



**HAL**  
open science

# Évolution du delta de la Thio, Nouvelle-Calédonie, de 1870 à nos jours, en lien avec les forçages anthropiques et naturels

Louise Schneider

► **To cite this version:**

Louise Schneider. Évolution du delta de la Thio, Nouvelle-Calédonie, de 1870 à nos jours, en lien avec les forçages anthropiques et naturels. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2018. dumas-03546740

**HAL Id: dumas-03546740**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03546740v1>**

Submitted on 28 Jan 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Mémoire de stage de fin d'études

*Formation initiale ingénieur  
Master 2 Géographie Environnementale*

**1<sup>er</sup> février au 29 juin 2018**

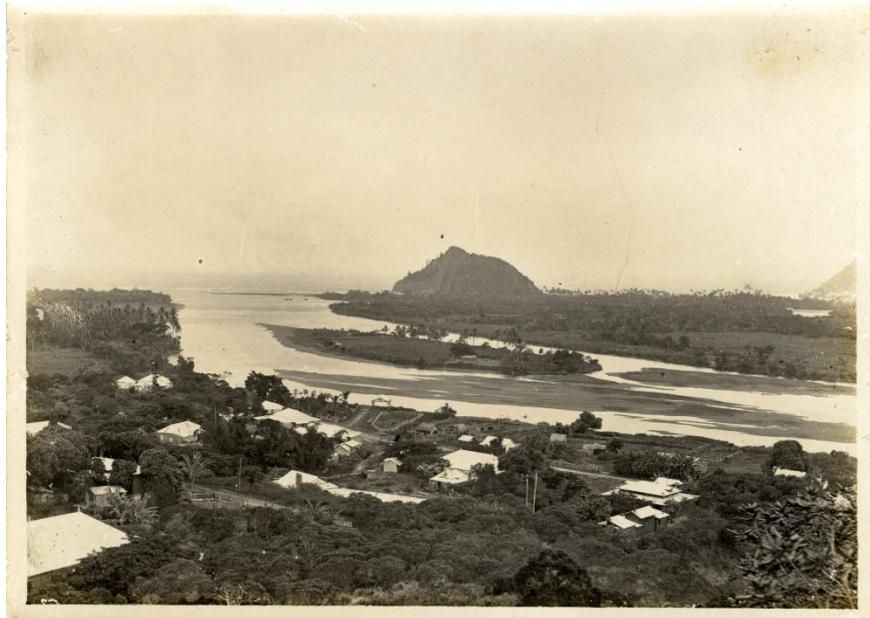
**SCHNEIDER Louise**

**FORMATION D'INGENIEUR  
MASTER 2**

**2017/2018**

**Promotion Freiburg**

*Evolution du delta de la Thio, Nouvelle-Calédonie, de 1870 à nos jours, en lien avec les forçages anthropiques et naturels.*



*Carte postale ancienne de l'embouchure du delta de la Thio à la fin du XIXe siècle. Source : Delcampe*

**Organisme d'accueil - ville - pays : Institut de Recherches en Géographie (IRG), composante Lyon 2 de l'UMR 5600, Bron**

**Tuteur de stage : Oldrich NAVRATIL**

## Résumé

Cette étude porte sur l'évolution biogéomorphologique du delta du fleuve Thio (Nouvelle-Calédonie, Pacifique) depuis le début des activités minières à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle afin de mieux comprendre pourquoi les populations subissent depuis 2013 des inondations récurrentes dans ce delta. Il aborde une analyse chronologique des changements socio-environnementaux induits à la fois par les forçages climatiques et anthropiques qui se produisent dans le delta et le bassin hydrographique. Une analyse est menée à partir de cartes historiques, de photos aériennes, de cartes postales anciennes, de données météorologiques et hydrologiques et de l'historique de l'activité minière. L'activité minière a explosé depuis les années 50 et atteint son apogée dans les années 70. Au même moment, une hypersédimentation s'est produite dans les ruisseaux situés en aval des mines. Depuis 1880, le littoral de la rive droite s'est déplacé jusqu'à 340 m. L'évolution géomorphologique la plus élevée s'est produite depuis les années 60 dans le delta. La concomitance du pic des activités minières et du cyclone d'Alison en 1975 a initié l'hypersédimentation du delta. Ensuite, des débits de pointe fréquents auraient également fourni d'énormes quantités de sédiments, car de nombreux bancs de gravier sont apparus les années suivantes dans le lit principal du delta. A partir des années 80, la rectification du lit du delta a induit une stabilisation de sa morphologie et une rapide colonisation végétale des bancs de gravier qui a commencé en 1995 jusqu'à aujourd'hui. Notre hypothèse est que la combinaison de ces processus de végétalisation rapide des bancs de gravier et de dépôts de sédiments fins a rapidement augmenté le risque d'inondation dans le delta depuis 2010.

Mots clés : delta, Thio, changements environnementaux, analyse diachronique, forçages, hydrologie, SIG

## Abstract

This study focuses on the bio-geomorphological evolution of the Thio River's delta (New Caledonia, Pacific) from the beginning of the mining activities at the end of the XIX<sup>s</sup> in order to better understand why the populations endure since 2013 recurring floodings in this delta. It tackles a chronological analysis of socio-environmental changes induced both by climatic and anthropogenic forcings that occurs in the delta and the river basin. An analysis was led based on historical maps, aerial photos, old postcards, meteorological and hydrological data and on the history of the mining activity. The mining activity has exploded since the 50' and it reaches a peak in the 70'. At the same time hypersedimentation occurred in the Creeks located downstream mines. Since 1880, the coastline on the right bank moved up to 340 m. The highest geomorphological evolution occurred since the 60' in the delta. The concomitance of the peak of the mining activities and the Alison's cyclone in 1975 have initiate the hypersedimentation of the delta. Next, frequent peak discharges would also have provided huge quantity of sediment as many gravel bars surfaces appeared the following years in the delta main riverbed. From the 80', the rectification of the delta riverbed induced a stabilization of its morphology and a rapid vegetation colonization of gravel bars that began in 1995 up to now. Our hypothesis is that the combination of these processes of rapid gravel bars vegetalisation and fine sediment deposits have rapidly increased the flood risk in the delta since 2010.

Key words: delta, Thio, environmental change, diachronic analysis, forcing, hydrology, GIS

## Remerciements

Je remercie toute l'équipe de m'avoir accueillie au sein de l'IRG.

Je remercie tout particulièrement mon maître de stage, Oldrich Navratil, pour la qualité de son suivi, sa sympathie et pour m'avoir guidée très agréablement tout au long de mon stage.

Je remercie également Jérôme Lejot pour son aide en SIG, Nicolas Jacob et Norbert Landon pour leurs conseils.

Une pensée va à mes camarades de stage et à mon copain pour leur sympathie et leur soutien.

Table des matières	
Introduction .....	1
<b>I. Site d'étude .....</b>	<b>4</b>
1. <i>La Nouvelle-Calédonie : généralités et contextualisation</i> .....	4
2. <i>Caractérisation de la zone d'étude</i> .....	8
<b>II. Matériel et méthode .....</b>	<b>22</b>
1. <i>Présentation des données</i> .....	22
a) Les cartes anciennes .....	22
b) Les images aériennes .....	23
c) Cartes postales et photos obliques .....	25
d) Données d'hydrologie et de météorologie .....	27
e) Données de SIG complémentaires .....	30
2. <i>Traitement des données</i> .....	32
a) Les cartes anciennes et les images aériennes .....	32
b) Méthode d'analyse des données hydrologiques .....	35
i. Analyse statistique .....	35
ii. Etude de la saisonnalité des pluies et des débits .....	37
c) Méthode d'analyse du trait de côte et de la progradation du delta .....	38
<b>III. Forçages hydrométéorologiques .....</b>	<b>43</b>
1. <i>Analyse des événements pluvieux</i> .....	43
a) Analyse pluie débit .....	43
b) Saisonnalité des pluies et des débits .....	49
<b>IV. Evolution du delta au cours du temps : analyse des cartes et photographies aériennes.....</b>	<b>56</b>
1. <i>Analyse du trait de côte</i> .....	56
2. <i>Analyse des zones en eau</i> .....	62
3. <i>Analyse des zones de forêts denses humides</i> .....	68
4. <i>Analyse de la végétalisation des bancs</i> .....	75
<b>V. Lien entre l'évolution du delta et les forçages anthropiques et hydrométéorologiques. ....</b>	<b>82</b>
1. <i>Rappel des forçages</i> .....	82
2. <i>Eléments d'analyse de la période de 1880 à 1954</i> .....	82
3. <i>De 1954 à l'actuel</i> .....	85
4. <i>Discussion autour des incertitudes</i> .....	91
Conclusion .....	92
Liste des acronymes .....	93
Bibliographie .....	94
Annexes .....	96

Figure 1: Diagramme ternaire présentant une classification des deltas. Source : (Salemstate edu, s. d.), (Galloway 1975).....	1
Figure 2 : .....	1
Figure 3: Carte de situation de la Nouvelle-Calédonie, LS, 2018. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.).....	4
Figure 4: Profil de la formation du sol de la majeure partie de la Nouvelle-Calédonie. Source : (SLN, s. d.).....	6
Figure 5: Evolution de la production de minerai de nickel en Nouvelle-Calédonie au XXe siècle. Source : ISEE. (L’Huillier et Jaffré 2010) .....	7
Figure 6: Photo d'une mine sur la commune de Thio avec ses chemins de prospection.....	7
Figure 7: Carte de la commune de Thio, LS. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.).....	9
Figure 8 : Carte de la zone d'étude plus précise, LS. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.).....	10
Figure 9 :Diagramme ternaire présentant une classification des deltas. Source: (Salemstate edu, s. d.), (Galloway 1975).....	11
Figure 10: Profil sismique boomer perpendiculaire à la côte (Allenbach 2017) .....	12
Figure 11: Formation végétale découpée en strate. Source : OEIL, 2014 .....	13
Figure 12: Carte de la géologie du bassin versant de la Thio .....	15
Figure 13: Schéma simplifié du fonctionnement des cours d'eau des rivières de Nouvelle-Calédonie. Source : (Garcin 2017).....	16
Figure 14 : Tableau des effectifs et fréquences des pluies pour les classes définies. Source : (GARCIN 2017).....	17
Figure 15: Pluviométrie annuelle en haut, nombre de jours de pluie par an en noir en bas, moyenne glissante du nombre de jours de pluie par an (courbe noire en bas), et la tendance d'évolution du nombre de jours de pluie par an (tirets). Source : (GARCIN 2017) .....	17
Figure 16: Pluviométrie mensuelle (courbe bleue) et moyenne glissante sur trois mois (courbe orange).....	18
Figure 17: Précipitations par saison (rouge : saison sèche, bleue : saison cyclonique).....	18
Figure 18: Synthèse des débits sur la station de Thio St Michel. Source : (DAVAR, 2015) ..	19
Figure 19: Evolution des chenaux du lit mineur entre 1955 et 1978 .....	20
Figure 20: Schéma de la méthode de l'OAM .....	39
Figure 21:Création d'un axe médian de l'enveloppe des traits de côte de la période de 1880 .	39
Figure 22: Méthode de calcul des surfaces entre le trait de côte de 1880 et celui d'autres dates (1971 pour cet exemple).....	40
Figure 23: Schéma de la méthode d'analyse du trait de côte par transects.....	40
Figure 24: Schéma de la méthode de détermination des incertitudes sur le trait de côte.....	41
Figure 25: Schéma de la méthode de calcul de l'indice des plages de dépôt, base de 1954 ....	42
Figure 26: Schéma de la méthode pour déterminer le nombre de chenaux par section.....	43
Figure 27: Nuage des événements représentés en fonction du débit maximal et de la pluie maximale. Seuil =0, inter=3 j.....	44
Figure 28: Relation entre $\log(Q_{max})$ et $\log(I_{max})$ .....	44
Figure 29: Relation entre la pluie maximale à Thio Plateau (mm/j) avec la pluie cumulée et le pic de crue .....	46
Figure 30: Figure précédente avec son espace segmenté en 3 parties.....	46
Figure 31: Classes d'événements et leur description en fonction de leur débit de pic de crue	47
Figure 32: Répartition des événements avec des crues faibles .....	47
Figure 33: Répartition des événements avec des crues fortes $QJ > 800 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	48

Figure 34: Répartition des événements avec des crues intermédiaires QJ < 800 m <sup>3</sup> /s.....	48
Figure 35: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala, de 1903 à 1951 .....	49
Figure 36: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala de 1952 à 2017 .....	50
Figure 37: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala de 1903 à 2017 .....	51
Figure 38: Précipitations moyennes mensuelles sur Thio fr 1952 à 2017 .....	51
Figure 39: Corrélation des pluies journalières entre Canala et Thio .....	52
Figure 40: Diagramme radar des pluies maximales des événements de pluie de 1952 à 2016	53
Figure 41: Diagramme radar des débits maximaux des événements de pluie de 1981 à 2016 ..	54
Figure 42: Diagramme radar des débits maximaux associés aux événements de pluie de 1981 à 2016, sans les deux débits maximaux .....	55
Figure 43: Déplacement moyen et vitesse de déplacement du trait de côte par rapport à 1880	59
Figure 44: Evolution du trait de côte au niveau de 4 tronçons différents .....	61
Figure 45: Evolution des surfaces en eau sur le delta de 1880 à 2017 .....	64
Figure 46: Nombre moyen d'intersections pour toutes les sections .....	67
Figure 48: Evolution de la diversité des habitats de 1880 à 2017 .....	67
Figure 47: Moyenne des intersections par année .....	67
Figure 49: Surface des zones de palétuviers et de forêt dense humide .....	69
Figure 50: Zones de palétuviers sur la carte ancienne de 1880 environ .....	70
Figure 51: Schéma du delta avec ses formations de forêt dense humide .....	74
Figure 52: Schéma des bancs analysés .....	76
Figure 53: Evolution de la proportion de bancs nus et bancs végétalisés, sur la longueur de la zone .....	78
Figure 54: Panorama de l'embouchure de la Thio, située après 1980 .....	79
Figure 55: Panorama d'une partie du delta en 1992 .....	79
Figure 56: Photographie du delta de la Thio, 2015, ON .....	80
Figure 57: Photographie de l'embouchure de la Thio datant de 1878 .....	80
Figure 58: Carte postale de la fin du XIXe siècle. Source: Delcampe .....	81
Figure 59: cartes postales du début du XXe siècle .....	81
Figure 60: Evaluation du volume de stériles mis en décharge. Source : (Garcin 2017) .....	82
Figure 61: Cliché de l'embouchure, avec une date estimée précédant 1898 .....	84
Figure 62: Comparaison des points de plus hautes eaux (récents) avec la ligne de crue de 1891) .....	85
Figure 63: Figure récapitulative de l'évolution d'indicateurs et des forçages associés de 1880 à 2017 .....	86
Figure 64 : Image aérienne de 1985 zoomée sur les premiers aménagements du lit de la Thio .....	88
Figure 65: Schéma de situation et des processus de sédimentation au niveau de l'embouchure de la Thio (inspiré par Allenbach, Hoibian, 2002). Source : (Leroux 2009) .....	89
Figure 66: Image aérienne de 1995 (gauche), 2008 (milieu) et 2017 (droite) avec un zoom sur les aménagements du lit de la Thio .....	89
Figure 67: Travailleurs Japonais débarquant à Thio-Mission autour de 1910. Source: (Beauducel 2015) .....	96
Figure 68: Chronologie de l'histoire relative à l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, du début de la colonisation aux années 40. Source majeure: (Bencivengo 2014a) .....	97
Figure 69: Carte c3, carte la plus complète .....	98
Figure 70: Photographie de l'embouchure de la Thio prise dans le village. Date estimée au début du XXe siècle. Source: Delcampe .....	98
Figure 71: Relevés météorologiques d'archive à Canala de 1912. Source : Météo France NC	98

Tableau 1 : Surfaces des formations végétales par rapport à la superficie totale couverte par la végétation Source : (Mériaux 2017).....	13
Tableau 2: Surfaces en sols nus et des habitations (Mériaux 2017).....	14
Tableau 3: Surfaces des types de roches sur la surface totale des sols nus.....	16
Tableau 4 : Chronologie des aménagements sur la zone d'étude, d'après (Bencivengo 2014a) .....	21
Tableau 5: Données cartographiques issues des fonds d'archive de la Nouvelle Calédonie ...	23
Tableau 6: Données d'imagerie aérienne issue de la DITTT .....	24
Tableau 7:Données d'imagerie orthorectifiée.....	25
Tableau 8:Cartes postales utiles avec leurs métadonnées .....	26
Tableau 9: Données d'hydrologie et de météorologie .....	27
Tableau 10: Détail du code attribué aux données de pluie d'archive .....	28
Tableau 13: Journaux collectés présentant des informations d'événements cycloniques sur la Nouvelle-Calédonie.....	29
Tableau 11: Présentation des données SIG utiles au projet .....	31
Tableau 14: Résultats de géoréférencement et de paramètres de digitalisation des photos aériennes.....	34
Tableau 15: Résultats de géoréférencement et paramètres de digitalisation des cartes anciennes .....	34
Tableau 16:Test de sensibilité de la BD par rapport au choix de la durée entre deux événements .....	45
Tableau 17: Indicateurs de saisonnalité pour les pluies .....	53
Tableau 18: Indicateurs de saisonnalité pour les débits .....	55
Tableau 19: Incertitudes du trait de côte des cartes anciennes.....	56
Tableau 20: Incertitudes du trait de côte sur les photos aériennes .....	56
Tableau 21:Résultats des mesures de surface des zones et du ratio de la surface sur la longueur de la ligne de 1880 .....	59
Tableau 22: <i>Distance de déplacement (en m) et vitesse (en m/an) des traits de côte par rapport à la bande représentative du trait de côte de 1880 au niveau des 4 transects .....</i>	60
Tableau 23: Diversité moyenne annuelle du nombre de chenaux pour chaque section.....	66

## Introduction

Les deltas sont au cœur de nombreuses problématiques de recherches en raison tout d'abord des enjeux socio-économiques auxquels ils sont associés (eg. le delta du Mekong avec une population de 17.5 Mha), mais aussi de par leur capacité à enregistrer dans leur morphologie, la signature de changements environnementaux passés ou en cours de leur bassin versant. Leur situation d'interface entre le continent et la mer leur confère en effet des qualités de conducteurs et d'enregistreurs de phénomènes variés à l'échelle du bassin versant et au niveau de la côte, comme par exemple l'élévation du niveau de la mer en lien avec le changement climatique (Bianchi et Allison, 2009).

Un système deltaïque peut être défini comme une unité stratigraphique rocheuse tridimensionnelle, composée de lobes sédimentaires adjacents déposés, dans un contexte de flux terrigènes, à l'endroit où une rivière se jette dans une zone de dépression ou un plan d'eau permanent, tel qu'un lac ou une mer (Galloway, 1975). Leur géomorphologie est donc le résultat d'une combinaison de processus se déroulant à l'interface entre le domaine fluvial et le domaine maritime. Il existe plusieurs classifications des estuaires permettant de réaliser une typologie des deltas. Une classification généralement utilisée (Galloway, 1975) prend en considération l'influence des flux liquides et sédimentaires provenant du bassin versant et un contrôle par la mer ou côtier, lié aux vagues et à la marée (Figure 1).

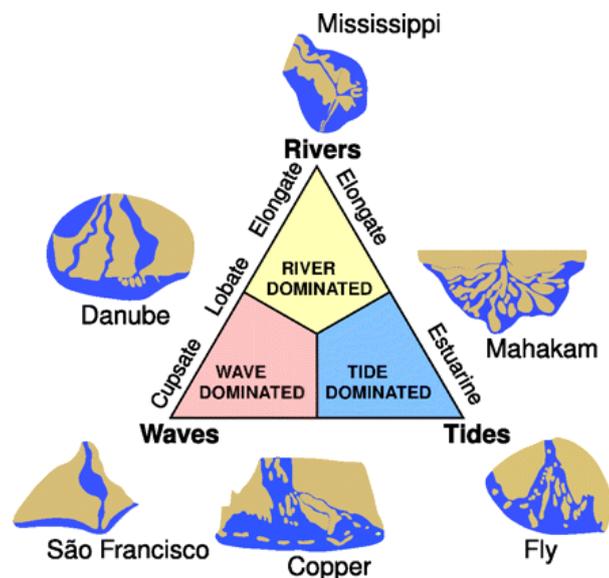


Figure 1: Diagramme ternaire présentant une classification des deltas. Source : (Salemstate edu, s. d.), (Galloway 1975)

Le delta de la rivière Thio, en Nouvelle-Calédonie, fait face à des changements environnementaux récents très importants. Ce bassin versant présente de fortes pentes, des pluies cycloniques diluviennes et une géologie composée de roches latéritiques et sédimentaires, le rendant ainsi naturellement très vulnérables à l'aléa érosion. Des griffes d'érosions apparaissent dans le bassin et génèrent des apports sédimentaires naturels. Toutefois, les origines des changements rapides et contemporains du delta sont plutôt à rechercher dans les forçages anthropiques que subit ce bassin depuis environ 150 ans. En 1863, un géologue français, Jules Garnier, est envoyé en Nouvelle Calédonie pour y effectuer une mission géologique, durant laquelle il découvre un minerai vert, le nickel. Ce minerai entre dans la

confection de l'acier inoxydable utilisé dans la vie quotidienne, comme dans d'autres secteurs tels que les transports, ou encore dans l'alliage servant à fabriquer la monnaie. La Nouvelle-Calédonie et la commune de Thio en particulier, ont alors connu l'essor de l'industrie du nickel dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle. En effet, très vite, cette ressource minière est exploitée, conférant à l'archipel une position centrale dans l'industrie mondiale du nickel. La Société Le Nickel (SLN) est créée alors en 1880 pour exploiter le minerai et participe ainsi à l'essor de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie avec l'aide d'une organisation coloniale développée. Le village de Thio nommé la « Nickeltown » devient alors rapidement la capitale de cette industrie en Nouvelle-Calédonie en raison de riches gisements de minerais (eg. Thio Plateau) sur les montagnes présentes sur son territoire, d'un accès des mines à la côte facilité pour l'exportation du minerai par bateau et la création de fonderies (au lieu-dit d'Ouroué puis à Thio-Mission). Actuellement, l'activité industrielle minière garde une place majeure dans l'activité Calédonienne et se situe entre le 3<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> rang mondial des producteurs de nickel (L'Huillier et Jaffré, 2010).

Au XIX et début XX<sup>e</sup> siècle, l'extraction du nickel se réalisait dans des galeries souterraines et les techniques de prospection se faisaient manuellement. En 1920, le nickel est exploité à ciel ouvert, et à partir de 1950, la prospection devient mécanisée. De grandes quantités de blocs, galets, terre ont été alors déposées sur les versants lors du décapage des couches supérieures de latérites aux teneurs faibles en nickel non exploitables à l'époque. Ces déchets miniers ou stériles ont été déposés sur des pentes devenues rapidement instables. De grandes surfaces ont alors été décapées et exposées aux cyclones. Ces activités ont alors très rapidement généré des modifications environnementales flagrantes et inévitables.

A cette activité de production, s'ajoute aussi une activité de prospection qui a laissé des marques profondes dans le territoire. Les montagnes sont marquées par les chemins de prospection et engendrent de nombreux décrochement de terrain au niveau des talwegs. Ainsi, les sédiments grossiers instables sur les vers ou au niveau des pistes de prospection descendent à chaque cyclone vers les rivières (nommées « Creek »). Ces sédiments entraînent des sur-engravements des rivières à l'aval et l'eau se charge en boue latéritique rouge-orange après chaque événement pluvieux. Des événements de laves torrentielles et de crues torrentielles apparaissent et ont engendré dès le début du XIX<sup>e</sup> des risques accrus pour la population.

Actuellement, au niveau du delta et depuis quelques dizaines d'années, les populations observent une augmentation de l'aléa inondation, lié à un sur-engravement reporté depuis les années 70. Il s'agit d'une époque charnière dans l'histoire du delta. Le passage du cyclone Alison en 1975 ressort particulièrement des témoignages locaux. D'après les témoignages, ce serait un événement hydrométéorologique clé pour la métamorphose des rivières et du delta. La végétation joue potentiellement un rôle dans l'aggravation des inondations par le fait qu'elle peut agir comme un frein à l'écoulement en augmentant la rugosité et en restreignant la largeur de la bande active.

Le quotidien des habitants est alors perturbé obligeant parfois les tribus à se déplacer pour éviter les inondations et modifiant aussi les rendements agricoles. Un enjeu social émerge donc, alliant conflits d'usages entre exploitants et habitants et un sentiment de délaissement. La responsabilité des conséquences néfastes peine à être reconnue. Des curages sont réclamés pour améliorer les capacités hydrauliques de la rivière sur les affluents et au niveau du delta. La culpabilité envahit également les populations ayant participé à cette industrie et ayant profité de son essor économique (Gosset 2016).

A partir de 1975, l'industrie minière modifie ses méthodes d'exploitation en raison d'une réglementation environnementale plus stricte qui interdit la mise en verse des sédiments. Elle

incite à utiliser des techniques plus respectueuses de l'environnement. Le transport des stériles et leur stockage doit se faire en versées stabilisées dans des sites choisis. En bordure de piste, une bande naturelle protectrice est conservée, et des caniveaux et décanteurs doivent être mis en place pour limiter le ruissellement et les boues associées. Plus tard, le code minier de 2009 imposera sur mine de réaliser des travaux pour mieux gérer les eaux pluviales et les sédiments. (L'Huillier et Jaffré, 2010).

Afin d'améliorer la situation du delta, des aménagements ont été réalisés. La rectification du lit principal de la Thio a été mise en place à partir de 1985. Des remblais pour la création d'appontements, ainsi que des routes ont aussi été mis en place. Ces aménagements font partie des forçages s'exerçant sur la zone. A l'échelle du bassin versant, la forêt subit aussi des pressions. Elle est exploitée au début de l'industrie minière pour construire les infrastructures d'exploitation. Les feux de brousse utilisés pour créer des zones de cultures est une pratique très ancienne. Ces feux continuent à être pratiqués sur le bassin de la Thio et peuvent engendrer aussi des décrochements de terrain sur les versants abrupts.

Des changements spectaculaires du delta se sont donc opérés depuis 1880, induits par une combinaison de forçages à la fois d'origine anthropiques et hydrométéorologiques. Cette étude consiste donc à analyser chronologiquement, l'évolution du delta depuis les débuts de l'exploitation minière (1870) et de l'expliquer à l'aide d'une reconstitution de données hydrométéorologiques et d'exploitation minière. Il s'agit donc de trouver des indicateurs permettant de décrire cette évolution et pour la quantifier. Les forçages doivent être caractérisés également : types de pluie, leur occurrence et leur susceptibilité à générer des crues importantes. L'histoire de la zone peut apporter des explications à la transformation du delta.

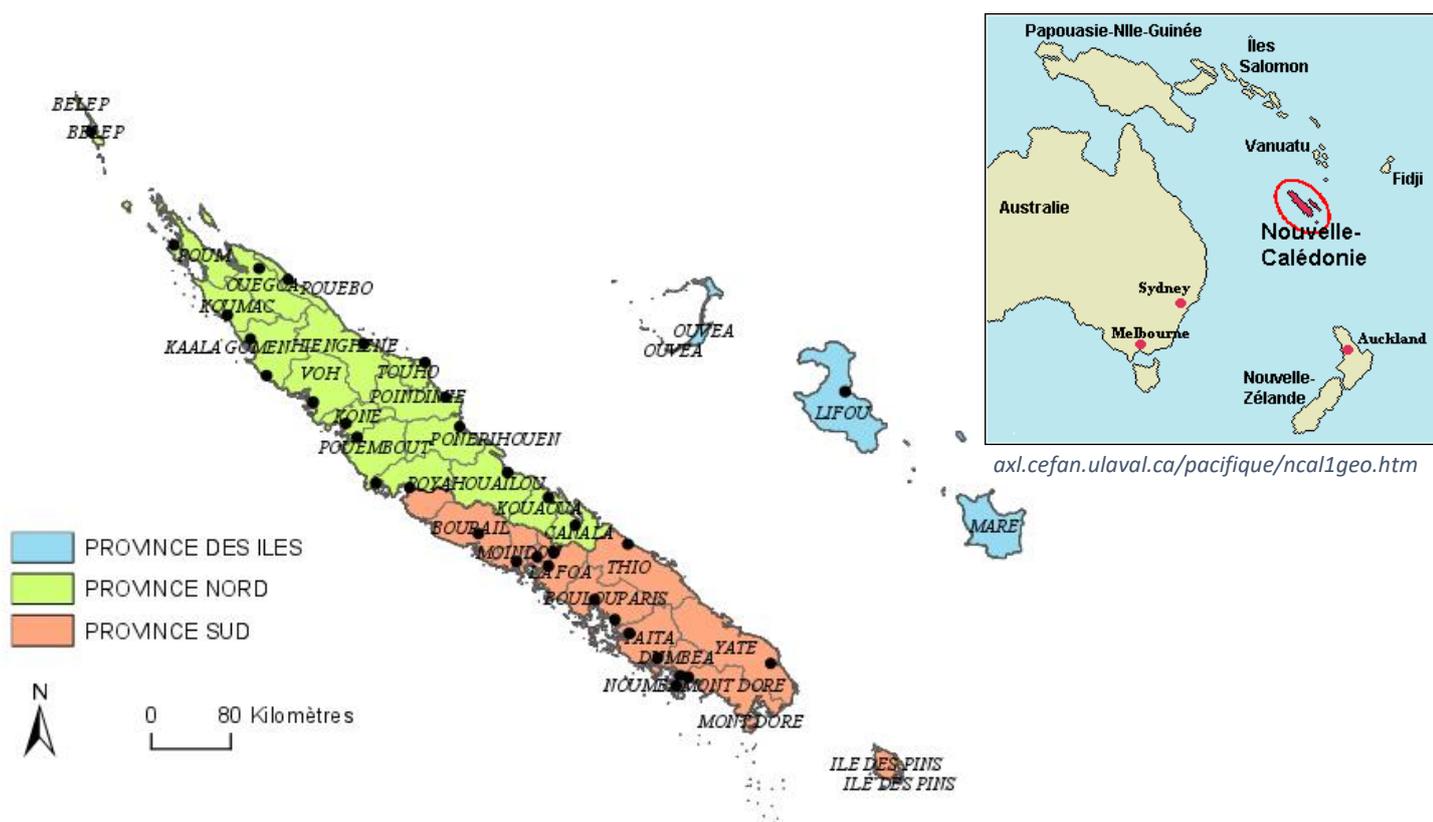
L'originalité du sujet consiste à exploiter des données d'archive, telles que des cartes anciennes de 1874 à 1885 qui ne l'ont probablement jamais été dans une telle étude. Des données d'imagerie sont également utilisées. Une collecte de cartes postales anciennes est réalisée, support destiné à une analyse complémentaire qualitative sur toute la période. Des données hydrométéorologiques récentes (débits et pluies), ainsi que des données d'archive issues d'une collaboration avec Météo France NC, comprenant des données de pluies du début du XXe siècle sur Canala située à proximité, et un recensement des événements dépressionnaires depuis 1880 sont également disponibles. La méthode employée consiste à créer une base de données et à en extraire l'information. Les données hydrométéorologiques sont mises en relation avec l'évolution analysée, tout comme l'historique de la zone, afin de répondre à l'objectif de reconstituer l'évolution du delta de la Thio de 1870 à nos jours, en lien avec les forçages anthropiques et hydrométéorologiques.

Ce stage a été effectué à l'Institut de Recherches en Géographie, composante Lyon 2 de l'UMR 5600 du CNRS. L'étude se rattache aux sujets d'étude du projet IMMILA (Impact de la Mine au Lagon) financé par le CNRT, visant à déterminer l'impact des bassins versants miniers sur le continuum « bassin versant-rivière-estuaire et littoral ».

# I. Site d'étude

## 1. La Nouvelle-Calédonie : généralités et contextualisation

La Nouvelle Calédonie est un archipel situé dans le Pacifique Sud, au nord du tropique du Capricorne. Elle fait partie des îles formant la Mélanésie, avec les Fidji, les îles Salomon, Vanuatu, Papouasie-Nouvelle Guinée et la région indonésienne de la Nouvelle-Guinée occidentale. Son archipel est constitué de Grande-Terre, l'île à la surface la plus importante, de l'île des Pins, de l'archipel des Beleps et des îles Loyauté. Trois provinces découpent la Nouvelle-Calédonie administrativement : la Province Nord, la Province Sud et les îles Loyauté. Ces provinces sont également des collectivités territoriales de la République Française avec une administration propre (Figure 3).



En 1774,

Figure 3: Carte de situation de la Nouvelle-Calédonie, LS, 2018. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.)

l'anglais James Cook débarque sur Grande-Terre, à Balade, et nomme l'archipel. C'est seulement en 1853 que la France prend possession de la Nouvelle Calédonie à travers le contre-amiral Febvrier Despointes. La colonisation commence donc réellement à partir de cette date. Par la suite, des installations sont mises en place, telles que des services postaux, un journal, *le Moniteur impérial de la Nouvelle Calédonie*, et dépendances ou encore une garde nationale et de multiples missions. Des expéditions militaires sont organisées et des violences entre autochtones et colons ont parfois lieu (O'Reilly 1953).

Aujourd'hui, la Nouvelle-Calédonie est une collectivité française d'Outre-Mer à statut particulier. Ce statut est défini par les accords de Nouméa de 1998, qui annoncent le partage de la souveraineté entre la France et la Nouvelle-Calédonie, afin qu'elle puisse profiter d'un début d'autonomie et de transfert de compétences. Ce statut est nommé *sui generis* (« de son propre genre » ; « Les statuts de la Nouvelle-Calédonie et de la Polynésie », 2017)

Cet archipel présente une superficie de 18 576 km<sup>2</sup>. La Grande Terre compte 16 664 km<sup>2</sup> et donc la majeure partie de la superficie totale. La Nouvelle-Calédonie présente une population de 269 000 habitants recensés en 2014, dont 93% vivant sur Grande Terre (INSEE, 2014).

Nouméa, la capitale, peut être repérée par une latitude -22° 16' 34 S, et une longitude 166° 27' 25 E. Cette commune est située sur la côte est, et constitue la ville la plus peuplée de Nouvelle-Calédonie avec 99 926 habitants en 2014. 2 habitants sur 3 vivent dans le Grand Nouméa (INSEE 2014). Cette ville a été bâtie en 1854 et constitue le pôle économique principal de Nouvelle-Calédonie, basé en grande partie sur l'industrie du Nickel.

Grande-Terre est orientée selon un axe nord/ouest sud/est. Une chaîne de montagnes, la chaîne centrale, présente au centre de l'île dans sa longueur, sépare la côte Ouest de la côte Est. Son point culminant est le Mont Panié à 1629 m. La chaîne centrale sépare ainsi un versant assez abrupt côté Est et plus bas d'altitude côté Ouest. Cette dissymétrie entraîne des différences de précipitations, les renforçant sur la côte Est (côte au vent) par rapport à la côte Ouest (côte sous le vent). (Association des Pays et Territoires d'Outre-mer de l'Union européenne, s. d.). Il peut pleuvoir jusqu'à 3000 mm par an sur la côte Est tandis qu'il peut ne pas pleuvoir plus de 1000 mm sur la côte Ouest. La Nouvelle-Calédonie, se situant en zone intertropicale, connaît un climat qualifié de tropical océanique. Elle est soumise au courant de l'alizé et est marquée par des brises venant de l'est. Deux périodes définissent ses saisons, avec des intersaisons : la saison « cyclonique » et la saison « fraîche ». La première s'étend de mi-novembre à mi-avril et est une saison chaude et humide. Des dépressions apparaissent et peuvent induire des épisodes de cyclones. La deuxième s'étale de mi-mai à mi-septembre. C'est la saison présentant le minimum de température annuelle. Quelques perturbations, les « coups d'ouest » d'origine polaire peuvent apparaître. Entre mi-avril et mi-mai, il y a peu de perturbations tropicales et la pluviosité et les températures diminuent. De mi-septembre à mi-novembre, le climat est sec et ensoleillé, la température augmentant progressivement et la pluviosité à son minimum annuel. (Ville de Nouméa, s. d.) La température moyenne annuelle est de 23.5°C à Nouméa. Les températures maximales au cours de la saison chaude peuvent atteindre 32°C (Latham *et al.*, 1978). Les cyclones sont favorisés en Nouvelle-Calédonie par une eau de mer chaude, une atmosphère plus fraîche en altitude, d'une force de Coriolis suffisante et d'une perturbation préexistante à la surface de la mer. Un cyclone apparaît pour des vents de plus de 117 km/h. (Lavigne et Sahal, 2011)

Les roches sédimentaires présentes en Nouvelle-Calédonie sont des formations pélitiques plus ou moins calcaires, les formations siliceuses et gréseuses et les alluvions. Les formations volcaniques sont représentées en Nouvelle-Calédonie par la formation basaltique de Poya et par les massifs de roches ultrabasiques. Ce sont ces massifs qui seront exploités car composés principalement de harzburgite et de péridotites. Des épanchements de rhyolites peuvent également être observés. Les roches métamorphiques sont composées de massifs schisteux et de serpentinites, formant les massifs ultrabasiques, et à la base de la formation de la chaîne centrale. (Latham *et al.*, 1978) C'est à l'Eocène supérieur que le socle continental calédonien a émergé et la roche mère profonde du manteau supérieur est apparue par chevauchement. Les péridotites, constituant la partie inférieure, seule relique apparente du manteau à notre époque, ont donc affleuré. Ce sont les roches mères du nickel. Elles se sont enrichies en nickel au cours des années par des phénomènes d'altération liés au climat tropical, et ont formé les saprolites. Les saprolites se sont également altérées au cours du temps et ont formé les latérites. Un minéral, appelé la Ganiérite en l'honneur de l'homme qui l'a découvert, peut être extrait. Il est à l'origine du nickel. La constitution du sol jusqu'au manteau est détaillée (Figure 4, profil d'altération).

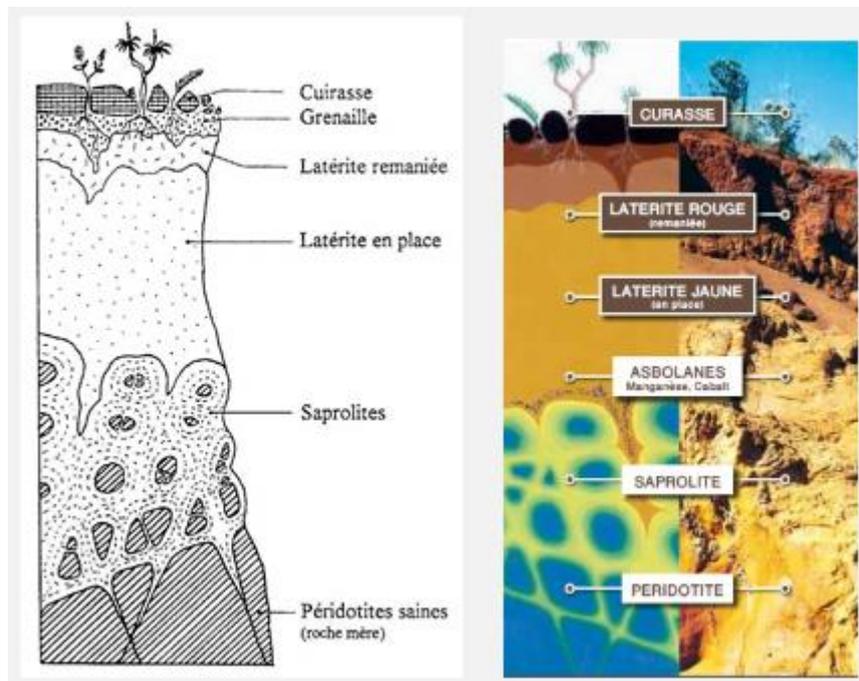


Figure 4: Profil de la formation du sol de la majeure partie de la Nouvelle-Calédonie. Source : (SLN, s. d.)

La Figure 4 montre une coupe du sol où l'échelonnage des roches est bien observable : plus les roches sont proches de la surface, plus elles sont altérées, en cohérence avec la succession géologique décrite précédemment.

La Nouvelle Calédonie représente le quart des réserves mondiales en nickel, ce qui a forgé une grande partie de son histoire depuis la moitié du XIXe siècle. Après les débuts de la colonisation, Jules Garnier est envoyé sur le territoire en 1863 afin d'y effectuer une mission géologique. Il y découvre le Nickel, et en fait rapport. Très vite, de grands massifs sont identifiés pour leur exploitation, et la première concession minière est établie au Mont d'Or. Grande-Terre avait déjà été une zone d'intérêt pour sa houille et son or découvert à Pouébo. En 1874 débute réellement l'exploitation du Nickel, accompagnée d'une première réglementation. (Bencivengo 2014a) La Nouvelle-Calédonie réalise déjà 40 % de la production mondiale. (Bencivengo 2014b). En 1880 est fondée la Société Le Nickel (SLN). L'économie néo-calédonienne est ensuite rythmée par des successions de crises, de réglementations et de profits de l'industrie du nickel.

L'exploitation du nickel débute tout d'abord par la prospection. Au début de l'histoire, cela est réalisé sur des sites choisis, à la pelle et à la truelle, de façon assez manuelle. L'époque de la mécanisation faisant irruption dans les années 50, les chemins de prospection sont creusés au bulldozer, et l'exploitation s'accélère. L'essor de cette exploitation mécanisée a été grandement facilitée par les nombreux camions et les engins mécaniques laissés par l'armée américaine lors de son départ à la fin de la seconde guerre mondiale. La Nouvelle Calédonie était en effet l'une des principales bases armées du Pacifique pour lancer des offensives sur le Japon. Il est observé une explosion de l'industrie du nickel, le « boom » du nickel, la production culmine en 1972 environ (Figure 5).

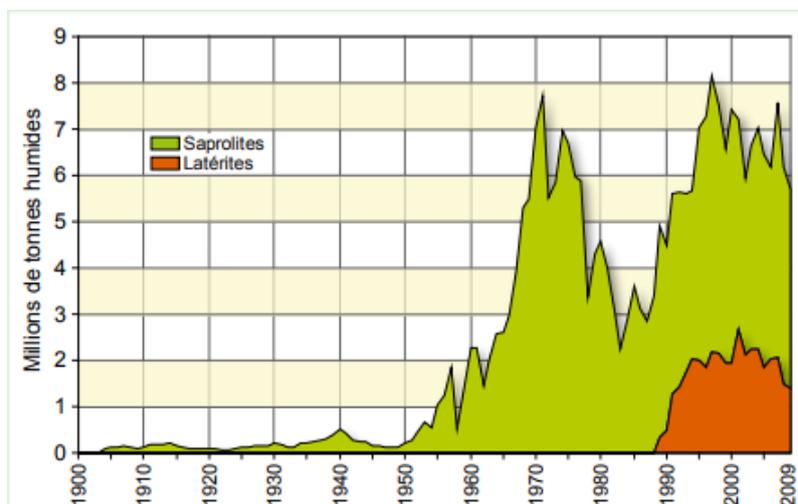


Figure 5: Evolution de la production de minerai de nickel en Nouvelle-Calédonie au XXe siècle. Source : ISEE. (L'Huillier et Jaffré 2010)

L'explosion de cette exploitation a un impact considérable sur le modelé du paysage : les montagnes semblent lacérées, visibles de près comme de loin sur des clichés aériens ou même des photographies (Figure 6).



