solaire réfléchie par la Terre dans le spectre visible et le proche infrarouge, ainsi que le rayonnement thermique émis par les surfaces, notamment aquatiques.

Aujourd'hui, différents produits satellitaires sont utilisés pour caractériser la dynamique sédimentaire dans les masses d'eau. Le Tableau 4-1 énumère les différents satellites optiques pertinents pour l'étude des sédiments, en détaillant leurs caractéristiques. À l'exception de la mission Sentinel-3, aucun de ces produits n'a été conçu spécifiquement pour la surveillance des surfaces aquatiques. Cependant, ils disposent des bandes dans le visible et le proche infrarouge nécessaires pour la caractérisation de la dynamique sédimentaire (Section 4.2.2).

Tableau 4-1 : Principaux produits satellites pertinents pour l'étude des sédiments dans les masses d'eau et leurs caractéristiques

Produit	Couverture temporelle	Résolution temporelle [j]	Résolution spatiale, bandes multispectrales [m]
MODIS	1999 - présent	1 - 2	250 - 500
SPOT-5	2002 - 2015	26	10
Landsat 5	1984-2013	16	30
Landsat 7	1999 - présent	16	30
Landsat 8	2013 - présent	16	30
Landsat 9	2021 - présent	16	30
Sentinel 2	2015 - présent	5	10 - 20
Sentinel 3	2016 - présent	1 - 2	300

Comme le montre le Tableau 4-1, la résolution temporelle et spatiale des satellites sont souvent inversement proportionnelles. Un satellite avec une haute résolution temporelle a généralement une résolution spatiale moins fine, ce qui implique que certains satellites sont mieux adaptés à l'étude de phénomènes à grande échelle, permettant un suivi rapide des changements. C'est le cas de MODIS, qui est un instrument à bord des satellites Terra (EOS AM) et Aqua (EOS PM), ainsi que des satellites Sentinel-3A et 3B, rendant ces systèmes applicables principalement aux estuaires, zones côtières, grands lacs et grands bassins fluviaux (Copernicus, 2022; Tarpanelli et al., 2020).

Les missions Sentinel-3 sont équipées du capteur OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), les rendant particulièrement adaptées aux environnements aquatiques. Ce capteur a été optimisé pour déterminer la couleur de l'eau, un facteur crucial pour distinguer les sédiments de l'eau claire (Copernicus, 2022).

Les capteurs des différentes missions Landsat et Sentinel-2 offrent un niveau de détail plus fin. Les missions Landsat, qui font partie d'un programme à long terme, offrent aujourd'hui une couverture temporelle de 40 ans. La qualité des capteurs s'est améliorée avec les versions ultérieures. En termes de caractérisation de la dynamique sédimentaire, la résolution spatiale de ces missions, et plus particulièrement de Sentinel-2, permet de capturer des détails plus précis, y compris les processus d'érosion et le transport de sédiments dans les rivières assez larges.

Enfin, SPOT-5 présente une résolution spatiale identique pour ses différents capteurs. Bien que sa résolution temporelle soit plus faible, les missions SPOT étaient équipées d'une technologie de dépointage leur permettant de capturer des images d'un même endroit jusqu'à tous les 2-3 jours selon la configuration (ESA, s. d.).

4.2.2 Algorithmes

Comme illustré sur la Figure 4-5, les sédiments se distinguent principalement de l'eau par leur signature spectrale distincte. La différence de réflectance entre les sédiments et l'eau est la plus marquée dans les parties basses du spectre visible et du proche infrarouge (entre 620 et 900 nm), où la réflectance de l'eau est presque nulle. Ce contraste élevé entre la réflexion des sédiments et l'absorption par l'eau permet de bien distinguer ces deux éléments sur les images satellites. Au-delà de 900 nm, les sédiments ont une réflectance qui diminue significativement, ce qui rend le contraste entre sédiments et eau moins marqué (Mondejar & Tongco, 2019).

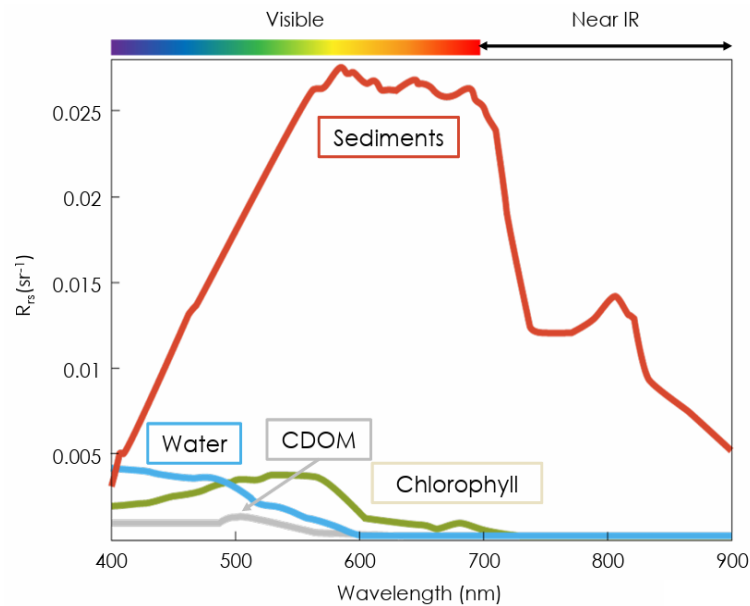


Figure 4-5 : Signature spectrale de l'eau, des sédiments, de la matière organique dissoute colorée et de la chlorophylle (Pisanti et al., 2022)

Cette caractéristique est cruciale pour les algorithmes de télédétection destinés à identifier les concentrations de sédiments, qui vont donc utiliser préférentiellement les bandes de réflectance rouge et infrarouge des différents produits. Parfois, ces bandes sont combinées aux données de réflectance des bandes vertes et/ou bleues en vue d'améliorer les distinctions entre les sédiments, les autres matières en suspension et la chlorophylle. Cela est possible étant donné que la chlorophylle a une réflectance importante dans le vert, tandis que la matière en suspension dissoute a une réflectance importante dans le bleu. Comparativement à sa réflectance dans le rouge, les sédiments ont une réflectance faible dans le vert et le bleu. Dès lors, par exemple, un rapport élevé $\frac{R_{red}}{R_{green}}$ indique une concentration importante en sédiments, prévalente par rapport à la concentration en chlorophylle (Jarrard & Vanden Berg, 2006).

Ces différences dans les signatures spectrales des composants qui peuvent être en suspension dans l'eau sont donc une caractéristique essentielle prise en compte par les algorithmes. Certains algorithmes vont plutôt caractériser la turbidité, qui est une mesure du degré de clarté de l'eau correspondant à la matière totale en suspension, incluant les sédiments, les algues, la matière organique et les polluants chimiques. Tandis que d'autres algorithmes ont été spécifiquement calibrés pour estimer seulement la concentration totale en sédiments.

Enfin, les algorithmes destinés à identifier des concentrations sédimenteuses se classent en trois catégories en fonction de s'ils sont basés plutôt sur des observations directes ou des méthodes mathématiques. Les algorithmes sont donc empiriques, statistiques, ou semi-empiriques (Peel, 2013):

- **Empirique:** Basés sur des observations ou des expériences directes plutôt que sur des théories préconçues, ces algorithmes utilisent des mesures in situ pour établir les meilleures corrélations avec les bandes de réflectance capturées. Leur principal inconvénient réside dans leur manque de généralisabilité ; ils sont souvent spécifiques à certaines régions ou périodes et peuvent ne pas être efficaces dans d'autres contextes ou à d'autres moments. Par exemple, certains sont calibrés uniquement pour des concentrations spécifiques ou pour des types particuliers de masses d'eau.
- **Statistique:** Ces algorithmes traitent les données de mesures in situ en appliquant des méthodes mathématiques pour déceler des relations et des tendances. Ils incluent des techniques de régression, similaires aux algorithmes empiriques, mais également des méthodes de classification et d'autres approches statistiques pour modéliser la distribution et le mouvement des sédiments selon divers facteurs environnementaux.
- **Semi-empirique:** Combinant des observations empiriques avec des théories scientifiques, ces algorithmes visent à créer des modèles plus robustes. Ils peuvent partir d'un modèle théorique initial qui est ensuite ajusté ou calibré à l'aide de données empiriques pour en améliorer la précision.

Tableau 4-2 : Comparaison de différents algorithmes utilisés pour l'étude des sédiments et les caractéristiques liées à leurs développement. Avec : TSM : matière total en suspension, NDTI : Indice de Turbidité Normalisé, SSC : Concentration de Sédiments en Suspension, NIR : Proche Infrarouge, NDSSI : Indice de Sédiments en Suspension Normalisé, VRE : vegetation red edge, MCI : Indice Maximum de Chlorophylle, FUI : Forel-Ule index

N°	Algorithme	Produit	Site d'étude	Intervalle de concentration	Type d'algorithme	Précision	Référence
[1]	$TSM \left[\frac{mg}{l} \right] = \frac{R_{green} + R_{red}}{2}$	MODIS	golfe de Gabès en Tunisie	TSM : 1 à 30 mg/l	semi-empirique	R ² = 0,69	Katlane et al., 2013
[2]	$NDTI = \frac{R_{red} - R_{green}}{R_{red} + R_{green}}$	SPOT-5	étangs au Sénégal	Indice : [0,1]	empirique	/	Lacaux et al., 2007
[3]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 11,8R_{NIR} - 12,2R_{SWIR1} + 5,3 \frac{R_{NIR} + R_{red}}{R_{green} + R_{blue}} - 4,6 \frac{R_{NIR}}{R_{red}} + 2,2$	Landsat 5	fleuve Araguaia au Brésil	SSC : 4 à 220 mg/l	empirique	R ² = 0,82	Cremon et al., 2019
[4]	$NDSSI = \frac{R_{blue} - R_{NIR}}{R_{blue} + R_{NIR}}$	Landsat 7	rivières au Pakistan	Indice : [0,1]	empirique	R ² = 0,88	Shahzad et al., 2018
[5]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 22,6R_{NIR}^2 - 549,3R_{NIR} + 3616,8$	Landsat 7	rivière Padma au Bangladesh	SSC : 200 à 800 mg/l	empirique	R ² = 0,89	Rahman et al., 2021
[6]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 4,24e^{2,53 \left(\frac{R_{red} + R_{NIR}}{R_{green}} \right)}$	Landsat 8	rivière Rouge au Vietnam	SSC : 4 à 200 mg/l	empirique	R ² = 0,75	Pham et al., 2018
[7]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 673R_{red} + 8345 R_{vegetation\ red\ edge} - 11$	Sentinel 2	eaux côtières dans le delta du Yangtze en Chine	SSC : 100 à 800 mg/l	statistique	R ² = 0,98	Cai et al., 2016
[8]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 207,2 (R_{red}/R_{green})^2 - 114,8 (R_{red}/R_{green})$	Sentinel 2	grands lacs et rivières du bassin versant Yangtze en Chine	SSC : 1 à 300 mg/L	empirique	R ² = 0,88	Hou et al., 2017
[9]	$SSC_{class1} \left[\frac{mg}{l} \right] = 65R_{red} - 2,2 \frac{R_{VRE}}{R_{red}} + 4,1 \frac{R_{VRE}}{R_{red}} - 0,5, MCI \leq 0,0016$ $SSC_{class2} \left[\frac{mg}{l} \right] = -31R_{VRE} + 2,7 \frac{R_{VRE}}{R_{blue}} + 3,22, MCI > 0,0016$	Sentinel 2	estuaire du fleuve Jaune et le lac Daihai en Chine	SSC : 2 à 2300 mg/l	statistique	/	Yue et al., 2020
[10]	$SSC_{class1} \left[\frac{mg}{l} \right] = 3,3 \frac{R_{red}}{R_{green}} - 1,3e^{14,6R_{red}} + 0,2FUI; FUI \leq 14$ $SSC_{class2} \left[\frac{mg}{l} \right] = 4,7 \frac{R_{VRE}}{R_{red}} - 1,6e^{-90R_{VRE}} + 0,2FUI; FUI > 14$	Sentinel 2	fleuve Yangtze en Chine	SSC : 2 à 850 mg/l	semi-empirique	R ² = 0,79	Zhang et al., 2022
[11]	$SSC \left[\frac{mg}{l} \right] = 1,04 \frac{R_{NIR}}{R_{blue-green}} - 9,9$	Sentinel 3	estuaire de la baie de Hangzhou en Chine	SSC : 30 à 700 mg/l	empirique	R ² = 0,96	Yu et al., 2022

Le Tableau 4-2 résume une revue de la littérature visant à concentrer les résultats d'études récentes qui ont développé des algorithmes pour étudier la dynamique sédimentaire dans des masses d'eau. La recherche s'est focalisée sur les produits présentés dans le Tableau 4-1.

Les algorithmes [1] et [2] caractérisent la turbidité, tandis que les autres algorithmes ont été calibrés pour caractériser uniquement les sédiments en suspension.

Les algorithmes [2], Normalized Difference Turbidity Index (NDTI), et [4], Normalized Difference Suspended Sediment Index (NDSSI), sont des indices utilisés pour estimer respectivement la turbidité et la concentration en sédiments de manière relative et normalisée selon la surface d'application. Ces indices, tout en étant corrélés à la turbidité ou à la concentration en sédiments, ne fournissent pas de valeurs de concentration précises. Ils ont cependant pour avantage d'être faciles à implémenter et de pouvoir être plus facilement applicables et comparables entre différentes zones d'études ou différents moments (Lacaux et al., 2007; Shahzad et al., 2018). Ce qui n'est pas forcément le cas des autres algorithmes empiriques, plus complexes et souvent peu généralisables.

Les algorithmes développés à partir des images Sentinel-2 présentés ici s'appuient sur les avancées des approches antérieures, avec l'algorithme [10] représentant l'aboutissement de cette série. Les algorithmes [9] et [10] sont des approches innovantes qui ont montré des résultats satisfaisants. L'algorithme [9] intègre le calcul du « maximum de chlorophylle (MCI) » avant de choisir l'algorithme spécifique à appliquer à la zone étudiée. Bien que les sédiments et la chlorophylle soient distincts, leur relation dans leurs signatures spectrales respectives justifie leur utilisation conjointe. Le MCI se calcule à partir des bandes de réflectance dans le rouge et le proche infrarouge (Yue et al., 2020). L'algorithme [10] utilise le « Forel-Ule index (FUI) », qui influence également le choix de l'algorithme mais est aussi utilisé dans le calcul de la SSC. Le FUI, qui mesure la coloration de l'eau, est calculé en utilisant les bandes de réflectance RGB et une relation empirique, illustrant une fois de plus la relation spectrale entre la SSC et le FUI (Zhang et al., 2022).

5 Matériel et méthodes

Une méthodologie en trois étapes a été appliquée dans cette étude. Tout d'abord, une analyse du contexte hydro-climatique a été réalisée, incluant le calcul des débits des rivières Tempisque et Bebedero.

Ensuite, la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero a été caractérisée à l'aide d'images satellites. En croisant les résultats des concentrations sédimentaires dans ces rivières avec leurs débits calculés, il a été possible d'estimer la charge sédimenteuse totale transportée par celles-ci.

Enfin, une modélisation de l'érosion et du transport sédimentaire à l'échelle du bassin versant, en considérant exclusivement des processus d'érosion naturels, a été effectuée. Cette dernière étape a permis de comparer l'érosion totale dans le bassin versant, caractérisée dans les deux premières étapes, à celle causée uniquement par des processus naturels. Cela permet dès lors d'estimer l'érosion liée à des causes anthropiques et donc potentiellement attribuable au projet Arenal-PRAT.

5.1 Contexte hydro-climatique et agricole du bassin versant Tempisque-Bebedero

5.1.1 Données

UF-Hydrobase

L'analyse hydrologique de la région a été réalisée avec la base de données UF-HydroBase de l'Université de Floride, département « Agricultural and Biological Engineering ». Cette base archive des séries chronologiques de projets de terrain, incluant des données du bassin Tempisque et du parc National Palo Verde : débits et niveaux des rivières/canaux, ruissellement, eaux souterraines, propriétés du sol, qualité de l'eau, et données météorologiques et pluviométriques, couvrant 1951 à 2020.

Le Tableau 5-1 présente les stations de mesures qui ont été utilisées dans cette étude. Ici, seules des données relatives aux mesures des niveaux d'eau (TWSCA) et aux débits des rivières et canaux d'irrigation ont été exploitées (TWCA). Les données de niveau d'eau sont issues de la base de données hydrométéorologiques du Parc National Palo Verde, avec des enregistrements débutant en mai 2013 et présentant une fréquence de mesure de 15 minutes. Toutefois, aucune donnée n'a été reçue depuis juin 2019.

Les données concernant les débits des rivières, extraites sur une base quotidienne, couvrent la période de 1952 à 2012, mais aucune série temporelle n'est complète sur ces soixante années.

Enfin, les données concernant les débits des canaux d'irrigation, extraites sur une base horaire, couvrent la période 2002 à 2019 avec cependant 8 mois de données manquantes en 2015.

L'ensemble de ces données temporelles ont été traitées et qualifiées, indiquant si chaque mesure a été validée, retirée, reconstruite, etc. (UF-HydroBase, s. d.).

Tableau 5-1 : Métadonnées de stations de mesures de débit (TWCA) fournies par ICE et de niveau (TSCA) fournies par Organization from Tropical Studies (OTS) de rivières dans le bassin versant Tempisque – Bebedero

Fournisseur	ID Hydrobase	Nom local	Bassin versant	Rivière/Canal	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Elevation [m]	Couverture temporelle	Résolution temporelle
ICE	TWCA01HY	Guardia	Tempisque	Tempisque	10.565	-85.591	12.9	1952 - 2009	1j
ICE	TWCA02HY	Coyolar	Tempisque	Colorado	10.667	-85.494	76.7	1970 - 1993	1j
ICE	TWCA04HY	La Guinea	Tempisque	Tempisque	10.422	-85.498	10	1970 - 1980	1j
ICE	TWCA06HY	El Salto	Tempisque	El Salto	10.579	-85.384	105	1976 - 1993	1j
ICE	TWCA07HY	Canas	Tempisque	Las Canas	10.355	-85.569	13.5	1971 - 1975	1j
ICE	TWCA08HY	Colorado	Tempisque	Colorado	10.675	-85.483	79.5	1951 - 1970	1j
ICE	TWCA09HY	Corobici	Bebedero	Corobici	10.461	-85.132	30.5	1953 - 1994	1j
ICE	TWCA13HY	Punta de Palo	Bebedero	Blanco	10.589	-85.202	152	1976 - 1993	1j
ICE	TWCA14HY	Santa Rosa	Bebedero	Santa Rosa	10.477	-84.997	38.3	1977 - 1993	1j
ICE	TWCA15HY	Magdalena	Bebedero	Santa Rosa	10.471	-85.105	63.3	1986 - 1993	1j
ICE	TWCA16HY	Canal Sud	Bebedero	Principal Sud	10.458	-85.114	68	2002 - 2019	1h
ICE	TWCA17HY	Canal Ouest	Bebedero	Principal Ouest	10.467	-85.12	63	2002 - 2019	1h
OTS	TSCA02	Tempisque	Tempisque	Tempisque	10.324	-85.335	5	2013 - 2016	15min
OTS	TSCA08	Bebedero	Bebedero	Bebedero	10.332	-85.209	10	2013 - 2019	15min

Humanitarian Data Exchange (HDX)

Des données sur la pluviométrie ont également été utilisées dans cette étude. La base de données HDX fournit les données de précipitations cumulées des 10 derniers jours et présente l'avantage d'être mise à jour toutes les deux semaines, contrairement à Hydrobase qui contient aussi des données de précipitations mais avec des mises à jour moins fréquentes. Au total, HDX recense les données de pluviométrie de 75 sites répartis à travers tout le pays. Le Tableau 5-2 présente les stations de mesures qui ont été considérées dans cette étude.

Les estimations des précipitations dans HDX sont dérivées des observations par satellite, mais elles sont également ajustées à l'aide des données issues des pluviomètres des stations locales pour réduire les erreurs de mesure. Au total, HDX recense les données de pluviométrie de 75 sites répartis à travers tout le pays (HDX, 2024).

Tableau 5-2 : Métadonnées de stations de mesures de précipitations fournies par HDX.

Fournisseur	ID	Nom local	Bassin versant	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)	Couverture temporelle	Résolution temporelle
HDX	CR501	Liberia	Tempisque	10.622	-85.456	1984 - 2024	10j
HDX	CR503	Santa Cruz	Tempisque	10.256	-85.572	1985 - 2024	10j
HDX	CR504	Bagaces	Bebedero	10.513	-85.26	1986 - 2024	10j
HDX	CR506	Cañas	Bebedero	10.425	-85.097	1987 - 2024	10j
HDX	CR507	Abangares	Bebedero	10.525	-85.228	1988 - 2024	10j
HDX	CR508	Tilarán	Bebedero	10.462	-84.97	1989 - 2024	10j

Emplacements des stations de mesures

La Figure 5-1 illustre l'emplacement de toutes les stations de mesures utilisées pour cette analyse.

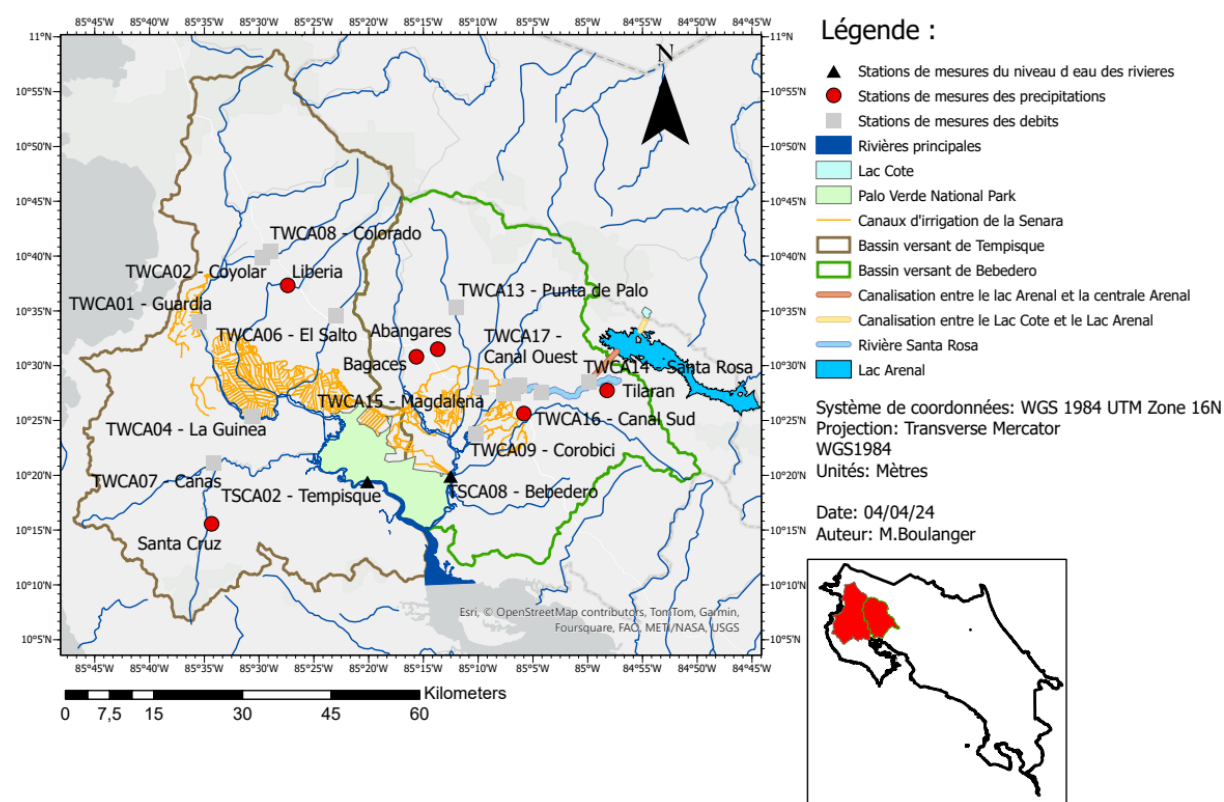


Figure 5-1 : Répartition des principales stations de mesures du niveau et du débit des rivières ainsi que des précipitations dans le bassin versant Tempisque - Bebedero

5.1.2 Calcul des débits des rivières Tempisque et Bebedero

Le principal affluent du golfe de Nicoya est la rivière Tempisque, elle-même affluent de la rivière Bebedero à environ quatre kilomètres de l'estuaire. Ces rivières sont considérées comme les principaux vecteurs de transport sédimentaire vers le golfe (Kress et al., 2002).

Comprendre l'évolution des débits de ces rivières au fil du temps est crucial pour analyser la dynamique fluviale et évaluer l'influence des processus naturels mais également les impacts du projet Arenal-PRAT sur cette dynamique. De plus, considérer ces débits près de l'embouchure est nécessaire pour estimer la charge sédimentaire totale transportée par celles-ci à partir de données de concentrations (Section 5.2.4).

Malheureusement, il n'est pas possible de mesurer directement le débit de ces rivières près de l'estuaire en raison de la forte influence des marées. Une méthode couramment utilisée pour estimer le débit d'une rivière consiste à utiliser un modèle hydrologique basé sur des données climatiques et physiques (Ávila et al., 2022). Cependant, cette solution n'est pas pertinente dans ce cas car il est supposé que les eaux usées issues de l'irrigation, en particulier en raison de la mise en place du projet Arenal – PRAT, influencent les débits de ces rivières. Nous ne connaissons ni la proportion ni le moment précis de cette influence.

La solution appliquée ici consiste à estimer les débits des rivières Tempisque et Bebedero en se basant sur les données mesurées de leur hauteur d'eau (Figure 5-1).

Séparation de la variabilité du signal générée par le débit de celle générée par les marées

Les stations de mesure TSCA02 - Tempisque et TSCA08 - Bebedero, situées respectivement à 16,9 km et 17,6 km de l'estuaire, ont enregistré les niveaux d'eau au fil du temps. Aux localisations des stations de mesure, les rivières sont influencées par les marées qui remontent du golfe. Le niveau d'eau est donc régulé par le débit de la rivière mais également par les forces astronomiques et d'autres forces externes qui modulent la variabilité des marées (Figure 5-3).

Ainsi, le niveau d'eau d'une rivière influencée par les marées peut être approximé par la superposition d'un niveau d'eau subtidal (niveau en deçà des variations du niveau dues aux marées) (ST), influencé principalement par le débit en rivière, et d'une oscillation générée par les marées et pouvant être reconstruite par une combinaison de M constituants harmoniques :

$$WL(t) = ST + \sum_{j=1}^M A_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (1)$$

Où WL est le niveau d'eau au cours du temps (t), A est l'amplitude, ω est la fréquence angulaire, et ϕ est le décalage de phase du $j^{\text{ème}}$ constituant harmonique. On peut donc approximer le niveau d'eau résultant du débit amont-aval en rivière en filtrant l'oscillation générée par les marées du signal du niveau d'eau mesurée WL.

