



HAL
open science

Qualification et quantification des flux de la mine au lagon et de leurs impacts. Rapport scientifique final

Michel Allenbach, Mélanie Bertrand, Marc Despinoy, Olivier Evrard, Manuel Garcin, Frédéric Liébault, Oldrich Navratil, Alain Recking, Didier Richard, Isabelle Rouet, et al.

► To cite this version:

Michel Allenbach, Mélanie Bertrand, Marc Despinoy, Olivier Evrard, Manuel Garcin, et al.. Qualification et quantification des flux de la mine au lagon et de leurs impacts. Rapport scientifique final. [Rapport de recherche] Programme Immila. (Tome Nickel et Environnement), CNRT Nickel et son environnement. 2020, 251 p. hal-03417991

HAL Id: hal-03417991

<https://hal.science/hal-03417991>

Submitted on 6 Nov 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Rapport scientifique Edition 2020

IMMILA

Qualification et quantification des flux
de la mine au lagon et de leurs impacts



2016/04/08

Rapport Scientifique 2020

PROGRAMME IMMILA

IMPACT DE LA MINE AU LAGON



*Étude réalisée dans le cadre des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*

Juin 2020

CNRT
NICKEL
& son environnement



« IMMILA – IMPACT DE LA MINE AU LAGON »

QUALIFICATION ET QUANTIFICATION DES FLUX DE LA MINE AU LAGON ET DES LEURS IMPACTS

Rapport scientifique final

Juin 2020

Ouvrage collectif coordonné par Michel ALLENBACH (UNC – ISEA - EA 7484) pour le consortium UNC (ISEA-EA 7484), IRD (UMR 228 ESPACE-DEV), IRSTEA (Unité ETNA), CEA (LSCE-CEA – UMR 5600), BRGM, CNRS (UMR M2C Caen), Rouetis R&D, EW Consultant.



AUTEURS (LISTE ALPHABÉTIQUE)

Michel ALLENBACH (UNC)
Melanie BERTAND (IRSTEA)
Marc DESPINOY (IRD)
Olivier EVRARD (LSCE CEA)
Manuel GARCIN (BRGM)
Frederic LIEBAULT (IRSTEA)
Oldrich NAVRATIL (U LYON)
Alain RECKING (IRSTEA)
Didier RICHARD (IRSTEA)
Isabelle ROUET (ROUETIS R&D)
Catherine SABINOT (IRD)
Virginie SELLIER (LSCE CEA)
Bernadette TESSIER (CNRS)
Isabelle THINON (BRGM)
TOURAIVANE (UNC)
Elisabeth WORLICZEK (EW)

STAGIAIRES DU PROGRAMME

Yann GASTALDI
Louise SCHNEIDER
Germain MERIAUX
Laetitia NEMOAJOU
Lucie GOSSET
A-Tena PIDJO
Perrine DRAIN
Larrivière MOUSSOUNDA
Simon TRANQUART
Léo PANCRAZI
Nicolas GOSSELIN
Tom BURLAT

Réf.	CSF n° 10PS2013-CNRT.UNC/IMMILA du 01/09/2015			
Version	Date	Rédacteur(s)	Qualité du rédacteur(s)	Révision pour CNRT
V2	02.02.2020	Michel ALLENBACH UNC	Coordinateur du programme	F. Bailly CNRT

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : Impact environnemental, Quantification, Qualification, Transport par charriage, MES, Thio, Nouvelle-Calédonie ;

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Allenbach M. *et coll.* (2020) – *Rapport scientifique*. Programme « IMMILA, Impact de la mine au lagon ». CNRT « Nickel & son environnement ». 251 pages.

SOMMAIRE

PREAMBULE	15
1. PRESENTATION DU PROGRAMME	16
1.1. LA PROBLÉMATIQUE	16
1.2. LE CHANTIER GÉOGRAPHIQUE.....	17
1.3. UNE APPROCHE MULTI-TEMPORELLE	17
1.4. LES TÂCHES PRINCIPALES DU PROGRAMME	18
1.5. STRUCTURATION DU RAPPORT.....	19
2. DYNAMIQUE ANCIENNE DES APPORTS AU LITTORAL	20
2.1. LA SISMIQUE RÉFLEXION TRÈS HAUTE RÉOLUTION	20
2.1.1. <i>Principe général</i>	20
2.1.2. <i>Mise en œuvre à la mer</i>	20
2.1.3. <i>Interprétation des résultats</i>	22
2.1.4. <i>Analyse interprétative et conclusions relatives à l'évolution à long terme de la zone littorale</i>	27
2.2. LES SONDAGES CAROTTÉS	28
2.2.1. <i>Les opérations de terrain</i>	30
2.2.2. <i>Le travail en laboratoire</i>	31
2.2.3. <i>Les résultats</i>	31
3. EVOLUTION RÉCENTE DES BASSINS VERSANTS ET DES HYDROSYSTÈMES	38
3.1. CHRONIQUE MÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE.....	38
3.1.1. <i>Une approche novatrice du forçage météorologique</i>	39
3.1.2. <i>Analyse de la pluviométrie à Thio-P</i>	40
3.1.3. <i>Analyse des évènements climatiques</i>	47
3.1.4. <i>Conclusion</i>	60
3.2. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS ET ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT	62
3.2.1. <i>Objectifs</i>	62
3.2.2. <i>Cartographie des bassins versants de la Thio et de la Todré</i>	63
3.2.3. <i>Evolution du trait de cote (estuaire de la Thio)</i>	90
3.2.4. <i>Conclusion</i>	93
3.3. ÉTUDE MORPHODYNAMIQUE DE L'HYDROSYSTÈME.....	95
3.3.1. <i>Analyse diachronique des bandes actives : bassins versants de la Thio et de la Todré</i>	95
3.3.2. <i>Reconstitution des phases récentes d'exhaussement et d'incision de la Néburu à partir de l'analyse croisée des photographies aériennes historiques et des données LiDAR de 2012</i>	99
3.3.3. <i>Principaux enseignements de l'analyse historique des changements fluviaux</i>	109
3.4. ÉVOLUTION DES APPORTS MINIERIS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA THIO	110
3.4.1. <i>Objectifs</i>	110
3.4.2. <i>Méthodes</i>	112
3.4.3. <i>Résultats</i>	117
3.4.4. <i>Discussion</i>	129
3.4.5. <i>Conclusion</i>	130
3.5. QUANTIFICATION DES TAUX DE SÉDIMENTATION DANS LA ZONE LITTORALE.....	132
3.5.1. <i>Etude des systèmes côtiers des embouchures de la Thio et de la Todré</i>	132
4. ETAT ET FONCTIONNEMENT ACTUEL : TRANSPORT SOLIDE GROSSIER	147
4.1. ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE	147
4.1.1. <i>Reconnaissance géomorphologique</i>	147
4.1.2. <i>Quelques mots sur la problématique inondation</i>	159
4.1.3. <i>Conclusion</i>	161
4.2. LA QUANTIFICATION DES FLUX.....	162
4.2.1. <i>collecte des données</i>	162
4.2.2. <i>Résultats</i>	170

4.2.3.	<i>Conclusion</i>	174
5.	ETAT ET FONCTIONNEMENT ACTUEL : LES MATIÈRES EN SUSPENSION	175
5.1.	TRAÇAGE DES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS LE BASSIN VERSANT DE THIO.....	175
5.1.1.	<i>Objectif</i>	175
5.1.2.	<i>Matériels et méthodes</i>	176
5.1.3.	<i>Résultats et discussion</i>	185
5.1.4.	<i>Conclusions et perspectives</i>	198
5.2.	CARACTÉRISATION ET QUANTIFICATION DU COLMATAGE DE LA THIO ET DE SES AFFLUENTS	199
5.2.1.	<i>Matériel et méthodes</i>	199
5.2.2.	<i>Estimation de la quantité et qualité des fines présentes dans le lit de la rivière</i>	202
5.2.3.	<i>Conclusion</i>	207
5.3.	MESURE DES CONCENTRATIONS ET DES FLUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION À L'EXUTOIRE DE LA THIO	207
5.3.1.	<i>Instrumentation et analyses</i>	208
5.3.2.	<i>Résultats et discussions</i>	208
5.3.3.	<i>Synthèse et perspectives</i>	211
6.	PERCEPTION DES HABITANTS ET ACCEPTATION SOCIALE DES TRANSFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES	212
6.1.	DIFFÉRENCES DE PERCEPTION ET DE VÉCU DES CHANGEMENTS SOCIO-ENVIRONNEMENTAUX ENTRE LES TRIBUS AMONT ET AVAL	214
6.2.	LES IMPACTS EN LIEN AVEC LA PROBLÉMATIQUE D'ENGRAVEMENT ET D'HYPERSÉDIMENTATION	214
6.2.1.	<i>Conséquences sur le foncier</i>	219
6.2.2.	<i>Conséquences sur les cultures vivrières</i>	223
6.2.3.	<i>Focus sur les dépôts de boue</i>	226
6.2.4.	<i>Conséquences sur les représentations des habitants à propos des cours d'eaux et leur perception des risques</i>	229
6.3.	CONSÉQUENCES ET ENJEUX ASSOCIÉS POUR LE FUTUR.....	229
6.3.1.	<i>Conséquences sur les habitations : enjeux de maintien de la population sur ses terres ou de relocalisation</i>	229
6.3.2.	<i>Conséquences sur les zones de culture et enjeux de maintien des cultures et des variétés cultivées</i>	230
6.3.3.	<i>Conséquences sur les zones de pêche et enjeux de maintien d'une pratique familiale nourricière</i>	231
6.4.	REGARDS CROISÉS ENTRE SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET SAVOIRS LOCAUX	231
7.	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	235
7.1.	L'ÉVOLUTION À LONG TERME	235
7.2.	L'ÉVOLUTION RÉCENTE DU SYSTÈME BASSIN VERSANT- RIVIÈRE - LITTORAL.....	236
7.2.1.	<i>Données générales sur le bassin versant de la Thio</i>	236
7.2.2.	<i>Les impacts sur la morphodynamique de l'hydrosystème</i>	241
7.3.	L'ÉTAT ET LE FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BASSIN VERSANT	244
7.3.1.	<i>Quantification du transport solide et en suspension</i>	244
7.3.2.	<i>Perception des habitants et acceptation sociale des transformations environnementales</i>	246
8.	BIBLIOGRAPHIE	248

LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Présentation géographique rapide du chantier géographique d'IMMILA	17
Figure 2 :	L'approche multi-temporelle du programme « IMMILA »	18
Figure 3 :	L'organigramme des tâches d'IMMILA	18
Figure 4 :	Le bateau Gouaro utilisé pour le levé et le boomer Seistec-IKB (en haut), le matériel THR source sparker (en bas)	21
Figure 5 :	Le bateau en levé au voisinage de l'embouchure de la Thio	21
Figure 6 :	Plan de position des levés dans la zone de l'embouchure de la Thio. En rouge, les profils réalisés au boomer et en bleu ceux du mini-sparker.....	22
Figure 7 :	Profil type (boomer), parallèle à la côte (enregistrement sismique au-dessus et coupe interprétative au-dessous).....	23
Figure 8 :	Les 3 réflecteurs principaux sur deux profils géophysiques sécants de la zone marine proche de l'embouchure de la Thio	25
Figure 9 :	Montage représentant les traces superposées des 3 réflecteurs principaux de l'ensemble des profils levé	25
Figure 10 :	Cartographie isochrone (mstd) de l'épaisseur du recouvrement sédimentaire entre le fond marin (réflecteur bleu) et la base du remplissage sédimentaire (réflecteur rouge).....	26
Figure 11 :	Cartographie isochrone (mstd) de l'épaisseur du recouvrement sédimentaire entre le fond marin (réflecteur bleu) et le rail interne (réflecteur orange) du remplissage sédimentaire	26
Figure 12 :	Positionnement des forages	29
Figure 13 :	Cible du sondage S1 situé au plus près de l'extrémité Sud-Ouest du profil sismique IM16_014 – Remplissage post réflecteur interne.....	29
Figure 14 :	Cible du sondage S2 situé au plus près de l'extrémité Sud-Ouest du profil sismique IM16_021– Remplissage anté réflecteur interne.....	30
Figure 15 :	Les opérations de mise en station de la foreuse (Sédidrill) et l'équipe de forage de l'IRD en haut de plage sur le point de forage S2.	30
Figure 16 :	Photographies des passes successives du forage S2. Chaque bande noire le long des tronçons indique la position des échantillons prélevés	32
Figure 17 :	Synthèse des résultats des analyses sédimentologiques réalisées sur le forage S2 et des interprétations en termes d'environnements de dépôt	32
Figure 18 :	Synthèse des résultats des analyses sédimentologiques réalisées sur le forage S1 et des interprétations en termes d'environnements de dépôt.	34
Figure 19 :	Corrélation entre le forage S2 et le profil sismique IM16_021.....	35
Figure 20 :	Profil sismique IM16_014, brut (haut), avec les principaux réflecteurs pointés (milieu), interprété (bas).....	36
Figure 21 :	Corrélation entre le forage S1 et le profil sismique IM16_014.....	37
Figure 22 :	Carte de localisation du bassin versant de la Thio et du pluviographe Thio-P (Fond : MNT DITTT)	40
Figure 23 :	Pluviométrie maximale et moyenne/mois sur la période 1952-2016	41
Figure 24 :	Précipitations par saison (saison sèche en rouge, saison cyclonique en bleu).....	42
Figure 25 :	Pluviométrie annuelle (en haut), nombre de jours de pluie par an (en bas, courbe noire), moyenne glissante du nombre de jours pluie par an (en bas, courbe bleue), tendance d'évolution du nombre de jours de pluie (courbe en tirets gris).....	42
Figure 26 :	Relation entre le nombre de jours de pluie par an et les précipitations annuelles cumulées	43
Figure 27 :	Histogramme des précipitations annuelles cumulées	43

Figure 28 :	Courbes de variation annuelle de la pluviométrie, du nombre de jours de pluie par an, des précipitations maximums en 24h et du Southern Oscillation Index (NOAA)	44
Figure 29 :	Courbe de variation du SOI en saison cyclonique (courbe bleue) et en saison sèche (courbe rouge) de 1952 à 2015	45
Figure 30 :	Diagramme des précipitations saisonnières en fonction du SOI saisonnier.....	45
Figure 31 :	Courbes de variation temporelle du nombre de jour de pluie par an, de la PSL (Pression At Sea Level) à Tahiti, de l'Interdecadal Pacific Oscillation IPO index.....	46
Figure 32 :	Radar présentant les proportions relatives des différents types d'événement par an...	49
Figure 33 :	Exemple d'archives de pluies et données d'archives pour Canala mis à disposition par Météo Nouvelle Calédonie et numérisée par Louise Schneider.	53
Figure 34 :	Matrice de corrélation des variables pluie-débit	56
Figure 35 :	Relation entre $\log(Q_{max})$ et $\log(I_{max})$	56
Figure 36 :	Relation entre la pluie maximale à Thio Plateau (mm/j) avec la pluie cumulée et le pic de crue ; la taille du cercle renseigne sur l'intensité journalière du pic de crue.	57
Figure 37 :	Représentations sous la forme Intensité de pluie-Cumul de pluie des évènements depuis 1952. En gris, les débits de $0.8m^3/s < QJX < 300m^3/s$; en orange, les débits $83m^3/s < QJX < 807m^3/s$ et en bleu : $500 m^3/s < QJX < 2000m^3/s$	58
Figure 38 :	Répartition des événements avec des crues faibles « type C » événement.	58
Figure 39 :	Répartition des événements avec des crues moyennes « type B »	59
Figure 40 :	Répartition des événements avec des crues fortes « type A »	59
Figure 41 :	Date d'acquisition des données (noir : BRGM ; rouge : IRD)	69
Figure 42 :	Répartition et identification des sous-bassins versants de la Thio (0-49) et de la Todré (50-60).	72
Figure 43 :	Carte du caractère localement favorable à l'érosion par ruissellement.....	73
Figure 44 :	Carte hypsométrique de la zone d'étude et altitude moyenne dans chaque sous-bassin (en mètres)	74
Figure 45 :	Statistiques géomorphologiques par sous-bassin (altitude moyenne et dénivelé, pente moyenne et pourcentages de surfaces à caractère favorable à l'érosion (Thio 0-49, Todré 50-60).	75
Figure 46 :	Répartition des sols nus obtenue par imagerie satellitale. A : SPOT1986 ; B : SPOT1994-95 ; C : SPOT1999 et D : Landsat 8 2015	76
Figure 47 :	Pourcentage de sols nus par sous-bassin versant et par date (Thio 0 à 49, TodTre 50 à 60)	78
Figure 48 :	Carte des surfaces en excavation artificielle (source BDTPOPO, Gouvernement NC)...	79
Figure 49 :	Détail par classe et par date des superficies dans le bassin de la Thio (Rappel : classes distinguées en fonction du contexte localement favorable ou non à l'érosion par ruissellement).	80
Figure 50 :	Détail par classe et superficies analysées cumulées dans le bassin de la Thio et de la Todré pour le 09/10/1986.	81
Figure 51 :	Détail par classe et par date des superficies dans le bassin de la Todré (Rappel : classes distinguées en fonction du contexte localement favorable ou non à l'érosion par ruissellement).	82
Figure 52 :	Répartition et proportions relatives des types de sols nus détectés dans les sous-bassins versants en 1986, 1994-95, 1999 et 2015.....	83
Figure 53 :	Superficie de la végétation en km^2 par sous-bassin pour chaque date.....	84
Figure 54 :	Évolution de la superficie de végétation par sous-bassin versant entre 1986 et 1999 (en haut) et entre 1986 et 2015 (en bas).....	85
Figure 55 :	Évolution des sols nus à érosion dominante autres entre 1986 et 2015	86
Figure 56 :	Évolution des sols nus entre 1945 et 2008, Garcin et al. 2017	87

Figure 57 :	Évolution générale des surfaces de sols nus sur 12 sous-bassins versants miniers de la Thio étudiés par le BRGM	87
Figure 58 :	Évolution (ha) de 1986 à 2015 des classes de sols nus et de végétation pour les 58 sous BV analysés	88
Figure 59 :	Évolution en superficie d'une date à l'autre des sols nus à érosion dominante autres ..	89
Figure 60 :	Exemple de positionnement des transects pour l'étude du trait de côte (Leroux, 2016)... ..	91
Figure 61 :	Tendance de l'évolution du trait de côte au niveau de la plage d'Urue entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).....	92
Figure 62 :	Tendance de l'évolution du trait de côte au niveau de l'embouchure de la Thio entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).....	92
Figure 63 :	Tendance de l'évolution du trait de côte au niveau de la tribu de St Philippo entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).....	93
Figure 64 :	Représentation schématique des forçages d'origine minière et hydrométéorologique susceptibles d'expliquer les réponses morphologiques ; les dates des photographies aériennes disponibles sont représentées en rouge	96
Figure 65 :	Évolutions de la bande active de la Thio et de ses affluents entre 1954 et 2015.....	98
Figure 66 :	Évolution de la bande active de la Todré entre 1943 et 2015	99
Figure 67 :	Localisation du tronçon étudié (cadre blanc) dans le bassin versant de la Néburu ; ce tronçon correspond à la zone couverte par le levé LiDAR de 2012	100
Figure 68 :	Localisation des 11 profils en travers (en rouge) extraits des données LiDAR de 2012 sur les trois derniers kilomètres de la Néburu ; l'extension de la plaine alluviale est représentée en noir ; courbes de niveau 10 m en orange	101
Figure 69 :	Effet de la réattribution manuelle des points LiDAR du nuage brut sursol sur la topographie du transect XS7 (projection orthogonale des points sur une bande de 4 m centrée sur le transect).....	102
Figure 70 :	Reconstitution du profil en long de la surface alluviale boisée du cours inférieur de la Néburu (en vert) ; le profil du lit actif actuel est représenté en noir ; les traits verticaux discontinus représentent les ruptures de pente majeure du profil en long	103
Figure 71 :	Surface alluviale boisée en rive gauche de la Néburu, entre les transects XS7 et XS8; les graviers sont recouverts par des dépôts fins, typiques des plaines d'inondation (© F. Liébault)	103
Figure 72 :	Banc perché à patine sombre occupé par des patchs arbustifs, en rive droite de la Néburu, au droit du transect XS8 (© F. Liébault)	104
Figure 73 :	Transects topographiques sur lesquels les bancs à patine sombre avec végétation arbustive sont observés	104
Figure 74 :	Banc perché à patine sombre, sans végétation arbustive, observé en rive gauche de la Néburu, au droit du transect XS9 (© F. Liébault)	105
Figure 75 :	Reconstitution du profil en long des bancs à patine sombre non végétalisés sur le cours inférieur de la Néburu (en orange)	106
Figure 76 :	Reconstitution du profil en long des vagues sédimentaires de 1988 et 1975 sur les trois derniers kilomètres de la Néburu	107
Figure 77 :	Mise en place schématique des vagues sédimentaires successives de la Néburu ; le trait discontinu représente l'extension latérale de la bande active	108
Figure 78 :	Répartition des surfaces de sols nus naturels et d'origine minière à l'échelle de la Grande-Terre (Garcin et al. 2013, modifié)	111
Figure 79 :	Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volumes de stérile minier mis en décharge	113
Figure 80 :	Les sous-bassins versants et le cadastre minier du bassin de la Thio.....	114

Figure 81 :	Différents types de zones productives naturelles de type 1 – a) Grand mouvement de terrain, b et c) Petites loupes d'arrachement, d) Ravinement sur morphologie naturelle.....	115
Figure 82 :	a) cônes dans le creek Liliane en aval des décharges minières ; b) eaux rouges latéritiques lors d'un orage (Hwa No).....	116
Figure 83 :	a) Anciennes décharges, érosion en zone d'exploitation, érosion induites par les pistes, mouvement de terrain et sur-engravement des creeks en contre-bas (Hwa No); b et c) érosion liée aux pistes	116
Figure 84 :	Localisation du bassin versant de la Thio.....	117
Figure 85 :	Pourcentage de surface par lithologie du bassin de la Thio.....	118
Figure 86 :	Tonnage de stériles produit dans les sous-bassins versants de la Thio (la ligne verticale en tiret violet correspond à l'année 1975, date de la mise en œuvre du code minier interdisant la mise en décharge des stériles)	119
Figure 87 :	Courbes cumulées de tonnage de stérile (en millions de tonnes) par sous bassin versant de la Thio.....	120
Figure 88 :	Évaluation du volume de stériles mis en décharge sur l'ensemble du bassin versant de la Thio	120
Figure 89 :	Tonnage de stérile total mis en décharge par bassin versant.....	121
Figure 90 :	Apport spécifique total de stérile mis en décharge en tonnes/hectare par bassin versant	122
Figure 91 :	Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau ..	124
Figure 92 :	Tonnage des apports miniers issus des décharges regroupées selon leur localisation dans le bassin amont, médian ou aval de la Thio (en haut tonnage annuel, en bas tonnage cumulé)	125
Figure 93 :	Cartographie des surfaces des « Zones Productrices » et des « Zones Actives » sur le bassin versant de la Thio avec en haut et de gauche à droite : 1954, 1976 et en bas 1988 .	127
Figure 94 :	Évolution des surfaces des « Zones Productives » et « Zones Actives » tous types confondus entre 1954 et 2008 (haut à gauche), détail de l'évolution des « Surfaces Productives » entre 1954 et 2008 (en bas à gauche), détail des « Surfaces Actives » entre 1954 et 2008 (en bas à droite)	128
Figure 95 :	Exemple de la carte C3 (la plus complète) source DITTT.....	134
Figure 96 :	Schéma de la méthode de l'Open Angle Method (OAM)	139
Figure 97 :	Création d'un axe médian de l'enveloppe des traits de côte de la période de 1880 ...	139
Figure 98 :	Méthode de calcul des surfaces entre le trait de côte de 1880 et celui d'autres dates (1971 pour cet exemple)	140
Figure 99 :	Schéma de la méthode d'analyse du trait de côte par transects.....	140
Figure 100 :	Schéma de la méthode de détermination des incertitudes sur le trait de côte	141
Figure 101 :	Distance moyenne de déplacement et vitesse de déplacement du trait de côte de 1880 à 2017, par rapport au trait de côte de 1880	144
Figure 102 :	Évolution du trait de côte au niveau de 4 tronçons différents.....	145
Figure 103 :	Plan d'ensemble	148
Figure 104 :	Photomontage de la Thio (flèches rouges= témoins d'incision).....	148
Figure 105 :	Bancs végétalisés.....	149
Figure 106 :	La Thio (au niveau de Saint Paul, Sections 7-8)	149
Figure 107 :	Estuaire de la Thio.....	150
Figure 108 :	Photomontage de la Nakalé	151
Figure 109 :	Photomontage de la Néburu.....	152

Figure 110 :	La Tomuru	152
Figure 111 :	Creek Bwa Néca (ou Creek Cimetière) avec peigne	153
Figure 112 :	Dépôts en amont de la digue routière sur la Todré	154
Figure 113 :	Banc sur la Todré	154
Figure 114 :	Vue d'ensemble de la Cascade de Wellington	156
Figure 115 :	Traces de barrage naturel visibles sur les deux versants	157
Figure 116 :	Le cône	157
Figure 117 :	Confluence Nakalé-Thio, vue du ciel et depuis les berges.....	158
Figure 118 :	Confluence Tomuru/Thio	158
Figure 119 :	a) Confluence Neburu/Thio et b) La Thio juste en aval de la confluence.....	159
Figure 120 :	Principe de fonctionnement d'une plage de dépôt (d'après [Piton and Recking, 2015])...	159
Figure 121 :	a) Terrasse dans le lit de la Thio	160
Figure 122 :	Représentation schématique de l'évolution de la ligne d'eau avec sur engrèvement .	161
Figure 123 :	Possible évolution de l'hydrogramme de crue avec le sur-engrèvement	161
Figure 124 :	Mesure de la granulométrie par la méthode Wolman.....	164
Figure 125 :	Exemple de courbe granulométrique mesurée sur la Nakalé (2 échantillons et la moyenne)	164
Figure 126 :	Exemple de section en travers (Section 8, Pont des pétroglyphes).....	165
Figure 127 :	Profil en long de la Thio depuis l'embouchure jusqu'en amont des creeks Nakalé et Tomuru	165
Figure 128 :	Chronique des débits moyens journaliers sur la Thio.....	166
Figure 129 :	Crue de février 2015.....	166
Figure 130 :	: Évolution du D50 et du D84 sur la Thio.....	168
Figure 131 :	: Évolution du D50 et du D84 sur la Nakale.....	168
Figure 132 :	Évolution du D50 et du D84 sur la Néburu	168
Figure 133 :	Évolution de la pente sur la Thio	168
Figure 134 :	Hypothèse d'un contrôle hydraulique aval.....	169
Figure 135 :	Évolution de la largeur active sur la Thio.....	169
Figure 136 :	Principe de modélisation de l'hydraulique et du transport solide en rivière (Extrait du guide Onema : Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière).....	170
Figure 137 :	Valeurs du transport solide (m ³ /an) prédit par toutes les formules pour chaque section (les barres indiquent la médiane, les quartiles les min et max).....	171
Figure 138 :	Valeurs du transport solide (m ³ /an) prédit par les formules spécifiques aux fortes pentes (les barres indiquent la médiane, les quartiles les min et max).....	171
Figure 139 :	Valeurs du transport solide (m ³ /an) prédit par la formule Recking (2013) validée pour le terrain	172
Figure 140 :	Schématisme et résumé de la dynamique actuelle	174
Figure 141 :	Localisation des prélèvements des sédiments déposés i) le long de la Thio, ii) au niveau des sous-bassins versants miniers et non miniers, et iii) au niveau de la zone deltaïque (carotte sédimentaire).	177
Figure 142 :	Carotte sédimentaire prélevée en aval du bassin de la Thio.....	178
Figure 143 :	Spectrocolorimètre Minolta.....	178
Figure 144 :	Diagramme représentant différents niveaux de clarté (konikaminolta.eu)	179

Figure 145 : Diagramme de représentation des coordonnées chromatiques (a^* et b^*) et de la clarté (L^*) (konicaminolta.eu)	179
Figure 146 : Photographie de l'appareil de fluorescence X à énergie dispersive (ED-XRF)	180
Figure 147 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium (a), de celles du potassium en fonction de celles du thorium (b) et de celles du thorium en fonction de celles de l'uranium (c) au sein de substrats volcano-sédimentaires ou, au contraire, de filons et massifs de péridotites (Sevin, 2014)	181
Figure 148 : Principales lithologies du bassin versant de Thio	182
Figure 149 : Cartographie des surfaces des « Zones Productrices » et des « Zones Actives » sur le bassin versant de la Thio avec en haut et de gauche à droite : 1954, 1976 et en bas 1988 (source : Garcin et al., 2017)	183
Figure 150 : Concentrations en Ni au sein des sédiments des bassins miniers, non-miniers, des sédiments de la Thio de 2015 et 2017	184
Figure 151 : Photographies représentatives des sources minières (à gauche) et des sources non-minières (à droite)	185
Figure 152 : Valeurs des paramètres colorimétriques L^* (clarté) et a^* (indicateur chromatique du vert au rouge) au sein des bassins miniers et non-miniers	186
Figure 153 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium (a), et celles de l'uranium en fonction de celles du thorium (c) au sein des sous bassins miniers et non-miniers en lien avec leurs sites de prélèvements (b)	187
Figure 154 : Activités des radionucléides ^{137}Cs (à gauche) et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (à droite) au sein des sédiments des sous-bassins miniers, non-miniers et des sédiments déposés le long de la Thio lors de la crue de février 2015	188
Figure 155 : Carte des contributions relatives des sous-bassins miniers et non-miniers aux sédiments transitant dans la Thio au moment de la crue de février 2015 (DT)	191
Figure 156 : Répartition spatiale des précipitations générées par la dépression tropicale de février 2015	191
Figure 157 : Carte des contributions relatives des sous-bassins miniers et non-miniers aux sédiments transitant dans la Thio au moment de la crue d'avril 2017 (Cyclone Cook)	193
Figure 158 : Répartition spatiale des précipitations générées par le cyclone Cook (avril 2017)	193
Figure 159 : Localisation des pluviomètres et de la station de mesure de débits	194
Figure 160 : Profil spectrocolorimétrique (dérivées premières du spectre de réflectance (a) et indicateur chromatique a^* (b)), géochimique avec le Ni (c), des changements de faciès (d) et des contributions minières et non-minières (e) de la carotte sédimentaire	196
Figure 161 : Concentrations en Ni au sein des sources minières, des sources non-minières et de la carotte sédimentaire	197
Figure 162 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium au sein des sources minières, des sources non-minières et des sédiments	197
Figure 163 : Lieu de prélèvement (banc) des échantillons de fines	200
Figure 164 : Volume de 30x30x10 cm pour le prélèvement des échantillons + bassine remplie de 50L d'eau	200
Figure 165 : Échantillons prélevés sur la Thio et ses affluents numérotés de 1 à 29	201
Figure 166 : Variabilité spatiale des quantités de fines dans les creeks et sur la Thio	203
Figure 167 : Variabilité spatiale du nickel, chrome, cadmium et mercure dans les sédiments du lit des rivières	205
Figure 168 : Variabilité spatiale de l'indice a^* sur le bassin versant	206
Figure 169 : Évolution du paramètre a^* de l'amont vers l'aval de la Thio et valeur sur les affluents de la Thio	207

Figure 170 :	Évolution des débits et des concentrations en MES pour deux évènements de crues de faible intensité sur la Thio (hauteur max : 2m) en 2017	209
(a) Évolution des concentrations en MES en fonction des débits pour la même période (02/2017) (02/2017).....		209
Figure 171 :	Évolution des concentrations en MES en fonction des débits.....	209
Figure 172 :	Représentation spatialisée des dynamiques de crue vécues sur des zones à enjeux à Saint Paul et Saint-Michel. Source : Entretiens sur photo aérienne menés en 2016 et 2017 par A. Pidjo et L. Gosset.....	220
Figure 173 :	Représentation spatialisée des dynamiques de crue vécues sur des zones à enjeux à Saint Paul et Saint-Michel. Source : Entretiens sur photo aérienne menés en 2016 et 2017 par A. Pidjo et L. Gosset.....	220
Figure 174 :	Représentation spatiale des écoulements d'eau anciens et récents ayant conduit entre autres à la transformation de trous d'eau à Saint-Pierre.....	225
Figure 175 :	Représentation spatialisée de la dynamique sédimentaire constatée par les habitants des tribus de l'estuaire à l'embouchure de la Thio.	228
Figure 176 :	Représentation spatialisée de la dynamique sédimentaire constatée par les habitants d'Urué à l'embouchure de la Dothio.	228
Figure 177 :	Corrélation des pluies journalières entre Canala et Thio.....	238
Figure 178 :	Représentation schématique des forçages d'origine minière et hydrométéorologique susceptibles d'expliquer les réponses morphologiques ; les dates des photographies aériennes disponibles sont représentées en rouge	241
Figure 179 :	Évolution 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.....	243

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 :	Principales caractéristiques annuelles des précipitations	50
Tableau 2 :	Principales caractéristiques des précipitations par période entre les différentes campagnes de photographies aériennes	51
Tableau 3 :	Données d'hydrologie et de météorologie	52
Tableau 4 :	Détail du code attribué aux données de pluie d'archive	54
Tableau 5 :	Journaux collectés présentant des informations d'événements cycloniques sur la Nouvelle-Calédonie	54
Tableau 6 :	Classes d'événements et leur description en fonction de leur débit de pic de crue	57
Tableau 7 :	Principales caractéristiques des images satellitales utilisées.....	64
Tableau 8 :	Correspondance entre les numéros des sous-bassins de la Thio et leur nom vernaculaire (source BRGM)	66
Tableau 9 :	Présentation des indices de végétation et de sols	68
Tableau 10 :	Évolution des superficies (ha) par type de sols (BRGM, 2017).....	69
Tableau 11 :	Classification des sols nus télédétektés, basée sur la morphologie et les données exogènes.	70
Tableau 12 :	Surface des bassins versants détectée en sol nu en hectares et proportions dans les images satellitales de 1986, 1994-95, 1999 et 2015.....	77
Tableau 13 :	Données d'imagerie utilisées pour l'étude du trait de côte à l'embouchure de la Thio (A. Leroux, 2016).....	90
Tableau 14 :	Imagerie utilisée pour la reconstitution de l'évolution des bandes actives dans les bassins versants de la Thio et de la Todré.....	95

Tableau 15 :	Position et caractéristiques des profils en travers extraits du levé LiDAR de 2012 sur la Néburu	101
Tableau 16 :	Ratio entre la quantité de minerai et la quantité de stérile produit (source : DIMENC/SMC)	113
Tableau 17 :	Les différents types de surface analysés	115
Tableau 18 :	Pourcentage de surface occupé par les principales lithologies affleurant dans le bassin de la Thio (Les lithologies sur fond rose correspondent au massif minier)	118
Tableau 19 :	Relation entre les types d'impact, leurs sources potentielles et leurs origines.....	130
Tableau 20 :	Données cartographiques issues des fonds d'archive de la Nouvelle Calédonie ...	133
Tableau 21 :	Images étudiées provenant de la DITTT	135
Tableau 22 :	Images orthorectifiées	136
Tableau 23 :	Résultats de géo-référencement et de paramètres de digitalisation des photos aériennes	137
Tableau 24 :	Résultats de géoréférencement et paramètres de digitalisation des cartes anciennes	138
Tableau 25 :	Incertitudes du trait de côte des cartes anciennes	142
Tableau 26 :	Incertitudes du trait de côte sur les photos aériennes	142
Tableau 27 :	Résultats des mesures de surface des zones et du ratio de la surface sur la longueur de la ligne de 1880.	143
Tableau 28 :	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	145
Tableau 29 :	Distance des sites de mesure aux affluents et ponts.	163
Tableau 30 :	Les bassins versants et sous bassins	167
Tableau 31 :	Valeurs du transport solide (m ³ /an, à multiplier par 2.65/2 pour les volumes apparents) prédits par la formule Recking (2013) validée pour le terrain.....	172
Tableau 32 :	Calculs de transport solide effectués pour la crue de 2015, au pas de temps journalier et au pas de temps 5 min	173
Tableau 33 :	Synthèse des différentes sources sédimentaires et lithologies associées	176
Tableau 34 :	Récapitulatif des hypothèses de traçage sédimentaire envisagées	184
Tableau 35 :	Teneurs (moyennes ± écarts-type) des différents éléments géochimiques analysés au sein des sources minières et non-minières	187
Tableau 36 :	Résultats des analyses statistiques menées pour sélectionner les traceurs optimaux sur chacune des familles de traceurs : « géochimie », et « radionucléides géogéniques ».....	189
Tableau 37 :	Contributions des sous-bassins minières et non-minières le long de la Thio au cours de la crue de février 2015.....	190
Tableau 38 :	Contributions des sous-bassins minières et non-minières le long de la Thio au cours de la crue d'avril 2017	192
Tableau 39 :	Chroniques des crues débordantes à l'endroit du carottage	195
Tableau 40 :	Estimations des différents paramètres de crue et de transport de MES au cours de 3 événements de crue.....	210
Tableau 41 :	Information des crues mesurées sur la Ouenghi (245 km ²) par Danloux et Lagagnier (1991)	210
Tableau 42 :	Descriptif du contexte général et des enjeux spécifiques des tribus de la chaîne ..	215
Tableau 43 :	Impacts des phénomènes d'engravement, d'hypersédimentation et d'inondation – Tribus de la chaîne.....	217

Tableau 44 : Impacts des phénomènes d’engrèvement, d’hypersédimentation et d’inondation – Tribus du littoral.....	218
Tableau 45 : Synthèse des discours collectés à propos des dynamiques de déplacement envisageables en réponses aux contraintes foncières. Tribus de la chaîne.....	221
Tableau 46 : Synthèse des discours collectés à propos des dynamiques de déplacement envisageables en réponses aux contraintes foncières. Tribus du littoral.....	222
Tableau 47 : Synthèse des impacts de l’hypersédimentation constatés sur les activités vivrières. Tribus de la chaîne.....	223
Tableau 48 : Synthèse des impacts de l’hypersédimentation constatés sur les activités vivrières. Tribus du littoral.....	224
Tableau 49 : Synthèse à dire d’habitants de l’impact de la boue sur les tribus de la chaîne et de l’estuaire. Tribus de la chaîne.....	226
Tableau 50 : Synthèse à dire d’habitants de l’impact de la boue sur les tribus de la chaîne et de l’estuaire. Tribus du littoral.....	227

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

BDMF	Base de données Météo France
BDOPO NC	Base de données topographique du gouvernement de la Nouvelle-Calédonie
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CDS	Mine de Camp Des Sapins
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
EA	Équipe d'accueil
ICP-MS	Spectrométrie de masse par plasma à couplage inductif (métaux)
IMMILA	IMPact de la Mine au LAgon
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
IRSTEA	Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (devenu INRAE en 2020)
ISEA	Institut des Sciences Exactes et Appliquées
LiDAR	Light Detection And Ranging
LSCE	Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
MES	Matières en suspension
SIG	Système d'Information Géographique
UMR	Unité Mixte de Recherche
UNC	Université de la Nouvelle-Calédonie
XRF	Fluorescence des Rayons X

PREAMBULE

Le présent document correspond au **rapport scientifique** final du programme *IMMILA* (Impact de la mine au lagon) – *Qualification et quantification des flux de la mine au lagon et de leurs impacts*.