Figure 6: Photo d'une mine sur la commune de Thio avec ses chemins de prospection

La mine exploitée est visible de par les terrasses et les verses, et les chemins de prospections se détachent en allant plus bas que la mine, sans aboutissement.

Le nickel est extrait et acheminé en Europe où il est affiné. La première fonderie installée en France se situe au Havre. Une première fonderie se trouvait à Nouméa, établie dès 1877 sur la pointe de Chaleix, mais fut fermée après deux ans. Une fonderie est ouverte à Thio-Mission, secteur plus stratégique pour la transformation du nickel extrait. (Bencivengo 2014b)

Ce minerai est tout d'abord employé pour des objets de luxe, comme la vaisselle et la décoration. Par la suite, il va être utilisé dans de nombreux domaines comme la serrurerie ou l'horlogerie par exemple. La monnaie constitue plus tard une grande part de son utilisation à travers le monde.

Comme l'en atteste le patrimoine de la Nouvelle-Calédonie, de nombreux étrangers sont venus travailler sur les mines de nickel. De la main d'œuvre était nécessaire ; les Européens ont des réticences à employer des Kanaks, sûrement du fait d'une image négative véhiculée. Les Néo-

Hébridais employés dès 1873, mais victimes d'une forte mortalité, principalement liée aux mauvaises conditions de vie, redoutent d'aller travailler en Nouvelle-Calédonie. Ensuite, la main d'œuvre employée provient des bagnes très présents en Nouvelle-Calédonie. La main d'œuvre des condamnés, utilisée en temps normal pour le fonctionnement de la colonie, est détournée vers les mines. (Beauducel 2015) Cependant, il s'agit de compléter le nombre d'ouvriers, le marché reprenant activement vers 1890. Les relégués et les libérés ont aussi été assignés au travail dans les mines, mais ne semblent pas assurer suffisamment la charge de travail. Tous les condamnés représentent une partie importante de la main d'œuvre employée sur les mines mais ne suffisent pas pour faire face à l'important développement de la production. La SLN a donc recours aux travailleurs étrangers (Bencivengo 2014a). Ils proviennent majoritairement d'Asie (Japonais, Chinois, Janavais, Tonkinois...). La photographie en annexe I illustre l'arrivée de ces employés asiatiques sur le sol Néo-calédonien.

La SLN introduit 600 Chinois après en avoir reçu l'autorisation dès 1884. Les ouvriers étaient accueillis dans des villages aménagés près des mines, comportant toutes les installations nécessaires au quotidien des travailleurs. Le cimetière japonais situé à Thio est un témoignage de la multi culturalité présente en Nouvelle-Calédonie à partir de la fin du XIXe siècle. Une xénophobie ambiante, ainsi qu'une mésentente et des cas des violences sont observés entre les différentes nationalités qui cohabitent autour des mines. (Bencivengo 2014a)

L'annexe II offre un complément de la chronologie de l'histoire de la mine, en présentant des dates clés.

La commune de Thio a joué un rôle prépondérant dans l'histoire de l'industrie minière en Nouvelle-Calédonie. Elle a été et est toujours un haut lieu de production minière. De grandes concessions ont été et sont encore de hauts lieux d'exploitation du nickel sur son territoire, telles le Plateau ou le Camp des Sapins. Des transporteurs et un transbordeur ont été installés de sorte de transporter le minerai directement aux bateaux ramenant leur chargement aux fonderies. Plus tard, une fonderie a été mise en place à Thio-Mission, montrant ainsi l'importance du lieu dans la production de nickel. Thio a été un temps le haut lieu de l'industrie du nickel en Nouvelle-Calédonie. Malgré l'économie florissante qu'elle a prodiguée, l'exploitation du nickel a aussi marqué profondément et durablement la Nouvelle-Calédonie et particulièrement le bassin de la Thio (Bencivengo 2014a)

## 2. Caractérisation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe sur la commune de Thio. Elle fait partie du bassin versant de la Thio qui s'étale sur une partie de la commune et sur celle de Bouloupari également (Figure 7).

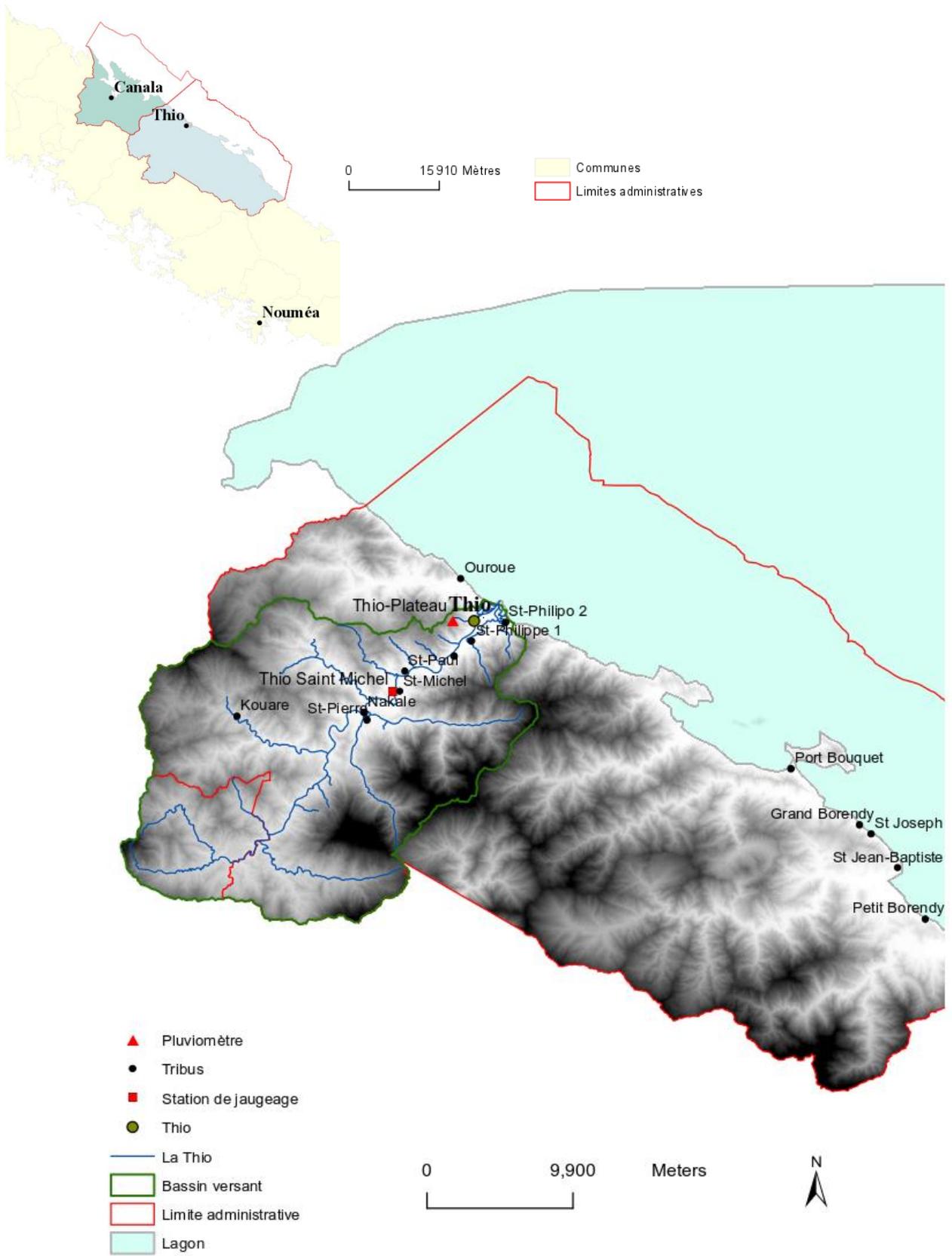


Figure 7: Carte de la commune de Thio, LS. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.)

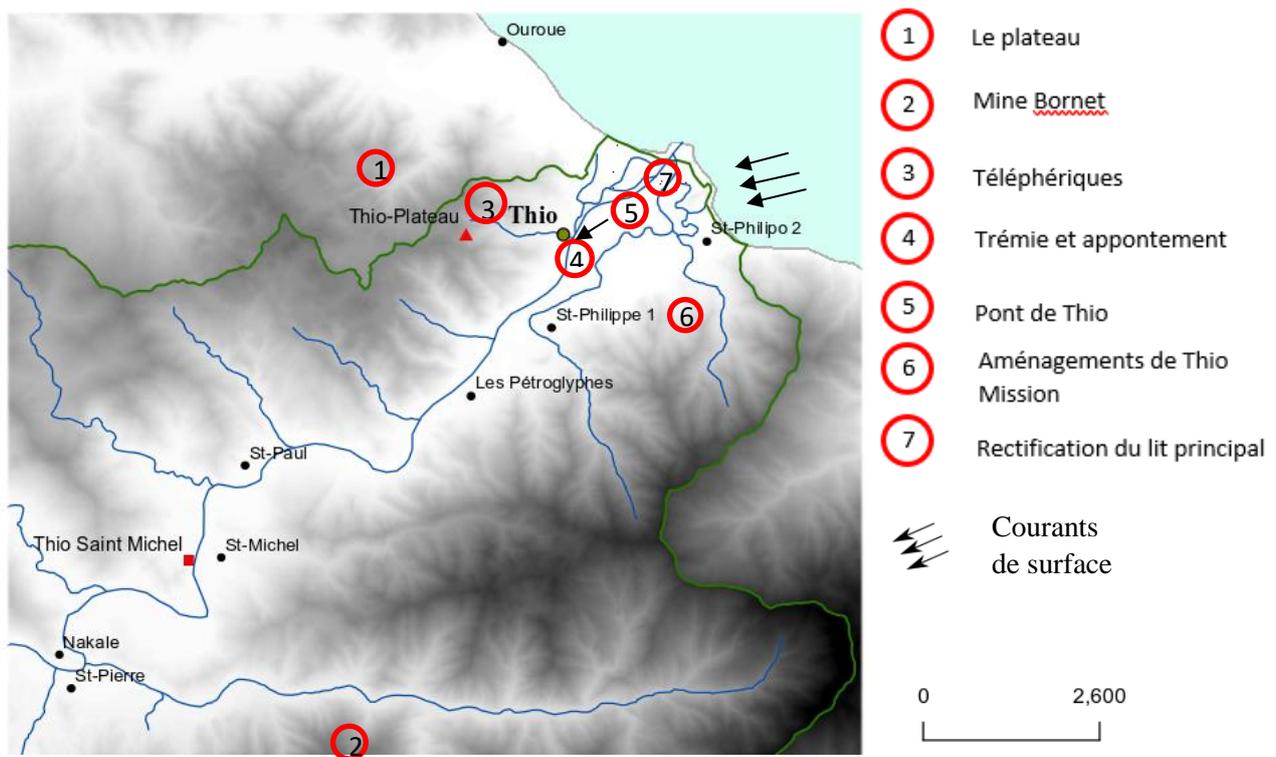


Figure 8 : Carte de la zone d'étude plus précise, LS. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.)

La zone d'étude s'étend de la tribu de St Michel, à l'amont de Thio-Village, jusqu'au trait de côte (Figure 8). Il semble en effet cohérent de définir un système sur lequel l'étude va être menée, en fonction des données disponibles et des contraintes de traitement de ces données. C'est donc St Michel qui est choisi comme limite amont car la station de jaugeage d'où proviennent les chroniques de débits disponibles se situe au niveau de cette tribu. Les limites latérales sont définies par les bordures du bassin versant, et n'englobent pas les régions aux altitudes plus importantes. La zone d'intérêt concerne surtout le thalweg, l'analyse des données est donc adaptée à ce choix.

Canala rentre également en compte dans la zone d'étude. Des données de pluies d'archives sont en effet disponibles sur cette commune. Elle est située dans le bassin de Negropo, plus au nord de Thio, également sur la côte ouest.

Le bassin de la Thio se situe sur la côte Est de Grande Terre, conditionnant ainsi ses caractéristiques climatiques, et ainsi hydrologiques et géomorphologiques.

L'exutoire du bassin versant d'étude se trouve à l'embouchure de la Thio, au niveau du village de Thio, dont le nombre d'habitants s'élevait à 2643 habitants en 2014 (ISEE). Le bassin a une surface d'environ 340 km<sup>2</sup>. Sa superficie semble être calculée différemment selon les travaux précédemment effectués lors d'autres études : 344 km<sup>2</sup> (Allenbach et Hoibian, 2002), 391 km<sup>2</sup> (EIL, 2017), ou encore 397 km<sup>2</sup> calculés à partir de la couche SIG du bassin versant extrait et utilisé dans cette étude. L'altitude maximale du bassin versant est de 1006 m. Le relief de cette zone est assez marqué, puisque des massifs montagneux s'élevant à environ 1000 m bordent la vallée de la Thio et la partie deltaïque, encaissant ainsi largement les vallées présentes. En tête du bassin, des pentes supérieures à 15 % sont observées. (EIL, 2017)

Le réseau hydrographique semble particulièrement dense, présentant de nombreux creeks, nom donné aux ruisseaux en Nouvelle-Calédonie. Une partie de ce réseau, composé de la Thio et des rivières affluents principales sont présentées sur la Figure 7.

La Thio se forme à la confluence de la Kuenthio, la Nakalé, la Neburu et la Fanama, et descend vers l'embouchure sur 19 km, observant une pente moyenne de 7%. La Thio est de type méandriforme ; avec des basses terrasses assez étroites et allongées et des moyennes terrasses plus larges principalement autour des méandres. Deux domaines peuvent être observés sur cette rivière : un cours amont alimenté par la Nakale, la Neburu et la Fanama, avec une faible largeur de lit mineur, et un cours aval avec un lit plus large. (EIL, 2017)

On peut reprendre la classification précédemment présentée en introduction pour essayer de situer le delta de la Thio sur ce diagramme triangulaire ( Figure 9).

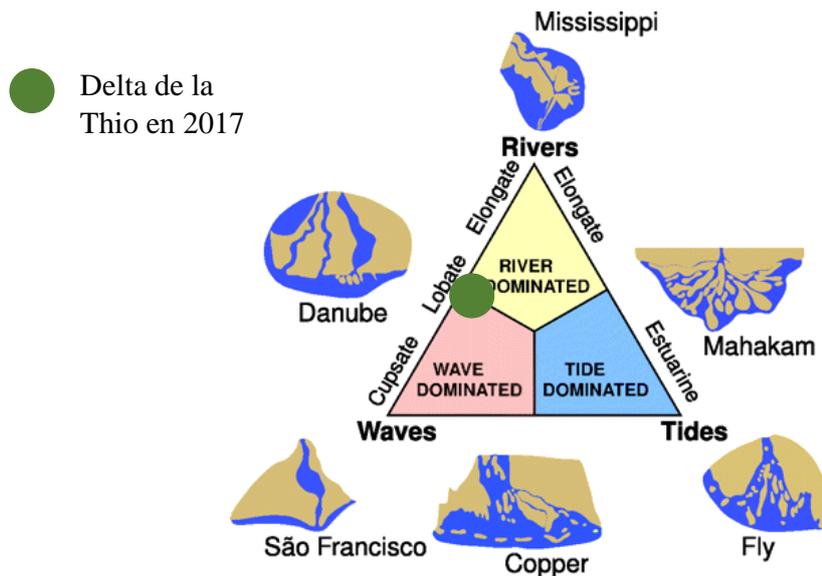


Figure 9 :Diagramme ternaire présentant une classification des deltas. Source: (Salemstate edu, s. d.), (Galloway 1975)

La morphologie du delta de la Thio est dominée par des processus fluviaux, mais peut également se rapprocher d'une influence côtière en raison de la houle et de l'influence de la marée marées. Actuellement, nous situons approximativement le delta dans le diagramme Galloway (1975) entre une influence fluviale et une influence liées à la houle et les courants du lagon qui permettent un export des matériaux.

La zone deltaïque de la Thio présente une surface d'environ 4 km<sup>2</sup> en 2017. D'autres caractéristiques du delta seront présentées lors de l'analyse de l'évolution de sa morphologie au cours du temps. Le domaine marin du delta est le lagon. Sa zonation est définie par des ensembles successifs parallèles au trait de côte. Le delta est constitué de deux lobes séparés par un réflecteur de forte amplitude qui sera analysée grâce à des datations (Figure 10). (Allenbach, 2017)

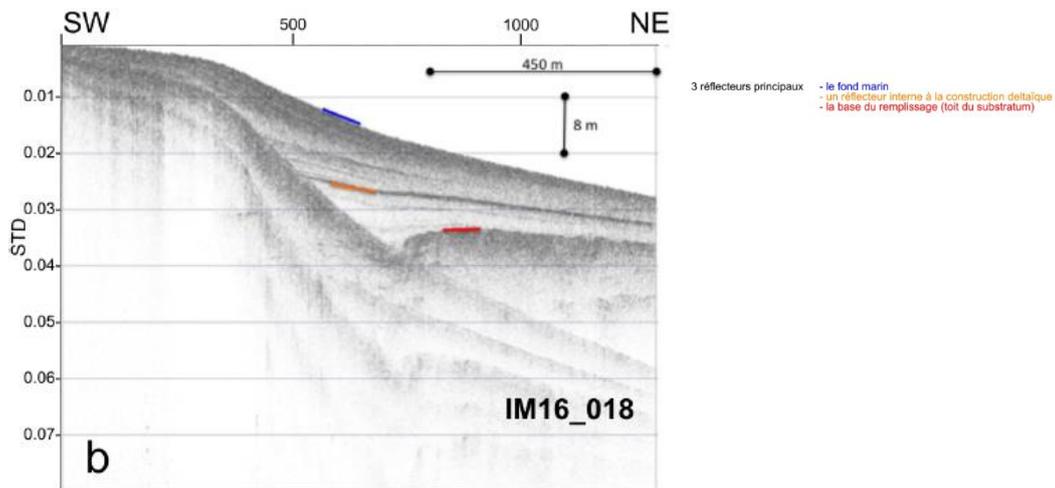


Figure 10: Profil sismique boomer perpendiculaire à la côte (Allenbach 2017)

On peut identifier deux ensembles bien distincts sur ce profil sismique vertical en coupe et le réflecteur est bien identifiable également.

La profondeur moyenne du lagon est de 25 m avec des endroits atteignant jusqu'à 50 m. (CEIL, 2017). Il est également montré que le delta a largement progressé sur le domaine marin depuis 1954 : 1 million de m<sup>3</sup> auraient sédimenté au droit de l'embouchure de la Thio entre 1954 et 1998 (Allenbach et Hoibian, 2002). L'appareil deltaïque présent au droit de l'embouchure ne facilite pas l'évacuation des crues, augmentant ainsi le risque d'inondation. (CEIL, 2017) Des travaux de rectification du lit principal de la Thio ont été entrepris dans les années de 1980, afin d'obtenir un lit rectiligne conduit plus loin dans le lagon. Cela permet d'augmenter le gradient hydraulique, en vue d'évacuer l'eau et ses sédiments plus loin, d'un point de vue hydraulique. Cependant, un raccourcissement des digues est envisagé, car l'apport sédimentaire ne s'équilibre pas avec l'énergie des vagues au niveau de la rive gauche, creusant ainsi la côte.

Le lagon au niveau de la zone d'étude est bordé d'un récif corallien intermédiaire à 2 km de la côte et d'un récif barrière entrecoupé par une large passe. Ce récif est dédoublé et ennoyé, et présente des caractéristiques liées à un hydrodynamisme avec une forte influence océanique. (OEIL 2017) Cette barrière constitue la limite du lagon.

Une étude sur les courants côtiers a été réalisée par la SLN au niveau de l'ancien quai de déchargement de la SLN, sur la rive droite de la Thio, au niveau de la Mission. Il s'avère que les courants principaux prennent une direction Nord-Ouest. (OEIL 2017)

L'occupation des sols peut jouer un rôle dans les processus d'évolution du delta car il s'agit d'un aspect essentiel pour expliquer les caractéristiques d'évolution morphologique de la zone d'étude est l'occupation des sols, composante des éléments descriptifs de l'évolution d'une zone.

La végétation néo-calédonienne est entièrement conditionnée par le type de sol et son substrat sur lequel elle vit, mais également de par l'impact de l'Homme. Elle compose 98.1 % de la surface du sol sur le bassin versant de la Thio. (Mériaux, 2017)

La végétation de la zone d'étude peut être présentée par strates : strate arborée, strate arbustive et strate herbacée, comme la Figure 11 le représente.

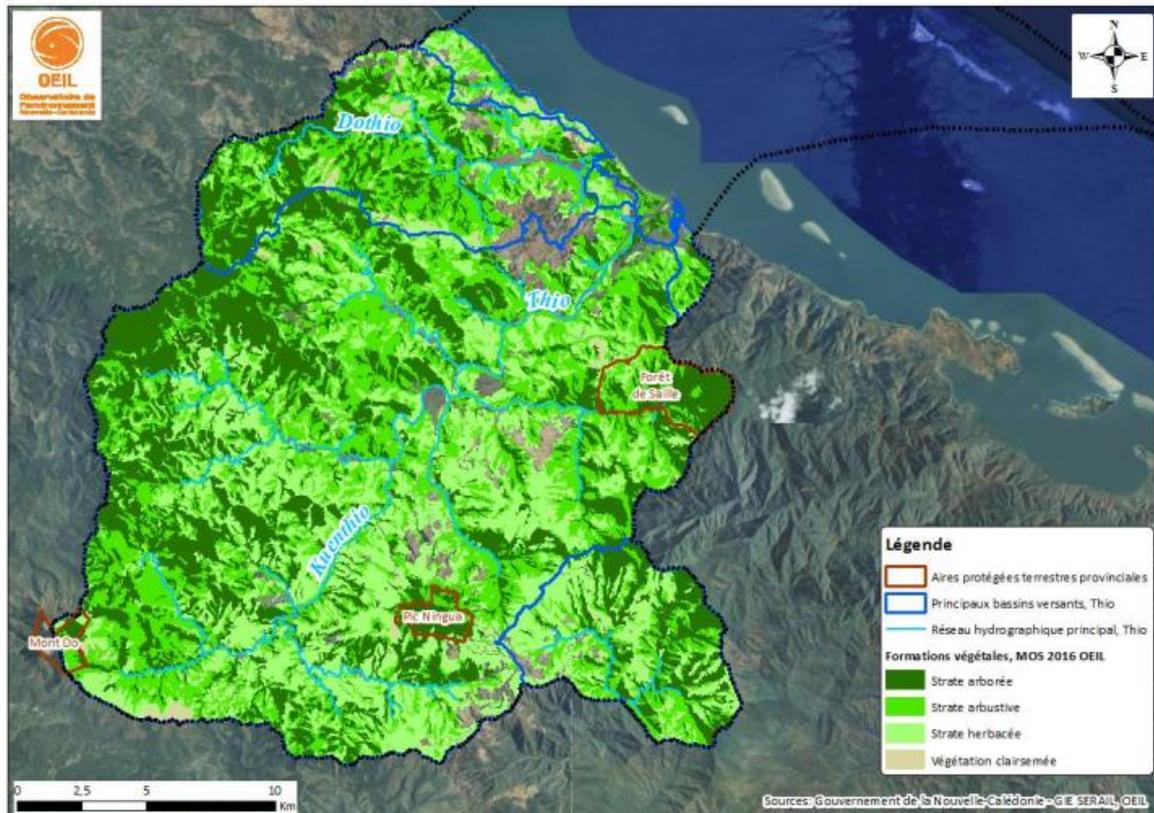


Figure 11: Formation végétale découpée en strate. Source : OEIL, 2014

Il n'est pas observé de dominante réelle sur le type de strate en termes de surface de recouvrement. Il semble cependant que la strate arborée se développe de façon privilégiée dans les zones de plus haute altitude. La strate arbustive semble entourer et accompagner les arbres. La strate herbacée semble plus présente sur les zones de plus basse altitude, certainement plus occupées par l'homme et près de la Thio.

On peut de plus détailler les formations végétales composant les différentes strates. Les formations végétales présentes sur le bassin versant de la Thio se divisent en quatre catégories : les forêts denses sempervirentes, les maquis miniers sur sols ultramafiques, les zones paraforestières, les prairies et les savanes à Niaoulis sur substrats volcano-sédimentaires et alluvionnaires. (Leroux 2009) Le Tableau 1 présente la part de surface d'occupation des formations végétales présentes sur le bassin.

Formation végétale	Surface (km <sup>2</sup> )	% d'occupation du sol
Forêt	137,8	35
Savane	30,1	8
Maquis	123	32
Arbustes	68	18
Végétation éparse	30	8

Tableau 1 : Surfaces des formations végétales par rapport à la superficie totale couverte par la végétation Source : (Mériaux 2017)

Il est remarqué que ce tableau ne présente pas la zone para-forestière. Elle est probablement assimilée à la végétation éparse. Les arbustes ont leur surface reportée bien qu'ils constituent une strate définie, et non un type de formation végétale. Ce tableau est donc à considérer comme un complément d'information de la description des formations végétales réalisée par la suite. Il peut être complété par les surfaces d'autre occupation du sol.

Occupation du sol	Sols nus	Habitations
Surface (m <sup>2</sup> )	5 698 010,00	1 125 040,00
% Occupation du sol	1,4	0,3

*Tableau 2: Surfaces en sols nus et des habitations (Mériaux 2017)*

Les forêts denses humides de basse et moyenne altitudes (ou sempervirentes) ont pour substrat des roches volcano-sédimentaires ou des roches ultramafiques. Les premières sont composées en grande partie de palmiers, conifères et de familles à caractère primitif. Ce type de forêt est touché par des feux de brousse qui les font régresser au profit de savanes et du maquis sur roches siliceuses. Cela montre l'effet négatif de l'action anthropique sur ce type de végétation. (Agniel, 2012)

Les maquis sur roches ultramafiques ou « maquis miniers » ne font pas partie de la forêt dense humide. Ils se développent sur des roches ultrabasiqes qui manquent fortement d'éléments nutritifs mais qui sont riches en nickel, manganèse, chrome, cobalt et magnésium. Ils forment une barrière écologique pour des espèces introduites non-adaptées à un environnement hostile manquant de ressources et toxique. Les familles qui représentent le maquis minier sont les Apocynacées, les Casuarinacées, parmi d'autres. (Agniel, 2012) La flore des maquis miniers est quasiment totalement endémique. (Hoff, 1982)

Les formations paraforestières sont des forêts sèches et constituent des zones de transition entre les forêts denses humides et les maquis. (Jaffré, 1980) Ce sont souvent des forêts dégradées et donc présentes en bordure des forêts denses. (Leroux, 2009)

Les prairies et savanes à Nialoulis sont le résultat d'incendies ou de défrichage récurrents. Les savanes à Niaoulis font donc partie de la strate arborée. (Agniel, 2012) Les Niaoulis font partie de la famille des Myrtacées présentent une écorce capable de s'effiloche et leur permettant de résister aux feux. Ils sont capables de se développer sur des sols très pauvres et font preuve d'une grande plasticité, leur permettant de coloniser des milieux hétérogènes en termes d'altitude, de substrat ou encore d'humidité. (Hoff, 1982)

Une formation végétale supplémentaire constitue les mangroves. Elles font partie de la strate arborée, et peuvent être associées à la formation végétale de la forêt dense humide, et sont composées de palétuviers. Ils n'excèdent pas 8 à 10m de haut. Des patchs de mangrove sont encore présents dans le delta et constituent un écosystème d'intérêt patrimonial, protégé par le Code de l'environnement de la province Sud. (CEIL, 2017) Les palétuviers se développent dans la zone de balancement des marées. (Agniel, 2012) Les palétuviers rouges du genre *Rhizophora* possèdent des racines aériennes qui atteignent le sol et s'y ancrent à l'aide d'échasses-support leur permettant de se maintenir dans le sol. L'aérenchyme alimenté de par des pores ou lenticelles leur permettent d'assurer les échanges respiratoires lorsqu'ils sont dans l'eau. L'autre genre présent sur le delta de la Thio est *Avicennia*, ou palétuviers blancs, présentant des pneumatophores, croissant toutefois de bas en haut et assurant des échanges avec l'air. La mangrove constitue un milieu très riche et à grande valeur écosystémique. De nombreux animaux y vivent : poissons, mollusques, crabes ou encore des insectes ou oiseaux.

La mangrove est également un puits de carbone, capable d'en stocker de grandes quantités. L'Homme y trouve également de quoi se nourrir et du bois ou du sel, mais a tendance à l'exploiter de manière de moins en moins raisonnée. En Nouvelle-Calédonie et sur la zone d'étude, la mangrove est très peu exploitée. Les palétuviers colonisent rapidement les bancs de vase dans la zone intertidale. Ils sont sensibles au niveau marin et à la sédimentation. En effet, lorsque le niveau de l'eau devient trop important, la mangrove ne peut plus s'établir et est repoussée vers les terres. De la même façon, si le niveau de la mer baisse, la mangrove perd du terrain sur la partie terrestre au profit de l'aval vers la mer, observant ainsi un mouvement continu d'amont vers aval, et d'aval vers amont. Ainsi, la mangrove est également sensible à des phénomènes de sédimentation, avançant le trait de côte et la repoussant vers la mer. (Fromard, Michaud, *et al*,2018)

L'étude de la dynamique de la mangrove au cours du temps peut être un indicateur de modifications du comportement du delta et constitue donc une piste pour évaluer l'effet d'une sédimentation anormalement excessive provenant de l'amont.



Figure 12: Carte de la géologie du bassin versant de la Thio

Des formations géologiques variées sont présentes sur le bassin de la Thio (Figure 12). Sur la rive gauche de la Thio, des formations de type volcano-sédimentaires et éruptives sont majoritairement représentées. Cependant, près du delta au niveau du Plateau de Thio, c'est la roche ultramafique péridotitique qui est principalement représentée, conférant à Thio

d'importantes ressources minières. De la même façon, la rive de la Thio est principalement composée de formations ultramafiques, constituant la fin du massif de péridotite du Sud. Les roches majoritaires sont les harzburgites. (CEIL, 2017)

Les surfaces de chaque type de roches sont présentées dans le Tableau 3.

Type de roches	Surface (km <sup>2</sup> )	% d'occupation sur la surface totale des sols nus
Sédimentaires	135	35
Magmatiques	23	6
Métamorphiques	127	33
Détritiques	31	8
D'altérations tropicales	70	18

Tableau 3: Surfaces des types de roches sur la surface totale des sols nus

La majeure partie des sols sont constitués de roches sédimentaires ou de roches métamorphiques.

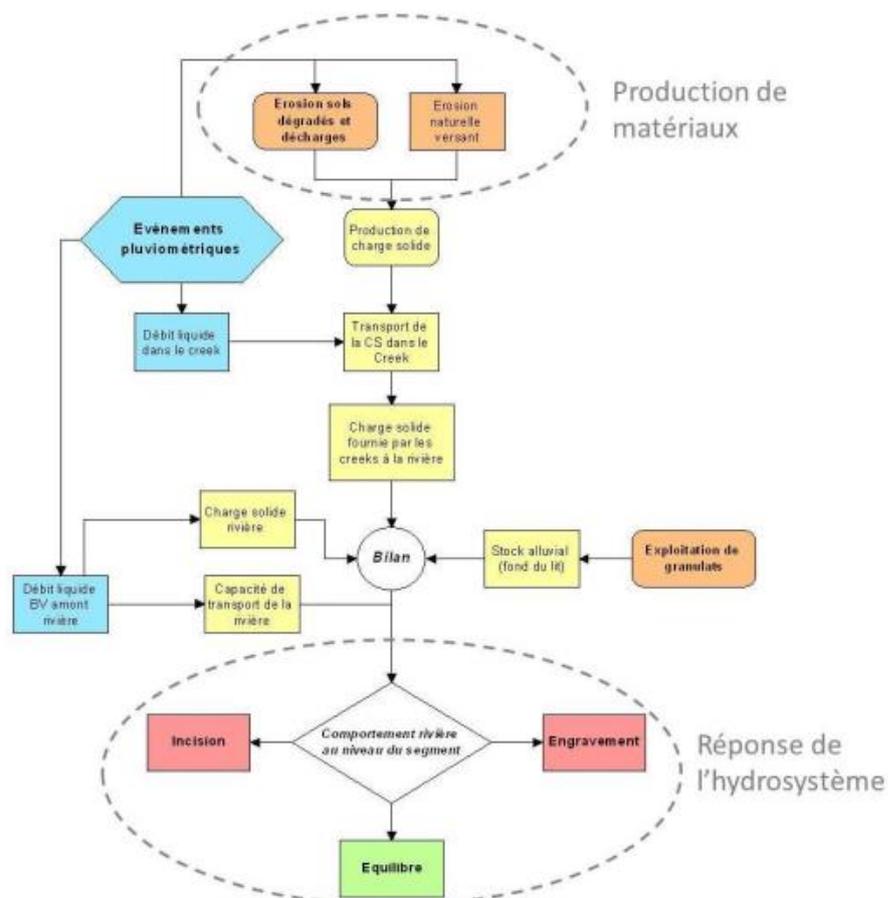


Figure 13: Schéma simplifié du fonctionnement des cours d'eau des rivières de Nouvelle-Calédonie. Source : (Garcin

La Figure 13 montre le fonctionnement des cours d'eau sur l'archipel. Il montre les principaux forçages conditionnant les systèmes fluviaux : événements pluviométriques, l'érosion des sols accentuée par des activités anthropiques et l'érosion naturelle, ainsi que l'exploitation de granulats. Diverses réponses sont observées, mais en ce qui concerne la zone d'étude, la réponse du système est l'engravement du cours d'eau sur ses 20 derniers km. (Garcin, 2013)

Borne inférieure	Borne supérieure	Effectif	Fréquence
0	5	19925	0.841
5	15	1868	0.079
15	25	650	0.027
25	50	689	0.029
50	100	375	0.016
100	200	162	0.007
200	300	24	0.00101
300	400	2	0.00008
400	500	1	0.00004
500	600	1	0.00004

Figure 14 : Tableau des effectifs et fréquences des pluies pour les classes définies. Source : (GARCIN 2017)

La majorité des jours de pluies ont une pluviométrie inférieure à 100 mm/j (Figure 14). Des événements plus forts ont lieu moins fréquemment : la classe qui comprend les pluies entre 500 et 600 mm/j comprend un jour de pluie sur toute la série de données.

La pluviométrie annuelle est ensuite analysée (Figure 15).

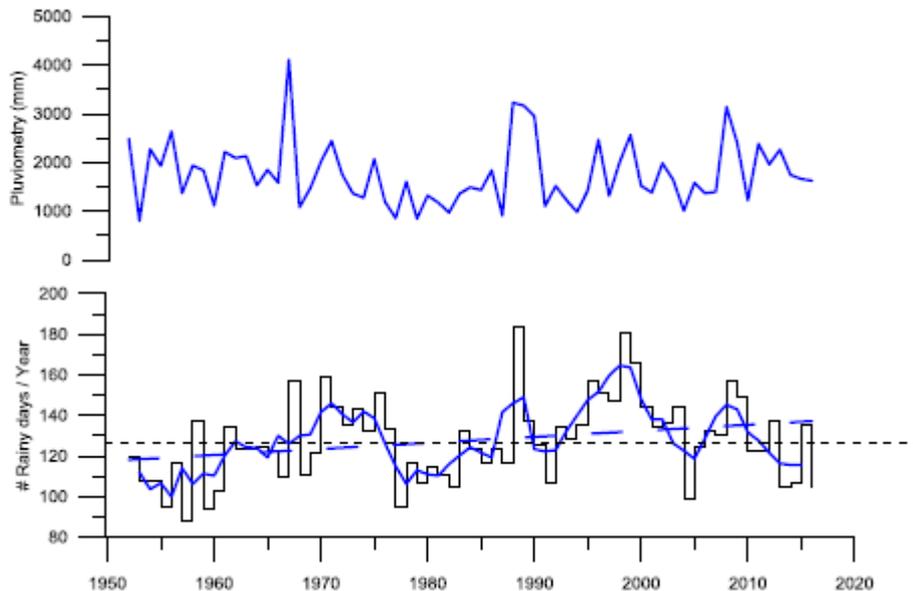


Figure 15: Pluviométrie annuelle en haut, nombre de jours de pluie par an en noir en bas, moyenne glissante du nombre de jours de pluie par an (courbe noire en bas), et la tendance d'évolution du nombre de jours de pluie par an (tirets). Source : (GARCIN 2017)

Les différentes courbes de la Figure 15 montrent une forte variabilité des pluies annuelles sur toute la période. Le minimum est de 804 mm/an et le maximum de 4111 mm/an. Le nombre de jours de pluie par an est également très variable, atteignant un minimum de 88 jours et un maximum de 184 jours. La dérivée de la tendance (courbe en tirets bleus) semble augmenter au cours du temps indiquant une augmentation du nombre de jours de pluie par an.

La distribution des mois de pluies (Figure 16) montre que les mois avec le plus de pluie sont janvier, février, et mars qui correspondent à la saison humide. Elle montre une forte variabilité également, interannuelle et mensuelle.

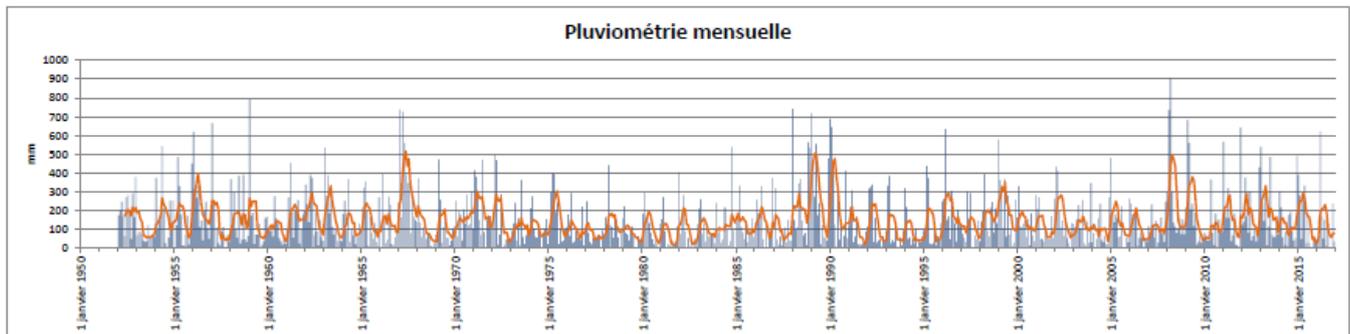


Figure 16: Pluviométrie mensuelle (courbe bleue) et moyenne glissante sur trois mois (courbe orange)

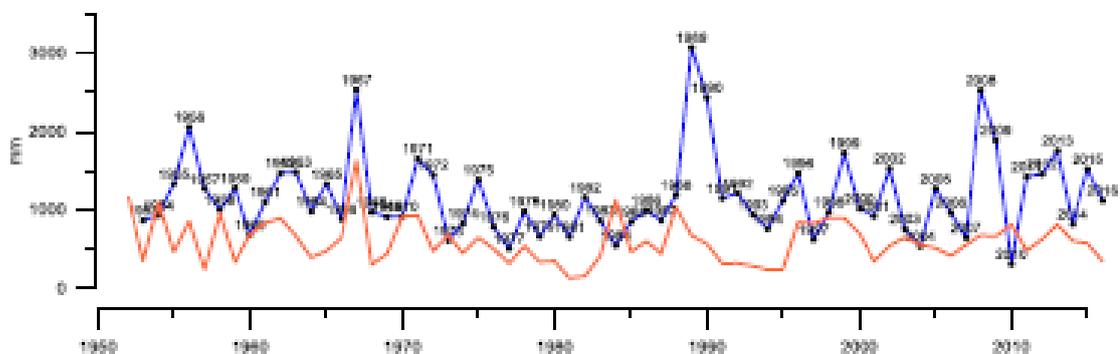


Figure 17: Précipitations par saison (rouge : saison sèche, bleue : saison cyclonique)

La pluviométrie moyenne de la saison cyclonique (du 1<sup>er</sup> novembre au 30 avril) (Figure 17) est de 1162 mm, le minimum est de 310 mm et le maximum de 3076 mm. La pluviométrie de la saison sèche présente une moyenne de 597 mm, avec un minimum de 131 mm et un maximum de 1633 mm. La pluviométrie est très variable entre les deux saisons, et au sein même des deux saisons. Sur la période cyclonique, il est arrivé très rarement que le minimum de pluie de la saison cyclonique soit inférieur à celui de la saison sèche.

La pluviométrie est l'un des forçages agissant sur la zone, et peut être complétée par l'analyse des débits.

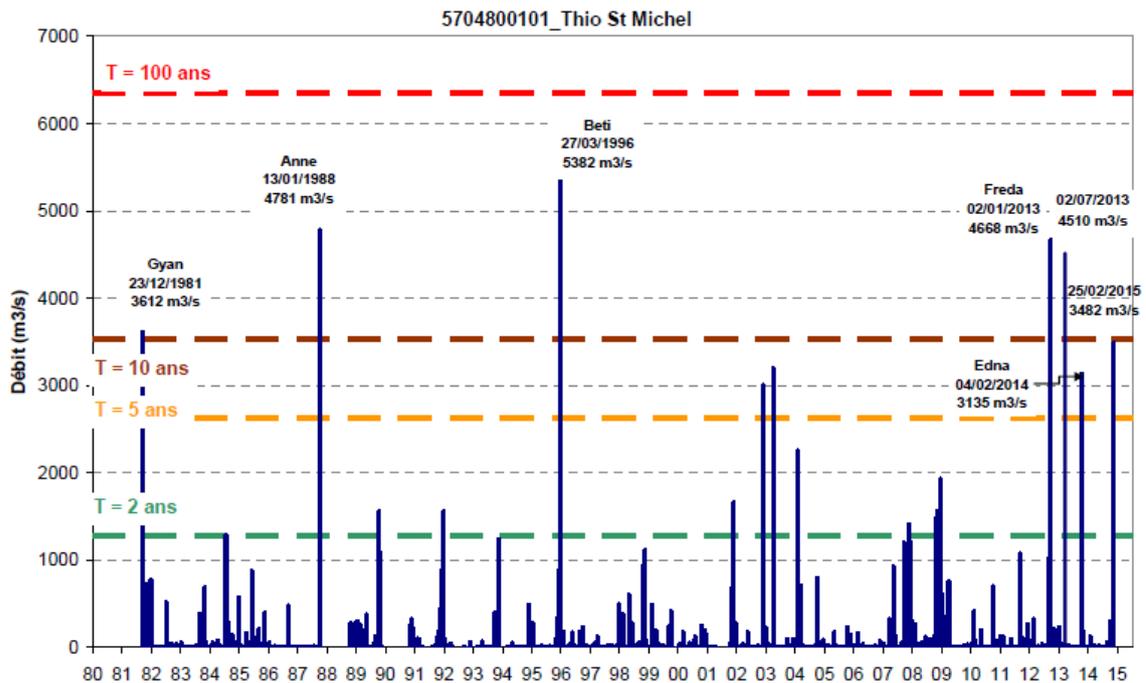


Figure 18: Synthèse des débits sur la station de Thio St Michel. Source : (DAVAR, 2015)

La Figure 18 montre la chronique de débits de 1981 à 2015, avec les débits de périodes de retour 2, 5, 10 et 100 ans. Sur cette période, le débit de période de retour 100 ans (environ  $6200 \text{ m}^3/\text{s}$ ) n'a pas été atteint. Les pics au-dessus de la période de retour 10 ans (environ  $3500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) correspondent tous à des événements forts tels que des cyclones ou des tempêtes tropicales.