Une étude préalable sur la rivière Tempisque a montré que les cycles de marées sont majoritairement régis par des oscillations semi-diurnes (cycle de environ 12 heures), ainsi qu'une composante diurne moins dominante (cycle de environ 24 heures) (Alonso, 2017). L'étude a aussi identifié des élévations supplémentaires avec des cycles de 6 heures et de 4 heures. Pour éliminer l'effet des marées dans le signal, il est également nécessaire de prendre en compte le cycle des marées bimensuelles, étroitement lié au cycle lunaire de 29,5 jours. Ce cycle influence l'amplitude des cycles de marées plus courts. Quand la Lune, la Terre et le Soleil sont alignés, la force gravitationnelle combinée maximise les marées de vive-eau, produisant de très hautes marées hautes et de très basses marées basses. Inversement, lorsque la Lune et le Soleil sont perpendiculaires par rapport à la Terre, l'écart entre les marées hautes et basses est réduit (Elst et al., 2016).

Il est également crucial de considérer les oscillations solaires annuelles (période d'environ 12 mois) et semestrielles (période d'environ 6 mois), qui influencent les amplitudes des marées. Ces oscillations découlent de l'inclinaison de l'axe terrestre ($23,5^\circ$) et des variations de la distance Terre-Soleil dues à l'orbite légèrement elliptique de la Terre, modifiant ainsi les interactions gravitationnelles entre la Terre et le Soleil tout au long de l'année.

Une autre manière d'illustrer ces effets est d'appliquer, une transformée de Fourier rapide aux données de niveau d'eau, permettant d'identifier les fréquences présentes dans le signal. La Figure 5-2 montre un pic principal correspondant à l'oscillation semi-diurne, ainsi que d'autres pics de moindre amplitude associés aux cycles diurnes, de 4 heures et de 6 heures. Des périodicités significatives autour de 360 et 720 heures sont également observées, correspondant aux cycles des marées bimensuelles. Des pics sont également identifiés autour des périodes de 4380 heures et 8360 heures, correspondant aux oscillations solaires semestrielles et annuelles.

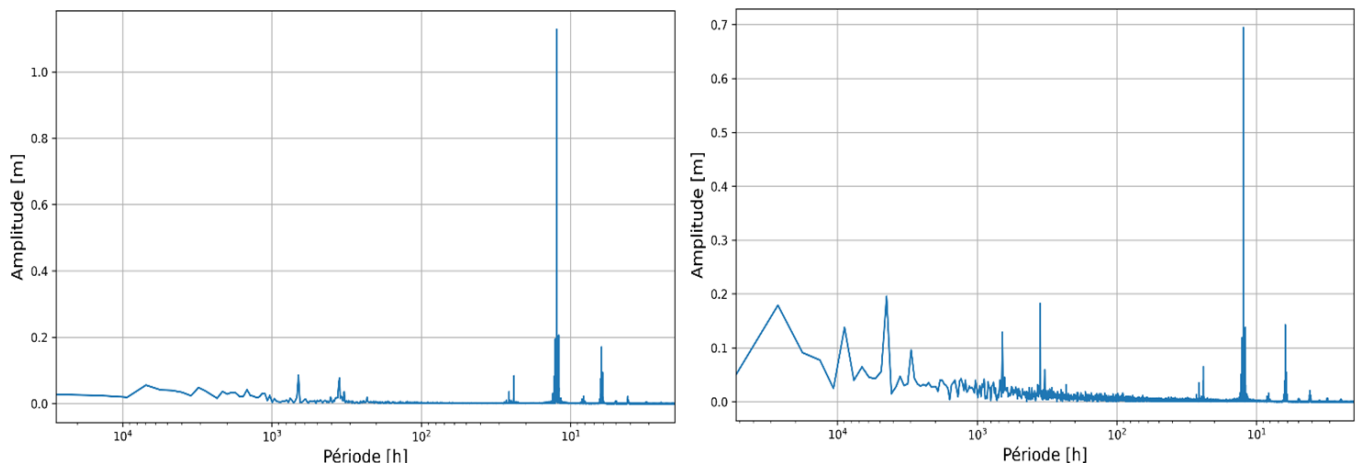


Figure 5-2 : Décomposition de Fourier rapide du niveau d'eau mesuré de la rivière Tempisque (gauche) et Bebedero (droite)

Deux opérations ont été conduites successivement sur les séries temporelles du niveau d'eau WL afin d'obtenir ST.

1. L'application d'une moyenne mobile avec une fenêtre de 30 jours pour éliminer les oscillations de période inférieure à 30 jours
2. La soustraction des oscillations solaires annuelles et semestrielles pour reconstruire les signaux des niveaux d'eau influencés uniquement par les forces externes. Ces oscillations ont déjà été reconstituées pour la rivière Tempisque à partir d'une analyse de l'amplitude et de la phase des constituants harmoniques, en utilisant le logiciel UTide Matlab (Alonso, 2017; Whitney & Codiga, 2011). On suppose que le niveau d'eau de Bebedero est influencé par les mêmes oscillations, avec des amplitudes et des déphasages similaires, hypothèse justifiable par la proximité géographique, la distance par rapport à l'estuaire, et les conditions environnementales similaires affectant les deux rivières. Toutefois, les différences dans les caractéristiques hydrodynamiques des deux rivières, telles que la profondeur, la largeur, la pente et le débit, peuvent introduire des variations dans les signaux des oscillations solaires. (Khojasteh et al., 2021)

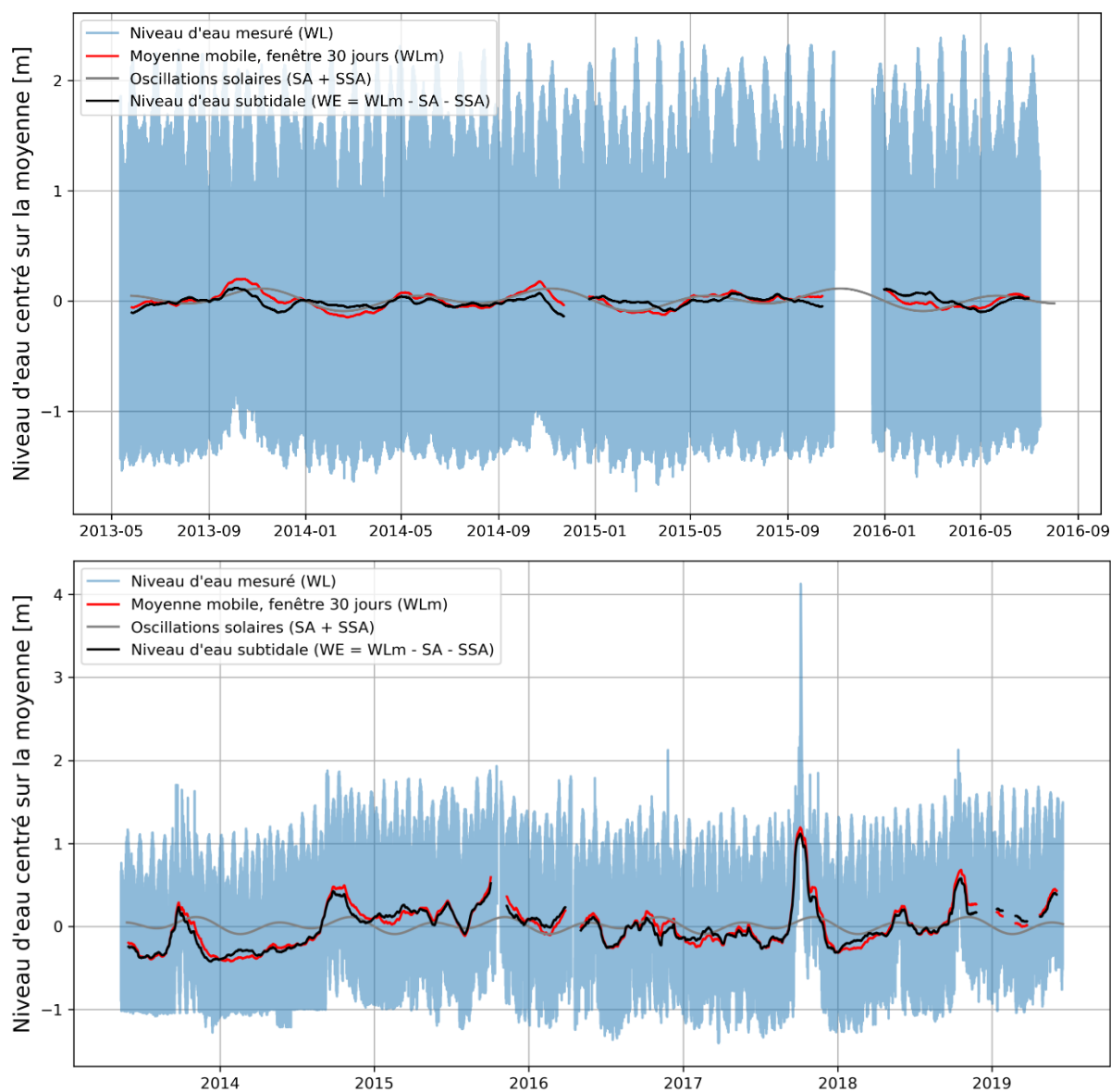


Figure 5-3 : Séries temporelles du niveau d'eau mesuré de la rivière Tempisque (haut) et Bebedero (bas) (WL), du niveau d'eau après l'application d'un lissage par moyenne mobile sur une période glissante de 30 jours (WLM), des oscillations solaires annuelle et semi-annuelle (SA+SSA) et du niveau d'eau subtidale (ST = WLM-SA-SSA)

Comme illustré par la Figure 5-3, une fois nettoyé de l'effet des marées, le niveau d'eau des rivières révèle des fluctuations saisonnières.

Relation entre hauteur d'eau et débit

Il s'agit maintenant d'estimer le débit à partir des données de hauteur d'eau desquelles la variabilité induite par l'influence des marées a été soustraite.

La formule de Manning-Strickler est une approche empirique fréquemment utilisée pour calculer la vitesse moyenne de l'écoulement d'un fluide en surface libre à partir de la hauteur d'eau (Dabrowski, 2014). À partir de cette vitesse, il est possible d'estimer le débit de la rivière en multipliant cette vitesse par la section transversale du cours d'eau.

$$Q = \frac{1}{n} A R^{2/3} S^{1/2} \quad (2)$$

Où Q [m³/s] est le débit de la rivière, n est le coefficient de Manning qui dépend de la rugosité de la surface du canal, A [m²] est l'aire de la section transversale mouillée, R [m] est le rayon hydraulique qui est le rapport de l'aire mouillée sur le périmètre mouillé) et S [-] est la pente hydraulique.

Ici, il sera considéré que la hauteur d'eau est la seule variable qui correspond aux données enregistrées par les stations de mesures. Cette variable influence la valeur des paramètres A et R . Selon l'approximation que la section transversale de la rivière est rectangulaire, on a :

$$A = l h \quad (3)$$

$$R = \frac{l h}{2l + 2h} \quad (4)$$

Où l [m] est la largeur de la rivière et h [m] la hauteur d'eau. On a dès lors :

$$Q(h) = \frac{1}{n} w h \left(\frac{w h}{2w + 2h} \right)^{2/3} S^{1/2} \quad (5)$$

Le coefficient de Manning (n) a été établi à 0,049 selon la table des coefficients de rugosité de Chow, ce qui correspond à un lit composé de roches fines et de végétation modérée (Chow, 1959). La largeur moyenne de la rivière Tempisque au niveau de la station de mesure est de 229 mètres, tandis que celle du Bebedero est de 56 mètres. La pente des rivières est très faible, mesurée à 0,7 m/km pour le Tempisque et 1,1 m/km pour le Bebedero. Ces valeurs ont été déterminées à partir de mesures altimétriques disponibles sur Google Earth, avec une précision de $\pm 0,5$ m, et espacées de 13 km pour compenser l'imprécision des mesures altimétriques. Ces données altimétriques proviennent de la mission spatiale SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), qui a collecté ces données d'altitude avec des antennes radar sur l'ensemble du globe en 2009 (Farr et al., 2007).

Incertitudes liés à l'utilisation de la formule de Manning-Strickler

L'incertitude sur les données de débit a été estimée selon la théorie de la propagation des incertitudes qui prend en compte les erreurs potentielles dues à l'imprécision des instruments de mesure ou au choix des constantes (Damasceno & Couto, 2018).

Dans l'application de l'équation de Manning-Strickler (5), pour laquelle des décisions ont été prises concernant la détermination du coefficient de Manning (n), de la pente hydraulique (S), de la largeur de la rivière (l) et du niveau d'eau (h), la formule de la propagation des incertitudes se compose tel que défini dans l'Equation 6 :

$$\sigma_Q(h) = \sqrt{\left(\frac{dQ}{dn}\sigma_n\right)^2 + \left(\frac{dQ}{dS}\sigma_S\right)^2 + \left(\frac{dQ}{dh}\sigma_h\right)^2 + \left(\frac{dQ}{dl}\sigma_l\right)^2} \quad (6)$$

Où σ représente l'incertitude standard de chaque variable, et σ_Q l'incertitude totale associée au débit. Ces incertitudes sont multipliées par les dérivées partielles de la fonction Q par rapport aux variables en question, tous les autres paramètres (sauf h) étant considérés constant en utilisant les valeurs associés à l'Equation 5. Ainsi, par exemple après avoir calculé $\frac{dQ}{dn}$, une fonction dépendant de n et de h est obtenue. La valeur de n est alors remplacée par sa moyenne utilisée dans l'Equation 5, tandis que h représente la variable hauteur d'eau. Une fois l'incertitude σ_Q calculée, nous avons un intervalle $Q(h) \pm \sigma_Q(h)$, où Q et σ_Q dépendent de la hauteur d'eau.

Hypothèse concernant la section transversale de la rivière

Notons qu'une source d'incertitude qui n'a pas été considérée ici est que la section transversale mouillée des rivières est supposée rectangulaire. Toutefois, il est plus réaliste de s'attendre à une forme trapézoïdale ou en U.

Coefficient de Manning, $\frac{dQ}{dn}\sigma_n$

Selon le tableau de Chow, pour un chenal dont le lit est constitué de broussailles moyennes à denses et d'arbres — un environnement typique des berges des rivières Tempisque et Bebedero — le coefficient de rugosité (n) varie entre 0,058 et 0,040 (Elmoaty & Elsamman, 2020).

Ainsi, selon la théorie de la propagation des incertitudes (Damasceno & Couto, 2018), on calcule:

$$\sigma_n = \frac{n_{max} - n_{min}}{2} = \frac{0,058 - 0,040}{2} = 0,009 \quad (7)$$

et $\frac{dQ}{dn}$ est la dérivée partielle du débit par rapport à ce coefficient.

Pente de la rivière, $\frac{dQ}{dS}\sigma_S$

Pour les pentes (S) des rivières Tempisque et Bebedero, elles ont été estimées en utilisant deux points d'élévation ($e1$ et $e2$), pour chaque rivière, séparés par une distance d . Ainsi, la pente (S) se calcule par:

$$S = \frac{e1 - e2}{d} \quad (8)$$

La distance d est considérée comme exacte car mesurée avec une précision de l'ordre du centimètre sur une distance de 13 kilomètres. L'incertitude associée à cette mesure est donc considérée ici comme nulle. Les mesures d'élévation, prises directement sur Google Earth, ont une précision de l'ordre du mètre, $\sigma_{e1} = 0,5 \text{ m}$ et $\sigma_{e2} = 0,5 \text{ m}$, ce qui donne :

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{e1}^2 + \sigma_{e2}^2} \quad (9)$$

En considérant l'incertitude associé à d comme nulle et que les hauteurs $e1$ et $e2$ sont liées par une différence, cela conduit à une incertitude absolue (Damasceno & Couto, 2018) :

$$\frac{\sigma_S}{S} = \frac{\sigma_e}{e1 - e2} \quad (10)$$

Cela permet de déduire σ_S et de calculer la dérivée partielle liée à la pente, afin de connaître la contribution de l'incertitude liée à la pente sur l'incertitude totale du débit.

Mesure du niveau d'eau, $\frac{dQ}{dh} \sigma_h$

Les données de mesure du niveau d'eau ont été prises avec un capteur de pression submersible, placé dans le lit de la rivière à une certaine profondeur. Cet instrument mesure la pression totale exercée par la colonne d'eau au-dessus, ainsi que la pression atmosphérique. Afin d'obtenir le niveau d'eau précis, il est nécessaire de corriger ces mesures avec les données fournies par un barologger situé à la station météorologique locale, qui mesure exclusivement la pression atmosphérique (Solinst, s. d.).

L'incertitude liée à l'utilisation de cet instrument peut être estimée en multipliant la plage de mesure (30 m) par la précision de l'instrument (0,05%), soit 0,015.

Notons qu'indépendamment de l'incertitude liée à l'instrument, il existe également une incertitude liée à :

1. L'approximation de la hauteur du capteur par rapport au lit de la rivière ;
2. Le niveau du lit de la rivière lui-même, qui peut varier en fonction de sa nature sédimenteuse.

Ces sources d'incertitude n'ont pas été considérées.

Largeur de la rivière, $\frac{dQ}{dl} \sigma_l$

La largeur de la rivière a également été mesurée directement via Google Earth, avec une précision de l'ordre du centimètre. Cependant, l'incertitude principale provient du fait que, bien que considérée comme constante dans la formule de Manning, la largeur de la rivière fluctue tout au long de l'année. Pour la rivière Tempisque, au niveau de la station de mesure, la largeur a été estimée avec une variation annuelle de $\pm 4,5$ m par rapport à la mesure moyenne de 229 m utilisée dans la formule de Manning. Cette estimation est basée sur différentes images satellites prises au cours de l'année. Pour la rivière Bebedero, la variation de la largeur a été estimée à $\pm 2,5$ m autour d'une largeur moyenne de 56 m.

5.2 Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero

Dans cette section, une méthodologie en deux étapes a été appliquée conformément à l'objectif 2. Dans un premier temps, l'analyse s'est concentrée sur la caractérisation de la dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya. Dans un second temps, l'attention s'est portée sur les rivières Tempisque et Bebedero, où les séries temporelles des concentrations en sédiments ont été reconstruites et croisées avec les débits des rivières pour estimer la charge sédimentaire totale transportée.

L'ensemble des analyses a été réalisé à partir d'images satellites traitées via Google Earth Engine. Les étapes de prétraitement des images, nécessaires à l'utilisation de ces images satellites, sont communes aux deux phases de l'étude.

5.2.1 Google Earth Engine

Pour l'analyse des données géospatiales et le traitement des images dans ce mémoire, Google Earth Engine (GEE) a été utilisé. Cette plateforme repose sur une infrastructure de cloud computing développée par Google, ce qui permet de traiter efficacement de vastes ensembles de données géospatiales. Les images satellites, qui constituent les sources de données primordiales, facilitent la compréhension de divers phénomènes et processus terrestres. L'utilisation de GEE exploite cette capacité de traitement avancée pour analyser des volumes importants de données, augmentant ainsi la précision et l'efficacité de notre recherche. (Google Earth Engine, s. d.-b)

5.2.2 Imagerie satellite

Les images satellites ont été la principale source de données utilisées pour atteindre l'objectif 2 de cette étude. Toutes les images disponibles couvrant la zone d'étude des satellites Landsat 5, 7, 8, et 9, ainsi que celles de Sentinel 2, ont été examinées.

Comme l'illustre la Figure 5-4, les missions Landsat fournissent des images depuis 40 ans de l'intégralité de la surface terrestre. La mission Sentinel 2 est plus récente, ayant été lancée en 2015.

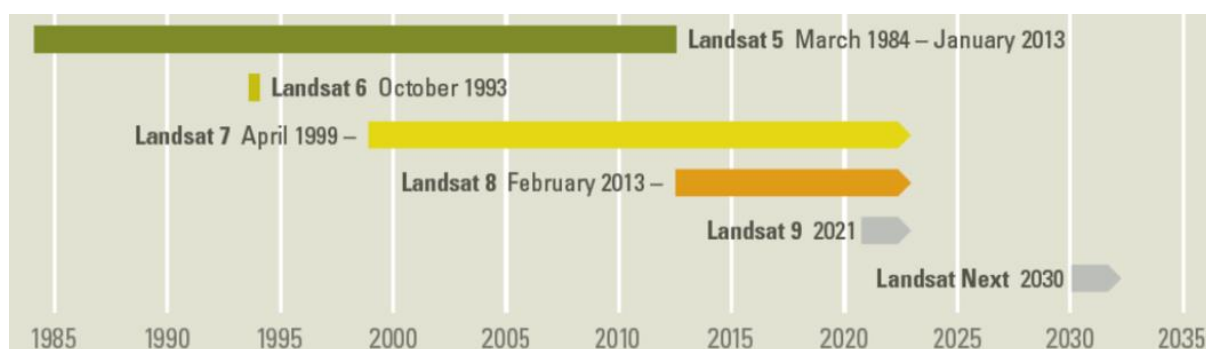


Figure 5-4 : Couverture temporelle des missions de Landsat 5, 6, 7, 8 et 9

Landsat 5

Les images utilisées dans cette analyse proviennent de la Collection 2 de Landsat 5. Ces données sont des réflectances mesurées au sommet de l'atmosphère (TOA) et correspondent à des images de niveau 1, qui ont subi une calibration radiométrique et une correction géométrique. Ces corrections utilisent des points de contrôle au sol (GCP) et des modèles d'élévation numérique (DEM) pour compenser les déformations liées au relief. Il est important de souligner que, bien que ces images aient été ajustées pour les distorsions géométriques, elles ne bénéficient pas d'une correction atmosphérique (Earth Resources Observation And Science (EROS) Center, 2020).

Le capteur Thematic Mapper (TM) employé pour ces images offre une résolution spatiale de 30 mètres. La fréquence de capture des images, ou résolution temporelle, est de 16 jours.

Landsat 7

Landsat 7, également inclus dans la Collection 2, suit des normes de traitement similaires à celles de Landsat 5, incluant des corrections géométriques mais sans corrections atmosphériques. Son capteur, l'Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), fournit une qualité d'image supérieure. Toutefois, bien que la résolution temporelle soit identique à celle de Landsat 5, soit de 16 jours, Landsat 7 est affecté par l'anomalie SLC-off depuis mai 2003. Cette anomalie entraîne des bandes manquantes dans les images, ce qui signifie que les images prises après mai 2003 n'ont pas pu être utilisées dans cette étude (USGS, 2022, p. 7). La résolution spatiale des bandes utilisées reste de 30 mètres, identique à celle de Landsat 5.

Landsat 8

La collection d'images utilisée ici de Landsat 8 adhère également aux standards de la Collection 2, comprenant la calibration radiométrique et la correction géométrique, mais sans correction atmosphérique. Avec l'introduction du capteur Operational Land Imager (OLI) et du Thermal Infrared Sensor (TIRS), Landsat 8 présente une amélioration notable de la qualité d'image et de la précision des données. La résolution spatiale et temporelle reste similaire à celle de Landsat 5 et 7.

Landsat 9

Landsat 9 se différencie de Landsat 8 principalement par l'introduction des capteurs améliorés OLI-2 et TIRS-2, qui fournissent une qualité de données supérieure par rapport à leurs prédécesseurs OLI et TIRS utilisés dans Landsat 8 (USGS, 2024).

Sentinel 2

La mission Copernicus Sentinel-2 comprend les satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B, lancés respectivement en 2015 et 2017. Étant donné que toutes les images Sentinel-2 disponibles sont utilisées dans cette étude, il y a environ deux fois moins d'images disponibles en 2015, 2016 et début 2017. Cette mission utilise l'instrument MultiSpectral Instrument (MSI) pour une imagerie multispectrale de haute précision, offrant des résolutions spatiales jusqu'à 10 m et une fréquence de revisite de 2 à 3 jours aux latitudes moyennes, comme au Costa Rica.

Pour cette étude, deux collections de Sentinel-2 ont été fusionnées : « COPENICUS/S2 » et « COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED ». La principale différence entre ces deux collections est que la première est de niveau-1C, ce qui correspond principalement à des données au sommet de l'atmosphère (TOA) réfléchissantes, tandis que la seconde offre des images de niveau-2A, qui sont des données corrigées de l'atmosphère (surface reflectance) et qui ont été harmonisées pour maintenir une cohérence entre les images acquises (EOS Data Analytics, 2021).

5.2.3 Pré-traitement d'images

La Figure 5-5 illustre le processus de prétraitement appliqué aux différentes collections d'images utilisées dans cette étude

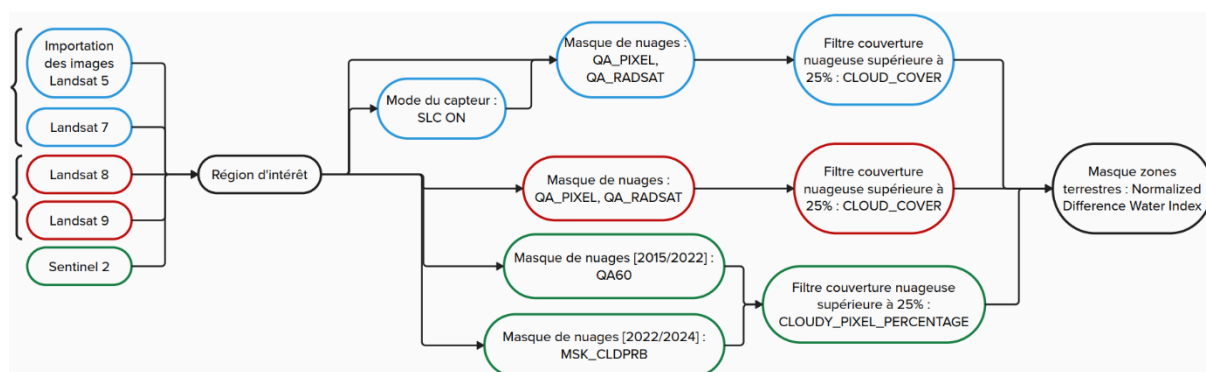


Figure 5-5 : Etapes de pré-traitement - le code couleur correspond aux étapes appliquées aux différentes collections. Les étapes en noir sont communes à toutes les collections

Après leur importation, les images sont classées en collections en fonction des missions satellites d'origine. En raison des similarités mentionnées précédemment, les images de Landsat 5 et 7 sont regroupées ensemble, tout comme celles de Landsat 8 et 9.

Pour atteindre l'objectif 2 de cette recherche, les images sont ensuite découpées spécifiquement pour cibler la région d'intérêt, à savoir le golfe de Nicoya, en particulier au niveau de l'estuaire de la rivière Tempisque et certaines portions des rivières Tempisque ou Bebedero.

Landsat 5 et 7

Les images de Landsat 7 affectées par la désactivation du Scan Line Corrector (SLC) ont été exclues de la collection. Le SLC, un élément du capteur Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) de Landsat 7, corrige les distorsions géométriques causées par le mouvement latéral du satellite. Suite à sa défaillance en mai 2003, des bandes alternées sans données ont commencé à apparaître dans les images. Comme le montre la Figure 5-6, ces lacunes rendent les images concernées inutilisables pour notre étude. (USGS, 2022, p. 7)



Figure 5-6 : Image du golf de Nicoya prise par Landsat 7 datant de novembre 2009 avec le SLC désactivé

Ensuite, les nuages et les ombres associées dans la zone étudiée ont été masqués grâce à la bande de qualité (QA_PIXEL). Dans cette bande, les nuages sont identifiés par le bit 5, tandis que les ombres des nuages sont marquées par le bit 3. La bande QA_RADSAT est utilisée pour identifier et masquer les pixels affectés par la saturation radiométrique, un phénomène se produisant lorsque l'intensité de la lumière incidente dépasse la capacité de mesure du capteur (Knudby, 2021).

Les images présentant une couverture nuageuse supérieure à 25% sont également exclues de la collection. Pour Landsat 5 et 7, cette information provient de la métadonnée 'CLOUD_COVER', calculée à l'aide de l'algorithme CFMask et intégrée aux métadonnées de l'image (USGS, s. d.).