IMMILA est un programme de recherche mené par un consortium scientifique réunissant l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC LIVE-EA 4243 devenu ISEA EA-7484), l'IRD (UMR 228 ESPACE-DEV), l'IRSTEA (Unité ETNA), le CEA (LSCE) associé à l'Université de Lyon (UMR-CNRS 5600-IRG), le BRGM, le CNRS (UMR M2C Caen) et deux bureaux d'études en noms propres : Rouetis R&D et Elisabeth Worliczek Consultant.

Le présent rapport s'accompagne d'une **synthèse** et d'un **volume d'annexes** contenant les contributions complètes des partenaires scientifiques.

Ce programme *IMMILA* s'insère dans un ensemble de deux projets menés en parallèle sur le « Transport solide dans les bassins versants miniers » composé de :

- ⊙ **IMMILA** Impact de la mine au lagon, coordonné par Michel ALLENBACH, UNC (2015-2019).

3 volumes :

- **Rapport synthétique des travaux** du projet « *IMMILA* »
- **Rapport scientifique final** du projet « *IMMILA* »
- **Volume des annexes** « *IMMILA* » (Contributions intégrales)

- ⊙ **GESTION DU PASSIF de l'activité minière et REMEDIATION**, coordonné par Manuel GARCIN, BRGM (2015-2018).

3 volumes :

- Rapport scientifique du projet « Gestion du passif de l'activité minière et remédiation »
- Guide méthodologique « Gestion du passif de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie »
- Référentiel d'application « Largeur des bandes actives : un outil empirique pour évaluer le sur-engravement »

Cet ensemble d'ouvrages traite des causes et des mécanismes de mobilisation des matériaux le long des cours d'eau, des différentes approches pour leur étude et propose des mesures de remédiation aux engravements anciens ou plus récents des rivières calédoniennes.

1. PRESENTATION DU PROGRAMME

1.1. LA PROBLÉMATIQUE

La présence d'exploitations minières à ciel ouvert sur de nombreux bassins versants des massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie entraîne des taux d'érosion importants sur les versants et des transferts non moins importants de sédiments (grossiers et fins) et d'éléments solubles des creeks jusqu'aux lagons.

Le programme *IMMILA* vise à caractériser l'influence des exploitations minières sur ces transferts dans différents compartiments (versant, rivière, estuaire, lagon) du transect de la mine au lagon. Il s'inscrit à la suite du programme « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers*¹ » réalisé entre 2011 et 2014 sur financement du CNRT. Ce dernier était centré sur l'hydrologie minière, la quantification et la qualification des flux d'eau et de matières issus des bassins versants miniers. Ce travail a été mené au plus près des sources de production des « fines », les MES (matière en suspension) afin de délivrer un guide des bonnes pratiques de l'hydrologie minière² visant à minimiser l'impact des « eaux rouges » sur les rivières et le lagon.

IMMILA a pour objectif de s'intéresser préférentiellement à l'autre composante des apports issus des exploitations minières, les « grossières », qui engravent la rivière Thio et ses affluents. À ce titre, le programme *IMMILA* est lié au programme du CNRT « *Gestion du passif* » restitué en 2018. Ce dernier a produit un guide méthodologique³ dont les principes ont été appliqués pour analyser la situation du bassin versant de la zone étudiée. L'étude des « fines » qui posent problème dans la partie aval de la rivière et à son embouchure est abordée dans cette monographie régionale, mais comme indiqué plus avant, l'effort de recherche principal a été consacré au charriage des éléments grossiers.

¹ Allenbach M. et al. (2015). *Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers »*. CNRT « Nickel & son environnement ».

² Mathys N., Caze N., Richard D. (2015) - « *Guide méthodologique pour le suivi hydrologique et sédimentaire des petits bassins versants miniers* ». Guide méthodologique. CNRT « Nickel & son environnement ».

³ Richard D., Garcin M., Liébault F., Recking A., Piton G., Sabinot C., Worliczek E., Lesimple S., Bertrand M., Gastaldi Y., Burlat T., Gosset L., Pidjo A., Gosselin N. (2017) – « *Gestion du passif minier en Nouvelle-Calédonie* ». Guide méthodologique. CNRT « Nickel & son environnement ». 79p, 20 fig. 9 tab.

1.2. LE CHANTIER GÉOGRAPHIQUE

La problématique est abordée à partir de l'exemple de la région de Thio (Fig.1), haut lieu de l'exploitation minière sur la côte est de la Grande Terre néo-calédonienne depuis plus de 150 ans.



Figure 1 : Présentation géographique rapide du chantier géographique d'IMMILA

Le travail a été mené préférentiellement sur le bassin versant de la Thio, bassin versant de 396 km² formé de roches variées, dont une partie de péridotites, de longue date exploitées par les mineurs. Il a également été réalisé, chaque fois que cela a été possible, sur le bassin versant de la Todré qui se jette en Baie de Port Bouquet, à une douzaine de kilomètres vers le sud-est de l'embouchure de la rivière Thio. Ce bassin est lui-même composé de plusieurs types de roches dont des péridotites qui ont été moins impactées par l'activité minière. De ce fait, ce bassin de 61 km² a été proposé comme bassin de référence. Ce choix est loin d'être parfait du fait des superficies et géologies différentes entre les deux bassins, du profil en long de la rivière et des pentes différentes de celles du bassin versant de la Thio. Par ailleurs, la zone n'est pas vierge de travaux menés par les mineurs, mais à proximité de l'embouchure de la Thio, ce bassin représentait le moindre mauvais choix pour essayer d'avoir des comparaisons entre un domaine minier fortement impacté et un équivalent moins impacté.

1.3. UNE APPROCHE MULTI-TEMPORELLE

L'approche multi-temporelle est schématisée sur la figure 2.

Le programme *IMMILA* se propose de réaliser une approche méthodologique multi-temporelle qui s'articule autour de trois échelles de temps emboîtées.

- « Le temps long » : Caractérisation des apports sédimentaires au littoral par l'étude de séquences de l'Holocène récent (quelques siècles) ;
- « La période récente » : Caractérisation des évolutions des bassins versants, des rivières et du littoral au cours des 50 dernières années ;
- « L'actuel » : Caractérisation de la dynamique actuelle des flux dans les rivières et dans le lagon.

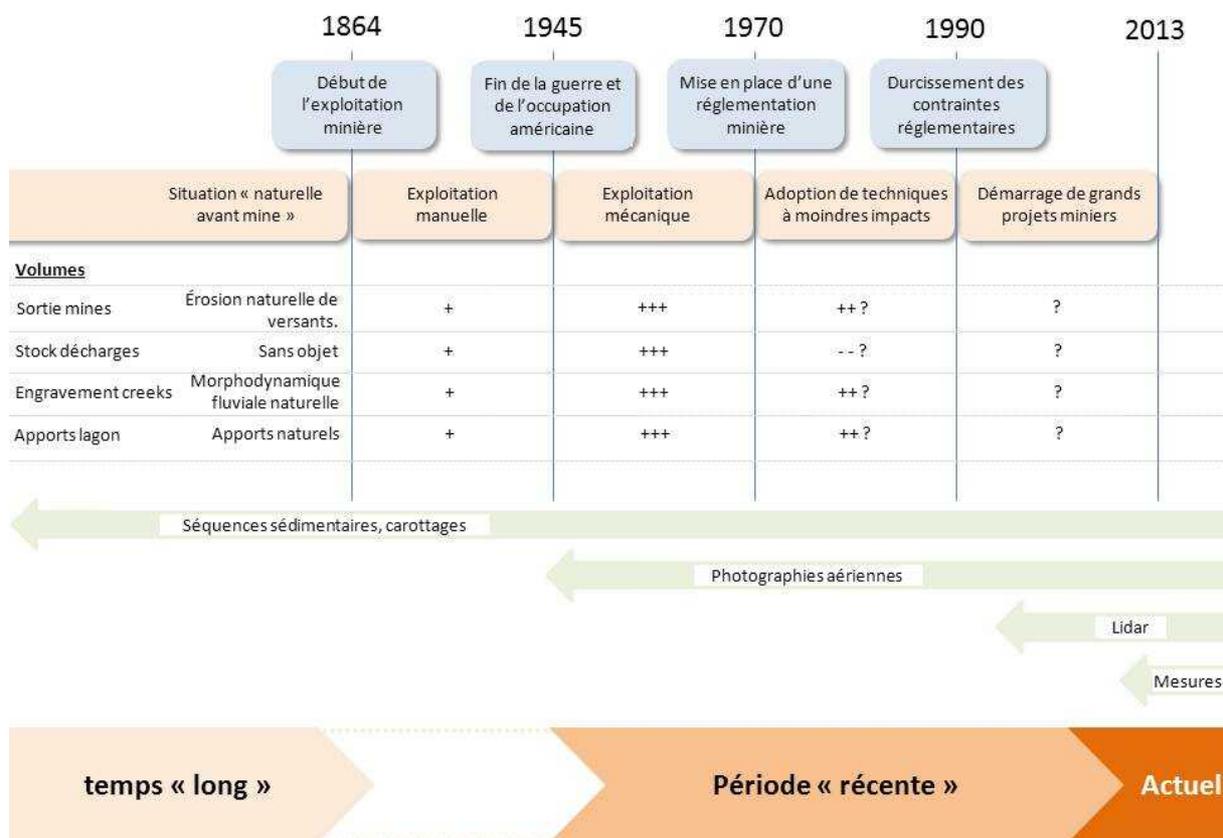


Figure 2 : L'approche multi-temporelle du programme « IMMILA »

1.4. LES TÂCHES PRINCIPALES DU PROGRAMME

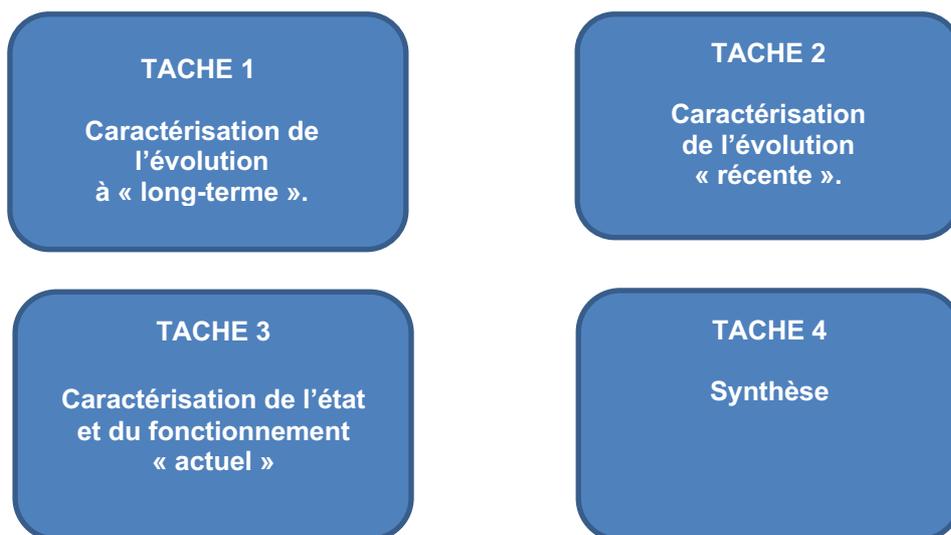


Figure 3 : L'organigramme des tâches d'IMMILA

L'organigramme des tâches présenté à la figure 3 permet d'expliciter la démarche générale du consortium. Il a été recherché sur la base de données multivariées la compréhension du fonctionnement des bassins versants de la Thio et de la Todré avant l'exploitation minière (évolution à long terme), puis au fil de celle-ci (évolution récente) et ce, jusqu'à la période actuelle (fonctionnement actuel).

1.5. STRUCTURATION DU RAPPORT

Le rapport présente, en respectant les trois échelles de temps, les contributions aux différentes tâches du programme (voir Fig.3), soit successivement : (i) l'évolution à long terme et plus spécifiquement la dynamique ancienne des apports au littoral (section 2), (ii) l'évolution récente (section 3), et enfin (iii) l'état et le fonctionnement actuel du bassin versant de la Thio (sections 4 à 6). La section 7 constituant une synthèse des résultats du programme IMMILA.

2. DYNAMIQUE ANCIENNE DES APPORTS AU LITTORAL

Selon les objectifs du programme, l'évolution à long terme vise à qualifier et quantifier les transferts et apports sédimentaires au littoral par l'étude de séquences de l'Holocène récent pour tenter de discriminer la part anthropique de la part naturelle de l'érosion des sols.

Pour essayer de comprendre ce que pouvait être la dynamique des apports à la zone littorale avant l'exploitation minière afin de pouvoir comparer les faits du passé avec ceux plus récents associés au temps de l'exploitation minière, deux approches méthodologiques ont été mises en œuvre :

- Des levés **géophysiques THR** (très haute résolution) à l'interface terre-mer ;
- Des **sondages carottés** dans cette même zone

Il est à remarquer ici que ces deux méthodes s'appliquent à la totalité de la plage temporelle qui fait l'objet du programme et que leur mise en œuvre a permis d'apporter des éléments d'information à chacune des tâches.

2.1. LA SISMIQUE RÉFLEXION TRÈS HAUTE RÉOLUTION

Auteurs : I. Tessier (Univ. Caen, CNRS), I. Thinon (BRGM), S. Trinquart – Annexe 6

2.1.1. PRINCIPE GÉNÉRAL

La prospection des domaines sous-marins par géophysique repose sur l'étude des échos d'une onde acoustique émise artificiellement et réfléchi par des interfaces : le fond-marin et les limites entre les différentes couches qui constituent les sédiments déposés sous l'eau. Le bateau remorque à l'arrière le système sismique constitué d'une source et de récepteurs sismiques. À bord, se trouve le système d'enregistrement des données et la génératrice.

Les sources haute résolution et très haute résolution les plus couramment utilisées pour la prospection des environnements côtiers (plateformes) sont électriques (sparker) et électromécaniques (boomer). Ces sources diffèrent en termes de puissance et de fréquence du signal émis. La source sismique envoie une impulsion à intervalles de temps réguliers. Une partie du signal est réfléchi sur le fond, une partie pénètre sous le fond et est partiellement réfléchi sur les discontinuités présentes (réflecteurs sismiques).

L'échelle verticale de la section sismique est une échelle de temps. La pénétration sous le fond-marin dépend de l'atténuation du signal, fonction du matériau et de la fréquence. La sismique utilisée pour étudier les domaines littoraux, où l'épaisseur des sédiments n'excède pas quelques dizaines à une centaine de mètres en général, est dite « très haute résolution » (THR). Elle répond à une double nécessité : d'une part, l'étude très fine des sédiments (résolution métrique à inférieure), d'autre part, une mise en œuvre dans un environnement peu profond.

2.1.2. MISE EN ŒUVRE À LA MER

Deux sources complémentaires ont été mises en œuvre pour l'acquisition des données sismiques sur le prisme d'embouchure deltaïque de la Thio. Le levé au droit de l'embouchure de la Todré n'a pas pu être réalisé du fait de la dangerosité du site (zone non hydrographiée). La première est une source boomer dont le signal possède une très bonne résolution, inférieure généralement à 50 cm, mettant en évidence des détails très fins de l'architecture du remplissage sédimentaire meuble. Par contre, sa pénétration est mauvaise dans les roches. La seconde est une source sparker qui peut pénétrer dans le substratum rocheux et permet d'imager des sédiments meubles très grossiers, mais avec une moindre résolution (de l'ordre du mètre) que le boomer.

Compte tenu de l'objectif assigné au travail qui était de caractériser le plus finement possible le recouvrement sédimentaire superficiel associé aux transferts et transports de la rivière, c'est l'usage de

la source boomer qui a été privilégié dans les petits fonds littoraux. Les levés au mini-sparker ont permis d'imager le substratum rocheux sur lequel repose les sédiments pour estimer la puissance des dépôts dans la zone de l'embouchure.

La campagne d'acquisition marine de sismique réflexion nommée « IMMILA », s'est déroulée du 14 au 18 Novembre 2016 dans la région de Thio sur le bateau Gouaro (Fig. 4).



Figure 4 : Le bateau Gouaro utilisé pour le levé et le boomer Seistec-IKB (en haut), le matériel THR source sparker (en bas)

Ont été réalisés : 125 km de profils de sismique réflexion THR (Fig. 6) dont 30 km en boomer (16 profils) et 95km en sparker (14 profils) imagent plusieurs dizaines de mètres (40-90 m) sous le fond marin avec une résolution spatiale et verticale métrique. Le plan de position de la navigation suivie en levé dans la zone de l'embouchure est présenté à la figure 6.



Figure 5 : Le bateau en levé au voisinage de l'embouchure de la Thio

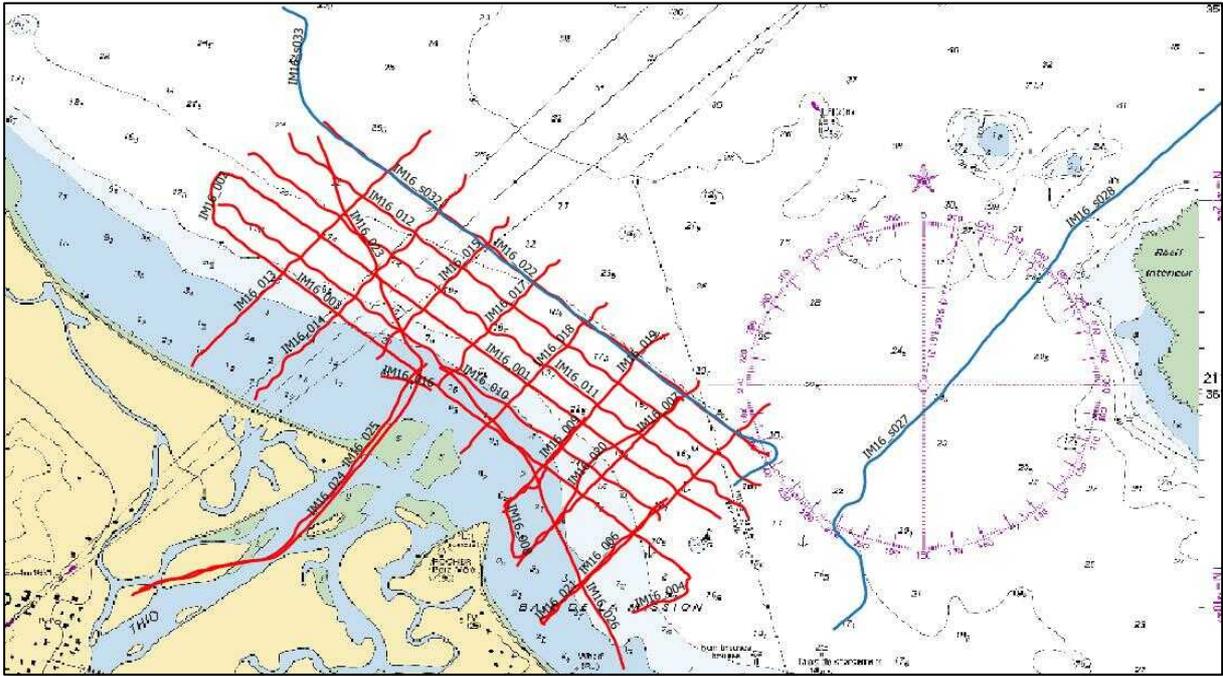


Figure 6 : Plan de position des levés dans la zone de l'embouchure de la Thio. En rouge, les profils réalisés au boomer et en bleu ceux du mini-sparker

2.1.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

2.1.3.1. Les grandes unités sismiques reconnues

Au-dessus de la base du remplissage sédimentaire (nommé U0), trois unités sismiques principales, nommées U1, U2 et U3, ont été reconnues dans le remplissage sédimentaire selon leur géométrie, leurs limites supérieures et inférieures (onlap, toplap, downlap, conformes et non conformes) et leur faciès acoustique (amplitude, continuité, fréquence et configuration des réflecteurs internes).

La figure 7 illustre un profil type boomer, parallèle à la côte, permettant de visualiser les quatre unités citées (U0, U1, U2 et U3). Sur la figure, l'enregistrement sismique est au-dessus du montage et la coupe interprétative au-dessous.

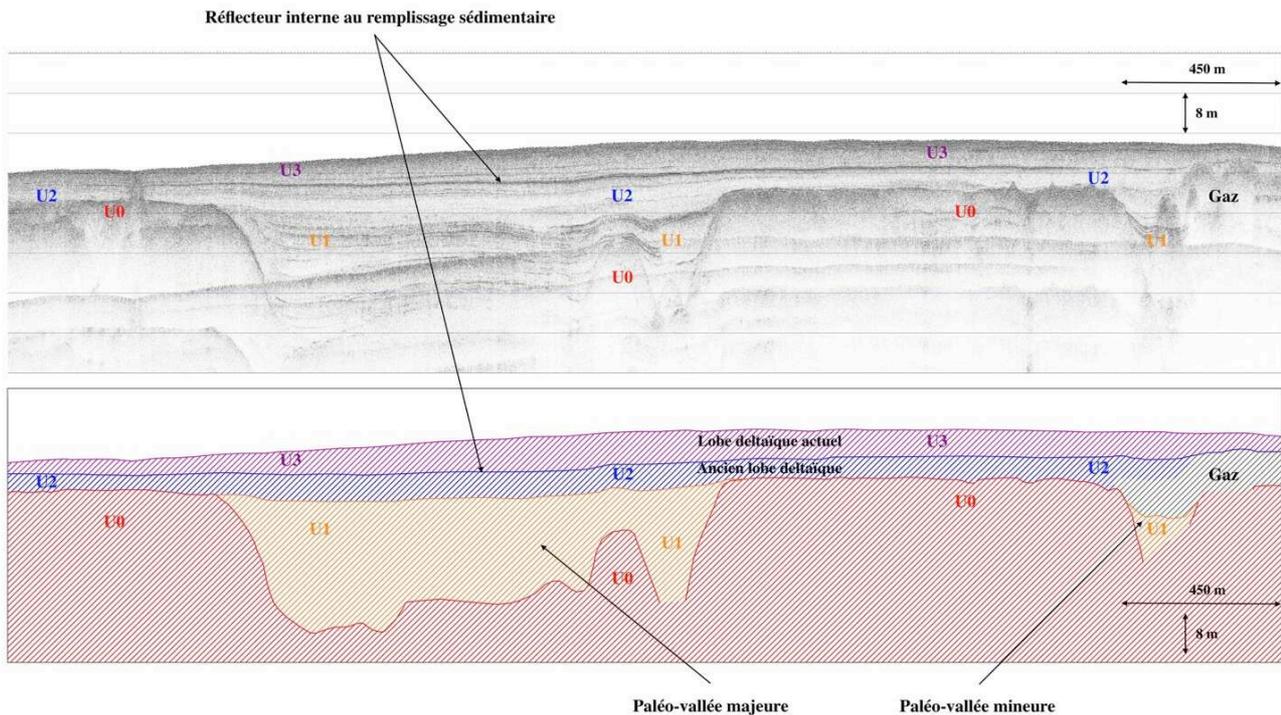


Figure 7 : Profil type (boomer), parallèle à la côte (enregistrement sismique au-dessus et coupe interprétative au-dessous)

⊙ L'unité U0

L'unité U0 représente le socle acoustique (l'onde ne pénètre pas plus bas) de la construction deltaïque de la Thio. Il s'agit de la base du remplissage sédimentaire observable sur les profils sismiques levés.

Selon la nature du substrat, les faciès acoustiques dans U0 sont variables, mais la surface sommitale qui est érosive montre :

- Une paléo-vallée majeure située dans l'axe de l'exutoire actuel de la Thio. Elle est orientée du Sud-Ouest vers le Nord-Est avec un remplissage sédimentaire épais d'environ 40m ;
- Une paléo-vallée mineure, située au sud du Botaméré, orientée de l'Ouest vers l'Est, avec un remplissage sédimentaire d'environ 20m d'épaisseur.

⊙ L'unité U1

L'unité U1 repose sur U0. Sa limite inférieure affiche tantôt une discordance angulaire (en onlap), tantôt une configuration conforme sur U0. Dans la majeure partie du delta, sa limite supérieure est conforme, parfois en toplap. Sa forme extérieure « drapante » vient lisser la morphologie du socle acoustique sous-jacent (remplissage des paléo-vallées). U1 a une épaisseur maximale d'environ 30 m. U1 n'est pas présent partout, elle correspond au comblement des paléo-vallées. Elle est caractérisée par une configuration oblique, sigmoïdale et parallèle, parfois masquée par le gaz montrant un faciès chaotique. Elle disparaît localement sur les sommets du socle acoustique sans entrer en contact avec ce dernier. Les nombreuses discordances angulaires au sein de cette unité laissent suggérer plusieurs phases de remplissage. Sur l'extrémité Sud des profils, au niveau de la paléo-vallée mineure, l'interprétation sismique est plus difficile à cause du gaz et elle ne permet pas de conclure sur la présence de U1.

⊙ L'unité U2

L'unité U2 est l'unité intermédiaire du remplissage sédimentaire du delta. Elle est présente partout. Elle repose sur U1 ou directement sur U0. Elle est en conformité avec U1 et U0. Elle comprend trois faciès acoustiques, FS1, FS2 et FS3 et présente une configuration globale « drapante » sur U0 et U1. L'épaisseur de U2 varie de 4 à 8 m. Sur la base de sa configuration interne, U2 peut être subdivisée en

trois séquences acoustiques élémentaires (susnommées) constituées d'une succession de réflecteurs à faible amplitude / moyenne continuité, de réflecteurs à faible continuité / moyenne amplitude et de réflecteurs chaotiques. Les séquences élémentaires de U2 présentent une configuration aggradationnelle (surface conforme) dans la partie centrale du delta (au niveau de l'exutoire actuel de la Thio) et des terminaisons qui diminuent en amplitude dans les parties distales des profils longitudinaux. Il s'agit d'un ancien lobe deltaïque limité à son sommet par un réflecteur continu et de forte amplitude présent sur l'ensemble de la zone cartographiée que nous avons appelé rail interne et que l'étude du caractère sismique n'a pas permis d'identifier avec certitude.

⊙ **L'unité U3**

L'unité U3 est présente partout et repose directement sur U2 par l'intermédiaire du rail interne. L'épaisseur de U3 varie de 6 à 12 m. Sur la base de sa configuration interne, U3 est matérialisée par deux faciès acoustiques, FS1 et FS2. Ces deux faciès sont constitués d'une succession de réflecteurs à moyenne amplitude / faible continuité et de réflecteurs à faible continuité / forte amplitude. Les faciès élémentaires de U3 présentent une configuration aggradationnelle (surface conforme) dans la partie centrale du delta (au niveau de l'exutoire actuel de la Thio) et des terminaisons en downlap, caractéristiques d'une progradation deltaïque, dans les parties distales des profils longitudinaux.

2.1.3.2. La représentation cartographique des résultats

Trois réflecteurs importants présents sur l'ensemble des enregistrements réalisés permettent de présenter la structure géologique simplifiée des fonds marins littoraux à l'embouchure de la Thio. Ils sont visibles sur la figure 8 qui présente deux enregistrements sécants, le premier parallèle à la côte orienté nord-ouest sud-est et l'autre perpendiculaire à la côte orienté sud-ouest nord-est. Il s'agit :

- Du réflecteur bleu correspondant au fond marin et au toit des formations constitutives du recouvrement sédimentaire superficiel ;
- Du réflecteur orange interne à la construction deltaïque, séparant deux lobes sédimentaires superposés au sein du recouvrement sédimentaire superficiel ;
- Du réflecteur rouge identifié comme base du recouvrement sédimentaire et toit du substratum acoustique.

La figure 9 est un montage représentant les traces superposées sur la même image de ces 3 réflecteurs pour l'ensemble des profils levés. Cette superposition fait apparaître la continuité spatiale de ces réflecteurs sur la zone cartographiée et la morphologie typique d'un cône deltaïque progradant vers le large.

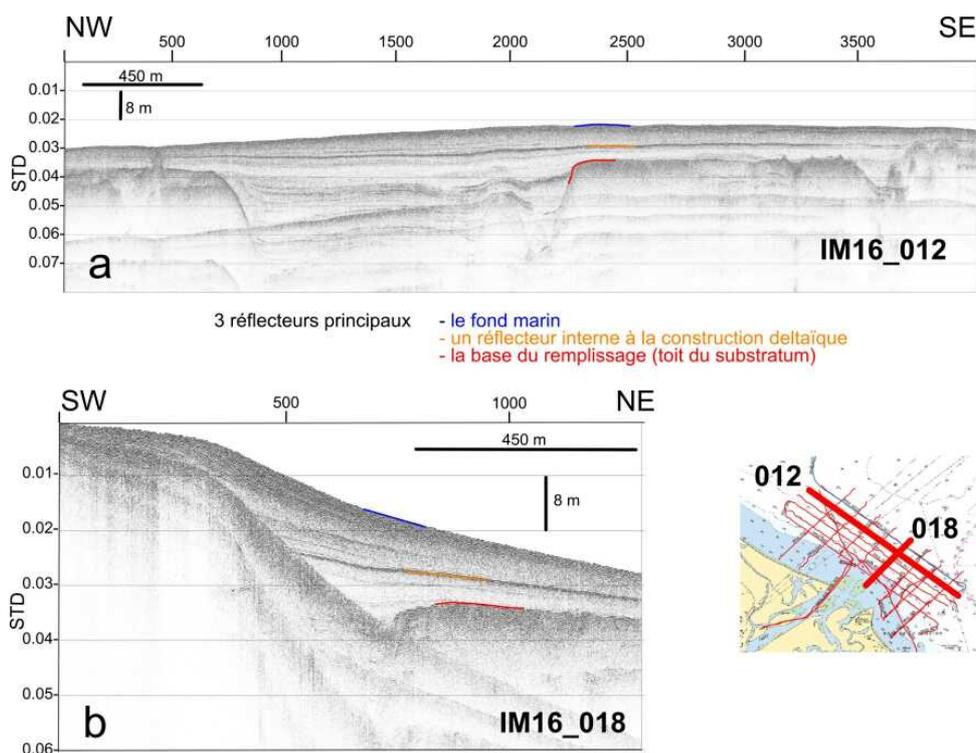


Figure 8 : Les 3 réflecteurs principaux sur deux profils géophysiques sécants de la zone marine proche de l'embouchure de la Thio

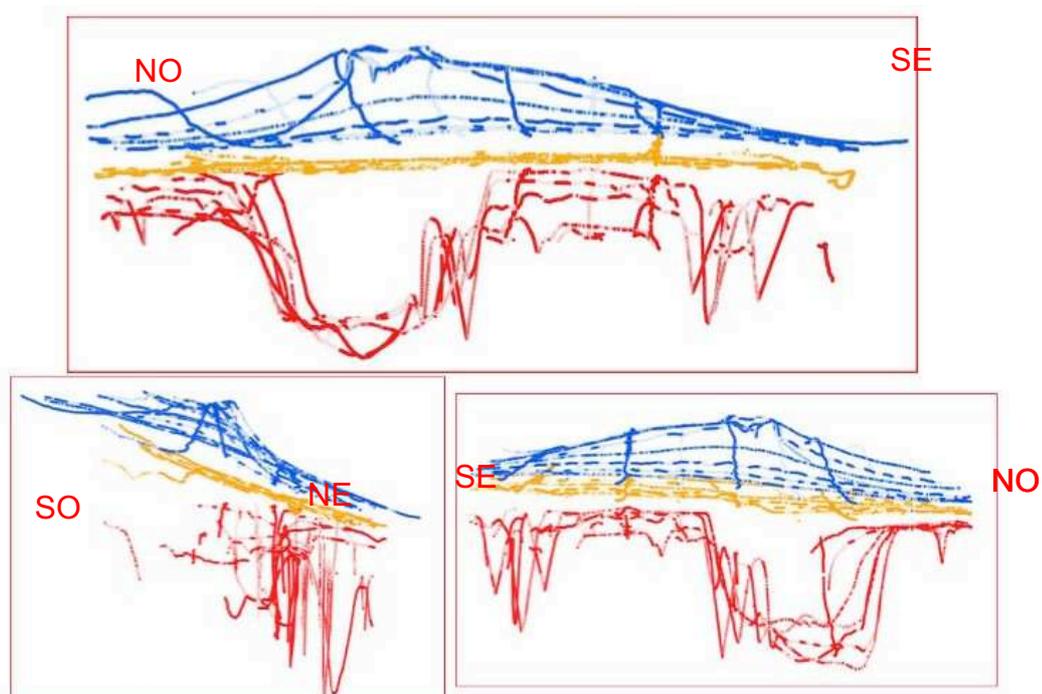
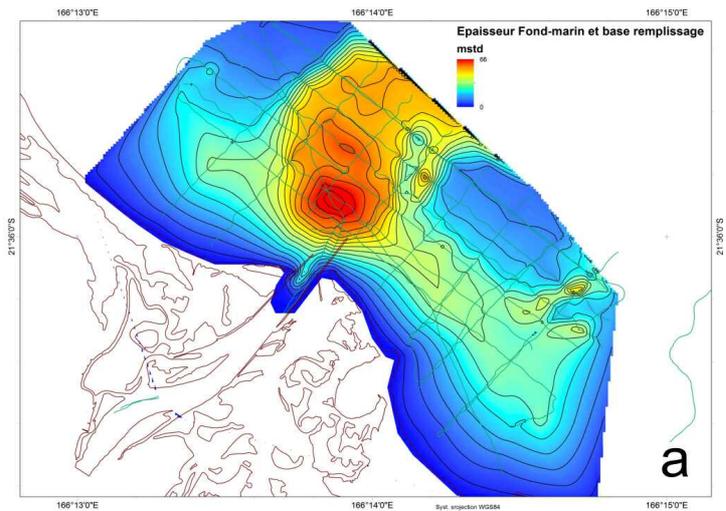


Figure 9 : Montage représentant les traces superposées des 3 réflecteurs principaux de l'ensemble des profils levé

Deux cartes isochrones en millisecondes temps double ont été tracées.

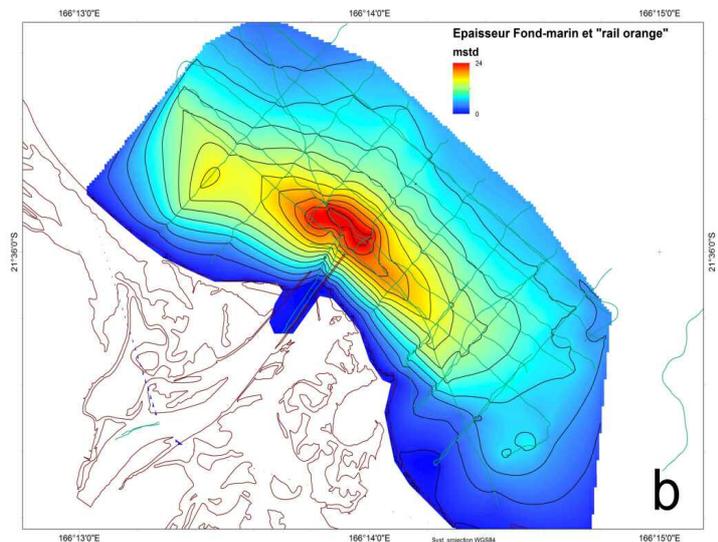
- La première carte image (Fig. 10) l'épaisseur de sédiment entre le fond marin (réflecteur bleu) et la base du remplissage sédimentaire (réflecteur rouge). **On reconnaît la paléo-vallée majeure orientée du sud-ouest vers le nord-est avec un remplissage sédimentaire d'environ 40m (sur la base d'une vitesse prise égale à 1600 m/s pour l'onde acoustique dans ce type de sédiment), ainsi que la paléo-vallée mineure, située plus au Sud, orientée de l'Ouest vers l'Est, avec un remplissage sédimentaire d'environ 20m.** Ces deux paléo-vallées se situent dans le prolongement de l'embouchure principale actuelle (paléo-vallée majeure) et d'une embouchure non pérenne (paléo-vallée mineure) qui s'ouvre en période de forte crue au sud du Botaméré. Les enregistrements sismiques confirment la continuité de ce fonctionnement, aujourd'hui toujours fonctionnel, au cours des temps géologiques passés ayant conduit à la construction des dépôts reconnus par la géophysique.