Sur la période 1981-2008, le débit jaugé minimal est de  $0.673 \text{ m}^3/\text{s}$  et le débit maximal jaugé est de  $724 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cependant, le débit maximal a été évalué à  $5688 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le module annuel est de  $7.33 \text{ m}^3/\text{s}$ . A l'étiage sec, pour une période de retour 5 ans, le débit est de  $0.962 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'hydrologie conditionne également la géomorphologie de la zone d'étude.

La zone d'étude connaît depuis les années 70, un sur-engravement de ses cours d'eau. Cela est dû en grande partie à la prospection et à l'exploitation minière. Cette industrie a généré notamment d'importants stériles miniers déversés à flanc de montagne et a laissé des sols avec son substrat affleurant, extrêmement vulnérable à l'érosion. (Allenbach et Hoibian, 2002) L'hypersédimentation est à dominante d'arénites et de lutites. (Allenbach, 2017) Les changements du lit mineur observés dans la basse-vallée sont l'ensablement de la rive droite, ainsi que le développement de méandres à l'amont et à l'aval du pont, à partir d'un lit très rectiligne de base. (Laganier et Danloux 1991) Divers éléments indiquent en effet un engravement du delta. Jusqu'en 1930, il était possible de remonter en bateau jusqu'au Pétroglyphes, ce qui n'est plus le cas (Figure 8) (Allenbach, 2002). Les bateaux ne remontent d'ailleurs plus ni même vers Thio-Village, comme autrefois quand les minerais provenant du Plateau étaient transportés par chaland depuis l'apponement de Thio.

La Figure 19 montre l'évolution des chenaux de la Thio entre 1955 et 1978, avec les surfaces de dépôts et de remblai ou érodées. La zone la plus à l'amont a été remblayée par les populations pour créer une zone d'habitations protégée. Des zones d'érosion sont visibles près du village en rive gauche.

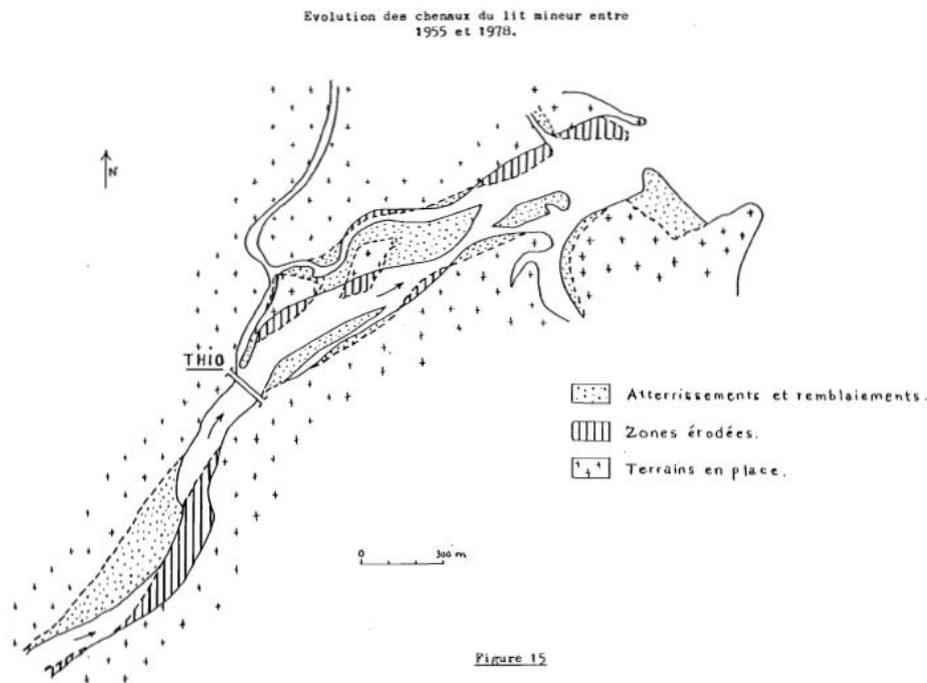


Figure 19: Evolution des chenaux du lit mineur entre 1955 et 1978

Plus en hauteur, les creeks situés sur les versants surplombant le delta transportent les gros sédiments, qui sont stockés à la confluence avec la Thio. Il y a un tri granulométrique de l'amont vers l'aval du bassin versant. La Thio n'a pas l'énergie suffisante pour transporter les rochers, ni les graviers. Ce sont donc principalement les sédiments fins qui sont transportés jusqu'au delta (Garcin 2013) Les graviers et rochers étant stockés dans les creeks, le village de Thio par exemple connaît des laves torrentielles, liées aux événements extrêmes, ainsi que des épisodes d'inondation de plus en plus récurrents. La zone qui s'étend de l'embouchure jusqu'aux Pétroglyphes est en zone inondable. (Gosset, 2016) (Annexe III) Les blocs de pierre n'atteignent pas le delta et se stockent à la confluence de la Thio et de ses affluents. Le delta se remplit plutôt de sédiments fins. Les populations attendent donc des actions entreprises : Des curages sont attendus et certains ont déjà eu lieu comme à St Pierre, avec en définitive peu de résultats à long terme et un manque de satisfactions des tribus concernées. (Gosset, 2016)

De nombreux sites miniers sont présents sur la commune de Thio : Le Plateau, Camp des Sapins et d'autres concessions produisent des quantités importantes de minerais. Un plan incliné y a été installé en 1882 dès le début de l'exploitation. Après la fermeture de la fonderie de la Pointe Chaleix, une fonderie a été construite en 1889 à Ouroué avant d'être fermée deux ans plus tard à cause de fondations instables. D'autres aménagements témoignent de l'essor de l'activité sur la commune de Thio tels que le transbordeur à Thio Mission ou les transporteurs aériens de la mine Bornet jusqu'à la Mission notamment (annexe XIX). Le Tableau 4 complète la chronologie des aménagements miniers et environnementaux.

Année	Aménagement	Utilité
1898	Installation du pont submersible	Acheminer les minerais jusqu'à Thio-Mission
1902	Pont sur la rivière de Thio	Pour relier le village à la plaine de Thio-Mission avec une ligne de chemin de fer.
1906	Mise en service du complexe mécanique à Thio-Mission	"Mécanisation des opérations de stockage et d'embarquement des minerais" (Benvivengo)
1912	Fonderie de Thio-Mission mise en service	"Les grues et structures du transbordeur sont endommagées et diminuent la capacité d'expédition."(Benvivengo)
1918	Fin du pont submersible	
1920	Fin de l'extraction du Nickel saprolithique par galeries souterraines	
1930	Date limite d'accessibilité aux Pétroglyphes en bateau	
1950	Débuts de l'extraction mécanisée du nickel	Atteindre de plus grandes profondeurs
1954	Construction du pont de Thio actuel	
1960	Technique du sondage carotté	Méthode pour découvrir d'autres gisements
1961	Nombreux travaux de prospection mécanisée	Encouragement de l'administration de la SLN
1970	Date-clé de changement de comportement du delta (Gosset, 2016)	
1975	Fin du déversement des stériles sur les versants	
1976	Première réglementation environnementale	
1980	Premières rectifications du lit de la Thio au niveau de l'embouchure	Evacuation plus rapide de l'eau
1987	Technique de prospection par héliportage	
1995	Raccourcissement des digues	
2003	Cyclone casse les digues	
2008	Schéma de mise en valeur des richesses minières	Protection de l'environnement pour l'exploitation des gisements
2009	Mise en place du fonds Nickel	Financement de projets de réhabilitation et soutien des communes

*Tableau 4 : Chronologie des aménagements sur la zone d'étude, d'après (Bencivengo 2014a)*

L'évolution géomorphologique du delta a des conséquences qui perturbent la vie des populations dans le bassin. En effet, ces modifications de comportement du delta empêchent le bon déroulement de leurs activités. Les trous d'eau où ils pouvaient pêcher se déplacent ou rétrécissent. Les poissons seraient asphyxiés par le nickel lors des inondations. Leurs champs deviennent impossibles à cultiver car ils sont envahis de boue et de caillasse après une

inondation. Des espaces sacrés pour les populations Kanaks sont reconsidérés car ils sont marqués par les inondations. (Gosset, 2016) Des conflits d'usage apparaissent entre les populations locales et l'exploitant minier. Les habitants demandent réparation auprès des exploitants des mines, qui était en position d'instance publique auparavant mais qui se situe actuellement plus comme un industriel. En parallèle, un sentiment de délaissement mais également de culpabilité envahit les populations. Thio ayant été pendant longtemps la capitale économique de l'industrie du nickel, a permis l'enrichissement de nombreux acteurs de l'industrie. Après avoir perdu cette place, Thio a subi les conséquences environnementales, économiques et sociales de l'exploitation massive sur la zone. (Gosset, 2016)

## II. Matériel et méthode

Dans cette partie, les données à disposition sont présentées, ainsi que la méthode suivie lors de cette étude.

Des données sont collectées dans la littérature, des cartes anciennes, des données d'imagerie sont complétées par une collecte et une mise en forme d'une base de données de cartes postales. Les données hydrométéorologiques sont organisées (pluies et débit), et une base de données de Météo France recensant des événements météorologiques est complétée par une collecte d'informations de journaux d'archive. Le traitement de ces données est ensuite réalisé.

### 1. Présentation des données

Les données à disposition sont principalement issues de fonds d'archives. Les premières, tout type confondu, sont datées de 1870 environ.

#### a) Les cartes anciennes

Des cartes anciennes ont été récupérées aux archives territoriales de Nouvelle-Calédonie. On en compte 91, sur des zones couvertes allant de Port-Bouquet à Nakéty ainsi que sur des bassins versants proches de celui de la Thio, tels que Bouloupari. Les cartes représentant la zone d'étude sont donc triées, et présentées dans le Tableau 5. Un code est attribué à chacune pour faciliter leur identification (c1 à c5).

Code de la donnée	Date de création	Zone d'intérêt	Echelle	Source	Etat de la donnée
<i>c1</i>	1874	Village de Thio	1/2000	Archives territoriales de NC	Abîmée, indications de crues.
<i>c2</i>	1880	Partie gauche du delta	1/10000	Archives territoriales de NC	Bon état, carte non centrée sur la zone d'étude et delta représenté partiellement
<i>c3</i>	Sans date	Delta jusqu'à St Paul	Sans échelle	Archives territoriales de NC	Bon état, carte détaillée
<i>c4</i>	Sans date	Bassin de la Thio	1/40000	Archives territoriales de NC	Bon état, occupation des sols moins détaillée
<i>c5</i>	1885	Delta jusqu'à St Michel	1/40000	Archives territoriales de NC	Bon état, carte non centrée sur la zone d'étude. Carte des terrains miniers

*Tableau 5: Données cartographiques issues des fonds d'archive de la Nouvelle Calédonie*

Ces cartes sont au format TIFF et ont été scannées, et sont donc à disposition au format numérique.

Il est remarqué que les cartes visent à représenter des sujets variés : certaines offrent une vue globale du bassin, comme la carte codée c4, d'autres sont quelque peu plus centrées sur le delta, ce qui est le cas pour les cartes c3 (annexe IV) et c5. Certaines ne montrent qu'une vue partielle de la rivière ou du delta, telles que les cartes c1 et c2, et représentent plutôt les terrains miniers. Elles offrent pour certaines des indications d'occupation du sol, assez précises, et au minimum y sont représentées les zones en eau. La carte c1 par exemple, présente des indications de traits de berge et de limites de zones inondées correspondant à des événements météorologiques précis ou encore à des années supposées représentatives d'événements forts. Les échelles sont également variées.

Les cartes c3 et c4 ne comportent pas d'indication de dates, mais au vu de l'état général du delta, et des zones bâties telles que le cadastre du village, elles se rapprochent de la période de 1880 à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle.

#### b) Les images aériennes

Les photos aériennes ont été récupérées sur le géoportail de Nouvelle-Calédonie (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.) et issues du fonds de la DITTT. Les photos ont été acquises lors de missions d'acquisition détaillées dans le Tableau 6. De la même façon que pour les cartes, un code a été attribué aux différentes missions effectuées et utiles pour la zone d'étude.

Code de la donnée	Date de création	Jour de la campagne	Zone d'intérêt	Altitude de vol (m)	Echelle	Surface de recouvrement d'une photo (km <sup>2</sup> )	Etat de la donnée
<i>p1</i>	1943		Delta			50	Image oblique. Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p2</i>	1954		Delta et plus en amont	5000	1/40000	45	Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p3</i>	1971	30/08 21/09 24/11	Delta et plus en amont	1520	1/40000	7	Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p4</i>	1976	Entre le 14/09 et le 24/11	Delta et plus en amont	3040	1/40000	27	Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p5</i>	1982		Delta et plus en amont		1/40000	4	Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p6</i>	1985	25/10 02/12	Delta et plus en amont	6120	1/40000	95	Panchromatique. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p7</i>	1989		Delta et plus en amont		1/40000	4	Couleur. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p8</i>	1995		Delta et plus en amont		1/40000	25	Couleur. Images non géroréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p9</i>	2008		Delta et plus en amont		1/40000	25	Couleur. Images non géroréférencées ni orthorectifiées.

Tableau 6: Données d'imagerie aérienne issue de la DITTT

Les photos aériennes sont des scans de photos et sont au format JPEG. Peu de métadonnées sont disponibles sur Georep, exceptées la date et les indications de donnée brute. Les informations de la date exacte de la campagne, ainsi que l'altitude de vol ont donc été obtenues dans le rapport de stage de Perrine DRAIN (Drain 2016), qui a obtenu ces données par l'IGN. Les indications d'échelle ont été collectées dans le rapport de stage d'Arthur LEROUX (Leroux 2009).

De plus, les images collectées sur georep.nc n'ont pas subi de traitement. D'autres données d'images orthorectifiées et géoréférencées ont été récupérées à l'IRSTEA Grenoble et permettent ainsi de gagner du temps sur la partie du géoréférencement ou de gagner en qualité d'image et en résolution (Liébault, pers. comm). Les données de départ proviennent également des missions d'acquisition de la DITTT. Les résultats de l'imprécision et de la résolution des images couvrant la zone d'étude sont présentés dans le Tableau 7.

<b>Code de la donnée</b>	<b>Imprécision (m)</b>	<b>Résolution finale (m)</b>
ortho_1971	<5	1
ortho_1976	<5	1-1.5
ortho_1985	<5	1,5
ortho_1989	<5	1

*Tableau 7: Données d'imagerie orthorectifiée*

Toutes les images à disposition ne couvrent pas forcément la zone du delta, réduisant ainsi le jeu de données retravaillées à quatre années. Différentes méthodes de texturation ont été utilisées, dont le résultat est visible sur ces images. La qualité est variable : la résolution est moins importante sur les images de 1976 et 1985, et des artéfacts sont également présents. La rectification semble rendre floues quelques zones proches de la rivière et du littoral. La qualité de l'image a un impact sur les délimitations des types d'occupation du sol : ceux-ci semblent en effet parfois décalés entre les différents résultats d'images. Il s'agit donc de prêter une attention particulière à la qualité d'imagerie lors de l'extraction des données présentes.

Les cartes anciennes et les photographies aériennes sont simplement triées selon la zone qu'elles couvrent.

### c) Cartes postales et photos obliques

Un autre type de données pouvant offrir une bonne représentation de l'état du delta au niveau de son occupation du sol, et de sa morphologie sont les cartes postales anciennes et les photographies. Les données à disposition sont issues de différents fonds, souvent de collections de locaux ou de passionnés. Elles sont au format JPEG, et il peut en être compté jusqu'à environ 400.

Il est remarqué que des mêmes prises de vue sont observables à des dates différentes, parfois même bien échelonnées dans le temps. De plus, le delta et plus particulièrement l'embouchure de la Thio sont photographiés depuis différents points, rendant ainsi une vision plus globale et avec un bon angle de la rivière. (Annexe VI)

D'autres aspects du bassin sont également représentés, tels que les conditions de travail dans les mines, ou encore les aménagements comme les transporteurs aériens ou encore le transbordeur de Thio-Mission. Des éléments d'événements météorologiques forts sont également identifiables : les dégâts causés par le cyclone de 1909 par exemple, ou les laves torrentielles jusque dans le village de Thio (annexe V).

Enfin, il faut préciser que les indications de dates sur les cartes postales sont souvent issues du timbre, et indiquent donc des années de circulation, et donc une date imprécise de l'état du delta représenté. Des métadonnées sont cependant disponibles et par reconstitution des différents états des aménagements comme le pont de Thio notamment, des dates approximatives peuvent être déduites.

Les cartes qui vont être utilisées par la suite sont répertoriées dans le Tableau 8.

Code	Date	Source
CPA1	1878	na
CPA2	Avant 1902	Dépêche Coloniale du 15 avril 1902
CPA3	A circulé en 1913	Site Delcampe
CPA4	1920	Site Delcampe
CPA5	Après 1913, peut-être proche de 1940	Fonds Meyers
CPA6	1919	Site Delcampe
CPA7	Entre 1954 et 1971	na
CPA8	Après 1980	na
CPA9	Autour de 1878	Fonds Meyers
CPA10	1900	na
CPA11	1906	na
CPA12	A circulé en 1908	Delcampe
CPA13	Autour de 1953	Delcampe
CPA14	A circulé en 1914	Delcampe
CPA15	A circulé en 1917	Delcampe
CPA16	Vers 1919	Delcampe
CPA17	Autour de 1920	Fonds Meyers

*Tableau 8: Cartes postales utiles avec leurs métadonnées*

Toutes les photographies et cartes postales sont regroupées dans un même fichier kmz sur Google Earth©. Leur point de prise de vue est identifié sous forme d'un repère, et la carte postale implémentée dans ce repère. En s'orientant correctement par rapport au repère, la photographie montre un état plus ancien de la zone. Un tel fichier permet de synthétiser le jeu de prises de vue, et d'apporter des informations complémentaires, telles que des métadonnées disponibles selon la source. Des indices sont présents de façon récurrente sur les cartes postales anciennes, permettant ainsi d'identifier le lieu qu'elles représentent. Parfois, il est difficile de repérer le lieu exact, une zone plus large est alors assimilée à la carte.

Ce tri de photos représentant explicitement le delta pourra servir à valider les analyses de l'occupation des sols issue des cartes anciennes et des images aériennes.

d) Données d'hydrologie et de météorologie

Les données d'hydrologie et de météorologie sont maintenant présentées. Des données de débits, et de pluies et d'autres indicateurs météorologiques sont présentés dans le Tableau 9.

Type de la donnée	Période couverte	Station	Source	Etat de la donnée et indications
<i>Débîts instantanés</i>	01/01/2015-17/10/2016	Thio-St Michel	Météo France	Donnée continue
<i>Débîts journaliers</i>	23/12/1981-16/10/2016	Thio-St Michel	Météo France	Donnée continue avec lacune
<i>Pluviométrie journalière</i>	1912-1948	Canala	Météo France	Donnée d'archive parfois incomplète et comportant des erreurs de retranscription
	01/01/1952-16/02/2017	Thio	Météo France	Donnée continue
<i>Pluviométrie mensuelle</i>	01/02/1952-16/03/2017	Canala	Météo France	Donnée continue
	De 1903 à 1951	Canala	Météo France	Données irrégulières et ponctuelles, complétées par les totaux de la donnée de pluie journalière
<i>Liste des événements pluvieux</i>	1880-2017	Nouvelle-Calédonie	Météo France	Liste non exhaustive
<i>Southern Oscillation Index</i>	1866-2017	Pacifique tropical	NOAA, ESRL	Données complètes
<i>Multivariate ENSO Index</i>	1871-2005	Pacifique tropical	NOAA, ESRL	Données complètes
<i>Interdecadal Pacific Oscillation</i>	1854-2018	Pacifique tropical	Henley et al. (2015) ERSST V5	Données complètes

Tableau 9: Données d'hydrologie et de météorologie

Il est possible de résumer plus brièvement les périodes couvertes par les différentes données : les débits journaliers sont disponibles à partir de 1981, et la pluviométrie journalière sur Canala et Thio, à partir de 1952. La pluviométrie journalière d'archive et non continue débute en 1912, et la mensuelle, en 1903.

Les données de pluie d'archives sur Canala sont présentes sous des formes variées : une fiche synthèse des pluies mensuelles à partir de 1903, des tableaux synthétiques des pluies mensuelles avec le nombre de jours correspondants à partir de 1904, et des fiches mensuelles avec des observations météorologiques et particulièrement des hauteurs d'eau à partir de 1912 qu'il a fallu numériser. Ces données sont disponibles suite à un partenariat avec Météo France Nouvelle Calédonie. (Annexe VII)

Les données d'archive de pluie sur Canala sont ensuite numérisées. D'un côté les pluies mensuelles répertoriées dans la fiche synthèse sont reportées dans des tableaux. De l'autre côté, les pluies journalières disponibles sont également notées. Cependant, les relevés étant faits à la

main, des doutes apparaissent sur l'écriture. De plus, les totaux mensuels ne sont pas toujours égaux à ceux présents sur la fiche de synthèse.

Un code qualité est donc établi et présenté dans le Tableau 10.

Code	Détail
1	Pas de doute sur la donnée
2	Doute sur l'écriture
3	Problème de somme des données journalières par rapport à ce qui est calculé dans les archives
4	Problème reporté de mesure
5	Doute sur l'année
6	Pas de relevé disponible

*Tableau 10: Détail du code attribué aux données de pluie d'archive*

Il s'agit plus précisément non de qualité croissante, mais plutôt d'une typologie des erreurs qui peuvent être générées lors de la numérisation des données et constitue un recensement des sources d'erreurs rencontrées. Ce code permet ainsi de faciliter la visibilité des données et détermine le choix qui va être effectué pour le report de la donnée en question. Une hiérarchie entre les valeurs lues et reportées, et les valeurs d'archive elles-mêmes peut ensuite être établie. Enfin, il permet de distinguer les valeurs nulles des dates sans relevé effectué.

En effet, le problème rencontré le plus déterminant est la différence entre le total des pluies journalières et celui inscrit sur les fiches de relevés journaliers, et avec la synthèse des pluies mensuelles. Si les totaux sont différents entre la sommation des données journalières et le total sur le relevé d'archive, il est alors regardé s'il apparaît des doutes sur l'écriture (code 2). Si c'est le cas et que le total ne semble pas aberrant par rapport aux autres données journalières, c'est le total mensuel d'archive qui est conservé et reporté dans le tableau des pluies mensuelles. S'il n'y a aucun doute sur l'écriture des données d'archive, c'est le total recalculé qui est conservé. Ces valeurs sont ensuite comparées avec les deux autres fiches de synthèse, notamment avec la fiche synthèse la plus propre. Si les valeurs sont différentes, le choix va être porté sur les totaux des observations journalières d'archive ou sur les sommes recalculées.

Ainsi, le tableau des pluies mensuelles est rempli grâce à la fiche de synthèse, facilitant la lecture. Comme précisé au paragraphe précédent, si des incohérences sont décelées, la priorité est portée sur la donnée provenant des archives journalières et la fiabilité de la valeur précisée. De plus, les mois pour lesquelles les valeurs de pluies mensuelles pour lesquelles les tableaux de relevés et celles de la fiche synthèse ou de celles provenant des pluies journalières sont différentes sont tout de même surlignées, de sorte à mettre en valeur le caractère moins fiable de la donnée.

La base de données Météo France recense des événements dépressionnaires depuis 1880. Le nom des cyclones, leur jour d'apparition, la zone où l'événement s'est abattu de façon privilégiée sont renseignés. Des indications de dégâts sont également expliquées, et des informations tirées de (Terry 2008) sont indiquées concernant principalement la réponse de la rivière Tontouta.

La liste des événements dépressionnaires forts reste à compléter. Pour cela, des articles de journaux anciens sont consultés sur le site de la Bibliothèque Nationale de France et sur le site internet de Georges Coquilhat (« Ma Nouvelle Calédonie », s. d.), présentant une analyse des

journaux anciens de Nouvelle-Calédonie (Tableau 11). Les informations complémentaires concernent la date du cyclone et les dégâts causés localement ou à l'échelle de l'archipel.

Nom du journal	Date de parution	Numéro	Source
La Science Illustrée	01/12/1888		Bibliothèque Nationale de France (« Bibliothèque Nationale de France »)
Journal de Fourmies	26/03/1893	1496	BnF
La Croix	31/03/1910	8288	BnF
La Presse	02/05/1924	3373	BnF
Le Temps	21/04/1931		BnF
La Revue du Pacifique	15/01/1932	6	BnF
La Croix	02/02/1932	15421	BnF
La Croix	24/02/1932	15629	BnF
L'Action française	04/04/1934		BnF
Journal Officiel de la République	02/05/1948		BnF
Les Annales Coloniales	1933	33	BnF

*Tableau 11: Journaux collectés présentant des informations d'événements cycloniques sur la Nouvelle-Calédonie*

Le Southern Oscillation Index (SOI) est un indice relatif à l'oscillation australe. Il s'agit d'un phénomène climatique faisant varier le champ de pression atmosphérique dans le Pacifique tropical. Le SOI correspond à la différence de pression entre Darwin et Papeete. (« Météo France, Comprendre », s. d.). Ainsi en Nouvelle-Calédonie, le SOI inférieur ou égal à -1.1 correspond un déficit des précipitations de la saison pluvieuse, et est corrélé avec un phénomène El Niño. Les valeurs positives, quant à elles, correspondent généralement à des saisons de pluies excédentaires, et à un phénomène La Niña. L'ensemble de ces phénomènes constituent donc l'El Niño-Southern Oscillation (ENSO) : les masses d'eau chaude et les nuages sont déplacés, ayant pour effet d'augmenter considérablement les pluies dans la zone équatoriale et d'assécher la Nouvelle-Calédonie. (*Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques*, s. d.)

Le Multivariate ENSO Index (MEI) est un outil servant à suivre les périodes d'ENSO en s'appuyant sur six variables : la pression au niveau de la mer, des composants du vent de surface, la température à la surface de la mer, la température de l'air à la surface, et la fraction ennuagée totale du ciel. (« Mutivariate Enso Index », s. d.) Les valeurs de SOI et de MEI seraient corrélées et indiqueraient les mêmes tendances caractérisant les périodes extrêmes d'ENSO (Ortiz-Tánchez, *et al*, 2002).

L'Intercadal Pacific Oscillation (IPO) correspond à des changements de température et de pression atmosphérique également sur la zone du Pacifique sud. Les cycles observés sont plus longs que pour les phénomènes relatés précédemment, et s'étendent sur des dizaines d'années, à savoir de 15 à 30 ans. Les phases négatives de l'IPO sont relatives à des périodes plus froides

dans les régions tropicales, et plus chaudes que la moyenne dans les régions plus au nord. Le contraire est observé durant les périodes positives (« Climatology, IPO, UK », s. d.).

Ces différents indices pourraient être susceptibles d'indiquer des périodes de pluies plus importantes que d'autres sur la zone d'étude, et cela depuis 1870, date de départ de cette étude.

#### e) Données de SIG complémentaires

D'autre matériel est à disposition et nécessaire à la bonne conduite de l'étude. Il s'agit de nombreuses couches de SIG étant le support de référence spatiale principal pour l'analyse des données. Ces couches proviennent principalement du géoportail de Nouvelle-Calédonie (Géoportail de Nouvelle-Calédonie, s. d.). Les données de support utiles sont présentées dans le Tableau 12.

Information de la couche	Description	Source	Auteur et contact	Système de coordonnées
Cadastre minier	Cette couche regroupe le cadastre minier actif et échu en Nouvelle-Calédonie et correspond à la situation réelle à la date de mise à jour. Elles sont susceptibles d'évoluer en fonction des créations/suppression/mouvements de titres miniers. Dernière mise à jour: 12/02/2018.	Georep.nc	Service Mines et carrières de la DIRENC	RGCN 91-93 Lambert NC
Cartographie 1/10000ème	Dalles de 5 km x 5 km en JPEG géoréférencé. Format image/raster de la donnée topographique de la Nouvelle-Calédonie à l'échelle du 10.000ème. Imprimée à 100%, les dimensions d'impression de chaque dalle sont de 50cm x 50cm. Issue de la BDTPO-NC. Description de l'occupation du sol, des infrastructures complètes du réseau routier, les constructions, les monuments, l'hydrographie, le littoral, une description précise du relief, la toponymie, la végétation, les limites administratives... La précision de cette carte est métrique.	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC
Cartographie 1/50000ème	Dalles de 5 km x 5 km en JPEG géoréférencé. Format image/raster de la donnée cartographique de la Nouvelle-Calédonie à l'échelle du 50.000ème. Imprimée à 100%, les dimensions d'impression de chaque dalle sont de 10cm x 10cm. La	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC

description est la même qu'à l'échelle 1/10 000ème.

Orthophotos	Issues de la BDORTHO-NC, des chantiers du bureau de la cartographie. Dalle unique en JPEG géoréférencé et corrigé. Résolution de 50cm. Imprimée à 100%, les dimensions d'impression de chaque dalle sont de 100cm x 100cm. Fond d'imagerie	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC
Bassin versant de la Thio	Région hydrographique de la Thio, extraite d'une SIG.	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC
Pluviomètres Thio	Indication de l'emplacement des pluviomètres sur le bassin de la Thio.	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC
Stations de jaugeage	Indication de l'emplacement des stations de jaugeage sur le bassin de la Thio.	Georep.nc	DITTT	RGCN 91-93 Lambert NC

*Tableau 12: Présentation des données SIG utiles au projet*

Le cadastre minier, les données de cartes, et les orthophotographies sont utiles au géoréférencement des données d'archives et des photos aériennes. La couche du bassin versant est utile à la délimitation latérale de la zone d'étude notamment au niveau du delta, et les couches des pluviomètres et des stations de jaugeage permettent de présenter l'origine de la donnée d'hydrologie utilisée.

D'autres informations sont décelées au fil des lectures, comme le livre Nickel, La naissance de l'Industrie de Nouvelle-Calédonie (Bencivengo 2014a) ou encore sur des cartes postales.

Les données de débits, de pluies, d'indicateurs d'oscillation australe, d'événements météorologiques sont présentées sous forme de graphiques et de frises chronologiques.

Un autre type de données qui n'est pas disponible dans un premier temps sont les aménagements réalisés sur le delta, ainsi que l'évolution de l'histoire de la mine et de la zone d'étude. Ainsi, d'un côté, une chronologie des moments marquants de l'histoire de la mine à Thio est réalisée. Plusieurs sources sont donc mises à contribution : le film documentaire « Sur les terres du roi Nick » (Beauducel 2015), un chapitre sur l'exploitation du nickel en Nouvelle Calédonie ((L'Huillier et Jaffré 2010), ainsi que le livre Nickel, La naissance de l'industrie calédonienne ((Bencivengo 2014a). D'autres témoignages de locaux, comme ceux d'un habitant de Thio sont analysés. Des informations complémentaires sur les travaux de rectification de la Thio au niveau de son embouchure sont tirées de papiers traitant de l'évolution morphologique récente du delta (Allenbach 2002). Des informations partielles en sont tirées et remises dans un ordre chronologique.

Toutes les données disponibles sont recensées dans des tableaux, présentant le code de la donnée si nécessaire, les métadonnées disponibles et les sources.

## 2. Traitement des données

### a) Les cartes anciennes et les images aériennes

Les cartes anciennes présentent les zones en eau, les zones de palétuviers pour certaines avec un figuré particulier, ou simplement des formes distinctes des zones en eau dans un autre coloris pour représenter ce type d'occupation du sol. Des zones de bâti ou de voirie sont présentes, ainsi que la forme du trait de côte, ou encore le cadastre minier. L'information principale contenue dans ces cartes est donc l'occupation des sols.

Les images aériennes présentent des indications d'occupation des sols, voire même de type de sol selon l'échelle ou la zone couverte.

Les types d'occupation ciblés pour ce sujet sur les cartes anciennes doivent pouvoir rendre compte de l'évolution morphologique du delta. Ce sont donc les zones en eau, les zones de palétuviers largement représentés, ainsi que le trait de côte qui sont numérisés. Les zones de dépôts (bancs de graviers dans la rivière) pourront être utilisées également.

Sur les photos aériennes, les mêmes types sont repérés. Cependant, l'analyse de la végétation ne peut être réalisée à un niveau de détail aussi précis que le type palétuvier annoté sur les cartes anciennes. C'est donc la classe forêt dense qui est numérisée et repérée sur les photos aériennes par une densité plus importante que les zones para-forestières notamment.

Les cartes anciennes et les images aériennes sont traitées grâce au logiciel ArcGIS®, sous ArcMap 10.4.1©. Deux étapes se succèdent : le géoréférencement et la digitalisation.

Des points homologues entre les couches sont définis et diffèrent selon la zone couverte par la carte notamment. Certains points sont cependant récurrents. Le Bota méré, une montagne présente sur le littoral au niveau de l'embouchure de la Thio, visible sur les images, ne semble pas subir de déformation ni de mouvement, et constitue un point d'amer utilisé pour tous les géoréférencements. Les intersections de rues dans le village de Thio, ainsi que les ponts sont pris comme référence. Les coins des concessions minières sur la couche SIG des concessions minières sont utilisés comme référence, dans la limite où ils n'entraînent pas des erreurs et des résultats aberrants.

La digitalisation est réalisée à une échelle relativement petite et est adaptée en fonction de la qualité de l'image et du type d'objet digitalisé. Une synthèse des résultats après traitement est présentée dans les Tableau 13 et 15.

Date de création	Image	Surface de recouvrement d'une image (km <sup>2</sup> )	RMS finale (m)	Type transformation	Référence pour géoréférence r	Echelle de digitalisation Zones en eau Forêt dense	
1954	400_208	45	1.78	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
1971	orthophoto_1971	7					
	orthophoto_1976						
1976	1942	27	1.65	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
	1561		1.55	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)		
	80_2		1.55	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)		
	20		1.85	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)	1:800-1:1500	1:2500-1:4000
	22		1.54	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)		
1982	3	4	1.03	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
	23		0.72	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
	24		1.16	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)		
	26		0.22	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
	27		1.78	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
1985	orthophoto_1985	95					
	orthophoto_1989						
1989	80c	4	1.8	Polynomiale 3ème ordre	image orthorectifiée (validation orthophoto actuelle)		

	80c		0.69	Polynomiale 3ème ordre	image orthorectifié e (validation orthophoto actuelle)
1995	68	25	1.8	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)
	27		1.7	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)
2008	Images orthorectifi ées et géoréférénc ées georep.nc	25			
2017	photo aérienne 2017 (DITTT)	4	1.24	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)

Tableau 13: Résultats de géoréférencement et de paramètres de digitalisation des photos aériennes

Code de la donnée	Date de création	Echelle	RMS finale (m)	Type transformation	Référence pour géoréférencer et digitaliser	Echelle de digitalisation
<i>c1</i>	1874	1/2000	2.1	Polynomiale 2nd degré	Orthophotos et IGN actuelles	
<i>c2</i>	1880	1/10000	1.72	Polynomiale 2nd degré	Orthophotos et IGN actuelles	
<i>c3</i>	sans date	Sans échelle	1.8	Polynomiale 2nd degré	Orthophotos et IGN actuelles	1:800-1:1500
<i>c4</i>	sans date	1/40000	1.82	Polynomiale 2nd degré	c3 et orthophotos	
<i>c5</i>	1885	1/40000	2.02	Polynomiale 3ème degré	1ère partie de c4 et orthophotos	
			1.72	Polynomiale 3ème degré	Orthophotos et cadastre minier	

Tableau 14: Résultats de géoréférencement et paramètres de digitalisation des cartes anciennes

L'image aérienne est choisie pour géoréférencer les autres images non-géoréférencées, afin de faciliter la reconnaissance des points d'amer. Les orthophotos suivies d'une date sont les images orthorectifiées récupérées auprès de l'IRSTEA Grenoble, et sont utilisées pour digitaliser. Cependant, en raison des texturations offrant un résultat parfois flou, des images non orthorectifiées sont géoréférencées et utilisées pour digitaliser certaines zones. Le géoréférencement s'appuie alors sur des points d'amer de l'image orthorectifiée bien reconnaissables, le but étant de superposer les deux images de sorte de pouvoir digitaliser en

passant de l'une à l'autre sans décalage. C'est par exemple le cas pour l'année 1976. Le traitement d'orthorectification n'est pas forcément utile pour les objectifs de cette étude puisque la zone d'intérêt se situe sur la partie deltaïque et non sur les hauteurs proches.

La RMS (*Root Mean Square*, moyenne quadratique) ou valeur efficace est un indicateur de distance entre la position de chaque point homologue sur le raster d'origine et les coordonnées réelles sur un support déjà géoréférencé. Elle correspond à la racine de la somme de chaque distance au carré. Une régression est en effet établie afin de minimiser cette distance, induisant une déformation de l'image à géoréférencer. (« RMS », s. d.)

L'ordre de la transformation polynomiale dépend principalement du nombre de points homologues disponibles. Il dépend également de la partie de l'image géoréférencée : si les points d'amer se concentrent préférentiellement sur le bord de l'image où se trouve la zone d'intérêt la carte risque d'être bien plus déformée à un ordre de déformation plus grand.

Les points homologues sont plus difficiles à trouver puisqu'une grande période séparent ces cartes des documents de référence géoréférencés. Pour compléter la liste de points d'amer, la couche SIG du cadastre minier est utilisé pour la carte ayant pour sujet les terrains miniers.

La carte c4 a été coupée en deux parties car elle recouvrait tout le bassin de la Thio et rendait donc difficile la répartition des points homologues et donc une déformation bien trop importante pour pouvoir digitaliser. La deuxième partie de la carte, plus à l'amont de Thio a été géoréférencée sur la partie basse de la première partie.

## b) Méthode d'analyse des données hydrologiques

### i. Analyse statistique

Dans cette partie, on cherche à analyser les événements hydrométéorologiques sur le bassin de la Thio afin d'aider à l'interprétation de la dynamique morphologique du delta.

Les questions qui se posent sont donc :

- Les forçages hydro ont-ils changé au cours du XXe siècle, ou peut-on identifier des périodes avec des crues intenses et d'autres périodes moins actives hydrologiquement ?
- Quelles crues ont pu entraîner des modifications significatives du delta ? Cette analyse est à mener conjointement avec une analyse de la production sédimentaire du bassin. Un changement morphologique du delta peut être lié à une ou plusieurs crues très fortes, soit une augmentation du nombre de crues fréquentes associées à une production sédimentaire importante et constante.

La BDMF (Base de Données Météo France) est une première base de travail, mais toutefois non-exhaustive car toutes les crues et événements cycloniques n'apparaissent pas et il n'y a pas d'information locale sur les débits de crue sur la Thio. Cependant, des données précises sont à disposition pour Saint Michel de 1981-2017, sur lesquelles l'analyse reposera.

L'enjeu de ce travail sera de constituer une BD de crue pertinente sur la Thio avant 1980. L'idée n'est toutefois pas d'effectuer une modélisation pluie-débit précise, mais d'évaluer la possibilité d'estimer le potentiel érosif et de transport de sédiments de chaque année sur une longue période, de 1880 à l'actuel. Pour cela, les données des pluviomètres pourront être

utilisées, ainsi que des indicateurs à large échelle (SOI, MEI, POI) qui peuvent informer sur l'occurrence de ces événements depuis 1880 et donc documenter l'histoire hydrologique du bassin sur une période où il n'y a que des données de pluies éparses (données d'archives avant 1952) et pas forcément localisées sur le bassin d'étude (Canala).

Pour cela, on a construit et analysé une base de données d'événements pluvieux (chroniques d'environ 70 ans) et hydrologiques (environ 40 ans) dans les données météorologiques et hydrologiques à disposition). Cette base de données d'événements hydrométéorologiques a été constituée puis analysée à l'aide du logiciel R (plateforme RStudio® ; librairies : HydroTSM, Segmented, xslx, xts). La méthode d'analyse s'organise en 5 étapes :

- Etape 1 : compilation des données d'entrée : pluies, débits, indicateurs climatiques
- Etape 2 : définition d'événements pluvieux;
- Etape 3 : calcul d'indicateurs hydrométéorologiques pour chaque événement (intensité de pluies, durée de l'événement, pic de débit, pluie du mois avant la crue, MEI du mois, SOI du mois...)
- Etape 4 : description et analyse des relations entre les variables ;
- Etape 5 : modélisation.

A l'étape 1, les données qui sont compilées présentent des lacunes, ou et des pas de temps très différents selon le type de donnée (pluie journalière et valeurs mensuelles d'indicateurs ENSO), ainsi que des échelles spatiales différentes, comme les SOI couvrant une partie du Pacifique à l'inverse des pluviomètres qui sont plus localisés. Il s'agit donc à cette étape de compiler des données très différentes pour pouvoir les confronter.

L'étape 2 vise à constituer une base de données d'événements pluvieux. Tout d'abord, il s'agit d'identifier des événements pluvieux indépendants dans la série de pluie sur Thio, depuis le début de la donnée en 1952. Il s'agit de distinguer les événements en fonction des pics de crue qu'ils génèrent. La même tâche est définie pour les données de Canala. L'outil utilisé pour cela consiste à séparer des événements les uns des autres grâce à un seuil de pluie (en mm/j) et un intervalle de temps sans pluie. Il s'agit donc de choisir les paramètres les plus cohérents avec les données à disposition. Un test de sensibilité est réalisé sur ces critères afin de savoir à quel point ils conditionnent la constitution de la base de données.

La méthode utilisée pour définir ces paramètres consiste à identifier « à la main » les événements pluvieux reportés dans la base de données Météo France (notée BDMF). Un intervalle de 5 jours est choisi. On identifie ensuite des événements de la BDMF dans la série de données, et on regarde si l'intervalle de 5 jours est cohérent. Des tests sont réalisés avec plusieurs seuils de pluie (Tableau 15). Les paramètres finaux sont fixés à 0 mm pour le seuil et à un 5 jours d'intervalle entre deux événements.

Il est remarqué qu'un décalage entre la date de début de l'événement indiquée par la BDMF et l'événement identifié dans les données de pluie est présent pour les cyclones pointés dans la série de Thio. Cela est certainement dû au fait que les cyclones ou tempêtes se déplacent et ne touchent pas au plus fort toutes les zones. La BDMF a probablement noté la date des événements correspondant au premier endroit frappée, puisque la BDMF est à l'échelle de la Nouvelle-Calédonie et non de la zone d'étude.

Ensuite, il est intéressant de savoir si les événements identifiés et stockés dans la base de données Météo France et de connaître leur nom s'ils y apparaissent.

La somme des précipitations tombées lors des événements identifiés est ajoutée, pouvant donner une idée de l'importance d'un événement et de le comparer avec d'autres. Le maximum d'intensité journalière de l'événement ainsi que sa date d'apparition permettant de mettre en valeur le jour le plus intense en termes de précipitations. L'intensité moyenne journalière de l'événement est également une indication de la teneur de l'événement. Le mois de l'événement, ainsi que son jour d'apparition et s'il s'est produit en saison sèche ou humide sont identifiés afin de relier l'événement à une période préférentielle. Le nombre de jours séparant l'événement de son prédécesseur paraît également pertinent, puisqu'il permet de caractériser l'occurrence d'événements particuliers au cœur d'une période qui elle aussi peut être caractérisée. En effet, la somme des précipitations tombées pendant le mois correspondant à l'événement peut être calculée. Le débit maximum généré durant les événements à partir de 1981 est également entré dans la base de données, afin de caractériser la crue générée par le même événement. Les indicateurs de l'ENSO du mois de l'événement et du mois précédent sont identifiés. En ce qui concerne le SOI, il semble que selon certaines observations, les SOI moyens des mois précédant un événement soit en lien avec une période dépressionnaire pouvant entraîner des événements plus forts que la normale. Ainsi, une moyenne glissante est calculée sur 4 mois de sorte d'évaluer une tendance de cet indicateur sur un plus long terme. Ces moyennes peuvent de la même façon être calculées sur 2 ou 3 mois précédant l'événement. Cela est également réalisé pour les MEI et les IPO.