Enfin, un dernier filtre est appliqué pour isoler uniquement les zones aquatiques. Le Normalized Difference Water Index (NDWI) est calculé à partir des bandes spectrales verte et proche infrarouge pour détecter ces zones. Les zones aquatiques présentent une faible réflectance dans le proche infrarouge et une forte réflectance dans le vert, caractéristiques qui sont accentuées par un NDWI élevé. Ainsi, une valeur seuil de NDWI est définie pour distinguer les zones aquatiques des autres types de couverture terrestre.

$$NDWI = \frac{R_{green} - R_{NIR}}{R_{green} + R_{NIR}} \quad (11)$$

Landsat 8 et 9

Pour les missions Landsat 8 et 9, le processus de prétraitement est similaire à celui appliqué aux missions Landsat 5 et 7, mais sans les problèmes liés SLC et avec une légère modification de la valeur seuil du NDWI.

Pour les missions Landsat 8 et 9, le prétraitement est similaire à celui des Landsat 5 et 7, sans les problèmes de SLC et avec une légère modification de la valeur seuil pour le NDWI.

Sentinel-2

Pour Sentinel-2, le traitement des nuages et de leurs ombres diffère de celui des missions Landsat. Jusqu'au début de 2022, la bande QA_60 est utilisée pour cette tâche. Cette bande fonctionne de manière similaire à la bande de qualité des images Landsat, mais elle utilise les 10e et 11e bits pour identifier et exclure les pixels nuageux et ombragés. Toutefois, pour les deux dernières années, la bande QA60 ne contient plus de données.

Pour pallier ce manque, les utilisateurs de Google Earth Engine optent pour la collection « COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED », qui inclut la bande « MSK_CLDPRB ». Cette bande mesure la probabilité que chaque pixel soit couvert par des nuages. Les pixels présentant une probabilité de nuage supérieure à un seuil fixé (ici, plus de 1%) sont filtrés. Ces données sont précalculées par des algorithmes de détection des nuages qui exploitent les signatures spectrales distinctes des nuages, permettant ainsi une identification précise et fiable des couvertures nuageuses.

5.2.4 Traitement d'images

Une méthodologie en deux étapes a été mise en œuvre dans cette section. Tout d'abord, l'attention a été portée exclusivement sur le golfe de Nicoya afin de caractériser la dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments. Ensuite, l'analyse s'est concentrée sur les rivières Tempisque et Bebedero pour reconstruire les séries temporelles des concentrations en sédiments.



Figure 5-7 : images brutes Sentinel 2 de l'embouchure de la rivière Tempisque dans le golfe de Nicoya.

Comme illustré par la Figure 5-7 des tâches de sédiments sont visibles dans le golfe mais moins perceptibles dans la rivière Tempisque, en raison de concentrations en sédiments généralement plus élevées dans les rivières que dans le golfe tout au long de l'année. Cette observation a guidé l'approche méthodologique en deux temps.

Pour caractériser la dynamique sédimenteuse dans un golfe et des rivières à partir d'images satellites, une méthode couramment utilisée consiste à appliquer des algorithmes basés sur les bandes de réflectance dans le visible et le proche infrarouge pour calculer les concentrations en sédiments dans l'eau. L'usage d'algorithmes exploitant des combinaisons de bandes ou des rapports de bandes offre plusieurs avantages par rapport à l'utilisation d'une seule bande :

- Réduction des interférences de substances telles que la chlorophylle dans le calcul des concentrations en sédiments (Han & Du, 2021).
- Sensibilité accrue et obtention d'informations plus détaillées (James, 2001).
- Meilleure corrélation avec les mesures in situ (James, 2001).

Cependant, des erreurs peuvent survenir avec ces méthodes. La précision dépend fortement de la qualité des données d'entrée et il est crucial de noter que les algorithmes utilisés ont été calibrés sur d'autres zones d'étude, ce qui pourrait affecter la précision des résultats en raison des variations des conditions atmosphériques, environnementales et des concentrations sédimentaires réelles.

Les algorithmes sélectionnés sont adaptés aux conditions locales en termes de concentrations sédimenteuses et climatiques. Les algorithmes spécifiques utilisés incluent l'algorithme [3] pour Landsat 5 et 7, l'algorithme [6] pour Landsat 8 et 9, et l'algorithme [8] pour Sentinel 2. Ces algorithmes sont présentés dans le Tableau 4-2 (Section 4.2.2).

Dynamique du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya

La Figure 5-8 illustre les résultats obtenus après l'application d'algorithmes de calcul de concentrations en sédiments sur des images de Sentinel-2, Landsat 8, et Landsat 5.

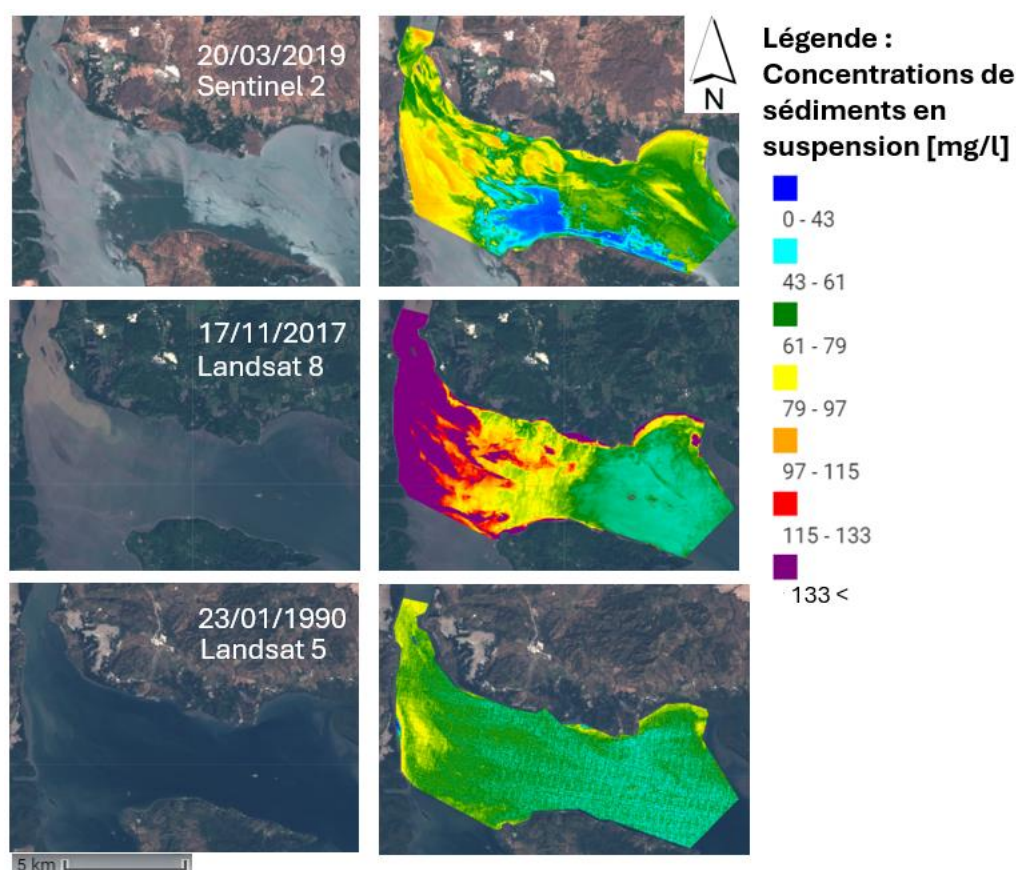


Figure 5-8 : Résultats de l'application d'algorithmes de calcul de concentrations en sédiments (SSC [mg/l]) sur trois images du golfe de Nicoya (Landsat 5 : algorithme [3], Landsat 8 : algorithme [6], Sentinel 2 : algorithme [8]).

Typiquement, des concentrations plus élevées de sédiments sont détectées dans les zones où ils semblent être abondants. Cependant, il est important de noter que les valeurs de concentration obtenues sont fournies à titre indicatif. Les corrections radiométriques et éventuellement atmosphériques, varient entre les différentes collections.

De plus, la sensibilité des capteurs et la précision des données diffèrent selon les collections utilisées. Les résultats issus des images de Landsat 5 tendent à être moins précis, ce qui peut être attribué à la qualité inférieure des données de ce satellite, qui est le plus ancien des trois.

Clustering – caractérisation temporelle

Pour standardiser les résultats et permettre des comparaisons entre différentes collections d'images, un clustering des pixels (classification) était nécessaire. Chaque pixel de chaque image a été classifié dans l'une des deux catégories suivantes : sédiments ou eau claire.

Le choix s'est porté sur l'utilisation d'un clustering K-means utilisant l'algorithme Weka, avec la bande SSC (Suspended Sediment Concentration) préalablement calculée comme base de données. L'algorithme K-means segmente les données en `k` groupes distincts (ici, deux : sédiments et eau claire), en attribuant chaque point de données au groupe dont le centre (ou la moyenne) est le plus proche. Le processus commence par la sélection aléatoire de `k` centres de cluster, réaffecte les points au cluster le plus proche, et recalcule les centres en fonction des points attribués. Cette itération continue jusqu'à ce que les centres se stabilisent, résultant en une segmentation efficace des données basée sur la similarité (Google Earth Engine, s. d.-a).

Pour entraîner le clustering K-means, une image composite a été créée par la médiane des valeurs de la bande SSC pour chaque pixel à travers toutes les images de la collection. Cette méthode vise à minimiser le bruit et les perturbations en réduisant l'impact des valeurs aberrantes, offrant ainsi une représentation plus stable et fidèle de la surface terrestre. Cette approche augmente la généralisabilité des résultats du clustering, améliorant la fiabilité de la classification entre les catégories sédiments et eau claire (Digital Earth Africa, 2021).

Les tâches de sédiments sont discernables dans les bandes du spectre visible des images de différentes collections, permettant d'évaluer l'efficacité du clustering en comparant avec les images originales. Des tests effectués avec les valeurs de la bande SSC ont montré que l'utilisation de l'image composite pour le clustering produisait des résultats supérieurs par rapport à un clustering réalisé image par image. Cette méthode composite atténue l'impact des variations propres à chaque image, améliorant ainsi la généralisabilité et la précision du clustering.

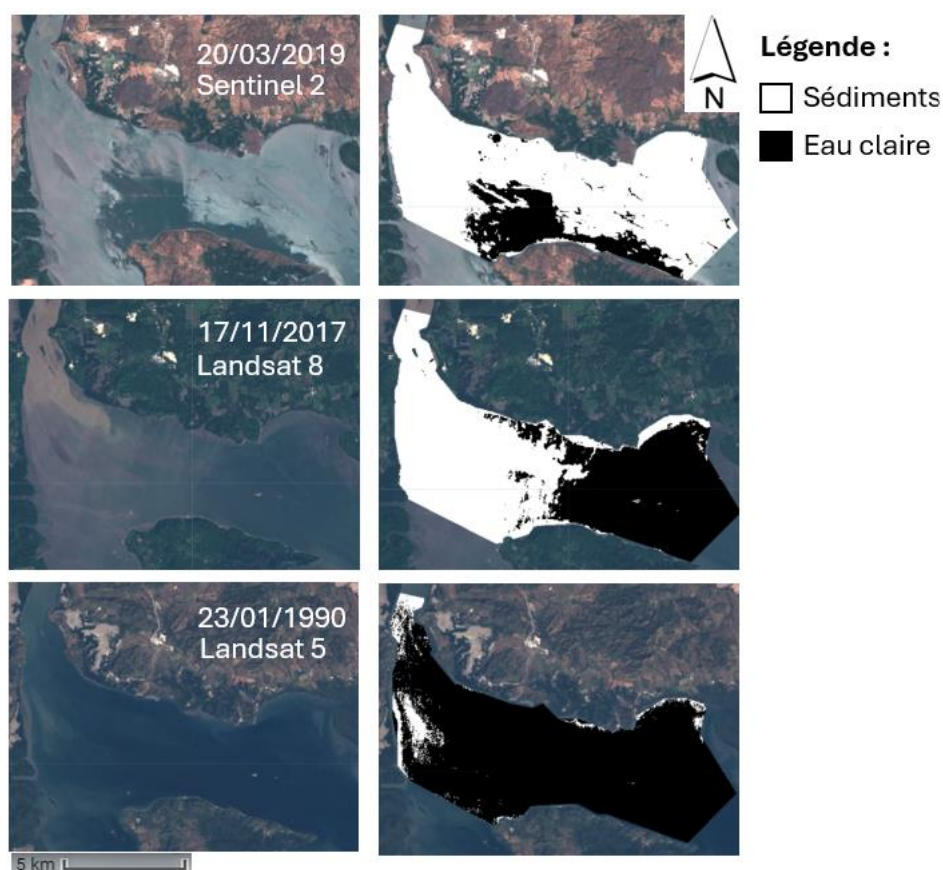


Figure 5-9 : Résultats du clustering appliqué sur trois images du golfe de Nicoya provenant des missions Landsat 5, 8 et Sentinel 2 sur base des résultats du calcul des concentrations en sédiments (SSC [mg/l]) à partir d'algorithme.

La Figure 5-9 illustre les résultats obtenus après l'application du clustering K-means, entraîné sur les résultats de calcul des concentrations en sédiments (SSC [mg/l]) obtenus à partir des algorithmes utilisés ([3], [6], [8] Tableau 4-1).

Images composite – caractérisation spatio-temporelle

Cette partie de l'étude se concentre sur l'analyse de la dynamique spatio-temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya. Les objectifs principaux sont d'identifier l'origine de la charge sédimenteuse et d'évaluer la vitesse de dispersion du panache.

Pour atteindre ces objectifs, des images composites mensuelles ont été élaborées en utilisant les données issues du clustering. Chaque image composite est constituée en calculant la moyenne des valeurs de chaque pixel dans la bande de clustering pour toutes les images prises durant le mois concerné. Par exemple, si un pixel est classifié comme sédiments 60% du temps durant le mois de septembre, ce pixel se verra attribuer une valeur de 0,6 dans l'image composite mensuelle pour septembre. Ce processus génère douze images composites mensuelles, une pour chaque mois de l'année.

Dynamique de la concentration en sédiments dans les rivières Tempisque et Bebedero

Pour analyser la dynamique de la concentration en sédiments dans les rivières Tempisque et Bebedero, des polygones ont été délimités près des stations de mesure du niveau d'eau. À l'intérieur de chaque polygone, la concentration en sédiments a été calculée pour tous les pixels de chaque image disponible. Pour construire des séries temporelles qui reflètent fidèlement la dynamique des concentrations sédimentaires, seule la médiane des concentrations calculées a été conservée pour chaque image. Cette préférence pour la médiane plutôt que pour la moyenne vise à réduire l'impact des valeurs aberrantes, comme celles issues de pixels nuageux non filtrés.

Pour cette étude, uniquement les images de Sentinel 2 ont été utilisées, en appliquant l'algorithme [8] (Tableau 4-1), car les variations entre les missions en termes de capteurs, de corrections appliquées et d'algorithmes rendent les comparaisons difficiles. De plus, la résolution spatiale des images Landsat étant de 30 m et la largeur de la rivière Bebedero au niveau des stations de mesure étant d'environ 55 m, l'utilisation des images Landsat est compliquée par les effets de bord, où les pixels peuvent contenir à la fois de l'eau et du terrain.

Il est important de noter que cette analyse se concentre uniquement sur l'examen des dynamiques interannuelles et intra-annuelles des concentrations en sédiments, ainsi que sur l'identification de toute saisonnalité ou tendance visible à travers les images. Étant donné que la majorité des images de Sentinel 2 n'ont pas subi de corrections atmosphériques et qu'aucune mesure de concentration in situ n'a été réalisée, la précision absolue des valeurs calculées ne peut être garantie.

Pour faciliter l'interprétation des données de concentrations sédimentaires, qui sont irrégulièrement espacées dans le temps, une méthode de moyenne mobile pondérée a été employée (Figure 6-12, Figure 6-14). Cette technique consiste à regrouper les données par périodes de 30 jours et à calculer pour chaque groupe une moyenne où chaque donnée est pondérée par une fonction exponentielle décroissante basée sur sa distance temporelle par rapport à la date centrale du groupe. Cette méthode permet de lisser les concentrations en sédiments, tout en tenant compte de l'espacement irrégulier des données.

L'estimation des concentrations en sédiments dans les polygones tracés près des stations de mesure du niveau d'eau permet également d'estimer la charge en sédiments transportée par les rivières, en utilisant l'équation suivante:

$$\begin{aligned} \text{Charge en sédiments [mg/s]} \\ = \text{Concentrations en sédiments [mg/m}^3\text{]} \times \text{Débit [m}^3\text{/s]} \end{aligned} \quad (12)$$

Cette approche offre un moyen efficace de lier la charge sédimentaire aux fluctuations du débit des rivières, examinées précédemment dans la Section 5.1.2.

5.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant

5.3.1 Calcul de l'érosion à l'échelle du bassin versant Tempisque-Bebedero

Cette section a pour but de reconstruire le profil érosif du bassin versant Tempisque-Bebedero dans le cas hypothétique où le projet Arenal-PRAT était inexistant à l'exception de l'assolement des terres qui résultent de ce projet. L'érosion a été évaluée en utilisant l'équation universelle de perte de sol (USLE):

$$A[kg/ha/j] = 2,24 R K L S C P \quad (13)$$

où A représente la perte annuelle de sol par hectare, et les facteurs sont définis comme suit:

- R [$\frac{MJ\ mm}{ha\ j\ h}$] (Érosivité de la pluie) : ce facteur estime l'érosion potentielle liée à la distribution des précipitations. Il est calculé en multipliant les données de précipitations (Section 5.1.1) par un coefficient d'intensité érosive de la pluie, fixé ici à 0,3.
- K [$\frac{t\ ha\ h}{ha\ MJ\ mm}$] (Érodibilité du sol): ce facteur est basé sur la répartition des principaux types de sols dans le bassin versant (Guzmán Arias & Calvo-Alvarado, 2012) et leur coefficient d'érodibilité correspondant (Stone, 2000) (Tableau B-1).
- LS [-] (Longueur et pente) : Valeur fixée à 4, déterminée à partir d'une étude géomorphologique du bassin (Transect of the Americas, 2015).
- C [-] (Couverture végétale et gestion) : Calculé en fonction de la répartition des usages des sols au cours de l'année (Tableau B-2), avec des variations saisonnières (Jiménez et al., 2005; Senara, 2024). Par exemple, plus de sols agricoles sont laissés nus durant la saison sèche, augmentant l'érosion. Les valeurs C varient avec la végétation, plus abondante durant la saison des pluies, ce qui aide à retenir l'eau et stabiliser les sols (Mancino et al., 2016) (Tableau B-3).
- P [-] (Pratiques de conservation des sols) : Déterminé en fonction des usages des sols et estimé selon les pratiques de conservation documentées par (USDA, 2024) (Tableau B-4).

Ratio d'apport de sédiments (SDR)

Le ratio d'apport de sédiments (SDR) est un paramètre clé pour évaluer la proportion des sols érodés calculés par l'USLE qui parviennent effectivement au point de sortie d'un bassin versant. Dans l'étude (Mancino et al., 2016), ce taux a été estimé à 10,5%. Étant donné les nombreuses similarités en termes d'utilisation des sols (répartition pratiquement identique à la seule différence majeure que la zone d'étude de Mancino ne contient ni zone humide ni mangroves), de types de sols et de reliefs (relativement plat) entre le bassin versant étudié par Mancino et le bassin versant Tempisque-Bebedero, un SDR similaire a été adopté pour cette analyse.

Modèle de fonction de transfert

Il y a un décalage temporel entre l'érosion des sols et l'arrivée des sédiments dans les cours d'eau du bassin versant. Pour modéliser ce décalage, deux fonctions de transfert en série ont été utilisées. Ces fonctions représentent des densités de probabilité dont les paramètres ont été calibrés dans (Alonso, 2017) lors d'une étude estimant le débit de la rivière Tempisque à partir d'une simple fonction de transfert pluie-débit. Pour cette analyse, le seul ajustement apporté à la fonction a été la modification du « poids » associé à cette fonction pour y intégrer le SDR.

La fonction de transfert est formulée comme suit :

$$h(u) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} u^{\alpha-1} e^{-u/\beta} \quad (14)$$

où u est le décalage temporel, α est le paramètre d'échelle, β est le paramètre de taux, $\Gamma(\alpha)$ est la fonction gamma évaluée à α (Figure B-1).

6 Résultats

6.1 Contexte hydro-climatique du bassin versant Tempisque-Bebedero

6.1.1 Représentation conceptuelle du régime hydrologique et du transports hypothétiques des sédiments agricoles dans la zone d'étude

La Figure 6-1 est une représentation conceptuelle de la dynamique des flux d'eau et du transport hypothétique des sédiments issus de l'érosion des sols agricoles dans la zone d'étude.

Le projet Arenal-PRAT régule le transfert d'eau depuis les bassins versants de la Côte et d'Arenal à travers le complexe hydroélectrique ARDESA et jusqu'au réseau d'irrigation, en aval du complexe.

Le fonctionnement du complexe hydroélectrique ARDESA est indépendant des canaux d'irrigation, et le flux d'eau à travers ce complexe ne subit pas de variations saisonnières significatives. Cela est possible car la variation saisonnière des précipitations est moins marquée dans les bassins de la Côte et d'Arenal et que ces bassins sont situés en amont du complexe, étant donné qu'ils sont les principales sources d'eau de tout le projet Arenal – PRAT (Section 3.2.2)

A l'inverse, les canaux d'irrigation sont principalement alimentés durant la saison sèche pour compenser la baisse de disponibilité de l'eau de précipitation dans les bassins du Tempisque et du Bebedero. Cela est possible car le barrage de dérivation de la Senara fonctionne comme un réservoir pendant la saison des pluies pour gérer cette indépendance.

L'eau d'irrigation est d'abord conduite par les canaux d'irrigation principaux Ouest et Sud, et par la rivière Corobici, avant de se répartir en canaux secondaires et tertiaires qui irriguent différents sous-districts d'irrigation des bassins versants du Tempisque et du Bebedero. Certaines rivières, comme la Santa Rosa, jouent également un rôle crucial dans l'alimentation du complexe et des canaux d'irrigation. D'autres, telles que la Charco, déversent leur eau dans les rivières Bebedero ou Tempisque, en aval du complexe.

Durant la saison des pluies, les précipitations sont abondantes dans tous les bassins versants concernés, ce qui entraîne un accroissement significatif du débit des rivières, régulé par des forces naturelles. En saison sèche, les précipitations diminuent dans les bassins versants du Tempisque et du Bebedero, réduisant de ce fait le débit des rivières de ces régions.

Les débits indiqués sur les modèles conceptuels sont des valeurs moyennes observées durant les saisons des pluies ou sèches, calculées sur base des données des stations de mesures de débits dans le bassin versant Tempisque – Bebedero fournies par UF- Hydrobase (Section 5.1.1). Ces moyennes sont calculées sur la base de différentes périodes de collecte de données pour chaque débit pour lesquels les données sont disponibles (Tableau 5-1).

Ce modèle a été construit sur base d'hypothèses qui auront pour but d'être confirmées ou réfutées en répondant aux objectifs de ce travail :

1. Dans certaines rivières situées en aval du complexe d'irrigation, la dynamique de débit expliquée exclusivement par l'alternance entre saison sèche et saison des pluies n'est pas respectée. L'explication serait que les lâchers d'eau du barrage de redistribution de la Senara et/ou les retours d'irrigation influencent la dynamique du débit de certaines rivières. Concernant les retours d'irrigation, l'idée serait qu'une partie de l'eau est consommée par les cultures via l'évapotranspiration, tandis qu'une autre partie s'évapore directement; le reste ruisselle ou est drainé à travers les parcelles cultivées et se dirige finalement vers les rivières Tempisque et Bebedero.
2. L'eau d'irrigation qui se retrouve dans ces rivières transporte des sédiments issus des sols altérés par l'agriculture intensive.
3. Les précipitations favorisent également la remobilisation des sédiments terrestres, qui sont entraînés vers les rivières par le ruissellement.
4. Étant donné que la topographie de la zone irriguée est relativement plate et que le système de drainage est peu développé, avec des altitudes variant de 0 à 60 mètres au-dessus du niveau de la mer (Senara, 2024), cette région forme une unité sédimentaire significative qui est susceptible d'être remobilisée lors des crues annuelles.
5. La majorité des sédiments trouvés dans le golfe de Nicoya ont été transportés par les rivières Tempisque et Bebedero (Murcia, 2013). Cela va à l'encontre de l'hypothèse de (Quirós, 2001) qui, sans spécifier lesquels, indique que certains secteurs côtiers sont affectés par l'effet des marées, entraînant la remobilisation des sédiments dans les zones côtières du golfe de Nicoya.