Figure 10 : Cartographie isochrone (mstd) de l'épaisseur du recouvrement sédimentaire entre le fond marin (réflecteur bleu) et la base du remplissage sédimentaire (réflecteur rouge)



- La seconde carte (Fig. 11) image l'épaisseur de sédiment entre le fond marin (réflecteur bleu) et le réflecteur interne (rail orange). On y reconnaît la forme « en éventail » typique des dépôts sédimentaires deltaïques progradants à l'embouchure principale de la rivière. Le maxima enregistré immédiatement au nord des digues dans l'axe de la paléo-vallée majeure est de 24 mstd, soit une quinzaine de mètres selon la loi de vitesse citée plus avant. Les dépôts post-rail sont beaucoup plus faibles dans l'axe de la paléo-vallée mineure (de l'ordre de 5 m au maximum), à peine visibles sur la carte, en accord avec le fonctionnement discontinu de cet exutoire temporaire de la Thio.

Figure 11 : Cartographie isochrone (mstd) de l'épaisseur du recouvrement sédimentaire entre le fond marin (réflecteur bleu) et le rail interne (réflecteur orange) du remplissage sédimentaire



2.1.4. ANALYSE INTERPRÉTATIVE ET CONCLUSIONS RELATIVES À L'ÉVOLUTION À LONG TERME DE LA ZONE LITTORALE

Les résultats précédemment présentés permettent de dire que l'avant-côte actuelle au droit de la vallée de la Thio montre la pérennité sur une longue période des exutoires de la rivière Thio et le caractère rythmé de l'évolution géomorphologique littorale dans un contexte de fluctuations du niveau de base (le niveau de la mer) soumis aux cycles glacio-eustatiques du quaternaire.

Les paléo-vallées aux flancs redressés (cf. figure 9) qui caractérisent la morphologie du réflecteur rouge ont été creusées au cours des bas niveaux marins associés aux périodes froides. Au cours du dernier épisode de ce type (le Würm daté entre -125 000 et - 12 000 ans, marqué dans le détail par plusieurs oscillations eustatiques), le niveau de la mer a pu descendre à plus d'une centaine de mètres au-dessous de ce qu'il est aujourd'hui. Cette régression marine a fait du lagon un espace continental, autorisant l'incision des thalwegs (les paléo-vallées) par l'eau de la rivière jusqu'aux exutoires synchrones de ces périodes : les passes actuelles au niveau du récif barrière.

Les dépôts de remplissage (U1, U2 et U3) correspondent à des phases superposées de comblement des paléo-vallées. Ces dépôts se mettent en place à l'occasion de périodes moins froides du Würm se traduisant par des remontées plus ou moins significatives du niveau de la mer.

L'unité basale U1 qui repose sur U0 (le socle acoustique) a une épaisseur maximale d'environ 30 m et elle n'est pas présente partout. Elle correspond au stade le plus ancien du comblement des paléo-vallées ayant pu être reconnu sur les enregistrements sismiques. Les nombreuses discordances angulaires au sein de cette unité laissent imaginer plusieurs phases de remplissage au sein même de cette unité.

Les unités U2 (épaisseur comprise entre 4 et 8m) et U3 (épaisseur comprise entre 6 et 12m) qui sont présentes partout sur la zone correspondent à des stades de remplissage plus récents que l'unité U1. Des rythmes sédimentaires s'observent au sein de ces séquences de remplissage, marqués par des réflecteurs plus ou moins continus et de plus ou moins grande amplitude (structures en lobes sédimentaires deltaïques superposés) qui témoignent de pulsations dans l'arrivée des dépôts et des oscillations du niveau de base.

Les épaisseurs de sédiments déposés dans les paléo-vallées au fil du temps géologique et sur l'éventail progradant deltaïque proche du littoral sont significatives.

En regard de la question posée par la quantification des apports sédimentaires de la Thio à la zone marine actuelle couverte par le levé géophysique, c'est au sein de la partie supérieure du prodelta marin (l'unité U3) que se trouve la réponse avec un premier élément quantitatif. **Cet impact qui ne peut pas être seulement minier, mais intègre des facteurs anthropiques (feux, déforestation) et naturels décrits dans d'autres volets de ce rapport a une épaisseur maximale de 19 mètres, bien moindre lorsque l'on s'éloigne de l'apex des dépôts.** Il n'est pas possible sur la base de la seule géophysique d'estimer quantitativement précisément le taux de sédimentation de cette zone. Pour le faire, il faudrait des datations dans les différentes unités identifiées, ce qui demande des forages et carottages en zone maritime, forages et carottages non autorisés par le budget alloué au programme. On ne peut que donner l'épaisseur maximale de ces dépôts sans précision d'âge. Qualitativement, on peut apporter deux éléments de précision. Le premier concerne le caractère acoustique de l'unité U3. Il n'apparaît pas de réflecteur ou de séquence se distinguant particulièrement des autres au sein du recouvrement sédimentaire superficiel au-dessus du rail interne, ce qui plaide pour un fonctionnement globalement « constant » au cours de cette période de dépôt. **On peut en conclure que l'impact de la mine à la zone marine actuelle s'intègre dans la normalité des faits identifiables par le levé géophysique.**

Le second élément concerne le rail interne séparant les unités U2 et U3 et il en est de même pour le réflecteur séparant U1 et U2. Ces réflecteurs marquent des faits hydrosédimentaires importants puisqu'ils sont présents sur toute la zone levée. Les dater permettrait de préciser les taux de sédimentation dans la zone. C'est dans cet esprit qu'il a été proposé (et accepté par le CNRT) de faire des carottages au plus près de la mer pour essayer d'atteindre le rail interne et dater les sédiments anté et post rail. C'est ce travail qui va maintenant être présenté.

2.2. LES SONDAGES CAROTTÉS

Auteur : M. Allenbach (UNC)

L'objectif découle de la conclusion du paragraphe précédent. L'analyse des enregistrements de sismique a permis de montrer que l'appareil sédimentaire deltaïque présent en mer au voisinage de l'embouchure de la Thio constituait la partie supérieure d'une séquence de remplissage de vallée incisée. On a conclu, à ce niveau, sur une épaisseur maximale de la partie deltaïque marine récente de 19 m pouvant être potentiellement attribuée, au moins en partie à l'anthropisation de la zone (les phénomènes naturels sont bien présents dans la zone), avec un questionnement sur l'origine et l'âge des deux lobes deltaïques séparés par une surface très régulière pentée vers le large (le rail interne ou réflecteur orange).

Pour essayer d'affiner ce résultat et « caler » lithologiquement et chronologiquement les unités et réflecteurs mis en évidence en sismique, il a été réalisé deux forages carottés permettant des pénétrations significatives (objectif ciblé : 25 m) à réaliser au plus près du trait de côte. Les forages étant inenvisageables en mer du fait du coût de telles opérations, le choix des emplacements de forage (Fig. 12) a été fait au plus près des extrémités de deux profils sismiques perpendiculaires à la côte, les profils IM16_014 (Fig. 13) pour le forage S2 situé sur la plage de Saint-Philippe au sud du Botaméré Mere et IM16_021 (Fig. 14) pour le forage S1 situé au nord de l'embouchure de la Thio.

L'objectif était d'essayer de forer au-dessus et au-dessous du rail interne (le réflecteur orange) pour mieux contraindre les spécificités des deux unités U2 et U3. À l'examen des réflecteurs identifiables sur les enregistrements sismiques, la réalisation du forage S1 permettait d'espérer traverser les horizons sédimentaires situés au-dessus du rail interne pour autant qu'ils ne biseautent pas à l'interface terre-mer actuelle. Pour le forage S2, le raisonnement était le même avec l'idée d'espérer traverser les horizons situés au-dessous du rail interne. Les profils sismiques et les cibles espérées sont respectivement présentés aux figures 12 et 13 pour les forages S1 et S2.

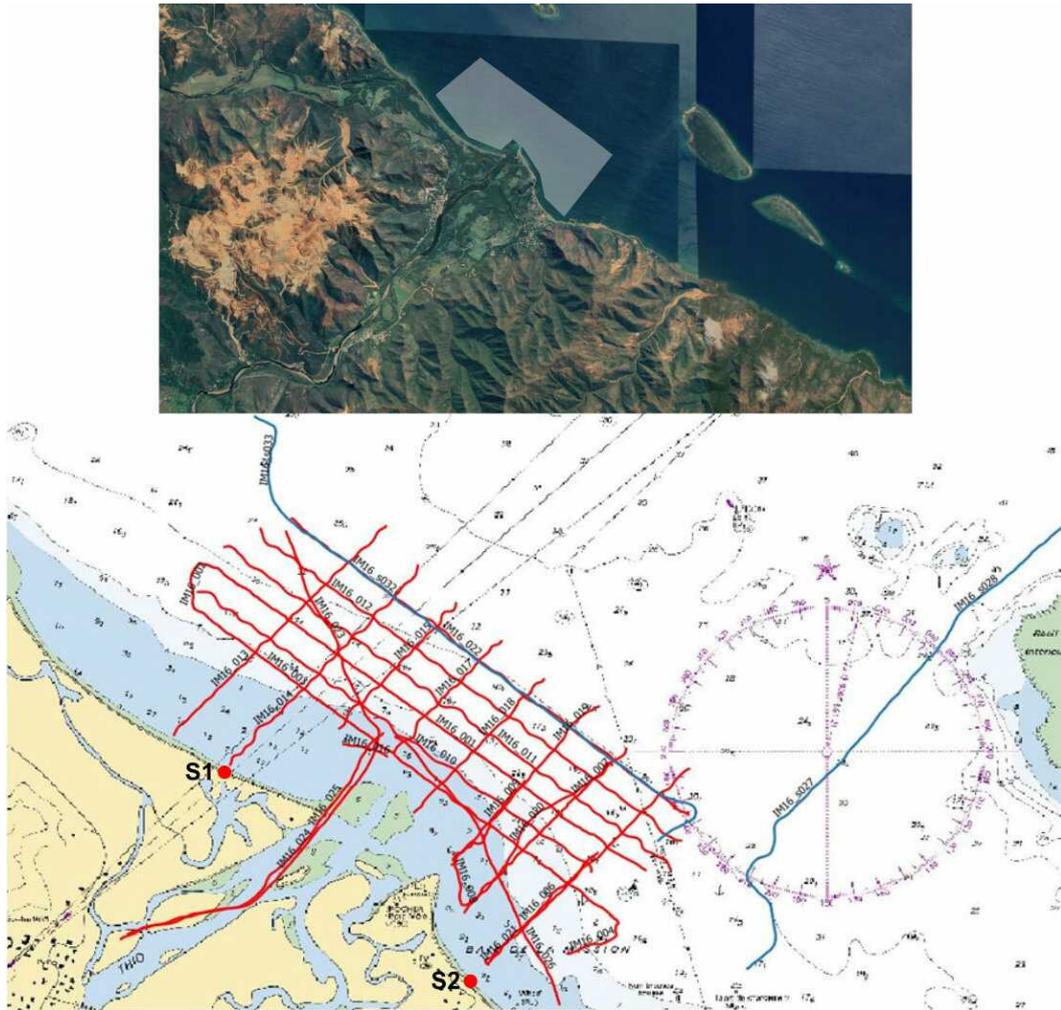


Figure 12 : Positionnement des forages

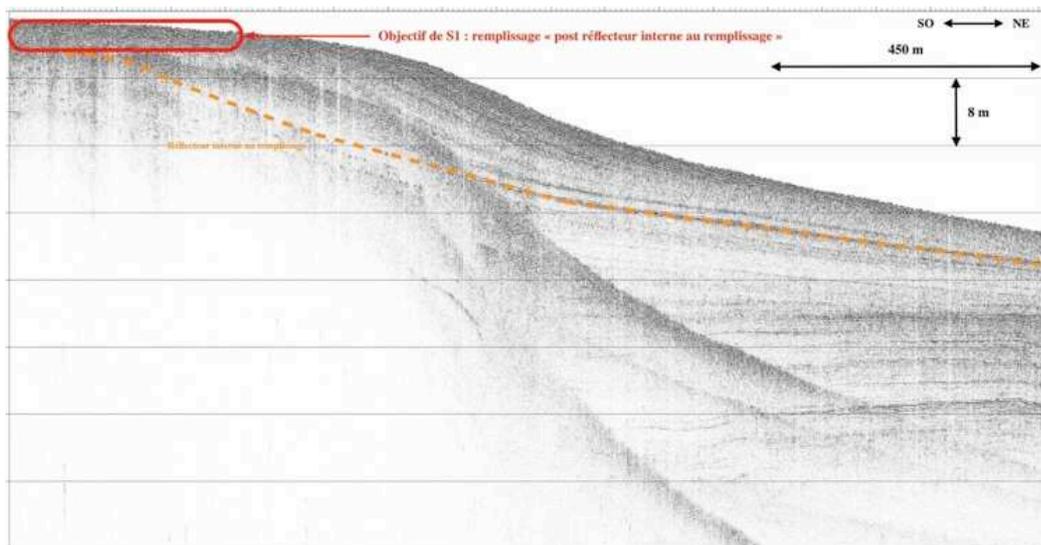


Figure 13 : Cible du sondage S1 situé au plus près de l'extrémité Sud-Ouest du profil sismique IM16_014 – Remplissage post réflecteur interne

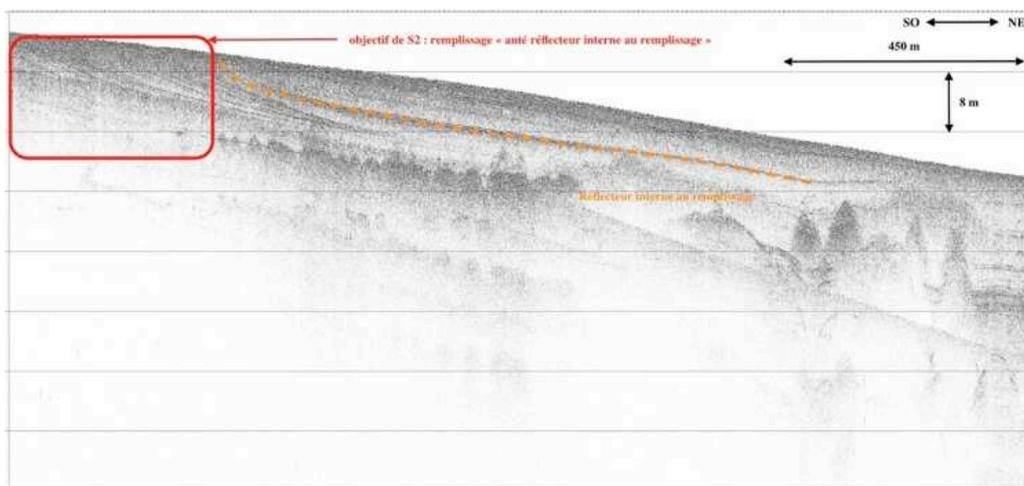


Figure 14 : Cible du sondage S2 situé au plus près de l'extrémité Sud-Ouest du profil sismique IM16_021– Remplissage anté réflecteur interne

2.2.1. LES OPÉRATIONS DE TERRAIN

Un premier forage a été réalisé sur le site S2 (au sud du Botaméré, cf. Fig. 12) au mois de septembre 2018 et le second (accès au site S1 malaisé consolidé par l'équipe technique municipale de Thio) au mois de mai 2019. La photographie (Fig. 15) illustre les opérations de terrain sur la plage de Thio, opérations menées avec la sondeuse Sédidrill de l'IRD équipée en tubes NQ (36,5mm de diamètre interne) et l'équipe de sondeurs de ce même institut. Le forage S2 a été arrêté à la côte 25.5m et le sondage S1 à la côte 31,5m



Figure 15 : Les opérations de mise en station de la foreuse (Sédidrill) et l'équipe de forage de l'IRD en haut de plage sur le point de forage S2.

2.2.2. LE TRAVAIL EN LABORATOIRE

Les analyses sédimentologiques ont été effectuées au sein du laboratoire de l'UMR CNRS M2C de l'Université de Caen, membre du consortium. Il a été réalisé :

- Une analyse granulométrique par granulométrie laser pour l'essentiel des échantillons, et par tamisage pour les sédiments les plus grossiers du sommet de la carotte ;
- Une mesure du taux de carbonate de calcium à l'aide d'un calcimètre Bernard.

Les échantillons ont été parallèlement envoyés par le BRGM, partenaire du consortium, pour datation ¹⁴C au laboratoire Beta Analytic Inc qui a réalisé les préparations et mesures. Deux séries de datations ont été effectuées, la première sur débris coquilliers, la seconde sur débris végétaux. Cette double procédure a été mise en œuvre, d'une part, pour être certain d'être dans des âges datables par la méthode et d'autre part, pour vérifier la cohérence des dates obtenues. On trouvera à l'annexe 11 la note technique⁴ rédigée par le BRGM pour ce travail réalisé dans le cadre du projet *IMMILA*.

Seules les analyses sédimentologiques, datations et l'interprétation des données dérivées du sondage S2 sont présentées dans le cadre de ce rapport. La raison est double. D'une part, nous avons voulu connaître les résultats du premier forage pour savoir si ceux-ci apportaient les éléments d'information escomptés. D'autre part, nous ne disposons pas des financements nécessaires pour étudier le second forage. Au vu des résultats obtenus sur le forage S2, un financement a été obtenu courant novembre 2019 pour effectuer le même type de travail sur les échantillons du forage S1. Ces résultats feront l'objet d'une note complémentaire qui sera adressée au CNRT au terme des analyses à réaliser au cours du premier trimestre 2020.

2.2.3. LES RÉSULTATS

2.2.3.1. Résultats de l'analyse sédimentologique et des datations du forage carotté S2

50 échantillons ont été prélevés le long du forage S2 dont la longueur totale est de 25.5m. Visuellement, le forage comprend trois membres bien distincts (Fig. 16) :

- De la base jusqu'à 19.5m : un ensemble de couleur beige-jaune, de sédiments fins (silt-argileux) ;
- De 19.5 m à environ 5-6m : un ensemble de couleur grise à gris-jaune, de sédiments silt-sableux à sablo-silteux, riches en débris coquilliers et de coraux ;
- De 5-6m au sommet : un ensemble de couleur gris beige, de sédiments sableux moyens à graveleux, contenant quelques bioclastes.

⁴ Garcin M., Flehoc Ch. (2019) – *Éléments radiochronologiques de la carotte Thio-1 (Nouvelle-Calédonie)*. Note technique BRGM DRP 19-257, juillet 2019, 17p., 8 fig., 6 tabl.

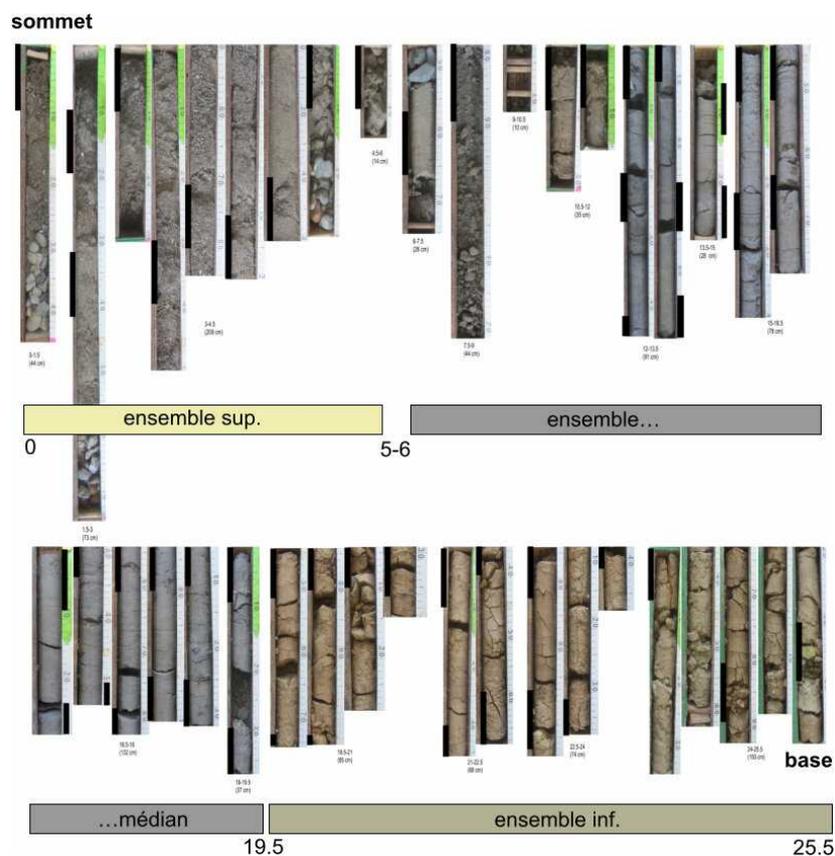


Figure 16 : Photographies des passes successives du forage S2. Chaque bande noire le long des tronçons indique la position des échantillons prélevés

L'ensemble des résultats est synthétisé dans la figure 17.

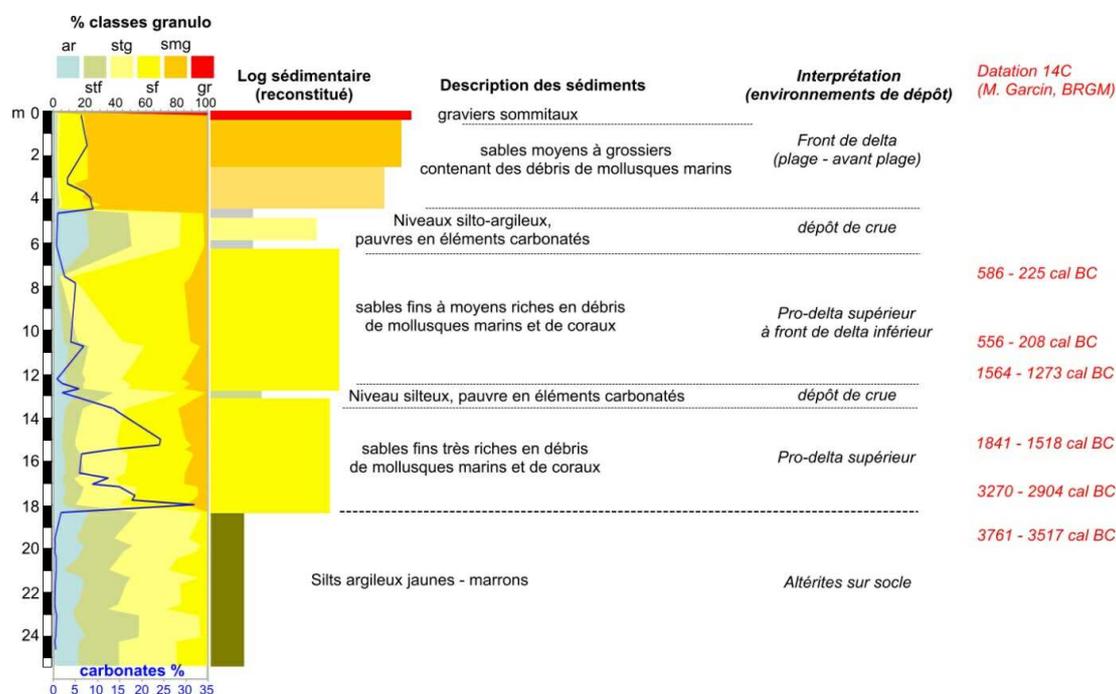


Figure 17 : Synthèse des résultats des analyses sédimentologiques réalisées sur le forage S2 et des interprétations en termes d'environnements de dépôt

La colonne de gauche présente l'évolution de la proportion en argile, silt, sable, graviers (ar : argile; stf : silt fin ; stg : silt moy-grossier ; sf : sable fin ; smg : sable moy-grossier ; gr : graviers) ainsi que le contenu en CaCO₃ (courbe en bleu). Le log sédimentaire simplifié présenté parallèlement est

reconstitué (il ne tient pas compte des passées de non récupération). La description succincte en termes de faciès sédimentaire est proposée à côté. Les datations ¹⁴C réalisées apparaissent en rouge à droite de la figure 17. Du fait de leur nature sablo-graveleuse, les dépôts de la partie supérieure du forage n'ont pas pu être datés.

L'ensemble des résultats obtenus le long du forage S2 montre :

- Une séquence sédimentaire globalement grano-croissante, silto-sableuse à sablo-graveleuse, surmontant une unité basale silto-argileuse ;
- La séquence grano-croissante contient des sédiments bioclastiques d'origine marine. Elle est interprétée comme une séquence marine de progradation deltaïque ;
- L'unité basale ne contient pas d'élément d'origine marine. Elle est interprétée comme des faciès continentaux d'altérites ;
- La séquence marine comprend deux membres : un membre inférieur (19.5 - 5m) de sables fins à moyens riches en débris de mollusques et de coraux. Ces sédiments sont interprétés comme des dépôts deltaïques distaux (prodelta supérieur à front de delta inférieur) ; un membre supérieur de sables moyens à grossiers voire graveleux, contenant quelques débris coquilliers. Ces faciès sont interprétés comme des dépôts deltaïques proximaux de front de delta (plage - avant plage) ;
- Deux niveaux de sédiments silto-argileux, pauvres en CaCO₃, sont intercalés dans la séquence marine grano-croissante, l'un à 13 m, l'autre autour de 5-6 m. Ces niveaux, dont les sédiments semblent être d'origine continentale compte tenu de leur granulométrie et leur faible teneur en carbonates, sont interprétés comme des dépôts de crue ;
- Les datations ¹⁴C indiquent que la séquence grano-croissante de progradation deltaïque a débuté il y a environ 6000 ans.

Le forage S1 réalisé dans un second temps a permis d'apporter des éléments de précision essentiellement litho-stratigraphiques sachant que contrairement au forage S2, les datations n'ont pas pu être faites.

51 échantillons ont été prélevés le long du forage S1 dont la longueur totale est de 32 m. Visuellement, 3 parties peuvent être distinguées le long du sondage :

- De la base à 25,5 m : un ensemble de couleur grise de sédiments fins (silts sableux) ;
- De 25,5 m à 18 m : un ensemble de couleur plutôt gris-beige montrant une alternance de sédiments sableux (fins à grossiers) allant parfois jusqu'à des graviers, et de sédiments fins (silts argileux à sableux) ;
- De 18 m au sommet : un ensemble de couleur plutôt gris-beige de sédiments grossiers (sables grossiers à graveleux). À noter au sein de cet ensemble sommital la présence d'un niveau de sédiment fin autour de 9 m.

L'ensemble des résultats est synthétisé dans la figure 18.

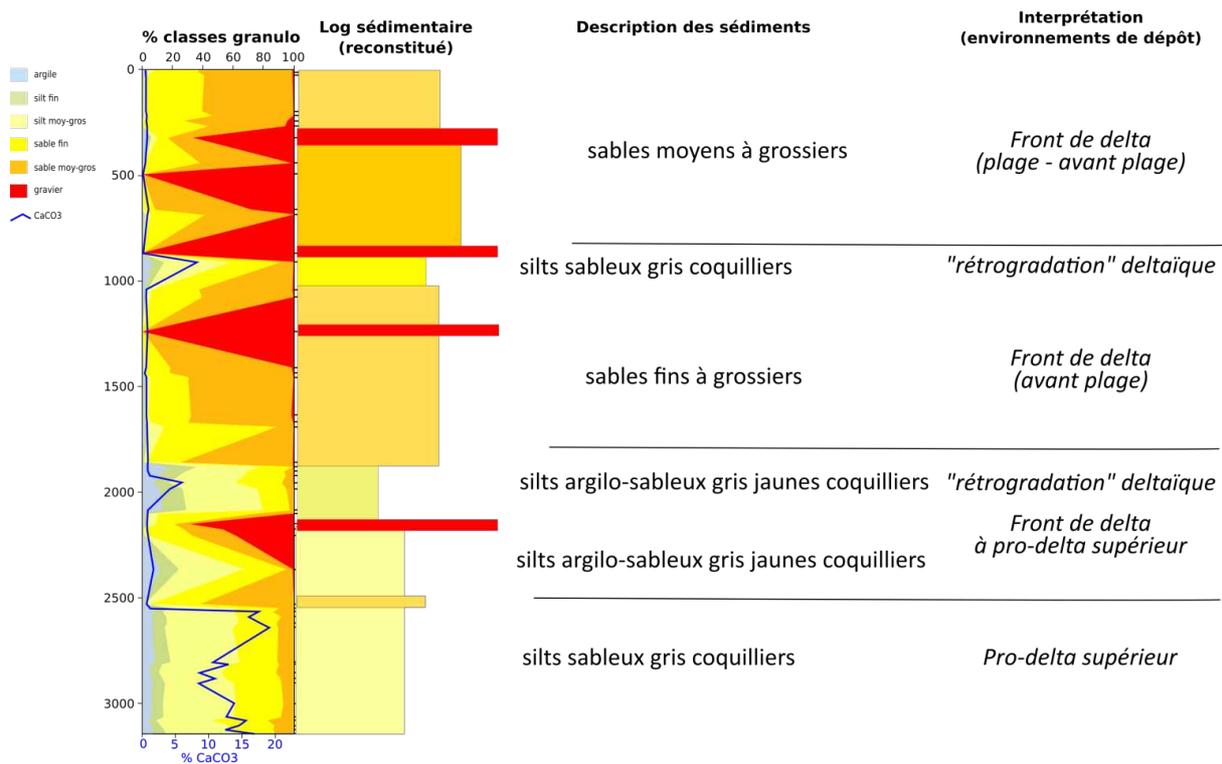


Figure 18 : Synthèse des résultats des analyses sédimentologiques réalisées sur le forage S1 et des interprétations en termes d'environnements de dépôt.

La colonne de gauche présente l'évolution de la proportion en argile, silt, sable, graviers ainsi que le contenu en CaCO_3 (courbe en bleu). Le log sédimentaire simplifié présenté parallèlement est reconstitué (il ne tient pas compte des passées de non récupération). La description succincte en termes de faciès sédimentaire est proposée à côté.

L'ensemble des résultats sédimentologiques obtenus le long du forage S1 montre :

- Une séquence sédimentaire globalement grano-croissante, depuis une unité basale silteuse passant plus ou moins progressivement à des sédiments sablo-graveleux ;
- Une unité basale relativement riche en carbonates (10 à 20 %), sous forme de fins débris coquilliers chétifs et localement des gastéropodes (turtelles) d'origine marine.

L'ensemble de la succession est interprété comme une séquence de progradation deltaïque depuis des sédiments fins de pro-delta supérieur à des sédiments grossiers de front de delta (plage). Les passées les plus grossières de la succession sont très peu carbonatées (très peu bioclastiques), tandis que les niveaux les plus fins, intercalés autour de 20 et 10 m dans les sédiments grossiers de la séquence progradante, sont plus carbonatés, comme les faciès pro-deltaïques. Ils reflètent par conséquent des périodes de rétrogradation deltaïque.

2.2.3.2. Corrélation entre le forage et la sismique

Le positionnement du forage S2 proche de la terminaison la plus côtière du profil sismique IM16_021, permet de proposer une corrélation entre les deux résultats. Pour corréler le forage S2 avec le profil sismique IM16_021, une simple prolongation vers la côte des principaux réflecteurs identifiés sur le profil a été réalisée, en tenant compte de leur pente, jusqu'au zéro marin, c'est-à-dire la plage (Fig. 19).

La corrélation est assez remarquable et permet en particulier de montrer que : la progradation deltaïque identifiée sur la sismique et qui comprend deux lobes, ne représente que la partie sommitale du forage. Elle surmonte logiquement des niveaux plus fins prodeltaïques qui passent vers le large à des

sédiments finement lités. Les deux niveaux de crue sont identifiés en sismique, et plus particulièrement le niveau supérieur. Son épaisseur et sa lithologie silto-argileuse en font une barrière de perméabilité le long de laquelle le gaz est en grande partie bloqué lors de sa migration vers la surface.

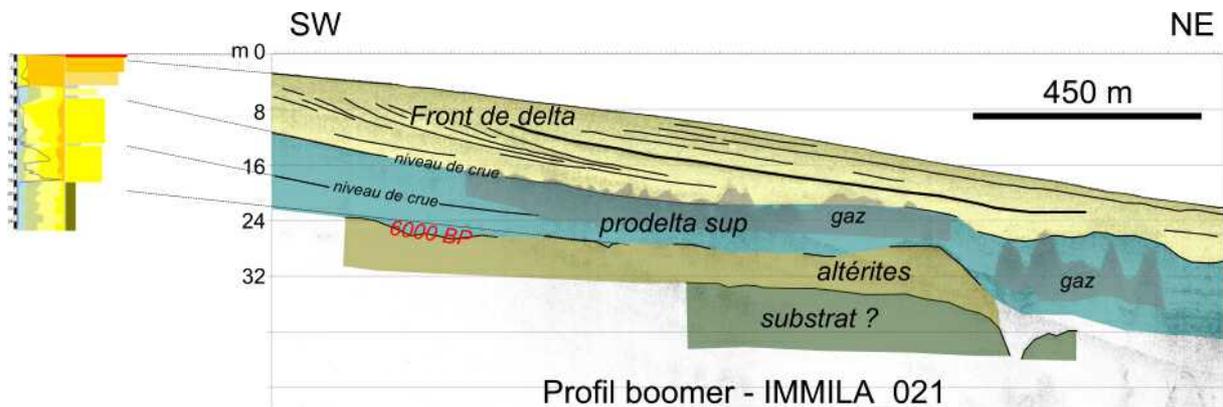


Figure 19 : Corrélation entre le forage S2 et le profil sismique IMMILA_021

Le positionnement du forage S1 proche de la terminaison la plus côtière du profil sismique IMMILA_014, permet, elle aussi, de proposer une corrélation entre les deux approches (sismique et forage).

Le profil IMMILA_014 (Figure 21) montre une accumulation deltaïque composée de deux lobes, surmontant une succession régulièrement litée constituant le remplissage d'une incision. La partie amont des lobes deltaïques est composée de faciès sismiques chaotiques avec des réflecteurs très discontinus, reflétant des sédiments grossiers. Cela est confirmé par la faible pénétration du signal boomer. Cette pénétration devient meilleure vers le large, corrélativement à l'affinement des sédiments deltaïques plus distaux.

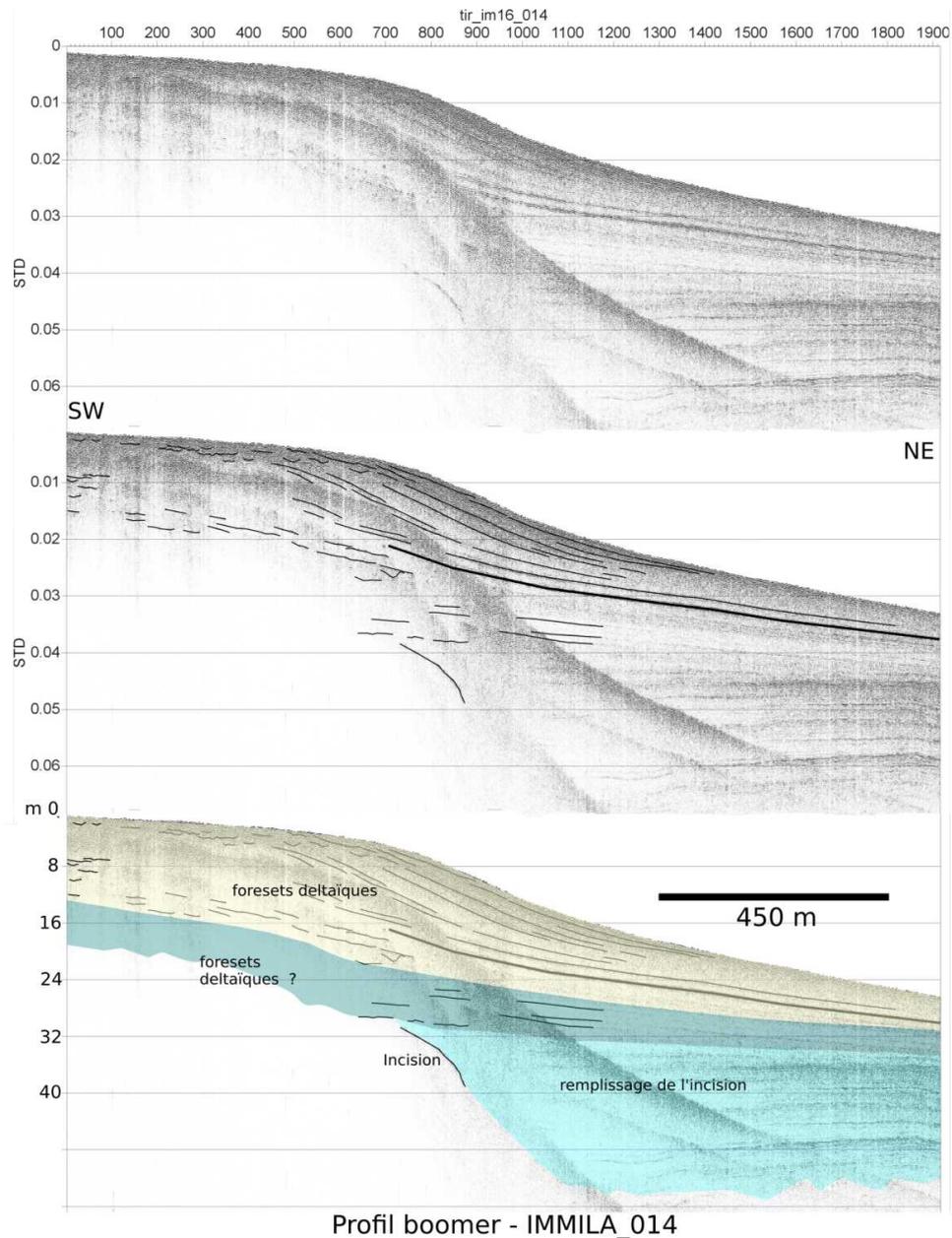


Figure 20 : Profil sismique IM16_014, brut (haut), avec les principaux réflecteurs pointés (milieu), interprété (bas)

Les échelles en mètres sont indiquées sur le profil interprété - une vitesse de 1600 m/s a été considérée pour la conversion temps - profondeur (attention à l'exagération verticale). 3 unités sismiques sont distinguées.