Dans une deuxième partie, la base de données va être analysée à l'aide de traitements statistiques. L'objectif est de montrer s'il y a un lien entre la pluie tombée et le débit. Un premier graphique est représenté, montrant la répartition des événements par rapport au maximum de pluie de l'événement et au maximum de débit observé durant l'événement (Figure 27). L'abscisse représente le log du maximum de pluie et l'ordonnée le log du débit maximal. Un ajustement est ensuite réalisé de sorte de laisser apparaître une courbe représentative d'une tendance. Le test de Davis est ensuite utilisé afin de tester l'hypothèse d'un changement de pente de la courbe, apparaissant comme une cassure sur le graphique. Une matrice de corrélation est produite (annexe IV) rendant compte des liens entre les caractéristiques des événements de la base de données ainsi considérées comme des variables indépendantes.

## ii. Etude de la saisonnalité des pluies et des débits

L'objectif est de caractériser les pluies et les débits sur la zone d'étude, et les pluies sur Canala. L'analyse des données d'archive peut venir compléter quelque peu celle des forçages météorologiques sur le bassin de la Thio par le BRGM (GARCIN 2017). Les moyennes mensuelles et les maximums mensuels sont utilisés comme indicateurs de saisonnalité des pluies (Figure 35) Ils sont comparés entre les périodes de 1903 à 1948, correspondant aux données d'archives et la période récente, de 1952 à 2017, afin de montrer une éventuelle évolution entre ces périodes (Figure 36 et 38). Enfin, on recherche une corrélation entre les pluies à Thio au niveau du pluviomètre de Thio Plateau et à Canala.

La saisonnalité des débits sur la zone est ensuite caractérisée. Pour cela, un diagramme radar (Figure 41) est établi de sorte de visualiser les périodes où les débits les plus forts et la fréquence des événements par date sont observés. Les débits maximaux de la chronique d'événements pluvieux sont utilisés, car les événements sont déjà isolés ; il s'agit en effet de limiter le nombre de valeurs moins parlantes sur le graphique, et de caractériser des événements indépendants. La base de données générée par le programme R est utilisée, les événements sont ainsi

indépendants s'ils sont séparés d'un intervalle de 5 jours. La période étudiée correspond à celle pour laquelle les débits sont disponibles, de 1981 à 2016. Le pas de temps présenté est journalier et l'axe transversal représente les valeurs de débit. La même méthode est appliquée aux pluies.

Dans un deuxième temps, un indicateur de saisonnalité est déterminé. La méthode s'appuie sur des statistiques circulaires grâce à la méthode de détaillée par Burn. (Burn 1997) Les indicateurs résultant des calculs circulaires sont  $r$  et le jour où le débit moyen est observé (Tableau 17). Plus  $r$  est proche de 0, moins la saisonnalité est marquée, inversement, si  $r$  est proche de 1, la saisonnalité est d'autant plus marquée.

### c) Méthode d'analyse du trait de côte et de la progradation du delta

En analysant qualitativement l'évolution du trait de côte depuis 1880, nous avons observé une dynamique générale de progradation du delta. Il serait intéressant de quantifier cette avancée. L'hypothèse d'une progradation globale du delta sera alors testée à l'aide d'indicateurs morphométriques (évolution de la surface du delta, avancée moyenne annuelle) et d'une analyse fine de l'évolution spatio-temporelle du trait de côte à partir de transects définis perpendiculairement à la côte.

Le trait de côte est d'abord tracé. Pour cela, la ligne de plus hautes eaux est repérée sur les images et le trait de côte tracé jusqu'à l'embouchure. Au niveau de l'embouchure, un protocole est établi afin de pouvoir comparer le trait de côte des différentes images entre eux sur le même plan. La méthode utilisée s'appuie sur celle de (Shaw et al. 2008), l'Open Angle Method (OAM). Les points définissant le trait de côte correspondent au point d'origine de l'angle pour lequel l'angle a des intersections avec le trait de côte préalablement tracé. L'angle choisi est  $45^\circ$  puisque selon l'étude, c'est une valeur standard pour la majorité des configurations. L'opération est répétée autant de fois qu'il faut pour pouvoir tracer un trait régulier (Figure 20).

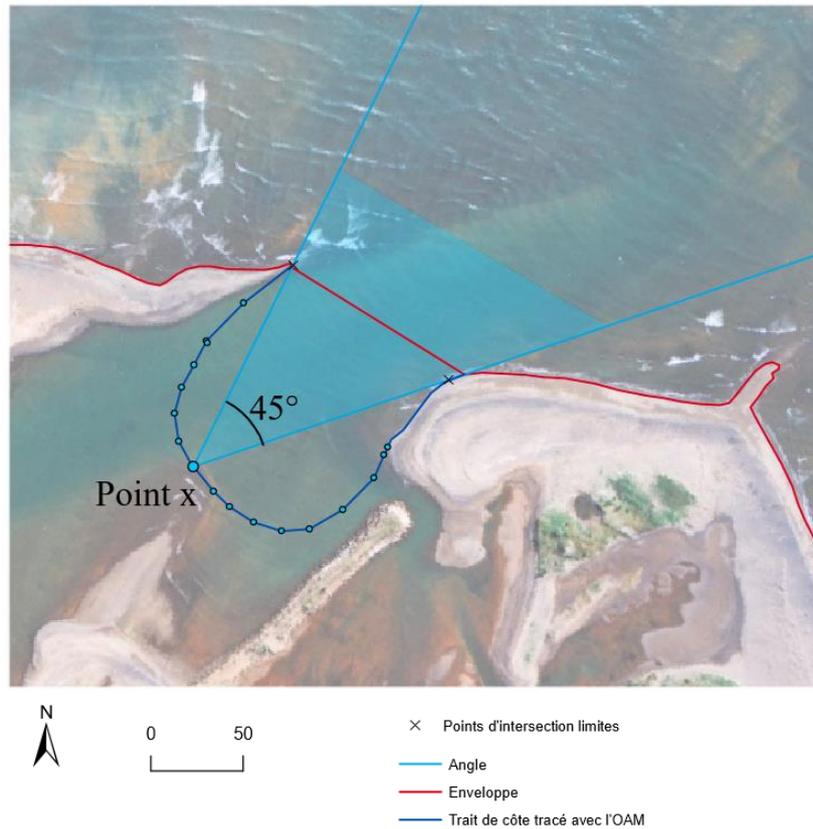


Figure 20: Schéma de la méthode de l'OAM

Nous avons analysé la vitesse d'avancée des surfaces du delta afin de vérifier l'hypothèse de sa progradation dans les années 70-80. Cette méthode consiste à quantifier les variations de surface du delta par une analyse de l'évolution du trait de côte par rapport à une situation moyenne observée en 1880.

La première étape consiste à déterminer un trait de côte moyen de la période de 1880. (Figure 21).

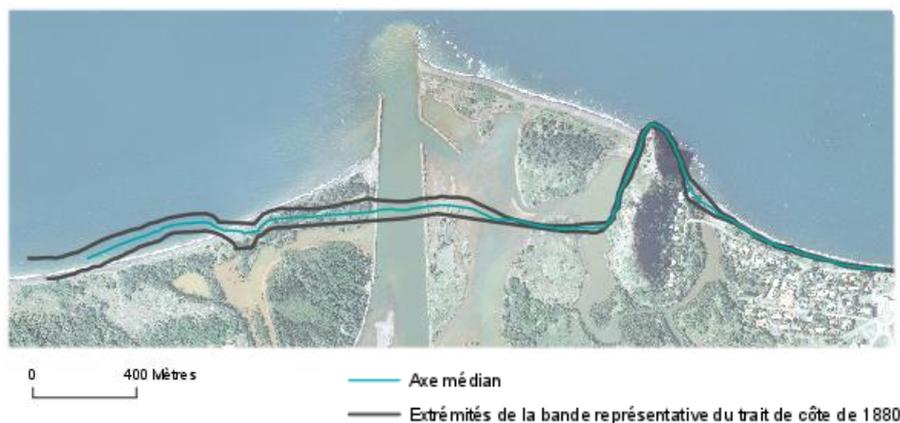


Figure 21:Création d'un axe médian de l'enveloppe des traits de côte de la période de 1880

La méthode consiste à tracer une surface entre le trait de côte de 1880 et les traits de côte des années disponibles. Les superficies obtenues sont ramenées à la longueur du trait de côte de 1880, afin d'estimer le déplacement moyen (à l'échelle du linéaire côtier considéré) par rapport

à 1880 et sa vitesse de progradation (évolution entre deux dates ;Figure 22). Le logiciel Arcmap© est utilisé pour réaliser les différentes étapes de la méthode. L'avancée moyenne du delta peut ainsi être estimée pour chaque date par rapport à la longueur du trait de côte de 1880. La vitesse moyenne annuelle est aussi calculée.

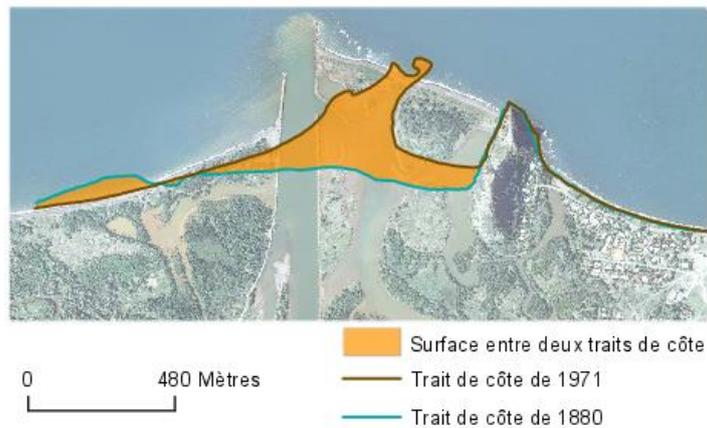


Figure 22: Méthode de calcul des surfaces entre le trait de côte de 1880 et celui d'autres dates (1971 pour cet exemple).

Afin d'analyser l'évolution du trait de côte plus précisément par secteurs, des transects perpendiculaires au trait de côte de 1880 ont été définis sur différentes zones du delta. 4 transects sont tracés perpendiculairement à la bande représentative du trait de côte de 1880 et croisent les autres traits de côte. Leur emplacement est choisi sur des tronçons qui se distinguent par une morphologie ou une dynamique particulière. Le milieu du segment perpendiculaire à la bande de 1880 est déterminé et les mesures sont prises à partir de ce point. La distance entre le trait de côte représentatif de 1880 et les points d'intersection de la ligne de transect et des traits de côte est mesurée (Figure 23).

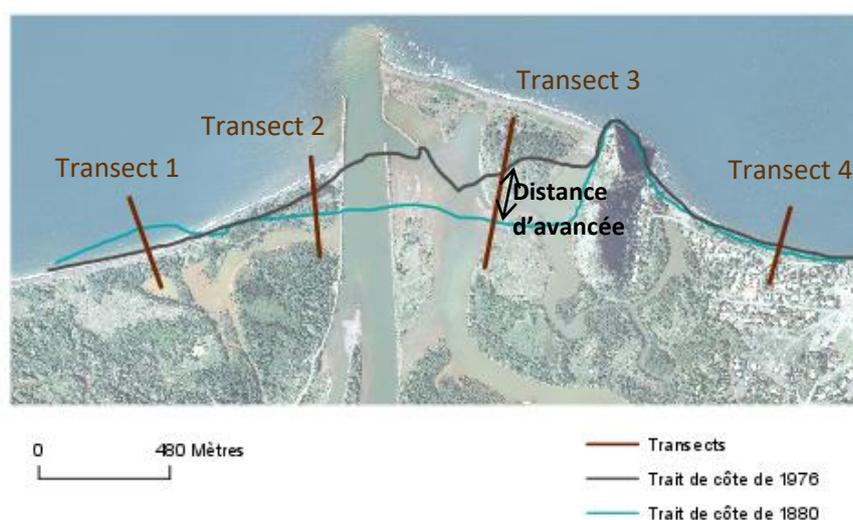


Figure 23: Schéma de la méthode d'analyse du trait de côte par transects

Le transect n°1 est situé sur la rive gauche de l'embouchure existante en 1880. Le deuxième transect est placé sur sa droite. Ces deux tronçons se démarquent de par leur situation de rives

d'une embouchure qui a disparu au cours du temps. Le transect n°3 est situé sur la gauche du Bota Méré là où une avancée significative du trait de côte avait été observée. Le dernier transect est placé sur la droite du Bota Méré, où il avait été remarqué une certaine stabilité. Le Bota Méré délimite ces différents tronçons.

Les incertitudes liées à la digitalisation du trait de côte sont déterminées. Plusieurs étapes sont nécessaires :

- Trouver un tronçon de référence stable au cours du temps
- Choisir le trait de côte de référence
- Trouver un outil pour quantifier les écarts
- Déterminer des incertitudes moyennes sur le tronçon

Le tronçon de référence choisi est le côté droit du Bota Méré (Figure 24), peu soumis au courant et stable.

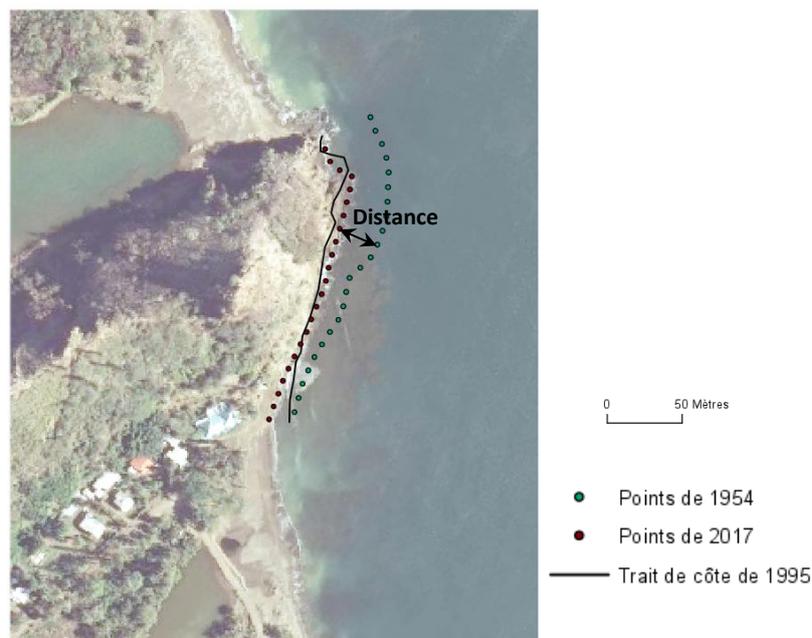


Figure 24: Schéma de la méthode de détermination des incertitudes sur le trait de côte

Le trait de côte de référence choisi est celui de 2017, et représentatif de l'état actuel du delta. La méthode pour quantifier les écarts entre tronçons de trait de côte pour chaque année consiste à implanter 25 points le long des tronçons et de déterminer leur distance avec les points de 2017. Une moyenne des distances est calculée pour chaque année, et une moyenne globale est également évaluée (Tableau 18 et 20). En ce qui concerne l'incertitude des traits de côte des cartes anciennes, l'incertitude moyenne est calculée pour toutes les cartes utilisées pour créer la bande représentative du trait de côte de 1880.

Les surfaces des zones en eau, de palétuviers et de forêt dense sont calculées afin de quantifier une évolution des éléments numérisés.

Pour quantifier l'évolution des éléments numérisés, des métriques sont utilisées, permettant de compléter l'analyse de l'occupation du sol. La méthode s'appuie sur des métriques utilisées

pour caractériser les rivières en tresse, définies par Egozi et Ashmore (Egozi et Ashmore, 2008). Il s'agit du BRI, le « Braiding Intensity Index », et comporte une série de métriques permettant de caractériser les rivières en tresses. Le delta présente des similarités avec ce type de rivière, puisque des bancs et plusieurs chenaux sont observables. Ils peuvent donc être caractérisés par des indicateurs semblables que les rivières en tresse. Le premier indice représente une proportion de longueurs de bancs. Cela consiste à calculer la somme des longueurs de tous les bancs de sable (nus) par rapport à la longueur totale du secteur étudié (Figure 25). La longueur totale de la zone est comprise entre le pont de Thio et le trait de côte, puisque c'est sur ce secteur que sont visibles la plupart des dépôts sur le delta et sur lequel ils sont analysés. Les bancs considérés ne sont pas stabilisés et donc non végétalisés, de sorte de pouvoir en déduire une évolution de la stabilisation des bancs.

La même méthode est appliquée pour les bancs végétalisés.

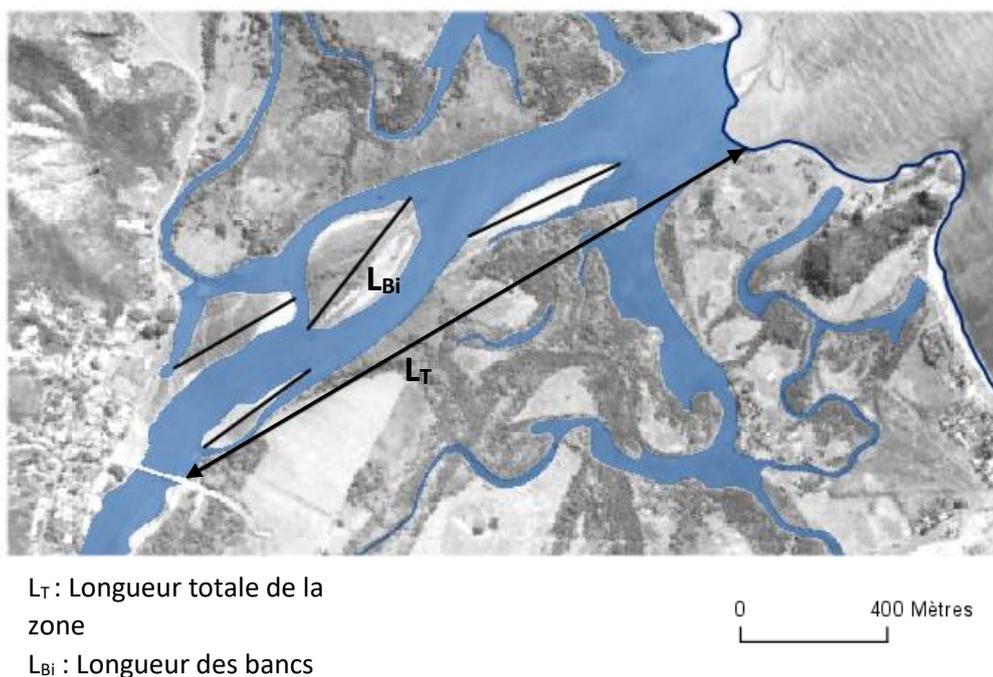


Figure 25: Schéma de la méthode de calcul de l'indice des plages de dépôt, base de 1954

Afin de compléter l'analyse de l'évolution du delta, un indice de multiplicité des chenaux est calculé. Cela peut permettre de déterminer une caractéristique supplémentaire associée aux deltas. La méthode s'appuie également sur le BRI. L'indicateur utilisé pour la diversité des habitats est le nombre de chenaux rencontré sur une même section. Un carroyage est réalisé, avec un pas de 300 m. L'axe du lit de la Thio est le repère pour créer le carroyage (Figure 26). Le nombre de chenaux croisé pour chaque section est déterminé pour chaque date disponible.

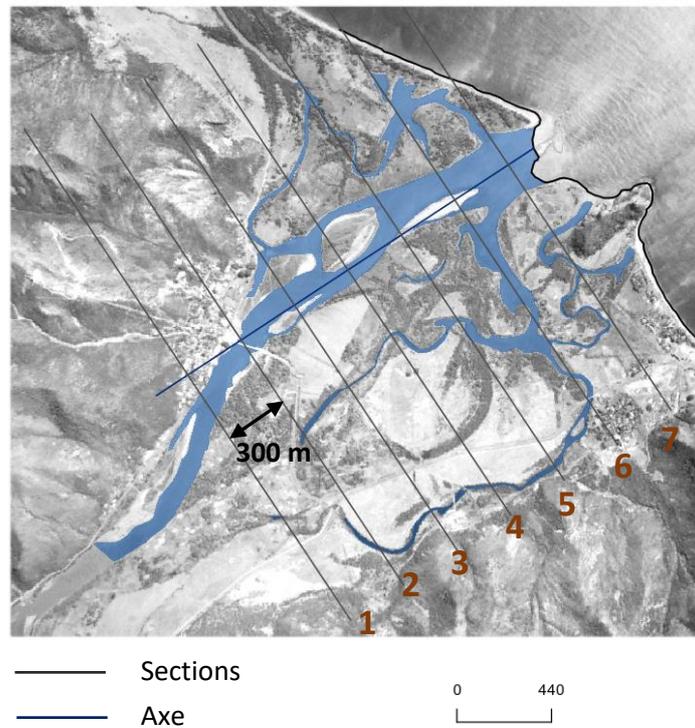


Figure 26: Schéma de la méthode pour déterminer le nombre de chenaux par section

### III. Forçages hydrométéorologiques

#### 1. Analyse des événements pluvieux

##### a) Analyse pluie débit

Dans un premier temps, l'hypothèse d'un seuil d'intensité maximale de pluie est testée. Les événements sont représentés en fonction de leur intensité maximale et de leur débit maximal (Figure 27). La base de données est constituée avec des intervalles séparant les événements de 3 jours sans pluie et sans seuil de pluie.

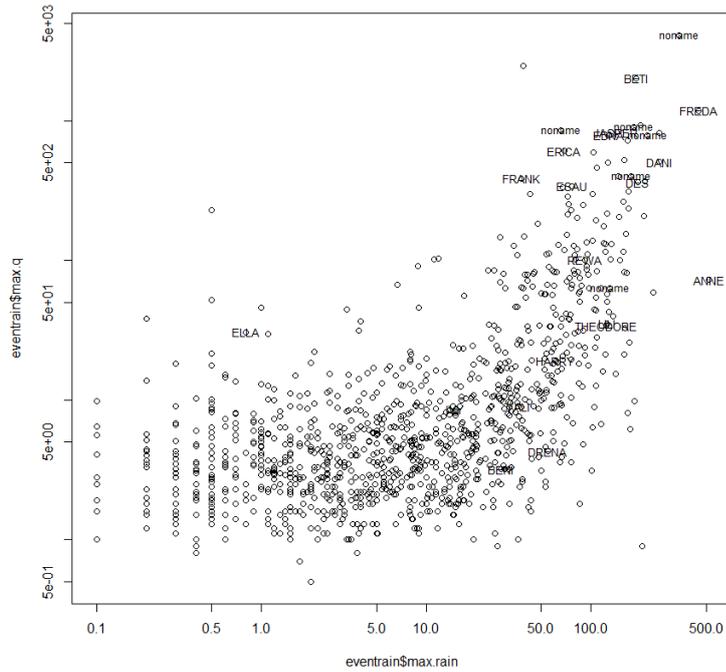


Figure 27: Nuage des événements représentés en fonction du débit maximal et de la pluie maximale. Seuil =0, inter=3 j

Aucun seuil de pluie n'est visible sur le nuage d'événements pour cette base de données. Cela vérifie que le choix des paramètres (seuil et intervalle de temps sans pluie) conditionne bien la base de données.

La Figure 28 montre le résultat de bases de données constituées avec d'autres critères ; avec un seuil de 0 et des durées respectivement de 2 et 5 jours.

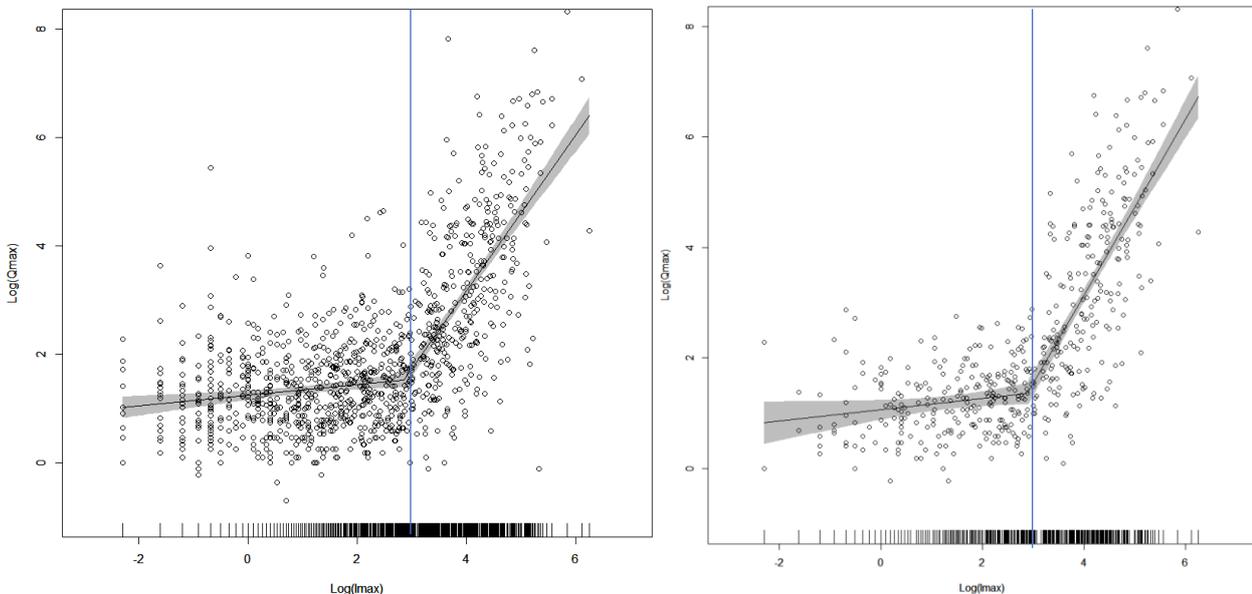


Figure 28: Relation entre  $\log(Q_{max})$  et  $\log(I_{max})$

On peut observer une différence dans la forme de la rupture, associée à une valeur de  $I_{max}$  différente. Pour des critères de seuil de pluie nul et de durée de 5 jours, la rupture a lieu pour une valeur d'intensité maximale de 19 mm/jour.

Un test de sensibilité est réalisé afin de montrer les impacts du choix de la durée sur la base de données constituée (Tableau 15).

Nombre d'événements recensés dans la BDMF	Seuil de pluie (mm/j)	Durée (jours)	Position de la cassure (mm/jour)
32	0	0	18.91
29	0	2	18.91
28	0	3	18.91
26	0	4	18.91
22	0	5	18.91
19	0	7	12.81
16	0	10	24.05

*Tableau 15: Test de sensibilité de la BD par rapport au choix de la durée entre deux événements*

Il est intéressant de constater qu'en dessous de 5 jours, la position de la cassure ne change pas, et reste à 19 mm/j. Au-delà, la cassure diminue ou augmente. Le nombre d'événements présents dans la BDMF varie également en fonction de la durée entre les événements : plus la durée est courte plus le nombre d'événements identifiés est important, ce qui est à relier au fait qu'une durée courte entre les événements augmente leur nombre et donc la probabilité qu'ils apparaissent dans la BDMF.

Ce sont les paramètres de seuil de pluie nul et d'intervalle de 5 jours qui vont être retenus afin d'éliminer les valeurs aberrantes de débits maximaux forts associés à des intensités maximales faibles. Les corrélations entre variables sont ensuite analysées (annexe V).

Tout d'abord, le débit maximal ne semble pas du tout corrélé avec toutes les données relatives à l'ENSO. Les probabilités sont en effet très proches de 0, avec une forte p-value dans la plupart des cas. Dans certains cas, la p-value est faible ou absente. On peut conclure que les SOI, MEI et IPO ne peuvent expliquer la chronique de débits, ni les caractéristiques dérivées de ces indices (SOI du moins d'avant, de 4 mois avant...).

La corrélation entre le débit et les caractéristiques de pluie sont intéressantes à analyser, pour avoir au moins une estimation de leur relation. La probabilité que le débit et la somme de pluie tombée durant l'événement soient corrélés s'élève à 0.46, avec une forte p-value. La corrélation entre ces variables n'est pas flagrante, mais cela montre qu'il y a bien un lien entre les deux. Le maximum de pluie tombée est un peu plus corrélé au maximum de débit, avec une probabilité de 0.54 et une forte p-value. De la même façon, les deux variables semblent un peu corrélées. Les graphiques associés où la régression est déterminée montrent un agglomérat de points autour des faibles valeurs et des événements plus dispersés pour les valeurs plus importantes, pouvant induire une dispersion.

Les pluies peuvent expliquer en partie débit max de crue à la station de Saint Michel. Il serait intéressant de classer les pluies et de caractériser les périodes à plus grand potentiel morphogène.

La Figure 29 représente les événements de la base de données, avec leur pluie cumulée et le maximum tombé durant l'événement. Le diamètre des bulles représente l'intensité de pic de crue.

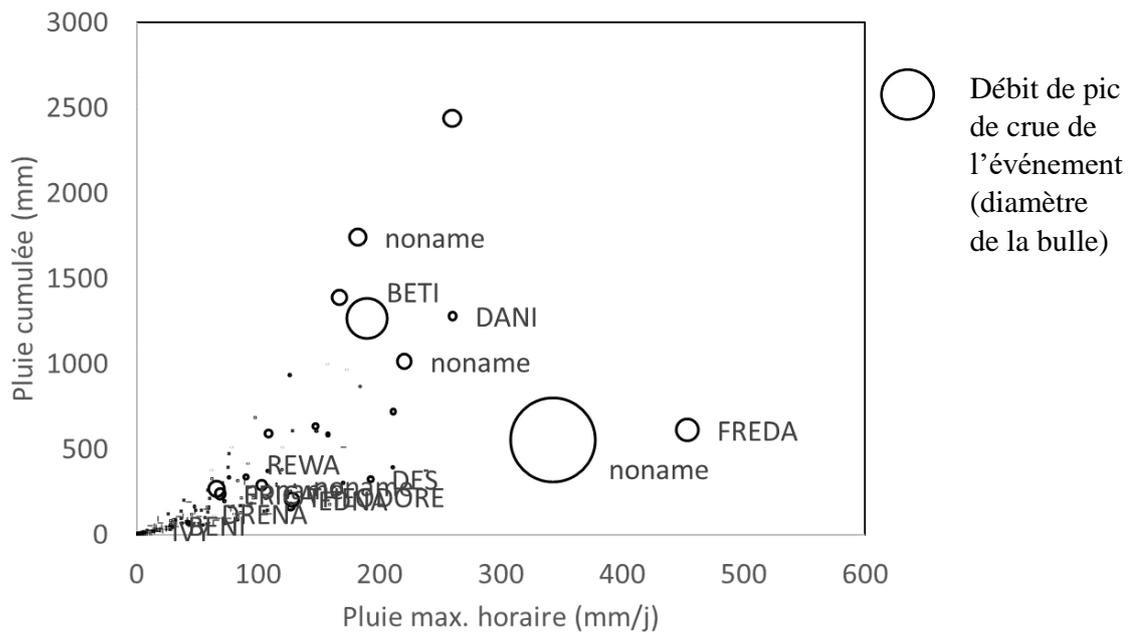


Figure 29: Relation entre la pluie maximale à Thio Plateau (mm/j) avec la pluie cumulée et le pic de crue

L'espace est ensuite segmenté à la main (Figure 30) en fonction du débit. Deux limites sont distinguées permettant de créer trois classes d'évènements de pluie, qui se distinguent par le débit maximal des pics de crue qu'ils produisent.

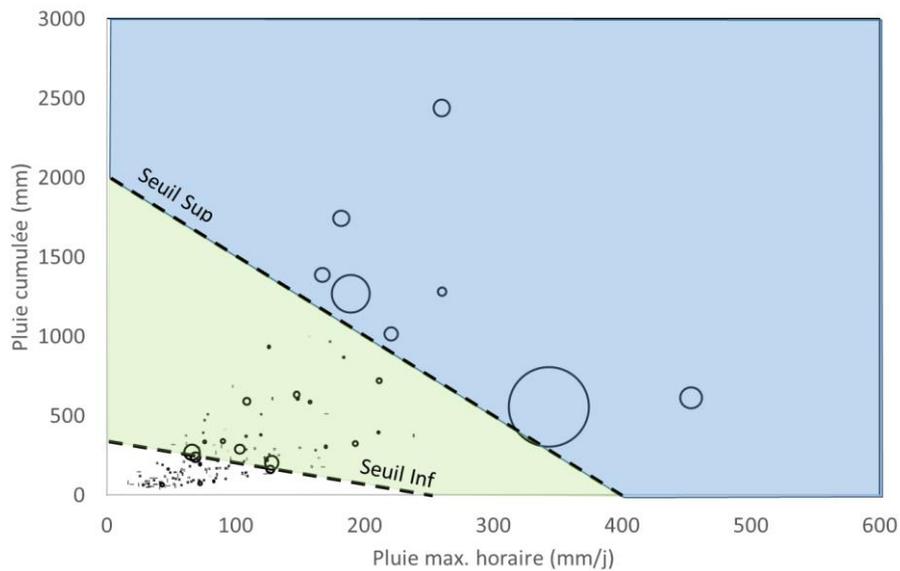
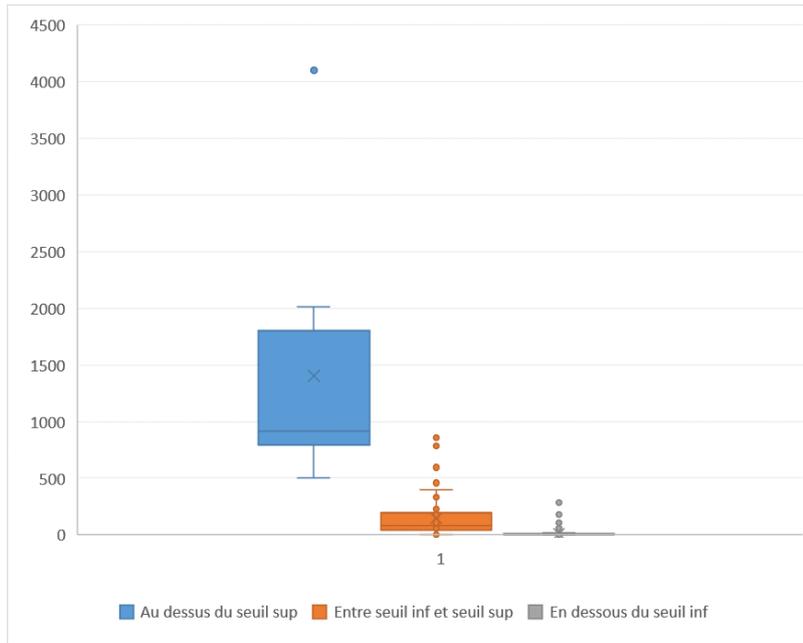


Figure 30: Figure précédente avec son espace segmenté en 3 parties

En observant les trois espaces, on observe qu'il y a un lien entre des classes d'évènements (relation entre la pluie cumulée et l'intensité maximale) et les pics de crue de chaque événement. Plus les intensités de pluie ou les pluies cumulées sont fortes, plus le débit du pic de crue semble important.

Les événements sont ainsi redistribués en trois classes de débits de crue maximaux journaliers (Figure 31), correspondant aux événements répartis dans les trois zones de la

Figure 30. Le maximum, le minimum, la moyenne et la médiane sont représentés. La Figure 31 décrit les 3 classes d'événements.



Classes	Effectifs (entre 1952 et 2015)	Nb evenement référencés dans la BDMF	Qmax	Qmin	Qmed
Seuil sup	14	71%	4102	507	915
Entre Seuil sup et seuil inf	172	8%	807	4	83
En dessous de Seuil inf	991	0.3%	300	0.8	4

Figure 31: Classes d'événements et leur description en fonction de leur débit de pic de crue

L'occurrence des trois classes de pluies peut être représentée, avec leur année d'occurrence. Les débits des pics de crue sont liés à la répartition de chaque événement.

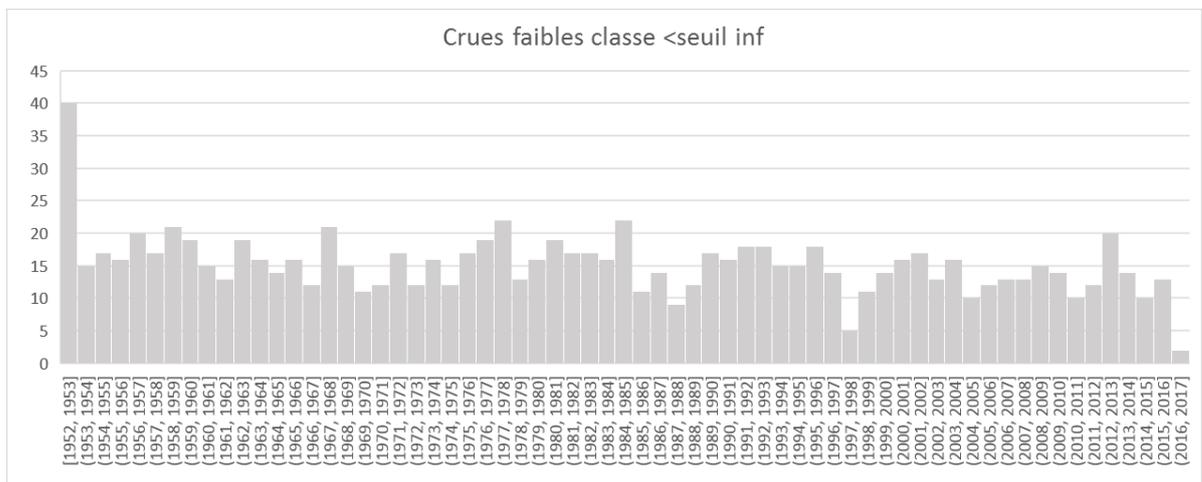


Figure 32: Répartition des événements avec des crues faibles

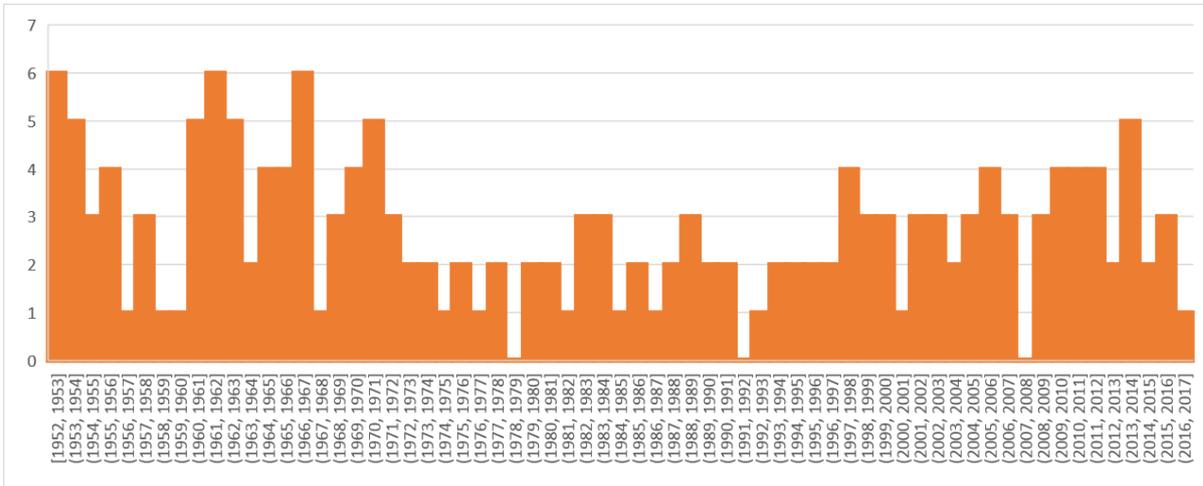


Figure 34: Répartition des événements avec des crues intermédiaires QJ < 800 m3/s

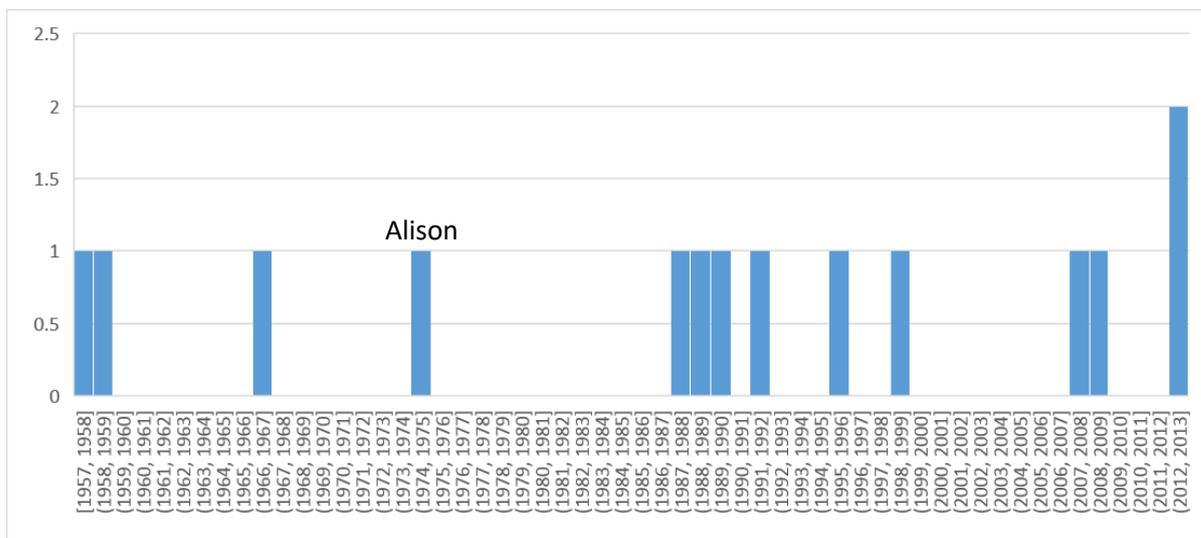


Figure 33: Répartition des événements avec des crues fortes QJ > 800 m3/s

La Figure 32 et la Figure 34 montrent que les crues d'intensité faible et moyenne ont lieu très régulièrement. On n'observe pas de tendance particulière à première vue pour la chronique de pics de crue faibles. Pour celle des débits moyens, il semble y avoir une fréquence importante de ces événements de 1952 au début des années 70, de 1 à 6 événements de ce type par an. Par la suite, ils ont lieu moins souvent : seulement de 0 à 3 fois au maximum par an. A partir de 1998, la fréquence augmente s'échelonnant de 0 à 5 avec de nombreux événements apparaissant 3 fois par an. Ces événements aux pics de crue moyens et même faible ne sont pas à négliger dans l'apport de sédiments au delta et leur impact sur le delta et le lagon.

La Figure 33 montre les périodes où des événements pluvieux forts se sont produits. Il est observé qu'entre 1957 et 1975, seulement 4 de ces événements ont eu lieu. Lors des 12 années suivantes, il n'y a pas eu d'événement marquant. C'est à partir de 1987 que des événements plus récurrents ont eu lieu, jusqu'en 1999. Ensuite, ils sont observés vers 2008, et 2 événements de la sorte ont été observés entre 2012 et 2013.