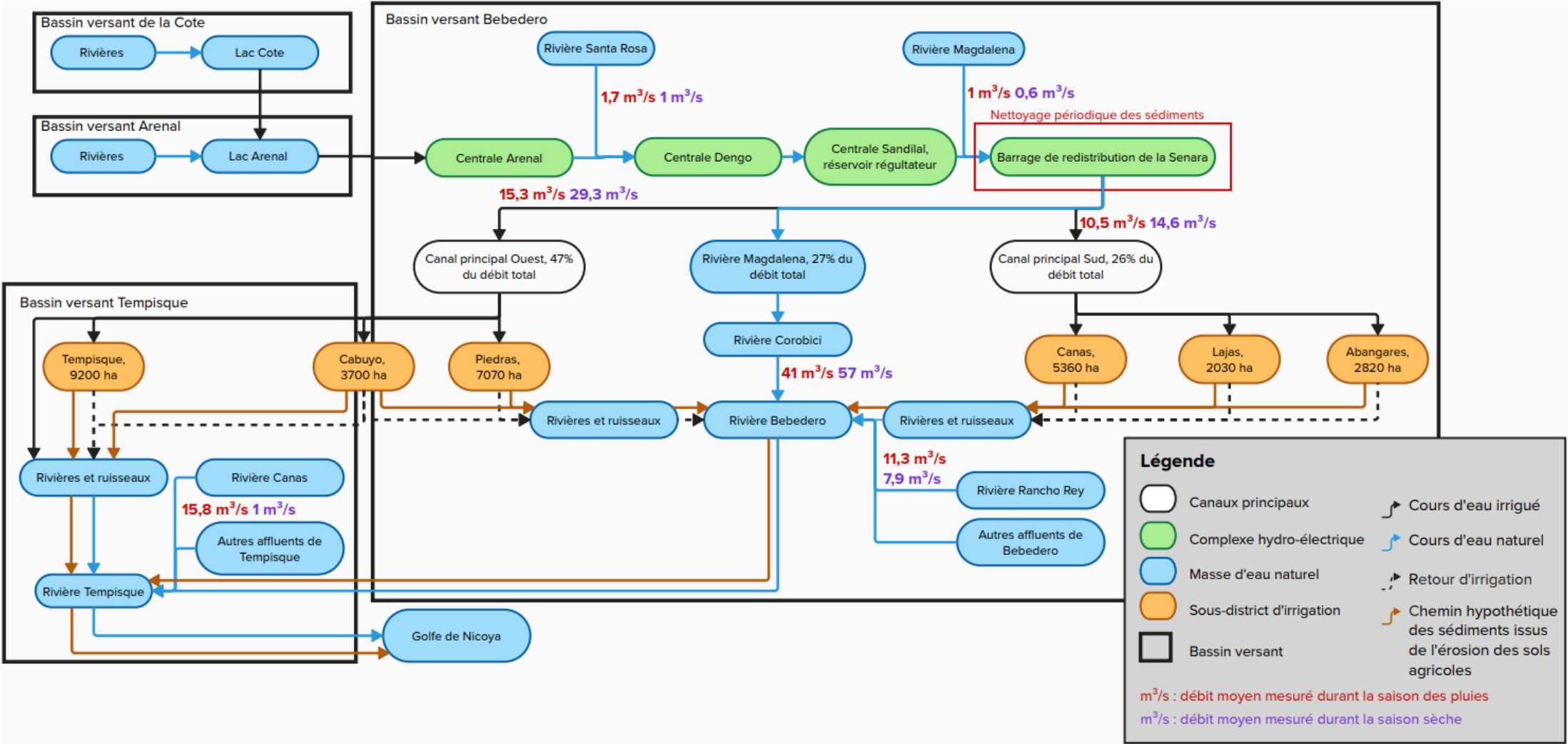


Figure 6-1 : Représentation conceptuelle du régime hydrologique lié au projet Arenal – PRAT et du transport hypothétique des sédiments issus de l'érosion des sols agricoles irriguées dans le bassin versant Tempisque - Bebedero

6.1.2 Analyse comparative de la variabilité temporelle des débits

La Figure 6-2 montre l'évolution des moyennes des précipitations mensuelles cumulées, calculées à partir des données recueillies par les stations de mesure dans le bassin versant Tempisque-Bebedero (Section 5.1.1) (Tableau 5-2). La figure montre également les moyennes mensuelles des débits :

1. De la rivière Santa Rosa (1977-1993), Corobici (1953-1979 et 1980-1994, soit avant et après la mise en opération des barrages), du canal principal Ouest (2002-2019) et du canal principal Sud (2002-2019) calculés sur base des données de débits fournies par les stations de mesures en question (Section 5.1.1) (Tableau 5-1).
2. De la rivière Bebedero (2013-2019) et Tempisque (2013-2016), calculés en utilisant la formule de Manning-Strickler à partir des données de niveau d'eau (Section 5.1.2)

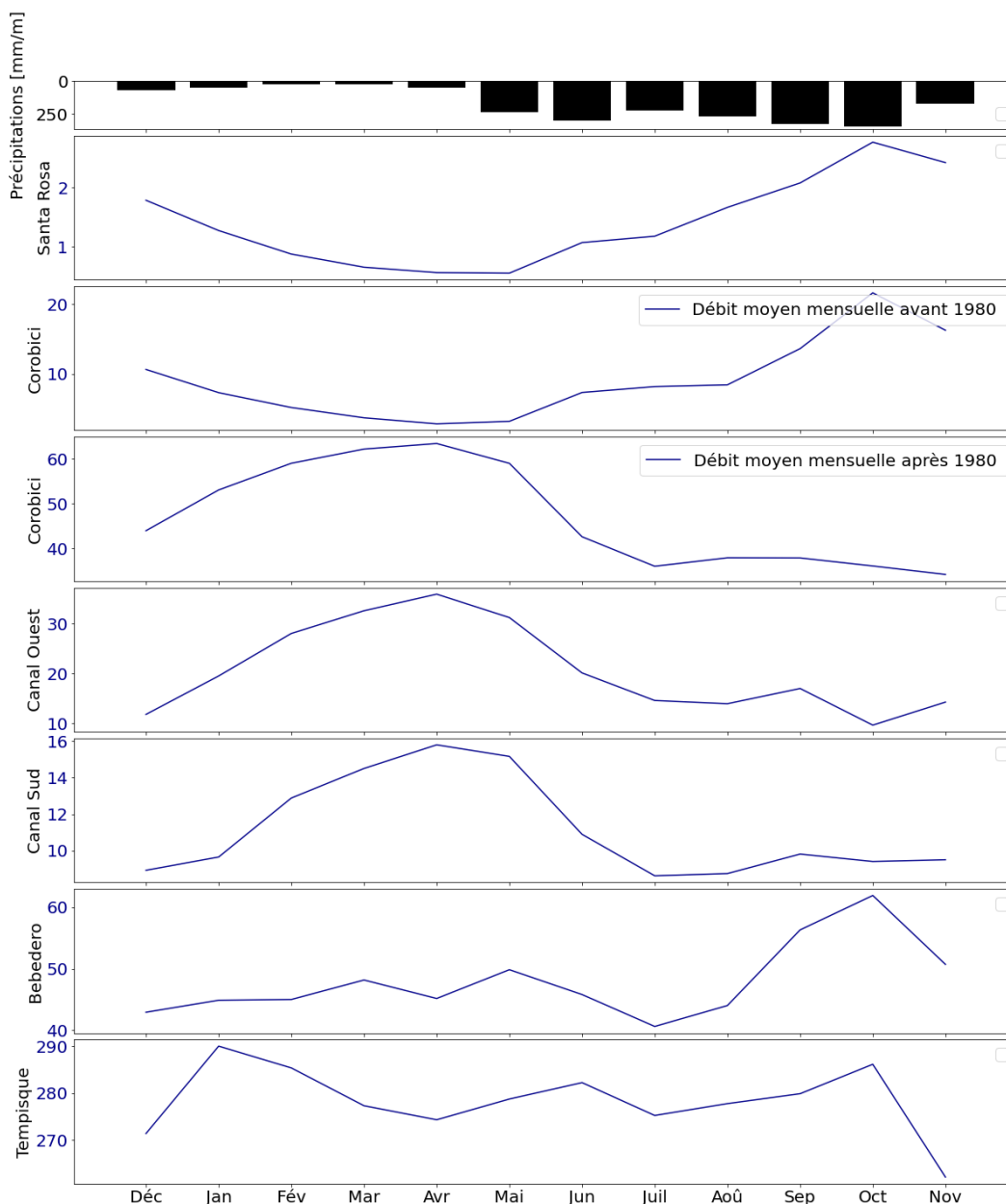


Figure 6-2 : Moyennes des précipitations mensuelles cumulées, calculées à partir des données recueillies par les stations de mesure dans le bassin versant Tempisque-Bebedero et moyennes mensuelles des débits de la rivière Santa Rosa, Corobici (avant et après 1980), du canal principal Ouest et du canal principal Sud De la rivière Bebedero et Tempisque. Pour les rivières les axes des y correspondent aux débits en $[m^3/s]$

Notons que sur la Figure 6-2 résultats sont organisés selon le calendrier hydrique du Costa Rica, où décembre correspond au début de la saison sèche.

Amont du projet Arenal – PRAT

La station de mesure du débit de la rivière Santa Rosa n'est pas affectée par les eaux mobilisées par le projet Arenal-PRAT car située en amont (Figure 5-1, Figure 6-1). Dès lors, le débit de la rivière Santa Rosa est directement corrélé aux précipitations avec une augmentation notable du débit pendant la saison des pluies, de mai à novembre (Figure 6-2, Figure C-1).

Une dynamique similaire de débit est rencontrée dans toutes les rivières, pour lesquelles des mesures sont accessibles, qui ne sont pas influencée par les eaux mobilisées par le projet Arenal-PRAT (Tableau C-1).

Aval du projet Arenal - PRAT – rivière Corobici et canaux d'irrigation

La station de mesure du débit de la rivière Corobici est situé en aval du projet Arenal-PRAT (Figure 5-1, Figure 6-1).

Avant 1980, comme le montre la Figure 6-2 le débit de cette rivière est de nouveau plus élevé durant la saison des pluies (Figure C-2).

Après 1980, comme le montre la Figure 6-2 la dynamique du débit de la rivière Corobici n'est plus corrélée aux précipitations. Le pic de débit se situe désormais vers le mois d'avril, à la fin de la saison sèche qui s'étend de décembre à avril (Figure C-3).

Les canaux principaux d'irrigation Ouest et Sud sont alimentés par les eaux mobilisées par le projet Arenal-PRAT. Les débits mesurés dans ces canaux sont beaucoup plus importants pendant la saison sèche et confèrent une dynamique similaire à celle de la rivière Corobici après 1980 (Figure 6-2, Figure C-4).

Aval du projet Arenal -PRAT – rivières Tempisque et Bebedero

Les Figure 6-4 et Figure 6-3 montrent l'évolution temporelle du débit des rivières Bebedero et Tempisque. Ces données ont été calculées en utilisant la formule de Manning-Strickler à partir des données de niveau d'eau, provenant de stations situées en aval du projet Arenal-PRAT (Figure 5-1, Figure 6-1), desquelles sont retirées la variabilité induite par les marées. Les données de précipitations de la station météorologique la plus proche (Canas pour les deux rivières) ainsi que les mesures de débit des canaux d'irrigation du bassin versant concerné ont été intégrées dans ces graphiques.

Le débit de la rivière Bebedero présente une saisonnalité marquée par deux augmentations au cours de l'année (Figure 6-2, Figure 6-4). La première se produit entre le début et le milieu de la saison sèche, de janvier/février jusqu'après le début de la saison des pluies, vers la fin juin. La seconde augmentation significative du débit a lieu vers la fin de la saison des pluies, en septembre/octobre. Cette dynamique est observée pour toutes les années contenant des données, à l'exception de 2014, qui est moins marquée par ce double pic hydrique annuel (Figure 6-4). Le maximum durant la saison sèche est souvent inférieur à celui de la saison des pluies.

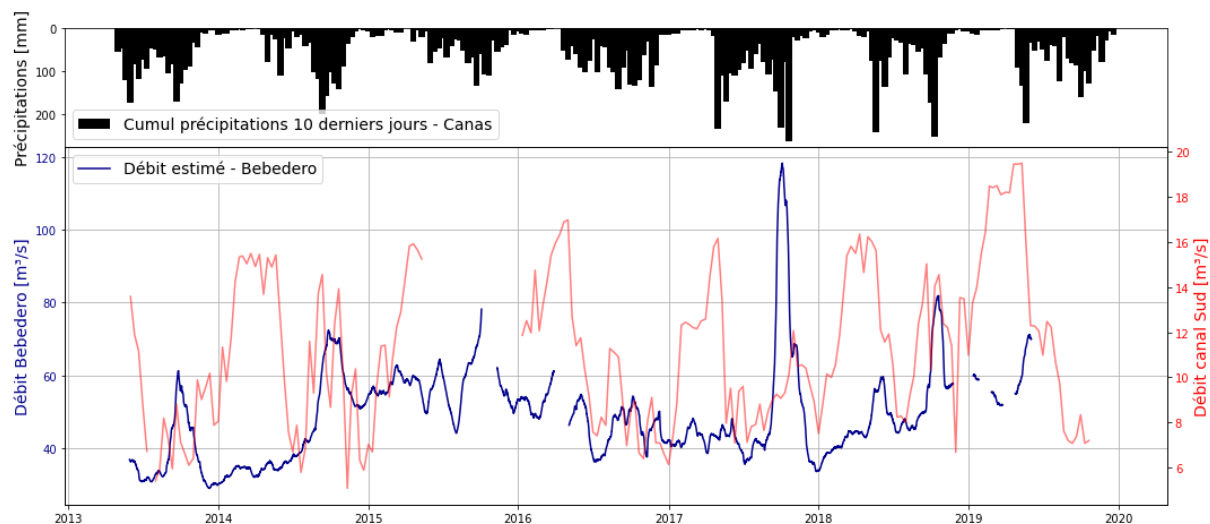


Figure 6-4 : Débit estimé de la rivière Bebedero avec la formule de Manning-Strickler, débit mesuré du canal Sud et précipitations mesurés par la station Canas au cours du temps

Comme le montre la Figure 6-2 et la Figure 6-3 le débit estimé de la rivière Tempisque est plus stable que celui de la rivière Bebedero en ne montrant pas de saisonnalité.

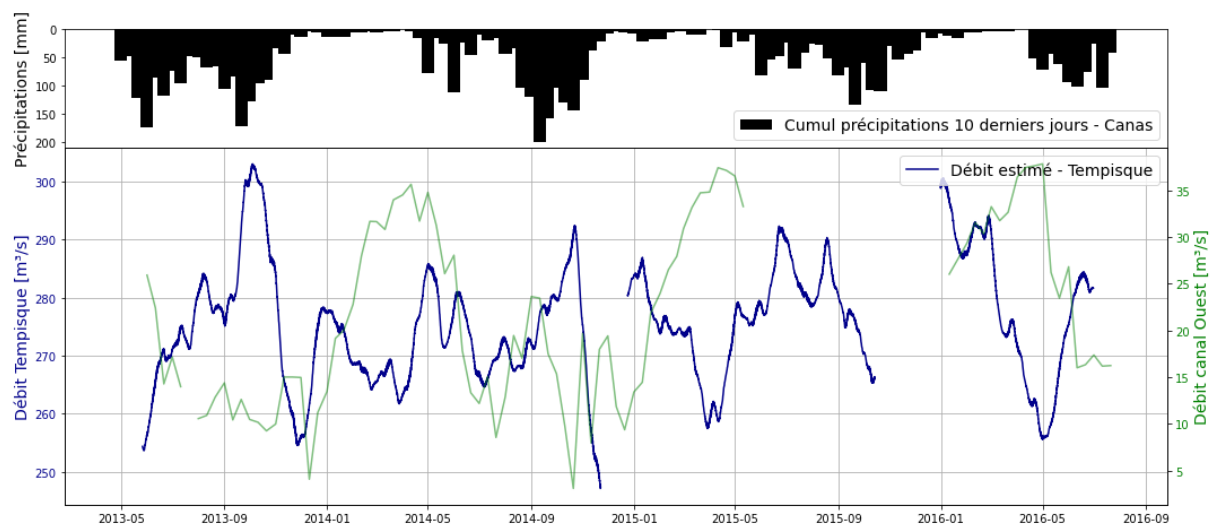


Figure 6-3 : Débit estimé de la rivière Tempisque avec la formule de Manning-Strickler, débit mesuré du canal Sud et précipitations mesurés par la station Canas au cours du temps

6.2 Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero

6.2.1 Dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya

Sentinel-2

La Figure 6-5 présente les résultats synthétiques du clustering réalisé sur les images de Sentinel-2 dans le golfe de Nicoya (Section 5.2.4). Cette analyse visait à catégoriser chaque pixel des images en deux classes : sédiments et eau claire. Les images ont été regroupées par mois et par année, et une valeur médiane a été calculée pour chaque regroupement mensuel. Un pourcentage élevé dans un groupe mensuel indique une prévalence notable de sédiments dans les images de ce mois.

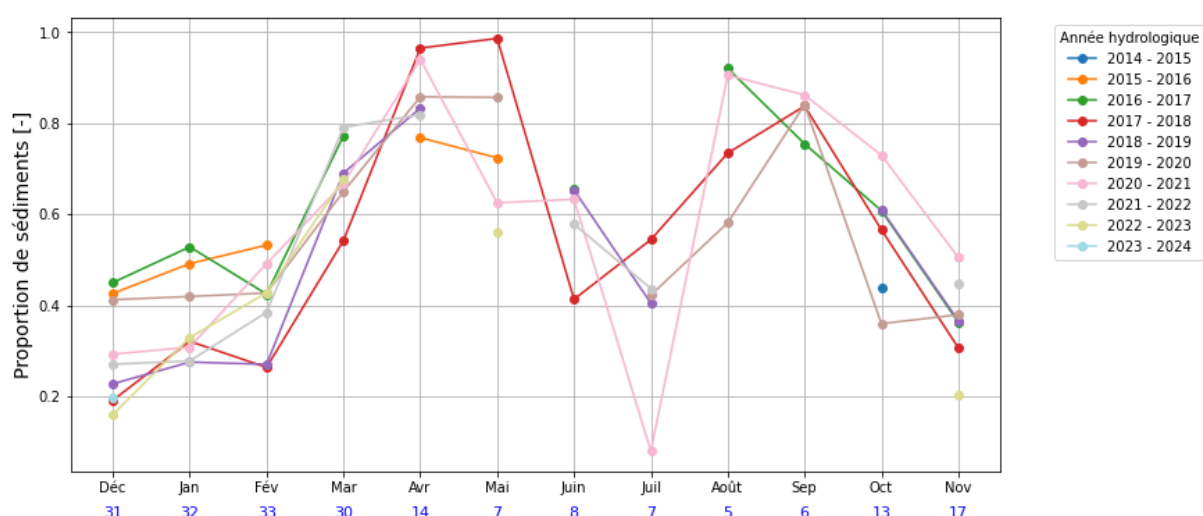


Figure 6-5 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Sentinel-2 avec le décompte mensuel du nombre d'images

La Figure 6-5 montre que les résultats sont fortement corrélés entre les différentes années. La proportion de taches de sédiments dans le golfe semble suivre une dynamique particulière, liée au calendrier hydrologique du Costa Rica. On observe un pic aux alentours de septembre, l'un des mois les plus pluvieux de l'année, correspondant au milieu ou à la fin de la saison des pluies. Un second pic notable apparaît vers avril/mai, correspondant à la fin de la saison sèche. Le nombre d'images disponibles est également corrélé au calendrier hydrologique ; moins d'images sont disponibles pendant les mois pluvieux, surtout entre mai et septembre, en raison de l'exclusion des images avec une couverture nuageuse supérieure à 25%.

Landsat 8 et 9

Comme le montre la Figure 6-6, moins d'images au total et sur une période plus longue sont disponibles pour Landsat 8 et 9. La dynamique particulière observée dans les images Sentinel-2 est moins perceptible.

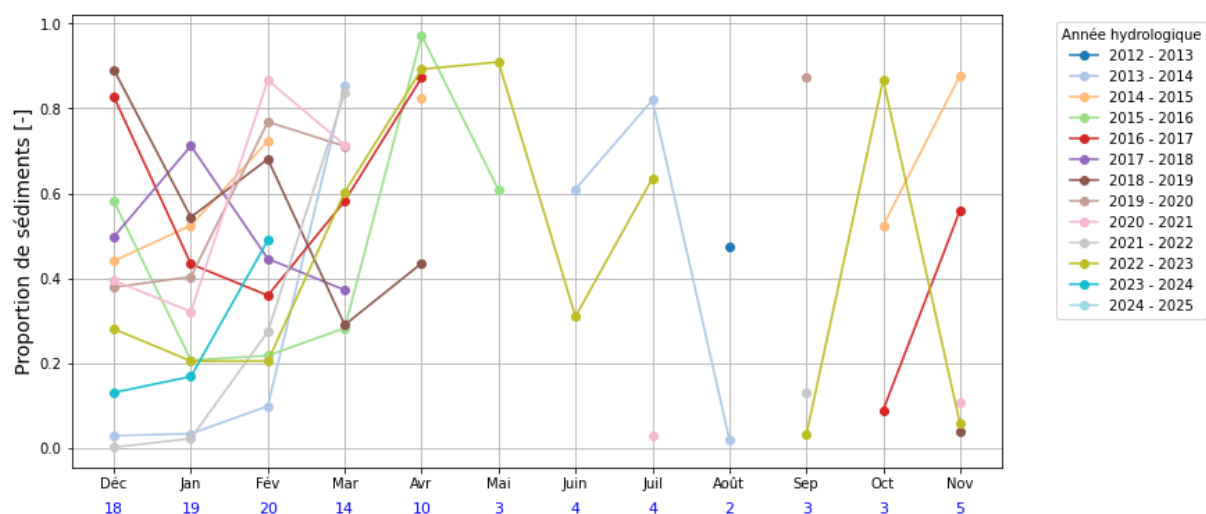


Figure 6-6 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Landsat 8 et 9 avec le décompte mensuel du nombre d'images

Cependant, comme le montre le Tableau 6-1, la proportion de taches de sédiments augmente constamment au début de la saison sèche, atteignant un pic en avril, en accord avec les résultats de Sentinel-2. Toutefois, une différence notable est observée avec une proportion de sédiments plus élevée en décembre qu'en janvier.

Tableau 6-1 : résultats médians et intervalles interquartiles de la proportion de sédiments durant la saison sèche sur base des images Landsat 8 et 9

Mois	Proportion médiane de sédiments [-]	Intervalle interquartile (P25-P75) [-]
Décembre	0.37	0.19 - 0.56
Janvier	0.33	0.05 - 0.46
Février	0.43	0.18 - 0.66
Mars	0.57	0.36 - 0.77
Avril	0.87	0.79 - 0.92

Landsat 5 et 7

Comme le montre la Figure 6-7, en raison du problème du SLC désactivé sur les images Landsat 7 (Section 5.2.3), les résultats de Landsat 5 et 7 ne se chevauchent pas dans le temps avec ceux des missions Sentinel-2 et Landsat 8 et 9. Cela rend les résultats difficilement comparables avec ceux des autres missions. Il est important de noter que la dynamique sédimentaire observée avec les images Sentinel-2 et Landsat 8 et 9 n'est pas présente dans les résultats de Landsat 5 et 7.

Les résultats de Landsat 5 et 7 sont discutables et ne seront pas pris en compte dans l'analyse qui suit. Cela est discuté plus en détail dans la section 6.2.1.

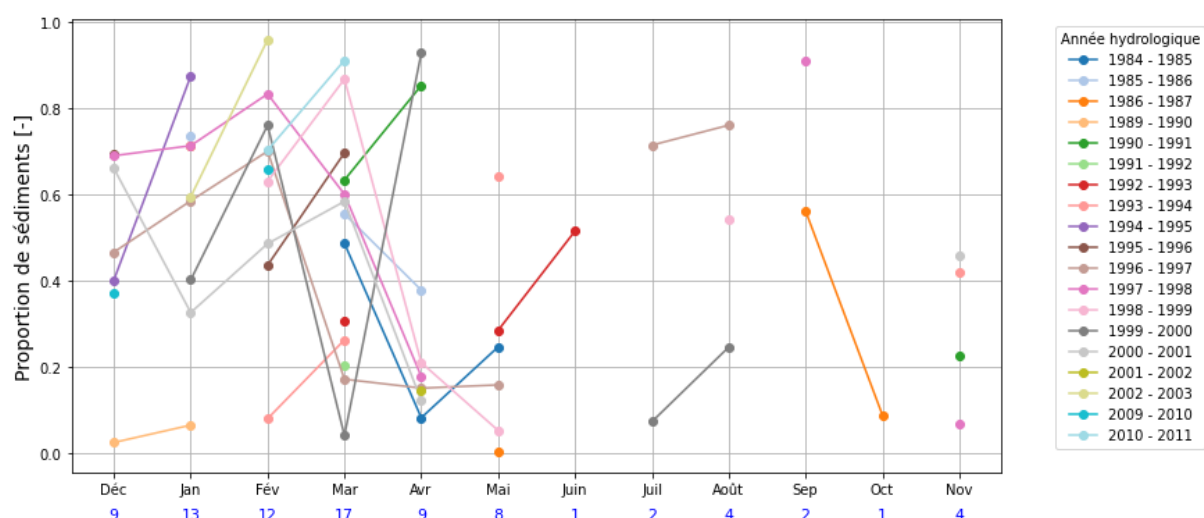


Figure 6-7 : Variation mensuelle de la superficie médiane des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Landsat 5 et 7 avec le décompte mensuel du nombre d'images

Dynamique globale annuelle

La Figure 6-8 présente une combinaison des résultats des images Sentinel-2, Landsat 8 et 9. Cette fois-ci, la médiane a été calculée indépendamment de l'année afin de fournir une vue d'ensemble de la dynamique annuelle globale. En ajoutant certains percentiles et les proportions de sédiments de chaque image, on constate que la dynamique observée, avec ce double maximum en avril et en septembre, ne reflète qu'une tendance générale. La proportion du golfe de Nicoya occupée par des taches de sédiments présente une grande variabilité interannuelle et intra-annuelle.

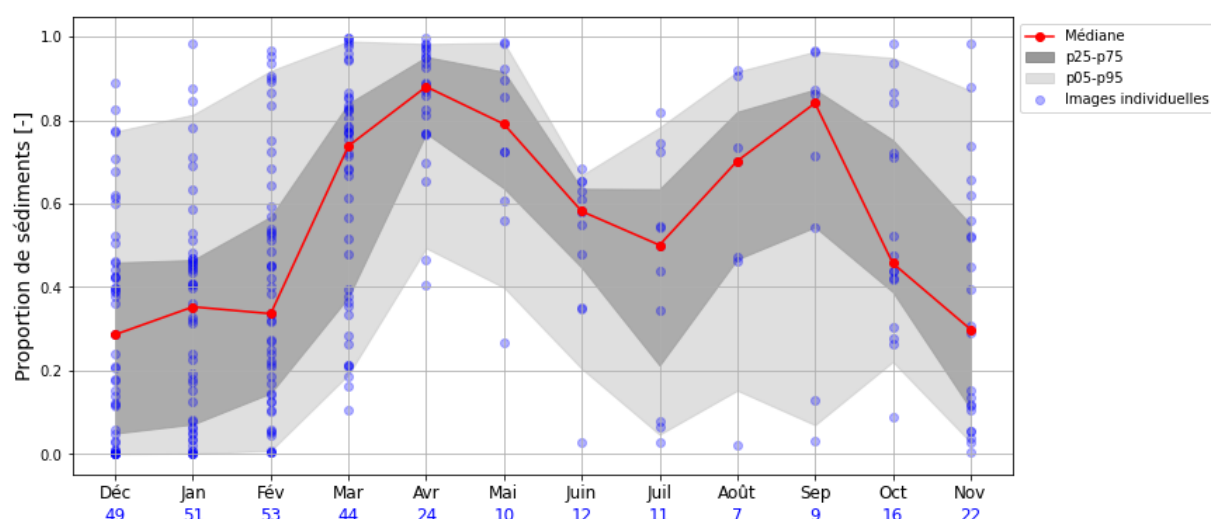


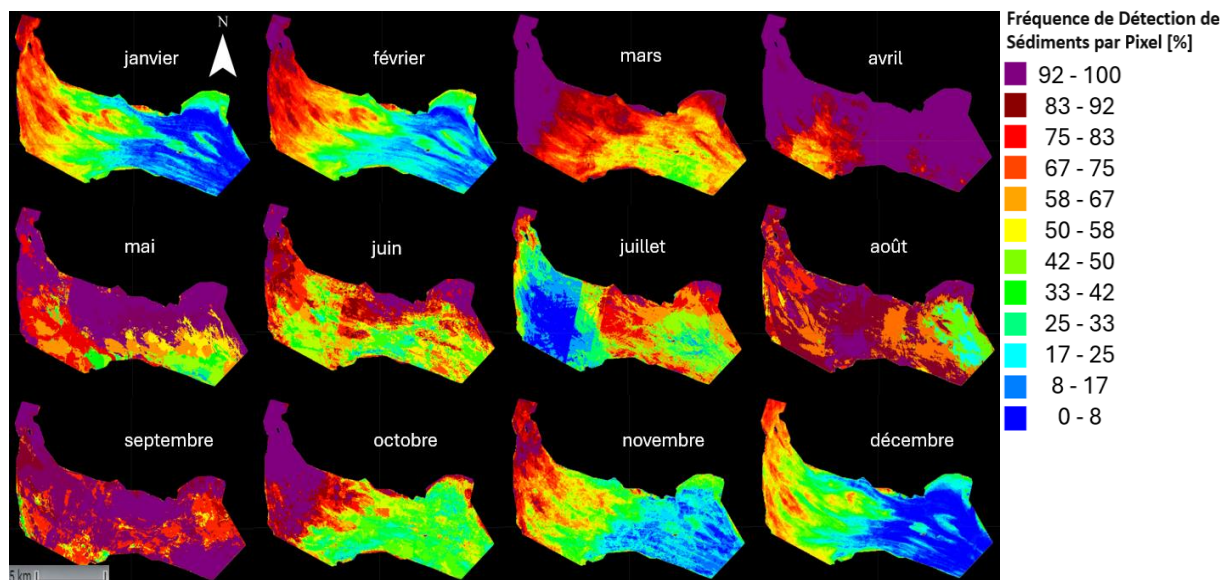
Figure 6-8 : Variation mensuelle et indépendante de l'année de la superficie médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) des panaches de sédiments dans le golfe de Nicoya, basée sur les images Sentinel 2 et Landsat 8 et 9 avec le décompte mensuel du nombre d'images

Caractérisation spatio-temporelle

La Figure 6-9 est le résultat de la construction de 12 images composites attribuables aux 12 mois de l'année. Ces images, issues des données du clustering réalisé sur les images Sentinel 2 du golfe de Nicoya (Section 5.2.4), montrent la fréquence de détection d'attribution de chaque pixel à la catégorie sédiment plutôt que eau claire.