Pour corréler le forage S1 avec le profil sismique IM16_014, une simple prolongation vers la côte des principaux réflecteurs identifiés sur le profil a été réalisée en tenant compte de leur pente, jusqu'au zéro marin, c'est-à-dire la plage (Figure 21).

La corrélation montre que la progradation deltaïque identifiée sur la sismique ne représente que la partie sommitale du forage (les 10 premiers mètres). Aucune autre corrélation claire n'est possible et l'absence de datation ne permet pas d'apporter d'information supplémentaire à celle fournie par le sondage S2 concernant les taux de sédimentation de la séquence de dépôts.

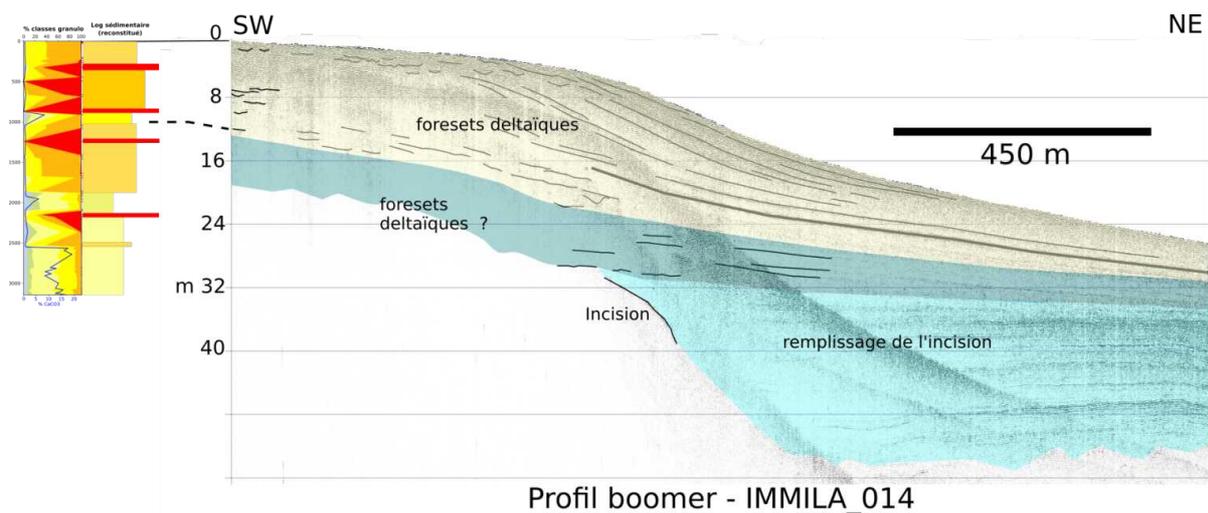


Figure 21 : Corrélation entre le forage S1 et le profil sismique IM16_014

2.2.3.3. Estimation des taux de sédimentation de la période pré-minière

Auteur : M. Allenbach (UNC) – Annexe 7

Quatre grandes périodes caractérisées par des vitesses de sédimentation différentes s'individualisent :

- Une période comprise entre 5200 ans BP environ et 4600 ans BP durant laquelle les vitesses de sédimentation sont de l'ordre de 4 à 5,3mm/an selon que l'on considère les âges obtenus sur débris coquilliers ou débris végétaux.
- Une période comprise entre 4600 BP et 3600 BP avec des vitesses de sédimentation plus faibles (de l'ordre de 2,2 à 2,4mm/an) et en dessous de la vitesse moyenne de dépôt.
- Une très forte augmentation des vitesses de sédimentation qui atteignent de 10,7 à 14,3mm/an sur une très courte période comprise entre 3700 et 3300 ans BP environ. Les vitesses y sont de 2,8 à 3,8 supérieures à la vitesse moyenne.
- Un retour à des vitesses plus modérées à partir de 3300 ans BP. Il faut toutefois noter que l'absence de datation dans la période postérieure à 2600-2500 ans BP ne permet pas de restituer la variabilité des vitesses de sédimentation au cours de cette période récente. Elle permet seulement de proposer un taux de sédimentation moyen dont on doit remarquer qu'il est proche de celui noté pour l'ensemble de la période investiguée par le forage.

Le forage S2 avait pour cible principale les dépôts anté-rail interne.

Le forage S1 était ciblé sur les dépôts post-rail interne, c'est-à-dire sur les dépôts les plus récents de l'Holocène qu'il a recoupé sur plus de 30m de profondeur. Les financements disponibles n'ont pas permis de réaliser les datations. Les échantillons restent disponibles pour cela.

3. EVOLUTION RÉCENTE DES BASSINS VERSANTS ET DES HYDROSYSTÈMES

Pour caractériser l'évolution du bassin versant depuis les débuts de l'exploitation minière (1864) jusqu'au début de la période actuelle marquée par la place d'une législation minière (1970), puis le durcissement des contraintes réglementaires avec la mise en place des grands projets industriels miniers et métallurgiques en Nouvelle-Calédonie, plusieurs approches méthodologiques ont été mises en œuvre.

Trois d'entre-elles ont permis de travailler sur le contexte général de l'évolution récente des bassins versants et des hydrosystèmes au cours de la période considérée. Il s'agit :

- D'un travail sur la **chronique météorologique et hydrologique** de la zone. Les trois premières phases du cycle sédimentaire (érosion/altération, transport et sédimentation) agissant sur l'évolution géomorphologique sont intimement dépendantes de l'action de l'eau et du climat. Il était donc essentiel d'étudier les chroniques disponibles pour comprendre ces éléments de forçage de l'évolution du bassin ;
- D'un **descriptif géomorphologique** global du bassin et de son évolution au cours du temps. Ce diagnostic diachronique a été réalisé en partie sur photographies aériennes pour la période ayant immédiatement suivi la seconde guerre mondiale où seule cette imagerie était disponible. Il a également été réalisé par télédétection spatiale avec une analyse commençant en 1986 (premières scènes accessibles) et se poursuivant jusqu'à 2015. Ce faisant, ce volet du travail a permis de caractériser la situation à la fin de la période d'exploitation « sauvage » de la ressource, au moment où les premières mesures réglementaires commencent à être appliquées et à donner des résultats, puis le suivi sur 30 ans de la situation consécutive à la mise en place de la législation minière. Si l'analyse sur photographie aérienne a été essentiellement faite pour caractériser l'impact de la mine (cf. alinéa suivant), la télédétection spatiale avait pour objectif d'étudier l'évolution des bassins versants sous l'angle des relations sols nus/végétation ;
- D'une **analyse cartographique diachronique** du surengrèvement des hydrosystèmes à partir d'une analyse et d'une photo-interprétation de l'imagerie aérienne et satellitale disponible.

Une quatrième approche a ciblé la quantification et l'analyse de l'évolution au fil du temps des surfaces minières ayant impacté le bassin. Deux voies complémentaires ont été travaillées : la **quantification des tonnages et volumes mis en décharge**, d'une part, et l'évaluation de l'**évolution des surfaces de sols nus** réalisé selon une typologie spécifique des sols nus.

3.1. CHRONIQUE MÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROLOGIQUE

Auteurs : O. Navratil (Univ. Lyon) et M. Garcin (BRGM) – Annexe 3

Le projet *IMMILA*, vise à caractériser les flux de matières de l'amont des bassins versants calédoniens jusqu'au littoral sur le chantier géographique du bassin versant de la Thio. La présence de mines de nickel à ciel ouvert et la pratique consistant à verser les déchets miniers sur les pentes jusqu'en 1975 a impacté (sur-engrèvement des rivières et des creeks) le fonctionnement naturel de l'hydrosystème.

Afin de mieux comprendre les moteurs et dynamiques de cette évolution, il est nécessaire de mettre en perspective le sur-engrèvement avec les différents facteurs de forçage ayant conduit à celui-ci. De nombreux facteurs interviennent dans l'évolution temporelle du sur-engrèvement des cours d'eau (Garcin 2009, 2010, 2013). L'un de ces facteurs est le surplus d'apport en matériaux induit directement et indirectement par l'activité minière. Il s'agit d'une part de la quantité de stériles miniers qui ont été mis en décharge dans les versants jusqu'en 1975 et d'autre part de la mise à nus des sols autour des mines et par la réalisation des pistes et prospections minières (Garcin et al. 2017). L'impact de ce facteur sera traité dans un paragraphe spécifique 3.4 correspondant à la sous-tâche B2 : Évolution des exploitations minières.

L'autre facteur majeur dans cette évolution est la séquence météorologique, et notamment les pluies, lors du passage des cyclones ou lors de fortes tempêtes tropicales. Ces pluies vont déclencher des ruissellements et des érosions sur les versants où des décharges minières sont présentes ainsi que sur

les sols mis à nus (naturels, zones d'exploitation, de prospection et pistes). Par ailleurs, ces pluies, en fonction de leur intensité, de leur durée et de leur répartition spatiale vont générer des débits liquides plus ou moins importants dans les creeks et les rivières. Le transport solide en rivière sera conditionné en grande partie par ces débits. C'est ce transport solide qui assurera la migration des sédiments vers le bas des versants, puis dans les creeks, leur transfert vers l'aval des cours d'eau et finalement leur migration jusqu'aux embouchures des rivières. Selon la capacité de transport des rivières lors des crues et les durées de ces dernières, des modifications des lits et des morphologies alluviales se produisent. C'est ce second facteur de forçage qui est traité dans cette section.

3.1.1. UNE APPROCHE NOVATRICE DU FORÇAGE MÉTÉOROLOGIQUE

Jusqu'à présent, dans les études traitant de cette problématique, une analyse sommaire des facteurs de forçage météorologiques avait été effectuée à travers la compilation des données historiques et d'archives sur les cyclones et les dépressions tropicales (données Météo NC). Bien qu'informatrice, cette approche reste sommaire lorsqu'il s'agit d'analyser les relations entre les facteurs météorologiques et l'évolution de l'engravement. En effet, la définition du cyclone est basée sur un critère de vent qui n'est donc pas, en ce qui concerne l'évolution des lits de rivière, le critère le plus pertinent. Ensuite, les caractéristiques des cyclones (ou des fortes dépressions tropicales) en termes de trajectoire, de secteurs affectés, de pluies induites sont très variables. Certains cyclones majeurs pourront avoir eu des effets importants dans certains bassins versants de Nouvelle-Calédonie alors que d'autres auront été épargnés. L'analyse des facteurs de forçage météorologiques consistant à comptabiliser le nombre d'événements par type (cyclones, dépressions tropicales majeures) au cours d'une période est utile (Garcin et al. 2016) mais relativement peu informative pour analyser la relation entre forçage météorologique et évolution morphologique.

L'approche suivie dans le cadre d'IMMILA a été d'utiliser la **distribution temporelle des précipitations** comme un indicateur du forçage météorologique. L'idée est donc d'analyser la pluviométrie sur une durée longue afin :

- D'une part d'essayer de caractériser la pluviométrie du bassin versant étudié ;
- D'autre part, d'identifier les événements ou saisons où les pluies, par leurs différentes caractéristiques (intensité, durée, quantité), ont pu générer des fortes érosions des sols et des débits morphogènes dans les cours d'eau.

Chaque événement, en fonction de ses caractéristiques (durée, intensité etc.) a un effet spécifique sur les processus d'érosion des versants et de transport solide en rivière.

L'analyse de l'évolution et du transfert des sédiments au sein des rivières n'est faite qu'à certaines dates en fonction des campagnes de photographies aériennes qui sont plus ou moins espacées dans le temps. De ce fait, les évolutions morphologiques extraites de ces analyses sont la résultante du cumul des effets de plusieurs événements qui se sont produits au cours de plusieurs années. Il est donc nécessaire, afin d'essayer de déterminer les liens de cause à effet entre les événements météorologiques et l'évolution morphologique des cours d'eau, de restituer l'ensemble des événements s'étant produits entre les deux dates où l'analyse morphologique a été conduite. Afin de réaliser cette approche, nous avons donc analysé les données de pluie du pluviomètre de Thio localisé à l'aval du bassin versant, dans le village de Thio (Thio-P, station n°98829001 ; Lat. : -21,610667 ; long : 166,2155 ; données Météo France, convention du 24/02/2017, Fig. 22. Les enregistrements y ont débuté en 1952 et ont été quasi continus (92 jours seulement sont manquants suite à un arrêt d'enregistrement) jusqu'à aujourd'hui.

Le travail réalisé vise à fournir des indicateurs sur l'évolution du forçage météorologique basé sur des analyses statistiques et l'élaboration d'une typologie des événements pluvieux. Il constitue l'un des éléments de la réflexion visant à établir les liens entre le facteur de forçage météorologique, les apports solides issus des décharges minières et de l'érosion des sols nus miniers (Garcin et al. 2017) et l'évolution des lits des rivières et du sur-engravement.

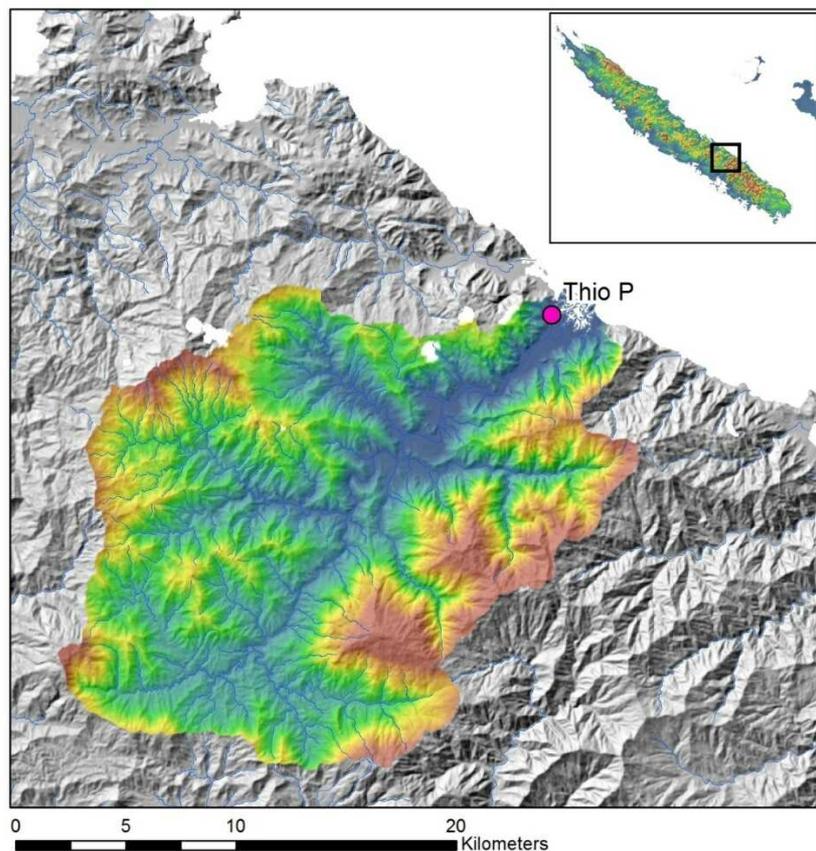


Figure 22 : Carte de localisation du bassin versant de la Thio et du pluviographe Thio-P (Fond : MNT DITTT)

3.1.2. ANALYSE DE LA PLUVIOMÉTRIE À THIO-P

Le travail a été mené sur la base de données journalières du pluviomètre de Thio-P et il porte sur une série de 64 années de mesures comprise entre 1952 et 2016. Il a été effectué des analyses de chroniques à différents pas de temps : journalier, mensuel, saisonnier, annuel. Le détail de ces analyses pourra être trouvé à l'annexe 3. Nous ne présenterons dans la première partie de ce paragraphe que les éléments conclusifs les plus importants de cette analyse statistique.

Dans la région du Pacifique Ouest, deux phénomènes cycliques affectant le climat se produisent. Le premier est lié au phénomène El Niño et son pendant La Niña qui sont liés à un cycle de variations de la pression atmosphérique entre l'est et l'ouest du Pacifique, couplé à un cycle du courant océanique le long de l'équateur (Météo France). Le second est l'Interdecadal Pacific Oscillation (IPO), un phénomène d'oscillation des températures de la surface de la mer (SST) et de changement de pression au niveau de la Mer à l'échelle de l'ensemble du Pacifique. Ces deux oscillations (ENSO et IPO) ont une influence reconnue sur le climat et les conditions météorologiques qui règnent à une date donnée sur le Pacifique et par voie de conséquence, sur la Nouvelle-Calédonie. Nous avons donc essayé de savoir si une relation claire existait entre les oscillations climatiques de type ENSO (El Niño Southern Oscillation) et l'IPO (Interdecadal Pacific Oscillation) et la pluviométrie sur Thio. Les éléments importants de cette recherche seront exposés dans la 2ème partie de ce paragraphe qui renvoie également à l'annexe 3 pour les détails.

⊙ **L'analyse statistique des chroniques de Thio-P**

• **Analyse des chroniques journalières**

Sur les 23 697 jours d'enregistrement :

- Plus de 84% des pluies journalières (19 925 jours) sont comprises entre 0 et 5 mm/j ;
- Près de 8% sont comprises entre 5 et 15mm ;
- 2,7% entre 15mm et 25mm ;
- 2,9% entre 25mm et 50mm ;
- 1,6% entre 50mm et 100mm ;
- 7 pour mille entre 100mm et 200mm ;
- 1 pour mille entre 200mm et 300mm.

Une pluviométrie supérieure à 300mm n'a été atteinte qu'au cours de 4 jours.

• **Analyse des pluviométries mensuelles**

La pluviométrie mensuelle a été calculée à partir des données journalières. La variabilité mensuelle des pluies est très forte. La valeur maximum atteint 905 mm (Mars 2008), la moyenne (tous mois confondus) se situant à 147 mm et la médiane à 100 mm.

La figure 23 présente les pluviométries moyennes et maximales par mois sur la période 1952-2016. On y remarque que les pluviométries maximales enregistrées pour un mois particulier sont très largement supérieures aux moyennes indiquant une forte variabilité des pluies mensuelles. Ceci est particulièrement vrai pour les mois de janvier, février et mars qui correspondent à la seconde partie de la saison cyclonique.

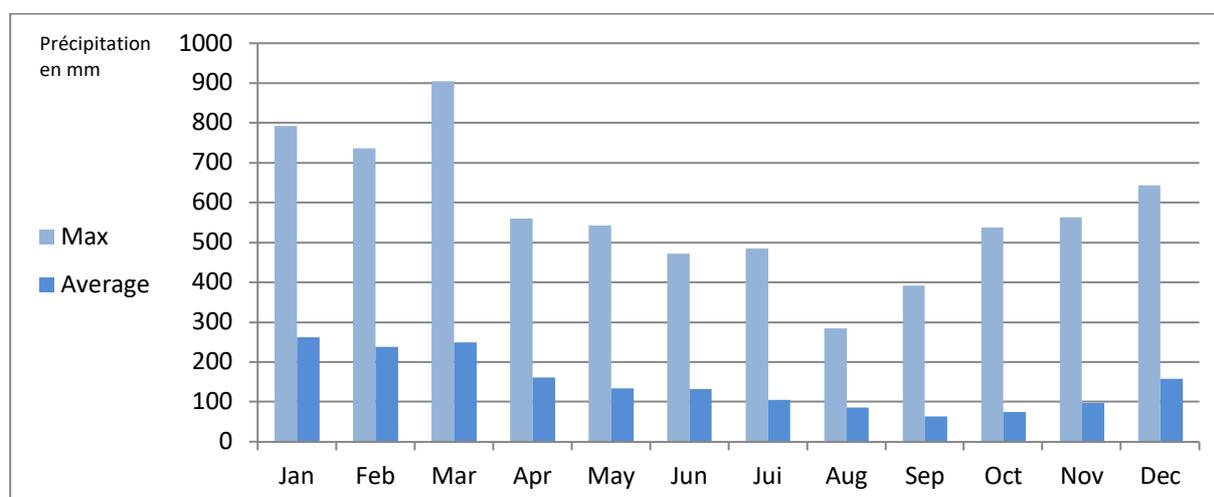


Figure 23 : Pluviométrie maximale et moyenne/mois sur la période 1952-2016

• **Analyse des pluviométries saisonnières**

Le climat de la Nouvelle-Calédonie est caractérisé par deux saisons (source : Météo-NC): la saison cyclonique la plus pluvieuse et la saison sèche. La saison cyclonique « officielle » en Nouvelle-Calédonie est comprise entre le 1er novembre et se termine le 30 avril.

Nous avons donc analysé les pluviométries par saison cyclonique (valeur de cumul des précipitations de Novembre de l'année x à fin avril de l'année x+1) et par saison sèche (du 1^{er} Mai jusqu'à la fin octobre de cette même année (Fig. 24). La pluviométrie moyenne de la saison cyclonique est de 1 162 mm avec un minimum de 310 mm et un maximum de 3 076 mm. Certaines années se détachent plus particulièrement du lot avec notamment des précipitations fortes en saison cyclonique comme les années 1956, 1967, 1989 et 1990 et les années 2008 et 2009. À noter qu'il est très rare d'avoir des précipitations en saison cyclonique plus faibles que celles de la saison sèche mais que cela peut se

produire (en 1984 par exemple). Il faut par ailleurs noter que la différence entre la pluviométrie de la saison sèche et celle de la saison cyclonique est cette fois encore très variable et qu'une saison sèche pluvieuse n'implique pas nécessairement une saison cyclonique pluvieuse (et inversement).

La pluviométrie en saison sèche est elle aussi extrêmement variable d'une année à l'autre avec une moyenne à 597 mm et une médiane à 556 mm. La valeur minimale est de 131mm en 1981 et la maximale atteint 1 633 mm en 1967. Compte-tenu de la quantité de pluies qui peuvent se produire durant certaines saisons sèches, elles ne doivent pas être négligées dans l'analyse des processus d'érosion en versant et de transport solide en rivière.

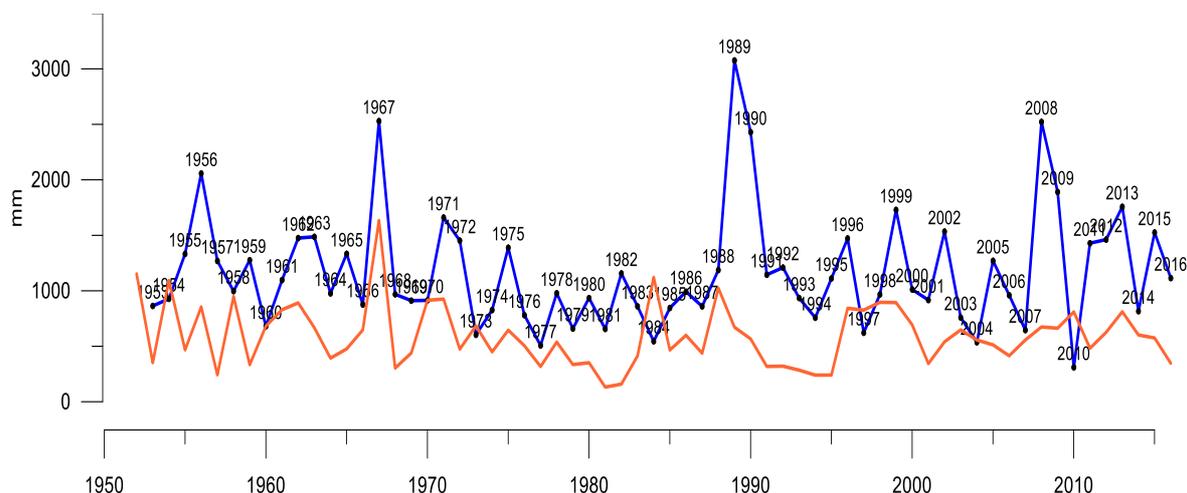


Figure 24 : Précipitations par saison (saison sèche en rouge, saison cyclonique en bleu)

- **Analyse des pluviométries annuelles**

La pluviométrie annuelle cumulée montre une forte variabilité interannuelle avec des valeurs comprises entre un minimum de 804 mm/an (1953) et de 4 111 mm/an (1967). La moyenne des précipitations annuelles est de 1 764 mm/an, la médiane à 1 603 mm/an et un écart type de 660 millimètres.

Le nombre de jours de pluie dans l'année est lui aussi très variable de 88 j en 1957 à 184 j en 1988 (Fig. 25). La moyenne est de 127 j/an et la médiane de 125 j/an (trait en tirets gris) et l'écart type est de 20,3 j.

Une dérive positive (*trend*) du nombre de jours de pluie sur ces 6 décennies est notable (trait en tirets bleus). Cette augmentation moyenne du nombre de jours de pluie sur la période 1952-2015 est de l'ordre de 0.3 j de pluie par an. La cause de cette dérive reste à déterminer

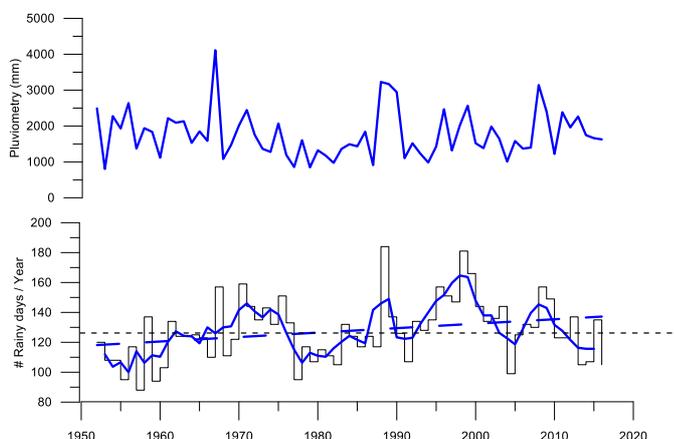


Figure 25 : Pluviométrie annuelle (en haut), nombre de jours de pluie par an (en bas, courbe noire), moyenne glissante du nombre de jours pluie par an (en bas, courbe bleue), tendance d'évolution du nombre de jours de pluie (courbe en tirets gris)

La figure 26 met en relation le nombre de jours de pluie par an avec le cumul annuel de précipitation.

On remarque que le cumul de pluie augmente avec le nombre de jours de pluie par an mais que pour un même nombre jours de pluie par an, la variabilité la pluviométrie totale annuelle est très forte. À titre d'exemple, pour cent soixante jours de pluie dans l'année, les précipitations annuelles peuvent varier de 1 428 mm à 3 141 mm.

On en déduit que les années pluvieuses ne sont pas nécessairement les plus arrosées, la corrélation entre années pluvieuses (nombre de jours de pluie par an) et le cumul des précipitations n'est donc pas significative.

Ceci s'explique simplement par l'importance des quantités de pluie lors des événements intenses de courte durée (dépressions tropicales ou cyclones) dont l'intensité est élevée et qui contribuent fortement au cumul annuel de précipitation sans pour autant augmenter significativement le nombre total de jours de pluie.

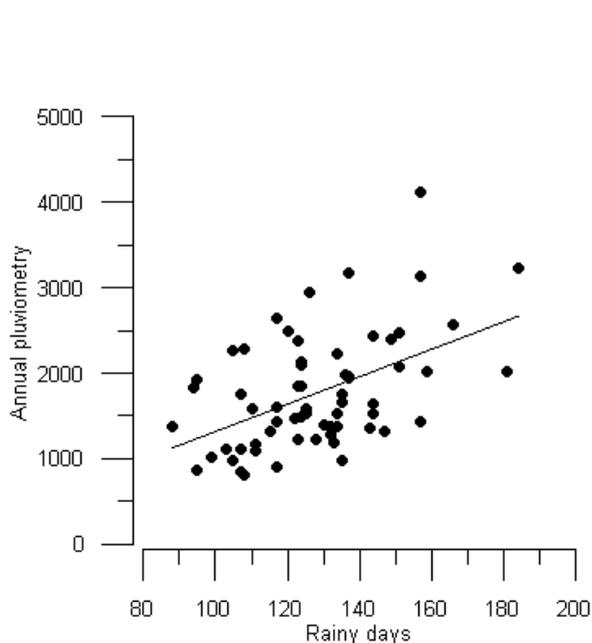


Figure 26 : Relation entre le nombre de jours de pluie par an et les précipitations annuelles cumulées

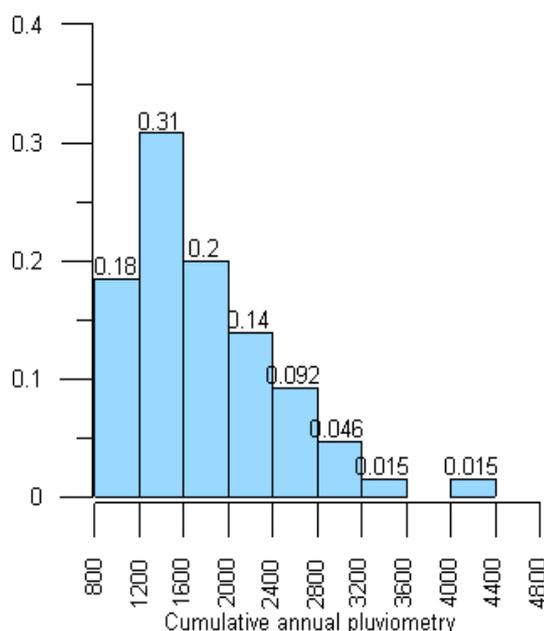


Figure 27 : Histogramme des précipitations annuelles cumulées

L'analyse des précipitations annuelles (Fig. 27) montre que les années avec une pluviométrie comprise entre 800 mm/an à 2 400 mm/an englobent 83% des années. Un peu plus de 16% des années ont des cumuls supérieurs à 2 400 mm/an.

Nous avons par ailleurs traité les précipitations annuelles selon l'approche par quantile. Les 5% des années les plus pluvieuses sont celles dont la précipitation cumulée annuelle est supérieure à 3 100 mm/an.

○ **Les oscillations climatiques régionales**

• **Le SOI (Southern Oscillation Index).**

Il s'agit de l'index permettant de caractériser les phases opposées El Niño/la Niña du phénomène couplé océan/atmosphère appelé ENSO (El Niño / Southern Oscillation). El Niño correspond au réchauffement accentué des eaux de surface près des côtes de l'Amérique du Sud. Il est lié à un cycle de variations de la pression atmosphérique entre l'est et l'ouest du Pacifique, couplé à un cycle du courant océanique le long de l'équateur (Météo France). Nous avons travaillé, là aussi, sur plusieurs pas de temps : mensuel, saisonnier, annuel dont on trouvera les détails à l'annexe 3.

Au niveau du pas de temps annuel, la figure 28 qui superpose les courbes de variations en fonction du temps du SOI et de plusieurs paramètres des précipitations illustre un exemple du travail statistique réalisé.

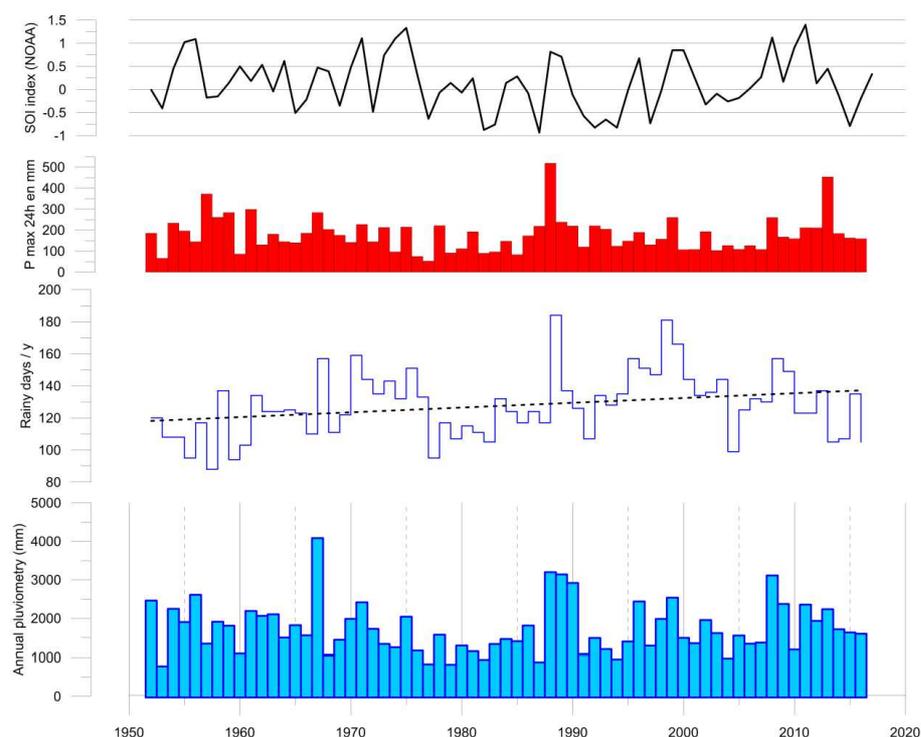


Figure 28 : Courbes de variation annuelle de la pluviométrie, du nombre de jours de pluie par an, des précipitations maximums en 24h et du Southern Oscillation Index (NOAA)

Les conclusions du travail sur le pas de temps annuel sont les suivantes : La corrélation entre le SOI et les précipitations annuelles est faible ($R\text{-squared} = 0.230646$) mais nous notons que plus l'index SOI est élevé :

- Plus les valeurs moyennes des précipitations augmentent,
- Plus la valeur du SOI annuel est forte, plus la variabilité en termes de précipitation augmente.
- Plus les valeurs du SOI sont faibles et négatives (phase la Niña forte) plus les précipitations annuelles sont faibles et comprises dans un intervalle resserré entre 1 000 mm/an et 2 000 mm/an.
- À l'opposé, en phase El Niño forte, les précipitations annuelles sont très variables d'une année sur l'autre et s'étalent entre 1 000 mm/an et 3 500 mm/an. L'année 1967 apparaît comme une exception avec un Niño relativement modéré et un record de précipitations annuelles.

Nous pouvons en conclure que plus le SOI est fort (phase El Niño) plus l'incertitude sur les précipitations annuelles augmente avec en corollaire l'incertitude sur le potentiel d'érosion et de transport solide dans les rivières qui peut potentiellement très fortement varier.

Au niveau pas de temps saisonnier, nous avons calculé à partir des données NOAA l'index SOI pour les saisons cycloniques et sèches (Fig. 29) afin de déterminer si une corrélation existait entre l'index SOI saisonnier et les précipitations au cours de ces mêmes périodes.

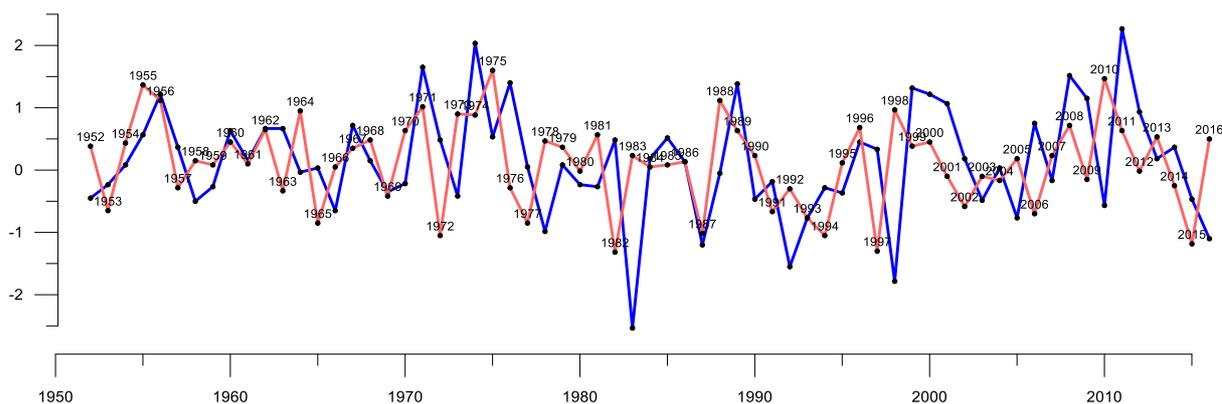


Figure 29 : Courbe de variation du SOI en saison cyclonique (courbe bleue) et en saison sèche (courbe rouge) de 1952 à 2015

Le diagramme des rapports entre la pluviométrie saisonnière et l'index SOI saisonnier (Fig. 30) montre que bien qu'il y ait une tendance d'augmentation des pluies plus l'index SOI est élevé, la dispersion reste forte. On observe aussi clairement que pour des valeurs de SOI comparables, la pluviométrie est plus faible en saison sèche et que sa dispersion y est moins forte.