En conclusion, l'analyse statistique des événements montre qu'il serait difficile de reconstituer des chroniques de débits sur la première moitié du XXe siècle à partir des pluies d'archive sur Canala, de par la difficulté d'établir une relation pluie-débit robuste, et par l'incertitude de l'utilisation de la donnée de pluie de Canala pour le bassin versant de la Thio. D'après les analyses de corrélation entre variables, il semble pour le moment peu pertinent d'utiliser les indices de l'ENSO pour reconstituer d'éventuelles chroniques. L'analyse permet de reconstituer la fréquence de classes d'événements avec leur débit de pic de crue, pouvant indiquer des périodes à potentiel de fort transport sédimentaire.

#### b) Saisonnalité des pluies et des débits

Les résultats de l'analyse des chroniques mensuelles d'archive et récentes sur Canala, ainsi que la corrélation entre les données de Canala et de Thio sont présentés.

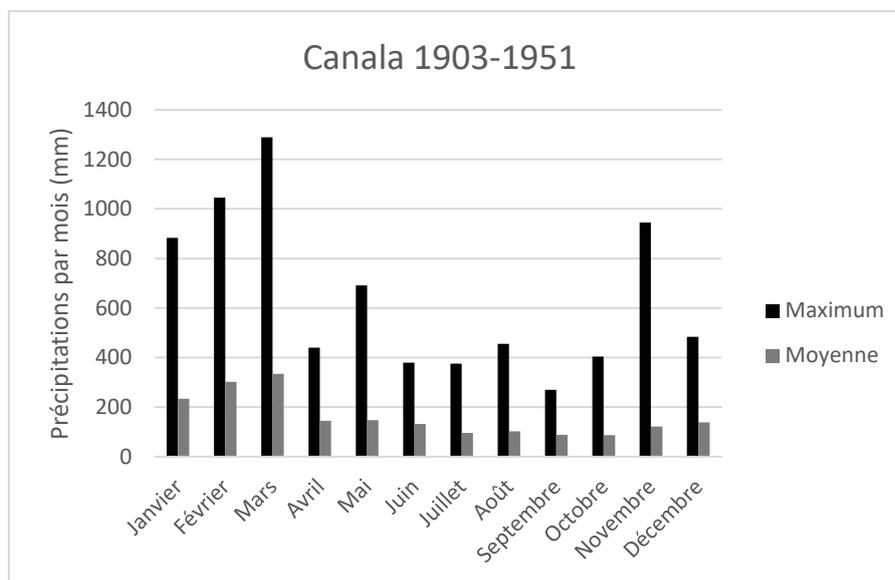


Figure 35: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala, de 1903 à 1951

La Figure 35 montre que le maximum mensuel annuel de pluie atteint environ 1300 mm par mois et a lieu en mars. La période où les maximums sont atteints s'étale entre novembre et mars, ce qui correspond à la saison humide. Cependant, le maximum atteint en décembre est d'environ 500 mm, ce qui est presque la moitié moins de ce qui est tombé lors du maximum de novembre. Ces précipitations ont eu lieu en novembre 1937. Entre avril et octobre, les maximums atteints sont moins importants, et plafonnent à presque 700 mm en mai. Le minimum de tous les maximums présente une valeur de 270 mm lors d'un mois de septembre. On peut donc observer une hétérogénéité importante entre les saisons : un rapport de 5 sépare le maximum atteint en mars et celui de septembre, avec une différence de pluies de 1000 mm.

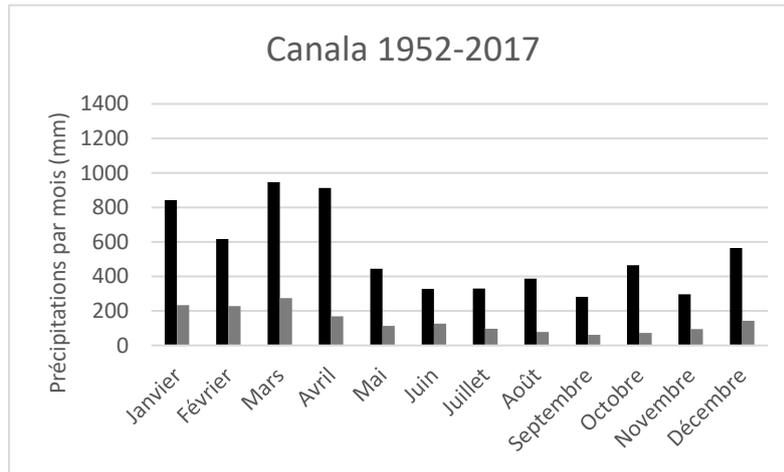


Figure 36: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala de 1952 à 2017

Les moyennes mensuelles semblent moins hétérogènes que les maximums pour cette période (Figure 36). Les maximums des moyennes mensuelles de précipitations sont observés entre janvier et avril, ce qui correspond à la saison humide. Le maximum est atteint en mars, avec une valeur de 330 mm. Les plus faibles précipitations s'étalent entre juillet et octobre, avec des précipitations moyennes minimales en septembre de 90 mm. Les pluies sont également plus faibles entre avril et juillet et novembre et décembre. La moyenne des pluies présente des différences marquées entre la saison humide et les autres périodes. Il est visible sur le graphique que les mois de janvier à mars présentent des précipitations plus importantes que pour le reste de l'année. Enfin, le rapport entre la moyenne minimale et la maximale est de 4 ce qui semble important.

La Figure 36 montre que les maximums atteints sur cette période sont moins importants : le maximum est de 950 mm alors qu'il était de 1300 mm environ sur la période précédente. Il est de nouveau atteint en mars. Quand de 1903 à 1948 il y avait 4 mois qui dépassaient les 800 mm de précipitations, il y en a 3 pour cette période et dépassant difficilement les 900 mm. Il semble donc qu'à l'échelle mensuelle, les maximums de pluie aient largement diminué, pouvant indiquer une modification de l'hydrologie entre ces deux périodes à Canala.

Quand une gradation était observée pour les maximums mensuels de janvier à mars de 1903 à 1951, elle n'est plus identifiable sur la période récente. Une autre différence apparaît pour le maximum mensuel d'avril, qui dépasse largement celui de février, en atteignant 900 mm. Cela s'est produit en 2008.

De plus, l'hétérogénéité précédemment observée entre la période sèche et la saison humide est peut-être moins marquée : le rapport entre le minimum et le maximum des maximums mensuels a baissé à 3.4, avec une différence chiffrée de 660 mm, et donc 350 mm de moins que pour la période précédente.

En ce qui concerne les moyennes mensuelles, elles semblent également plus homogènes. Les maximums atteints entre janvier et mars se situent toujours entre 200 et 350 mm environ. De la même façon, la gradation de janvier à mars n'est plus observée et le maximum apparaît en mars également.

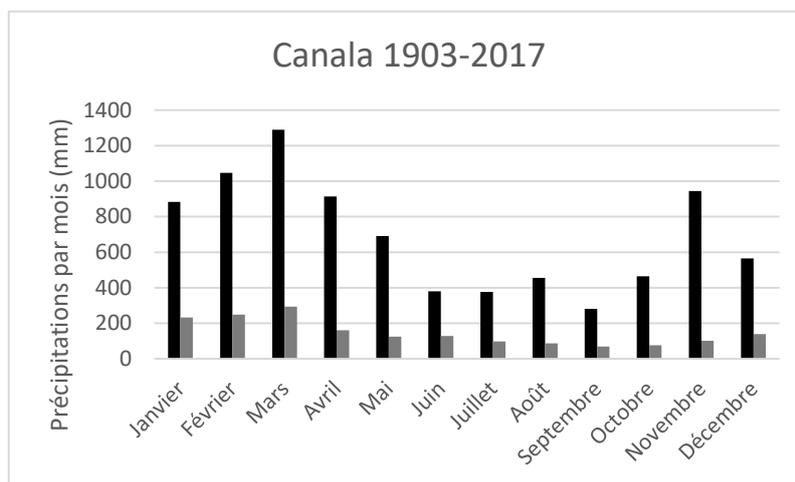


Figure 37: Précipitations moyennes mensuelles sur Canala de 1903 à 2017

En intégrant les valeurs de pluies d’archives à la série de données récente (Figure 37), les moyennes ne semblent pas avoir beaucoup changé. En effet, le maximum est toujours atteint en mars, avec une augmentation de 275 mm à 295 mm avec les pluies d’archive. Globalement, les moyennes mensuelles ne semblent pas avoir évolué significativement.

C’est au niveau des maximums mensuels que la différence est marquée. Cela peut être relié à l’occurrence d’événements exceptionnels, tant par son ampleur que par la période durant laquelle il se produit. L’analyse des pluies peut donc être réalisée à l’échelle de l’événement avec ses caractéristiques.

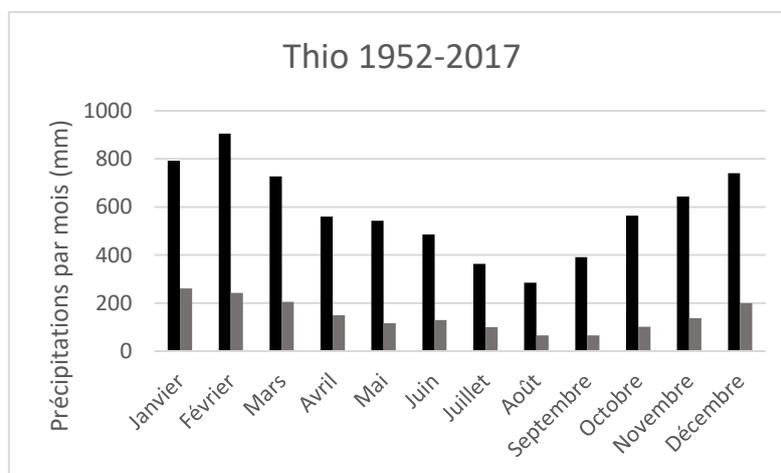


Figure 38: Précipitations moyennes mensuelles sur Thio fr 1952 à 2017

Les pluies de Thio et Canala sur la période de 1952 à 2017 sont comparées (Figure 36 et Figure 38). Au niveau des maximums mensuels, il semble que sur cette période, les maximums ont les mêmes ordres de grandeur : ils dépassent de peu 900 mm. Cependant, durant la saison humide, les maximums de pluie mensuelle à Thio ont tous été supérieurs à 700 mm, alors qu’à Canala, les seuls mois présentant plus de 700 mm sont janvier et mars. Une autre différence est l’évolution au cours de l’année : à Thio, l’évolution des maximums de précipitations semblent se faire progressivement, avec un pic atteint en février, un minimum en août et des valeurs intermédiaires augmentant de aout à février et diminuant de février à aout, sans pic intermédiaire. A Canala, l’évolution n’est pas si régulière : lors de la saison humide, la

maximum est atteint en mars après avoir diminué de 200 mm entre janvier et février. De la même façon, pendant la saison sèche, la progression est moins régulière et des augmentations intermédiaires sont visibles, en aout par exemple.

Les moyennes observent un comportement un peu différent. Le maximum lors de la saison humide est observé à Thio en janvier avec une valeur de 260 mm. Pour Canala il est atteint en mars avec une moyenne de 275 mm. Ces maximums de moyenne mensuelle sont cependant semblables. Pour le reste de l'année, les moyennes mensuelles sont relativement proches entre les deux stations.

Des éléments supplémentaires sont apportées, tirées de l'étude du BRGM par Manuel Garcin. (GARCIN, 2017) Les pluies journalières à Thio et Canala sont rapprochées sur le graphique pour analyser leur corrélation (Figure 39).

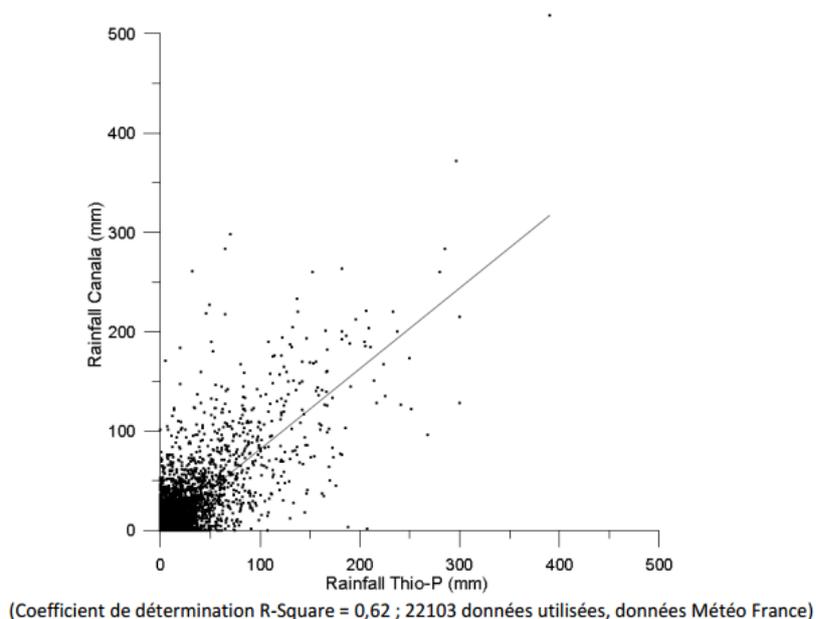


Figure 39: Corrélation des pluies journalières entre Canala et Thio

Le coefficient de corrélation entre les deux données est relativement faible, d'une valeur de 0.62. Il est donc possible de discuter de la faisabilité d'utiliser les pluies d'archive sur Canala pour compléter la chronique journalière des pluies à Thio. Les deux stations ne sont éloignées que de 27 km, mais la variabilité des pluies sur un même bassin versant explique ces différences. Sur le bassin de la Thio, les données du pluviomètre de Thio Plateau ne d'ailleurs pas représentatives de la pluviométrie du bassin. (GARCIN, 2017)

La saisonnalité des pluies (Figure 40 et Tableau 16) et des débits est maintenant étudiée (Figure 41 et Tableau 17). Tous les événements sont représentés, y compris ceux arrivant le même jour de l'année sur toute la chronique de débits.

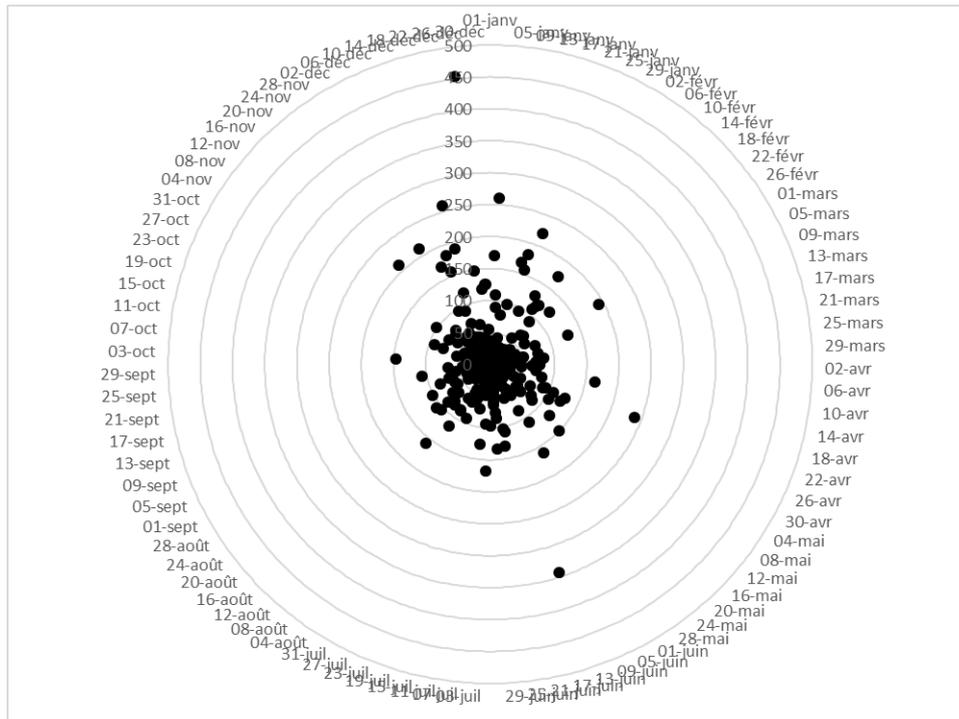


Figure 40: Diagramme radar des pluies maximales des événements de pluie de 1952 à 2016

A première vue, la saisonnalité des pluies n'est pas très marquée. Elle l'est même un peu moins que pour les débits (cf. ci-après). Cependant, il semble tout de même que les événements avec l'intensité maximale et fréquents se produisent principalement en janvier. Par exemple, le 5 janvier ont lieu 3 événements qui se détachent des plus faibles, avec des intensités maximales de 250, 170 et 100 mm/j environ.

L'indicateur de saisonnalité est utilisé pour vérifier ces observations (Tableau 16).

r	0.23
Jour de l'année	119 28-avr

Tableau 16: Indicateurs de saisonnalité pour les pluies

Le coefficient r est de 0.23 ce qui indique une saisonnalité assez peu marquée. Cet indicateur prend en compte tous les événements, même les plus faibles. La saisonnalité est plus marquée au niveau des événements les plus forts, comme ce qui a été montré sur les maximums mensuels. Le jour de l'année moyen est le 28 avril, se rapprochant de la saison humide.

L'analyse de la saisonnalité des débits est abordée, afin de compléter l'hydrologie de la zone.

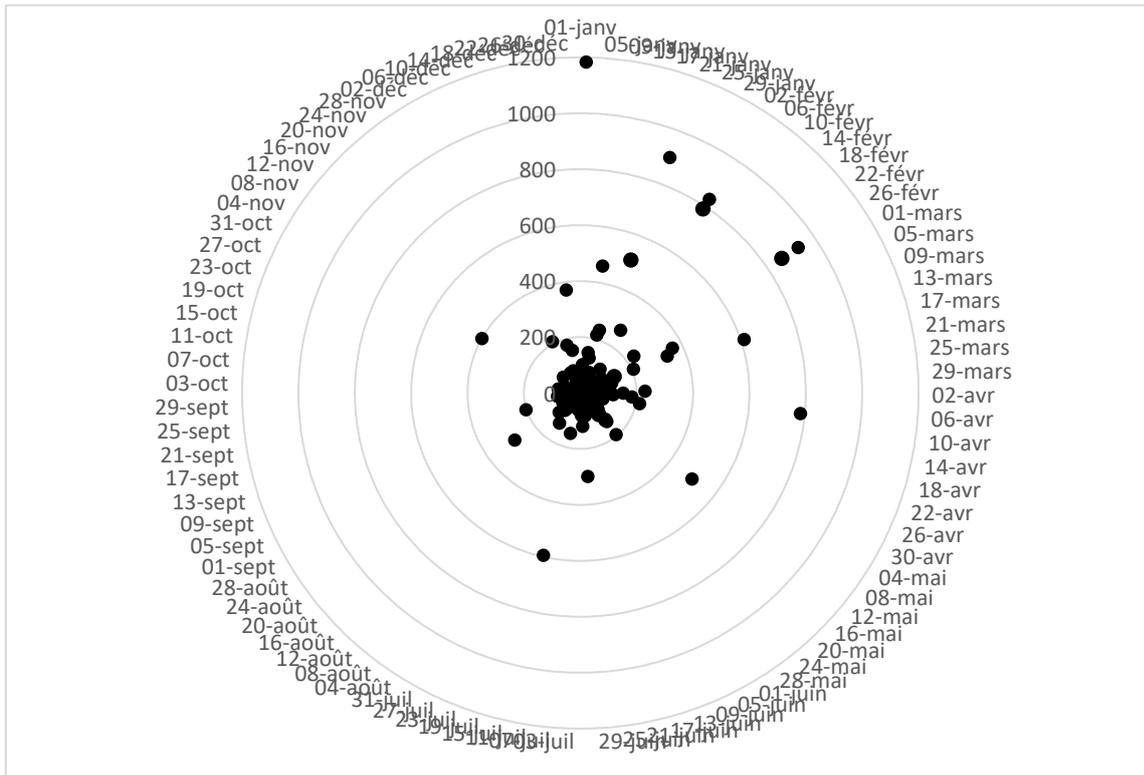


Figure 41: Diagramme radar des débits maximaux des événements de pluie de 1981 à 2016

Sur la Figure 41, tous les événements de la base de données sont présents. Il se trouve que le maximum d'une valeur d'environ  $4000 \text{ m}^3/\text{s}$  est très élevé par rapports aux autres événements, ce qui ne permet pas de visualiser une tendance nette pour les autres événements sur le diagramme.

La Figure 42 présente les débits de la même manière, en omettant le maximum et l'événement dont le débit maximal est d'environ  $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

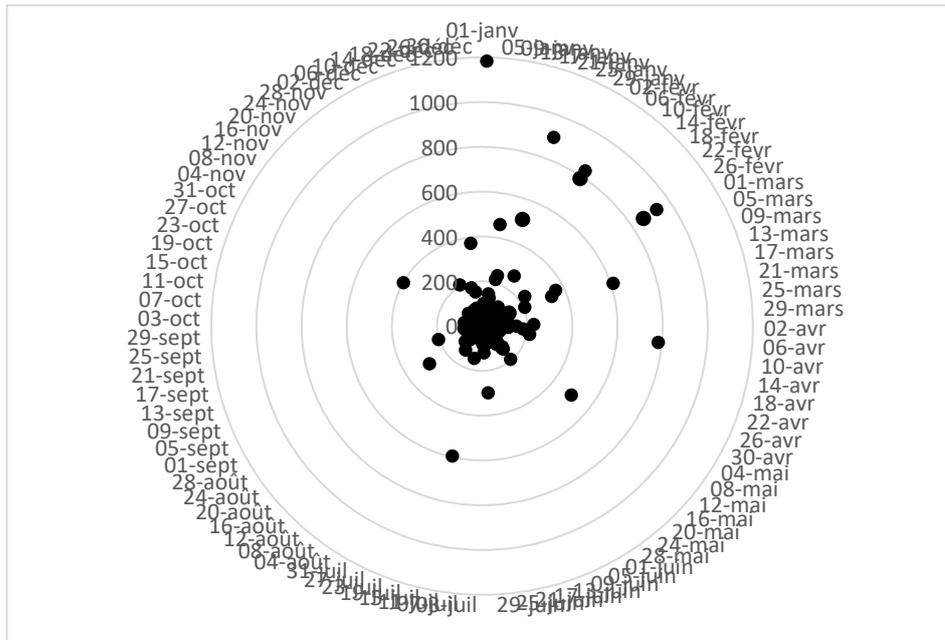


Figure 42: Diagramme radar des débits maximaux associés aux événements de pluie de 1981 à 2016, sans les deux débits maximaux

Il semble que les débits les plus importants soient observés entre janvier et mars principalement. Ces événements ont des débits supérieurs ou égaux à 800 m<sup>3</sup>/s. De plus, l'occurrence de ces hauts débits durant cette saison est plus fréquente. Le 1<sup>er</sup> mars par exemple voit deux événements dont le débit généré se situe autour de 900 m<sup>3</sup>/s. Lors du reste de l'année, les débits sont compris plus dans l'intervalle de 0 à 200 m<sup>3</sup>/s. Cependant, d'autres débits assez forts, entre 300 et 800 m<sup>3</sup>/s, jusqu'à 4000 m<sup>3</sup>/s, sont observés entre avril et juillet. Ils ne sont pas aussi récurrents que lors de la période humide.

Il est intéressant de quantifier la saisonnalité pour compléter l'observation du diagramme (Tableau 17).

r	0.24
Jour de l'année	27.74 19-avr

Tableau 17: Indicateurs de saisonnalité pour les débits

Le coefficient r est de 0.24, ce qui ne semble pas refléter une saisonnalité marquée. Il est étonnant de constater cela puisque l'analyse des pluies montrait une saisonnalité au contraire assez marquée. Il est possible que le fait que la saison humide se distingue particulièrement du reste de l'année et ne dure que 3 mois suffise à baisser le coefficient de saisonnalité.

Le jour de l'année moyen est situé en avril, assez proche de la saison humide. Cela confirme le fait que les jours où les débits sont les plus récurrents se situent proches de la saison humide.

#### IV. Evolution du delta au cours du temps : analyse des cartes et photographies aériennes

Les informations tirées des cartes anciennes sont présentées différemment que celles extraites des images aériennes. En effet, il a été expliqué que ces cartes présentaient parfois des informations partielles, et qui ne couvrent pas forcément toute la zone d'étude. L'analyse des cartes sera donc basée sur une carte, la plus représentative de la période du début de l'activité minière à Thio. Il s'agit incontestablement de la carte c3, qui ne présente pas de date mais qui peut être située vers la fin du XIXe siècle au vu des périodes que couvrent les autres cartes disponibles. Le trait de côte variant sur les différentes cartes, de par une incertitude sur la donnée et son traitement certaine, mais également par une variation réelle probable, une bande représentative du trait de côte de la fin du XIX siècle est établie.

##### 1. Analyse du trait de côte

L'évolution du trait de côte sera analysée par rapport à l'état de 1880, et à l'état final actuel de 2017. L'état initial est représenté par la bande grise, et correspond à une enveloppe des traits de côte extraits des cartes anciennes. Les deux points d'embouchure de la carte c3 ne sont pas visibles puisque qu'englobés dans des enveloppes qui ne comportaient qu'une embouchure.

Les résultats de l'incertitude de la digitalisation du trait de côte sont présentés (Tableau 18 et Tableau 19).

	c3	c4	c5	Moyenne totale (m)
Moyenne (m)	8.5	10.0	5.7	8.1

*Tableau 18: Incertitudes du trait de côte des cartes anciennes*

La moyenne totale des incertitudes au niveau du tronçon et par rapport au trait de côte de 2017 est de 8 m environ, pour la période de 1880.

	1954	1971	1976	1982	1985	1989	1995	2008	Moyenne d'erreur totale sur le Bota Méré (m)
Moyenne par année (m)	20.8	4.2	4.5	4.5	24.0	8.7	5.5	6.9	9.9

*Tableau 19: Incertitudes du trait de côte sur les photos aériennes*

On remarque que l'incertitude la plus grande est observée pour le trait de côte de 1954, avec presque 21 m. Cela est dû à l'imprécision de la digitalisation en lien avec la qualité moyenne de l'image, et particulièrement au niveau du Bota Méré, où des vagues rendent l'image comme floue. La moyenne totale des incertitudes sur les images aériennes approche 10 m.

Plusieurs éléments peuvent être observés : le trait de côte sur la rive gauche, sa situation par rapport au Bota Méré, ou encore le trait à la droite du Bota Méré (planche traits de côte).



1954



1971



1976



1982



1985



1989



1995



2008



2017

-  Bande représentative du trait de côte de la fin du XIXe siècle
-  Trait de côte
-  Dépôts

0 400 Mètres



*Evolution du trait de côte de 1954 à 2008, sur fond d'image aérienne de 2017 et en comparaison avec la bande représentative du trait de côte de 1880*

De 1880 à 1954, le trait de côte sur la rive gauche semble s'être avancé vers la mer, tout comme sur la gauche du Bota Méré. La partie droite semble suivre l'enveloppe de 1880, et le décalage entre les deux peut être dû à une incertitude sur le trait de 1954. En 1971, le trait de côte a encore progressé vers la mer sur la rive gauche tout en étant un peu en retrait en remontant sur sa partie gauche. Il est évident que le trait de côte à gauche prend le dessus sur la partie droite, modifiant ainsi l'orientation de l'embouchure. Le trait de côte semble s'être creusé sur le flanc gauche du Bota Méré. Sur sa droite, la côte ne semble pas avoir évolué depuis 1880.

Dès 1976, le trait semble s'équilibrer des deux côtés de l'embouchure : le cordon précédemment formé s'est rétracté, et sur le gauche du mont, le trait a avancé vers la mer. La Thio est donc conduite de façon plus rectiligne par rapport à son chenal principal. Sur la droite du Bota Méré, la côte ne semble pas s'être déplacée.

La même dynamique est observée jusqu'en 1982, puisque le trait de côte sur la rive gauche de la Thio semble se creuser un peu plus par rapport à 1880 mais également par rapport à l'image actuelle. La formation sur la gauche de la montagne gonfle encore pour s'avancer largement vers la mer, et semble rejoindre la pointe du Bota Méré.

En 1985, au niveau de l'embouchure se forme une sorte de goulot, qui semble s'évaser sur la mer, et formant une pointe sur la rive droite. En remontant le trait de côte vers la rive gauche, rien ne semble avoir évolué. Sur la gauche du Bota Méré, le trait de côté est légèrement creusé et sur sa droite, le trait de côte suit l'actuel et celui de 1880.

Entre 1985 et 1989, la forme du trait de côte au niveau de l'embouchure a encore évolué et semble s'être tassée. A gauche du Bota Méré, des formes singulières se créent, formant des creux bien dessinés et des appendices.

Ensuite, en 1995, il est visible qu'un cordon s'est formé au niveau de l'embouchure, cordon surement franchissable, mais indiquant un important dépôt de sédiments à ce niveau. En complément, le trait de côte a avancé vers la mer et rejoint la pointe de la montagne. La côte semble se stabiliser jusqu'à l'état l'actuel. Il est observé le même léger avancement de la côte dès 1995 où il se stabilise en l'état actuel.

En 2008, l'embouchure a pris la forme imposée par les travaux de rectification qui ont conduit la Thio de manière rectiligne, visible sur l'image actuelle.

Il apparaît que le trait de côte représentatif de 1880 semble plus homogène et rectiligne que ceux des états du delta sur les images aériennes. En effet dès 1954, le trait de côte sur la gauche semble plus creusé et remonte plus en en avant vers la mer. Au cours du temps, le trait de côte continue de se creuser. La plus grande avancée du trait de côte sans prendre en compte les aménagements plus récents est observée en 1971. Par la suite, les changements importants comme la création d'un cordon, ont lieu en 1995. La rectification du lit principal de la Thio conduit l'eau plus en avant encore sur la mer. Sur le flanc gauche du Bota Méré, le trait de côte avance largement sur la mer, d'environ 200 m entre 1954 et 1982. Il semble globalement se maintenir à partir de 1995, après avoir changé de morphologie en 1989. Sur le côté droit du Bota Méré, le trait de côte n'a pas évolué, du moins sur les cartes et images disponibles depuis 1880. Cela montre que la rivière est responsable des changements de morphologie de la côte.

Les résultats de l'analyse quantitative de l'évolution du trait de côte sont abordés (Tableau 20 et Figure 43).

La longueur déterminée pour le trait de côte de 1880 est de 2593 m.

Année	Nombre d'années d'écart	Surface (m <sup>2</sup> )	Surface/longueur	Vitesse moyenne (m <sup>2</sup> /an)	Vitesse moyenne (m/an)
1880		0	0	0	0
1954	74	149 723	58	2023	0.78
1971	17	144 786	56	-290	-0.11
1976	5	131 114	51	-2734	-1.05
1982	6	193 363	75	10375	4.00
1985	3	175 147	68	-6072	-2.34
1989	4	213 189	82	9511	3.67
1995	6	262 043	101	8142	3.14
2008	13	278 517	107	1267	0.49
2017	9	270 165	104	-928	-0.36

Tableau 20: Résultats des mesures de surface des zones et du ratio de la surface sur la longueur de la ligne de 1880

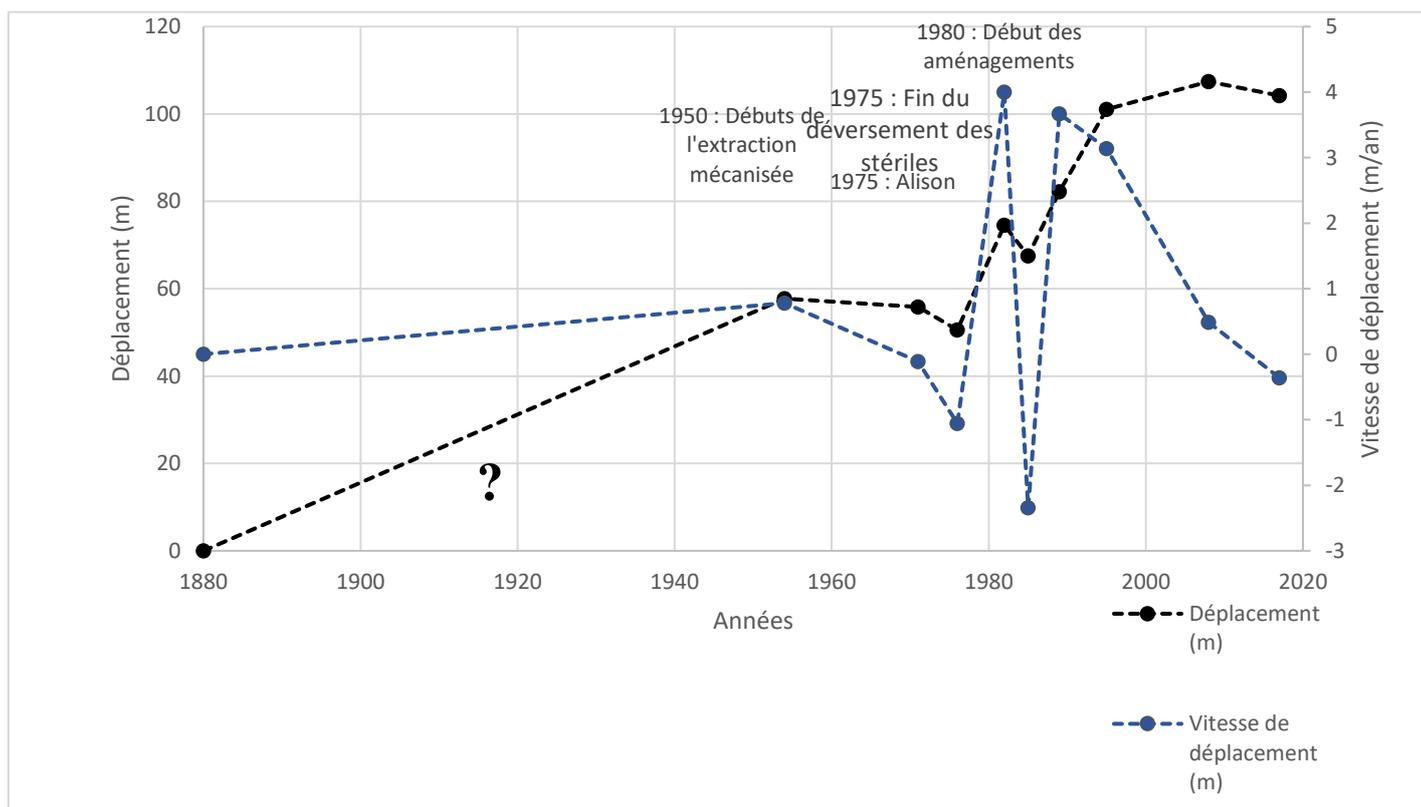


Figure 43: Déplacement moyen et vitesse de déplacement du trait de côte par rapport à 1880

Dans le détail, il est d'abord possible d'observer qu'en 1954, le trait de côte a déjà globalement avancé de 60 m environ par rapport à 1880. Sur le nombre d'années qui séparent les deux dates, la vitesse de déplacement est de 0.8 m par an, ce qui est faible. Pour tenter une analyse plus précise, il serait pertinent de compléter la chronique avec d'autres données disponibles entre 1880 et 1954.

De 1954 à 1976, il n'est pas remarqué de déplacement significatif du trait de côte, voire même un léger retrait de 5 m entre 1971 et 1976. C'est entre 1976 et 1982 que la dynamique s'inverse : le déplacement par rapport à 1880 augmente d'environ 24 m en 6 ans, indiquant une avancée significative du delta de 4 m/an en moyenne, ce qui semble refléter un changement important de la dynamique du delta. Entre 1982 et 1985 il peut être observé un léger recul du trait de côte de 7 m, avec une vitesse moyenne de 2.3 m/an, suivi par une progradation dans les années suivantes. La distance augmente en effet de 40 m entre 1985 et 2008. Le point d'avancée maximale pour les dates disponibles est atteint en 2008, avec une avancée de 107 m par rapport à 1880. La vitesse de déplacement atteint les 3.5 m/an entre 1985 et 1989, et se maintient à plus de 3 m/an jusqu'en 1995. La vitesse diminue pour atteindre 0.5 m/an entre 1995 et 2008, avec une avance de 6 m en 13 ans. Actuellement, le trait de côte serait légèrement en train de reculer, avec une vitesse de 0.4 m/an entre 2008 et 2017. Il est donc possible de conclure sur le fait que la côte a avancé de 60 m sur le lagon entre 1880 et 1954, puis a connu une relative stabilité de 54-76. A partir de 1976, l'avancée s'est accentuée et a continué sa dynamique jusqu'en 95 (époque des travaux) du delta, puis la morphologie s'est stabilisée (légère augmentation entre 95 et 2017, l'époque actuelle. La progradation maximale du delta est d'environ 110m sur toute sa longueur. La vitesse de déplacement semble relativement modérée jusqu'en 1976 et augmente de 5 m/an entre 1976 et 1982. Un autre recul important a lieu entre 1982 et 1985 avec une vitesse de 2.3 m/an. La vitesse d'avancée du trait de côte remonte jusqu'en 1995 puis diminue légèrement. Les changements les plus rapides ont eu lieu entre 1976 et 1995, ralentissant actuellement.

Les résultats au niveau des transects sont analysés (Tableau 21).

Une valeur négative indique un retrait par rapport à 1880 et une valeur positive indique une avancée. Le tableau recense les valeurs d'espacement entre les différents traits de côte par rapport à 1880 et au niveau des transects. Les valeurs ont pour unité le mètre.

n° transect		1880	1954	1971	1976	1982	1985	1989	1995	2008	2017
1	Déplacement	0	-32	-62.6	-60.8	-87.1	-62	-83.9	-78.1	-70.4	-78.1
	Vitesse	0	-0.43	-1.80	0.36	-4.38	8.37	-5.48	0.97	0.59	-0.86
2	Déplacement	0	94.7	51	58.8	43.5	69.7	95.4	103.4	106	124.4
	Vitesse	0	1.28	-2.57	1.56	-2.55	8.73	6.43	1.33	0.20	2.04
3	Déplacement	0	9.8	103	141.4	340	242.4	301.5	311	343.1	336.7
	Vitesse	0	0.13	5.48	7.68	33.10	-32.53	14.78	1.58	2.47	-0.71
4	Déplacement	0	30	2.6	13.9	5.9	9.9	9	16.6	5.3	1.8
	Vitesse	0	0.41	-1.61	2.26	-1.33	1.33	-0.23	1.27	-0.87	-0.39

Tableau 21: Distance de déplacement (en m) et vitesse (en m/an) des traits de côte par rapport à la bande représentative du trait de côte de 1880 au niveau des 4 transects

Afin de mieux visualiser l'évolution, des graphiques représentant la distance entre 1880 et chaque trait de côte au cours du temps sont tracés (Figure 44). La valeur de 1880 est nulle puisque cette date constitue la référence.

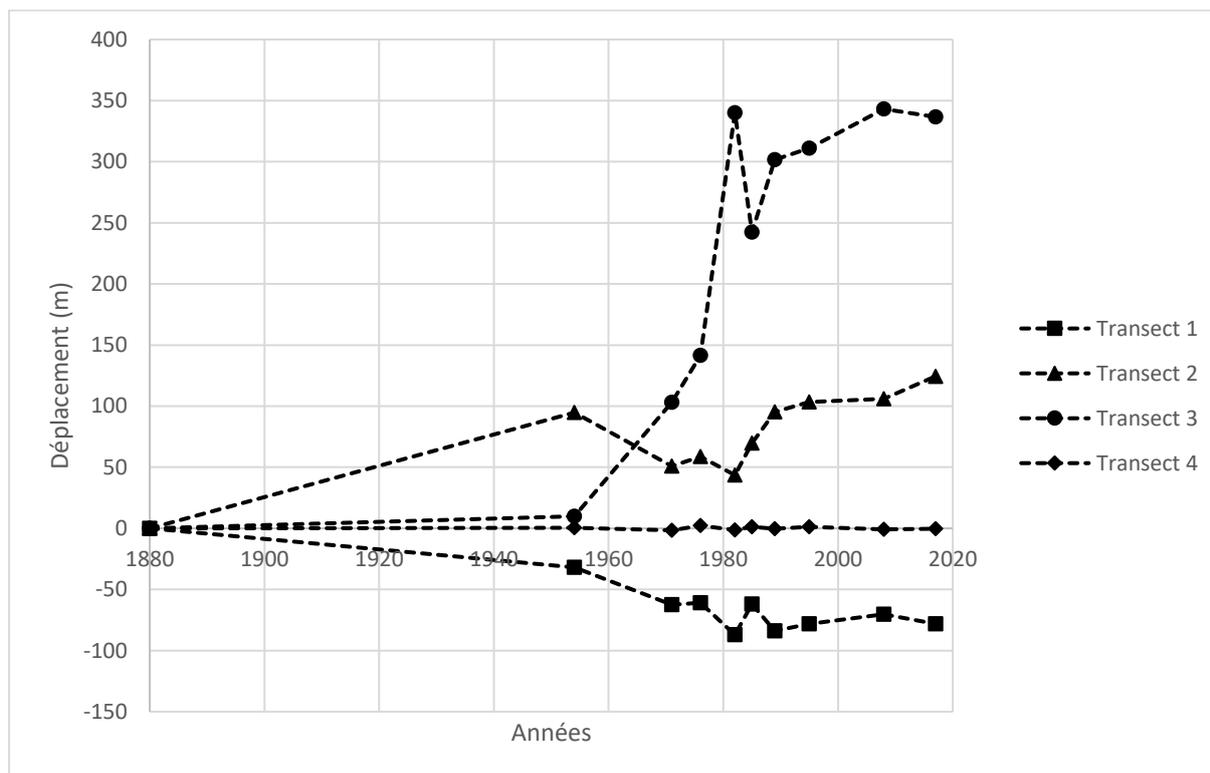


Figure 44: Evolution du trait de côte au niveau de 4 tronçons différents

On peut observer sur la Figure 44 que globalement, le trait de côte est stable au niveau du transect 4. Au niveau du transect 1, il semble que le trait de côte ait un peu reculé par rapport à 1880. Le transect 2 montre une avancée du trait de côte relativement importante sur la rive gauche proche de la Thio. C'est au niveau du transect 3 que l'avancée est la plus fulgurante.

La figure montre que depuis 1880, le trait de côte au niveau du transect 1, a reculé sur la rive gauche de l'embouchure présente en 1880. De 1880 à 1971 le trait de côte a reculé de 60 m environ. Il semble ensuite se stabiliser dans les années 1970 puis reculer encore de 20 m de 1976 à 1982. En 3 ans il semble avancer de 20 m au vu de sa position en 1985. Le trait de côte sur ce tronçon semble ensuite reculer de 20 m environ puis avancer de nouveau légèrement. En 2017 représentant l'état actuel du delta, le trait de côte à cet emplacement a reculé de 80 m depuis 1880. Il semble que le trait de côte sur ce tronçon ait une dynamique assez variable au cours du temps. Le changement le plus rapide a lieu de 1976 à 1989 : le trait de côte recule avec une vitesse de 4.4 m/an entre 1976 et 1982, puis avance de 25 m avec une vitesse de 8.4 m/an jusqu'en 1985. Durant les quatre années suivantes, le trait de côte recule de 22 m avec une vitesse de 5.5 m/an. De plus, sa position a complètement changé depuis 1880 indiquant des modifications de morphologie de la zone. Une hypothèse est que l'embouchure gauche présente en 1880 et ayant disparu a modifié le trait de côte en ne créant plus d'apport sédimentaire sur cette partie du delta. Ainsi, sous l'action des courants dominants, la côte a pu se creuser au cours du temps.