La Figure 6-9 montre que la majorité des sédiments dans le golfe semblent provenir de la rivière Tempisque, située au nord.

Les sédiments semblent réellement s'accumuler et/ou arriver en abondance dans le golfe de Nicoya entre décembre et avril, période où la fréquence d'occupation est maximale (saison sèche). Ensuite, la fréquence moyenne d'occupation en juillet (environ 50%) semble être le résultat inertiel des mois précédents, étant donné que la charge sédimentaire apportée par la rivière Tempisque est plus faible durant ce mois. Enfin, août et septembre révèlent également un apport massif de sédiments dans le golfe de Nicoya (saison des pluies).



6.2.2 Dynamique temporelle de la concentration et de la charge sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero

Concentration sédimentaire

Les Figure 6-10 et Figure 6-11 représentent la médiane et certains percentiles des concentrations mensuelles de sédiments, calculées indépendamment des années à partir des images Sentinel-2 dans les rivières Bebedero et Tempisque Section 5.2.4).

La concentration médiane annuelle calculée pour la rivière Bebedero est de 56 mg/l. Cette concentration médiane reste relativement stable tout au long de l'année. Cependant, on observe un léger maximum en avril (67 mg/l) et en août et octobre (respectivement 72 et 75 mg/l).

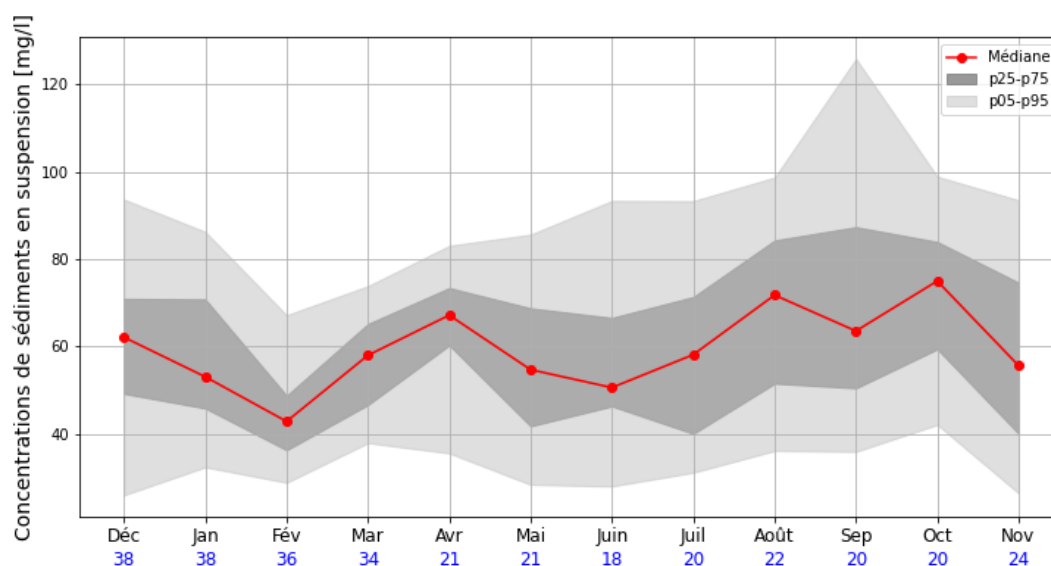


Figure 6-10 : Variation mensuelle et indépendamment de l'année de la concentration en sédiments de la médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) dans la rivière Bebedero, basée sur les images Sentinel 2 avec le décompte mensuel du nombre d'images

La concentration médiane annuelle calculée de Tempisque est de 107 mg/l avec des concentrations médiane mensuelle légèrement supérieur durant la saison sèche et légèrement inférieur durant la saison des pluies.

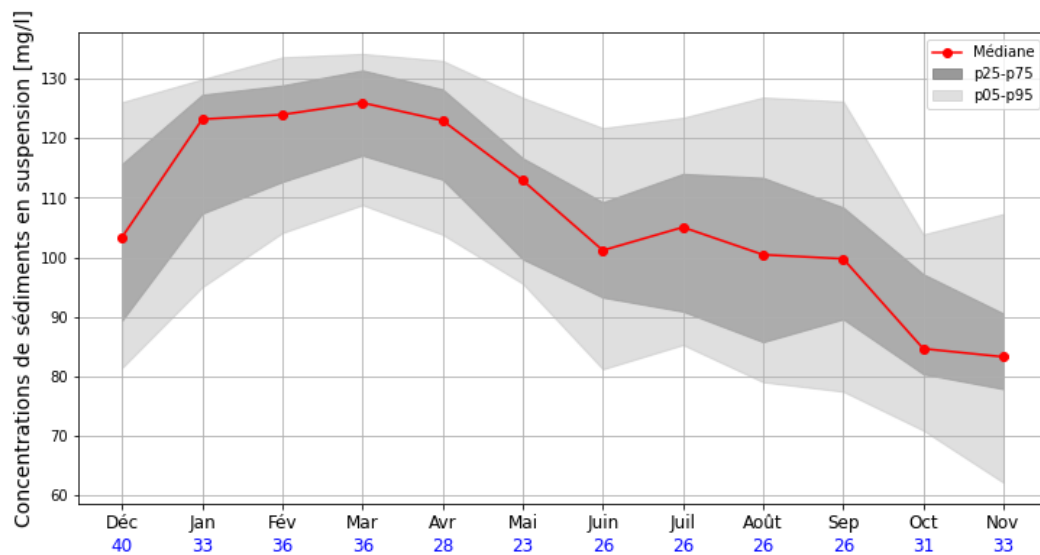


Figure 6-11 : Variation mensuelle et indépendante de l'année de la concentration en sédiments de la médiane et intervalles percentiles (P25-P75 et P05-P95) dans la rivière Tempisque, basée sur les images Sentinel 2 avec le décompte mensuel du nombre d'images

La dynamique sédimentaire particulière observée dans le golfe de Nicoya ne se retrouve pas dans la variation des concentrations en sédiments des rivières au cours du temps. Cela n'est pas particulièrement surprenant. Il est également nécessaire de considérer le débit des rivières pour estimer la charge en sédiments transportée par celles-ci au fil du temps (Equation (12)).

Charge sédimentaire

Bebedero

La Figure 6-12 présente le débit de la rivière Bebedero, à partir des données de niveau d'eau (Section 5.1.2), ainsi que l'évolution de la concentration en sédiments au fil du temps et les données de précipitations de la station météorologique la plus proche (Canas). Malheureusement, les données ne se chevauchent qu'entre septembre 2015 et mars 2019. De plus, entre septembre 2015 et mars 2017, seule l'une des deux missions Sentinel-2 avait été lancée, ce qui réduit la résolution temporelle de cette mission et, par conséquent, le nombre de données disponibles sur la concentration en sédiments.

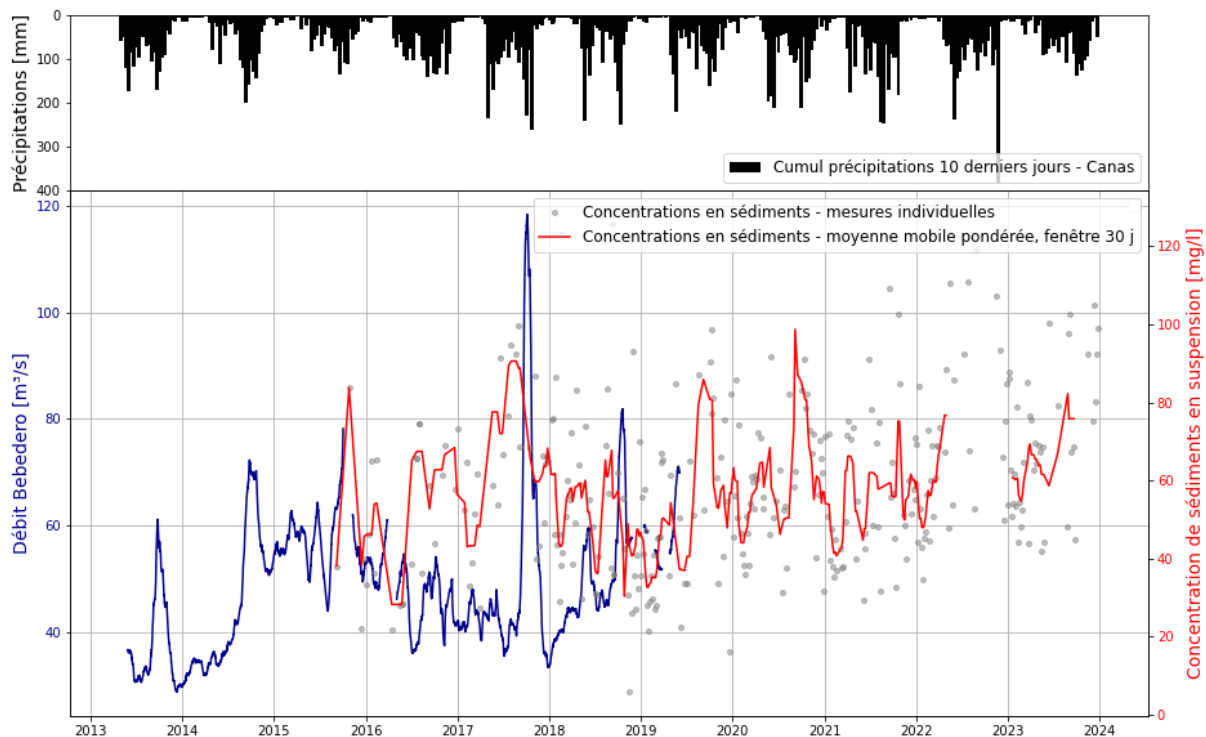


Figure 6-12 : débit estimé de la rivière Bebedero avec l'équation de Manning-Strickler, mesures ponctuelles des valeurs de concentrations basé sur des images Sentinel 2, moyenne mobile de fenêtre 30 jours pondérée des mesures ponctuelles de concentrations et précipitations cumulée mesurée à la station Canas

Intéressons-nous d'abord aux saisons des pluies, qui s'étendent de mai à novembre. Premièrement, que ce soit au niveau du débit estimé ou des concentrations en sédiments calculées, on observe une tendance à l'augmentation de ces variables pendant la saison des pluies.

Ensuite, plus spécifiquement comme le montre le Tableau 6-2, en examinant les quatre années complètes pour lesquelles les données de débit et de concentration se chevauchent, on remarque que le débit maximal estimé se produit toujours en octobre. On peut également constater qu'en 2017 et 2018, les précipitations cumulées en début de saison des pluies sont plus importantes qu'en 2015 et 2016. Durant ces deux années là, les pics de concentrations maximales en sédiments surviennent plus tôt dans l'année (en août ou septembre contre octobre ou décembre), et surtout avant le pic hydrique pendant la saison des pluies.

Tableau 6-2 : relation entre les précipitations cumulées en début de saison sèche et les dates de débit et concentrations maximales maximale dans la rivière Bebedero

Année	Précipitations cumulées (mai à juin) [mm]	Date du débit maximale de la rivière pendant la saison des pluies	Date de la concentration maximale de sédiments pendant la saison des pluies
2015	222	03-oct	27-oct
2016	451	05-oct	20-déc
2017	831	04-oct	22-août
2018	609	20-oct	06-sept

Concernant la saison sèche, de décembre à avril, on observe à partir de 2018 que la concentration en sédiments tend à augmenter rapidement durant le mois de mars et redescend au cours du mois de mai. Un phénomène similaire est observable au niveau des débits à partir de 2015. Il est à noter que cette dynamique particulière n'est observée simultanément que pour l'année 2018.

La Figure 6-13 montre l'évolution de la médiane mensuelle de la charge en sédiments transportée par la rivière Bebedero, calculée sur la base de l'Equation 12 à partir des mesures individuelles de concentrations et du débit journalier estimé de la rivière Bebedero.

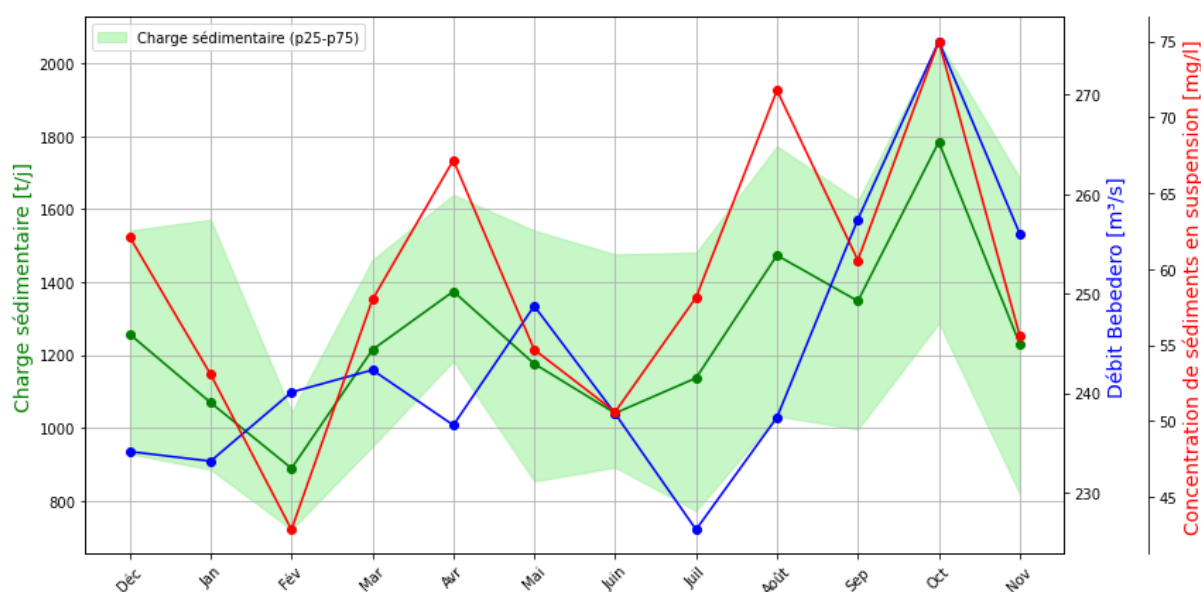


Figure 6-13 : Médiane mensuelle de la charge en sédiments transportée par la rivière Bebedero au cours du temps avec interquartile, calculé sur base des médianes mensuelles du débit estimé de cette rivière et des médianes mensuelles de la concentrations en sédiments de la rivière

On remarque que la charge en sédiments dans la rivière Bebedero suit une dynamique analogue à celle de la taille du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya (Figure 6-8), avec un premier maximum durant la saison sèche et un second durant la saison des pluies. Notons cependant que le maximum durant la saison sèche est plus faible en comparaison à celui de la saison des pluies, et que le maximum durant la saison des pluies survient un mois plus tard, en octobre.

Tempisque

La Figure 6-14 représente l'évolution de la concentration en sédiments au fil du temps de la rivière Tempisque, ainsi que les données de précipitations de la station météorologique la plus proche (Canas). Malheureusement, la disponibilité des données du niveau d'eau de Tempisque (entre mai 2013 et juillet 2016) ne permet pas d'associer le débit estimé de Tempisque à ses valeurs de concentrations aux mêmes moments. De plus, compte tenu des résultats douteux du débit estimé de Tempisque (Section 7.1.1), il est difficile de faire confiance au débit estimé de Tempisque et ainsi l'associer aux données de concentration.

Les valeurs de concentrations calculées montrent une dynamique particulière influencée par les saisons. Durant la saison sèche, les concentrations augmentent, puis tendent à diminuer entre les deux saisons. Au début de la saison des pluies, les concentrations ont tendance à réaugmenter soudainement avant de diminuer.

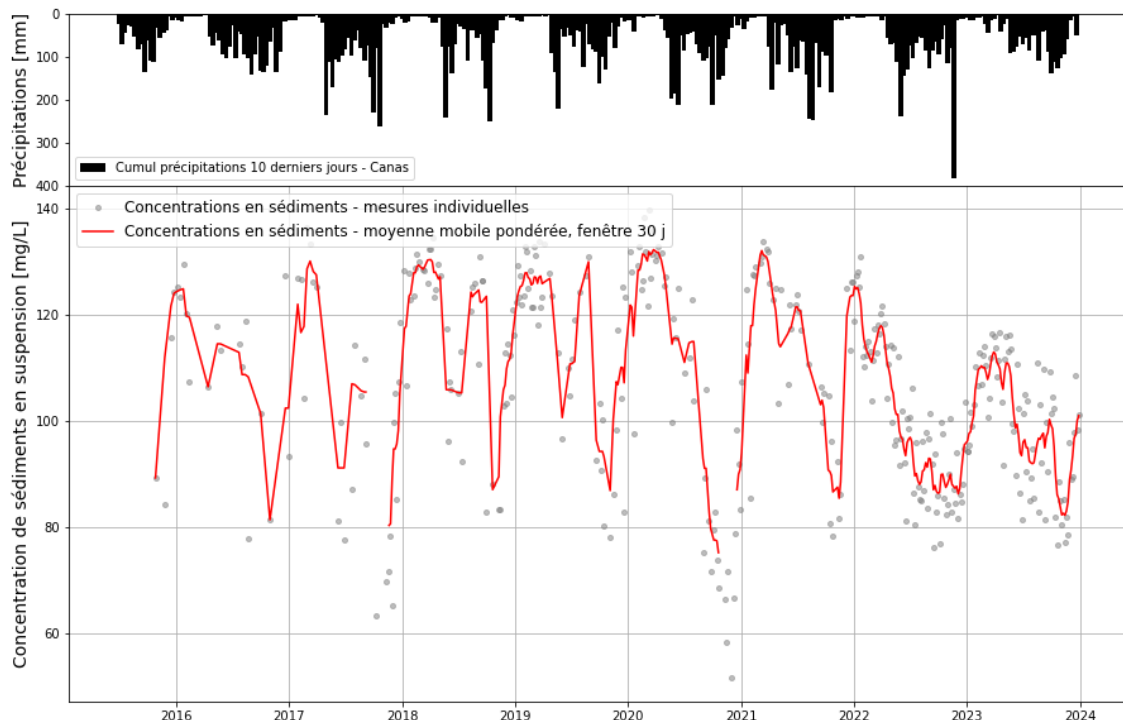


Figure 6-14 : Mesures ponctuelles des valeurs de concentrations basé sur des images Sentinel 2 dans la rivière Tempisque, moyenne mobile de fenêtre 30 jours pondérée des mesures ponctuelles de concentrations et précipitations cumulée mesurée à la station Canas

Malheureusement, il est difficile d'estimer la dynamique de la charge de sédiments transportés par la Tempisque. La concentration en sédiments de la rivière Tempisque est plus élevée durant la saison sèche (121 mg/l contre 96 mg/l durant la saison des pluies). C'est sans aucun doute l'inverse en ce qui concerne le débit selon les saisons (Section 7.1.1). La clé manquante réside ici dans la différence de débit de la rivière entre la saison sèche et la saison des pluies.

6.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant

La Figure 6-15 présente le résultat du calcul de l'érosion à l'échelle du bassin versant Tempisque-Bebedero, basé sur l'Universal Soil Loss Equation (USLE). Dans un cas où l'érosion serait uniquement causée par des processus naturels, en particulier par les précipitations locales, on observe une prédominance significative du profil érosif pendant la saison des pluies. Ce modèle ne prend donc pas en compte l'implication potentielle de l'eau mobilisé par le projet Arenal-PRAT sur la dynamique sédimentaire dans le bassin versant.

Selon ce modèle, à l'échelle du bassin versant, la quantité totale moyenne mensuelle de sédiments qui se retrouvent dans les rivières est de 6 200 tonnes durant la saison sèche, contre 22 700 tonnes durant la saison des pluies.

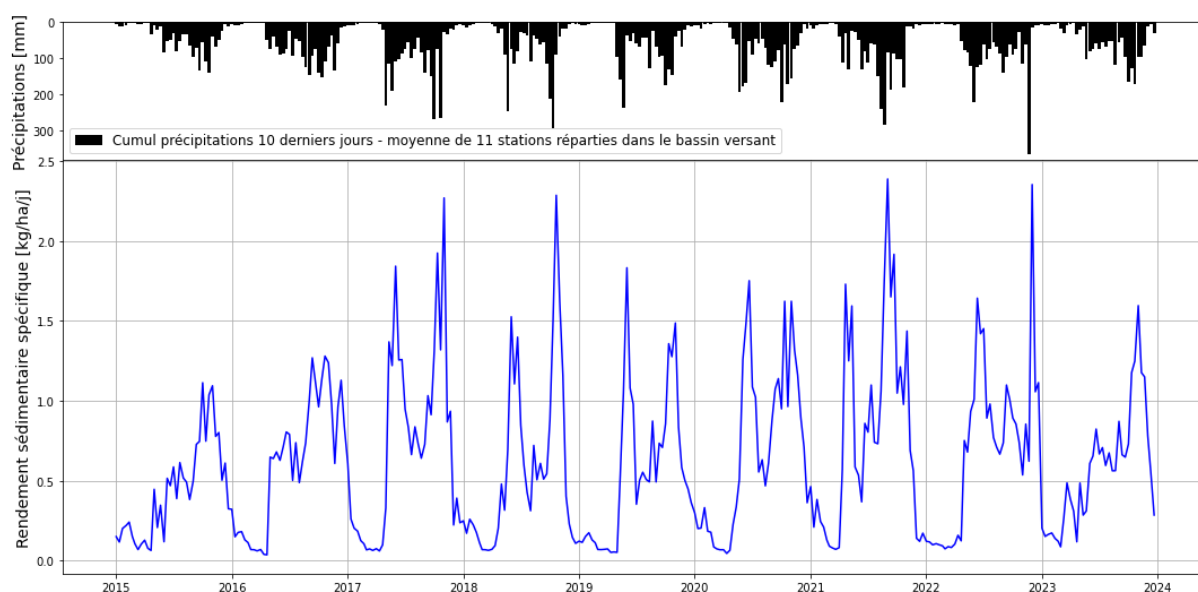


Figure 6-15 : Profil érosif du bassin versant Tempisque-Bebedero calculé sur base de l'USLE et précipitations moyennes mesurées par les différentes stations de mesures des précipitations dans le bassin versant (Figure 4 – 1)

7 Discussion

Le but de cette section est de passer en revue les différents résultats présentés et de (i) les interpréter et d'évaluer leurs conséquences à plus long terme (ii) d'évaluer les incertitudes à la méthodologie associée. La discussion de l'objectif 3 se terminera par une analyse approfondie de l'impact du projet Arenal-PRAT sur la dynamique sédimentaire dans le bassin versant Tempisque-Bebedero.

7.1 Contexte hydro-climatique du bassin versant Tempisque-Bebedero

7.1.1 Analyse comparative de la variabilité temporelle des débits

Amont du projet Arenal – PRAT

Les débits des rivières qui ne sont pas affectées par les eaux mobilisées par le projet Arenal-PRAT présentent une dynamique influencée exclusivement par des phénomènes naturels, à savoir les précipitations (Tableau C-1).

Souvent, le débit de ces rivières augmente progressivement du début (mai) jusqu'à la fin de la saison des pluies (novembre) (Figure 6-2, Figure C-1) avec des débits très faibles durant la saison sèche. La saisonnalité du cycle hydrologique au Costa Rica se manifeste par des mois très secs pendant la saison sèche suivis d'une saison des pluies durant laquelle les sols, initialement secs, absorbent une grande quantité d'eau. Au fur et à mesure de la progression de la saison, le sol atteint sa saturation, diminuant ainsi la capacité d'infiltration et augmentant le ruissellement vers les rivières, ce qui se traduit par une augmentation du débit avec un décalage après le début des pluies (Ramahaimandimby et al., 2023).

Plus rarement, on remarque un double pic hydrique annuel (par exemple, en 1981 à la station Santa Rosa, en 1982 aux stations Santa Rosa et Guardia, et en 1986 aux stations Santa Rosa, Guardia et Tilaran) (Figure 5-1). Cela peut être attribué à la dynamique des précipitations. Bien que la saison des pluies s'étende de mai à novembre, les précipitations diminuent souvent en juillet et août. Si les sols sont déjà saturés ou si les pluies de début de saison sont abondantes, le débit de la rivière peut montrer une double augmentation durant cette période.

Aval du projet Arenal - PRAT – rivière Corobici et canaux d'irrigation

L'augmentation significative du débit moyen de la rivière Corobici et son découplage avec le régime naturel des précipitations (Figure 6-2, Figure C-2) début des années 1980 peut être associée à l'inauguration du barrage Arenal, le premier construit dans le cadre du complexe hydroélectrique Arenal.

En effet, la rivière Corobici se trouve directement en aval du complexe hydroélectrique ARDESA. Environ 27% de l'eau mobilisée par ce complexe rejoint la rivière Corobici, tandis que le reste est transféré aux canaux d'irrigation de la DRAT, à savoir le canal principal Ouest (47% de l'eau mobilisée) et Sud (26%) (Figure 6-1).

Le débit de la rivière Corobici et des canaux d'irrigation sont donc corrélés (Figure 6-2, Figure C-4) et montrent une augmentation nette durant la saison sèche. Cela est cohérent avec l'objectif principal de la mise en place du réseau d'irrigation par le projet Arenal-PRAT. Le facteur limitant de l'agriculture pendant la saison sèche est l'eau, et l'utilisation des canaux permet de minimiser cet obstacle.

Aval du projet Arenal -PRAT – rivières Tempisque et Bebedero

Interprétations

Bebedero

Le débit moyen estimé de la rivière Bebedero est de 49 m³/s. La dynamique particulière de son débit, caractérisée par un double pic hydrique, ne peut pas être entièrement expliquée par la saisonnalité climatique.

En effet, le débit moyen mensuel estimé de Bebedero augmente progressivement entre décembre et mars (Figure 6-2). Ce phénomène n'est jamais observable pour les rivières influencée exclusivement par des phénomènes naturels.

Pour expliquer l'augmentation du débit de la rivière Bebedero durant la saison sèche, il faut sans doute considérer la rivière Corobici (27% de l'eau transféré par le projet Arenal-PRAT) et les canaux d'irrigation de la DRAT, à savoir le canal principal Sud et Ouest (73% de l'eau transféré par le projet Arenal-PRAT).