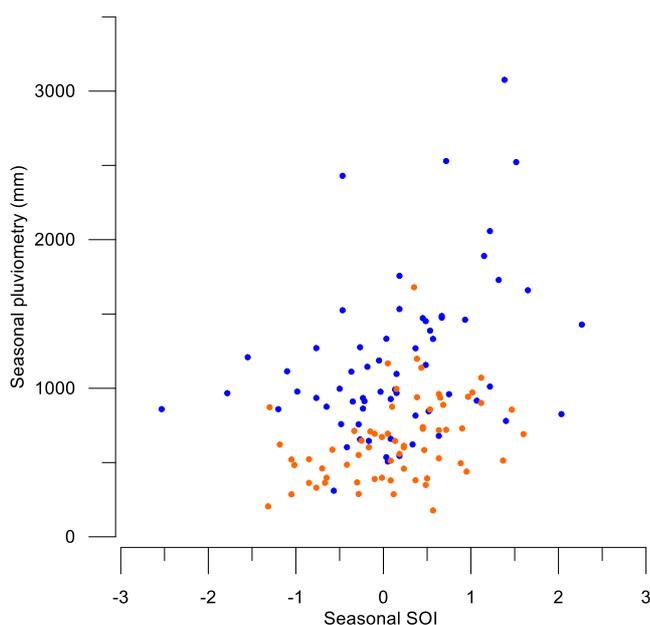


Figure 30 : Diagramme des précipitations saisonnières en fonction du SOI saisonnier.

Points rouges = saison sèche, points bleus = saison cyclonique

- **L'IPO (Interdecadal Pacific Oscillation)**

Il s'agit d'un phénomène d'oscillation des températures de la surface de la mer (SST) et de changement de pression au niveau de la mer à l'échelle de l'ensemble du Pacifique. Cette oscillation se produit à une fréquence plus faible (de l'ordre de 15 à 30 ans) que les phénomènes ENSO. L'IPO est similaire à la Pacific Decadal Oscillation (PDO) en termes de changement de température du Pacifique mais affecte aussi le Pacifique Sud ce qui n'est pas le cas de la PDO (Climatology.co.uk). Une analyse comparative entre les données de l'Interdecadal Pacific Oscillation (IPO, source NOAA, Henley et al.

2015) et la pluviométrie totale annuelle, le nombre de jours de pluie par an, et le nombre d'événements a été réalisée. Elle montre qu'il n'y a pas de corrélation entre l'IPO et le nombre de jours de pluie (R-squared = 0.06) ou le nombre d'événement (R-squared = 1.25e-005). Une faible corrélation semble identifiée entre l'IPO et les précipitations annuelles (R-squared = 0.23).

L'analyse a été étendue à La PSL Tahiti (Pression at Sea Level, source NOAA) et le nombre de jours de pluie par an a été réalisée (Fig. 31).

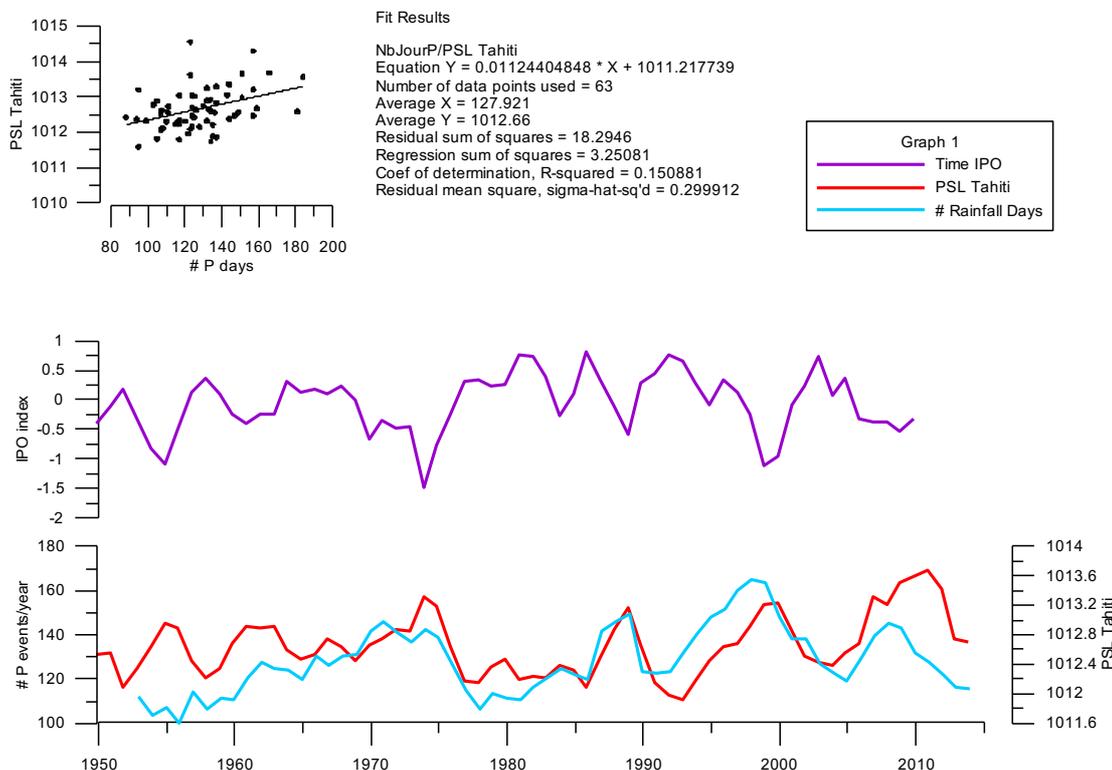


Figure 31 : Courbes de variation temporelle du nombre de jour de pluie par an, de la PSL (Pression At Sea Level) à Tahiti, de l'Interdecadal Pacific Oscillation IPO index

Certaines similitudes morphologiques entre les courbes de la PSL et la courbe du nombre d'événements de pluie par an semblent se dessiner mais la corrélation reste toutefois très faible.

• **Récapitulatif**

Les analyses réalisées ne montrent pas de corrélation très significative entre les oscillations de type ENSO et IPO et les différents paramètres pluviométriques (nombre de jours de pluie par an, nombre d'événements pluvieux par an). Toutefois la pluviométrie cumulée annuelle semble partiellement influencée par ces deux oscillations climatiques. En effet, nous notons que plus le SOI est élevé (donc plus la phase El Niño est marquée), plus les valeurs des précipitations annuelles, en moyenne, augmentent mais surtout que la variabilité en termes de précipitation augmente. Au contraire, plus les valeurs du SOI sont faibles et négatives (phase la Niña forte) plus les précipitations annuelles sont, en moyenne, faibles et comprises dans un intervalle resserré. En période ENSO, il est donc possible d'avoir des pluviométries très contrastées d'une année sur l'autre avec comme conséquence possible une forte variabilité des érosions des sols, des versants et du transport solide en rivière.

3.1.3. ANALYSE DES ÉVÈNEMENTS CLIMATIQUES

Nous avons considéré qu'une succession de jours de pluie consécutifs constituait un événement pluviométrique. Nous avons donc reconstitué à partir de l'ensemble des pluviométries journalières les événements de 1952 jusqu'à 2016. Nous avons ainsi obtenu 3 518 événements sur les 63 ans de chroniques. Ensuite, la durée et la quantité cumulée de pluie pour chaque événement ont été calculées.

Enfin, une évaluation par quantiles des précipitations et des durées des événements a été effectuée. Cette approche a pour but de caractériser les événements en fonction de leur pluviométrie totale (événements les plus pluvieux) et de leur durée (événements les plus longs). Ceci est notamment utile pour, indirectement, connaître les facteurs de forçages qui ont pu générer de forts ruissellements et des érosions dans les versants, des forts débits et capacité de transport dans les creeks et rivières, d'importants débits solides etc. Le travail par événement permet en effet d'aller plus loin qu'une simple analyse des pluviométries sur 24h et notamment de détecter les événements les plus importants générant de forts débits sur des durées suffisamment longues pour avoir un fort impact sur les morphologies et les transferts de matériaux.

On trouvera à l'annexe 3 les tableaux récapitulatifs chiffrés de l'analyse réalisée. Seule l'interprétation est détaillée ci-après :

L'analyse par quantiles des 3 518 événements donne les indications suivantes :

- Les 5% des événements les plus pluvieux sont ceux dont la pluviométrie totale est supérieure ou égale à 155 mm,
- Les 5% des événements les plus longs sont ceux dont la durée est égale ou supérieure à 6 j de pluie consécutive.

Nous avons considéré que :

- Un événement est pluvieux mais court si les précipitations sont supérieures à 155mm et sa durée est inférieure à 6 j,
- Un événement est pluvieux et long si les précipitations sont supérieures à 155mm ET sa durée supérieure à 6 j,
- Un événement est dit « ordinaire » si sa durée ET ses précipitations sont faibles (Durée <6j et P < 155mm),
- Un événement est considéré comme « extrême » si la pluviométrie cumulée est supérieure ou égale à 350mm (0.2% des années). Impact de l'activité minière sur la végétation du continuum versants-rivière-estuaire-littoral.

Les trente-cinq événements les plus pluvieux ($P \geq 350\text{mm}$) représentent 0,2% des événements dont 22 événements longs c'est-à-dire dont la durée est supérieure ou égale à 6j et 13 événements « courts » dont la durée est inférieure à 6j. 34 % de ces événements extrêmes se produisent en janvier, 14% en février et près de 26% en Mars. Les mois de novembre et de décembre concernent respectivement 8,6% et 5,7% des événements. 2,9% de ces événements extrêmes se produisent en juillet et août, c'est-à-dire en dehors de la période cyclonique (cas des pluies de juillet 2013, par exemple).

3.1.3.1. Durée et intensité des événements

La durée des événements extrêmes (pluviométrie supérieure ou égale à 350mm) est très variable. Elle est comprise entre 3 jours et 18 jours. Leurs intensités moyennes (Rapport du total des précipitations par la durée de l'événement, en mm/jour) sont de ce fait elles aussi extrêmement variables et sont comprises entre 20 mm/j et 146 mm/j. Les deux événements de pluie de 2013 (finissant les 2 janvier et 3 Juillet 2013) apparaissent en tête de liste des événements les plus intenses. Il faut souligner que l'événement de juillet 2013 qui a la plus forte intensité moyenne de tous les événements de la période 1952-2016 se produit en dehors de la saison cyclonique. Ceci confirme que des événements

météorologiques durant la période sèche sont relativement rares, mais qu'ils peuvent avoir de fortes répercussions sur l'évolution des lits et sur l'évolution du sur-engravement comme ce fut le cas en juillet 2013. Les trois événements avec les plus fortes précipitations cumulées (09/04/1967, 28/03/2008, 19/01/1988) ont des durées comprises entre 10 et 14j consécutifs de pluie avec des intensités moyennes comparables comprises entre 71 à 73 mm/j. Ces trois événements se sont produits au cours de la saison cyclonique.

3.1.3.2. Caractérisation des années

Principe. L'objectif est de caractériser et de discriminer les années (63 années de 1952 à 2015) en fonction du nombre d'événements de chaque type (pluvieux courts ($P > 155\text{m}$, $d < 6\text{j}$), pluvieux long ($P > 155\text{m}$, $D \geq 6\text{j}$, extrêmes ($P > 350\text{ mm}$) ou ordinaires (tous les autres événements)).

Il est possible de considérer que les événements de « pluie de fort cumul » ($P > 155\text{mm}$) mais de courte durée sont capables d'une part de générer des érosions importantes au niveau des décharges minières et zone en érosion naturelle. Au niveau des zones sources (cf. Garcin et al. 2017), ce type d'événement est générateur d'un déstockage de matériaux qui vont alors transiter vers l'aval et constituer un nouvel apport solide aux creeks et aux cours d'eau. De même, ce type d'événement est capable de générer, au moins dans les bassins versants de petite taille, des débits liquides et solides morphogénétiquement significatifs.

Les événements de « longue durée et de fort cumul » (donc généralement moins intenses) seront eux susceptibles de générer des crues importantes qui dureront plusieurs jours même dans les cours d'eau majeurs. Le transport solide cumulé au cours de l'événement peut donc être très important du fait de sa durée. Il engendrera potentiellement des évolutions morphologiques notables et une migration des stocks sédimentaires vers l'aval. Dans le cas d'événement vraiment exceptionnels, à très fort cumul et longue durée, les fractions granulométriques les plus grossières présentes dans lits pourront être mobilisées, dans certains cas, les sédiments des terrasses récentes pourront eux-aussi être repris.

Les événements « ordinaires » avec des cumuls faibles à modérés et des durées plutôt courtes seront à priori moins morphogènes. Toutefois, ce type d'événement est capable d'arracher les particules fines latéritiques au niveau des zones sources, de les mettre en suspension dans les cours d'eau même si les débits dans ces derniers ne sont pas extraordinaires. Ce type d'événement est donc capable de mobiliser la fraction la plus fine du sédiment qui pourra transiter alors jusqu'aux zones les plus aval puis jusqu'au littoral (Garcin et al. 2013, Dumas & Cohen 2014).

Discussion. Les résultats sont synthétisés sous la forme d'un radar (Fig. 32) présentant les proportions relatives des différents types d'événement par an. Sur ce radar apparaissent en vert les événements ordinaires, en bleu les événements pluvieux longs et en rouge les événements pluvieux courts. En trait continu bleu est tracée la courbe des précipitations annuelles normalisées (reportées sur l'intervalle 1,5 à 2,5)

Pour chaque année, nous avons calculé la fréquence relative de chaque type d'événement (pluvieux court, pluvieux long, ordinaire) c'est-à-dire le nombre d'événement de chaque type en le normalisant entre la valeur minimale et maximale obtenues sur les 64 années. On peut noter que certaines années sont largement dominées par des événements ordinaires alors que d'autres au contraire voient la proportion des événements pluvieux longs ou courts largement plus importante. La proportion des différents types a été calculée indépendamment de la pluviométrie annuelle. Cela permet de donner la « signature » de chaque année, mais pas nécessairement son impact sur les érosions et transport solide. La courbe normalisée des précipitations annuelles quant à elle permet de faire le lien entre la pluviométrie annuelle et la typologie des années).

À titre d'exemple, l'année 1967, qui a été la plus pluvieuse des 64 années traitées, présente un certain équilibre entre les différents types d'événement. À l'inverse, les années 1989 et 1990 elles aussi très pluvieuses, ont été marquées par une proportion beaucoup plus élevée d'événements pluvieux courts. Il est donc probable que les impacts des processus d'érosion et de transport solide soient différents entre ces années même si les ordres de grandeur de la pluviométrie annuelle sont du même ordre de grandeur.

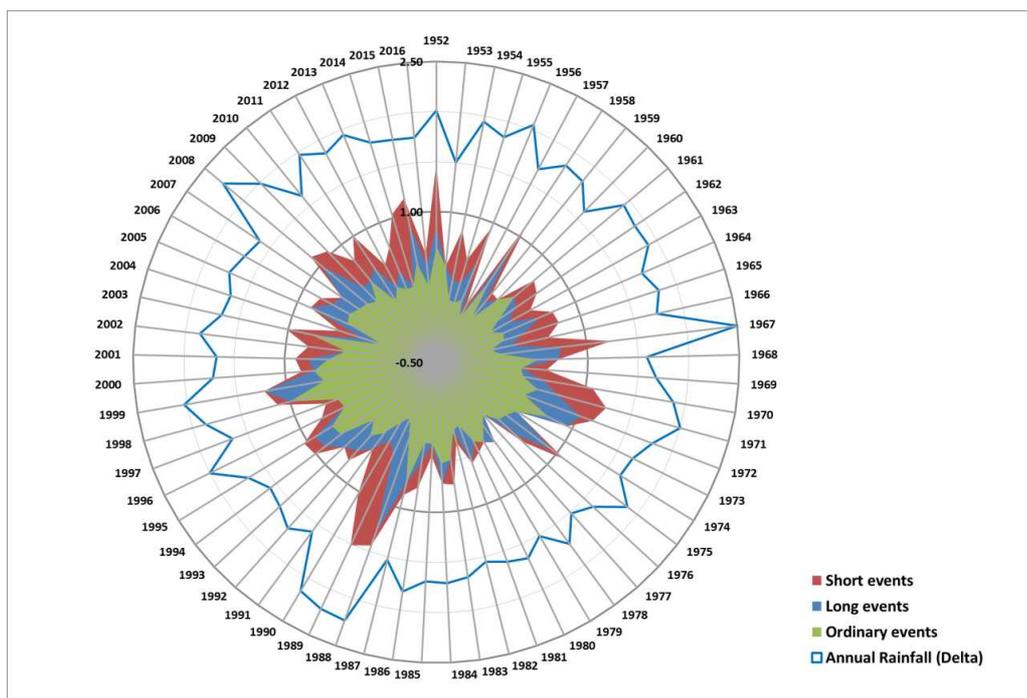


Figure 32 : Radar présentant les proportions relatives des différents types d'événement par an.

En vert, ce sont les événements ordinaires, en bleu événements pluvieux longs et en rouge événements pluvieux courts. En trait continu bleu, la courbe des précipitations annuelles normalisées (reportées sur l'intervalle 1,5 à 2,5).

Le tableau 1 synthétise les principales caractéristiques des précipitations annuelles de chaque année de 1952 à 2016. Y figurent les paramètres suivants :

- Pluie cumulée,
- Nombre de jours de pluie,
- Intensité maximale sur 24 heures,
- Pluie totale en saison cyclonique,
- Pluie totale en saison sèche,
- Nombre d'événements pluvieux,
- Nombre d'événements dont les pluies sont supérieures à 155mm (5%),
- Nombre d'événements dont la durée est supérieure à 6j (5%),
- Nombre d'événements pluvieux et longs ($P > 155\text{mm}$, $D > 6\text{j}$) ;
- Nombre d'événements courts mais pluvieux.

Pour chaque paramètre, les cellules dont les valeurs correspondent aux 10% des valeurs les plus élevées sont identifiées. Cette mise en forme permet de faire ressortir certaines années ou ensembles d'années au cours desquelles plusieurs des paramètres traités ont atteint des valeurs fortes. Ainsi, à titre d'exemple, l'année 1967 semble vraiment exceptionnelle avec 8 de ses paramètres situés dans les 10% des valeurs les plus fortes.

De même l'année 1988 semble assez exceptionnelle (6 paramètres dans les 10% les plus élevés) d'autant que les années suivantes 1989 et 1990 ont respectivement 3 et 4 de leurs paramètres dans les 10% des valeurs les plus élevées.

Tableau 1 : Principales caractéristiques annuelles des précipitations

(Les cellules en rouge correspondent aux années dont les paramètres correspondent aux 10% des valeurs les plus élevées pour chaque item)

Year	Annual rainfall (mm)	Rainfall days	24h max rainfall	Rainfall during cyclonic season	Rainfall during dry season	Number of rainfall events	Nb of event with rainfall > 155 mm (5% of events)	Nb of event with duration > 6j (5% of events)	Nb of rainy and long events Ev. Long ET Pluvieux	Nb of short but rainy events
1952	2490	120	185		1152	53	6	1	1	5
1953	805	108	66	864	352	54		1		
1954	2274	108	233	928	1092	49	5	1	1	4
1955	1931	95	196	1332	467	45	3	2	1	2
1956	2639	117	145	2058	855	49	5	2	2	3
1957	1372	88	372	1269	242	39	1	2		1
1958	1939	137	261	997	949	59	4	3	2	2
1959	1836	94	284	1276	334	42	2	2	1	1
1960	1117	103	86	680	681	50		2		
1961	2219	134	299	1097	829	59	2	1		2
1962	2092	124	130	1475	891	50	3	1	1	2
1963	2132	124	181	1487	667	45	3	4	1	2
1964	1531	125	145	977	393	49	3	2	2	1
1965	1850	123	140	1333	476	49	4	2	1	3
1966	1587	110	186	876	648	44	4	2	1	3
1967	4112	157	283	2530	1634	50	7	6	3	4
1968	1083	111	204	969	303	56	1	1	1	
1969	1472	122	176	911	439	53	2	2		2
1970	2015	159	142	914	915	56	5	2	1	4
1971	2444	144	227	1660	925	62	5	4	1	4
1972	1755	135	145	1452	474	57	4	3	3	1
1973	1364	143	213	604	684	65	1	1	1	
1974	1278	132	96	826	449	52		3		
1975	2070	151	215	1388	645	56	4	4	3	1
1976	1195	133	75	780	505	52	2	2	1	1
1977	858	95	53	507	317	45		1		
1978	1604	117	221	978	538	49	1	2	1	
1979	849	107	91	660	335	53		1		
1980	1324	115	111	935	352	51	1	2		1
1981	1175	111	192	656	132	47	2	4	2	
1982	973	105	90	1157	159	46	1	3		1
1983	1362	132	96	860	413	57	2	3		2
1984	1493	124	147	545	1122	57	1	2	1	
1985	1435	117	83	846	466	50	1	1		1
1986	1841	124	173	992	599	51	3	2	1	2
1987	910	117	219	860	437	66	1			1
1988	3128	184	519	1187	1025	55	6	1	5	1
1989	3168	137	238	3076	672	52	1	3	2	8
1990	2947	126	220	2430	567	51	6	3	1	5
1991	1105	107	120	1145	318	52	1	2	1	
1992	1519	134	221	1209	321	57	2	3	1	1
1993	1230	128	205	935	285	52	2	3	2	
1994	985	135	124	758	240	64	2	1	1	1
1995	1428	157	148	1112	241	64	2	4	1	1
1996	2467	151	190	1472	842	58	2	3		2
1997	1320	147	130	622	826	59	1	5		1
1998	2013	181	157	967	896	74	1	3		1
1999	2565	166	260	1729	894	63	3	4	3	
2000	1521	144	107	1012	693	64	1	2		1
2001	1383	134	108	917	344	60	2	1	1	1
2002	1984	136	193	1534	540	54	3	3		3
2003	1645	144	103	759	648	68	2	1		2
2004	1009	99	127	536	557	42	3	2	1	2
2005	1582	125	109	1271	513	56	2	3	2	
2006	1370	132	126	960	414	58	2	2	1	1
2007	1399	130	108	646	557	54	1	2	1	
2008	3141	157	260	2523	674	56	4	6	3	1
2009	2402	149	167	1891	663	55	5	3	1	4
2010	1222	123	159	311	810	59	2	1		2
2011	2384	123	211	1429	482	51	5	2	2	3
2012	1961	137	211	1462	626	52	2	1		2
2013	2264	105	454	1757	811	51	3	1	1	2
2014	1745	107	184	816	602	53	6			6
2015	1662	135	163	1525	575	61	4	3	2	2
2016	1628	105	159	1115	347	49	2	1	1	1

3.1.3.3. Caractérisation par période

Au sein des projets *IMMILA* et « *Gestion du passif* », l'objectif de l'analyse de la pluviométrie est d'identifier comment le forçage météorologique interagit avec les apports solides issus des décharges et des érosions des sols nus et comment il impacte l'évolution morphologique des cours d'eau.

L'analyse morphologique historique étant réalisée par analyse et traitement des campagnes de photographie aérienne, l'espacement temporel entre ces différentes campagnes est variable et intègre des années dont les caractéristiques en termes de pluviométrie sont très variables.

Nous avons procédé à l'intégration des paramètres présentés précédemment sur l'ensemble de chaque période encadrant les campagnes de photographies aériennes.

Les périodes entre deux campagnes de photographies aériennes sont les suivantes :

- 1954 à 1971,
- 1971 à 1976,
- 1976 à 1989,
- 1989 à 2008,
- 2008 à 2015.

Pour la plupart des paramètres, c'est la somme des valeurs qui a été intégrée sur chaque période (précipitation annuelle, nombre de jour de pluie etc.) alors que pour d'autres, c'est la valeur maximale qui a été retenue (Intensité maximale des pluies sur 24h).

L'intégration par période est présentée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Principales caractéristiques des précipitations par période entre les différentes campagnes de photographies aériennes

Period	Cumulated rainfall on the period (mm)	Sum of rainy days	Max rainfall intensity (mm/24h)	Sum of rainfall during cyclonic season (mm)	Sum of rainfall during dry season (mm)	Number of rainfall events	Nbof rainfall events P>155 mm (5%)	Nb of rainfall events duration > 6j (5%)	Nb of long and rainy events	Nb of short but intense events
1954 to 1971	33 370	2 067	372	21 841	11 649	857	54	40	18	36
1971 to 1976	7 662	694	215	5 051	2 757	282	11	13	8	3
1976 to 1989	20 219	1 585	519	13 258	6 565	679	20	25	12	17
1989 to 2008	32 612	2 633	260	22 537	10 367	1 106	42	53	19	23
2008 to 2015	13 639	879	454	9 191	4 568	382	27	11	6	21

3.1.3.4. Analyse des relations pluies-débits

3.1.3.4.1. Objectif

Nous cherchons à analyser dans cette partie les événements hydrométéorologiques sur le bassin de la Thio afin d'aider à l'interprétation de la dynamique morphologique des creeks, de la Thio et du delta. La morphologie du lit des creeks et de la Thio est principalement contrôlée par les cyclones et dépressions très fortes. Les changements morphologiques du delta quant à eux, associés principalement à des apports de sables et de MES, sont contrôlés par l'occurrence des fortes crues mais aussi des crues de plus faibles intensités, mais très fréquentes. Ces dernières sont en effet associées à une production sédimentaire de sable et matières en suspension importante sur le moyen et long-terme (plusieurs décennies). Nous avons essayé, dans cette partie du travail, à définir les forçages hydrométéorologiques et leurs évolutions au cours du XXe siècle, en distinguant les crues de fortes intensités et les crues fréquentes de moindres intensités. Ce travail est issu de deux mémoires d'étudiant : celui de Germain Mériaux (stage de L3, Université de Lyon, 2017) et d'un mémoire de Master 2/Engees de Louise Schneider réalisé au CNRS-EVS en 2018 et financé par le Labex IMU.

3.1.3.4.2. Données utilisées

Les données d'hydrologie et de météorologie utilisées sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Données d'hydrologie et de météorologie

Type de la donnée	Période couverte	Station	Source	Etat de la donnée et indications
<i>Débits instantanés</i>	01/01/2015-17/10/2016	Thio-St Michel	Météo France	Donnée continue
<i>Débits journaliers</i>	23/12/1981-16/10/2016	Thio-St Michel	Météo France	Donnée continue avec lacune
	1912-1948	Canala	Météo France	Donnée d'archive parfois incomplète et comportant des erreurs de retranscription
<i>Pluviométrie journalière</i>	01/01/1952-16/02/2017	Thio	Météo France	Donnée continue
	01/02/1952-16/03/2017	Canala	Météo France	Donnée continue
<i>Pluviométrie mensuelle</i>	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 Multivariate ENSO Index</i>	1866-2017	Pacifique tropical	NOAA, ESRL	Données complètes
<i>Interdecadal Pacific Oscillation</i>	1871-2005	Pacifique tropical	NOAA, ESRL	Données complètes
	1854-2018	Pacifique tropical	Henley et al. (2015) ERSST V5	Données complètes

Les débits journaliers sont disponibles à partir de 1981, et la pluviométrie journalière sur Canala et Thio, à partir de 1952. Afin d'élargir la fenêtre temporelle de notre analyse, nous avons collecté la pluviométrie

journalière d'archive débutant en 1912, et mensuelle, en 1903. Ces données ont fait l'objet d'une collaboration avec un projet d'archivage de données anciennes par Météo France NC. Les données de pluie d'archives sur Canala sont présentes sous des formats variés : fiche synthèse des pluies mensuelles à partir de 1903, tableaux synthétiques des pluies mensuelles avec le nombre de jours correspondants à partir de 1904, fiches mensuelles avec des observations météorologiques et particulièrement des hauteurs d'eau à partir de 1912. Compte tenu de l'hétérogénéité des formats et des erreurs potentielles liées à la numérisation et à la lecture plus ou moins aisée des documents disponibles (un exemple est fourni à la figure 33), un code qualité (Tabl. 4) a été établi selon une méthodologie qui est détaillée à l'annexe 3.

OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES.

STATION de Canala DÉPARTEMENT de La Nouvelle Calédonie MOIS de Mars 1912

ALTITUDE : 1000 Observations faites à 7 heures 1 du matin.

OBSERVATEUR : M. J. H. H. H. COMMISSION MÉTÉOROLOGIQUE. PAGE N° 1.

DATES	BAROMÈTRE.			TEMPÉRATURE			PLUIE		VENT.		DIRECTION des nuages.	ÉTAT DU CIEL 0 à 10.	REMARQUES DIVERSES.
	LECTURE brute.	THERMOMÈTRE attaché.	RÉDUIT à zéro.	le MATIN.	MINIMUM.	MAXIMUM.	ou REG.	DIRECTION.	FORCE.				
1													
2													
3													
4													
5													
6													
7													
8	765												
9	768												
10	768												
11	764												
12	766.5												
13	761.5												
14	760.2												
15	759.2												
16	756												
17	759												
18	763												
19	763												
20	763												
21	768												
22	764												
23	768												
24	765												
25	767												
26	767												
27	766.5												
28	765.2												
29	768												
30	768												
31	760												
Totals													
Moy.													

Baromètre à vide. — 0118-146-1910. [1789]

Baromètre : Système : Constructeur : Numéro : Correction :
 Thermomètre à maxima : Système : Constructeur : Numéro : Correction :
 Thermomètre à minima : Système : Constructeur : Numéro : Correction :

NOTA. — On ne fera pas les totaux et moyennes dont la place est barrée par une croix.

Figure 33 : Exemple d'archives de pluies et données d'archives pour Canala mis à disposition par Météo Nouvelle Calédonie et numérisée par Louise Schneider.

Tableau 4 : Détail du code attribué aux données de pluie d'archive

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

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 restant à compléter, des articles de journaux anciens ont été 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. Ces sources sont listées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Journaux collectés présentant des informations d'événements cycloniques sur la Nouvelle-Calédonie

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

3.1.3.4.3. Méthode d'analyse

La BDMF (Base de Données Météo France) est une première base de travail, mais elle est 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, pression à Tahiti PSL) 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 (données de 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'évènements hydrométéorologiques a été constituée puis analysée à l'aide du logiciel R (plateforme RStudio® ; librairies : HydroTSM, Segmented, xlsx, xts) selon une méthode d'analyse organisée en 5 étapes :

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

La méthode suivie a permis d'estimer la variabilité des débits maximum de crue à Thio Saint-Michel. La figure 34 montre une matrice de corrélation des variables pluie-débit qui permet d'analyser les relations entre la variable à expliquer (le débit maximum de crue lors de l'évènement) et les variables explicatives (pluies, indicateurs climatiques, saisonnalité).

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 mois d'avant, de 4 mois avant...).

La corrélation entre le débit et les caractéristiques de pluie est plus intéressante, pour avoir au moins une estimation de leur relation. La probabilité que le débit et la somme de pluie tombée durant l'évènement 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 évènements plus dispersés pour les valeurs plus importantes, pouvant induire une dispersion.

Les pluies peuvent expliquer en partie le débit maximum de chaque évènement de crue à la station de Saint Michel. Les évènements sont représentés en fonction de leur intensité maximale journalière ($\log(I_{max})$) et de leur débit maximal ($\log(Q_{max})$) sur la figure 35.

Cette relation montre une relation log-linéaire par morceau. Le test de Davis nous permet de fixer ce seuil de pluie à 19mm/j (sur la base d'une pluie journalière). Un test de sensibilité pour le choix de cette durée entre évènements de pluie montre qu'en dessous de 5 jours, la position de la cassure ne change pas, et reste à 19 mm/j. Il est à noter que ce seuil de pluie marque aussi un changement de comportement de la distribution fréquentielle des débits maximum annuels.

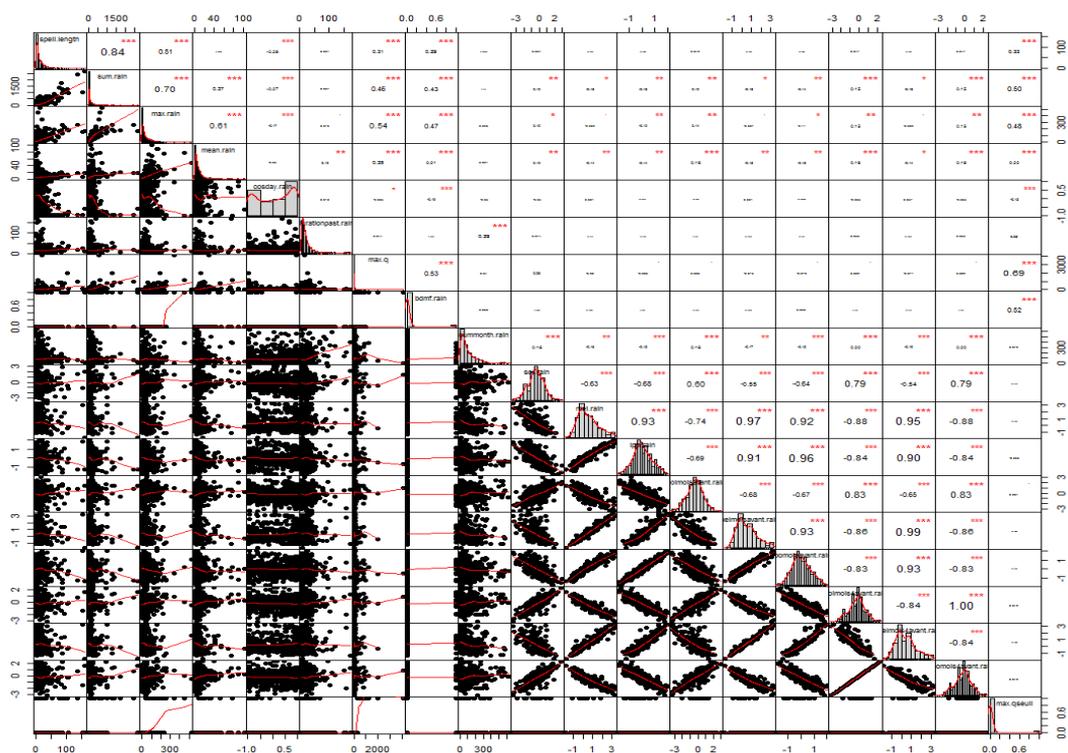


Figure 34 : Matrice de corrélation des variables pluie-débit

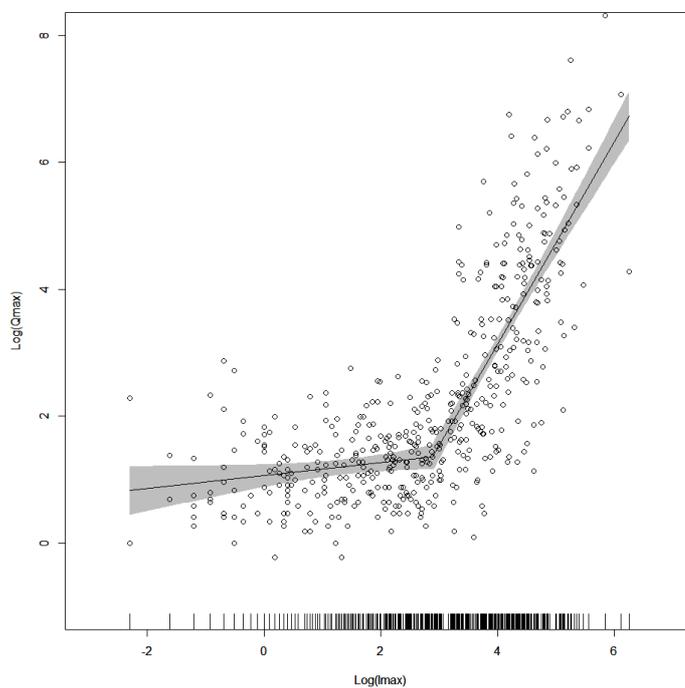


Figure 35 : Relation entre $\log(Q_{max})$ et $\log(I_{max})$

La relation de l'intensité du débit de pic de crue (taille de la bulle), avec l'intensité maximum tombée durant l'évènement et un nouveau paramètre, la pluie cumulée lors de l'évènement est intéressante. Ce dernier paramètre permet d'intégrer le facteur humidité initiale et saturation des sols qui est un paramètre important

pour la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant. De manière générale, plus les intensités de pluie ou les pluies cumulées sont fortes, plus les débits de pic de crue semblent importants. Deux limites (supérieure et inférieure) peuvent être distinguées sur le graphique présenté à la figure 36 (détermination visuelle complétée par une méthode statistique de type *linear discriminant analysis*). Ces limites permettant de créer trois classes d'évènements de pluie (Cat A, B, C), qui se distinguent par le débit maximal des pics de crue observés.