Les distances mesurées montrent une tendance à l'avancée du trait de côte au niveau du transect n°2. Entre 1880 et 1954, le trait de côte a avancé de presque 10 m. Il semble avoir reculé entre 1954 et 1971 d'environ 50 m puis avance progressivement entre 1982 et 2017 après avoir légèrement reculé entre 1976 et 1982. Le trait de côte au niveau du tronçon 2 avance de 90 m entre 1982 et l'actuel. La vitesse d'évolution est également variable. Les modifications les plus

rapides ont lieu sur la période de 1976 à 1989, atteignant des vitesses de 8.7 m/an entre 1982 et 1985. Cela montre donc une avancée du delta à ce niveau depuis 1980 environ.

Le trait de côte au niveau du transect 3 a également beaucoup évolué. Entre 1880 et 1954, le trait de côte ne semble pas avoir beaucoup changé. C'est à partir de 1971 que le trait de côte commence son avancée sur le lagon. Il progresse d'environ 100 m jusqu'en 1971. Ce phénomène continue en 1976, puis en 1982 où il progresse d'un coup jusqu'à +350 m. En regardant le trait de côte digitalisé sur les cartes, il y a bien une progression du trait de côte sur ce tronçon de 200 m entre 1976 et 1982. Le trait de côte recule de 100 m entre 1982 et 1985 ce qui semble étonnement important, mais en cohérence avec les observations des images aériennes. Par la suite, le trait avance encore un peu jusqu'à atteindre de nouveau une avancée de 350 m par rapport à 1880. Sur cette portion les changements semblent importants et rapides. C'est également sur cette partie de la côte que les changements de morphologie du delta sont les plus radicaux. Les vitesses de déplacement sont très variables : elles passent de 14.8 m/an entre 85 et 89 à 2 m/an entre 89 et 95. De plus, elles atteignent 33 m/an entre 1976 et 1982, et sont du même ordre de grandeur entre 82 et 85. C'est à relier au banc de sable qui s'est formé sur la gauche du Bota Méré puis stabilisé comme l'avait montré l'analyse des éléments végétalisés. Cela montre donc une sédimentation active sur la rive droite de la Thio au cours du temps, et probablement à partir de 1975 puisque c'est en 1982 que les changements importants sont visibles. Ce phénomène peut être accentué par l'aménagement du lit principal de la Thio, favorisant la sédimentation dans cette zone.

Au niveau du transect 4, le changement le plus important a eu lieu entre 1880 et 1954 où la côte a avancé de 30 m. Lors des dates suivantes, ce qui est observé est une succession de légères avancées et reculs n'excédant pas 10 m environ. Cet écart peut également être dû à l'incertitude engendrée de par la qualité des images aériennes et par la photo-interprétation. Globalement, il semble que cette zone soit stable au cours du temps, et non marquée par les changements de morphologie du delta comme observés sur les autres tronçons.

Enfin, les écarts de déplacement entre les transects sont variables : les plus importants sont observés à partir des années 70. En 1982, le trait de côte au niveau du transect 3 présente une avancée de + 450 m par rapport au transect 1. Cela montre une réelle hétérogénéité d'évolution sur la longueur du trait de côte.

En conclusion, il semble que le trait de côte ait globalement avancé depuis 1880. C'est depuis la fin des années 70 que la dynamique de progradation s'est accélérée. Les zones de la côte les plus touchées sont celles près de l'embouchure actuelle, et particulièrement la rive droite. En effet, l'avancée maximale à cet endroit atteint jusqu'à 350 m depuis 1880. Sur la gauche du delta, le trait de côte a tendance à se creuser, et a reculé jusqu'à presque 100 m depuis 1880. Au niveau des transects également c'est à partir de 1980 environ que le delta a vu sa dynamique d'avancée s'accélérer. De plus, une distorsion du trait de côte à partir des années 70 est à observer sur sa longueur par rapport à 1880. Des événements hydroclimatiques sont certainement à mettre en lien avec ces changements de morphologie liés à une hyper-sédimentation sur la zone deltaïque et particulièrement en rive droite.

## 2. Analyse des zones en eau

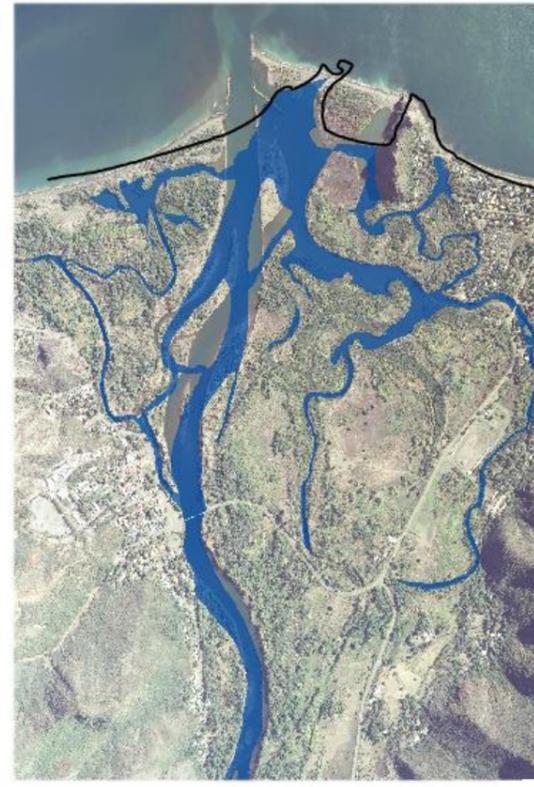
Les cartes montrant les zones en eau sont présentées sur la planche zones en eau. Le but étant d'évaluer l'évolution par rapport à un état connu et donc actuel, et servant de référence spatiale,



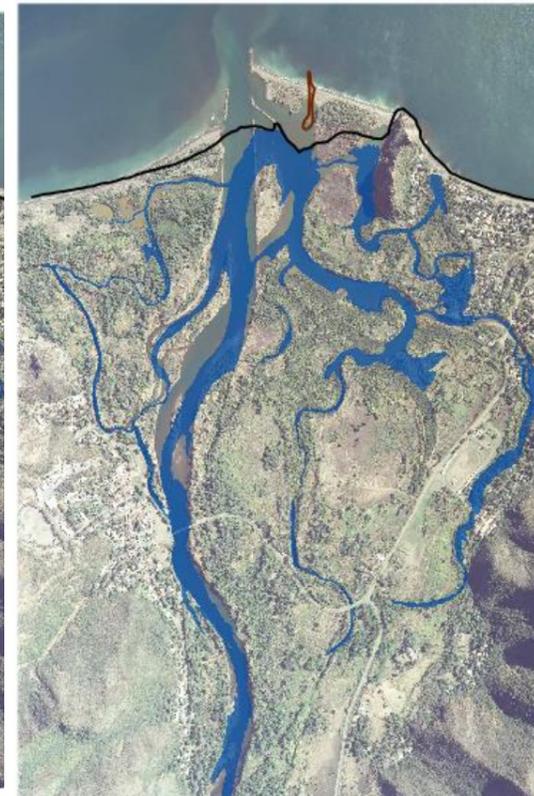
1880



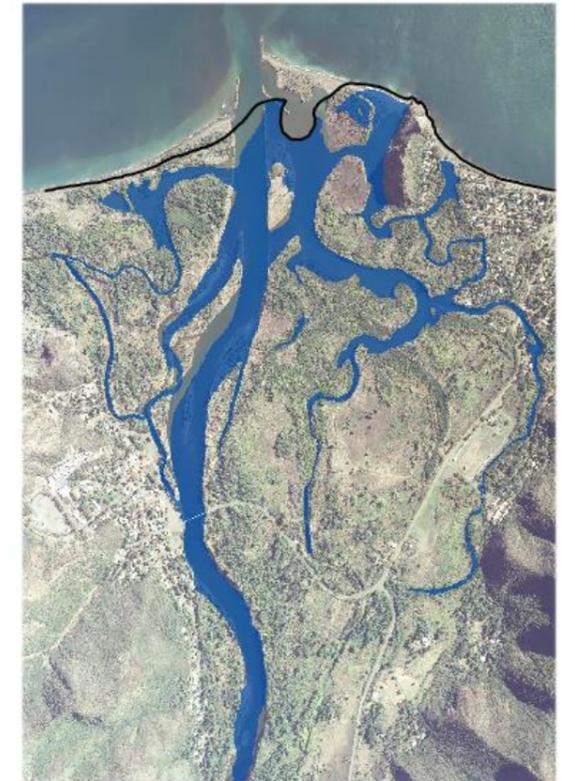
1954



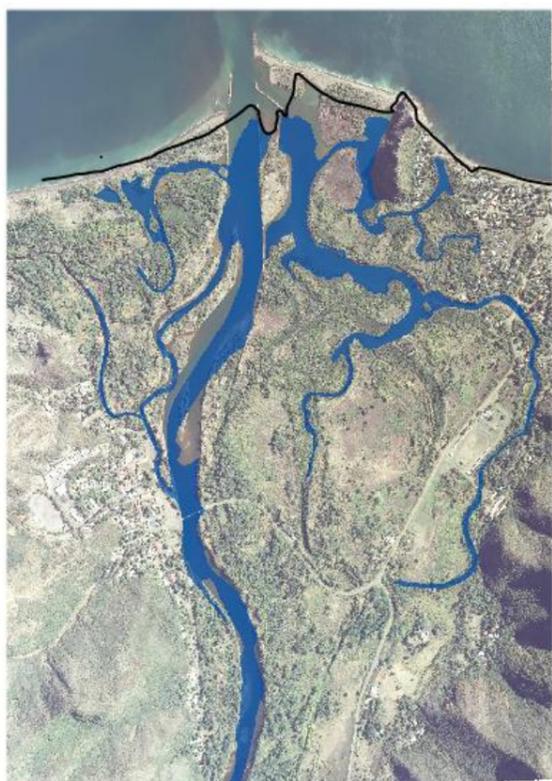
1971



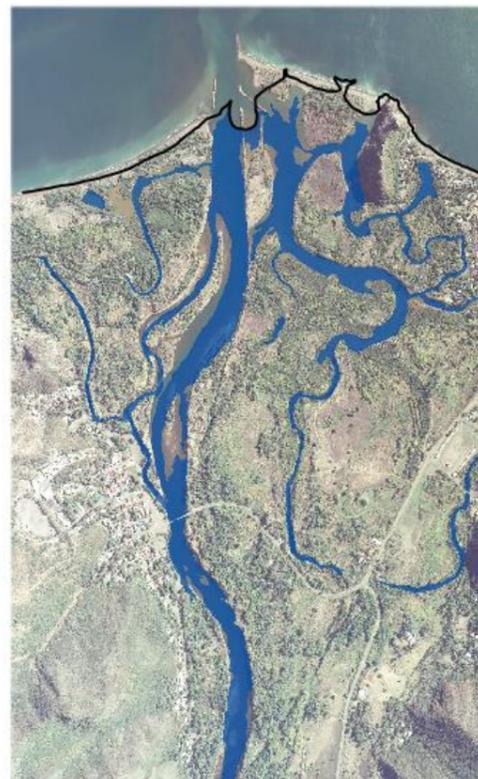
1976



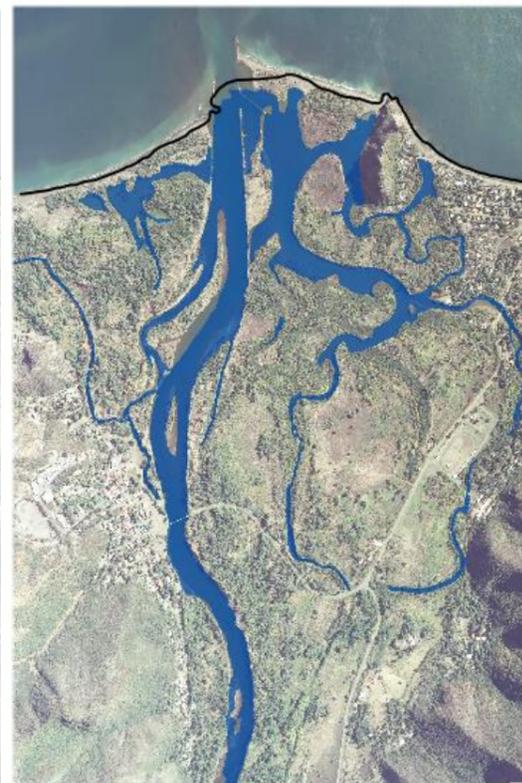
1982



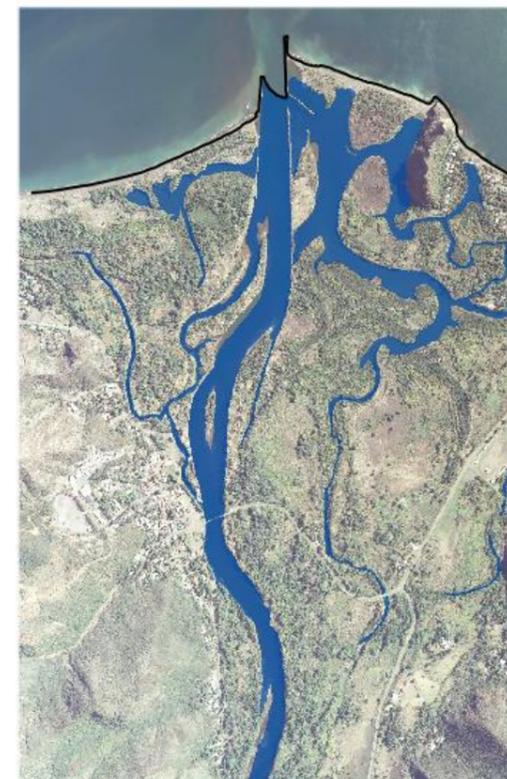
1985



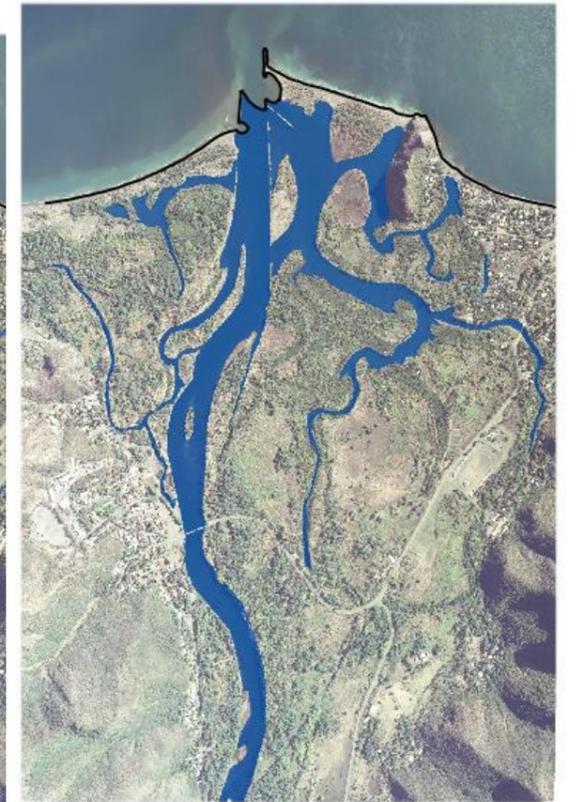
1989



1995



2008



2017



Evolution des zones en eau sur le delta, entre 1880 et 2008, en comparaison avec une image aérienne de 2017

les zones en eau anciennes digitalisées sont comparées sur l'image aérienne de 2017. L'évolution est également comparée entre les différentes dates, de sorte d'analyser plus précisément la donnée.

Les surfaces en eau (Figure 45) sont calculées grâce au logiciel ArcMap©.

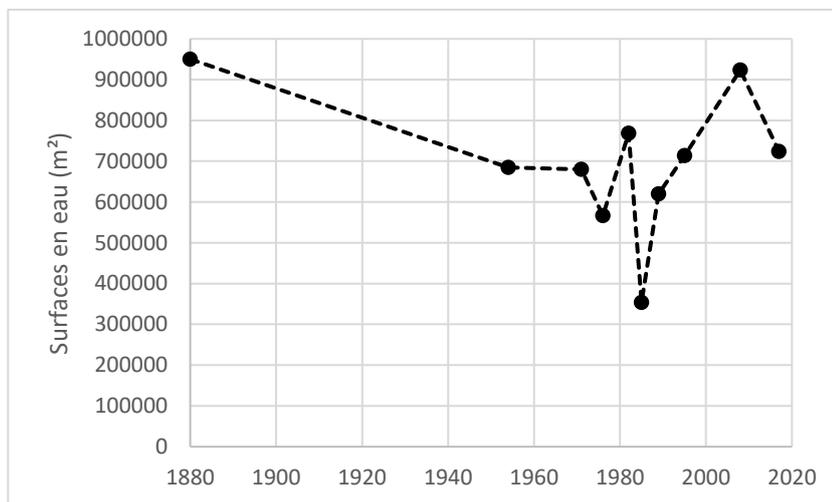


Figure 45: Evolution des surfaces en eau sur le delta de 1880 à 2017

Les tendances se dégageant Figure 45 sont (1) une nette diminution d'un tiers de la surface des zones en eau entre 1880 et 2017 et (2) une variabilité importante de cette surface en eau entre ces deux dates. Il ne semble pas y avoir d'évolution entre 1954 et 1971. Une légère baisse des surfaces en eau est observée entre 1954 et 1971, de 10 ha. Des changements plus rapides ont lieu entre 1976 et 1989. Il y a une augmentation de 20 ha entre 1976 et 1982, puis une diminution de moitié lors des 3 années suivantes. De 1985 et 1989, une augmentation des surfaces de 25 ha environ a lieu. Lors des années suivantes, les surfaces en eau continuent d'augmenter mais moins rapidement. Une diminution serait en œuvre actuellement, même s'il semble difficile pour le moment de dégager une tendance nette pour la dynamique actuelle. Les surfaces en eau actuelles sont sensiblement les mêmes qu'en 1880. Les périodes aux grands changements semblent se situer entre 1880 et 1985. Les dynamiques les plus rapides ont lieu entre 1976 et 1985.

L'analyse des cartes des zones en eau est donc effectuée.

Il est tout d'abord remarqué que la morphologie du lit principal de la Thio varie ostensiblement. Cela est particulièrement visible entre 1880 et 1954, puisqu'une grande période sépare les deux cartes. Sur la carte c3, la Thio présente deux embouchures et son lit est orienté dans une direction Nord-Ouest. Le trait de côte semble reculé par rapport au Bota Méré. Sur la carte de 1954, le lit change d'orientation : il prend une direction Nord/Est. Le trait de côte semble également être emmené dans la même direction, témoignant donc d'un mouvement général vers le Nord/Est. Une embouchure unique est alors présente. Il est possible que l'embouchure gauche de 1880 ait été dissociée du lit principal pour évoluer en des formations plus restreintes simplement reliées à l'embouchure par un petit chenal. Le bras menant à l'extérieur du bassin

versant sur la gauche semble quant à lui être resté, avec toutefois une diminution de la largeur de son lit. Autre fait observable entre ces deux cartes est la multiplicité et la longueur des chenaux secondaires sur la partie droite du delta. Sur le cliché de 1880, un chenal relie le lit principal de la Thio au bras secondaire le plus proche. En 1954, ce chenal ne se raccorde plus ni d'un côté ni de l'autre, il semble à sec sauf au niveau du coude où l'eau est la plus susceptible de stagner. De plus, les chenaux sur la rive droite progressent bien plus loin vers l'amont vers 1880 qu'en 1954, il y a bien un raccourcissement de ces bras. Un autre élément marqueur d'évolution est le banc séparant les deux bras de la Thio en 1880 : il est déplacé plus vers l'amont à partir de 1954. La diminution des surfaces en eau déterminée précédemment est visible en observant les cartes : elle peut être reliée à la contraction des deux bras en un bras unique au niveau de l'embouchure, ainsi qu'à la déconnexion de chenaux entre eux.

Entre 1954 et 1971, l'évolution des zones en eau est bien moins marquée, malgré les 18 années qui séparent les deux états. L'élément le plus marquant est le trait de côte sur la rive gauche de la Thio : un cordon s'est formé et progresse bien au-delà du trait de côte de la rive droite. Cela témoigne d'une progression de la sédimentation vers l'aval et d'un rejet de sédiment sur la gauche de l'embouchure. Un recouplement entre un chenal secondaire et le bras principal est observable, formant un nouveau banc près de l'embouchure. La baisse des surfaces couvertes d'eau est cette fois liée à un renforcement des bancs de sable sur le lit principal vers l'embouchure.

En 1976, la Thio est représentée plus en aval du trait de côte de sorte de pouvoir faire remarquer un petit banc de sable au niveau de l'embouchure. Il n'est pas matérialisé par le trait de côte sur la carte, mais simplement comme un obstacle contourné par l'eau. En 5 ans, la partie droite du delta voit ses chenaux secondaires avec des formations supplémentaires où l'eau a progressé. Le chenal le plus externe présente une largeur de lit plus importante. De la même façon, l'eau a progressé vers le trait de côte le long du Bota Méré. Cependant, les chenaux sur la rive gauche voient leur largeur s'amincir, de la même façon que pour le lit principal de la Thio.

A partir de 1982, il est bien visible que la largeur des bras de la Thio mais surtout de son chenal principal a augmenté. Le chenal sur la gauche du Bota Méré a pris de l'ampleur, tout comme le bras ayant recoupé le bras principal de la Thio au niveau du banc principal.

Entre 1982 et 1985, il est encore une fois visible que les zones en eau diminuent en surface. C'est à partir de 1985 que les bras secondaires sur la droite du delta n'évoluent plus.

En 1989, la partie gauche du delta voit ses bras secondaires diminuer, notamment près du trait de côte. La coupure du lit de la Thio est plus visible : un bras rectiligne semble se profiler du côté gauche du banc. Au niveau de Thio-Village, un recouplement est observable du côté droit du banc décrit précédemment.

En 1995, le mouvement rectiligne est encore accentué et a progressé vers le trait de côte. Des bras secondaires semblent avoir progressé depuis 1989 vers la mer, pouvant à partir de 1995 surement franchir le trait de côté pour rejoindre la mer, lorsque les conditions hydrologiques le permettent. A gauche du delta, les bras formant des recoins semblent avoir augmenté de surface de nouveau. La surface des zones en eau a visiblement augmenté.

En 2008, le lit principal de la Thio est totalement rectiligne, depuis l'ancien coude jusqu'au trait de côte, qui a lui aussi été modifié, puisque conduisant l'eau de façon canalisée en avançant dans la mer. La morphologie des autres chenaux ne semble pas avoir beaucoup évolué. De la même façon, en comparant avec l'image aérienne de 2017, la forme générale du delta ne semble pas avoir considérablement évolué.

Pour résumer, il semble que les surfaces en eau aient connu des variations, que l'on peut rapprocher d'éléments ayant évolué dans le delta : création de bancs, déconnexion entre des chenaux, amoindrissement de la largeur du lit ou encore d'évolution de l'embouchure. Plusieurs hypothèses peuvent ensuite être avancées : sédimentation et engravement préférentiel à certaines périodes amoindrissant la surface en eau, ou l'augmentation de l'influence marine grossissant le chenal au niveau de l'embouchure, ou bien encore une image aérienne prise après un événement pluvieux fort.

L'analyse de la multiplicité des chenaux peut être rapprochée de l'analyse des surfaces en eau et de la morphologie des chenaux. Les résultats par section sont présentés dans le Tableau 22.

Section	Nombre moyen d'intersections par section
1	1.8
2	2.8
3	4.6
4	5.4
5	8.1
6	9
7	4.5

*Tableau 22: Diversité moyenne annuelle du nombre de chenaux pour chaque section*

Les sections transversales comptant le plus grand nombre d'intersections sont les sections 5 et 6, avec des moyennes comprises entre 8 et 9. Ce sont celles qui traversent le delta dans son envergure et sont le plus susceptibles de croiser des chenaux. Les sections présentant le moins d'intersections sont les deux premières, situées le plus vers l'amont du delta, avec une moyenne de chenaux environ égales à 2 ou 3. Les autres sections, 3, 4 et 7, situées au milieu du delta et le plus à l'aval ont un nombre moyen d'intersections compris entre 4.5 et 5.5. On peut en déduire que le maximum de chenaux est observé dans la partie plutôt aval du delta. Cela est en cohérence avec l'organisation fractale du delta, les chenaux se dédoublant d'amont en aval.

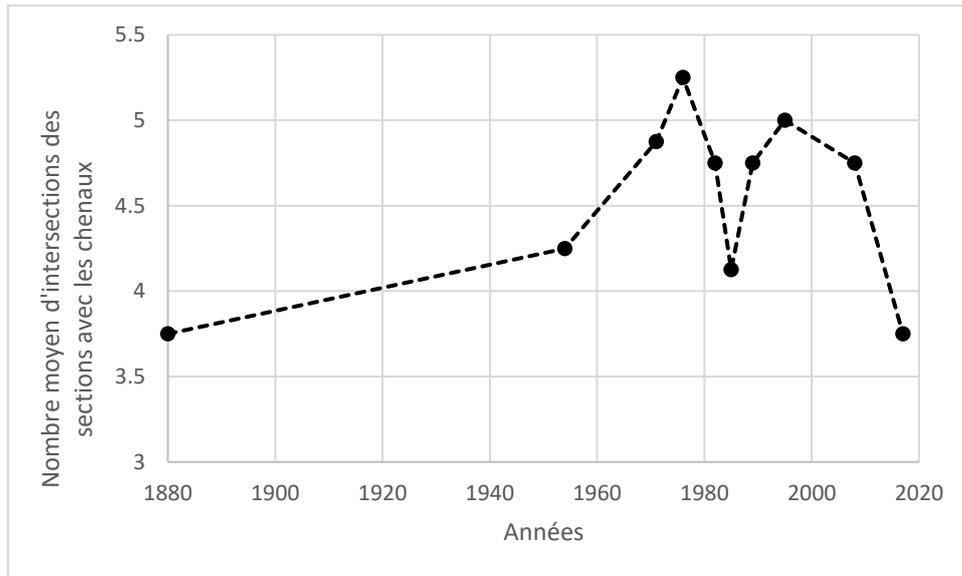


Figure 46: Nombre moyen d'intersections pour toutes les sections

Le nombre d'intersections par année est également variable tout en restant entre 3.75 et 5 (Figure 46). Des changements légers sont tout de même observables. Le nombre d'intersections augmente entre 1880 et 1976, passant de 3.75 et 5.25, indiquant une augmentation de la diversité des habitats. Il redescend de 1976 à 1985 d'environ 1.5. Une remontée de la diversité des habitats est observée jusqu'en 1995 légèrement (une intersection supplémentaire), pour diminuer jusqu'en 2017 où la diversité atteint celle présente en 1880. Les plus grands changements ont donc lieu entre 1970 et 2017, avec une période de changement de dynamique entre 1970 et 1995. Des modifications de la multiplicité des chenaux les plus rapides ont lieu sur cette période, indiquant des changements de morphologie sur le delta. L'évolution la plus importante de la diversité d'habitats moyenne sur la zone a lieu sur la période 1970-1995 mais n'est pas révélatrice de changements profonds. On peut donc s'intéresser à la variabilité du nombre d'intersections à l'échelle de la section (Figure 47).

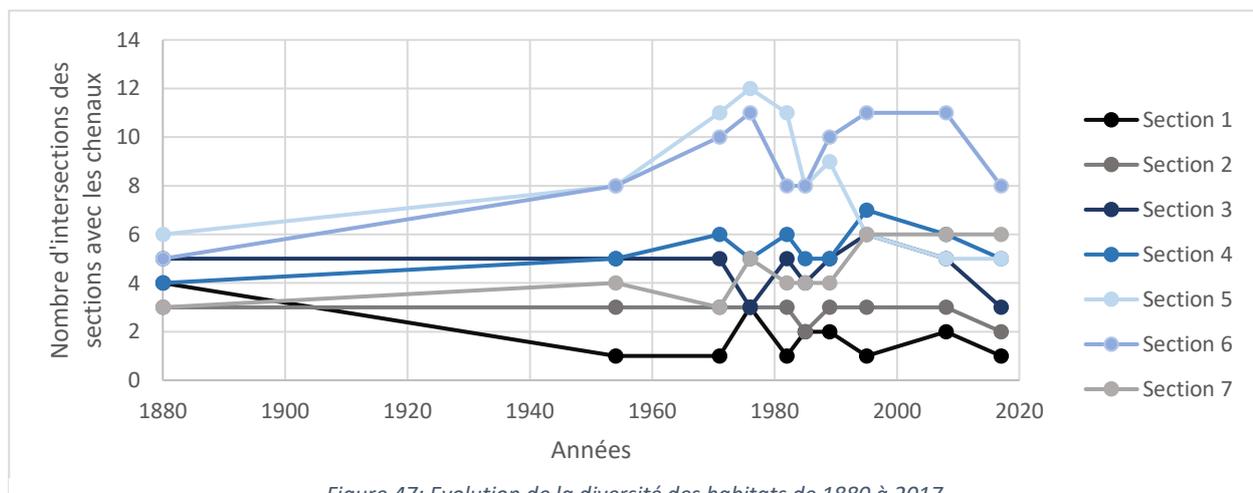


Figure 47: Evolution de la diversité des habitats de 1880 à 2017

Les évolutions du nombre d'intersections au cours du temps sont variables selon les sections. C'est probablement au niveau de la section 5 que les évolutions les plus fortes ont lieu. Entre 1880 et 1976, le nombre d'intersections double. Entre 1976 et 2008, le nombre d'intersections a diminué de 7. La

diminution de la diversité des habitats n'est pas observée pour les autres sections. C'est au niveau de l'envergure du delta (sections 5 et 6) que les changements les plus flagrants ont lieu puisque les chenaux risquent de ne plus être alimentés car trop éloignés du lit mineur. La section 6 suit une évolution un peu différente : elle suit la section 5 mais le nombre de ses intersections augmente à partir de 1985 au lieu de diminuer comme pour la section 5. Le nombre de chenaux à ce niveau augmente de 3 jusqu'en 2008, où il va redescendre de 3 jusqu'en 2017. Il serait possible que les phénomènes conduisant à la diminution de la diversité des habitats pour la section 5 se produisent avec du retard pour la section 6 comme la stabilisation des bancs par exemple. En effet, la section 6 se situe au niveau des aménagements de rectification du lit principal, entraînant ainsi un dédoublement du chenal contrairement à la section 5.

Au niveau de la section 1, il y a une diminution de la diversité des habitats entre 1880 et 1954, pouvant indiquer un retrait des chenaux secondaires plus vers l'aval. Pour les autres sections les tendances sont moins exceptionnelles, et suivent un cours assez régulier au cours du temps. Il faut remarquer que par rapport à 1880, les modifications pour chaque section comme pour la section 5 ne sont pas trop importantes : le nombre de chenaux diminue ou augmente de 2 environ.

Pour résumer, les changements principaux ont lieu au niveau de l'envergure du delta, liés à la largeur importante définie par les chenaux susceptibles de ne plus être alimentés en fonction des changements morphologiques du delta. En effet, il a été observé sur les cartes que les chenaux se déconnectent, créant ainsi une multiplicité de plus petites surfaces en eau. Enfin, la diversité moyenne à l'échelle du delta évolue le plus rapidement entre 1970 et 1995, période où le delta voit sa morphologie évoluer assez rapidement.

### 3. Analyse des zones de forêts denses humides

Il est difficile de repérer les zones de mangrove sur les images aériennes en raison de la qualité parfois insuffisante des images, et de l'incertitude liée à l'interprétation visuelle d'images prises verticalement. La mangrove est donc assimilée à la classe forêt dense humide. Cette catégorie de végétation se différencie sur les images par une densité plus importante que les autres formations végétales telles que le maquis, par exemple. Elle apparaît également plus sombre.

Afin de comparer les cartes et décrire l'évolution des zones de forêt dense, les zones digitalisées sont représentées sur leur carte ou image aérienne d'origine. Cela permet en effet de mieux visualiser l'espace dans lequel la forêt s'inscrit. Sur un fond d'image toujours identique, les zones de forêt dense se confondrait avec d'autres formations végétales et la carte serait donc moins lisible.

Les surfaces des zones de palétuviers pour la carte ancienne, et de la forêt dense humide sont calculées de la même façon que les zones en eau précédemment. Les résultats sont présentés sur la Figure 49.

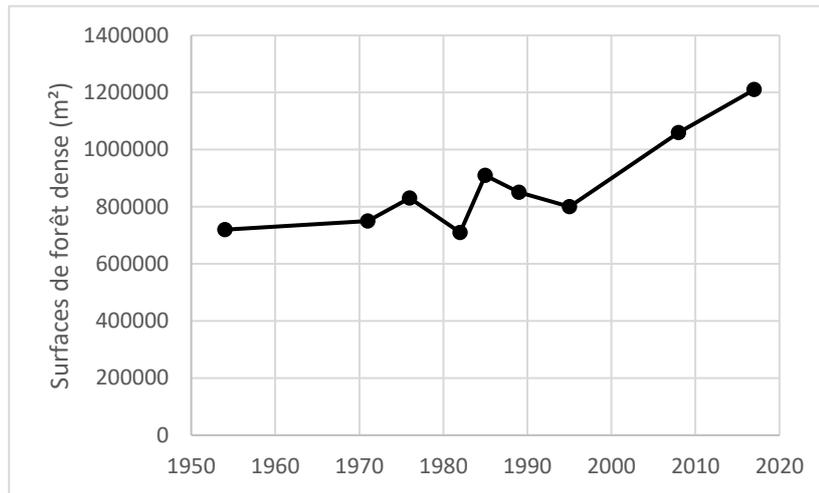


Figure 49: Surface des zones de palétuviers et de forêt dense humide

Il s'agit d'avoir le regard critique sur ces résultats : il est fort probable que les palétuviers ne correspondent pas entièrement aux zones de forêt dense, sous-estimant ainsi la surface de la forêt dense en 1880, et rendant donc impossible la comparaison des surfaces entre 1880 et les autres dates. En effet, la surface des palétuviers de 1880 environ est inférieure au minimum de la série de surfaces extraites des photos aériennes. L'ordre de grandeur de 1880 n'est cependant pas incohérent par rapport aux autres valeurs.

Il semble que les surfaces varient légèrement, décroissant et augmentant successivement. Il est intéressant de remarquer qu'entre des dates rapprochées, les surfaces de forêt semblent avoir varié assez fortement par rapport aux écarts de surface entre des périodes plus longues, comme entre 1954 et 1971. Entre 1971 et 1976 la surface a augmenté de 80000 m<sup>2</sup> et entre 1976 et 1982, la surface a de 120000 m<sup>2</sup>. Il semble y avoir une augmentation des surfaces de forêt dense humide dès 1995. La tendance générale qui se dégage de ces valeurs est l'augmentation des surfaces de 1954 à 2017, atteignant un pic en 2017.

Les plus grandes vitesses sont observées globalement entre 1976 et 2017, avec un pic entre 1982 et 1985 de 66667 m<sup>2</sup>/an.

Maintenant qu'il est plus évident que la forêt dense humide s'est étalée un peu plus au cours du temps, il serait intéressant d'observer les endroits où elle a pu s'établir préférentiellement (planche zones de forêt dense).

Dans un premier temps, la carte représentative de 1880 est commentée (Figure 50). Les palétuviers représentés sont reportés sur la carte d'origine en tant que tels ; il n'y a aucune interprétation de la carte ancienne. Le figuré est sous forme de tirets et l'inscription correspondante est « pal ».



Figure 50: Zones de palétuviers sur la carte ancienne de 1880 environ

Les patches de mangrove se situent près des zones en eau. Certains se sont cependant établis plus à l'intérieur des terres, formant des sortes d'arcs longilignes pouvant faire penser à d'anciens chenaux. Les palétuviers se reproduisent grâce à leurs fruits dans lesquels se développe leur appareil racinaire, dans la propagule. Ils sont dispersés par l'eau environnante : par les marées, les courants ou les flux estuariens. A marée basse, les fruits tombent simplement dans la vase et s'enracinent rapidement. (Fromard, Michaud, et Hossaert-McKey 2018). Les anciens chenaux de la Thio entrant dans les terres ont donc pu propager les palétuviers où ils se sont installés, la vase étant certainement propice. Il est de plus avancé que les palétuviers ont pu remplacer les chenaux présents sur la carte c4, ce qui peut expliquer la forme du patch de palétuviers sur la carte étudiée. Ces mêmes chenaux ont pu ensuite cesser d'être approvisionnés, pouvant indiquer une diminution de l'influence marine lors de l'époque précédant la période d'étude. Une autre hypothèse peut être le comblement de ces bras de la Thio par des sédiments, envasant progressivement la zone où la mangrove a pu s'établir préférentiellement. Enfin, il est également visible sur la carte et sur les photos aériennes suivantes que sur la zone d'étude, la mangrove n'est pas côtière comme on pourrait l'observer en Guyane par exemple. Le retrait de la mer et le substrat ne sont certainement pas favorables à l'installation de la mangrove sur le bord de mer. La Figure 51 situe les éléments dont l'évolution va être décrite.



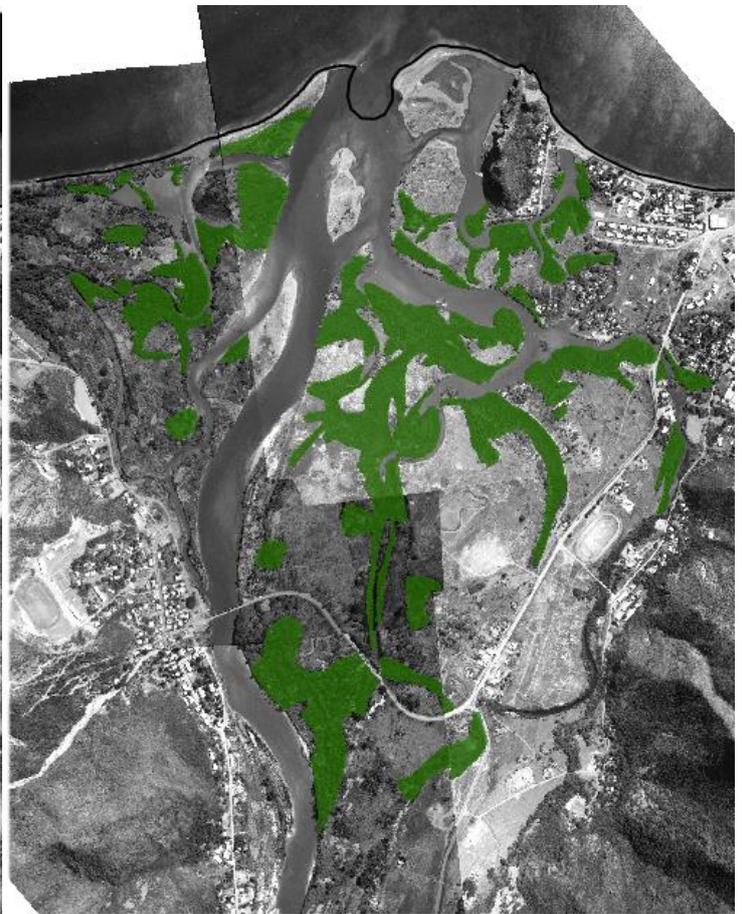
1954



1971



1976



1982



1985



1989



1995



2008



2017

0 575 Mètres



*Evolution des zones de forêt dense sur le delta, entre 1954 et 2008*

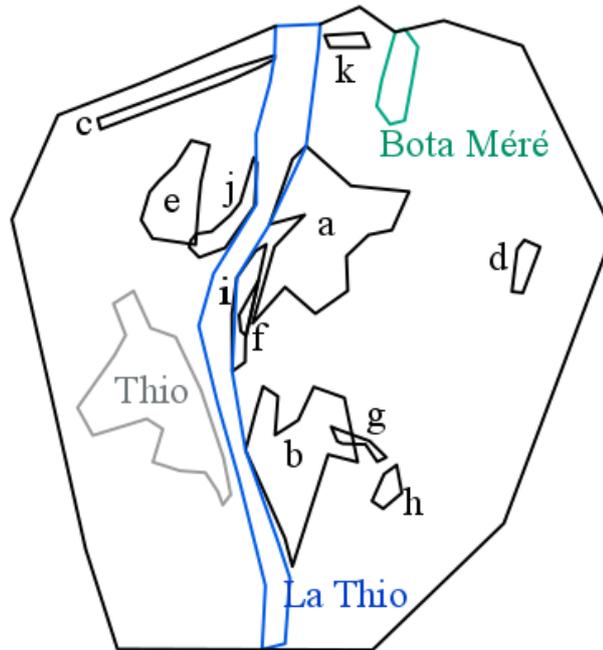


Figure 51: Schéma du delta avec ses formations de forêt dense humide

Les zones sombres et denses pouvant se rapporter à la forêt dense de la partie externe du delta à droite, n'ont pas été digitalisées car la résolution de certaines images comme celle de 1954 n'est pas suffisante pour distinguer les zones en eau des zones de forêt.

En 1954, il est observé que des patches de forêt sont présents près du trait de côte, mais ne bordent pas la mer. Ils sont situés derrière la plage de sable. Les zones de palétuviers présents près de Thio en 1880 ne semblent plus d'actualité en 1954. De plus, la zone située en bas du delta est couverte de formations végétales denses en 1954, formation qui n'est pas reportée en tant que palétuviers en 1880. Les autres zones de mangrove en 1880 semblent avoir évolué légèrement dans leur forme.

Il semble tout de même plus pertinent de décrire l'évolution de la forêt dense humide à partir de 1954 puisqu'il est délicat d'associer les palétuviers de 1880 avec les zones de forêt dense des photographies aériennes.

La formation **a** semble moins compacte en 1971 qu'en 1954. L'élément **b** semble s'être amoindri en surface. Cependant, en **g** une nouvelle formation s'est établie, suivant la forme d'un chenal en eau apparent en 1880. Elle était peut-être déjà présente en 1954 mais était trop étroite pour être repérée sur l'image aérienne. En **c**, la formation semble s'être agrandie et a progressé vers l'embouchure. Il y avait deux ensembles en **c** sur l'image de 1954, dont une qui ne se différencie plus assez en 1971. Des patches plus importants se forment sur la droite du delta, en **d**.

En 1976, la formation **a** semble épaissir de nouveau. Le patch en **e** se densifie également. Un nouvel élément signalé par la lettre **f** se forme le long de la Thio également.

En 1982, les éléments **c** et **f** semblent absents sur l'image aérienne, en comparaison avec celle de 1976. Globalement, les zones de forêt n'ont pas évolué ostensiblement.

A partir de 1985, toutes les formations s'épaississent et prennent de l'ampleur. En 1989, la partie gauche de l'élément **c** semble avoir rapetissé, ce qui peut être un effet de la qualité d'image.

Entre 1989 et 1995, c'est l'élément *e* qui semble avoir pris le plus d'ampleur, ainsi que la formation *b*. Quelques bancs proches du chenal principal de la rivière en *i* notamment, se végétalisent petit à petit. Globalement, les surfaces de forêt semblent s'être agrandies.

En 2008, le processus semble avoir progressé : la formation *f* a remonté le long de la Thio, et s'est installée sur le banc en *i*. Il est observé le même phénomène sur la rive gauche, sur le banc en *j*. Les forêts s'étalent plus près de Thio-Village. Les zones de forêt se sont également étalées près du trait de côte en *k*.

En 2017, les formations en *e* ont changé de morphologie en semblant se regrouper. Le patch en *k* s'est également agrandi.