Le débit de ces éléments est plus important durant la saison sèche (Figure 6-2, Tableau C-2). La rivière Corobici est un affluent de la rivière Bebedero. Le canal principal Sud sert exclusivement à l'irrigation des cultures situées dans le bassin versant de la Bebedero. Une partie du débit total du canal principal Ouest est également utilisé pour l'irrigation dans ce bassin versant (Figure 6-1). Il est supposé qu'une partie des retours d'irrigation, non mobilisée par les cultures, ruisselle ou soit drainé à travers les parcelles cultivées et se dirige finalement vers la rivière Bebedero.

Par conséquent, cette augmentation de débit durant la saison sèche est essentiellement attribuée à l'influence du projet Arenal-PRAT, tandis que l'augmentation en saison des pluies est liée aux précipitations naturelles dans le bassin versant.

Tempisque

Le débit moyen estimé de la rivière Tempisque est de 274 m³/s. Ce débit concorde avec l'étude de (Jimenez, 2001), qui a estimé un débit moyen de 284 m³/s. Ce débit estimé est très peu variable, avec un débit moyen de 274 m³/s, un minimum de 247 m³/s et un maximum de 303 m³/s sur l'ensemble des données.

En examinant spécifiquement la dynamique du débit estimé de la rivière Tempisque, il est difficile d'expliquer de tels résultats.

Premièrement, le débit estimé de la rivière Tempisque durant la saison sèche paraît très élevé :

- **Tentative d'explication par des phénomènes naturels :** la Figure 7-1 représente les moyennes mensuelles des débits mesurés par les stations Guardia et La Guinea, situées sur la rivière Tempisque à respectivement environ 94 km et 70 km de l'estuaire, ainsi que le débit de la rivière Canas un affluent de la rivière Tempisque (Figure 5-1). Les débits mesurés de ces stations ne sont pas influencés par le projet Arenal-PRAT et sont donc très faibles pendant la saison sèche. Le débit estimé de la rivière Tempisque sur base des mesures de la hauteur d'eau, prises à 17km de l'estuaire, est quant à lui très élevé durant cette saison. Ce débit élevé ne peut donc pas être expliqué sur base des mesures de débit prises par les stations en amont.

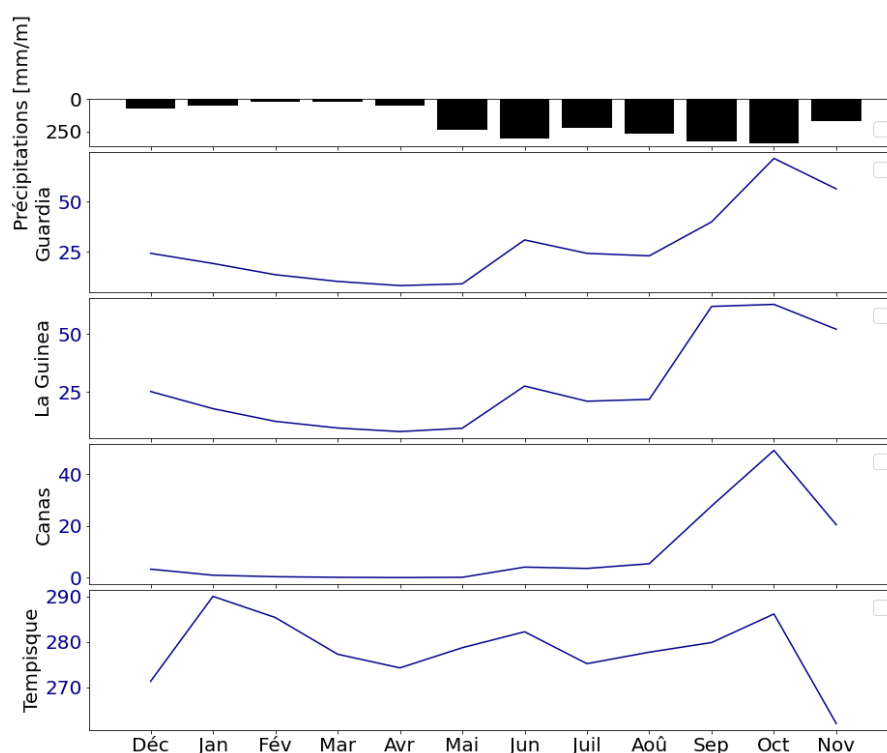


Figure 7-1 : Moyennes des précipitations mensuelles cumulées, calculées à partir des données recueillies par les stations de mesure dans le bassin versant Tempisque-Bebedero et moyennes mensuelles des débits de la rivière Tempisque mesurés aux stations Guardia, et La Guinea et de la rivière Canas et estimé à partir des données de niveau à la station Tempisque. Pour les rivières les axes des y correspondent aux débits en [m³/s]

- **Tentative d'explication par l'impact du projet Arenal-PRAT :** l'influence potentielle du projet Arenal-PRAT sur le débit de la rivière Tempisque se résume par l'utilisation du canal principal Ouest (Figure 6-1). Une partie seulement du débit de ce canal est dédié à l'agriculture irriguée durant la saison sèche du bassin versant Tempisque. Le débit moyen du canal principal Ouest est de 29 m³/s durant la saison sèche. Cela, combiné aux débits mesurés par les stations en amont, ne peut pas expliquer un débit estimé si élevé de la rivière Tempisque durant la saison sèche.

Deuxièmement, examinons la dynamique général du débit estimé de Tempisque (Figure 6-3). Les données disponibles n'ont permis d'estimer le débit de la Tempisque que de mai 2013 à août 2016, avec deux mois de données manquantes en novembre et décembre 2015. Ce faible ensemble de données limite la capacité à tirer des conclusions sur la détection d'une éventuelle saisonnalité annuelle. Cependant, les résultats demeurent discutables, avec des débits estimés qui ne montrent pas d'augmentation significative pendant la saison des pluies, et qui restent élevés durant la saison sèche. Enfin, le pic hydrique survenant en janvier 2014, 2015 et 2016 ne peut être expliqué ni par des phénomènes naturels, ni par des activités anthropiques.

Incertitudes

La Figure 7-2 représente le débit calculé des rivières Tempisque et Bebedero avec leur intervalle de confiance, $\pm \sigma_Q$, déterminé à l'aide de la formule de propagation des incertitudes.

Notons que c'est que l'incertitude liée au choix du coefficient de Manning qui constitue la contribution la plus significative à l'incertitude totale.

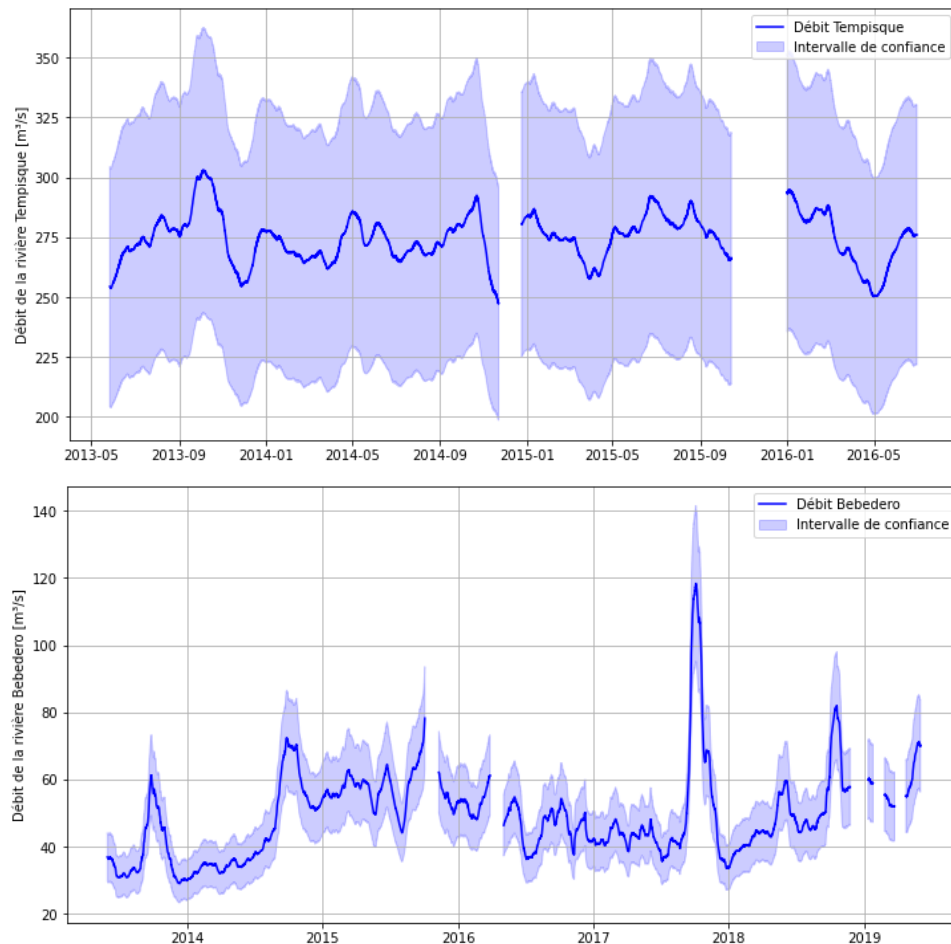


Figure 7-2 : Débit de la rivière Tempisque (haut) et Bebedero (bas) avec intervalle de confiance au fil du temps

Pour rappel, les résultats du débit calculé de la Tempisque sont surprenants et difficilement explicables (Section 5.1.2.). Bien que le rapport σ_Q sur Q (débit) soit de l'ordre de 20% pour les deux rivières, l'intervalle de confiance de la Tempisque est beaucoup plus large en raison de la différence de taille entre celles-ci. Cela indique que l'incertitude associée à cette méthodologie augmente avec la taille de la rivière.

De manière plus générale, une considération non prise en compte dans la formule de la propagation des incertitudes concerne les données sur la hauteur d'eau utilisées dans la formule de Manning-Strickler. En effet, il existe une incertitude, difficilement quantifiable, concernant la méthodologie appliquée pour retirer les effets des fluctuations des marées sur le niveau d'eau mesurés par les stations.

7.2 Caractérisation de la dynamique sédimentaire dans le golfe de Nicoya et les rivières Tempisque et Bebedero

Caractérisation spatio-temporelle

La Figure 6-9 a été construite dans le but de tester l'hypothèse selon laquelle la majorité des sédiments présents dans le golfe de Nicoya sont transportés par les rivières Tempisque et Bebedero. L'affluent principal du golfe de Nicoya étant la rivière Tempisque, elle-même affluent de la rivière Bebedero à environ 4 km de l'estuaire.

L'hypothèse inverse est que l'effet des marées joue un rôle majeur dans la remobilisation des sédiments dans les zones côtières. Cela est spécifié dans l'étude de (Quirós, 2001) qui évoque cette remobilisation dans certains secteurs côtiers, sans spécifier lesquels. De plus, selon lui cet effet serait amplifié durant la saison sèche.

La méthodologie appliquée ici ne permet pas d'avancer que l'effet décrit par (Quirós, 2001) n'existe pas. Cependant, comme le montre la Figure 6-9 la dynamique du panache de sédiments semble majoritairement être conduite par la rivière Tempisque et non par les secteurs à proximité des côtes, où la fréquence de détection des sédiments n'est pas significativement plus importante que dans le reste du golfe.

Ainsi, les résultats de ces images composites confirment qu'il est pertinent de comparer ces résultats à ceux de la dynamique sédimentaire observée dans les rivières Tempisque et Bebedero.

Caractérisation de la dynamique sédimentaire générale

La Figure 6-8 montre une augmentation notable de la taille du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya durant la saison sèche, durant la même période la Figure 6-13 montre une augmentation de la charge en sédiments dans la rivière Bebedero et la Figure 6-14 montre des concentrations en sédiments importantes dans la rivière Tempisque.

Les résultats de la sédimentation dans les rivières Tempisque et Bebedero sont cohérents avec ceux de (Delgado-sanchez, 2001) qui montrent une sédimentation et des concentrations en sédiments plus importantes dans ces rivières durant la saison sèche (Section 4.1.2).

La seule hypothèse valable concernant cette sédimentation importante durant la saison sèche est que l'érosion des sols est intensifiée par l'irrigation de l'agriculture intensive, établie par le projet Arenal – PRAT, durant la saison sèche. Les raisons principales en sont que aucun phénomène naturel ne peut expliquer une sédimentation si importante durant cette période et que les canaux d'irrigation, alimentés par les eaux mobilisées par le projet Arenal-PRAT, sont utilisés principalement durant la saison sèche.

Notons aussi que la Figure 6-8 et la Figure 6-13 montrent une sédimentation élevée dans le golfe de Nicoya et la rivière Bebedero durant la saison des pluies. Cela est certainement associé à la remobilisation des sédiments terrestres par la pluie.

Dans les Sections 7.2.1 et 7.2.2 les différents résultats concernant la dynamique sédimentaire vont être passés en revue. Des hypothèses concernant les phénomènes physiques derrière ces résultats seront émises à chaque fois. Les sections se clôturent par un commentaire lié à l'incertitude de la méthodologie associée.

7.2.1 Dynamique spatiale et temporelle du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya

Interprétation

La dynamique de la taille du panache sédimentaire, caractérisée par le clustering, est influencée par la charge en sédiments transportée par les rivières, mais aussi par la granulométrie de ces sédiments. En effet, les sédiments fins sont plus susceptibles d'être transportés sur de longues distances car ils peuvent rester en suspension dans l'eau plus facilement.

L'irrigation excessive augmente souvent l'érosion du sol, mobilisant des particules fines et des nutriments qui sont emportés sur de plus longues distances. En ce qui concerne la sédimentation due aux précipitations, la diversité de l'utilisation des sols dans le bassin versant Tempisque-Bebedero entraîne une variation significative de la taille et de la composition des sédiments. Les sédiments érodés issus des forêts et zones humides, représentant environ 31% de la couverture terrestre du bassin versant en 2000 (Jiménez et al., 2005), sont souvent plus grossiers et donc moins susceptibles de voyager très loin. Ceux issus des zones agricoles, environ 25% de la couverture terrestre du bassin versant, ont tendance à être plus fins (Y. Li et al., 2024).

Ainsi, une explication plausible de la dynamique saisonnière de la taille du panache sédimentaire dans le golfe de Nicoya pourrait être liée aux variations de la charge sédimentaire transportée par les rivières. Durant la saison sèche, l'érosion accrue due à l'irrigation intensive des cultures augmente la charge sédimentaire, avec une granulométrie généralement plus fine, favorisant ainsi le transport sur de longues distances et augmentant la taille du panache. À l'inverse, pendant la saison des pluies, la granulométrie des sédiments est souvent plus variée, ce qui pourrait limiter leur dépôt à des distances plus courtes. Une explication du maximum durant la saison des pluies serait que la charge totale des sédiments apportée par les rivières soit importante.

Incertitudes

Le choix de caractériser la dynamique du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya a été guidé par l'utilisation du clustering. Cette approche a été privilégiée car elle permet une interprétation visuelle efficace du fonctionnement de la méthode. En effet, la réflectance du panache sédimentaire dans le spectre visible diffère nettement de celle de l'eau claire, facilitant ainsi l'observation des résultats. En revanche, travailler avec des concentrations médianes ou moyennes en sédiments dans le golfe, basées sur des algorithmes de calcul de concentration, n'aurait permis aucune vérification fiable étant donné qu'il n'existe pratiquement aucune mesure in situ de concentrations.

Cependant, comme énoncé dans la Section 6.2.1, les missions Landsat semblent moins performantes pour caractériser la dynamique du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya que Sentinel-2. Plusieurs éléments peuvent expliquer cela (USGS, 2022) :

- **Résolution spatiale** : Les capteurs MSI (MultiSpectral Imager) de Sentinel-2 possèdent une résolution spatiale de 10 m contre 30 m pour les missions Landsat. Cela permet à Sentinel-2 de détecter des variations plus petites et plus détaillées dans les panaches de sédiments.
- **Fréquence de revisite** : La fréquence de revisite plus faible de Landsat (16 jours contre 5 pour Sentinel-2) entraîne un double effet négatif sur les résultats :
 - Les algorithmes de calcul de concentrations en sédiments ont été calibrés sur les résultats d'une seule mission Landsat, donc sur un ensemble de données moins important. Les algorithmes [3] et [6], calibrés respectivement sur des images de Landsat 5 et 8 et utilisés ici (Section 5.2.4), ont été calibrés chacun sur moins de 70 images contre 488 pour l'algorithme [8] basé sur Sentinel-2. Rappelons que l'utilisation de ces algorithmes est nécessaire avant de passer à l'étape du clustering (H. Wang et al., 2021).
 - Les moyennes mensuelles par années, présentées dans les Figure 6-6 et Figure 6-7), sont souvent basées sur une ou deux images seulement. Cela peut conduire à des résultats qui ne sont pas forcément représentatifs de l'état sédimentaire moyen du golfe de Nicoya durant ces mois-là.
- **Traitement des images** : Les images de Sentinel-2 utilisées de 2022 et 2023 sont de niveau 2A. Elles ont donc été traitées avec le processeur Sen2Cor, qui rend les valeurs des bandes de réflectance plus fiables en appliquant des corrections atmosphériques (en utilisant certaines bandes sensibles aux composants atmosphériques), topographiques (notamment avec des MNT fournis par le Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)), et de réflectance de surface (basées sur les corrections appliquées) (Moravec et al., 2021).
- **Qualité des capteurs** : La Figure 6-7, qui combine les résultats de Landsat 5 et 7, est construite sur plus de 90% d'images provenant de Landsat 5 en raison du problème du SLC désactivé (Section 5.2.3). Landsat 5, lancé en 1984, possède une résolution des capteurs inférieure par rapport aux générations suivantes.

7.2.2 Dynamique temporelle de la concentration et de la charge sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero

Interprétations

Les concentrations en sédiments ont été mesurées dans les rivières Tempisque et Bebedero, toutes deux influencées par les marées, au niveau de leur station de mesure respective (Section 5.1.2)(Figure 5-1). La concentration médiane annuelle de la rivière Tempisque est nettement supérieure, avec 107 mg/l (Figure 6-11), comparée à celle de la rivière Bebedero qui est de 57 mg/l (Figure 6-10).

Le débit de la rivière Tempisque est environ cinq fois supérieur à celui de la Bebedero. Le débit moyen de Tempisque est selon (Jimenez, 2001) de 284 m³/s. Le débit moyen estimé de Bebedero dans cette étude est de 49 m³/s.

Le fait que les concentrations et le débit de la Tempisque soient nettement supérieurs à ceux de la Bebedero indique que la majorité des sédiments présents dans le golfe de Nicoya proviennent certainement de la rivière Tempisque.

Intéressons-nous maintenant plus spécifiquement aux résultats de la dynamique des concentrations en sédiments interannuelles dans les rivières Tempisque et Bebedero.

Comme décrit dans la Section 4.1.1, dans la plupart des systèmes naturels, la concentration en sédiments et le débit d'une rivière sont fortement corrélés (Ghimire et al., 2024; Saad et al., 1999). Dans de tels systèmes, le débit des rivières est dirigé par les précipitations.

Cependant, dans le cas des rivières Tempisque et Bebedero, il se trouve que parfois le pic de sédiments durant la saison des pluies survient juste avant la deuxième période de précipitations intenses vers les mois de septembre et octobre. Cela est particulièrement observable pour les années 2017, 2018, 2019 et 2021 pour la rivière Tempisque (Figure 6-14), et 2017 à 2019 pour la rivière Bebedero (Figure 6-12, Tableau 6-2).

Deux hypothèses peuvent expliquer une telle dynamique :

- **Effet des précipitations antérieures** : Au Costa Rica, les mois de mai et juin sont souvent caractérisés par des précipitations importantes. Ces pluies intenses augmentent la saturation des sols, qui jusque-là étaient très secs et donc moins sensibles à l'érosion. Cela rend les sédiments plus susceptibles d'être érodés lors des précipitations futures. De plus, après des événements pluvieux importants, les sédiments peuvent déjà être partiellement décrochés, ce qui signifie que de nouvelles précipitations peuvent entraîner des pics de sédiments plus précoces et plus élevés (Walling et al., 1992; Cohen et al., 2010). Cet effet a notamment été observé dans l'étude de (Lenzi et al., 2003), qui montre que, suite aux nombreux épisodes de crues en 1994 dans le nord de l'Italie, les épisodes de crues même de faible intensité en 1995 ont conduit à une réponse plus importante dans la remobilisation des charges sédimentaires.
- **Effet de dilution** : Des précipitations continues et importantes peuvent entraîner une dilution des sédiments initialement érodés (Ghimire et al., 2024; H. Yang et al., 2024; Yu, 2002).

Cependant, pendant la saison sèche, aucun phénomène naturel connu d'une intensité suffisante ne semble pouvoir expliquer une telle augmentation de concentration en début de saison, que ce soit pour la rivière Tempisque ou la Bebedero (Section 4.1.1). Une nouvelle fois, le projet Arenal-PRAT semble être le seul élément capable d'expliquer cette dynamique particulière, notamment la remobilisation des sédiments terrestres fins par l'irrigation intensive des cultures.

Incertitudes

L'algorithme utilisé dans cette analyse ([8], Section 5.2.4) n'a pas été calibré spécifiquement pour cette zone d'étude et que l'absence de mesures in-situ ne permet aucune vérification des résultats obtenus. De plus, l'absence de corrections atmosphériques des images Sentinel-2 entre 2015 et 2021 pourrait altérer les signaux reçus par les capteurs du satellite.

Cependant, il est notable que le clustering du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya, réalisé sur la base des résultats de cet algorithme, a produit des résultats satisfaisants.

7.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle du bassin versant

7.3.1 Interprétation des résultats de l'USLE

Les résultats de l'application de l'USLE montrent que la part des sédiments remobilisés par des processus naturels, indiquent une remobilisation importante des sédiments pendant la saison des pluies (Figure 6-15).

Bien que les terres soient plus sensibles à l'érosion durant la saison sèche (végétation moins dense, terres cultivées laissées nues, etc.), la répartition annuelle déséquilibrée des précipitations dépasse cet effet.

La dynamique du profil érosif calculé ici diffère de la dynamique sédimentaire observée dans le golfe de Nicoya (Figure 6-8) et dans la rivière Bebedero (Figure 6-13). En effet, en ne tenant compte que des processus naturels, on n'observe pas d'augmentation significative des sédiments remobilisés durant la saison sèche. Ce modèle basé sur l'USLE constitue une nouvelle preuve évidente que le projet Arenal-PRAT perturbe la dynamique sédimentaire dans le bassin versant.

Examinons maintenant plus spécifiquement les contributions à l'érosion totale dans le bassin versant en fonction des différentes couvertures du sol sur base de l'USLE. En 1956, il n'y avait pas encore de parcelle dédiée à l'agriculture dans le bassin versant. Les 24,7% de la superficie totale aujourd'hui destinée à l'agriculture étaient autrefois des forêts, des pâtures, des zones humides et des mangroves.

Tableau 7-1 : Comparaison de l'érosion moyenne annuelle dans le bassin versant Tempisque-Bebedero en 1956 et en 2000 sur base des résultats de l'USLE

Date	Surface cultivée [%]	Erosion sols cultivés [t/ha/an]	Surface forêts/pâtures/zones humides/mangroves [%]	Erosion forêts/pâtures/zones humides/mangroves [t/ha/an]	Erosion bassin versant Tempisque-Bebedero [t/an]
1956	0	0.47	99.8	0.31	168 000
2000	24.7		74.1		190 000

Comme le montre le Tableau 7-1, le changement d'occupation des sols entre 1956 et 2010 a déjà entraîné une augmentation significative de l'érosion causée exclusivement par des phénomènes naturels dans le bassin versant. Ce changement d'occupation des sols est principalement dû à l'expansion significative des terres agricoles depuis la fin des années 1950 et à la déforestation pour étendre les zones de pâturages jusqu'aux années 1970. Cependant, il est important de noter que la déforestation est interdite depuis 1980 et que certaines zones commencent à être reboisées.

Il est essentiel de souligner que l'augmentation de l'érosion dans le bassin versant depuis 1956, liée aux changements dans l'utilisation des terres, est en partie due au projet Arenal-PRAT. Ce projet, en favorisant le développement de l'irrigation, a encouragé la conversion des terres en zones agricoles. Environ 50% des cultures dans le bassin sont désormais irriguées, permettant la culture de la canne à sucre et du melon, auparavant difficile. Bien que cette transformation des terres en zones irriguées ait stimulé le développement économique de la région, elle a également augmenté l'érosion dans le bassin versant.

Il est également important de noter que les surfaces non reprises dans ce tableau concernent les masses d'eau et les zones urbaines (0,2% du total en 1956 et 1,2% du total en 2010). L'érosion liée à ces surfaces est proportionnellement très faible par rapport à l'érosion totale.

7.3.2 Incertitudes des résultats de l'USLE

L'USLE est un modèle répandu et simple d'utilisation, mais qui présente certaines limites (Renard et al., 1997) :

- **Choix des constantes** : Le choix des différentes constantes est sujet à des approximations qui peuvent ne pas refléter fidèlement les variations au sein du bassin.
- **Facteurs de l'USLE** : Les facteurs utilisés sont des données moyennées et invariables entre les différentes années, ce qui ne reflète pas les conditions spécifiques d'une année donnée ou d'événements extrêmes.
- **Application uniforme** : Par définition, certains facteurs, comme le coefficient du potentiel érosif de la pluie, sont appliqués de manière uniforme à l'ensemble du bassin versant. En réalité, la relation entre ce facteur et la couverture végétale est plus complexe.
- **Limitation initiale** : L'USLE a été conçue initialement pour des parcelles individuelles et ne prend donc pas en compte les interactions entre les différentes parcelles ou couvertures de sols.

De plus, les choix relatifs au Sediment Delivery Ratio (SDR) et à la construction de la fonction de transfert (Section 5.3.1) sont également sujets à des approximations. Ces choix ont été faits sur la base d'études précédentes dont les zones et objectifs présentent des similarités avec la construction du profil érosif du bassin versant Tempisque-Bebedero, mais qui ne sont théoriquement pas directement applicables ici.

7.3.3 Impact de l'irrigation agricole sur l'érosion des sols dans le bassin versant Tempisque-Bebedero

Types d'irrigation

Il est indéniable que le projet Arenal-PRAT impacte la dynamique sédimenteuse dans le bassin versant Tempisque-Bebedero, en augmentant la remobilisation de sédiments. Il semble que l'impact de ce projet soit principalement dû à l'irrigation des cultures et aux changements d'occupation des sols.

La méthode d'irrigation utilisée dans le bassin versant Tempisque-Bebedero est l'irrigation par gravité, spécifiquement l'irrigation par inondation et par sillons.

Premièrement, l'irrigation par inondation consiste à libérer l'eau directement sur le terrain de culture, qui se répand alors sur la surface et pénètre progressivement dans le sol. Cette méthode est la plus répandue dans le bassin versant et vise surtout les cultures de canne à sucre (58% de la surface totale irriguée), une plante pluriannuelle nécessitant une grande quantité d'eau, et le riz (24% de la surface totale irriguée), qui se cultive en champs inondés (Senara, 2024).

L'irrigation abondante des cultures de canne à sucre peut causer la compaction du sol, réduisant ainsi sa perméabilité et augmentant le ruissellement. L'eau peut aussi désagréger la structure du sol. Dans le cas des cultures de riz, le sol peut se déstructurer en raison de l'eau stagnante. L'irrigation intensive du riz, suivie de périodes de repos et de dessèchement des champs entre les saisons, entraîne une saturation prolongée des sols, les rendant plus sujets à l'érosion.