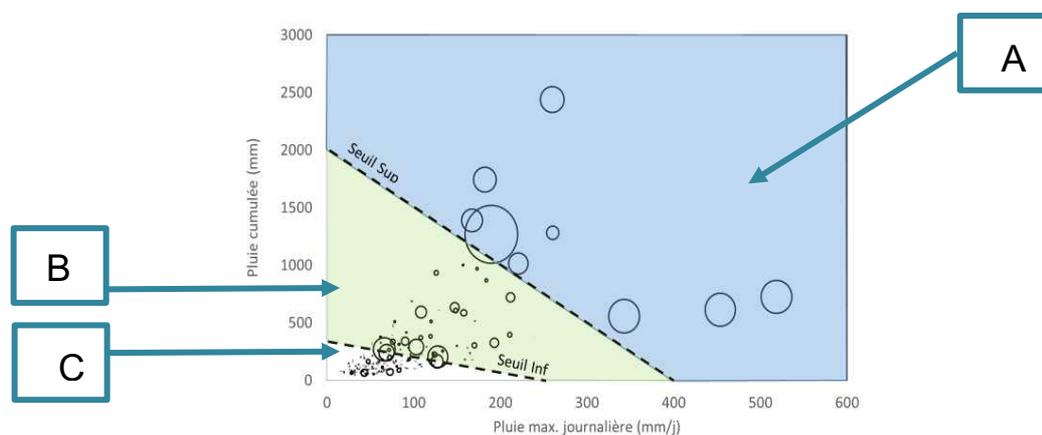


Figure 36 : Relation entre la pluie maximale à Thio Plateau (mm/j) avec la pluie cumulée et le pic de crue ; la taille du cercle renseigne sur l'intensité journalière du pic de crue.

Le tableau 6 décrit les 3 classes d'évènements. Ces trois classes se discriminent de manière satisfaisante en termes de débit.

Tableau 6 : Classes d'évènements et leur description en fonction de leur débit de pic de crue

Classes	Effectifs (entre 1952 et 2015)	Nb evenement référencés dans la BDMF	Qmax	Qmin	Qmed
Type A : Seuil sup	14	71%	2014	507	915
Type B: Entre Seuil sup et seuil inf	172	8%	807	4	83
Type C: En dessous de Seuil inf	991	0.3%	300	0.8	4

Une première classe (« type A ») de 14 évènements comprend 71% des évènements cycloniques ou dépressions fortes référencés dans la BDMF. Elle comprend les principaux évènements majeurs ayant eu lieu sur la Thio (débit journalier $500 \text{ m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 2000 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces évènements sont pour l'essentiels débordants, si on se réfère à la limite de $800\text{-}900 \text{ m}^3/\text{s}$ (définie à partir d'entretiens) dans la zone de l'apex du delta.

Une classe intermédiaire (« type B ») comprend 172 évènements de crue moyennes ; quelques crues importantes se trouvent toutefois dans cette classe ($83 \text{ m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 807 \text{ m}^3/\text{s}$). 8% sont recensés dans la BD MF.

Enfin, la classe des évènements de faible intensité (« type C ») comprend les crues $0.8 \text{ m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 300 \text{ m}^3/\text{s}$. Elle est composée en revanche de 991 évènements climatiques, dont 0.3% recensés dans la BD MF.

Nous pouvons ensuite représenter cette analyse discriminante pour toutes les pluies observées de 1952 – 2017 à Thio Plateau (Fig. 37). Cette figure permet de mettre en évidence 2 types de pluies pour les crues de « type A » : les pluies intenses, mais plutôt courtes (eg. Freda, Anne) et les pluies longues et moins intenses (eg. Beti, Alison, Delilah).

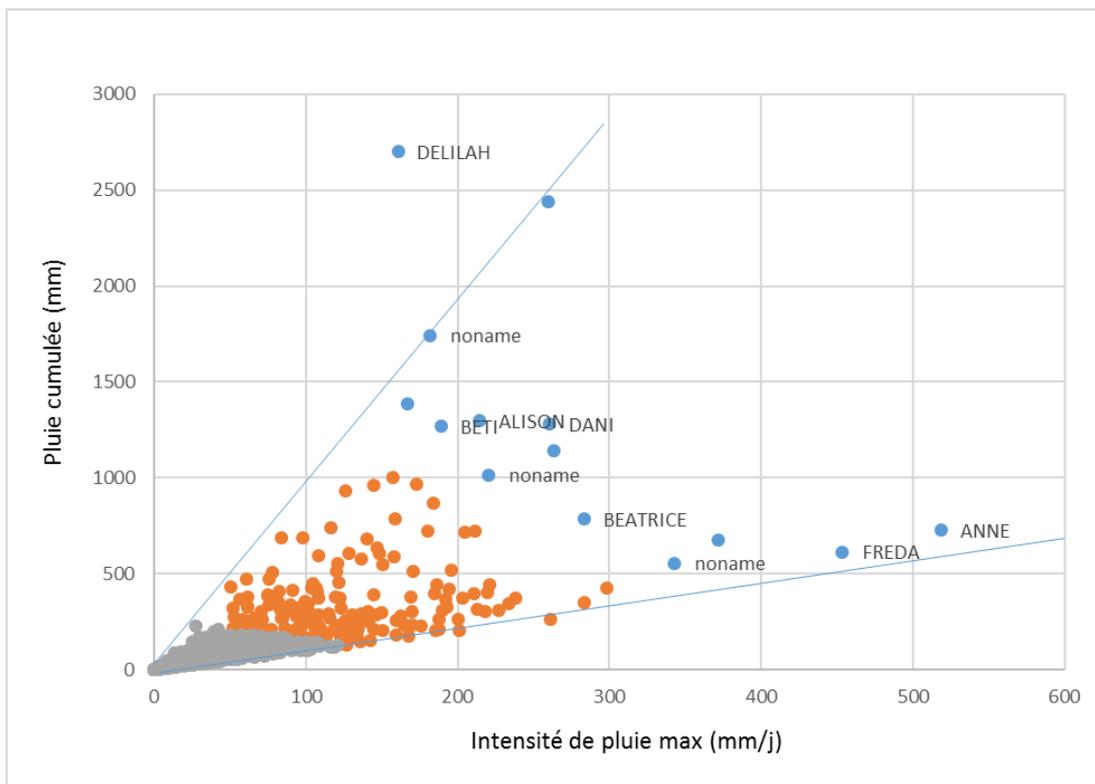


Figure 37 : Représentations sous la forme Intensité de pluie-Cumul de pluie des évènements depuis 1952. En gris, les débits de $0.8\text{m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 300\text{m}^3/\text{s}$; en orange, les débits $83\text{m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 807\text{m}^3/\text{s}$ et en bleu : $500\text{m}^3/\text{s} < \text{QJX} < 2000\text{m}^3/\text{s}$.

L'occurrence des trois classes de pluies peut être reconstituée ensuite avec leur année d'occurrence depuis 1952 (Fig. 38, 39, 40).

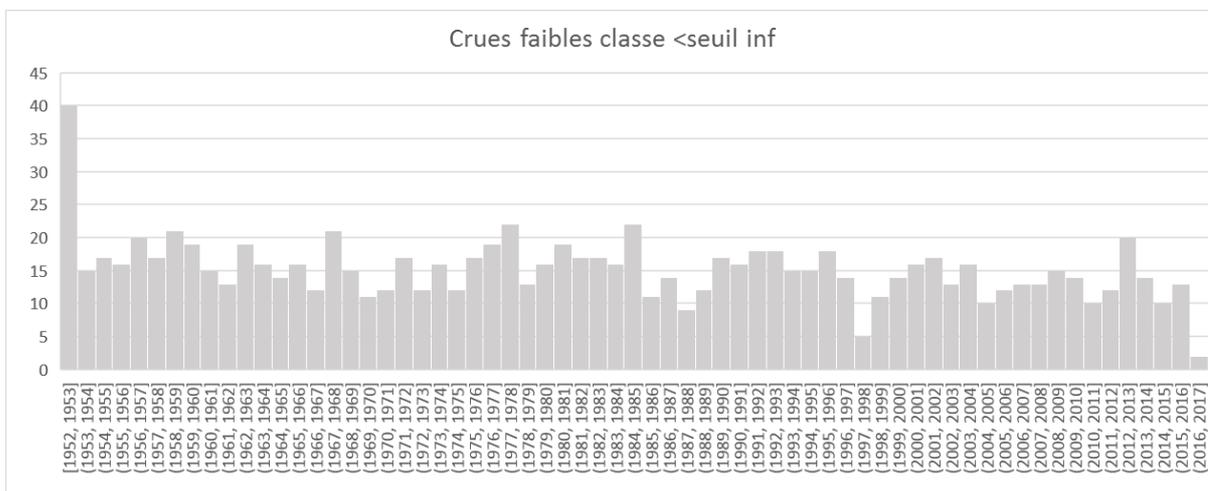


Figure 38 : Répartition des évènements avec des crues faibles « type C » événement.

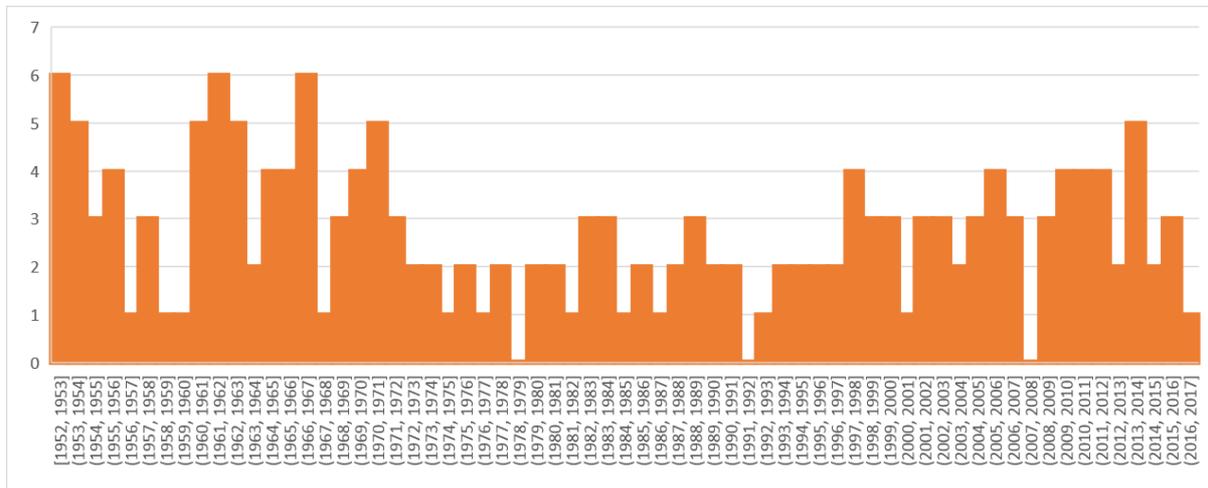


Figure 39 : Répartition des événements avec des crues moyennes « type B »

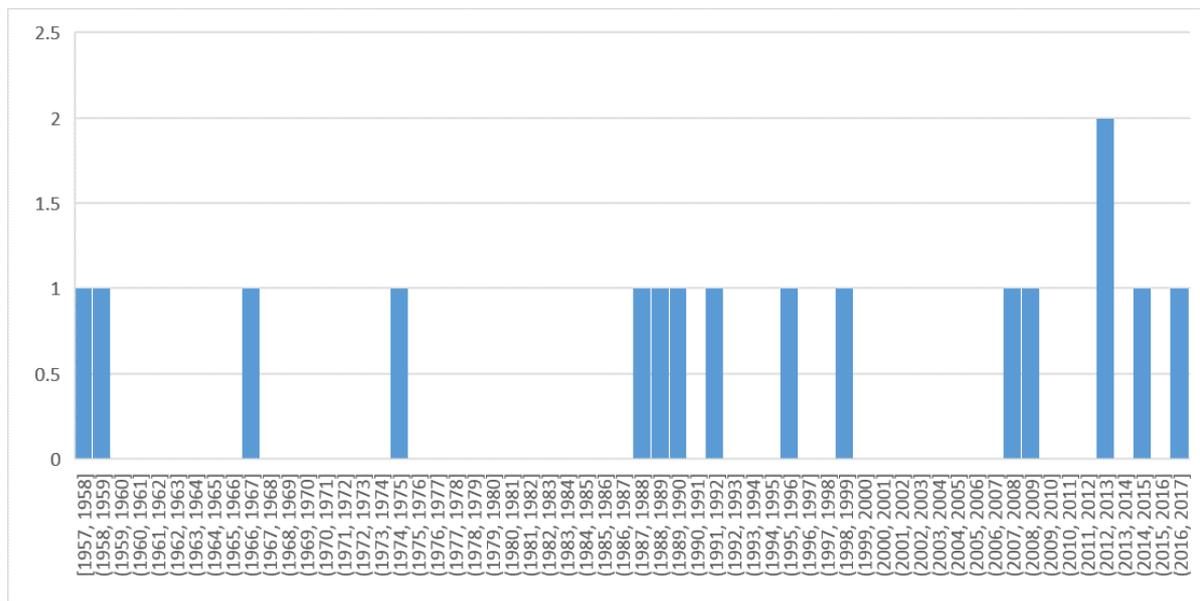


Figure 40 : Répartition des événements avec des crues fortes « type A »

La figure 38 montre que les occurrences des crues d'intensités faibles ne montrent pas de tendance sur la période 1952-actuel.

Pour celle des débits moyens (Fig. 39), 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. À 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 40 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 ont eu lieu de manière plus fréquente, jusqu'en 1999. Ensuite, ils sont observés vers 2008, et 4 événements de la sorte ont été observés entre 2013 (2), 2015 puis 2017.

Si l'on prend du recul sur le travail réalisé, l'analyse statistique des événements montre qu'il est difficile de reconstituer des chroniques de débits sur la première moitié du XXème 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.

Par contre, le travail réalisé permet de reconstituer depuis 1952 la fréquence de classes d'événements en fonction de leur débit de pic de crue (type A, B, C). Ces différents types d'évènement peuvent indiquer des périodes à potentiel de fort transport sédimentaire, utiles pour les analyses de la dynamique fluviale et deltaïque.

3.1.4. CONCLUSION

Pour analyser le forçage météorologique et ses effets sur l'évolution des morphologies des cours d'eau de Nouvelle-Calédonie, de leur engravement et du transfert vers l'aval des sédiments, nous avons traité les données enregistrées sur le pluviomètre de Thio-P. Les premiers enregistrements de ce pluviomètre, qui est encore actif, ont commencé en 1952. La fréquence d'enregistrement est journalière et couvre 64 ans soit 23 697 enregistrements non vides (92 jours sont manquants).

Les analyses réalisées ont porté sur les pluies journalières, les pluies mensuelles, les pluies saisonnières, la recherche de relation entre les oscillations climatiques (ENSO et IPO) et les pluies mensuelles et enfin les événements pluvieux.

Une typologie des événements pluvieux a ensuite été proposée (événements pluvieux courts, événements pluvieux long, événements extrêmes, événements ordinaires...) Puis, une caractérisation des années de 1952 à 2016 selon cette typologie et les différents paramètres pluviométriques préalablement évalués a été réalisée.

Enfin, afin de faciliter l'utilisation des données météorologiques pour interpréter les évolutions morphologiques des cours d'eau et l'évolution de leur sur-engravement, une agrégation de ces données par période entre chaque campagne de photographie aérienne a été effectuée.

L'approche consistant à utiliser les enregistrements d'un pluviomètre sur de nombreuses années comme un indicateur de forçage météorologique a plusieurs limites. Cette approche a toutefois été mise en œuvre car c'est la seule donnée qui couvre de façon continue une longue période temporelle. La période couverte par les enregistrements du pluviomètre de Thio-P est comparable à celle de l'analyse hydro-géomorphologique et à celle des apports en stériles miniers par les décharges et de l'évolution des sols nus (Garcin et al. 2017).

La première limite de l'approche suivie est que les processus d'érosion des sols n'est pas une simple fonction linéaire des pluies mais qu'elle résulte de processus complexes ayant trait aussi bien à la géomorphologie de la zone, la structure du sol, son degré d'humidité avant l'occurrence de l'évènement etc.

La seconde limite réside dans la complexité des relations pluie-débit et cela d'autant plus que les cours d'eau et creeks du bassin de la Thio ont des caractéristiques différentes (pente du linéaire, morphologie, lithologie et couverture végétale etc.). De plus, en fonction de la localisation dans le bassin versant, la réponse en termes de débit de chaque cours d'eau sera très variée (hydrogramme, temps de concentration, vitesse du courant, hauteur d'eau...).

La troisième limite est la variabilité spatiale des pluies à l'échelle d'un bassin versant comme celui de la Thio. Ainsi, les pluies enregistrées à Thio-P ne sont pas nécessairement représentatives des pluies affectant d'autres secteurs du bassin versant notamment les secteurs les plus amont situés dans la Chaîne Centrale. À titre d'exemple, les relations entre les données de pluie journalières à Thio et à Canala ont été étudiées. Bien que le pluviomètre de Canala ne soit qu'à environ 27 km de celui de Thio-P et qu'il soit situé lui aussi à proximité de la côte, le coefficient de corrélation de la droite de régression entre les pluies journalières à Thio et Canala est relativement faible (0,62).

Malgré ces limites, notre analyse permet de mettre en évidence certains enseignements qui sont résumés ci-après :

- La pluviométrie en 24h est, comme attendu, extrêmement variable. Sur les 23 697 jours d'enregistrement, plus de 84% des pluies journalières (19 925 jours) sont comprises entre 0 et 5 mm/j et une pluviométrie supérieure à 300mm n'a été atteinte qu'au cours de 4 jours.
- La pluviométrie annuelle est elle aussi très variable avec des valeurs comprises entre 804 mm/an et 4 111 mm/an, la moyenne se situant aux alentours de 1 764 mm/an.
- Le nombre de jours de pluie par an est compris entre 88 j et 184 j avec une moyenne de 127 j. Une dérive positive du nombre de jour de pluie par an de 1952 à 2016 a été caractérisée, cette tendance est de l'ordre de +0,3 j de pluie en moyenne par an sur la période.
- Il n'y a pas de corrélation significative entre le nombre de jour de pluie par an et la pluviométrie annuelle cumulée. Pour un même nombre de jour de pluie, on a une très forte dispersion de la pluviométrie annuelle. À titre d'exemple, aux environs de 160 j de pluie par an, les précipitations annuelles cumulées sont comprises entre 1 400 mm et plus de 4 000 mm.
- La pluviométrie mensuelle est elle aussi extrêmement variable d'un mois à l'autre mais aussi pour un même mois. Les mois les plus arrosés sont classiquement ceux de Janvier, Février et Mars soit la seconde partie de la saison cyclonique. La variabilité de la pluviométrie pour un même mois est très variable sur la période 1952-2016. Ainsi, la pluviométrie moyenne du mois de Mars est de 249 mm alors que sa pluviométrie maximum a atteint 905 mm.
- La pluviométrie moyenne de la saison cyclonique est de 1 168 mm avec un minimum de 310 mm et un maximum de 3 076 mm. Certaines années se singularisent par leurs fortes précipitations en saison cyclonique comme 1956, 1967, 1989 et 1990. La pluviométrie en saison sèche est elle aussi extrêmement variable d'une année à l'autre avec une moyenne à 597 mm. La valeur minimale est de 131 mm en 1981 et la maximale atteint tout de même 1 633 mm en 1967. Compte-tenu de la quantité de pluies qui peuvent se produire durant certaines saisons sèches, elles ne doivent pas être négligées dans l'analyse des processus d'érosion en versant et de transport solide en rivière.

Une recherche de corrélation entre les oscillations climatiques ENSO (Southern Oscillation Index) et l'IPO (Interdecadal Pacific Oscillation) et les paramètres pluviométriques a été réalisée. Cette analyse n'a pas montré de corrélation directe et significative entre ces oscillations et les différents paramètres pluviométriques calculés. Toutefois, il a été montré que plus la valeur du SOI annuel était élevée (El Niño fort) plus la variabilité de la pluviométrie annuelle était importante. Ainsi pour de faibles valeurs de SOI (phase La Niña) l'intervalle de la pluviométrie annuelle est compris entre 1 000 mm/an et 2 000 mm/an alors qu'en période de fort El Niño l'intervalle est compris entre 1 000 mm/an et 3 500 mm/an. L'année 1967, en phase El Niño modéré, est caractérisée par une très forte pluviométrie, elle apparaît comme exceptionnelle (horsain ou *outlier*). En période ENSO positif, il est donc possible d'avoir des pluviométries très contrastées d'une année sur l'autre avec comme conséquence possible une forte variabilité des érosions des sols, des versants et du transport solide en rivière.

Nous avons reconstitué à partir de l'ensemble des pluviométries journalières les événements pluvieux (jours de pluie continue) de 1952 jusqu'à 2016. **Nous avons ainsi obtenu 3 518 événements sur les 63 ans de chronique.** La durée et la quantité cumulée de pluie pour chaque événement ont été calculées. L'analyse par quantiles a permis de définir des événements types : événements pluvieux (5% des événements les plus pluvieux : $P > 155$ mm), événement long (5% des événements les plus long, durée ≥ 6 jours), événements intense (0.2% des événements avec $P \geq 350$ mm). **Nous avons donc créé les types « événement pluvieux long » ($P > 155$ mm, durée ≥ 6 jours), « événement pluvieux court » ($P > 155$ mm, durée < 6 jours), événements intense ($P > 350$ mm quel que soit la durée), événements ordinaires (tous les autres).** Une classification de tous les événements a été réalisée sur ces critères. Elle a permis, d'une part, de faire ressortir les événements les plus marquants et d'autre part, de caractériser chaque année en fonction du nombre d'événements de chaque type s'y étant produits.

L'analyse de fréquence des événements extrêmes montre qu'ils se produisent en grande majorité en janvier (34 %), en février (14%) et en Mars (25%).

À titre d'exemple, les événements les plus pluvieux se sont produit en 1967 (14j de pluie, 990 mm), en 2008 (11 jours de pluies, 804 mm) et en 1988 (10 j de pluie, 718mm). En termes de durée les événements les plus marquants sont ceux de 1958 avec 18 j de pluie (359mm), de 1993 (16 j de pluie, 361 mm) et de

1956 (15 j de pluies 536 mm). En termes d'intensité moyenne « IM » (pluviométrie de l'événement / durée en jours), les trois événements les plus marquants sont ceux de juillet 2013 (IM 146 mm/j, P 439 mm), de 1990 (IM 133 mm/j, P 400 mm) et de janvier 2013 (IM 132, P 530 mm).

On retrouve dans ce classement les deux événements de 2013 dont les répercussions sur l'évolution de l'engravement des lits de la Néburu et de la Nakalé ainsi que les inondations et dégâts ont été très significatifs. Il est intéressant de noter que l'événement qui apparait en tête du classement s'est produit en dehors de la saison cyclonique ce qui renforce son caractère exceptionnel (seulement 2,9% des événements extrêmes se produisent en juillet sur la période 1952-2016).

Pour chaque année, nous avons calculé la fréquence relative de chaque type d'événement (pluvieux court, pluvieux long, ordinaire) c'est-à-dire le nombre d'événement de chaque type en le normalisant entre la valeur minimale et maximale obtenues sur les 64 années. Les résultats montrent que certaines années sont largement dominées par des événements ordinaires alors que d'autres au contraire voient la proportion des événements pluvieux longs ou courts largement plus importante.

La proportion des différents types a été calculée indépendamment de la pluviométrie annuelle. Cela permet de donner la « signature » de chaque année mais pas nécessairement son impact sur les érosions et transport solide. La courbe normalisée des précipitations annuelles quant à elle permet de faire le lien entre la pluviométrie annuelle et la typologie des années.

Enfin, la consolidation de l'ensemble des paramètres pluviométriques traités pour tous les intervalles temporels entre chaque mission d'acquisition de photographie aérienne devrait permettre de faire le lien entre les évolutions morphologiques de sites restitués à partir de ces mêmes photographies aériennes et les événements météorologiques.

3.2. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS ET ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT

Auteurs : M. Despinoy (IRD), A. Leroux, I. Rouetis (Rouetis R&D) – Annexe 1

3.2.1. OBJECTIFS

Il s'agit d'étudier l'évolution des bassins versants sous l'angle des relations sols nus/végétation à travers les items suivants :

- Quantification des surfaces émettrices de fines ;
- Évaluation de la réponse de la végétation dans le temps (recul, extension) ;
- Évaluation de l'impact de l'activité minière sur la végétation.

Pour chacun des grands bassins versants de la Thio et de la Todré, il était prévu de produire :

- Une cartographie diachronique des sols nus versus végétation ;
- La quantification des surfaces sources (toutes origines) et des surfaces végétales pour chaque date ;
- Une étude des évolutions et la mise en relation sols nus/végétation.

L'objectif principal de cette partie du projet *IMMILA* étant l'observation des évolutions de l'environnement, une première partie de l'étude a été consacrée à l'analyse de l'évolution des limites des sols nus et de la végétation par traitements d'imagerie satellitaire. Compte tenu de la date relativement récente de ce type d'outils d'analyse de l'environnement (le programme Landsat a été lancé en 1972) et des images disponibles sur la zone, ce volet du programme mené par le consortium émerge à la fois au temps récent et au temps présent. Un second volet de ce type de travail consacré à l'évolution diachrone du delta de la Thio est présenté au paragraphe 3.5.

3.2.2. CARTOGRAPHIE DES BASSINS VERSANTS DE LA THIO ET DE LA TODRÉ

Pensée pour donner une vision générale de l'évolution environnementale liée à l'érosion par ruissellement, cette partie de l'étude a permis de mettre en évidence la manière dont a évolué le tandem de surfaces sols nus/végétation au cours de la période 1986-2015. En effet, la végétation est l'élément majeur de la protection des sols contre l'érosion par sa capacité à favoriser l'infiltration des eaux de pluie et à limiter l'impact de la pluie sur le sol. Sa disparition ou une dégradation importante sur les versants déstabilise le sol et favorise le ruissellement qui conduit à l'érosion.

À partir de traitements d'images satellitales, un premier niveau de cartographie distingue les sols nus de la végétation à différentes dates, entre 1986 et 2015. Cette cartographie est ensuite affinée à plusieurs niveaux de manière à proposer différentes classes de sols nus pour chaque date : selon que l'érosion est dominante ou non, prise en compte de la présence de pistes, des excavations artificielles (minières essentiellement).

Une fois ces cartographies réalisées, il devient possible de quantifier à chaque date les surfaces concernées par les différents thèmes et pour chaque classe. Cette quantification a été réalisée à l'échelle de sous-bassins versants couvrant les bassins de la Thio et de la Todré. La comparaison diachronique de ces surfaces permet ainsi d'étudier l'évolution des différents types de sols nus et de la végétation à l'échelle des sous-bassins versants. C'est à ce stade que des tendances ou des changements peuvent être mis en évidence, tant du point de vue de la végétation que des sols nus. Si la quantité de matériaux libérés ne peut être quantifiée ici (traité dans d'autres paragraphes), l'évolution des surfaces illustre cependant la dynamique générale au sein des sous-bassins, qu'elle soit à la faveur de la végétation ou liée à l'augmentation des surfaces émettrices de particules solides.

3.2.2.1. Données de base

La plupart de ces informations ont été téléchargées et sont libres d'accès ou sous couvert de convention entre l'IRD et l'organisme fournisseur de la donnée. Ces couches sont intégrables dans tous les systèmes d'information géographiques et projetées dans le système de projection local (Lambert Nouvelle-Calédonie RGNC 91-93, référencé par l'organisme international IOGP sous la référence : EPSG:3163).

- Couches au format VECTEUR
 - Il a été utilisé la BDTOPO-NC au 1/10.000 (DITTT).
- Couches au format RASTER

Les sources utilisées sont les suivantes :

- **Le modèle numérique de terrain (MNT)** au pas de 10 m de la DTSI, complété par celui de la DITTT dans les zones terrestres sans données

Les images satellitales utilisées sont présentées dans le tableau 7 avec leurs principales caractéristiques.

Tableau 7 : Principales caractéristiques des images satellitaires utilisées

	SPOT 1 1986	SPOT 3 (1994-1995)	SPOT 4 (1999)	LANDSAT 8 (2015)
Date	09/10/1986	16/12/1994 01/05/1995 23/09/1995	07/06/1999	03/06/2015
Système de référence spatial	WGS 84	WGS 84	WGS 84	WGS84
Source	IRD	Spot World Heritage (Programme THEIA)	Spot World Heritage (Programme THEIA)	USGS/earthexplorer
Résolution spatiale	Bandes 1 à 3 : 20 m	Bandes 1 à 3 : 20 m	Bandes 1 à 3 : 20 m	Bandes 1 à 7 et 9 : 30 m Bande 8 : 15 m Bandes 10 et 11 : 100 m
Résolution Spectrale	Bande 1 : Vert (0,50–0,59 μm) Bande 2 : Rouge (0,61–0,68 μm) Bande 3 : Proche infrarouge (0,78–0,89 μm)	Bande 1 : Vert (0,50–0,59 μm) Bande 2 : Rouge (0,61–0,68 μm) Bande 3 : Proche infrarouge (0,78–0,89 μm)	Bande 1 : Vert (0,50–0,59 μm) Bande 2 : Rouge (0,61–0,68 μm) Bande 3 : Proche infrarouge (0,78–0,89 μm) Bande 4 : Moyen infrarouge (MIR) (1,58–1,75 μm)	Bande 1 - Aérosols 0,433 - 0,453 μm Bande 2 - Bleu 0,450 - 0,515 μm Bande 3 - Vert 0,525 - 0,600 μm Bande 4 - Rouge 0,630 - 0,680 μm Bande 5 - Infrarouge proche 0,845 - 0,885 μm Bande 6 - Infrarouge moyen 11,560 - 1,660 μm Bande 7 - Infrarouge moyen 22,100 - 2,300 μm Bande 8 - Panchromatique 0,500 - 0,680 μm Bande 9 - Cirrus 1,360 - 1,390 μm
Correction géométrique / radiométrique (niveau 1)	Oui	Oui	Oui	Oui
Ortho rectification (niveau 2)	Non	Oui	Oui	Oui

3.2.2.2. Méthodologie

L'étude et l'analyse de l'évolution des bassins versants ciblés nécessitent la mise en place de traitements de données spatialisées (terrain et satellitaires) afin de caractériser en premier lieu la présence ou non de végétation pour chaque date retenue. En milieu terrestre, l'absence de végétation traduit soit la présence de sol nu, soit la présence d'eau.

Cas de l'eau : à l'échelle du pixel de travail (20 m x 20 m), les surfaces en eau hors des cours d'eau sont négligeables dans la zone d'étude. Concernant les cours d'eau, nous avons considéré ici que l'eau court sur des sédiments, ce qui est le cas pratiquement partout dans les zones sans végétation détectées. L'eau courante n'a donc pas été spécifiquement traitée pour considérer plutôt l'étendue des sédiments à nu ou sous tranche d'eau (*i.e.* sédiments non couverts par de la végétation).

De manière à distinguer les sols nus producteurs de matière des autres, des descripteurs géomorphologiques du milieu ont été mis en place (voir plus loin). Dans un deuxième temps, la distinction de divers types de sols nus, intervenant dans l'alimentation sédimentaire, a été réalisée par recoupement avec les descripteurs géomorphologiques précités, des informations préexistantes et expertise du terrain.

Enfin, la quantification en superficies de ces types de sols et de la végétation pour chacune des images satellitaires, a permis l'analyse de leur évolution par sous-bassin versant sur près de 30 ans.

⊙ **Bassins et sous-bassins versants**

L'étude porte ici sur les bassins versants de la Thio et de la Todré. Pour suivre l'évolution de ces grands bassins, ceux-ci ont été scindés en zones géomorphologiques qui correspondent pour la plupart à des sous-bassins versants et pour les quelques autres à des versants alimentant un tronçon hydrographique. Toutes ces zones sont par convention nommées sous-bassin versant dans cette partie. Certains sous-bassins ayant un nom et d'autres pas, ceci appelle à nommer chacun par un identifiant numérique plutôt que par son nom vernaculaire, bien que ce dernier puisse parfois aussi être évoqué. Les sous-bassins 0 à 49 appartiennent au bassin versant de la Thio et les 50 à 60 à la Todré. Les résultats présentés dans cette partie font suite à des analyses à l'échelle du grand bassin versant et à l'échelle de ces sous-bassins.

Dans le bassin de la Thio, les sous-bassins sont les mêmes que ceux utilisés par le BRGM dans sa contribution consacrée à l'évolution des apports miniers dans le bassin versant de la Thio de ce programme. Les résultats sur ce grand bassin versant peuvent donc être mis en relation puisqu'ils concernent les mêmes emprises (voir tableau 8 pour les correspondances entre les numéros utilisés ici et les noms vernaculaires des sous-bassins). Notons une petite différence sur les seuls sous-bassins 0 et 1 qui ont légèrement été tronqués dans ce volet car l'image de 1986 ne couvrait pas ces secteurs (266 ha au total, dont 188 ha dans le sous-bassin 0 (4,24 % de sa surface) et 78 ha dans le sous-bassin1 (1,48 % de sa surface). Les calculs dans ces sous-bassins sont basés sur la surface tronquée analysée pour toutes les dates pour obtenir des résultats comparables entre eux.

Dans le bassin de la Todré, les sous-bassins ont été tracés à partir d'un calcul sur le MNT à 10 m. Des modifications ont été apportées à ce tracé automatique pour répondre à deux impératifs :

- Conserver exactement les limites des sous-bassins de la Thio lorsqu'elles sont partagées pour préserver l'intégrité des sous-bassins de la Thio et ainsi avoir des résultats comparables à ceux du volet B2 ;
- Étendre le sous-bassin estuarien de la rive gauche de la Todré (58) pour couvrir la totalité de la zone alimentant le littoral jusqu'à la pointe de Cagou, dans la perspective d'une réflexion sur la production sédimentaire alimentant le delta de la Todré (baie de Port-Bouquet).

Tableau 8 : Correspondance entre les numéros des sous-bassins de la Thio et leur nom vernaculaire (source BRGM)

ID	Noms	ID	Noms	IS	Noms
0	Kwe Hwaa	18	Xwe Tomuru	34	Thio Riv. Intermédiaire
1	Karaka Rau	19	Xwe Pe	35	Thio Riv. Amont
2	Wa Weye	20	Nemuru	36	Kuenthio Rive Droite
3	Wa Neii	21	Xwe U	37	Xwe Neco
4	Xwe Ne Daami	22	Xwe Nepu	38	Contact Kuenthio Thio Riv.
5	Karingue	23	Xwe Mue	39	Xwe Xu Moto
6	Xwe Xarage	24	Wa Wi	40	Xwe Too
7	Xwe Chiremwawa	25	Bwa Neca	41	Thio Riv. aval Rive gauche
8	Xwe Tawa	26	Xwe Nekaca	42	SBV Thio Riv.1
9	Xwe Wido	27	Thio Riv. aval Rive droite	43	SBV Thio Riv.2
10	Xwe Pewi	28	Xwe Mea	44	SBV Thio Riv.3
11	Xwe Wio	29	Xwe Pexwawi	45	SBV Thio Riv.4
12	Neburu	30	Tomo	46	Kouenthio Riv. Amont
13	Nakare	31	Xwe Ngere	47	Kouenthio Riv. Intermédiaire
16	We Nedachia	32	Fouangueri	48	Nedoro
17	Xwe Wetu	33	Xwe Menya	49	Thio Riv. pétroglyphes Rive droite

⊙ **Caractérisation géomorphologique des bassins étudiés et érosion**

L'objectif est ici d'analyser les prédispositions géomorphologiques locales vis à vis de l'érosion par ruissellement : cartographier les zones favorables ou non à l'apparition ou à l'aggravation du phénomène. C'est l'attendu en termes de fonctionnement naturel qui est recherché ici, sans préjuger des perturbations anthropiques.

À partir du MNT à 10 m, des descripteurs morphologiques ont été calculés puis combinés pour produire une carte géomorphologique binaire des zones favorables ou non à l'érosion par ruissellement. Les zones considérées comme favorables à l'érosion sont localement en position dominante et leur pente est supérieure à 6°, alors que les conditions de position localement basse à pente inférieure à 6° sont considérées comme défavorables à l'érosion (*i.e.* favorables au dépôt).

Cette carte du caractère localement favorable à l'érosion ne prend pas en compte la lithologie car à l'échelle considérée, et notamment sur mine, la carte géologique disponible ne reflète pas toujours la nature des matériaux de surface. Le postulat posé est donc le suivant : dans les conditions de terrain les plus fréquentes connues en Nouvelle-Calédonie, les sols nus sont sensibles à l'érosion et émetteurs de matériaux dès lors qu'ils sont soumis au ruissellement. Une surface nue et morphologiquement propice à l'érosion sera donc ici considérée comme émettrice de matériaux, au minimum de particules fines. Un recoupement de la carte morphologique avec les sols nus télédétektés permet par conséquent de distinguer les sols nus émetteurs de sédiments des autres sols nus. Cette approche est possible ici car il n'est pas connu d'affleurements étendus et exclusivement rocheux dans la zone d'étude.

⊙ **Traitements des images satellitaires – les indices**

Les sols et la végétation sont les deux thèmes géographiques terrestres les plus observés par les satellites de télédétection (Escafadal, 1990). L'observation de la végétation au travers de la télédétection s'appuie essentiellement sur l'absorption du rayonnement rouge par les végétaux à forte activité chlorophyllienne, tandis qu'ils réfléchissent la fraction du spectre solaire dans les longueurs d'ondes correspondant à l'infrarouge (Escafadal, Huete, 1991). Selon Baret et al., 1988, les canaux rouges et proches infrarouges sont les mieux adaptés pour l'étude des couverts végétaux car ils constituent à eux seuls 90 % de l'information spectrale relative à la végétation vivante. Ainsi, la surveillance de la couverture végétale s'est développée par le biais d'indices utilisant les mesures radiométriques de l'activité photosynthétique de la végétation (Bannari, et al. 2002).