Pour synthétiser, les grandes zones de forêt dense sur le delta n'ont pas évolué de manière exceptionnelle depuis 1954, aux dates pour lesquelles de la donnée est disponible. La morphologie de certains patches de forêt a pu évoluer, mais l'incertitude liée à l'interprétation d'images de qualité variée, peut entraîner des erreurs de digitalisation pouvant fausser l'analyse de l'évolution des formations de forêt dense. Ce qui est cependant à noter et peut révéler un changement de morphologie du delta constitue la végétalisation de bancs à partir des années 80-90. Cela peut donc être un indicateur d'avancée de sédiments vers le trait de côte à partir de 1976, et pourrait être le signe d'une progradation.

#### 4. Analyse de la végétalisation des bancs

La végétation peut apporter des éléments afin de caractériser l'évolution des bancs. En effet, des bancs se forment au cours du temps sur le delta, ou se déplacent. Si de la végétation s'y installe, c'est que le banc est stabilisé et qu'il ne sera plus considéré comme faisant partie de la bande active.

Sur la zone, des bancs sont identifiés (Figure 52). Les éléments sont visibles sur la planche représentant l'évolution de la forêt dense.

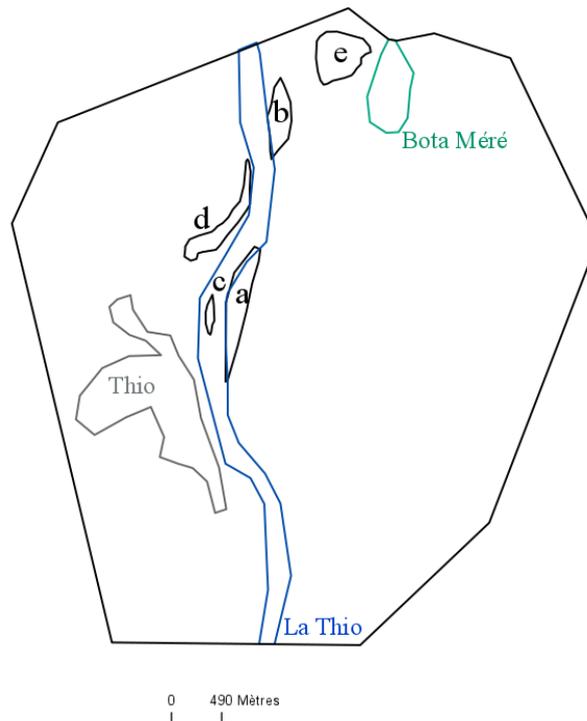


Figure 52: Schéma des bancs analysés

Le banc **a** est déjà présent sur l'image aérienne de 1954. A cette date, il est au tout début de sa formation. Il n'est donc pas végétalisé. A cette même date le banc **b** semble récemment formé, de par l'absence de végétation et sa couleur très claire par rapports aux autres bancs. Les autres éléments ne sont pas encore visibles.

En 1971, l'élément **a** s'est agrandi et de la végétation s'est un peu installée. L'élément **b** semble s'être stabilisé, de la végétation parait établie.

En 1976, le banc **a** ne semble pas avoir beaucoup évolué, mais des dépôts blancs de sables s'accumulent autour. C'est à cette date que le banc **c** apparait pour la première fois. Il est en cours de formation, des dépôts blancs sont visibles sur la gauche du banc **a**. L'élément **e** est en formation : une masse de sédiments se crée près du trait de côte qui a avancé. L'élément **b** semble avoir progressé vers l'aval et sa morphologie est modifiée, adoptant une forme suivant la direction de l'écoulement. La végétation est cependant toujours présente.

En 1982, le banc **a** semble en effet avoir gagné en surface, probablement de par les dépôts proches observés en 1976. La végétation ne semble avoir régressé, puisque les bosquets sombres observés en 1976 n'apparaissent plus sur l'image de 1982. Cela peut être dû à la qualité de l'image, mais la différence semble tout de même bien marquée. Les dépôts de sable associés au banc **c** ne sont plus visibles qu'en transparence. Cela peut être dû à une période de plus hautes eaux de la Thio par rapport à l'image de 1976, et serait donc à relier avec les surfaces en eau calculées. Le banc **e** amorce un début de formation, associée à l'avancée du trait de côte vers la pointe du Bota Méré à cette période. L'élément **b** présente une morphologie peut être plus précise et dessinée que sur l'image précédente. Une strate arbustive semble encore présente, mais peu développée en hauteur. Le banc **e** continue sa formation et a progressé vers le lagon. Quelques éléments de végétation sont discernables mais la qualité de l'image ne suffit pas pour la description de son étalement.

En 1985, le banc **a** ne semble plus avoir évolué. Le banc **c** a réapparu mais ses contours ne sont pas encore bien définis. Le banc **b** est situé au même endroit. Cependant des aménagements ont été réalisés à son niveau. Ainsi, des enrochements sont présents à son amont et à l'aval et sont raccordés au banc **b**, assurant sa stabilité. Le banc **e** a encore changé de morphologie. Ces éléments indiquent une dynamique rapide sur cette zone.

En 1989, les changements par rapport à 1985 ne sont pas flagrants ; le seul élément ayant évolué est le banc **e**, qui s'est agrandi vers le lagon.

En 1995, le banc **c** n'a pas encore de contours bien dessinés et indiquant une formation stable. La végétation ne s'est pas plus étalée sur les autres éléments. Le banc **b** est toujours présent, mais sa végétation reste basse. Des enrochements supplémentaires sont présents sur l'image de 1995. Ils longent le banc **b** et rendent le lit principal rectiligne. Le banc **e** semble avoir atteint sa forme finale dans l'ensemble. Quelques éléments de végétation sont présents et du même état que le banc **b**.

En 2008, les changements sont flagrants : la végétation a poussé jusqu'à la moitié du banc **e**. Elle a également progressé sur le banc **a** qui forme à cette date une continuité avec la rive à laquelle il est fixé. De la végétation a également poussé sur le banc **c**. Le banc est toujours présent et n'a pas vraiment évolué. La végétation basse est plus visible sur cette image. Quelques bosquets sont présents mais la végétation ne semble pas y être très épanouie.

En 2017, le banc **b** n'a pas vraiment évolué, mais des bosquets supplémentaires sont apparus. Le banc **c** voit sa surface recouverte de végétation jusqu'à ses bordures. Les bancs **a** et **e** ne semblent pas avoir évolué.

L'élément **d** est décrit à part puisqu'il semble se former à partir de deux autres bancs déjà présents. Il n'apparaît en un seul bloc qu'à partir de 1982. En 1954, deux bancs sont présents mais sont situés au milieu du lit principal. Ils semblent déjà un peu végétalisés, du moins sur leur partie centrale. En 1971, leur morphologie a un peu évolué, tout en se rapprochant de la rive gauche. Ils semblent également s'allonger. C'est en 1976 que les deux bancs s'assemblent. Ils sont encore végétalisés. En 1982, les bancs semblent encore s'allonger et également rétrécir en largeur. Il ne semble pas y avoir d'évolution flagrante entre 1982 et 1985. La végétation s'intensifie avec des bosquets jusqu'à 1989. En 1995, il apparaît que le banc se dissocie au niveau de la tranche la plus fine. Il s'agit d'une situation de concavité où il est probable que l'énergie de la rivière érode le banc **d**. En 2008, des enrochements sont présents au même endroit, montrant ainsi l'érodabilité de la zone. Les bancs se sont végétalisés complètement et des éléments de nature anthropique sont présents sur le banc le plus proche du village, pour assurer la stabilité. En 2017 le deuxième banc semble s'être encore allongé et garde sa végétation sur toute sa surface. Il est visible à partir de 1995 que la partie la plus aval du banc adopte une forme rectiligne par rapport à la rive droite, créant même un virage conducteur de la rivière.

Des dépôts apparaissent à l'amont du pont de Thio à partir de 1985 et sont visibles jusqu'en 1995.

En résumé, c'est à partir des années 70 que des bancs qui n'étaient pas encore formés commencent à se constituer. Certains déjà présents commencent à se végétaliser. L'évolution s'accélère dans les années 80, surtout au niveau des aménagements et de la côte. A cette époque, la végétation présente sur les bancs reste basse et peu dense. A partir des années 90, la morphologie des bancs n'évolue plus, c'est à partir de 1995 que la végétation se densifie de manière spectaculaire, jusqu'à recouvrir les éléments cités.

La référence prise est de nouveau le ratio de bancs nus de 1880. Cependant, les bancs étudiés par la suite ne sont pas semblables à ceux présents pour les années suivantes. Il est à noter que l'évolution du banc *d* est prise en compte dans le calcul des longueurs : ses deux parties sont incluses dans la sommation, puis la partie la plus à l'amont se stabilise (cf partie précédente).

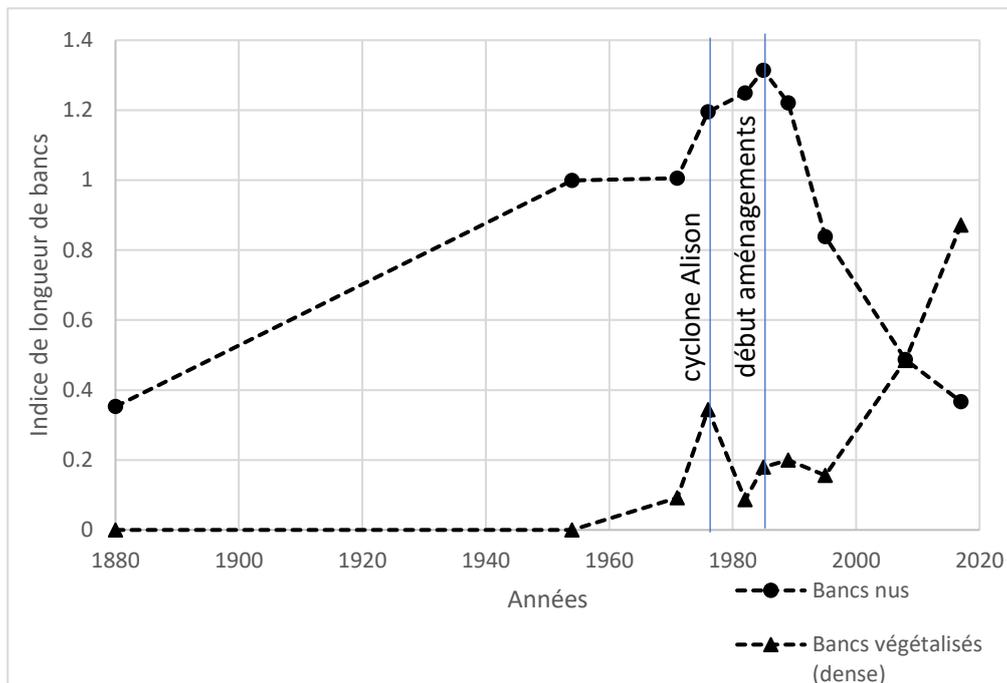


Figure 53: Evolution de la proportion de bancs nus et bancs végétalisés, sur la longueur de la zone

La Figure 53 montre une évolution importante de la proportion en bancs nus entre 1880 et 1954, puisqu'elle a presque triplé. L'indice reste le même entre 1954 et 1971. Il augmente de 20 % jusqu'à 1976 et de 30 % jusqu'en 1982. Il redescend à 1 en 1985, ce qui est sûrement lié au fait que le banc *c* n'est pas visible sur l'image aérienne de 1982 et apparaît de nouveau sur l'image de 1985. La proportion de la longueur de bancs nus diminue ensuite rapidement passant de 1.2 à 0.8 environ de 1989 à 95. En 2017, le ratio approche 0.4. Cette diminution rapide du ratio est à relier à la végétalisation des bancs précédemment formés, autour des années 80-90.

En ce qui concerne la végétalisation des bancs, celle-ci semble assez active à partir des années 70-80, et explose entre 1995 et 2017. Avant, la végétation est absente sur les bancs et semble augmenter de 0.1 entre 1954 et 1971. Un pic est observé en 1976, lié à de la végétation présumée sur le banc *a*. Ensuite les bancs semblent se végétaliser un peu, sans pourtant affirmer une tendance particulière. Entre 1995 et 2017, le ratio de végétalisation des bancs sur la longueur de la zone est multiplié par 18, indiquant une installation de la végétation (arborée ?) sur les bancs précédemment formés.

Les photographies ou cartes postales peuvent être utilisées pour vérifier les états de végétalisation du delta, et plus particulièrement des bancs. De nombreuses prises de vue sont effectuées depuis le village de Thio, permettant ainsi d'avoir une vue globale de l'embouchure (Figure 54 et Figure 55).



Figure 54: Panorama de l'embouchure de la Thio, située après 1980

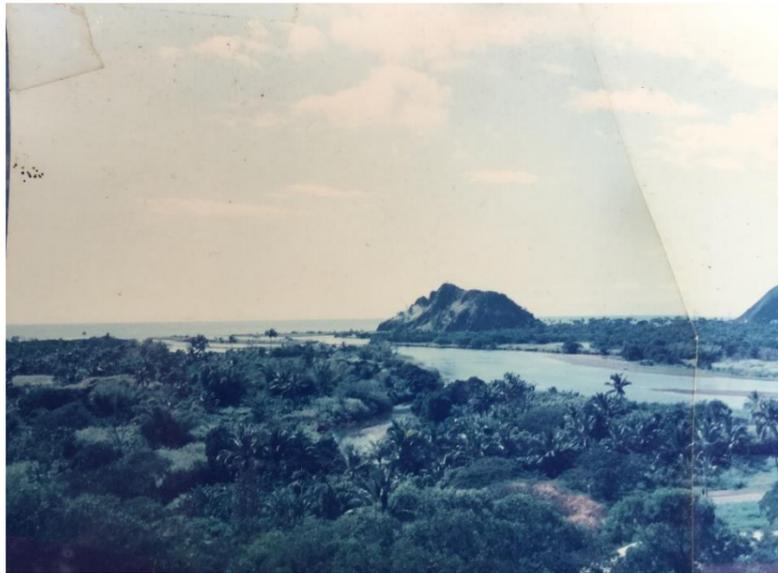


Figure 55: Panorama d'une partie du delta en 1992



Figure 56: Photographie du delta de la Thio, 2015, ON

Sur la Figure 54, on observe les éléments dont l'évolution est décrite précédemment : l'élément **c** en formation, avec très peu de végétation, l'élément **a** déjà bien végétalisé avec des dépôts supplémentaires, le banc **d** en phase de stabilisation de par les aménagements et la végétation présente. Le banc **e** est moins visible car la photo est oblique mais il semble également présent avec un peu de végétation. La photo apporte une appréciation supplémentaire sur le type de végétation. L'élément **a** paraît en effet être plus végétalisé avec une strate plus haute et plus dense que ce que l'on peut observer sur l'image aérienne de 1982.

La Figure 55 montre un état du delta qui semble bien plus végétalisé. L'angle différent par rapport à la figure précédente peut induire en erreur, mais il semble tout de même que le banc **a** ait achevé sa formation et soit végétalisé. Le banc **c** paraît agrandi avec des éléments de végétation supplémentaires. Le reste est difficilement identifiable.

La figure 57 montre le delta en 2015, rendant compte d'un état de végétalisation plus avancé qu'en 1980 et se rapprochant des analyses effectuées précédemment. Le banc **c** est particulièrement visible, puisqu'il se situe au milieu du chenal principal et présente de la végétation dense.



Figure 57: Photographie de l'embouchure de la Thio datant de 1878

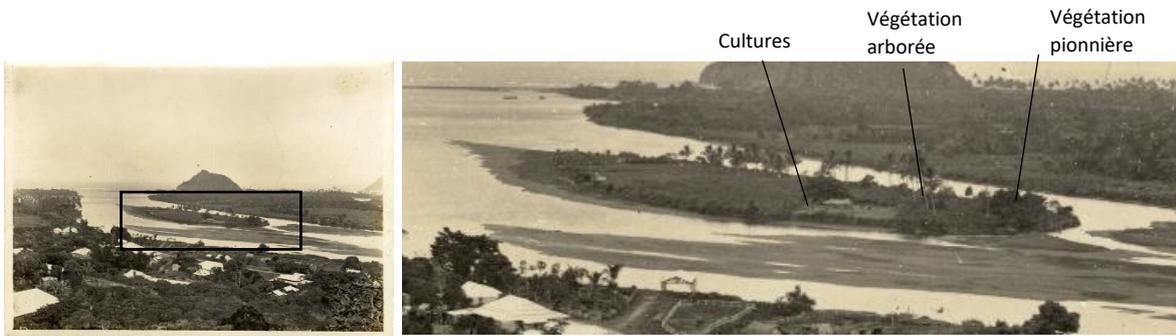
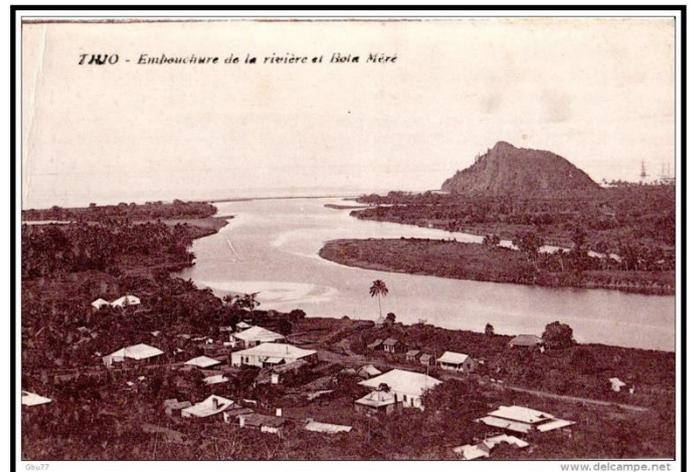


Figure 58: Carte postale de la fin du XIXe siècle. Source: Delcampe

La Figure 57 montre que les bancs présents semblent en partie végétalisés par une strate assez basse. De la végétation est présente sur les bancs principaux. De la même façon, la Figure 58 présente un état du delta avec un banc principal qui semble bien stable, par le fait que de la végétation arborée est présente sur sa surface. Des cultures sont également observées témoignant encore de la confiance que portent les populations dans la stabilité de ce banc. Sur la Figure 59, les bancs principaux se sont modifiés ou ont même disparu. Ils sont également végétalisés. La végétation semble arborée et relativement haute. Elle ne semble pas couvrir tout le banc en 1913, et paraît plus étalée en 1920. Ainsi, l'évolution de la végétation semble assez cyclique entre 1880 et 1920, alternant entre formation nouvelle et végétalisation, comme ce qui est observé sur les images aériennes.



1913



1920

Figure 59: cartes postales du début du XXe siècle

## V. Lien entre l'évolution du delta et les forçages anthropiques et hydrométéorologiques.

### 1. Rappel des forçages

La Figure 60 montre l'évolution du tonnage de stériles en décharge au cours du temps. La courbe du volume cumulé maximal montre que le tonnage de stériles en 1975 est 10 fois plus grand que celui observé en 1954 sur le bassin de la Thio. Cela correspond aux débuts de mécanisation dans la prospection et l'exploitation minière. Une réglementation interdisant la mise en décharge a été instaurée en 1975, expliquant la stabilisation de la courbe. Un pic particulièrement important a eu lieu à la fin des années 50, correspondant probablement à l'encouragement à utiliser des techniques de prospection mécanisées, augmentant ainsi encore le rendement.

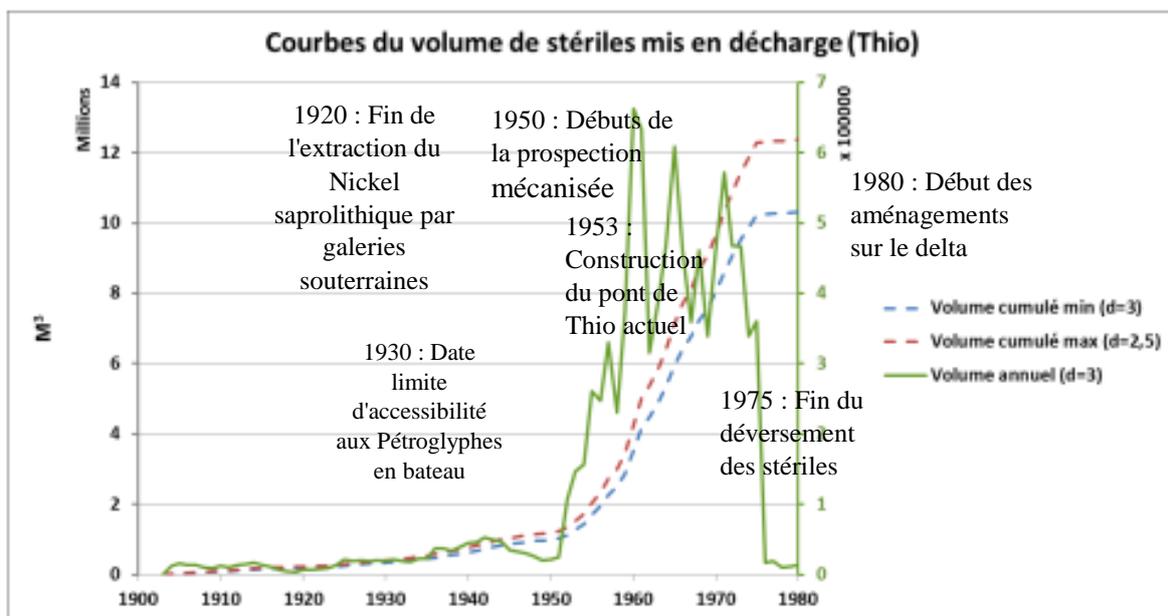


Figure 60: Evaluation du volume de stériles mis en décharge. Source : (Garcin 2017)

La Figure 6 montre les pistes ouvertes sur les montagnes du bassin versant, permettant d'observer une vulnérabilité à l'érosion. On peut donc en déduire que tout au long de l'exploitation minière, des sédiments fins sont mobilisables par l'eau ruisselante.

En présence d'événements pluvieux forts, les pics de crue peuvent transporter les sédiments stockés dans les décharges. Les creeks ont l'énergie suffisante pour transporter les plus gros rochers et graviers, et la Thio transporte des fines continuellement, avec un débit solide qui dépend des crues.

### 2. Eléments d'analyse de la période de 1880 à 1954

De 1880 à 1954, les crues ne sont pas estimées. Mais des indicateurs peuvent être reliés entre eux. Entre ces deux dates, la surface des zones en eau diminue, le trait de côte avance au niveau du transect 2 et la proportion de bancs augmente. Tout cela peut être lié à la disparition de l'embouchure de la Thio à gauche, et à une sédimentation au niveau de l'embouchure.

La Figure 59 présente des clichés disponibles pour la période.

Des éléments peuvent aider à percevoir l'évolution du delta entre 1880 et 1954, du moins partiellement. Des cartes postales notamment peuvent être des supports utiles.

Tout d'abord, il semble que les surfaces en eau soient plus importantes en 1913 qu'en 1920. En effet, le bras s'éloignant sur la gauche du bassin est en eau en 1913 alors que des dépôts de sédiments sont visibles à ce niveau en 1920. Cela peut aussi être lié à un état de marée différent entre les deux clichés. De plus, un cordon est visible au loin au niveau de l'embouchure en 1920 et des dépôts sont présents sur un chenal à droite. Le lit de la Thio semble plus large au niveau du village. A cette époque, il semble que l'embouchure soit unique.

Sur les deux clichés, un banc principal est présent au milieu du chenal principal. Il est végétalisé dans les deux cas. Mais en 1920, le banc semble plus épais.

La Figure 57 est située proche de 1878. Elle peut apporter des éléments de comparaison avec la carte de 1880. Les deux embouchures de la Thio sont bien présentes. Le banc central proche de la côte est également un élément que l'on retrouve. Sa forme n'est cependant pas descriptible puisque le caractère oblique de la carte distend les éléments. Un cordon semble apparaître à l'arrière-plan, ce qui peut se rapporter aux dépôts de sable observés sur la carte. Le banc de sable en face de Thio est également identifiable. La forme caractéristique de la pointe du banc n'est pas exactement la même que sur la carte : la pointe sur les cartes semble submergée, ce qui peut être dû à une marée au moment de la prise de la photographie. En ce qui concerne les zones de mangrove, aux endroits où elle est représentée sur la carte se trouvent sur la carte postale des zones de végétation dense et sombre. En face de Thio Village, sur la rive droite, les zones où les palétuviers bordent la Thio sont bien identifiables, sous forme de formations sombres. Les zones sur la gauche du village sont moins identifiables, de par l'angle de vue de la photographie. Près du Bota Méré, la mer semble en effet rentrer plus dans les terres.

Enfin, l'analyse de la végétation sur les bancs de la fin du XIXe siècle peut laisser penser que le système non endigué s'auto-ajuste naturellement, probablement en lien avec l'activité cyclonique et « nettoie » la végétation arborée qui devient alors vulnérable aux forces tractrices.

Les changements entre les deux périodes (pré-industrielle et post-industrielle) semblent très importants (embouchure, bancs principaux, position du trait de côte...). Cela témoigne de modifications importantes du régime hydrosédimentaire entre 1880 environ et le début du XXe siècle. Cependant, on peut observer que le cordon présent en 1920 semble plus présent sur la partie gauche de l'embouchure. On peut émettre l'hypothèse que l'embouchure de gauche présente en 1880 ait disparu de par une sédimentation plus active à son niveau. Cela peut se vérifier si les courants principaux n'ont pas changé d'orientation au cours du temps : les sédiments arrivant en plus grand débit à cette époque au niveau du lagon ont pu être ramenés dans le sens du courant vers la côte et sédimenter au niveau de l'ancienne embouchure. De plus, sur le cliché de 1913, le bras qui part vers la Dothio à gauche semble rejoindre la mer, pouvant laisser penser que le banc situé au niveau de l'embouchure s'est déplacé à gauche. Les sédiments ramenés par les courants ont pu se déposer autour du banc initial.



*Figure 61: Cliché de l'embouchure, avec une date estimée précédant 1898*

La Figure 61 montre l'embouchure vers la fin du XIXe siècle. La métamorphose au niveau de l'embouchure est plus visible : le banc au milieu du chenal et de l'embouchure présent en 1880 est visible également, mais avec plus de dépôts autour. Des sédiments se sont en effet déposés devant le banc face au lagon, et le cordon présent en 1878 semble se prolonger sur la gauche. Cela peut confirmer l'hypothèse d'une sédimentation sur la gauche de l'embouchure, les sédiments étant ramenés par les courants.

1930 est l'année marquant la fin de l'accessibilité aux Pétroglyphes en bateau. (Allenbach 2002) Cette information montre donc un engravement présent déjà à cette époque, qui a pu se dérouler au vu des clichés précédents dès le début du XXe siècle.

De plus, on remarque sur des cartes anciennes (Figure 62) des indications de laisses de crue.

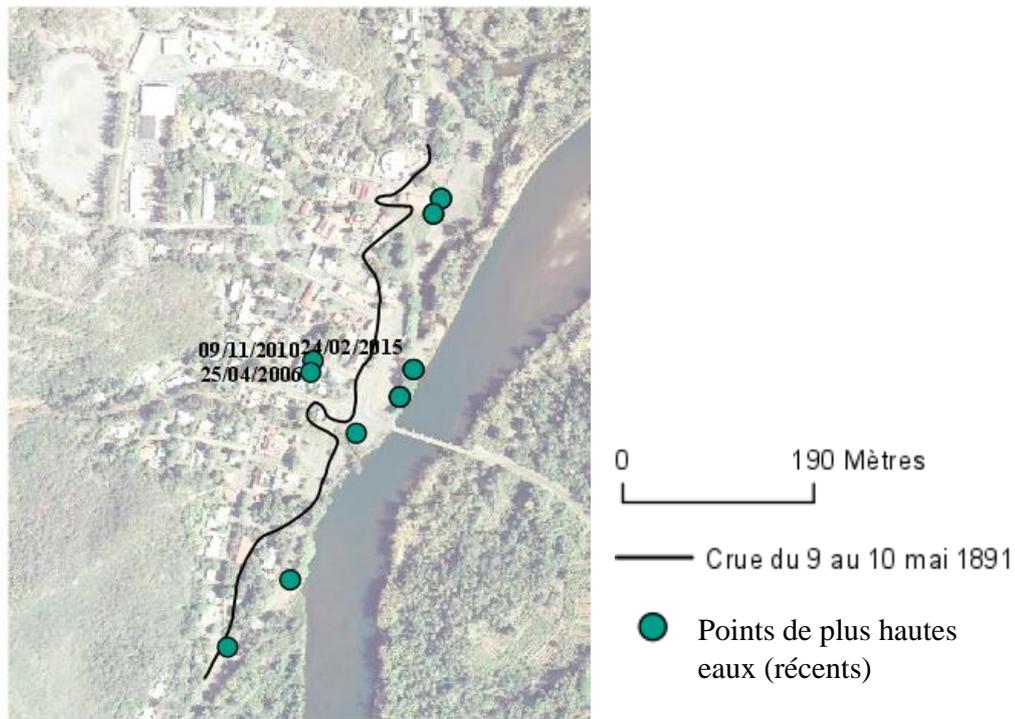


Figure 62: Comparaison des points de plus hautes eaux (récents) avec la ligne de crue de 1891

La Figure 62 montre la crue durant l'événement du 9 au 10 mai 1891. Cela indique que les inondations historiques ont aussi touché le village de Thio même avec un lit plus large et avant l'exploitation minière. Il est cependant difficile de conclure puisque que les pluies de cet épisode ne sont pas connues.

Cela montre des changements également autour du XIXe siècle au niveau du delta.

Des cyclones ayant causé des dégâts importants se sont abattus sur la Nouvelle-Calédonie à cette période. En 1909 notamment, le cyclone des 12 et 13 février a coulé la Joliette, un navire transportant des minerais. Il a également brisé le pont submersible de Thio. De tels événements ont pu générer des pics de crue importants, susceptibles de transporter les sédiments plus loin en aval sur le delta et générer ainsi des bancs supplémentaires et une sédimentation plus active au niveau de l'embouchure. De plus, cela correspond aux débuts de l'exploitation du nickel, pouvant favoriser l'érosion au niveau des mines et versants.

### 3. De 1954 à l'actuel

Entre 1954 et 1971, des changements commencent à être observés particulièrement au niveau du trait de côte, transect 2 (Figure 63). La proportion de bancs nus a un peu augmenté également. Cela témoigne d'une période de sédimentation plus active. C'est en effet les débuts de l'exploitation mécanisée. De plus, les événements à pics de crue intermédiaire ont lieu fréquemment à partir de 1952, avec une occurrence de 6 événements en 1953.

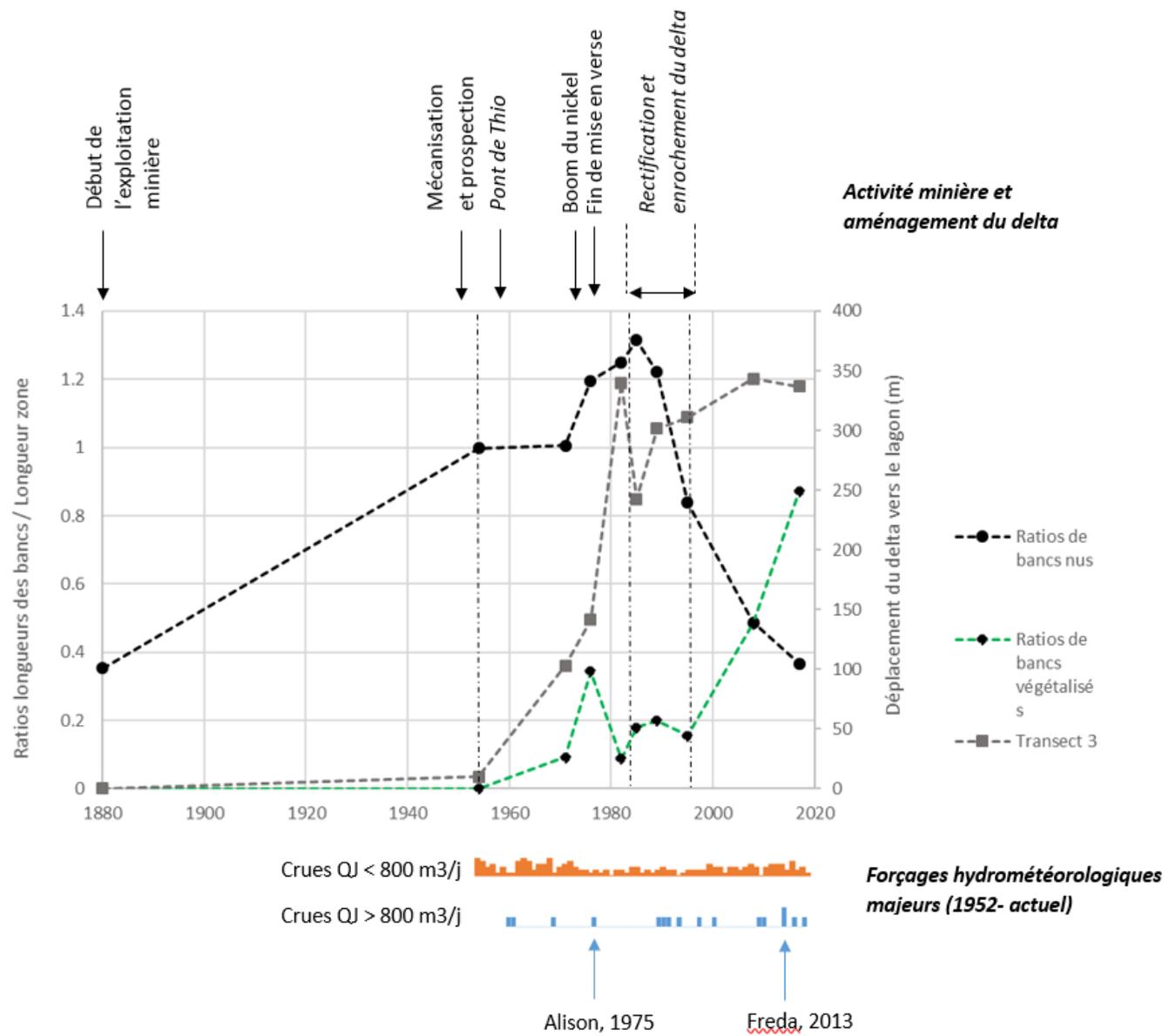


Figure 63: Figure récapitulative de l'évolution d'indicateurs et des forçages associés de 1880 à 2017

C'est entre 1974 et 1975, et entre 1987 et 1990 qu'ont eu lieu des événements avec une forte intensité (Figure 63), susceptibles de mobiliser les premiers l'importante masse de sédiments provenant des stériles mis en décharge lors des années précédentes. Cela a pu générer d'importants débits solides. De plus, c'est Alison, en 1975, qui aurait pu lessiver le premier tous les stériles et les sédiments fins associés stockés sur les versants du bassin et les atterrissements le long de la Thio. Des témoignages avancent que des épaisseurs de 50 cm à un mètre de boue rouge se sont déposés de Saint Michel à l'estuaire de la Thio. Un tel événement ne s'est plus reproduit par la suite (témoignage d'un habitant de la Tribu de Saint Michel, n.d.). Cela expliquerait la progradation très rapide du delta de 25 m entre 1976 à 1982.

De 1971 à 1976, les surfaces en eau diminuent largement, ce qui peut être lié au cyclone Alison, diminuant la bande active de par des dépôts de sédiments. En effet, la proportion de bancs nus augmente entre 1971 et 1976. De plus, la multiplicité des chenaux augmente entre 1880 et 1976, ce qui est probablement lié à la création de bancs nus (Figure 63), décuplant les chenaux.

Le cyclone Alison de 1975 a probablement apporté beaucoup de sédiment au delta, mais l'influence très forte de l'érosion maritime lors du passage du cyclone (vent, vague, marée et passage dépressionnaire) a probablement érodé le banc formé et pas encore bien installé et a aidé au transfert des sédiments terrigènes vers le large.

La Figure 63 montre qu'entre 1976 et 1982, la longueur relative des bancs nus augmente en même temps que la progression rapide du trait de côte. C'est en effet sur cette période qu'ont lieu les changements les plus rapides induits par une arrivée de sédiments rapide et un dépôt important dans le delta. Cela peut correspondre aux observations par la population, qui témoigne d'un engravement à partir des années 70 environ (Allenbach, 2002)

De 76 à 82, aucun événement au-dessus du seuil supérieur  $QJ > 800 \text{ m}^3/\text{s}$  n'est observé (Figure 63) indiquant donc une absence de forçage climatique majeur pouvant potentiellement entraîner de forts pics de crue. Cependant, les événements d'intensité faible et moyenne ont pu générer des débits pouvant mobiliser des sédiments fins en quantité et continuer à alimenter le delta en sédiments. Il est possible qu'Alison ait mobilisé d'importantes quantités de sédiments des mines, facilitant ensuite le transport solide pour des crues plus faibles.

De 82 à 85, il est observé un recul moyen de 10 m environ du trait de côte. Ce recul est observé sur la rive droite du delta. L'apport de sédiments semble être en effet bloqué par des enrochements sur l'image de 1985 (Figure 64). Ils rendent le lit rectiligne et sont implantés de part-et-d'autre du banc b. Ils semblent séparer le lit principal en deux chenaux distincts. Celui de droite semble presque coupé du lit principal, les enrochements bloquant l'écoulement vers la droite. On peut en déduire que les sédiments ne cheminent plus aussi bien sur le côté droit du delta. Les sédiments se déposent préférentiellement en rive gauche, comme pourrait le suggérer la forme de l'embouchure à droite en 1985. Une avancée de 20 m est toujours observable sur la rive gauche. Ainsi, une autre hypothèse est que l'orientation du chenal principal conduise les sédiments vers le lagon dans un direction Nord-Est, et que sous l'action des courants principaux, les sédiments soient ramenés vers la rive gauche. Le banc e est susceptible de ne plus être alimenté, et sous l'action du courant, la ligne de côte à droite peut se creuser et reculer.

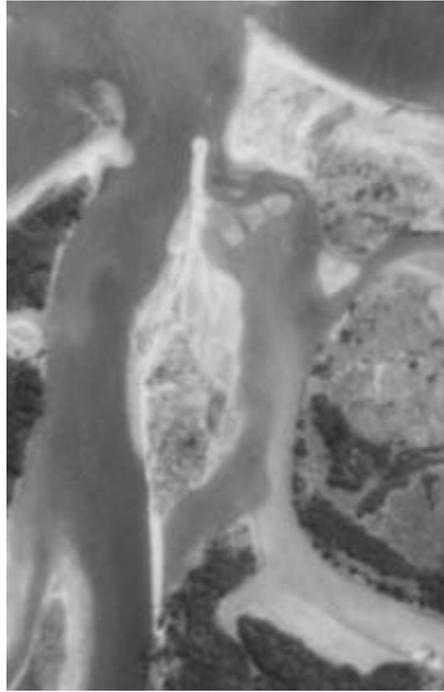


Figure 64 : Image aérienne de 1985 zoomée sur les premiers aménagements du lit de la Thio

L'occurrence des crues de classe intermédiaire susceptibles de transporter des sédiments sont relativement plus faibles sur la période de 1982 à 1985 (Figure 63). Un flux de sédiments est cependant toujours probable. Ce qui peut donc expliquer en majeure partie le recul léger au niveau de la rive droite est l'impact des aménagements effectués. Cependant, la longueur relative de bancs nus a encore légèrement augmenté, sans pour autant changer complètement.

D'autres changements rapides sur le delta se produisent entre 1985 et 1989. Sachant que d'autres événements forts ont lieu à partir de 1987, il se peut qu'une deuxième vague de transport important ait eu lieu. L'évolution intermédiaire sur cette période n'est pas connue, on ne peut donc pas conclure sur d'autres transformations entre 1985 et 1989. Les événements forts ont pu par la suite continuer à mobiliser l'importante masse de sédiments.

A partir de 1987, des crues fortes ont lieu de nouveau et parallèlement, le trait de côte a avancé de 15 m entre 1985 et 1989. Les fortes crues ont donc pu transporter les sédiments et les déposer en partie au niveau du trait de côte. Sur cette période, le trait de côte avance des deux côtés de l'embouchure. Une hypothèse serait que les sédiments sortent du domaine fluvial et sont conduits sur la droite de l'embouchure de sorte qu'ils se déposent sur la côte qui progresse le plus rapidement. Selon les courants principaux, les sédiments tout juste sortant sur le lagon devraient être ramenés en rive gauche. Cependant, si une crue est importante, la rivière peut conduire les sédiments plus en avant sur le lagon ; l'axe de l'embouchure étant légèrement en direction Nord-Ouest, les sédiments peuvent être ramenés vers la côte en rive droite sur un axe sud-Est. Cette hypothèse est retrouvée dans d'autres études qui viennent la vérifier (Leroux, 2009) (Allenbach, 2002) (Figure 65).

Parallèlement, la proportion de bancs nus semble se stabiliser. Des bancs végétalisés commencent à apparaître à cette période.

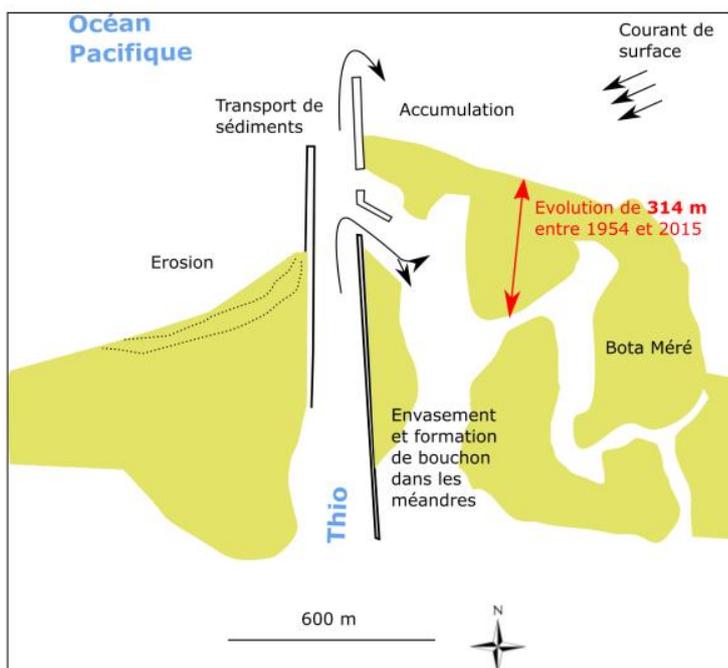


Figure 65: Schéma de situation et des processus de sédimentation au niveau de l'embouchure de la Thio (inspiré par Allenbach, Hoibian, 2002). Source : (Leroux 2009)

Pendant la période 89-95, le trait de côte continue d'avancer avec cependant des vitesses moins importantes. Quelques crues importantes sont observées, susceptibles de mobiliser du matériel sédimentaire, et d'expliquer la progression de la côte. En 1995, les aménagements ont encore évolué : la rive gauche présente des enrochements, et la rive droite subit une deuxième rectification rendant le lit encore plus et redressant l'axe du chenal vers le Nord (Figure 66).



Figure 66: Image aérienne de 1995 (gauche), 2008 (milieu) et 2017 (droite) avec un zoom sur les aménagements du lit de la Thio

La morphologie du lit principal peut donc conduire l'écoulement de façon plus rectiligne vers le lagon. Un cordon littoral est visible sur l'image de 1995, pouvant résulter de l'accumulation de sédiments au droit de l'écoulement, et ramenés vers l'embouchure par les courants.

Des digues sont brisées lors d'un événement en 2003. Les travaux d'aménagements sont ensuite repris.