Ensuite, l'irrigation par sillons consiste à diriger l'eau dans des canaux étroits entre les rangées de cultures. L'eau s'écoule par gravité le long de ces sillons, permettant une pénétration plus ciblée que l'irrigation par inondation. Les cultures principales sujettes à ce type d'irrigation sont les cultures de fourrage (4%), des cultures standards comme le maïs et le sorgho (10%), et les cultures de melons (1,6%).

Ce type d'irrigation peut également causer l'érosion des sols, en concentrant l'eau dans les canaux, ce qui peut provoquer l'érosion le long des sillons. Un phénomène de compaction peut aussi se produire en cas d'irrigation abondante (Senara, 2024).

Enfin, la pisciculture représente 2,4% de la surface totale irriguée. L'irrigation est ici utilisée pour maintenir les niveaux d'eau dans les bassins, ce qui ne cause a priori pas d'érosion directe, sauf potentiellement lors du drainage des bassins (FAO, 2024).

Types de sols

Les quatre principaux types de sols dans le bassin versant Tempisque-Bebedero sont les Inceptisols (56%), les Entisols (34%) et les Mollisols et Vertisols (un peu moins de 10%) (Guzmán Arias & Calvo-Alvarado, 2012). Les Mollisols, très fertiles et riches en matière organique, sont abondants entre les stations Guardia et La Guinea dans la rivière Tempisque (Figure 5-1) dans le sous-district d'irrigation Tempisque (Figure 6-1), une région intensivement cultivée. Grâce à leur teneur élevée en matière organique et à leur bonne structure, les Mollisols sont généralement peu vulnérables à l'érosion, sauf en cas d'agriculture intensive, comme c'est le cas aujourd'hui, ce qui augmente leur susceptibilité (Vazquez & Muneeppeerakul, 2022).

L'agriculture représentant environ 25% de la couverture terrestre du bassin versant Tempisque-Bebedero, les autres types de sols sont également utilisés. Les Entisols, en raison de leur faible développement de structure et de leur manque de matière organique, sont fortement vulnérables à l'érosion. On les retrouve dans l'ensemble des sous-districts d'irrigation, situés un peu plus au nord que les Mollisols. Les Inceptisols, légèrement plus développés que les Entisols, montrent une certaine accumulation de matière organique, mais peuvent encore être sujets à l'érosion. Ils sont également présents dans l'ensemble des sous-districts d'irrigation et ont tendance à être situés un peu plus au nord que les Entisols (Figure D – 1).

7.3.4 Conséquences positives et négatives du projet Arenal-PRAT sur le bassin versant Tempisque-Bebedero

Les effets du projet Arenal-PRAT ont été observés à travers la réalisation des trois objectifs. Arenal-PRAT perturbe les régimes hydrologiques et la sédimentation des masses d'eau dans le bassin versant Tempisque-Bebedero et dans le golfe de Nicoya. Cette section a pour but de passer en revue les conséquences de la mise en place de ce projet à travers les résultats présentés ici.

Effets positifs

- **Optimisation de l'utilisation de l'eau** : Le projet aide à soutenir la production agricole, autrefois limitée par des conditions climatiques sèches et une faible disponibilité naturelle en eau durant la saison sèche. Les terrains plats ou légèrement inclinés rendent le bassin adapté à l'agriculture irriguée.

- **Développement économique** : En favorisant le développement agricole, le projet Arenal-PRAT crée de nouvelles sources d'emploi et augmente les revenus des producteurs. Environ 800 producteurs bénéficient aujourd'hui du projet (Arriagada, 2004).
- **Croissance axée sur les exportations** : Le Costa Rica a réorienté son modèle économique vers une croissance axée sur les exportations au cours des dernières décennies. Le projet Arenal-PRAT participe à la production agricole de produits destinés au marché international. Les infrastructures d'irrigation permettent la culture de produits à haute valeur ajoutée comme le riz et la canne à sucre destinés à l'exportation. Les rendements des cultures irriguées sont également moins sujets aux variations climatiques (EFD, 2013).

Effets négatifs

- **Court terme**
 - Perte de fertilité des sols : L'érosion entraîne la perte de la couche supérieure du sol, riche en nutriments essentiels pour la croissance des plantes, réduisant ainsi la fertilité des sols.
 - Impact sur la pêche : La saison sèche est considérée comme la meilleure période pour la pêche dans le golfe de Nicoya. L'augmentation de la turbidité peut avoir un impact significatif sur la pêche en diminuant la production primaire. Le phytoplancton, à la base de la chaîne alimentaire marine, nécessite la lumière solaire pour la photosynthèse. Sa croissance peut être limitée dans les eaux turbides, impactant ainsi les espèces qui s'en nourrissent (Vargas, 1995). L'augmentation de la turbidité peut également entraîner le déplacement des espèces vers des eaux plus claires et sécurisées (Alms & Wolff, 2020).
- **Long terme**
 - **Modification des habitats** : L'accumulation de sédiments modifie la structure des fonds des rivières et des zones côtières. Les substrats sableux ou graveleux, cruciaux pour la ponte de certains poissons et le développement larvaire de plusieurs invertébrés, peuvent être recouverts de boues fines, réduisant les zones propices à la reproduction et au développement (Jonathan et al., 2019).
 - **Réduction de l'oxygène** : En diminuant la photosynthèse, les eaux turbides entraînent une baisse des niveaux d'oxygène, préjudiciable à la faune aquatique (Pacific Coastal and Marine Science Center, s. d.).
 - **Déséquilibre de la biodiversité** : L'augmentation de la turbidité de l'eau peut créer un déséquilibre pour la biodiversité locale. Certaines espèces se développent mieux dans des eaux turbides et pauvres en oxygène, tandis que d'autres sont plus sensibles, ce qui peut entraîner leur migration ou extinction, perturbant les chaînes alimentaires locales.
- **Très long terme**
 - **Conséquences climatiques régionales** : À plus long terme, l'augmentation de la turbidité dans le bassin versant pourrait avoir des conséquences sur le climat régional via un cycle de feedback climatique négatif. Une eau turbide peut réduire l'évapotranspiration en raison du stress de la végétation, modifiant ainsi les régimes locaux de température et de précipitations. La hausse de température de l'eau pourrait amplifier les températures aériennes locales, perturbant les cycles hydrologiques et les dynamiques de sédimentation. Ces

changements pourraient affecter la formation des nuages et les modèles de précipitation, exacerbant les cycles de feedback climatique et menaçant la stabilité écologique régionale. Bien que ces conséquences soient hypothétiques, elles méritent d'être considérées (Talib & Randhir, 2023).

7.3.5 Données manquantes et perspectives futurs

Il est indéniable que le projet Arenal-PRAT impacte la dynamique sédimenteuse dans le bassin versant Tempisque-Bebedero en augmentant la remobilisation des sédiments terrestres. Cependant, les incertitudes liées aux différentes étapes méthodologiques, les séries temporelles de données trop courtes, discontinues ou manquantes, ainsi que le manque de mesures in-situ rendent difficile la quantification exacte de cet impact.

Il semble y avoir des enjeux écologiques importants derrière le projet Arenal-PRAT qui pourraient menacer la biodiversité et les écosystèmes locaux. Rappelons que le Parc National Palo Verde (PVNP), situé au cœur du bassin versant Tempisque-Bebedero, représente une zone de grande valeur écologique dont les dégradations observées ces quarante dernières années pourraient être liées au projet.

Cependant, avant de prendre des mesures pour protéger les écosystèmes locaux, il est essentiel de cibler plus précisément les problématiques. Aujourd'hui, il n'existe pratiquement aucune information sur le retour des eaux usées et des eaux évacuées ayant servi à l'irrigation dans les rivières Tempisque et Bebedero. Il serait intéressant de quantifier la part des eaux usées retournées dans les rivières et d'évaluer leur concentration et leur composition en sédiments.

L'analyse de la composition des sédiments dans les rivières Tempisque et Bebedero durant la saison sèche permettrait de confirmer le lien entre l'irrigation et l'érosion des parcelles agricoles. Les sédiments issus des parcelles agricoles sont supposés être riches en matière organique et en nutriments.

De plus, certaines cultures ou certaines zones, en fonction des types de sols et du degré de pente, sont sans doute plus problématiques que d'autres. Il serait intéressant de multiplier les analyses en fonction de ces variables pour mieux comprendre et cibler les sources de sédimentation problématique.

8 Conclusion

L'étude avait pour objectif principal d'examiner l'impact de la mise en œuvre du projet Arenal-PRAT, incluant la construction de barrages et de canaux d'irrigation, sur la dynamique sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero, ainsi que dans le golfe de Nicoya. Cette initiative s'inscrivait dans un contexte de dégradation écologique observée depuis les années 1980 dans le bassin versant Tempisque - Bebedero.

Le premier objectif consistait à caractériser le contexte hydro-climatique et agricole du bassin. L'analyse a révélé une modification significative des régimes hydrologiques naturels durant la saison sèche, due à l'introduction du projet d'irrigation Arenal-PRAT, qui a augmenté la disponibilité en eau durant cette période. Cette perturbation affecte davantage le bassin versant Bebedero que celui de Tempisque. Ces résultats sont cohérents avec le but premier de la mise en place du projet PRAT : passer d'un système d'agriculture extensif à intensif en fournissant de l'eau, jusque-là un facteur limitant, aux zones agricoles durant la saison sèche.

Le deuxième objectif visait à caractériser la dynamique sédimentaire du golfe de Nicoya et des rivières Tempisque et Bebedero. Les résultats ont montré une dynamique de la taille du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya et de la charge en sédiments transportée dans les rivières, liée au calendrier hydrologique du Costa Rica. On observe un maximum durant la saison des pluies et un second maximum durant la saison sèche, attribué à l'utilisation du réseau d'irrigation.

Enfin, le dernier objectif cherchait à expliquer cette dynamique sédimentaire en relation avec le contexte hydro-climatique et agricole. Le modèle de l'USLE a permis de confirmer que le maximum sédimentaire durant la saison des pluies est expliqué par des causes naturelles, à savoir la remobilisation des sédiments terrestres par la pluie. Ce modèle a également mis en lumière que l'augmentation systématique du panache de sédiments dans le golfe de Nicoya et de la charge et concentration dans les rivières durant la saison sèche ne peut pas être expliquée par des causes naturelles seules. L'érosion des sols agricoles due à l'agriculture intensive rendue possible par l'irrigation abondante est la seule explication plausible à cette augmentation.

Ces pratiques d'irrigation intensives, en plus de causer la dégradation des sols, pourraient avoir de nombreux effets négatifs sur la biodiversité locale et contribuer aux perturbations des écosystèmes observées dans le PVNP depuis quarante ans.

Pour finir, dans une perspective d'études futures, il serait intéressant de mener des recherches sur le terrain afin d'étudier plus en détail la composition et l'origine des sédiments, ainsi que les effets de l'irrigation sur l'érosion, pour mieux cibler les interventions nécessaires.

I. Bibliographie

- Akhtar, N., Izzuddin, M., Ishak, S., Bhawani, S., & Umar, K. (2021). Various Natural and Anthropogenic Factors Responsible for Water Quality Degradation : A Review. *Water*, 13. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Alexandra, C.-N. (2018, juin 20). How to reconcile dams and sediment transport? *Encyclopedia of the Environment*. <https://www.encyclopédie-environnement.org/en/water/how-reconcile-dams-sediment-transport/>
- Alms, V., & Wolff, M. (2020). Identification of Drivers of Change of the Gulf of Nicoya Ecosystem (Costa Rica). *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00707>
- Alonso, A. (2017). *NOVEL QUANTIFICATION OF LONG-TERM HYDROLOGICAL AND LANDSCAPE SPATIOTEMPORAL DYNAMICS OF COUPLED NATURAL HUMAN SYSTEMS: THE CASE STUDY OF THE TEMPISQUE-PALO VERDE NATIONAL PARK COASTAL WETLAND, COSTA RICA*.
- Arriagada, R. A. (2004). *ESTIMATING PROFITABILITY AND FERTILIZER DEMAND FOR RICE PRODUCTION AROUND THE PALO VERDE NATIONAL PARK, COSTA RICA*.
- Astorga, Y. (2007). *Recurso Aguas Superficiales y Subterráneas con énfasis en las principales cuencas hidrográficas*. <https://repositorio.conare.ac.cr/handle/20.500.12337/499>
- Ávila, L., Silveira, R., Campos, A., Rogiski, N., Gonçalves, J., Scortegagna, A., Freitas, C., Aver, C., & Fan, F. (2022). Comparative Evaluation of Five Hydrological Models in a Large-Scale and Tropical River Basin. *Water*, 14(19), Article 19. <https://doi.org/10.3390/w14193013>
- Bedolla-Rivera, H. I., Negrete-Rodríguez, M. de la L. X., Gámez-Vázquez, F. P., Álvarez-Bernal, D., & Conde-Barajas, E. (2023). Analyzing the Impact of Intensive Agriculture on Soil Quality : A Systematic Review and Global Meta-Analysis of Quality Indexes. *Agronomy*, 13(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082166>
- Bhandari, D., Joshi, R., Regmi, R. R., & Awasthi, N. (2021). Assessment of Soil Erosion and Its Impact on Agricultural Productivity by Using the RMMF Model and Local Perception : A Case Study of Rangun Watershed of Mid-Hills, Nepal. *Applied and Environmental Soil Science*, 2021, e5747138. <https://doi.org/10.1155/2021/5747138>
- Birkel, C., & Sánchez-Murillo, R. (2017). *The Tempisque-Bebedero catchment system : Energy-water-food consensus in the seasonally dry tropics of northwestern Costa Rica* (p. 72-77).
- Canada, E. et C. climatique. (2007, janvier 9). *Pollution de l'eau : Érosion et sédimentation* [Lignes directrices]. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/pollution-causes-effects/erosion-sedimentation.html>
- Carpenna. (s. d.). Consulté 13 mai 2024, à l'adresse <https://abe.ufl.edu/faculty/carpenna/files/pdf/research/Tempisque%20Water%20Manag%20Sust-Prospectus-30%20Apr2013.pdf>
- Castillo, R. M., & Crisman, T. L. (2019). The Role of Green Infrastructure in Water, Energy and Food Security in Latin America and the Caribbean : Experiences, Opportunities and Challenges. *IDB Publications*. <https://doi.org/10.18235/0001920>

Chow, M.-S., Chow, Robert. (1959). *Manning's Equation Gauckler(1867)–Manning–Strickler (1923)—Ppt download*. <https://slideplayer.com/slide/12708904/>

Climate-Data. (2021). *Cañas climate : Weather Cañas & temperature by month*. <https://en.climate-data.org/north-america/costa-rica/guanacaste/canas-32456/#climate-graph>

Copernicus. (2022, janvier 25). *Sentinel-3*. Sentinel Online. <https://copernicus.eu/missions/sentinel-3>

Dabrowski, Y. (2014). « *Hydraulique urbaine et hydraulique rurale* ».

Damasceno, J., & Couto, P. (2018). *Methods for Evaluation of Measurement Uncertainty*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74873>

Delgado-sanchez, P. (2001). *Factors Affecting Community Structure of Mangroves Associated With Point Bars and Islands in a Costa Rican Estuary*. [Doctor of Philosophy, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College]. https://doi.org/10.31390/gradschool_disstheses.276

Digital Earth Africa. (2021). *Generating composite images—Digital Earth Africa 2021 documentation*. https://docs.digitalearthafrika.org/en/latest/sandbox/notebooks/Frequently_used_code/Generating_composites.html

dos Santos, J. C. N., de Andrade, E. M., Medeiros, P. H. A., Guerreiro, M. J. S., & de Queiroz Palácio, H. A. (2017). Effect of Rainfall Characteristics on Runoff and Water Erosion for Different Land Uses in a Tropical Semiarid Region. *Water Resources Management*, 31(1), 173-185. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1517-1>

Duarte, S. M. (2022). Interacción de fenómenos naturales y actividades antropogénicas en la Cuenca del Río Tempisque en la Provincia de Guanacaste, Costa Rica : Interaction of natural phenomena and anthropogenic activities in the Tempisque River Basin at the Province of Guanacaste, Costa Rica. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, 5(5), 54-74. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n5-004>

Earth Resources Observation And Science (EROS) Center. (2020). *Collection-2 Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM) Level-2 Science Products* [jeu de données]. [object Object]. <https://doi.org/10.5066/P9IAXOVV>

EFD. (2013). *Policy interactions : Impact Evaluation of the Arenal Tempisque Irrigation Project*. EfD - Initiative. <https://www.efdinitiative.org/news/policy-interactions-impact-evaluation-arenal-tempisque-irrigation-project>

Elmoaty, M., & Elsamman, T. (2020). Manning roughness coefficient in vegetated open channels. *Water Science*, 34, 121-128. <https://doi.org/10.1080/11104929.2020.1794706>

Elst, N., Delorey, A., Shelly, D., & Johnson, P. (2016). Fortnightly modulation of San Andreas tremor and low-frequency earthquakes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113, 201524316. <https://doi.org/10.1073/pnas.1524316113>

EOS Data Analytics. (2021, décembre 15). *Sentinel-2 : Satellite Imagery, Overview, And Characteristics*. <https://eos.com/find-satellite/sentinel-2/>

ESA. (s. d.). *SPOT 5—Earth Online*. Consulté 17 mai 2024, à l'adresse <https://earth.esa.int/eogateway/missions/spot-5>

FAO. (2024). *Home | Food and Agriculture Organization of the United Nations*. <https://www.fao.org/home/en>

Farr, T. G., Rosen, P. A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., & Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>

Frémion, F. (2017). *Dynamique des flux sédimentaires et des éléments métalliques en lien avec l'exploitation courante et exceptionnelle d'un barrage hydroélectrique*.

Ghimire, S., Singh, U., Panthi, K., & Bhattarai, P. (2024). Suspended Sediment Source and Transport Mechanisms in a Himalayan River. *Water*, 2024, 1063. <https://doi.org/10.3390/w16071063>

Google Earth Engine. (s. d.-a). *Ee.Clusterer.wekaKMeans | Google Earth Engine*. Google for Developers. Consulté 10 mars 2024, à l'adresse <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-clusterer-wekakmeans>

Google Earth Engine. (s. d.-b). Consulté 20 mai 2024, à l'adresse <https://earthengine.google.com>

Guzmán Arias, I., & Calvo-Alvarado, J. C. (2012). Recursos hídricos de la Cuenca Alta del Río Tempisque, Costa Rica (Nota técnica). *Revista Tecnología En Marcha*, 25(4), 63. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i4.620>

HDX. (2024). *Costa Rica : Rainfall Indicators at Subnational Level - cri-rainfall-adm2-full.csv - Humanitarian Data Exchange*. <https://data.humdata.org/dataset/cri-rainfall-subnational/resource/58e13a5d-0a15-4b91-beb5-c877ecec44a0>

Hund, S. V., Grossmann, I., Steyn, D. G., Allen, D. M., & Johnson, M. S. (2021). Changing Water Resources Under El Niño, Climate Change, and Growing Water Demands in Seasonally Dry Tropical Watersheds. *Water Resources Research*, 57(11), e2020WR028535. <https://doi.org/10.1029/2020WR028535>

James. (2001). *Band Combinations*. https://web.pdx.edu/~nauna/resources/10_BandCombinations.htm

Jarrard, R., & Vanden Berg, M. (2006). Sediment mineralogy based on visible and near-infrared reflectance spectroscopy. *Geological Society, London, Special Publications*, 267, 129-140. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2006.267.01.09>

Jiménez, Calvo-Alvarado, J., F., P., & González, E. (2005). *Conceptualization of environmental flow in Costa Rica : Preliminary determination for the Tempisque river*.

Jimenez, J. (2001). *La cuenca del Río Tempisque : Perspectivas para un manejo integrado*.

Jonathan, J., District, A., Aubuchon, J. S., Abraham, D., Posner, A., & Brown, J. (2019). *Acoustic Measurements on a Shallow, Sand-Bed River : A Case Study from the Rio Grande*.

Khojasteh, D., Chen, S., Felder, S., Heimhuber, V., & Glamore, W. (2021). Estuarine tidal range dynamics under rising sea levels. *PLOS ONE*, 16(9), e0257538. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257538>

Knudby, A. (2021). *Mesures radiométriques*. <https://ecampusontario.pressbooks.pub/teledetection/chapter/chapter-2-mesures-radiometriques/>

Kress, N., Coto, S. L., Brenes, C. L., Brenner, S., & Arroyo, G. (2002). Horizontal transport and seasonal distribution of nutrients, dissolved oxygen and chlorophyll-*a* in the Gulf of Nicoya, Costa Rica: A tropical estuary. *Continental Shelf Research*, 22(1), 51-66. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00064-4](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00064-4)

Lacaux, J. P., Tourre, Y. M., Vignolles, C., Ndione, J. A., & Lafaye, M. (2007). Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing : Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106(1), 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.012>

Lenzi, M. A., Mao, L., & Comiti, F. (2003). Interannual variation of suspended sediment load and sediment yield in an alpine catchment. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 899-915. <https://doi.org/10.1623/hysj.48.6.899.51425>

Li, T., Wang, S., Liu, Y., Fu, B., & Gao, D. (2020). Reversal of the sediment load increase in the Amazon basin influenced by divergent trends of sediment transport from the Solimões and Madeira Rivers. *CATENA*, 195, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104804>

Li, Y., Xu, Z., Zhan, X., & Zhang, T. (2024). Summary of Experiments and Influencing Factors of Sediment Settling Velocity in Still Water. *Water*, 16(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/w16070938>

Luo, H.-R., Smith, L. M., Allen, B. L., & Haukos, D. A. (1997). Effects of Sedimentation on Playa Wetland Volume. *Ecological Applications*, 7(1), 247-252. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0247:EOSOPW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0247:EOSOPW]2.0.CO;2)

Mancino, G., Nolè, A., Salvati, L., & Ferrara, A. (2016). In-between forest expansion and cropland decline : A revised USLE model for soil erosion risk under land-use change in a Mediterranean region. *Ecological Indicators*, 71, 544-550. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.07.040>

Mazour, M., & Roose, E. (2002). *Influence de la couverture végétale sur le ruissellement et l'érosion des sols sur parcelles d'érosion dans des bassins versants du nord-ouest de l'Algérie*.

Merchán, D., Casalí, J., Del Valle de Lersundi, J., Campo-Bescós, M. A., Giménez, R., Preciado, B., & Lafarga, A. (2018). Runoff, nutrients, sediment and salt yields in an irrigated watershed in southern Navarre (Spain). *Agricultural Water Management*, 195, 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.10.004>

Mondejar, J. P., & Tongco, A. F. (2019). Near infrared band of Landsat 8 as water index : A case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines. *Sustainable Environment Research*, 29(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s42834-019-0016-5>

Monge, A. W., & González, A. M. R. (2021). Análisis de la calidad de aguas de vertido en el Distrito de RiegoArenal-Tempisque (DRAT). *Ingeniería*, 31(2), 57-79.

- Moravec, D., Komárek, J., López-Cuervo Medina, S., & Molina, I. (2021). Effect of Atmospheric Corrections on NDVI : Intercomparability of Landsat 8, Sentinel-2, and UAV Sensors. *Remote Sensing*, 13(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/rs13183550>
- Murcia, C., Muñoz-Carpena, R., & Sasa, M. (2012). Modelaje integrado de cambio climático y socioeconómico en el manejo sostenible del recurso hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque : Una propuesta multidisciplinaria. *Revista de Ciencias Ambientales*, 43, 47. <https://doi.org/10.15359/rca.43-1.5>
- Nahib, I., Wahyudin, Y., Amhar, F., Ambarwulan, W., Nugroho, N. P., Pranoto, B., Cahyana, D., Ramadhani, F., Suwedi, N., Darmawan, M., Turmudi, T., Suryanta, J., & Karolinoerita, V. (2024a). Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution of Soil Erosion under Diverse Subwatershed Based on Geospatial Perspective : A Case Study at Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *Scientifica*, 2024, e7251691. <https://doi.org/10.1155/2024/7251691>
- Nahib, I., Wahyudin, Y., Amhar, F., Ambarwulan, W., Nugroho, N., Pranoto, B., Cahyana, D., Ramadhani, F., Suwedi, N., Darmawan, M., Turmudi, T., Suryanta, J., & Karolinoerita, V. (2024b). Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution of Soil Erosion under Diverse Subwatershed Based on Geospatial Perspective : A Case Study at Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *Scientifica*, 2024, 1-20. <https://doi.org/10.1155/2024/7251691>
- Osland, M. J., González, E., & Richardson, C. J. (2011). Restoring diversity after cattail expansion : Disturbance, resilience, and seasonality in a tropical dry wetland. *Ecological Applications: A Publication of the Ecological Society of America*, 21(3), 715-728. <https://doi.org/10.1890/09-0981.1>
- Pacific Coastal and Marine Science Center. (s. d.). *Sediment Transport in Coastal Environments / U.S. Geological Survey*. Consulté 12 mai 2024, à l'adresse <https://www.usgs.gov/centers/pcmssc/science/sediment-transport-coastal-environments>
- Pacini, N., Donabaum, K., Henry De Villeneuve, P., Konecny, R., Pineschi, G., Pochon, Y., Salerno, F., Schwaiger, K., Tartari, G., Wolfram, G., & Zieritz, I. (2013). Water-quality management in a vulnerable large river : The Nile in Egypt. *International Journal of River Basin Management*, 11(2), 205-219. <https://doi.org/10.1080/15715124.2013.781032>
- Paris, C., Vendittozzi, C., & Basaglia, A. (2013, septembre 9). *Experimentation of fiber optic FBG sensors in a CFRP aerospace component*.
- Peel, T. (2013, novembre 29). *Algorithmes de Poursuite Stochastiques et Inégalités de Concentration Empiriques pour l'Apprentissage Statistique. (Stochastic Pursuit Algorithms and Empirical Concentration Inequalities for Machine Learning)*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Algorithmes-de-Poursuite-Stochastiques-et-de-pour-Peel/5f369a1cc1fedd25b9be3db5e5a76a088fcd2aed>
- Pereira, P., Bogunovic, I., Inacio, M., Zhao, W., & Barcelo, D. (2023). *Agriculture intensification impacts on soil and water ecosystem services* (EGU23-1423). EGU23. Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1423>
- Phạm, V., Nguyen, H., Pahlevan, N., Oanh, L., Nguyen, T., & Nguyen, N. (2018). Using Landsat-8 Images for Quantifying Suspended Sediment Concentration in Red River (Northern Vietnam). *Remote Sensing*, 10, 1841. <https://doi.org/10.3390/rs10111841>

Qian, K., Ma, X., Wang, Y., Yuan, X., Yan, W., Liu, Y., Yang, X., & Li, J. (2022). Effects of Vegetation Change on Soil Erosion by Water in Major Basins, Central Asia. *Remote Sensing*, 14, 5507. <https://doi.org/10.3390/rs14215507>

Quirós, B. H., & Hernández, M. T. (1997). El proyecto hidroeléctrico de Arenal y el impacto en su entorno económico y social (1950-1994). *Revista de Historia*, 36, Article 36.