Étant donné que l'utilisation d'une bande spectrale est insuffisante pour l'étude de la végétation, les indices de végétation utilisent en général plusieurs bandes spectrales. Le NDVI, premier indice exprimant le contraste entre les valeurs mesurées dans les bandes rouges et infrarouges (Escafadal, Huete, 1991), correspond à la mesure quantitative indiquant la dynamique de la végétation (Campbell, 1987). Plus sa valeur est forte, plus la végétation est dense.

Dans la littérature, celui-ci a fait l'objet de critiques de la part de la communauté scientifique. C'est pourquoi plusieurs indices ont été développés, permettant de rendre compte des effets perturbateurs, tels que la couleur et la brillance des sols nus (Bannari et al. 1996). Nous avons calculé le MSAVI2 (Modified Soil Adjusted Vegetation Index 2) développé par Qi et al., 1994, afin de prendre en compte l'influence des sols. Selon Bannari et al., 2002, l'intérêt du développement de ces indices consiste à étudier l'évolution de l'occupation des sols et permettre l'analyse de la dynamique saisonnière de la végétation versus sols nus à plusieurs échelles.

Tout comme la végétation, le comportement spectral des sols se différencie par la teneur en minéraux, la pédologie et la lithologie. Les valeurs de réflectance sont croissantes du visible au proche infrarouge. Afin d'étudier les sols nus, nous avons fait le choix d'utiliser plus d'indices, car sur la zone d'étude choisie ils représentent une part très inférieure à celle de la végétation (environ 3% sur l'image Landsat de 2015 par exemple). Par ailleurs, il s'avère que leur distribution spatiale est très hétérogène et concerne de petites surfaces parfois inférieures à la résolution des images choisies (uniformisation des résolutions à l'image la moins résolue) soit 400 m² (pixel de 20 m x 20 m). Ces indices nous permettront donc d'observer dans quelle mesure il est possible de détecter des types de sols nus au travers d'images satellites multi-temporelles. Les traitements réalisés à partir des images ont fait l'objet de publications dans le cadre d'études sur la Nouvelle-Calédonie. L'indice de rougeur et l'indice de brillance ont donné des résultats satisfaisants afin de caractériser la nature des formations de surface (Mougel, Selmaoui, 2013 ; Rouet et al. 2009). Afin d'apporter plus d'information radiométrique aux modèles de traitement pour la distinction entre les sols, nous avons ajouté l'indice de cuirassement, l'indice ferrique et l'indice de coloration (*cf.* Tabl. 9).

En résumé, dans le cadre de notre étude, nous avons utilisé les indices mentionnés dans le tableau 9 principalement pour l'optimisation de la séparation des sols nus de la végétation et pour l'élaboration des masques des ombres dues aux reliefs.

Tableau 9 : Présentation des indices de végétation et de sols

Indice		Formule	Sources
Indices de végétation	NDVI	$\frac{PIR - R}{PIR + R}$	Rouse <i>et al.</i> , (1974)
	MSAVI 2	$\frac{(2 * NIR + 1 - \sqrt{(2 * PIR + 1)^2 - 8 * (PIR - R)})}{2}$	Qi <i>et al.</i> (1994)
Indices de sol	Indice de cuirassement	$3 * V - R - 100$	Roquin, Pion, Dandjinou (1989)
	Indice de rougeur	$\frac{V^2}{R^3}$	Escfadal et Huete (1991)
	Indice Ferrique	$\frac{R - V}{R + V}$	Devineau, Zombre (2009)
	Indice de coloration	$\frac{V - R}{2}$	Escafadal, Belghit, Ben Moussa, (1994)
	Indice de Brillance	$\sqrt{\frac{V^2 + R^2 + PIR^2}{3}}$	Rouet <i>et al.</i> (2009)

Pour les traitements qui ont suivi, une normalisation radiométrique des images a été réalisée par un ré-étalement linéaire des valeurs des indices entre 0 et 255, afin de les rendre comparables. Cela a également pour effet d'améliorer les contrastes au sein des images.

À ce stade, les sorties sur le terrain ont permis d'avoir une idée précise de la répartition des sols nus et de mieux guider cette étape de séparation sols nus *versus* végétation sur les images.

Afin de répondre aux objectifs (analyse de l'évolution des limites sols nus / végétation), nous avons opté pour une solution de seuillage d'histogramme des valeurs des pixels des images satellitaires pour la séparation dans un premier temps des sols nus et de la végétation pour chacune des images. Chaque seuil a été réalisé par itération et par expertise du terrain pour isoler ces 2 classes. Cette méthode est simple et rapide à mettre en œuvre et a permis l'obtention de seuils précis et fiables.

En effet, l'approche pixels (classification des images par arbres de décision de type Random Forest ou XGboost) n'a pas permis d'obtenir des cartes cohérentes de classes de sols, probablement en raison de la complexité des interactions spectrales entre classes de sols (hétérogénéité) ainsi qu'une résolution spatiale (20 m) peu adaptée à cette analyse.

Les résultats des seuillages d'histogramme ont ensuite été utilisés comme base et affinés par l'introduction de données exogènes (morphologie, piste, zones d'excavation...) dans un modèle réalisé sous SIG. L'ensemble des traitements d'image (calculs des masques sols nus, végétation, ombres dues aux reliefs et mosaïques) a été réalisé sous le langage open source R. Seules les corrections géométriques des images (orthorectification pour la SPOT86 et géo-corrrections pour les autres images) ainsi que l'introduction des données exogènes pour la distinction fine des sols, ont été réalisées sous les logiciels ENVI, ArcGIS et QGIS.

⊙ **Détermination des unités de surface cartographiées**

Un rapport du BRGM (référéncé BRGM/RP-66840-FR de Mai 2017), concernant la quantification et l'évolution temporelle des apports miniers dans les bassins de la Thio et de la Tontouta fait état des changements dans plusieurs classes de sols nus regroupées elles-mêmes dans 2 familles (tableau 10): les zones productives (zones en érosion et produisant des matériaux de toutes les classes granulométriques) et les zones actives (sols nus dont l'origine est anthropique).

Tableau 10 : Évolution des superficies (ha) par type de sols (BRGM, 2017)

		1954	1976	2008
Code	Zones productives			
Type 1	Erosion naturelle	59	71	76
Type 2	Zone de décharges minières	110	218	211
Type 3	Erosion sur mines	25	104	99
	Superficie en Ha	194	393	386
	Zones actives			
Type 4	Zones exploitations	233	775	831
Type 5	Pistes mines	44	613	596
	Superficie en ha	277	1388	1427

Ces évolutions ont été réalisées par photo-interprétation et concernent les années 1954, 1976 et 2008 (Fig. 41). Notre analyse au sein du projet *IMMILA* concerne l'évolution des sols par traitement automatique d'images satellites et est donc restreinte à l'existence d'images. Les données disponibles sur les bassins versants (BV) de la Thio et de la Todré concernent les années 1986, 1994/95, 1999 et 2014, soit 4 dates encadrées de rouge sur la figure 41 présentée ci-dessous.

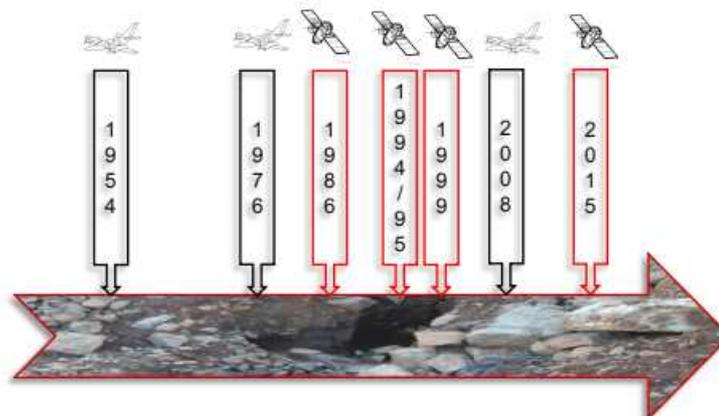


Figure 41 : Date d'acquisition des données (noir : BRGM ; rouge : IRD)

La classification selon les types de 1 à 5 du BRGM ne peut pas être utilisée ici car les approches sont différentes (approche pixels sur images satellitales, résolutions spatiales différentes, objectifs différents...). Le tableau 11 présente les distinctions de classes par niveau appliquées dans l'approche par télédétection. La correspondance avec les classes BRGM est limitée aux sols nus à érosion dominante (niveau 2), qui font référence à l'ensemble des zones productives et actives. Nos résultats ont été confrontés à ce travail pour validation.

Tableau 11 : Classification des sols nus télédéteectés, basée sur la morphologie et les données exogènes.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Végétation	Végétation	Végétation
Sol nu	Sol nu sans érosion dominante	Sol nu sans érosion dominante autre
		Sol nu sans érosion dominante sur voirie
		Sol nu sans érosion dominante sur excavation artificielle
	Sol nu à érosion dominante	Sol nu à érosion dominante autre
		Sol nu à érosion dominante sur voirie
		Sol nu à érosion dominante sur excavation artificielle

Les classes de sol nu de niveau 2 sont distinguées en se basant sur la carte géomorphologique du caractère localement favorable à l'érosion par ruissellement : lorsque la morphologie locale est favorable à l'érosion, le sol nu est classé en « sol nu à érosion dominante », sinon en « sol nu sans érosion dominante ».

Au niveau 3, les données de la BDTOPPO ont été utilisées pour distinguer les sols nus sur voirie et sur excavation artificielle. La voirie a été traitée toutes voies confondues, de manière à apprécier leur évolution dans sa globalité : elles évoluent peu spatialement depuis 1986 (hormis sur mine en activité), et par ailleurs leur usage a pu changer au cours du temps (ex. : pistes minières devenues d'usage commun). La seule évolution de voie susceptible d'être mise en évidence ici est donc une éventuelle réduction de surface de sol nu au profit de la végétation car il n'y a pas de vision diachronique de la voirie dans les données disponibles. Les excavations artificielles correspondent dans la zone d'étude, dans leur très grande majorité, à des plateformes minières, ce qui permet d'individualiser ces surfaces directement liées à l'activité minière passée ou actuelle dans la classification. L'habitat étant essentiellement dispersé hormis dans la zone de l'estuaire de la Thio, le bâti n'a pas été utilisé car très peu significatif en superficie, peu évolutif devant l'évolution générale des surfaces étudiées et peu lié à l'expression de l'érosion dans la zone ; ce thème est donc inclus dans les classes « sols nus autres ».

⊙ **Quantification des surfaces et évaluation des changements**

- Quantification des classes « sols nus » et « végétation »

Un développement de scripts sous le langage de programmation R a permis l'exploitation des masques végétation/sols nus en calculant le nombre de pixels par images (1986, 1994-95, 1999 et 2015) et par

classes. Connaissant la surface d'un pixel, la surface de chaque classe a pu être quantifiée par sous-bassin versant.

- Quantification des unités de surfaces (séparation des sols nus principalement)

Selon le même principe de scripts R, le calcul des surfaces a été réalisé par classe de sols nus de niveau 3. Le calcul des statistiques liées aux descripteurs géomorphologiques a été quant à lui opéré sous QGIS, le principe du calcul de surfaces raster restant le même que sous R.

Une fois les proportions des différentes classes connues pour chaque sous-bassin versant et à chaque date, une comparaison a été réalisée selon deux approches :

- Comparaison entre chaque date et 1986 (1986-1994-95, 1986-1999, 1986-2015) ;
- Comparaison de date à date (1986-1994-95, 1994-95-1999, 1999-2015).

Au-delà du terrain et de l'analyse des résultats, l'interprétation a aussi été étayée par les résultats obtenus dans les autres volets du projet.

3.2.2.3. Résultats

⊙ **Répartition des sous-bassins de la zone d'étude**

La répartition géographique des bassins versants représente un total d'environ 460 km² analysés (~45 830 ha), dont environ 393 km² (~39 285 ha) pour la Thio et 65 km² (~6 545 ha) pour la Todré.

Avertissements :

1. Une petite partie du bassin amont de la Thio a dû être retirée des analyses car elle n'était pas couverte par une des images (sous-bassins 0 et 1 concernés, voir méthodologie), ce qui permet de ne s'intéresser qu'aux surfaces comparables d'une date à l'autre sur les images ;
2. Malgré tout le soin apporté au calcul des superficies, il est à noter que selon l'outil utilisé (calculs vecteurs sous ArcGIS, QGIS, ou calculs raster sous R et QGIS), les résultats peuvent varier légèrement du fait de pixels comptabilisés ou non aux limites et des différents algorithmes vectoriels utilisés (0,01 % soit 6,4 ha de variation sur la base du total des surfaces calculées avec un maximum 0,97 % (0,27 ha) pour un des plus petits sous-bassins ou encore de 1,74 ha (0,04%) d'un des plus grands sous-bassins)
3. Il est rappelé ici que les résultats sont à considérer en gardant à l'esprit la résolution spatiale des images qui ont un pixel de 20 m x 20 m (surface minimale d'analyse de 400 m²), ce qui amène nécessairement à des approximations. Les valeurs surfaciques sont par conséquent toujours à considérer avec une mention d'approximation dans ce volet. Cela ne remet cependant pas en cause l'ordre de grandeur des résultats à l'échelle du sous-bassin, dont les surfaces sont exprimées en hectares.

La figure 42 présente l'extension géographique de l'ensemble des sous-bassins sur lesquels porte ce volet de l'étude. Leurs superficies sont hétérogènes : dans le bassin de la Thio elles vont de 20 ha pour le petit sous-bassin 35 à plus de 5 260 ha pour le sous-bassin 1 à l'amont ou plus de 4850 ha pour le 12. Dans le bassin de la Todré, les sous-bassins couvrent de 78 ha (n° 54) à 1 415 ha (n° 60).

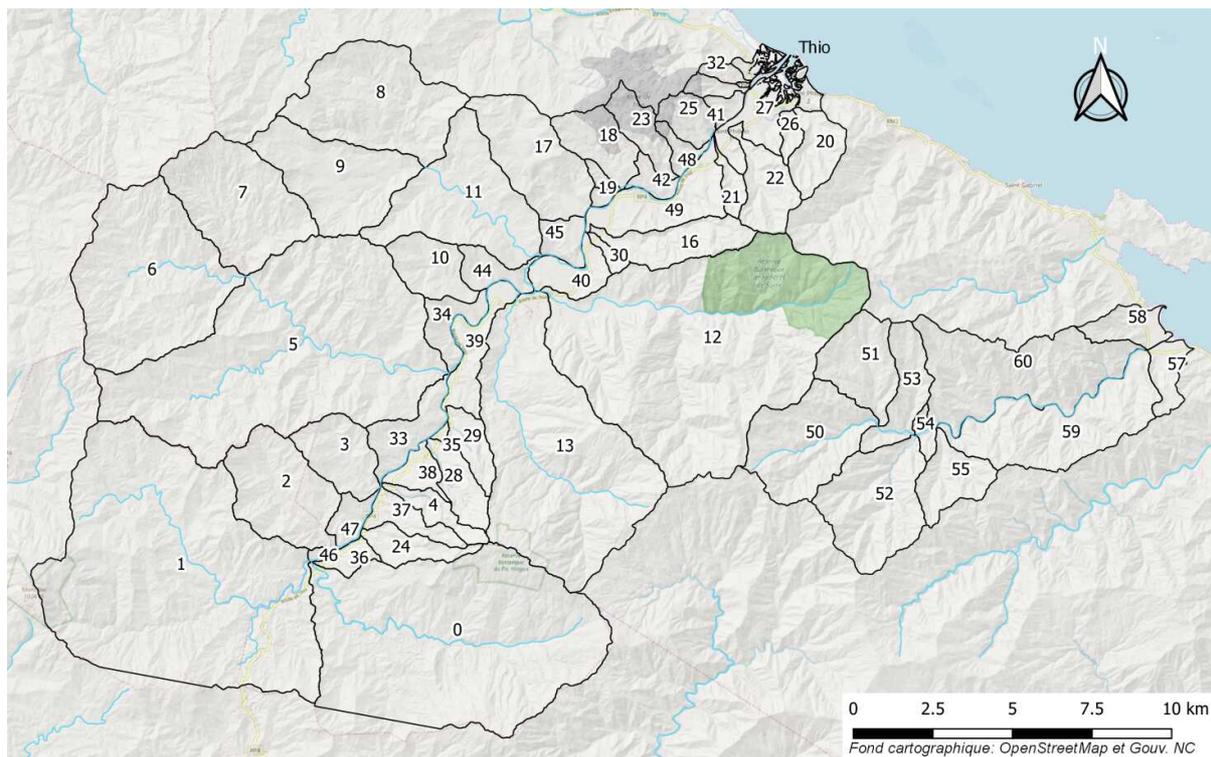


Figure 42 : Répartition et identification des sous-bassins versants de la Thio (0-49) et de la Todrè (50-60).

⊙ **Caractérisation géomorphologique de la zone d'étude**

La carte du caractère localement favorable à l'érosion distingue les zones d'érosion potentielle des zones où l'érosion est fortement improbable (Fig. 43). Comme indiqué précédemment, elle ne rend pas compte de la nature des matériaux disponibles mais indique les zones où l'on s'attend à observer soit des phénomènes d'érosion liée au ruissellement (sans couverture végétale suffisante), soit à l'inverse des zones défavorables à l'érosion.

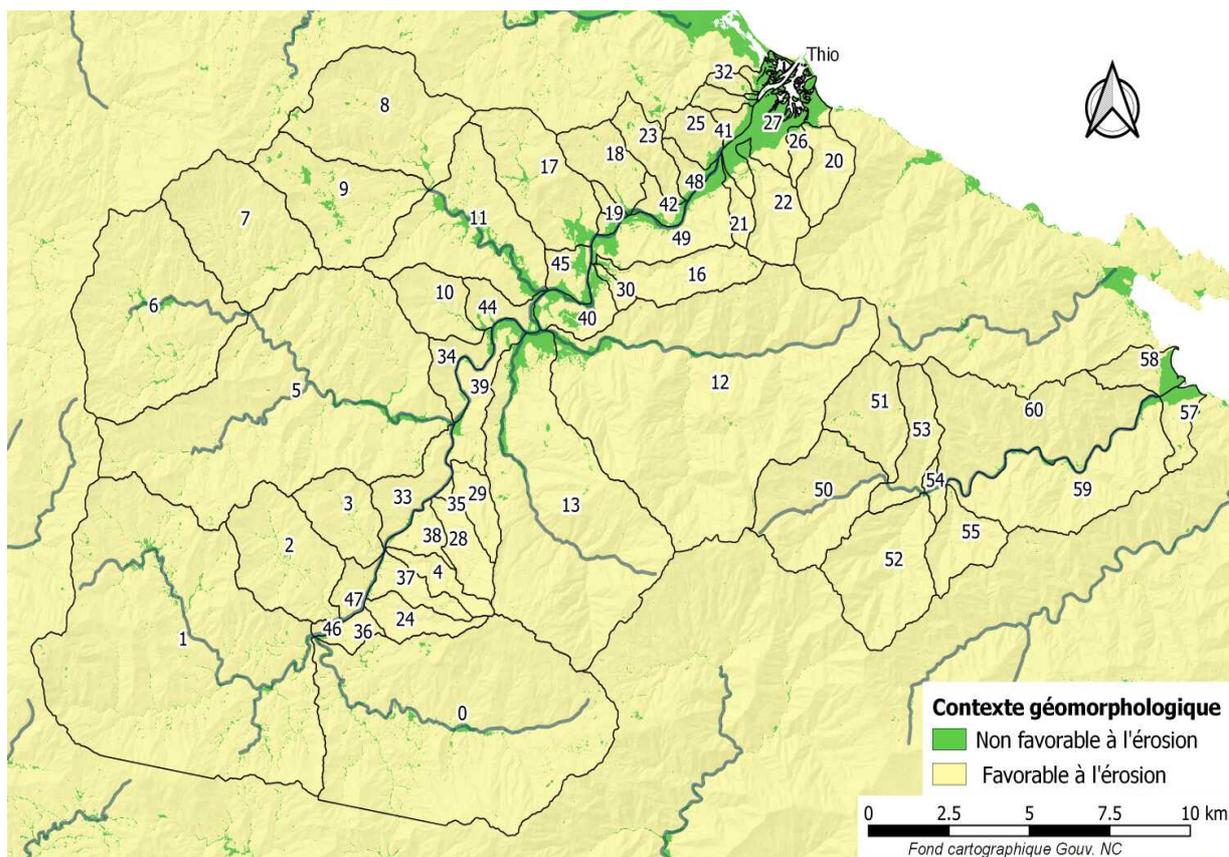


Figure 43 : Carte du caractère localement favorable à l'érosion par ruissellement

C'est sur cette base géomorphologique que les sols nus télédétektés ont été différenciés en sols nus à érosion dominante (source de matériaux) ou non. Selon les sous-bassins versants considérés, la proportion de surface potentiellement favorable à l'érosion par ruissellement est par conséquent différente. Sans surprise, les zones peu favorables à ce type d'érosion comme la basse vallée de la Thio et celle de ses principaux affluents (fonds de vallée), sont particulièrement bien mises en évidence, de même que les estuaires. À contrario, l'essentiel des versants est favorable à l'érosion, à l'exception de creux naturels ou anthropisés et parfois également sur mine.

À l'échelle du grand bassin versant, ces zones peu favorables à l'érosion représentent environ 2001 ha pour le bassin de la Thio et environ 179 ha pour celui de la Todrè, contre environ 37 282 ha de surfaces favorables à l'érosion par ruissellement pour la Thio et environ 6 366 ha pour la Todrè. Cela signifie que le bassin de la Thio présente environ 95 % de surfaces potentiellement favorables à l'érosion et la Todrè 97 %.

À l'échelle du sous-bassin versant, les zones peu favorables à l'érosion par ruissellement représentent parfois une surface importante rapportée à celle du sous-bassin (Cf. cartes en Annexe 1). Les plus concernés sont, dans la Thio, les sous-bassins 27 (estuaire) avec plus de 70 % et 43 avec 43 %, 40 avec 39 %, tous étant situés dans les zones morphologiques accumulatives de l'aval du bassin versant. Dans la Todrè, ce sont sans surprise les sous-bassins 57 et 58 (estuaire) avec plus de 20 % de surface du sous-bassin, cette valeur plus faible étant liée à des versants escarpés et à une embouchure peu évasée en comparaison de celle de la Thio.

À l'inverse, sur les versants, les surfaces favorables à l'érosion prédominent sans surprise dans les sous-bassins de grande taille ou si la pente y est importante (Cf. cartes en Annexe 1). Il est donc attendu que des sols nus de ces sous-bassins soient émetteurs de matériaux à destination des zones basses.

Les prédispositions morphologiques à l'érosion par ruissellement dans la zone d'étude suggèrent qu'une très grande partie des versants des bassins de la Thio et de la Todrè sont susceptibles de produire au moins des matériaux fins par ruissellement dès lors que la végétation disparaît.

Dans le détail, l'examen des résultats statistiques liés à l'altitude et à la pente éclaire ce contexte géomorphologique très propice à l'érosion.

La répartition hypsométrique dans les sous-bassins (Fig. 44) montre les variations d'altitude au sein des sous-bassins. Dans les bassins sensibles, le caractère localement favorable à l'érosion dépasse 90 % de la surface du sous-bassin même si l'altitude moyenne au sein d'un sous-bassin n'est pas particulièrement grande.

La figure 45 illustre cette variabilité : les altitudes au sein des sous-bassins les plus propices à l'érosion présentent des altitudes moyennes souvent élevées (n°12 ou 13) sans que cela semble être pour autant une règle générale (n°2, 3 ou 47).

On retrouve là des caractéristiques géomorphologiques plus liées aux grands domaines géologiques de la zone : bien que la plupart des surfaces présentent une morphologie potentiellement favorable à l'érosion, les sous-bassins du grand Massif du Sud se distinguent par leur dénivelé plus fort et souvent une pente importante (bassin de la Todré, rive droite de la Thio, cf. carte des dénivelés en Annexe 1). Dans ces derniers, l'expression de l'érosion est par conséquent particulièrement attendue sur sols nus. C'est aussi dans ce domaine géologique que sont établies les exploitations minières.

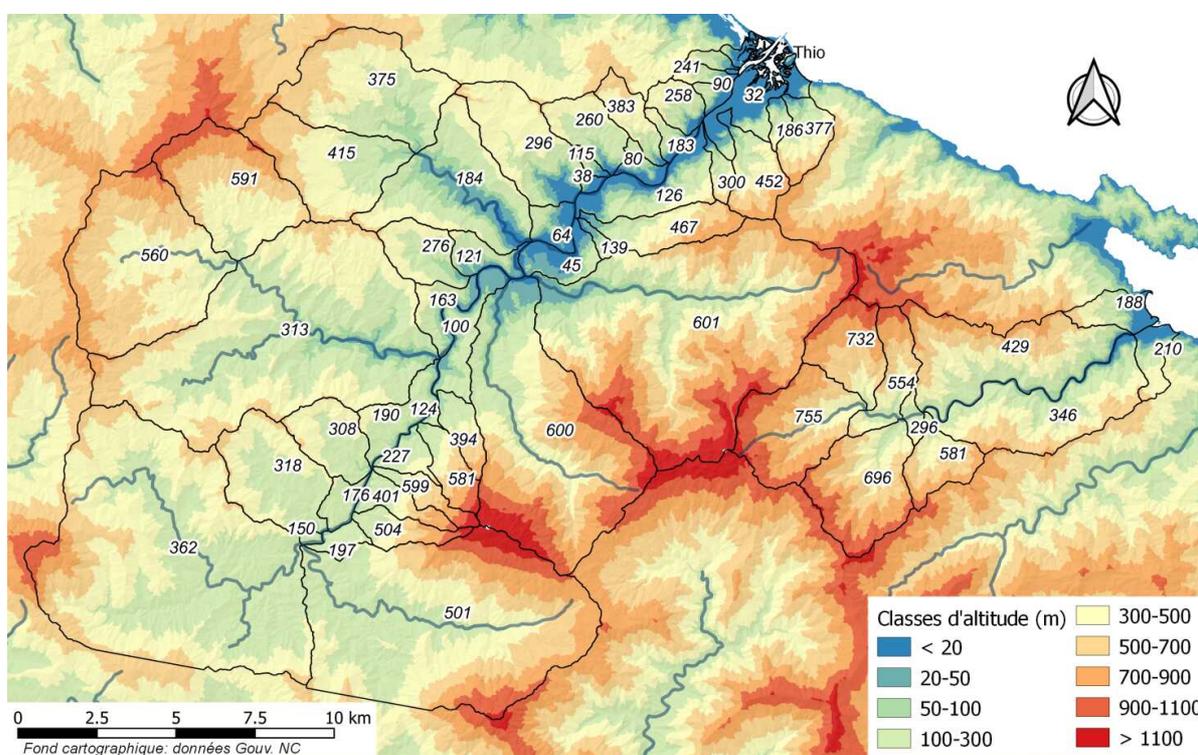


Figure 44 : Carte hypsométrique de la zone d'étude et altitude moyenne dans chaque sous-bassin (en mètres)

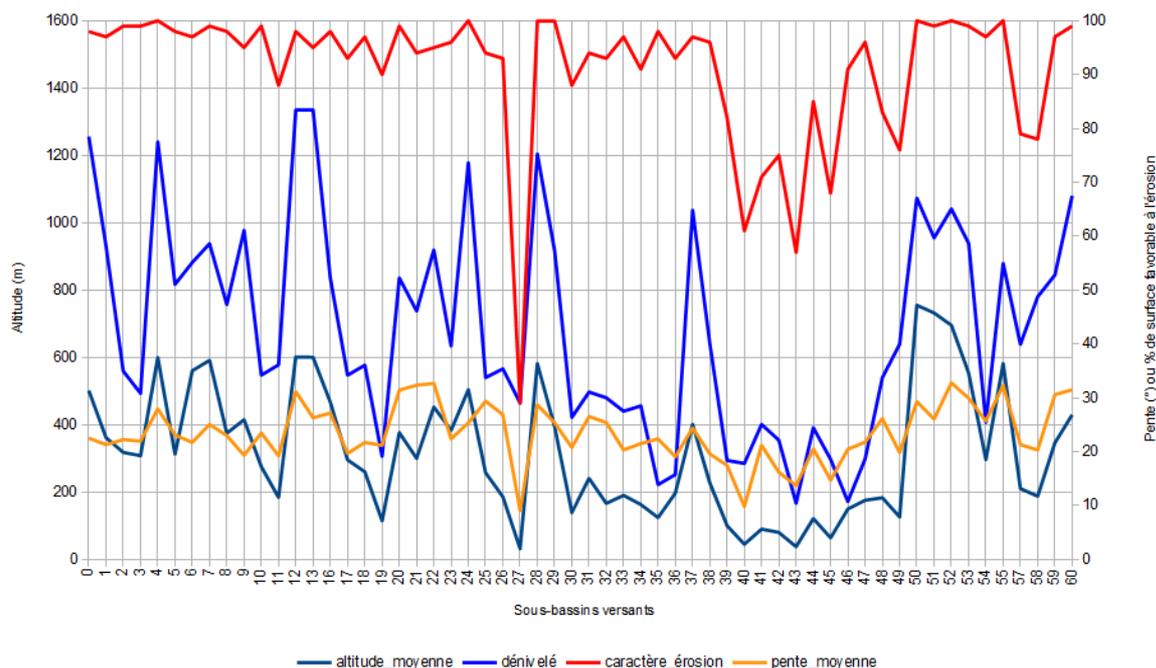


Figure 45 : Statistiques géomorphologiques par sous-bassin (altitude moyenne et dénivelé, pente moyenne et pourcentages de surfaces à caractère favorable à l'érosion (Thio 0-49, Todré 50-60)

Les sous-bassins les moins propices à l'érosion présentent quant à eux des altitudes moyennes systématiquement parmi les plus faibles (n°27, 43, 40) du fait de leur position basse. Ce type de sous-bassin est mieux représenté dans le grand bassin de la Thio suite à une évolution géomorphologique plus complexe. Ils peuvent cependant présenter un dénivelé important et une pente moyenne proche de 20° en présence de versants ultramafiques (n°49 aux Pétroglyphes ou n°58 dans l'estuaire de la Todré par exemple), ce qui confère malgré tout à ces derniers un potentiel favorable à l'érosion par ruissellement non négligeable.

⊙ Répartition et quantification des surfaces sources pour chaque date

Rappelons que l'on considère ici toute surface nue ou sans végétation active comme émettrice de matériaux par ruissellement si les conditions morphologiques locales le permettent. La séparation des sols nus *versus* végétation, réalisée par traitement des images satellitales, a permis l'obtention de cartes de leur répartition spatiale (Fig. 46) ainsi que des statistiques de superficies (pourcentage de sols nus et de végétation par sous-bassin versant). Il est à noter que la présence de nuages, même peu significative à l'échelle d'une scène satellitale, amène à exclure de l'analyse une partie des surfaces, qui seront donc potentiellement sous-estimées (bassins 0 et 1 notamment pour 1994-95). Cela concerne aussi les zones situées dans l'ombre au moment de l'acquisition de l'image. Les zones brûlées peuvent quant à elles conduire localement à une augmentation des surfaces de sol nu détectées (sols nus autres au niveau 3 de classification), elles sont comptabilisées dans les analyses sans être spécifiquement quantifiées.

En exemple, la zone entourée en rouge sur la figure 46 met en évidence pour 1994-95 des sols nus très étendus comparativement aux autres dates. Il s'agit des traces d'un incendie d'envergure ayant totalement détruit la végétation. Ces surfaces sont ainsi classées en sol nu dans les analyses.

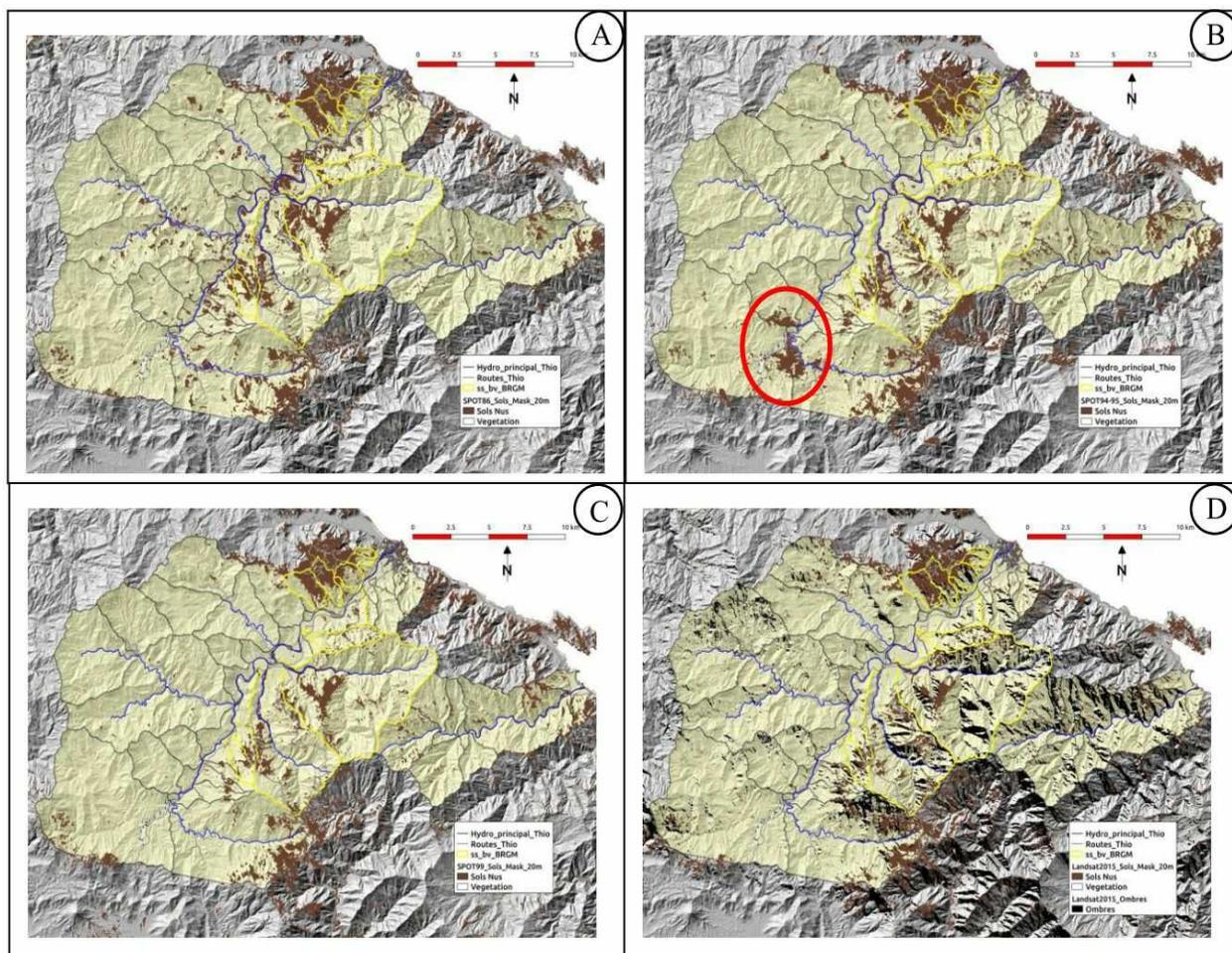


Figure 46 : Répartition des sols nus obtenue par imagerie satellitale. A : SPOT1986 ; B : SPOT1994-95 ; C : SPOT1999 et D : Landsat 8 2015

⊙ **Surfaces détectées à l'échelle du grand bassin versant**

D'un point de vue général, les surfaces totales analysées sont sensiblement équivalentes d'une date à l'autre (Tabl. 12). On constate qu'un peu moins de 8 % de sols nus (3 429 ha) sont détectés en 1986 sur la totalité de la zone d'étude. Ces surfaces diminuent en 1994-95 puis en 1999 où elles atteignent 7,6 % (3 276 ha), soit une réduction de 153 ha des sols nus détectés entre 1986 et 1999 (environ 0,35 % de perte de superficie).

Cette période se distingue de la période 1999-2015 au terme de laquelle, le cumul des surfaces détectées comme nues en 2015 atteint 8,3 % (3 598 ha), soit une augmentation de 322 ha (+0,40% de gain par rapport à 1986).

Tableau 12 : Surface des bassins versants détectée en sol nu en hectares et proportions dans les images satellitales de 1986, 1994-95, 1999 et 2015

	1986	1994-95	1999	2015
Total des surfaces analysées	43 231	43 215	43 232	43 218
Surface de sols nus	3 429	3 368	3 276	3 598
% sols nus	7,9	7,8	7,6	8,3
Sols nus, bassin Thio	3193	2 976	2 841	3 208
% sols nus, bassin Thio	8,7	8,1	7,7	8,7
Sols nus, bassin Todré	235	392	435	390
% sols nus, bassin Todré	3,6	6,0	6,7	6,0

- Période 1986-1999 :

Les résultats au niveau des deux grands bassins distincts de la Thio et de la Todré montrent des tendances différentes pour les deux périodes précédemment évoquées (1986-1999 et 1999-2015). Entre 1986 et 1999 dans le bassin de la Thio, la surface des sols nus a diminué progressivement de 352 ha, soit presque -1 %. Sur l'image de 1986, de nombreuses surfaces brûlées dispersées sont visibles (plusieurs dizaines d'hectares) et une zone brûlée étendue s'individualise bien sur l'image de 1994-95 (sous-bassins 0, 1 et 2), ce qui est moins évident pour les autres dates (1999 et 2015). La reprise de végétation est par ailleurs visible dans les principales zones touchées par les incendies, ce qui explique en partie cette diminution des sols nus.