La rectification est poursuivie jusqu'en 2008 où le chenal est encore avancé vers le lagon, avec une ouverture sur le côté gauche du lagon. Le prolongement doit permettre aux sédiments d'être acheminés plus en avant vers le lagon de sorte de ne pas s'accumuler au niveau des rives et de ne pas créer d'envasement dans les méandres de la Thio. Un passage est ouvert en rive droite créant un chenal où l'eau peut venir alimenter les chenaux secondaires du delta. Sur cette période, le trait de côte avance peu même sur la rive gauche, et aurait tendance à se stabiliser. Les aménagements peuvent être à l'origine du ralentissement de l'apport de sédiments en rive droite, qui auraient tendance à s'accumuler plus en avant du lagon et sur la gauche de l'embouchure. On peut observer sur l'orthophotographie de 2008 un flux de sédiments par transparence prenant une direction vers le Nord-Ouest. On peut également avancer que le transport solide est moins important, ou n'atteint plus aussi bien la côte comme avant. La masse cumulée de stériles en décharge semble se stabiliser à partir des années 80, même si ces sédiments restent présents et disponibles pour les crues. Si une partie des sédiments fins a déjà été lessivée lors des crues fortes précédentes, peut-être que le potentiel érosif a diminué. Le forçage météorologique quant à lui semble toujours présent avec une crue forte entre 2007 et 2008, et une occurrence de crues moyennes assez élevée (3 à 4 crues par an).

Le trait de côte s'est ensuite stabilisé, voire a même reculé un peu entre 2008 et 2017. La même dynamique continue, favorisée par les aménagements qui ont encore évolué entre ces deux dates, fixant les berges de la Thio encore plus en amont de l'embouchure. Une nouvelle ouverture est de plus présente sur la rive gauche au niveau du trait de côte naturel, et une deuxième ouverture est ouverte sur la rive droite. Sur l'image de 2017, des flux de sédiments sont visibles et semblent se diriger dans le lagon au droit de l'embouchure.

En comparant ces observations avec l'évolution des bancs nus et végétalisés (figure 52), il semble que la stabilisation des berges de la Thio sur les deux côtés du chenal va de pair avec la végétalisation des bancs. Malgré l'apparition d'événements forts en 1995, 1999, 2008 et d'autres récurrents en 2013, il semble que le delta se stabilise à partir de 1995 en grande partie grâce aux aménagements.

La multiplicité des chenaux au niveau des aménagements montre aussi leur impact. Après les aménagements, elle diminue au niveau de la section 5 (à l'amont des aménagements). Cela peut être lié au fait que l'influence marine n'est plus aussi importante qu'avant ou que l'eau de la Thio ne pénètre plus aussi facilement qu'avant. De plus, l'engravement a lieu également dans les chenaux secondaires, où des bouchons peuvent se créer (figure 55). Au niveau de la section 6 (au niveau des aménagements), le nombre de chenaux augmente puis se stabilise à partir de 1995, montrant la stabilité du delta après les aménagements.

En résumé, on peut distinguer 4 phases d'évolution du delta :

\* Phase 1 : une première phase pré-industrielle de 1880-1950 montrant une évolution lente des bancs nus et du processus de sédimentation mais significative;

\* Phase 2 : une phase industrielle de 1954-1980 qui montre une évolution très rapide de l'augmentation des atterrissements (bancs nus ; notamment après Alison) et une avancée très rapide du delta vers le lagon ;

\* Phase 3 : c'est une phase de stabilisation du delta et des formes en lien avec les aménagements du delta et potentiellement une réduction des apports terrigènes : 80-milieu des années 90; la végétation est présente mais contenue ;

\* Phase 4 : une phase de végétalisation très rapide des bancs nus de mi-90-actuel; les forts cyclones n'arrivent plus à enlever la végétation. Le delta a perdu sa capacité à s'auto-entretenir. C'est une hypothèse forte pouvant expliquer le risque accru d'inondation à partir de 2010 où la moitié des bancs se retrouve végétalisé (augmentation de la rugosité, envasement du delta lors des crues faibles ou fréquentes).

#### 4. Discussion autour des incertitudes

Cette étude propose une méthode d'analyse basée sur l'analyse diachronique de cartes et d'images aériennes, ainsi que sur l'interprétation de cartes postales et photographies anciennes. Cette méthode présente des limites par le fait que l'interprétation de l'occupation des sols notamment est subjective et peut entraîner des erreurs par rapport à la réalité. De plus, le matériel peut avoir une qualité qui peut induire en erreur, comme c'est le cas pour le trait de côte de 1954 notamment.

L'analyse des surfaces où la forêt dense s'est installée est également liée à une interprétation subjective. Il est donc difficile d'accorder une confiance totale aux cartes effectuées. Néanmoins, cette analyse semble convenir pour des zones plus restreintes et ciblées telles que les bancs. Une méthode de télédétection utilisant le spectre particulier de la mangrove pourrait être utilisée pour déterminer les surfaces de ce type de végétation grâce à des images infrarouges. Des indices de rougeur ou de cuirassement peuvent être utilisés (Leroux 2009) Dans tous les cas, il semble périlleux de remonter dans le temps au-delà des années 80 au vu du matériel disponible.

De plus, des incertitudes sont liées à la marée ou aux débits au moment de la prise de vue. En effet, si on prend l'exemple du trait de côte, celui-ci dépend de la force de la marée, puisque la référence prise pour le digitaliser et la limite des plus hautes eaux. De la même façon, les zones en eau pourront être digitalisées différemment en fonction du régime hydrologique sur l'image. Des zones de dépôts pourront être absentes à une date si à ce moment la marée est haute, ou si les débits de la Thio sont importants.

Ensuite, l'analyse des corrélations entre variables associées aux pluies montre que le débit maximal d'un événement et les indicateurs d'ENSO à plus grande échelle ne sont pas corrélés. Il n'est donc pas possible de reconstituer des chroniques de débits sur la période de 1903 à 1952. Le forçage météorologique et hydrologique n'a pu être déterminé sur cette période. Un traitement statistique plus poussé pourrait être déployé par la suite. Une analyse des indicateurs d'ENSO notamment pourrait être approfondie. Des analyses multivariées peuvent être également conduites afin de trouver d'autres relations pouvant aider à la reconstitution de périodes de pluies intenses par exemple, et de les appliquer aux données d'archive.

Il a été remarqué que l'évolution ne peut être analysée précisément sur les périodes entre 1880 et 1954, et entre deux images aériennes. De plus, il a été remarqué des changements très rapides, entre 1982 et 1985 par exemple, ce qui montre qu'une partie des modifications du delta est plus difficilement appréciable sur des périodes plus longues. Ainsi le jeu de données d'images aériennes ou de cartes pourrait être complété.

Sur la période 1880-1954 notamment, les cartes anciennes sont rares. Une recherche de ces données a été menée auprès du SHOM pour compléter les cartes anciennes par des cartes marines pouvant indiquer un état du delta intermédiaire, sans résultat probant. Des images aériennes à infrarouge à des dates intermédiaires pourraient être utilisées et sont potentiellement disponibles auprès de la DTSI.

## Conclusion

L'objectif de ce stage était de reconstituer l'évolution du delta de la Thio depuis les débuts de l'exploitation du nickel jusqu'à nos jours. Une base de données a pu être constituée avec des cartes anciennes de la période de 1880, des images aériennes de 1954 à 2017, des cartes postales anciennes et des photographies, ainsi que des données hydrométéorologiques.

On a pu constater des changements très importants sur toute la période étudiée. Une progradation du delta a été montrée, jusqu'à 107 m entre 1880 et 2008. Celle-ci a principalement lieu au niveau des deux rives de l'embouchure, mais les changements les plus spectaculaires concernent la rive droite, sur la gauche du Bota Méré. Parallèlement, un engravement du delta a été déterminé, débutant dans les années 70. On a en effet pu observer une augmentation des zones de dépôts entre 1880 et 1954, qui a encore augmenté jusqu'en 1985. Globalement, le total des surfaces en eau n'a pas beaucoup évolué sur toute la période. Elles ont néanmoins connu des évolutions rapides, qui ont été déterminées entre 1976 et 1989 sur la chronique des images aériennes disponibles. Il a été remarqué une végétalisation particulièrement importante du delta à partir de 1995, allant de pair avec les aménagements et la stabilisation du delta.

Il a été observé qu'à partir des années 70, et particulièrement après 1976, la dynamique d'évolution a été la plus rapide à tout niveau. Cela est probablement lié à la prospection et l'exploitation minière. L'activité minière a généré d'importantes surfaces vulnérables à l'érosion et un stock de sédiments mobilisables de par les stériles mis en décharge. Toute cette activité s'est accélérée à partir des années 50 par le début de la mécanisation.

Ajouté à cela, le cyclone Alison en 1975, a pu mobiliser d'importantes masses de sédiments lessivant les stocks, et débutant la dynamique d'hypersédimentation à partir de 1975. Ensuite, des pics de crue fréquentes ont pu également alimenter le delta en sédiments particulièrement dans les années 80, périodes où le delta prograde rapidement.

Les aménagements ont fixé les formes et donc la multiplicité des chenaux près du trait de côte à partir de leur établissement dans les années 85. La rectification du lit principal de la Thio l'a rendu rectiligne et a finalement conduit les sédiments plus loin dans le lagon où ils se sont déposés. Cela fait écho avec le diagramme ternaire du delta. En 1880, le delta semble subir l'influence fluviale mais également celle des vagues, le trait de côte étant plus reculé que lors des périodes suivantes et plus homogène également. Au cours du temps, l'influence fluviale a augmenté se traduisant par une progradation du delta et une

hypersédimentation dans le delta et au niveau du trait de côte. Actuellement, la dynamique planimétrique du delta s'est stabilisée avec les aménagements.

Enfin, il a été distingué 4 phases majeures d'évolution du delta, à savoir la phase pré-industrielle de 1880 à 1950, définie par une sédimentation lente mais effective. De 1954 à 1980 a eu lieu la phase industrielle avec une augmentation très rapide des atterrissements et une progradation très rapide du delta. La phase 3 a lieu en fin des années 80 jusqu'au milieu des années 90, où le delta semble se stabiliser, avec une diminution des apports en sédiments. La dernière phase observe une végétalisation rapide, avec probablement une perte des capacités d'auto-entretien du delta.

D'autres perspectives ressortent ainsi de cette étude pour compléter l'analyse. La détection sur des images infrarouges de la mangrove notamment, grâce à son spectre particulier pourrait être entreprise afin de déterminer l'évolution de la végétation avec moins d'incertitudes. Une reconstitution de données de débits plus précise pourrait être réalisée grâce à des traitements plus poussés. D'autres données de cartes anciennes comme des cartes marines du début du XXe siècle pourraient venir compléter l'analyse de l'évolution de la phase pré-industrielle.

## Liste des acronymes

BDMF : Base de Donnée Météo France

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BRI : Braiding River Index

DITTT : Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports terrestres

DTSI : Direction des Technologies et des services de l'Information

ENSO : El Nino/Southern Oscillation

GLM : Generalized Linear Model

IPO : Intercadal Pacific Oscillation

MEI : Multivariate ENSO Index

OAM : Open Angle Method, « Méthode de l'angle Ouvert »

SHOM : Service hydrographique et océanographique de la Marine

SLN : Société Le Nickel, groupe ERAMET

SOI : Southern Oscillation Index

## Bibliographie

- Agniel, Guy. 2012. « Atlas de la Nouvelle-Calédonie ». Marseille: IRD Editions.
- Allenbach. 2002. « L'évolution morphologique récente du littoral à l'embouchure des rivières Thio et Dothio : un exemple d'interactions anthropiques et naturelles. »  
<https://doi.org/10.5150/jngcgc.2002.013-A>.
- . 2017. « Impacts des exploitations de nickel sur les taux d'apports sédimentaires au littoral de Thio en Nouvelle-Calédonie. », 2017.
- Allenbach, Michel, et T Hoibian. 2002. « L'évolution géomorphologique récente du littoral à l'embouchure des rivières Thio et Dothio (Nouvelle-Calédonie) : Un exemple d'interactions anthropiques et naturelles ». In , 127-36. Editions Paralia.  
<https://doi.org/10.5150/jngcgc.2002.013-A>.
- Association des Pays et Territoires d'Outre-mer de l'Union européenne. s. d. « Présentation de la Nouvelle-Calédonie ». OCTA. <http://www.octassociation.org/presentation-de-la-nouvelle-caledonie>.
- Beauducel, Eric. 2015. *Sur les terres du roi Nick*. Archipels, France télévisions et Nouvelle Calédonie îère.
- Bencivengo, Yann. 2014a. *La naissance de l'industrie calédonienne*.
- . 2014b. « Naissance de l'industrie du nickel en Nouvelle-Calédonie et au-delà, à l'interface des trajectoires industrielles, impériales et coloniales (1875-1914) ». *Le Journal de la Société des Océanistes*, n° 138-139. <http://jso.revues.org/7144>.
- Bianchi, et Allison. 2009. « Large-river delta-front estuaries as natural “recorders” of global environmental change ». *PNAS* 106 (20).
- « Bibliothèque Nationale de France ». s. d. <http://gallica.bnf.fr/>.
- Burn, Donald H. 1997. « Catchment Similarity for Regional Flood Frequency Analysis Using Seasonality Measures ». *Journal of Hydrology* 202 (1-4): 212-30.  
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00068-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00068-1).
- « Climatology, IPO, UK ». s. d. <http://climatology.co.uk/interdecadal-pacific-oscillation#.Wtca3C5uYdU>.
- Drain, Perrine. 2016. « Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré (Nouvelle-Calédonie) ».
- Egozi, Roey, et Peter Ashmore. 2008. « Defining and Measuring Braiding Intensity ». *Earth Surface Processes and Landforms* 33 (14): 2121-38. <https://doi.org/10.1002/esp.1658>.
- Fromard, François, Emma Michaud, et Martine Hossaert-McKey. 2018. *Mangrove: une forêt dans la mer*. Paris: Le Cherche Midi : CNRS.
- Galloway. 1975. « Process framework for describing the morphological and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems ». In *Deltas*, Broussard, M.L., 87-98.
- Garcin. 2013. « Identification des rivières sur-engravées de la Grande-Terre »,.
- GARCIN, M. 2017. « Forçage météorologique de 1952 à 2016 sur le bassin versant de la Thio ». Note technique BRGM DRP 17-182.
- « Géoportail de Nouvelle-Calédonie ». s. d. Georep. Georep.nc.
- Gosset, Lucie. 2016. « Rivières engravées à Thio, Nouvelle-Calédonie : vécus et attentes de la population ».
- Hoff. 1982. « La végétation de Nouvelle-Calédonie ». *BULLETIN DE L'ASSOCIATION PHILOMATHIQUE D'ALSACE ET DE LORRAINE*, 1982.
- INSEE. 2014. « Recensement de la population en Nouvelle-Calédonie en 2014 ». 2014.
- Jaffré, Tanguy. 1980. *Étude écologique du peuplement végétal des sols dérivés de roches ultrabasiques en Nouvelle Calédonie*. Travaux et documents de l'ORSTOM, no 124. Paris: O.R.S.T.O.M.

- Laganier, Richard, et Joël Danloux. 1991. « Classification et quantification des phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation sur les bassins touchés par l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie. »
- Latham, M., Paul Quantin, et G. Aubert. 1978. « Étude des sols de la Nouvelle-Calédonie: nouvel essai sur la classification, la caractérisation, la pédogenèse et les aptitudes des sols de Nouvelle-Calédonie: carte pédologique de la Nouvelle-Calédonie à 1/1 000 000: carte d'aptitudes culturale et forestière des sols de Nouvelle-Calédonie à 1/1 000 000 ». Paris: ORSTOM.
- Lavigne, et Sahal. 2011. « La réalité des risques majeurs en Nouvelle-Calédonie. »
- Leroux, Arthur. 2009. « Étude de l'évolution récente des changements environnementaux : Analyse comparée d'un bassin versant minier et d'un bassin versant « naturel » à partir d'images satellites et aéroportées en Nouvelle-Calédonie (Thio, Province Sud) ». *Les régions françaises face aux extrêmes hydrologiques*. s. d. SEDES.
- « Les statuts de la Nouvelle-Calédonie et de la Polynésie ». 2017. Le portail de l'état au service des collectivités. 15 décembre 2017. <https://www.collectivites-locales.gouv.fr/statuts-nouvelle-caledonie-et-polynesie>.
- L'Huillier, Laurent, et Tanguy Jaffré. 2010. « L'exploitation des minerais de nickel en Nouvelle-Calédonie ». In .
- « Ma Nouvelle Calédonie ». s. d. <https://gnc.jimdo.com/georges-coquilhat-et-la-nouvelle-caledonie/>.
- Mériaux, Germain. 2017. « Caractérisation de bassins versants miniers et du degré de colmatage de la rivière Thio en Nouvelle-Calédonie ».
- « Météo France, Comprendre ». s. d. <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/153078-oscillation-australe>.
- « Mutivariate Enso Index ». s. d. <https://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/ARcHivEd=MeI/200210/mei.html>.
- OEIL. 2017. « Synthèse des connaissances environnementales sur les bassins versants de Thio et Dothio (province Sud, Nouvelle-Calédonie) ». OEIL.
- O'Reilly, Patrick. 1953. « Chronologie de la Nouvelle-Calédonie. De la découverte de l'île au cinquantième de la prise de possession (1774-1903) ». *Journal de la Société des Océanistes*, 1953.
- Ortiz-Tánchez, Eduardo, Werner Ebeling, et Karl Lanius. 2002. « MEI, SOI and Mid-Range Correlations in the Onset of El Niño–Southern Oscillation ». *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications* 310 (3-4): 509-20. [https://doi.org/10.1016/S0378-4371\(02\)00812-9](https://doi.org/10.1016/S0378-4371(02)00812-9).
- « RMS ». s. d. *Glossaire géomatique, ALPAGE*. (AnaLyse diachronique de l'espace urbain Parisien: approche GEomatique). <http://alpage.huma-num.fr/fr/frdocumentation/glossaire-geomatique>.
- Shaw, John B., Matthew A. Wolinsky, Chris Paola, et Vaughan R. Voller. 2008. « An Image-Based Method for Shoreline Mapping on Complex Coasts: SHORELINE MAPPING ON COMPLEX COASTS ». *Geophysical Research Letters* 35 (12): n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2008GL033963>.
- Terry, James, P. 2008. « Features of tropical cyclone-induced flood peaks on Grande Terre, New Caledonia ».
- Ville de Nouméa. s. d. « Un climat tropical ». <http://www.noumea.nc/decouvrir-noumea/geographie-et-environnement/un-climat-tropical>.

## Annexes

### Annexe I

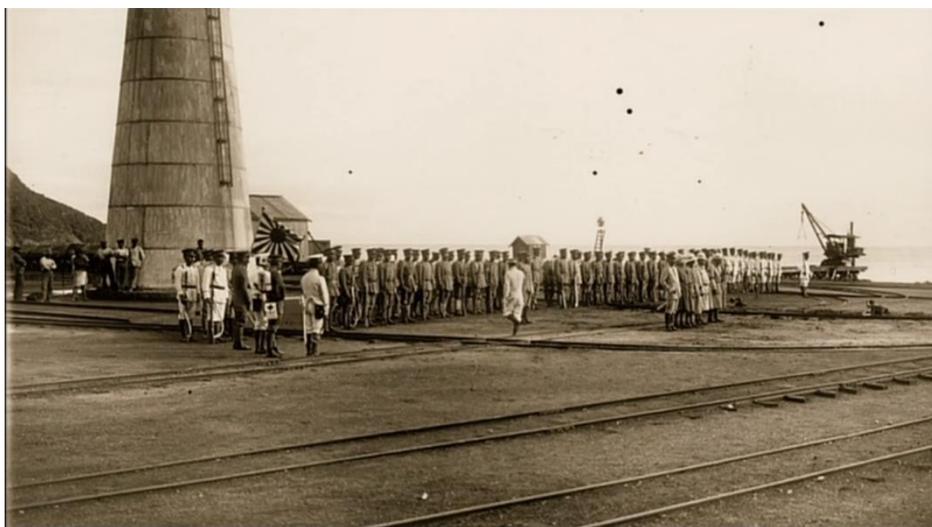


Figure 67: Travailleurs Japonais débarquant à Thio-Mission autour de 1910. Source:(Beauducel 2015)

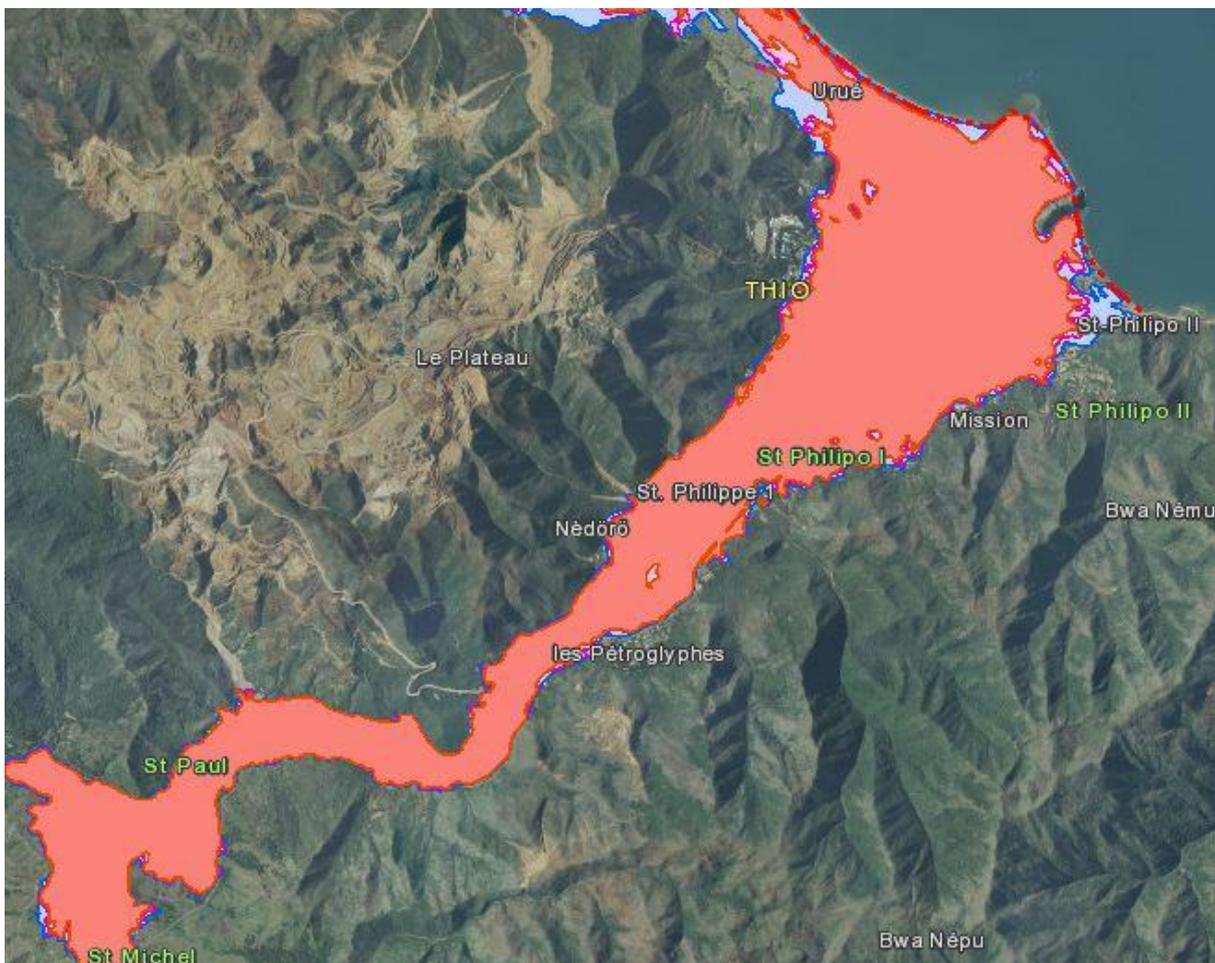
### Annexe II

<i>Date</i>	<i>Événement</i>
1853	La colonisation commence
1863	Découverte d'or (Pouébo)
1864	Découverte du Nickel par Jules GARNIER
1873	Première demande de concession minière de Nickel au mont d'Or Première réglementation minière de la Nouvelle-Calédonie
1874	Début de l'exploitation de Nickel en NC
1877-1879	Première crise du nickel en NC
1878-1880	Négociation en France par Higginson pour créer une société pour l'exploitation et le traitement des minerais de nickel calédoniens
1880	Fondation de la SLN
1881	J. Garnier quitte la SLN
1883	Deuxième réglementation minière de la NC La banque Rothschild entre dans le capital de la SLN
1884	Recrutement de 166 Chinois pas la SLN
1885-1888	Deuxième crise du Nickel en NC
1889	Ouverture de la fonderie d'Ouroué, qui ferme en 1891 Arrivée des premiers travailleurs Indochinois à Nouméa sur le Chéribon
1892	Arrivée des premiers engagés Japonais Troisième crise du Nickel en NC
1895	Réduction de moitié du capital de la SLN
1896	Troisième réglementation minière de la NC
1897	Fin des convois de condamnés vers la NC
1899-1906	Développement des infrastructures dans le centre de Thio
1900-1901	Arrivée d'autres Japonais
1900-1904	Boom du Nickel
1903-1910	Marasme économique en NC

1906	Quatrième réglementation en NC Mise en service du transporteur et du transbordeur Bleichert de Thio
1909	Naufrage de La Joliette et destruction partielle du transbordeur
1912	Mise en service de la fonderie à Thio-Mission
1913	Cinquième réglementation minière de NC
1924-1929	Boom du Nickel
1938-1939	Boom du Nickel

Figure 68: Chronologie de l'histoire relative à l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie, du début de la colonisation aux années 40.  
Source majeure: (Bencivengo 2014a)

### Annexe III



Zones inondables sur la zone d'étude. Source : (« Géoportail de Nouvelle-Calédonie », s. d.)



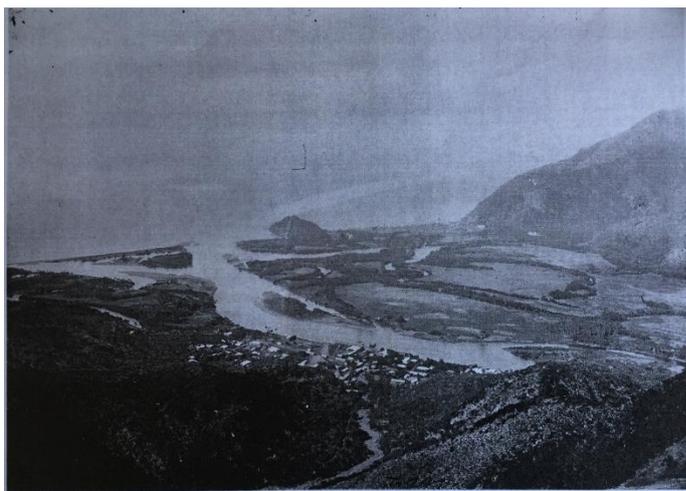
Figure 69: Carte c3, carte la plus complète

Annexe V

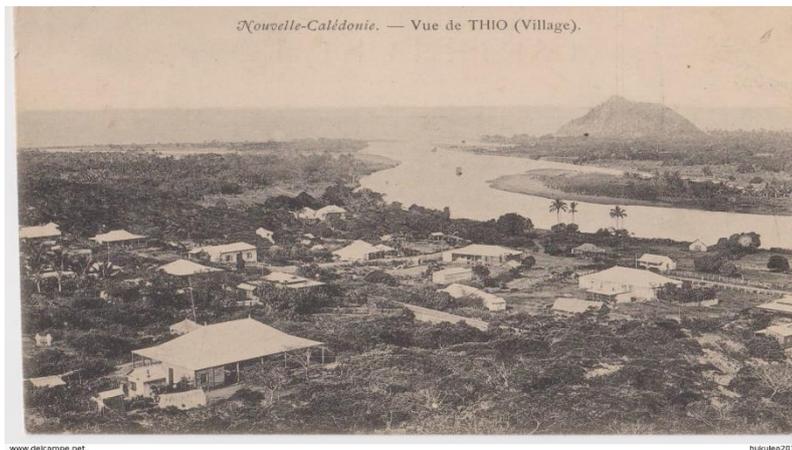


*Carte postale de laves torrentielles dans la Grande Rue de Thio Village. Date non connue. Source : Fonds Meyers*

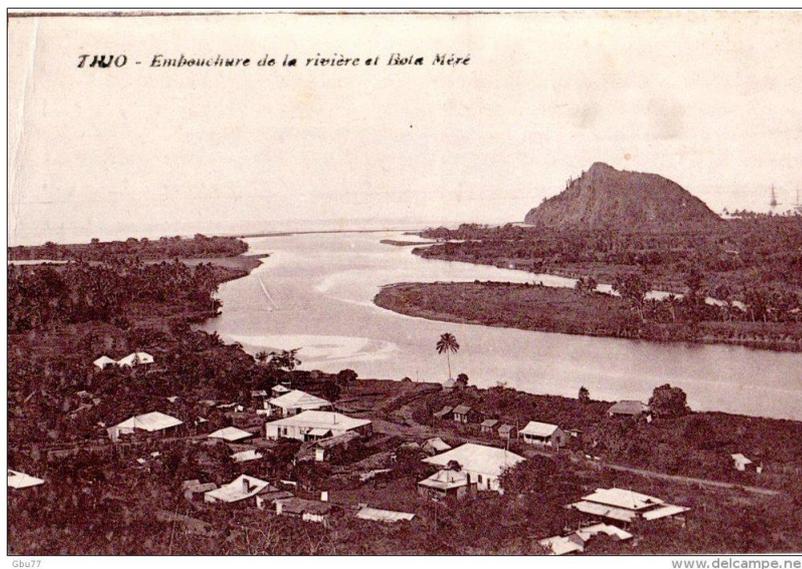
Annexe VI



*Photographie de l'embouchure de la Thio prise sur les versants du Plateau. Date estimée à avant 1898. Source : nd*



*Photographie de l'embouchure de la Thio prise au village de Thio. Date estimée au début du XXe siècle. Source : Site Delcampe*



*Carte postale ancienne de l'embouchure de la Thio. Date estimée en 1920. Source : Site Delcampe*

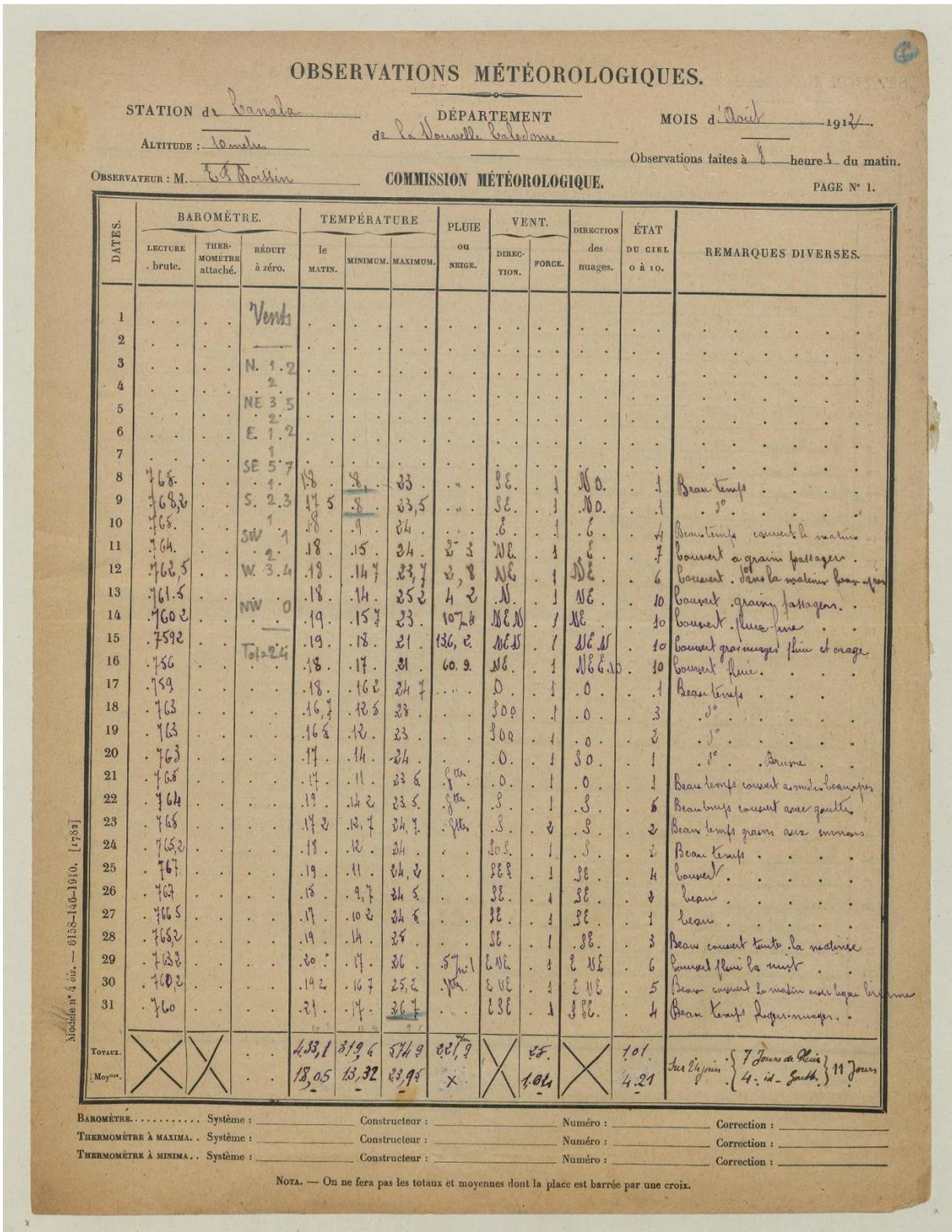
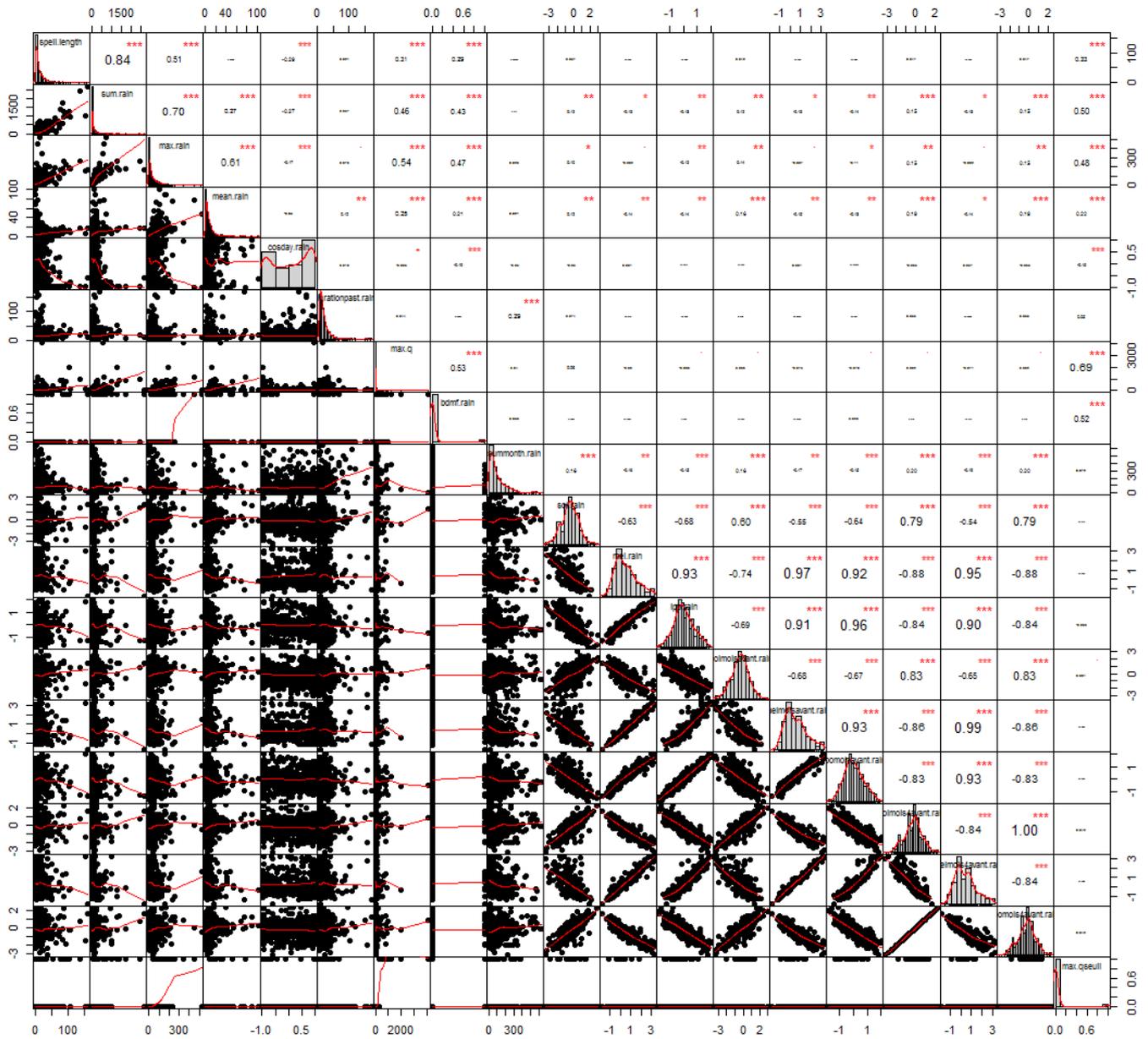


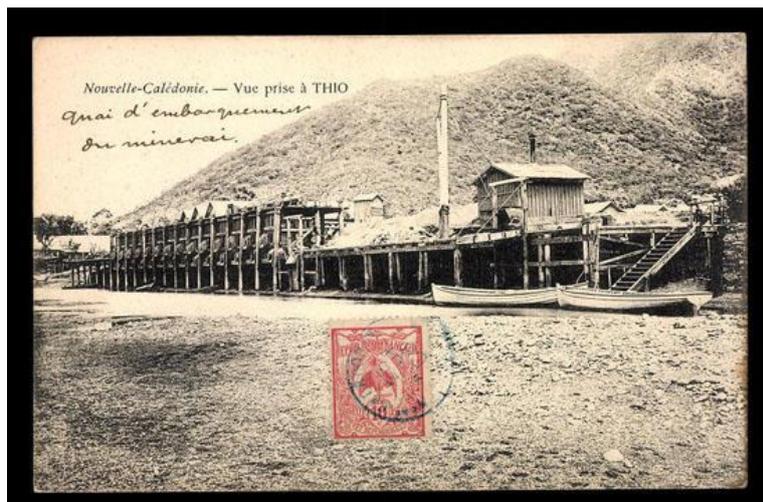
Figure 71: Relevés météorologiques d'archive à Canala de 1912. Source : Météo France NC

# Annexe VIII

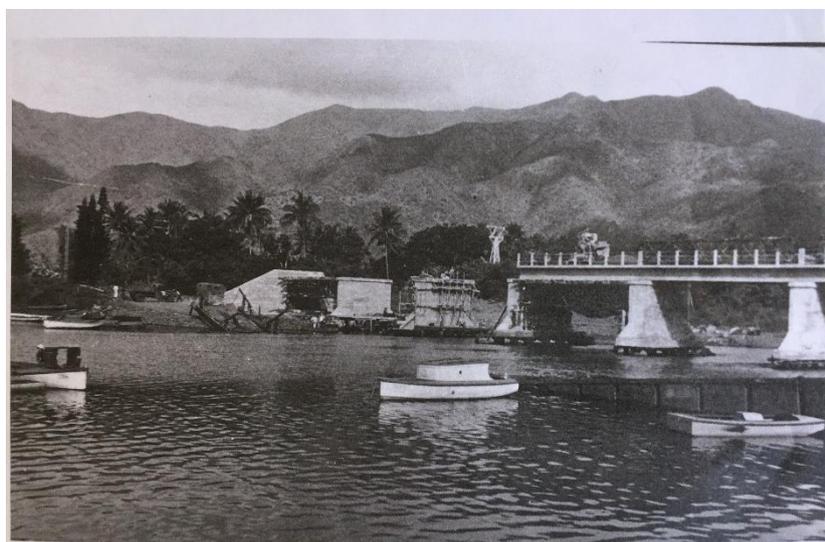


Matrice de corrélation des caractéristiques de pluie entre elles

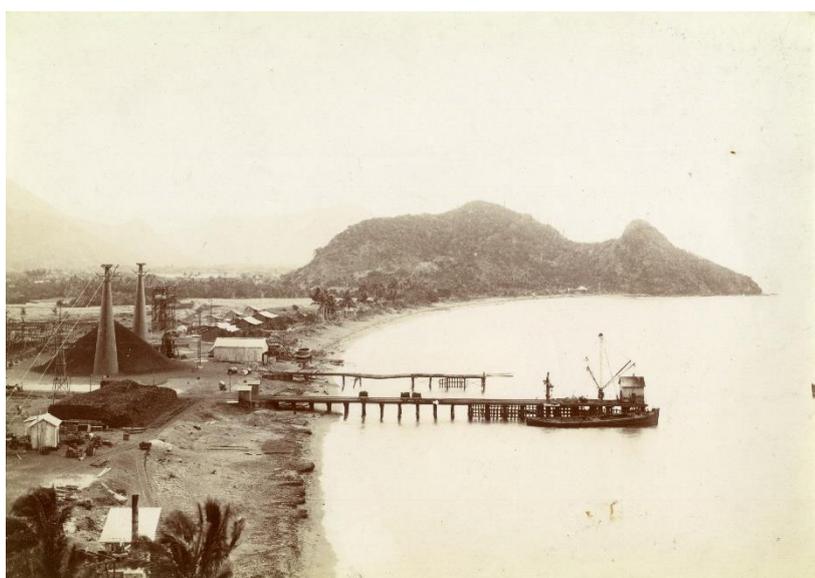
Annexe XIX



*Quai d'embarquement à Thio*



*Construction du pont de la Thio, probablement en 1953*



*Aménagements à Thio Mission, le wharf*

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

**Diplôme(s) :** Ingénieur de l'ENGEES/ Master cohabilité de géographie  
environnementale

**Auteur :** Louise SCHNEIDER

**Année :**  
2018

**Titre :** *Evolution du delta de la Thio, Nouvelle-Calédonie, de 1870 à nos jours, en lien avec les forçages anthropiques et naturels.*

**Nombre de pages texte :** 96

**Annexes :** 8

**Nombre de références bibliographiques :** 40

**Structure d'accueil**

*IRG, UMR 5600 CNRS/ Bron/ Rhône*

**Maître de stage :** Oldrich NAVRATIL

### Résumé

Cette étude porte sur l'évolution biogéomorphologique du delta du fleuve Thio (Nouvelle-Calédonie) depuis le début des activités minières à la fin du XIXe siècle afin de comprendre pourquoi les populations subissent depuis 2013 des inondations récurrentes. Elle aborde une analyse chronologique des changements socio-environnementaux induits à la fois par les forçages climatiques et anthropiques qui se produisent dans le delta. Une analyse est menée à partir de cartes historiques, de photos aériennes, de cartes postales anciennes, de données hydrométéorologiques et de l'historique de l'activité minière. Une hypersédimentation a été mise en évidence, suivie d'une fixation du delta plus tardive.

**Mots-clés :** delta, Thio, changements environnementaux, analyse diachronique, forçages, hydrologie, SIG