Rahman, M., Islam, G. M. T., & Rahman, Md. M. (2021). Remote Sensing for Monitoring Suspended Sediment Concentration in the Lower Ganges (Padma) River. In L. Ribbe, A. Haarstrick, M. Babel, S. Dehnavi, & H. K. Biesalski (Éds.), *Towards Water Secure Societies : Coping with Water Scarcity and Quality Challenges* (p. 183-196). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50653-7_14

Ramahaimandimby, Z., Randriamaherisoa, A., Vanclooster, M., & Biëlders, C. L. (2023). Driving Factors of the Hydrological Response of a Tropical Watershed : The Ankavia River Basin in Madagascar. *Water*, 15(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/w15122237>

Renard, K., Foster, G. R., Weesies, G., McCool, D., & Yoder, D. (1997, mars 1). *Predicting soil erosion by water : A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Predicting-soil-erosion-by-water:-a-guide-to-with-Renard-Foster/accb464bac84b9f21b0d82781e7a9f4626873946>

Rica, C. (s. d.). *Ficha técnica para ampliación del Sitio Ramsar Palo Verde, Costa Rica*.

Saad, S., Husain, Mohd. L., Yaacob, R., & Asano, T. (1999). Sediment accretion and variability of sedimentological characteristics of a tropical estuarine mangrove : Kemaman, Terengganu, Malaysia. *Mangroves and Salt Marshes*, 3(1), 51-58. <https://doi.org/10.1023/A:1009936014043>

Schmutz, S., & Moog, O. (2018). *Dams : Ecological Impacts and Management* (p. 111-127). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73250-3_6

Senara. (2024). *Distrito de Riego Arenal Tempisque*. <https://www.senara.or.cr/proyectos/drat/index.aspx>

Shahzad, M. I., Meraj, M., Nazeer, M., Zia, I., Inam, A., Mehmood, K., & Zafar, H. (2018). Empirical estimation of suspended solids concentration in the Indus Delta Region using Landsat-7 ETM+ imagery. *Journal of Environmental Management*, 209, 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.070>

Shanshan, W., Baoyang, S., Chaodong, L., Zhanbin, L., & Ma, B. (2018). Runoff and Soil Erosion on Slope Cropland: A Review. *Journal of Resources and Ecology*, 9, 461-470. <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2018.05.002>

Sistema Costarricense de Información Jurídica. (2016). https://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=82846

Solinst. (s. d.). *Solinst Groundwater and Surface Water Monitoring Instrumentation, Water Level Meters, Interface Meters, Dataloggers*. Consulté 11 avril 2024, à l'adresse <https://www.solinst.com/>

Stone, R. P. (2000). 00-002—Équation universelle des pertes en terre (USLE).

- Talib, A., & Randhir, T. O. (2023). Long-term effects of land-use change on water resources in urbanizing watersheds. *PLOS Water*, 2(4), e0000083. <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000083>
- Tarpanelli, A., Iodice, F., Brocca, L., Restano, M., & Benveniste, J. (2020). River Flow Monitoring by Sentinel-3 OLCI and MODIS : Comparison and Combination. *Remote Sensing*, 12(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/rs12233867>
- Toniolo, H., & Schultz, J. (2005). Experiments on sediment trap efficiency in reservoirs. *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 10, 13-24. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2005.00256.x>
- Transect of the Americas. (2015). *Tempisque-Bebedero (Costa Rica) | Transect of the Americas | Washington State University*. <https://transect-of-the-americas.wsu.edu/tempisque-bebedero/>
- UF-HydroBase. (s. d.). *Hydrobase 6.0*. Consulté 4 avril 2024, à l'adresse <http://hb40.ifas.ufl.edu/Main>
- USDA. (2024, février 20). *Home | Natural Resources Conservation Service*. <https://www.nrcs.usda.gov/>
- USGS. (s. d.). *Landsat Collections Land Cloud Cover | U.S. Geological Survey*. Consulté 8 mars 2024, à l'adresse <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collections-land-cloud-cover>
- USGS. (2022). *Collection-2 Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level-1 Data Products* [jeu de données]. [object Object]. <https://doi.org/10.5066/P9TU80IG>
- USGS. (2022). *Landsat 7 | U.S. Geological Survey*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-7>
- USGS. (2022). *USGS EROS Archive—Sentinel-2—Comparison of Sentinel-2 and Landsat | U.S. Geological Survey*. <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-sentinel-2-comparison-sentinel-2-and-landsat>
- USGS. (2024). *Landsat 9 | U.S. Geological Survey*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-9>
- Vargas, J. A. (1995). The Gulf of Nicoya Estuary, Costa Rica : Past, present, and future cooperative research. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, 49(1), Article 1. <https://doi.org/10.1007/BF02368405>
- Vazquez, K., & Muneeppeerakul, R. (2022). Resilience of a Complex Watershed under Water Variability : A Modeling Study. *Sustainability*, 14, 1948. <https://doi.org/10.3390/su14041948>
- Venegas-Cordero, N., Birkel, C., Giraldo-Osorio, J. D., Correa, A., Durán-Quesada, A., Arce-Mesen, R., & Nauditt, A. (2021). Can hydrological drought be efficiently predicted by conceptual rainfall-runoff models with global data products? *Journal of Natural Resources and Development*, 11, 1-18.
- Vörösmarty, C. J., Meybeck, M., Fekete, B., Sharma, K., Green, P., & Syvitski, J. P. M. (2003). Anthropogenic sediment retention : Major global impact from registered river impoundments.

Global and Planetary Change, 39(1), 169-190. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00023-7)

Wang, H., Wang, J., Cui, Y., & Yan, S. (2021). Consistency of Suspended Particulate Matter Concentration in Turbid Water Retrieved from Sentinel-2 MSI and Landsat-8 OLI Sensors. *Sensors*, 21(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/s21051662>

Wang, L., Zhang, F., Wang, G., Zeng, C., Chen, Y., Shi, X., Tang, H., Zhao, G., Xu, C., & Li, X. (2023). Response of Soil Erosion to Climate and Subsequent Vegetation Changes in a High-Mountain Basin. *Sustainability*, 15(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/su15043220>

Whitney, M. M., & Codiga, D. L. (2011). Response of a Large Stratified Estuary to Wind Events : Observations, Simulations, and Theory for Long Island Sound. *Journal of Physical Oceanography*, 41(7), 1308-1327. <https://doi.org/10.1175/2011JPO4552.1>

Yan, R., Zhang, X., Yan, S., & Chen, H. (2018). Estimating soil erosion response to land use/cover change in a catchment of the Loess Plateau, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 6(1), 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2017.12.002>

Yang, H., Mei, T., & Chen, X. (2024). Variation of Satellite-Based Suspended Sediment Concentration in the Ganges–Brahmaputra Estuary from 1990 to 2020. *Remote Sensing*, 16(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/rs16020396>

Yang, S. L., Zhang, J., Zhu, J., Smith, J. P., Dai, S. B., Gao, A., & Li, P. (2005). Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F3), 2004JF000271. <https://doi.org/10.1029/2004JF000271>

Yu, L. (2002). The Huanghe (Yellow) River : A review of its development, characteristics, and future management issues. *Continental Shelf Research*, 22, 389-403. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(01\)00088-7](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00088-7)

Yue, Y., Qing, S., Diao, R., & Hao, Y. (2020). Remote Sensing of Suspended Particulate Matter in Optically Complex Estuarine and Inland Waters Based on Optical Classification. *Journal of Coastal Research*, 102(sp1), 303-317. <https://doi.org/10.2112/SI102-037.1>

Zhang, C., Liu, Y., Chen, X., & Gao, Y. (2022). Estimation of Suspended Sediment Concentration in the Yangtze Main Stream Based on Sentinel-2 MSI Data. *Remote Sensing*, 14(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/rs14184446>

Zhang, X., Dong, Z., Gupta, H., Wu, G., & Li, D. (2016). Impact of the Three Gorges Dam on the Hydrology and Ecology of the Yangtze River. *Water*, 8, 590. <https://doi.org/10.3390/w8120590>

Zhao, Y., Liu, L., Kang, S., Ao, Y., Han, L., & Ma, C. (2021). Quantitative Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution of Soil Erosion Based on Geo-Detector Model under Diverse Geomorphological Types. *Land*, 10, 604. <https://doi.org/10.3390/land10060604>

II. Annexe

A. Paramètres de l'équation de Manning-Strickler

Tableau A – 1 : Table des coefficients de rugosité de Chow utile pour établir le coefficient de rugosité dans l'équation de Manning-Strickler (Manning, s. d.).

Channel Conditions		Values	
Material Involved	Earth	n0	0.025
	Rock Cut		0.025
	Fine Gravel		0.024
	Coarse Gravel		0.027
Degree of irregularity	Smooth	n1	0.000
	Minor		0.005
	Moderate		0.010
	Severe		0.020
Variations of Channel Cross Section	Gradual	n2	0.000
	Alternating Occasionally		0.005
	Alternating Frequently		0.010-0.015
Relative Effect of Obstructions	Negligible	n3	0.000
	Minor		0.010-0.015
	Appreciable		0.020-0.030
	Severe		0.040-0.060
Vegetation	Low	n4	0.005-0.010
	Medium		0.010-0.025
	High		0.025-0.050
	Very High		0.050-0.100
Degree of Meandering	Minor	m5	1.000
	Appreciable		1.150
	Severe		1.300

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5$$

B. Paramètres du modèle basé sur l'équation universelle de perte de sol (USLE) l'équation

Tableau B-1 : Répartition des principaux types de sols dans le bassin versant Tempisque -Bebedero et leurs facteur d'érosivité (R) associé

Types de sols	Superficie [%]	Facteur R
Entisol	34	0.1
Inceptisol	56	0.24
Mollisol	10	0.26

Tableau B – 2 : Répartition de la superficie de l'utilisation des sols dans de le bassin versant Tempisque - Bebedero en fonction des saisons

Utilisation des sols	Superficie durant la saison sèche [%]	Superficie durant la saison des pluies [%]
Mangroves	0.6	0.6
Zone humide	6.6	6.6
Forêt	24.6	24.6
Agriculture :	24.7	24.7
Riz	3	8.3
Canne à sucre	7.2	7.2
Melon	0.2	0.2
Pisciculture	0.3	0.3
Herbe/fourrage	0.5	7.4
Autres cultures	1.3	1.3
Sol nu	12.2	0
Pature	42.3	42.3
Zone urbaine	0.7	0.7
Masse d'eau	0.5	0.5

Tableau B-3 : Facteur de la couverture végétale et de gestion (C) en fonction de l'utilisation des sols et des saisons dans le bassin versant Tempisque - Bebedero

Utilisation des sols	Facteur C durant la saison sèche	Facteur C durant la saison des pluies
Mangroves	0.01	0.01
Zone humide	1.00E-07	1.00E-07
Forêt	0.02	0.01
Agriculture :		
Riz	0.1	0.1
Canne	0.25	0.25
Melon	0.4	0.4
Pisciculture	0	0
Herbe/fourrage	0.35	0.35
Autres cultures	0.04	0.04
Labour	0.7	0.7
Pature	0.12	0.06
Zone urbaine	1	1
Masse d'eau	0	0

Tableau B-4 : Facteur de pratiques de conservation des sols (P) en fonction de l'utilisation des sols dans le bassin versant Tempisque - Bebedero

Utilisation des sols	Facteur P
Mangroves	0.01
Zone humide	0.05
Forêt	0.15
Agriculture :	/
Riz	0.1
Canne	0.25
Melon	0.4
Pisciculture	0
Herbe/fourrage	0.35
Autres cultures	0.15
Labour	0.7
Pature	0.15
Zone urbaine	0.35
Masse d'eau	0

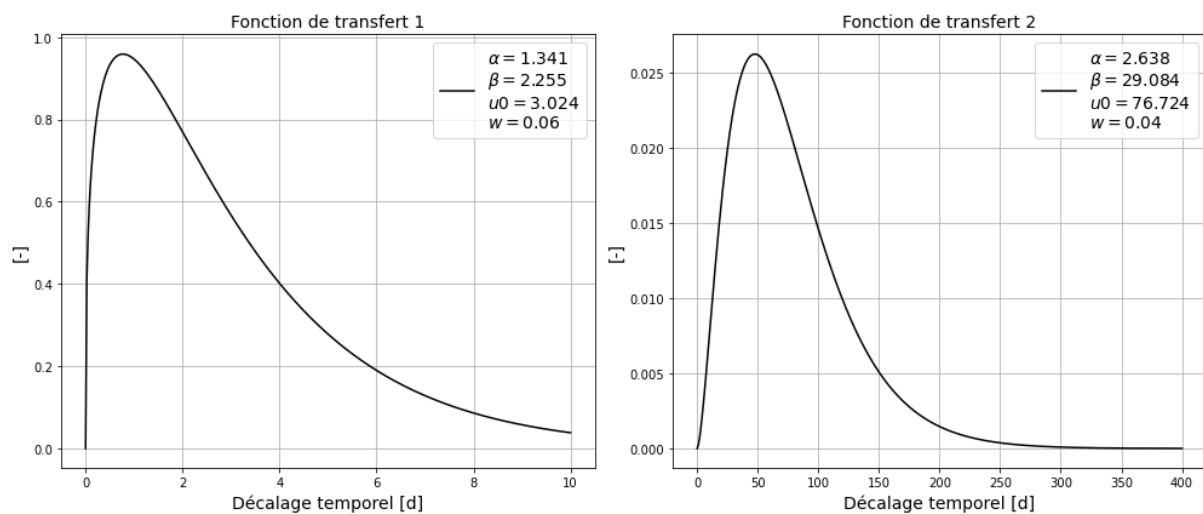


Figure B-1 : Fonctions de transferts utilisés en série pour calculer le décalage temporel entre l'érosion des sols et l'arrivée des sédiments dans les cours d'eau du bassin versant

C. Analyse comparative complémentaire de la variabilité des débits mesurés

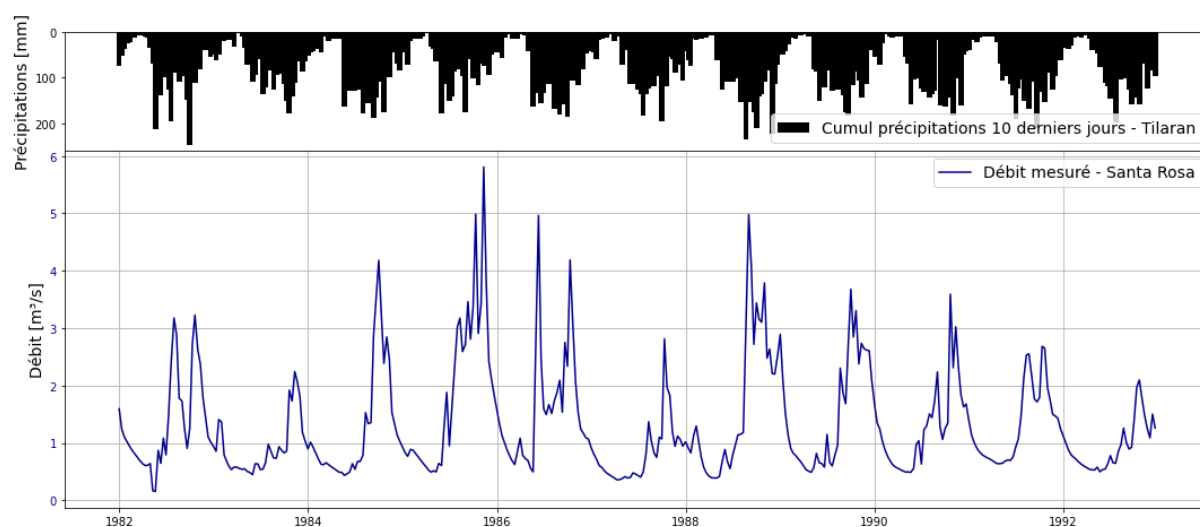


Figure C-1 : Précipitations mesurées à la station Tilaran et débit de la rivière Santa Rosa en fonction du temps (1982-1992)

Tableau C-1 : Débits moyens mesurés par les différentes stations de mesures influencés seulement par des phénomènes naturels en fonction des saisons

Station	Rivière	Bassin versant	Débit moyen saison sèche [m ³ /s]	Débit moyen saison des pluies [m ³ /s]	Intervalle temporel des débits mesurés
Santa Rosa	Santa Rosa	Bebedero	1	1.7	1977 - 1993
Magdalena	Magdalena	Bebedero	0.5	1.05	1986 - 1993
Punta de Palo	Blanco	Bebedero	1.8	4.2	1976 - 1993
Colorado	Colorado	Tempisque	3.7	6.4	1951 - 1970
Coyolar	Colorado	Tempisque	2.5	5.4	1970 - 1993
El Salto	El Salto	Tempisque	0.6	1.7	1976 - 1993
Canas	Canas	Tempisque	0.6	16	1971 - 1975
Guardia	Tempisque	Tempisque	13.9	37.4	1952 - 2009
La Guinea	Tempisque	Tempisque	13.2	37.4	1970 - 1980

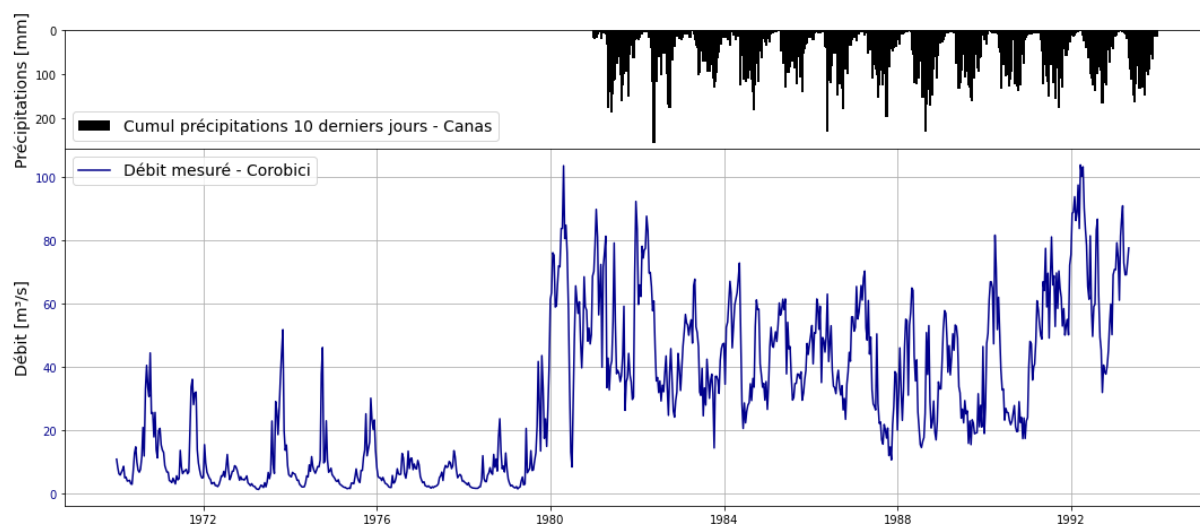


Figure C-1 : Précipitations mesurées à la station Canas et débit de la rivière Corobici en fonction du temps (1970-1994)

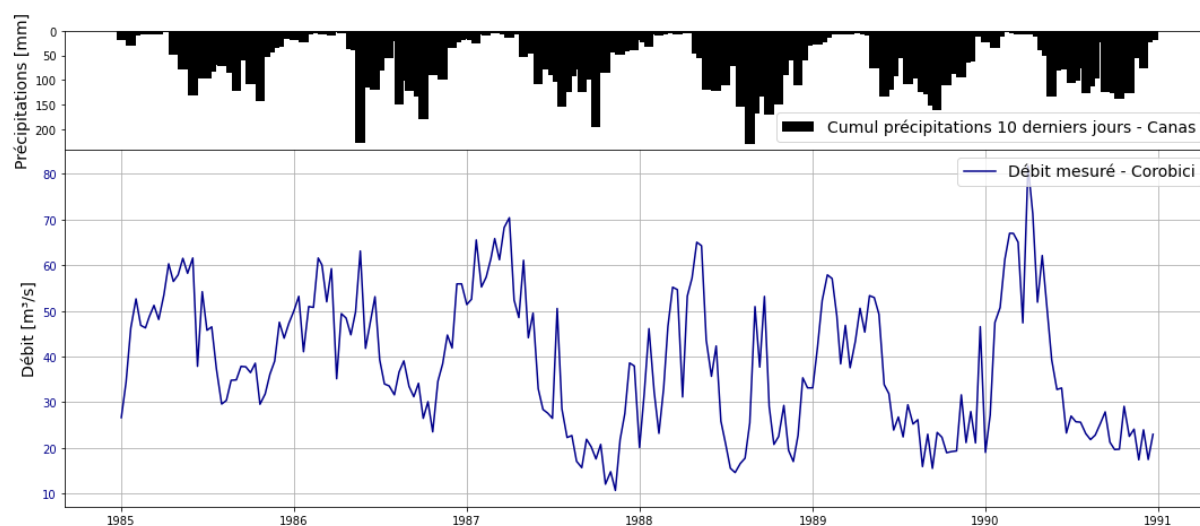


Figure C-3 : Précipitations mesurées à la station Canas et débit de la rivière Corobici en fonction du temps (1980-1992)

Tableau C-2 : Débits moyens mesurés de la rivière Corobici et des canaux d'irrigation en fonction des saisons

Rivière/Canal	Débit moyen saison sèche [m ³ /s]	Débit moyen saison des pluies [m ³ /s]	Intervalle temporel des débits mesurés
Corobici	57	41	1953 - 1994
Canal principal Sud	14.6	10.5	2002 - 2019
Canal principal Ouest	29.3	15.3	2002 - 2019

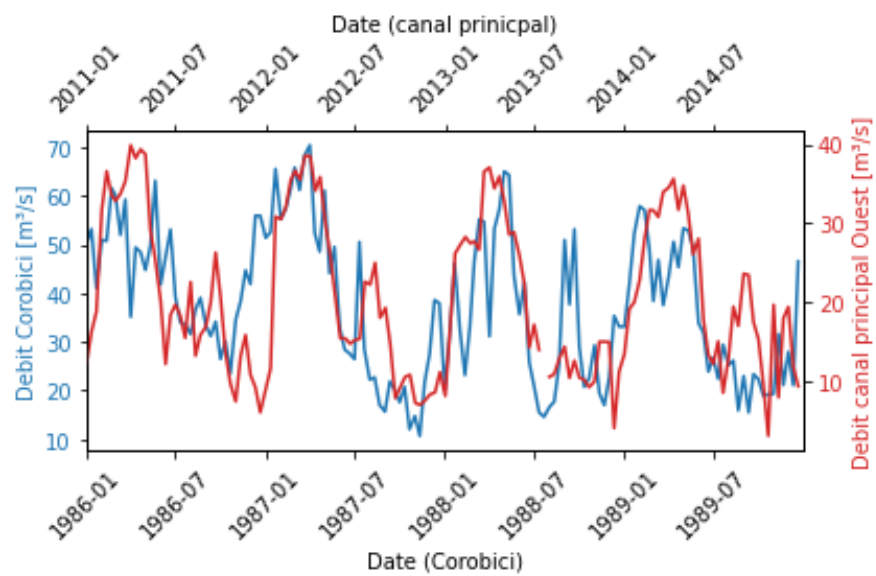


Figure C- 4 : Débits mesurés au cours du temps de la rivière Corobici (1986-1989) et du canal principal (2011-2014)

D. Principaux types de sols dans le bassin versant Tempisque

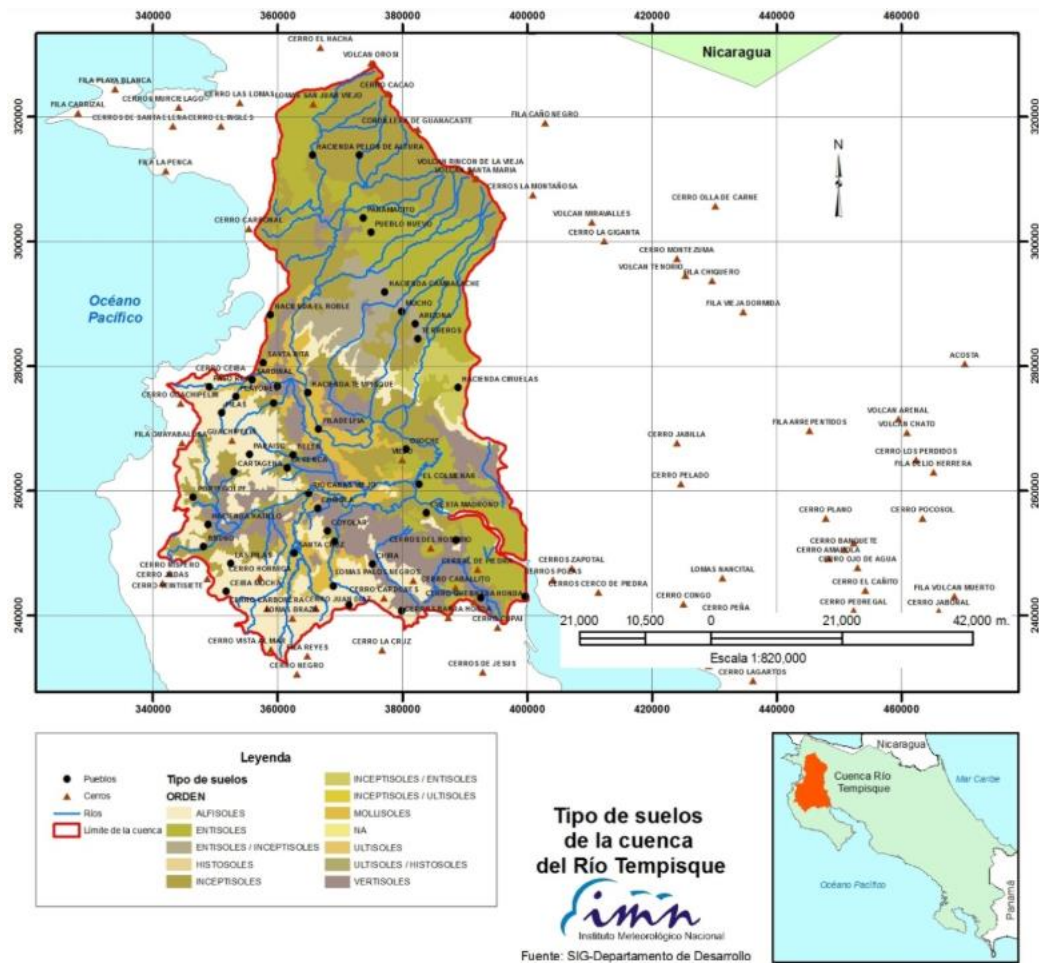


Figure D-1 : Classification des principaux types de sols dans le bassin versant Tempisque (EstudioCuencas-cuencaRioTempisque.pdf, s. d.)

Etude de l'impact du projet Arenal - PRAT sur la dynamique sédimentaire des fleuves Tempisque et Bebedero et du golfe de Nicoya

Martin Boulanger

Résumé :

Ce mémoire explore les impacts du projet Arenal-PRAT sur la dynamique sédimentaire dans les rivières Tempisque et Bebedero, ainsi que dans le golfe de Nicoya, Costa Rica. Inauguré en 1976, ce projet a introduit des modifications substantielles, notamment la construction de barrages et de canaux d'irrigation, influençant les régimes hydrologiques et agricoles de la région. À travers une analyse des données hydro-climatiques et l'usage de l'imagerie satellite, cette étude caractérise les modifications des régimes hydrologiques durant la saison sèche et examine les variations de la charge sédimentaire liées aux pratiques d'irrigation intensive. Les résultats révèlent que, bien que les variations saisonnières naturelles contribuent à la dynamique sédimentaire, l'intensification de l'agriculture due à l'irrigation joue un rôle prédominant, exacerbant l'érosion et augmentant la sédimentation dans le système aquatique.

Mots clés : Sédimentation, Projet Arenal – PRAT, Régimes hydrologiques, Irrigation, bassin versant Tempisque - Bebedero