Dans le même temps, la tendance dans le bassin de la Todré est inverse : les superficies de sols nus détectés augmentent d'environ 200 ha entre 1986 et 1999, soit +3,1 % du bassin, dont 157 ha (+2,4%) gagnés entre 1986 et 1994-95. Dans le cas de la Todré, il n'y a pas de trace d'incendie ou autre qui pourrait expliquer cette augmentation significative de l'extension des sols nus, l'analyse des sols nus de niveau 3 permettra de préciser quels types de sols nus se sont étendus entre 1986 et 1999.

- Période 1999-2015 :

En 2015, la totalité des surfaces détectées comme nues dans les 2 bassins versants dépassent les valeurs de 1986 (accroissement de la superficie des sols nus de +322 ha, soit + 0,75 %). Dans le détail, l'augmentation, rapportée à la superficie analysée par image, est mise en évidence pour la Thio : +1 % soit un gain de 367 ha basculés en sols nus entre 1999 et 2015. Dans le même temps pour la Todré, les résultats montrent une réduction des surfaces nues de -45 ha entre 1999 et 2015, soit un recul de - 0,7 %. L'évolution liée à l'augmentation des sols nus du bassin de la Thio peut être due à plusieurs facteurs possiblement coexistants, dont une extension des surfaces anthropisées, liées par exemple à des zones urbanisées ou à l'activité minière, à l'extension des zones sédimentaires actives ou à une végétation dégradée inactive. Dans la Todré, la végétation semble avoir repris un peu d'activité. Côté capteur, l'image de 2015, plus récente, est issue de Landsat 8, avec des plages de longueurs d'onde sensiblement différentes à celles de SPOT, surtout en ce qui concerne le proche infrarouge efficace dans la détection de la végétation (cf. Tabl. 12). Par ailleurs, Landsat dispose d'une meilleure résolution spatiale d'origine de 15 m. Ces particularités peuvent conduire à une meilleure détection des variations environnementales au sol et expliquer en partie les résultats plus tranchés de 2015 par rapport aux précédents.

⊙ **Analyses des superficies à l'échelle du sous-bassin versant**

L'examen des résultats à l'échelle du sous-bassin permet de distinguer clairement plusieurs dynamiques au sein des bassins versants de la Thio et de la Todré. Tout d'abord, la proportion de sols nus dans chaque

sous-bassin (Fig. 47) met en évidence des sous-bassins pour lesquels les superficies évoluent peu dans le temps et des bassins très ou moyennement évolutifs.

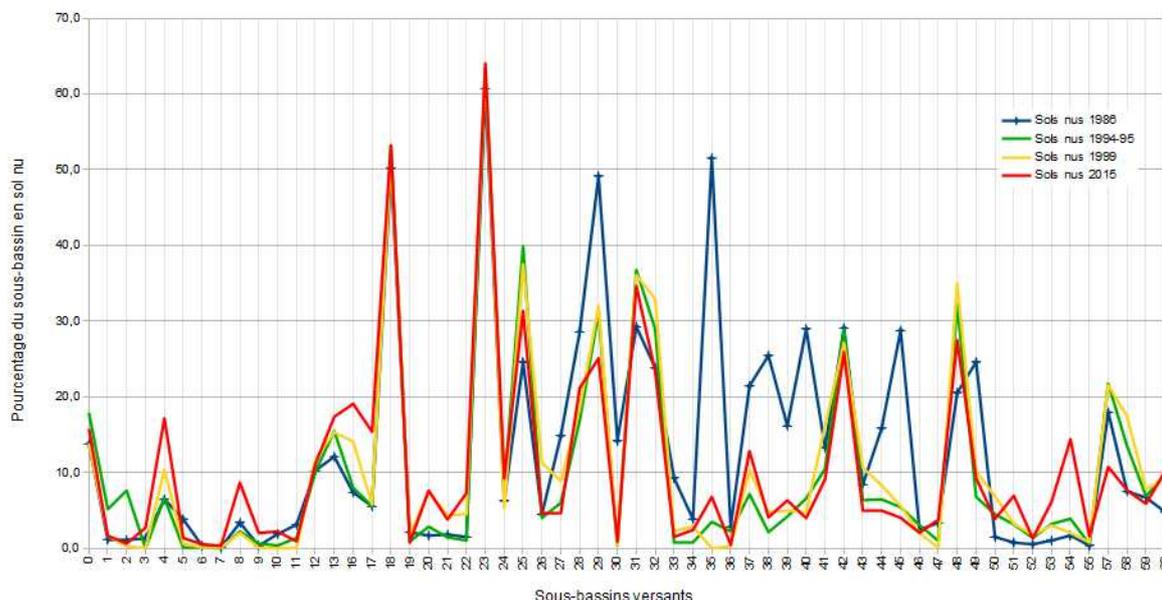


Figure 47 : Pourcentage de sols nus par sous-bassin versant et par date (Thio 0 à 49, TodTRe 50 à 60)

Les sous-bassins les plus stables du point de vue des sols nus sont les 18, 23 et 42, ils sont tous situés sur le versant sud de la zone de Thio-Plateau. Deux sont concernés par des excavations minières (18 et 23), le 42 leur est limitrophe et alimente la rive gauche de la Thio. Cela signifie que les surfaces étaient à nu avant 1986 (plus de 50 % de la superficie des sous-bassins 18 et 23) et qu'il n'y a pas eu de dénudation significative des sols entre 1986 et 2015, sans préjuger du volume de matériaux mobilisé par ruissellement pendant cette période. À l'opposé, les sous-bassins dont l'évolution est la plus marquée sont les 25, 29, 35, 37 à 40, 44, 45, 48, 49, 54, 57, 58, au sein desquels les 25, 29, 48 et 49 sont directement liés à une activité minière. Les sous-bassins montrant une évolution moins marquée sont pour certains liés à une mine, pour d'autres non, sans qu'il semble se dégager de caractéristique particulière. Parmi les sous-bassins identifiés comme ayant reçu des stériles miniers en décharge, le plus évolutif est le 29 (Xwe Pexwawi), avec une chute importante des surfaces nues entre 1986 et 1994-95 (-41 ha) : il s'agit principalement de zones brûlées sur l'image de 1986 qui ont disparu sur la mosaïque 1994-95, Idem pour le sous-bassin 49 (-103 ha de sols nus entre 1986 et 1994-95).

L'augmentation des sols nus détectés dans le sous-bassin 25 entre 1986 et 2015 (+15 ha) n'est pas significativement liée aux surfaces minières mais à l'évolution d'une végétation dégradée sur les versants, sans qu'il soit mis en évidence d'incendie aux dates étudiées. Idem pour le sous-bassin 48.

Les résultats de la classification des sols nus de niveau 3 qui suivent apportent un éclairage sur les observations à l'échelle du sous-bassin.

Tout d'abord, l'étude de l'évolution environnementale de la zone d'étude impose de prendre en compte les zones d'activité minière évoquées précédemment. La figure 45 présente les sous-bassins et la répartition des excavations artificielles (source BDTOP). Si cette donnée ne couvre pas les mines de manière exhaustive, elle permet d'identifier les principaux secteurs concernés par l'activité d'extraction minière passée ou actuelle.

Les sous-bassins les plus concernés en superficie par la mine sont les 0, 18, 23, 25, 12, 13, 29 et 28. Notons que ces zones ne sont pas exclusivement des surfaces décapées, elles peuvent inclure des zones où la végétation est localement préservée. Dans l'analyse des sols nus de niveau 3, tous les pixels détectés nus et correspondant à une excavation ont été classés comme tels. Il en va de même pour les pistes.

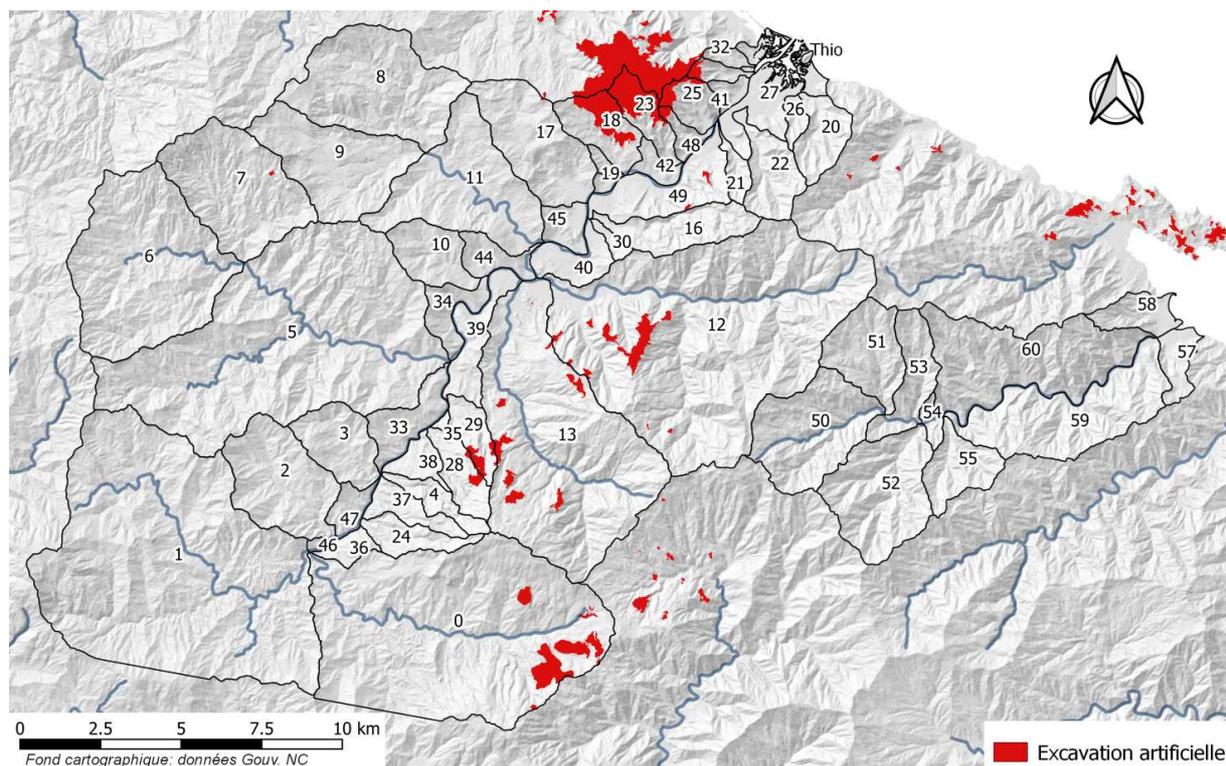


Figure 48 : Carte des surfaces en excavation artificielle (source BDTOPO, Gouvernement NC)

La figure 49 qui suit montre, pour 1986, que l'essentiel des sols nus soumis à l'érosion ne concerne pas directement les plateformes minières du bassin de la Thio, même si les surfaces de ces dernières ne sont pas négligeables (~510 ha de sols nus détectés comme localement favorables à l'érosion sur excavation artificielle en 1986). Dans la zone de Thio-Plateau, la proportion de surface nue concernée par une excavation artificielle peut devenir importante à l'échelle du sous-bassin (n°23 : 62 % des sols nus détectés, n°25 : 55 %, n°18 : 50 %, n°31 : 43% ; Fig. 47). Les sols nus liés aux activités minières hors plate-forme, comme par exemple les anciennes zones de décharge, n'ont pas été spécifiquement quantifiés et sont classés indifféremment dans la classe « sols autres » (voir paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour les détails). Ces sols nus autres représentent la classe très largement majoritaire devant les pistes et les excavations et ceux en condition localement favorable à l'érosion y dominent fortement.

Si l'on considère la série diachronique sur le bassin de la Thio, la répartition des classes en termes d'importance relative reste approximativement la même d'une date à l'autre (Fig 49) : environ 91 % des surfaces en végétation active, 0,5 à 1 % en sols nus autres sans érosion dominante, et 5 à 6 % en sols nus autres à érosion dominante. Les sols nus sur excavation artificielle représentent environ 1,5 % de la superficie du bassin et un peu plus de 16 % des sols nus détectés. On constate une certaine variabilité dans les surfaces anthropisées, qui reste modeste devant la variation des surfaces de sols nus autres et de la végétation active.

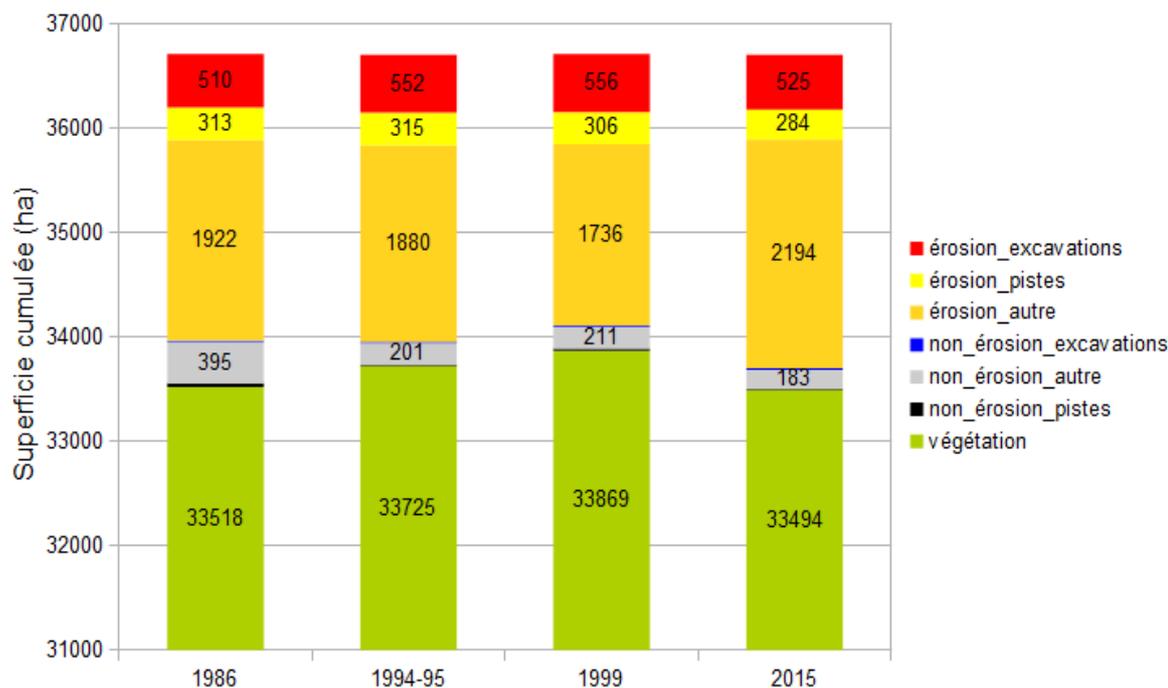


Figure 49 : Détail par classe et par date des superficies dans le bassin de la Thio (Rappel : classes distinguées en fonction du contexte localement favorable ou non à l'érosion par ruissellement).

Nous avons vu qu'en 1986 dans le bassin de la Thio, une partie des sols nus concernait des surfaces brûlées qui ont été reconquises par la végétation entre 1986 et 1999, ce qui ressort bien ici si l'on considère les sols nus autres dans leur ensemble avec l'évolution de la végétation (bassins les plus touchés : n°0, 12, 28, 29, 35, 38, 39, 40, 49, cf. Fig. 50). Dans le détail, les sols nus peu favorables à l'érosion diminuent le plus vite entre 1986 et 1994-95 (Fig. 49). Ceci peut être mis en relation avec le caractère plus propice à la reprise de la végétation dans ces zones quasiment plates susceptibles de collecter l'eau des versants alentours et où l'eau s'évacue moins vite. Pour les autres dates (1994-95, 1999 et 2015), ces sols nus peu favorables à l'érosion reflètent essentiellement les surfaces sans végétation du lit des cours d'eau. Une part des sols nus ou en eau de ces lits est classée en sol nu favorable à l'érosion du fait des caractéristiques morphologiques locales issues du MNT à 10 mètres. Pour obtenir un résultat qui prenne en compte la totalité de la surface des sédiments sans végétation et leurs conditions morphologiques, il faudrait une étude spécifique plus poussée qui n'a pas été menée ici car ce sujet est abordé dans le volet sur la cartographie des corps sédimentaires.

En ce qui concerne les sols nus autres des versants (caractère localement favorable à l'érosion donc surfaces émettrices de particules), les conditions hydriques sont généralement moins propices à une reprise de la végétation et l'effet conjugué d'une météorologie plus sèche peut impacter d'autant plus fortement la végétation. Sur le principe, le signal perçu par les capteurs satellitaires dans les zones où la végétation est trop dispersée ou trop sensible à la sécheresse sera proche de celui d'un sol nu et la végétation éventuellement présente n'aura quasiment pas d'effet protecteur contre l'érosion (les litières y sont potentiellement affectées par le ruissellement lorsqu'elles sont encore présentes). La classe des sols nus autres en contexte favorable à l'érosion est donc celle qui reflète le plus cette variabilité due à une végétation très dégradée de versant qui peut montrer une activité à certains moments et ne plus être détectée en sol nu (ou partiellement).

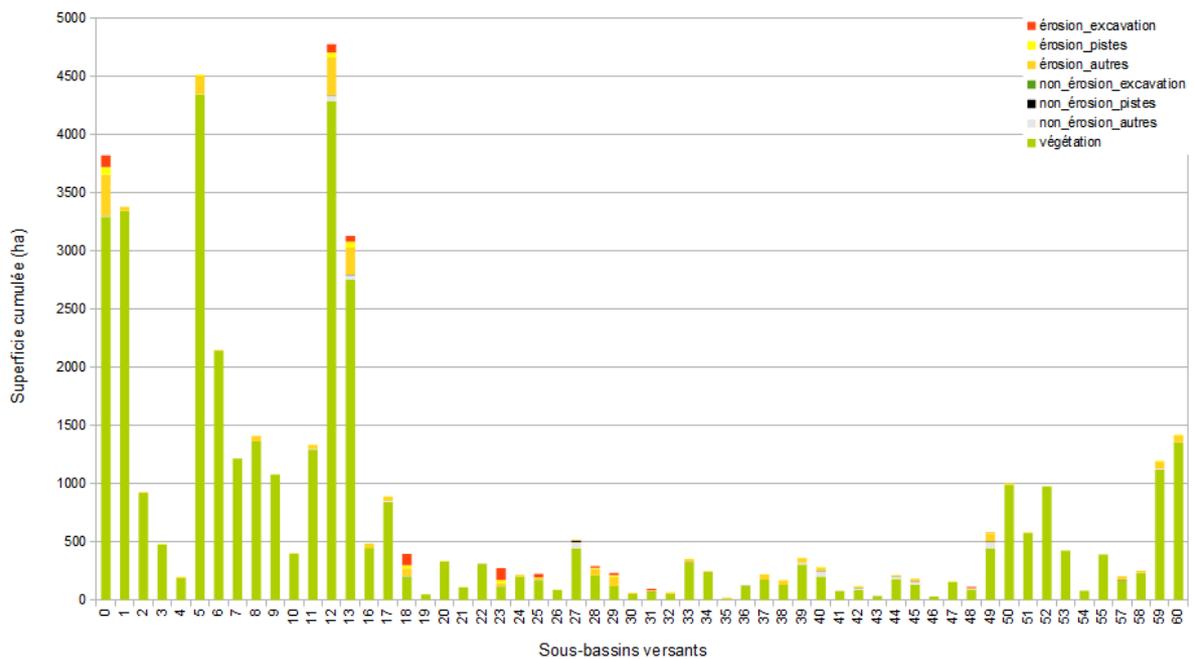


Figure 50 : Détail par classe et superficies analysées cumulées dans le bassin de la Thio et de la Todré pour le 09/10/1986.

(Rappel : classes distinguées en fonction du contexte localement favorable ou non à l'érosion par ruissellement).

Dans le bassin de la Todré (Fig. 52), les sols nus sur excavation ne sont pas représentés car l'information sur ce bassin n'existe pas dans la BDTPO. L'examen par photo-interprétation montre qu'il existe quelques anciens chantiers qui représentent au plus quelques dizaines d'hectares. Comme dans le bassin de la Thio, la très grande majorité des surfaces analysées sont détectées en végétation active (93 à 96%), devant les sols nus autres (5 à 6 %) et les pistes (maximum 0,3 % de la superficie du bassin contre 0,9 % pour celui de la Thio).

Les variations de superficies observées entre végétation et sols nus ne sont pas significativement liées à une activité humaine mais plus certainement à l'activité chlorophyllienne de la végétation dégradée des versants évoquée précédemment. Notons toutefois que les sols nus en position basse gagnent plus d'une dizaine d'hectares en 2015 principalement du fait d'une détection un peu plus sensible y compris dans le lit de la Todré.

En considérant les proportions relatives des différentes classes de sols nus pour chaque sous-bassin, il est possible de mettre en évidence d'autres caractéristiques dans la zone d'étude. Globalement, l'essentiel des sols nus détectés est plutôt émetteur de particules solides, sauf dans les petits sous-bassins qui jalonnent le fond de vallée de la Thio, ceux-ci collectant bien sûr les émissions des versants.

Les sols nus sans érosion dominante autres y sont majoritaires et comprennent l'ensemble des surfaces nues peu favorables à l'érosion par ruissellement qui ne sont ni sur voirie ni sur excavation artificielle. On retrouve principalement dans cette catégorie les surfaces nues des milieux anthropisés (habitat et zones dénudées à proximité, certaines zones de cultures, etc.) et les étendues sédimentaires sous et hors d'eau. Les sous-bassins de la vallée de la Thio sont particulièrement concernés par cette catégorie, qui représente parfois la quasi-totalité des sols nus d'un petit sous-bassin.

Dans les sous-bassins miniers principaux, la tendance générale est à la diminution de l'emprise des sols nus sans érosion dominante autres, ce qui s'observe aussi dans l'estuaire de la Thio.

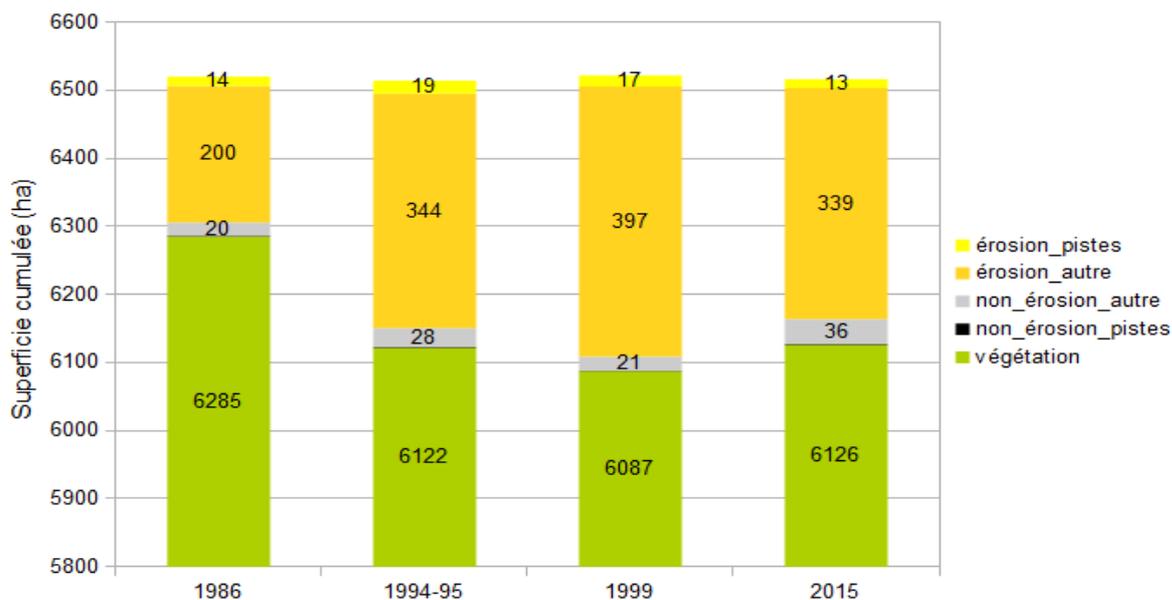


Figure 51 : Détail par classe et par date des superficies dans le bassin de la Todré (Rappel : classes distinguées en fonction du contexte localement favorable ou non à l'érosion par ruissellement).

Les zones sédimentaires ne prennent pas une proportion relative aussi importante dans les sous-bassins de la vallée de la Todré, même au niveau de l'estuaire. Ce grand bassin montre par ailleurs une relative stabilité dans le temps vis à vis des surfaces émettrices de particules solides (Fig. 52) malgré des caractéristiques géomorphologiques qui le rendent sensible à l'érosion. Toutes proportions gardées, ce bassin montre donc des versants moins émetteurs et un cours d'eau moins producteur de sédiments que celui de la Thio.

Dans le bassin de la Thio, la situation est différente (Fig. 52). On retrouve une évolution dans le temps en relation avec les caractéristiques géomorphologiques des sous-bassins : s'il arrive d'observer une évolution des proportions relatives de sols nus entre deux dates dans les bassins hors massifs ultramafiques, il s'agit des effets temporaires d'incendies plus qu'une variation de surfaces de sols nus établies à plus long terme comme celles liées à l'activité minière par exemple. L'impact de la présence humaine dans ces incendies semble indéniable (proximité de zones anthropisées), aucune trace de feu n'ayant par ailleurs été observée dans la Todré dans la période étudiée. L'écart entre les dates étant de plusieurs années, on ne met pas en évidence de persistance longue de l'arrêt de l'activité chlorophyllienne dans les zones brûlées et encore moins sur l'ensemble de la période 1986-2015.

Si cela est aussi vrai dans les sous-bassins ultramafiques, ceux-ci présentent par ailleurs, comme attendu, bien plus de surfaces de sols nus établies, qu'elles soient d'origine naturelle ou non. Ceci est le fait de leur morphologie particulière comme évoqué en début de chapitre, qui coexiste avec une végétation souvent dégradée par des incendies répétés et qui peine à se rétablir en densité de couverture. La présence fréquente de traces d'activité minière accentue bien sûr cet état de fait, ce qui conduit à identifier dans certains bassins plus de 50 % des sols nus d'origine anthropique (zone de Thio-Plateau). Dans d'autres bassins notoirement impactés par l'activité minière, la proportion de sols nus émetteurs directement imputables à la mine ne dépasse jamais 20 % : 19 % du sous-bassin 0 pour Camp des Sapins, 14,6 % pour le n°12 (Neburu) et 13 % pour le n°13 (Nakare). Parce que cela aurait demandé des moyens dépassant ceux de cette étude, nous n'avons pas pu cartographier par photo-interprétation dans ces bassins les décharges minières non contrôlées et le surengrèvement à chaque date, ce qui aurait permis de quantifier les surfaces environnementales impactées par la mine sur ces sous-bassins et de mettre celui-ci en balance avec les phénomènes naturels que l'on y observe simultanément. La proportion des sols nus d'origine anthropique (et minière en particulier) est par conséquent sous-évaluée de fait, bien que déjà en partie caractérisée. Cet impact est étudié en détail dans les autres volets du projet.

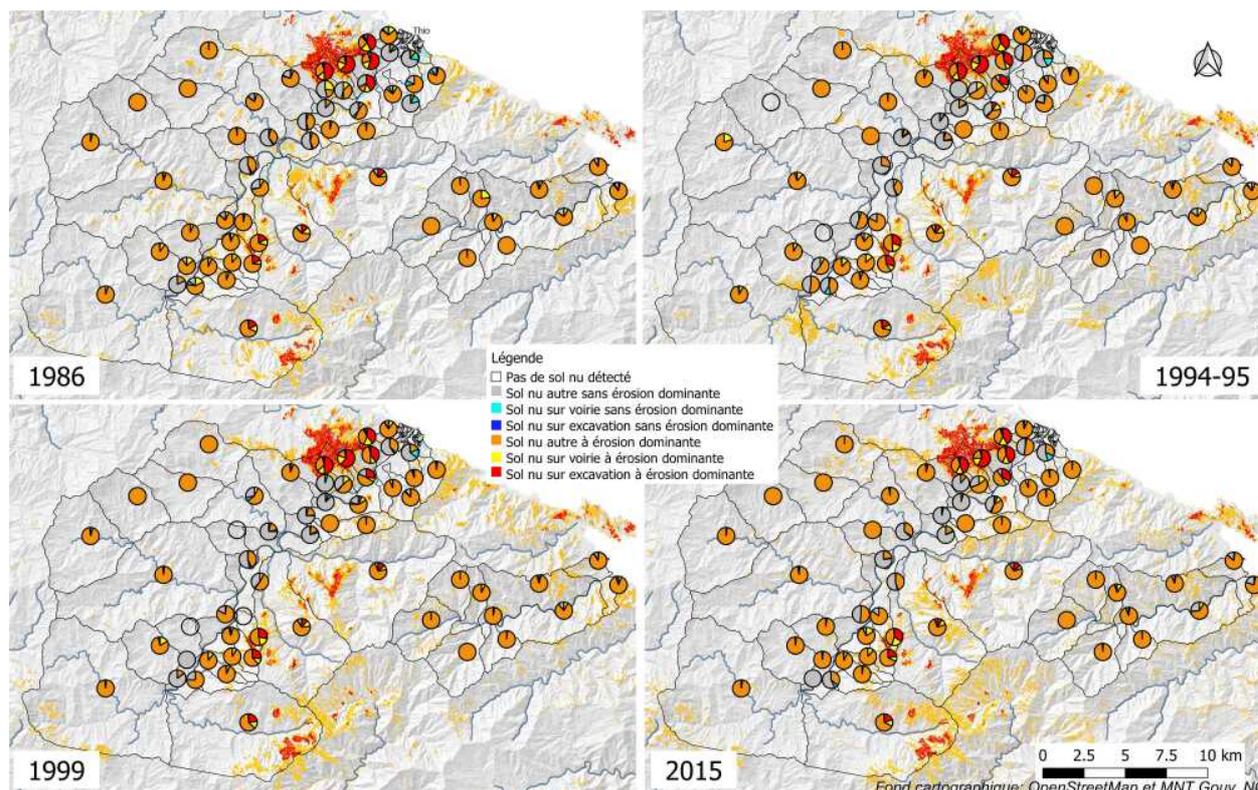


Figure 52 : Répartition et proportions relatives des types de sols nus détectés dans les sous-bassins versants en 1986, 1994-95, 1999 et 2015

Les classes liées à la voirie sont quant à elles à considérer avec grande précaution du fait de plusieurs facteurs : (1) les éléments de voirie sont linéaires et de largeur souvent inférieure à la taille du pixel des images satellitales (20 m x 20 m) et (2) un léger décalage peut exister entre une image et les données de la BDTOP. Un décalage d'un ou deux pixels peut conduire à sur- ou sous-classer des sols nus des classes de voirie. Par précaution, nous mettrons de côté ces classes dont les résultats se situent potentiellement dans la marge d'erreur. Considérons cependant que la proportion de voirie potentiellement favorable à l'érosion peut devenir importante dans un petit sous-bassin (Pour 1986 jusqu'à 26 % des sols nus du n°19 ou côté bassin de la Todré 22 % du n°53). À l'échelle des grands bassins versants de la Thio et de la Todré, il n'a pas été mis en évidence de diminution significative de surface de piste nue au profit de la végétation, ce qui recoupe les nombreuses observations de terrain qui soulignent la rare reconquête végétale sur ces surfaces nues très sensibles à l'érosion par ruissellement. La voirie détectée en sol nu représente un peu plus de 300 ha sur l'ensemble des deux bassins versants, dont seulement 13 à 19 ha dans la Todré selon les dates.

Les sols nus à érosion dominante autres étant majoritaires en proportion comme en superficie totale dans le bassin de la Thio comme celui de la Todré, rappelons que leur évolution est très liée aux incendies ainsi qu'à l'activité photosynthétique intermittente de la végétation très dégradée des versants dont elles illustrent la variabilité.

⊙ **Évolution de la végétation**

Si les illustrations précédentes ne permettent pas toujours d'établir visuellement des différences entre les dates pour la végétation, les cartes d'analyses statistiques des évolutions ci-après mettent en évidence la variation des proportions de la végétation pour chaque sous-bassin étudié. Ces variations concernent au maximum 1,7 km² (170 hectares) par sous-bassin (Fig. 53) mais cela peut donner des variations importantes en proportion dans les sous-bassins de petite taille. Gardons par ailleurs à l'esprit qu'un sol sur versant non protégé par la végétation présente un potentiel d'émission de particules d'autant plus important que la végétation tarde à se réinstaller et qu'une surface à nu émet de la matière par ruissellement même si elle est peu étendue. Les statistiques obtenues pour chaque date par sous-bassin versant ont permis de calculer les évolutions en superficie d'une date à l'autre et également depuis la date

de référence 1986 (Fig. 54). Ces évolutions sont proposées en pourcentage (évolutions ramenées à la superficie du sous bassin-versant considéré) et le détail des évolutions en km² est disponible dans les cartes en Annexe 1.

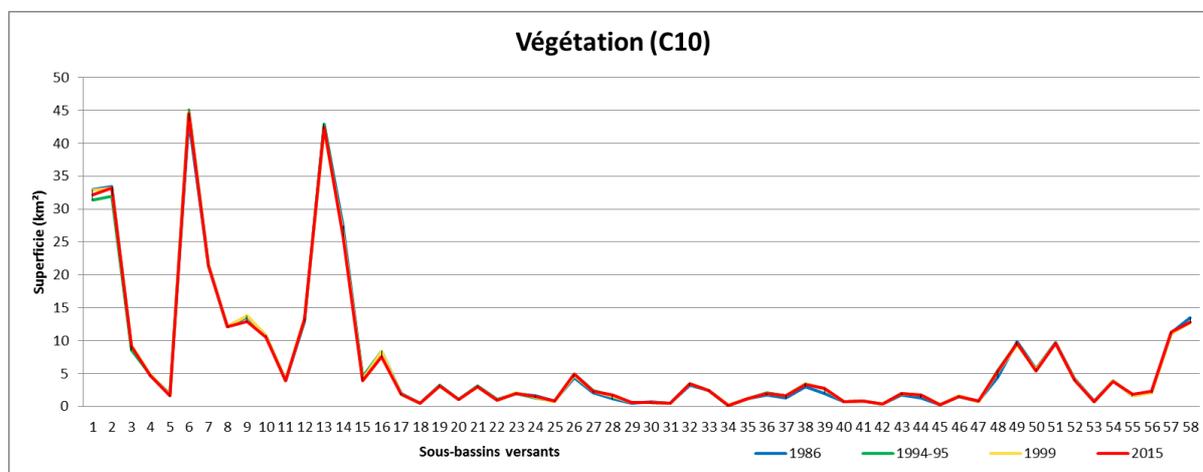


Figure 53 : Superficie de la végétation en km² par sous-bassin pour chaque date

Dans les cartes de la figure 54, les sous-bassins en rouge correspondent à ceux pour lesquels on montre une diminution de la superficie de la végétation (soit une extension de la superficie des sols nus) et à l'inverse en vert à une recolonisation de la végétation sur des sols précédemment nus. En blanc ou très clair, les sous-bassins ne présentant pas d'évolution significative. On retrouve la majeure partie des extensions de sols nus déjà évoquées dans le fond de vallée de la Thio, dues entre 1986 et 1994-95 aux reprises de végétation suite aux zones brûlées visibles en 1986 (Fig. 54, 1986 à 1994-95). Les bassins amont de la Thio (n°0, 1 et 2) évoluent alternativement entre la dégradation et la recolonisation de la végétation durant les 4 périodes successives d'observation (dégradation durant la première période de 1986 à 1994-95 du fait des traces du grand incendie observé en 1994-95).

Les sous-bassins de Thio-Plateau voient surtout l'état de la végétation sur les hauts des versants se rétablir jusqu'en 1999 puis se dégrader alternativement (les surfaces minières y évoluent peu) ; c'est le cas le plus observé dans les sous-bassins ultramafiques (Fig. 54).

Par exemple, dans les sous-bassins 25 et 48 entre 1986 et 1994-95, la dégradation de la végétation des versants non anthropisés explique à elle seule la tendance observée, sans extension significative des surfaces minières.

Les sous-bassins caractérisés par une recolonisation particulièrement notable de la végétation (en vert foncé) sont souvent liés aux périodes post-incendie, pendant lesquelles la végétation se réinstalle (bien mis en évidence sur l'évolution entre 1986 et 1999 (Fig. 54). Il a toutefois été observé une colonisation végétale sur un banc sédimentaire de la Thio dans le sous-bassin 45 : les sédiments à nu observés en 1986 présentent un couvert végétal partiel aux dates ultérieures, suggérant un début de stabilisation sur environ 0,01 km² (1 ha). Cela reste faible face aux superficies des surfaces brûlées regagnées sur environ 0,2 km² (20 hectares) entre 1986 et 1994-95 dans ce sous-bassin.

Entre 1994-95 et 1999 (Fig. 54) les évolutions sont moins prononcées. Elles varient entre -6,15% (-0,3 km²) et +7,37% (0,68 km²) : quasiment pas de zones brûlées observées en 1999 alors qu'en 1994-95 on observait les traces d'un grand incendie dans les sous-bassins 0, 1 et 2 qui ont disparu depuis. Les sous-bassins de la rive droite à proximité de l'embouchure de la Thio ainsi que quelques autres se distinguent par une dégradation de la végétation des versants, sans évidence d'un incendie ou d'une activité humaine particulière.

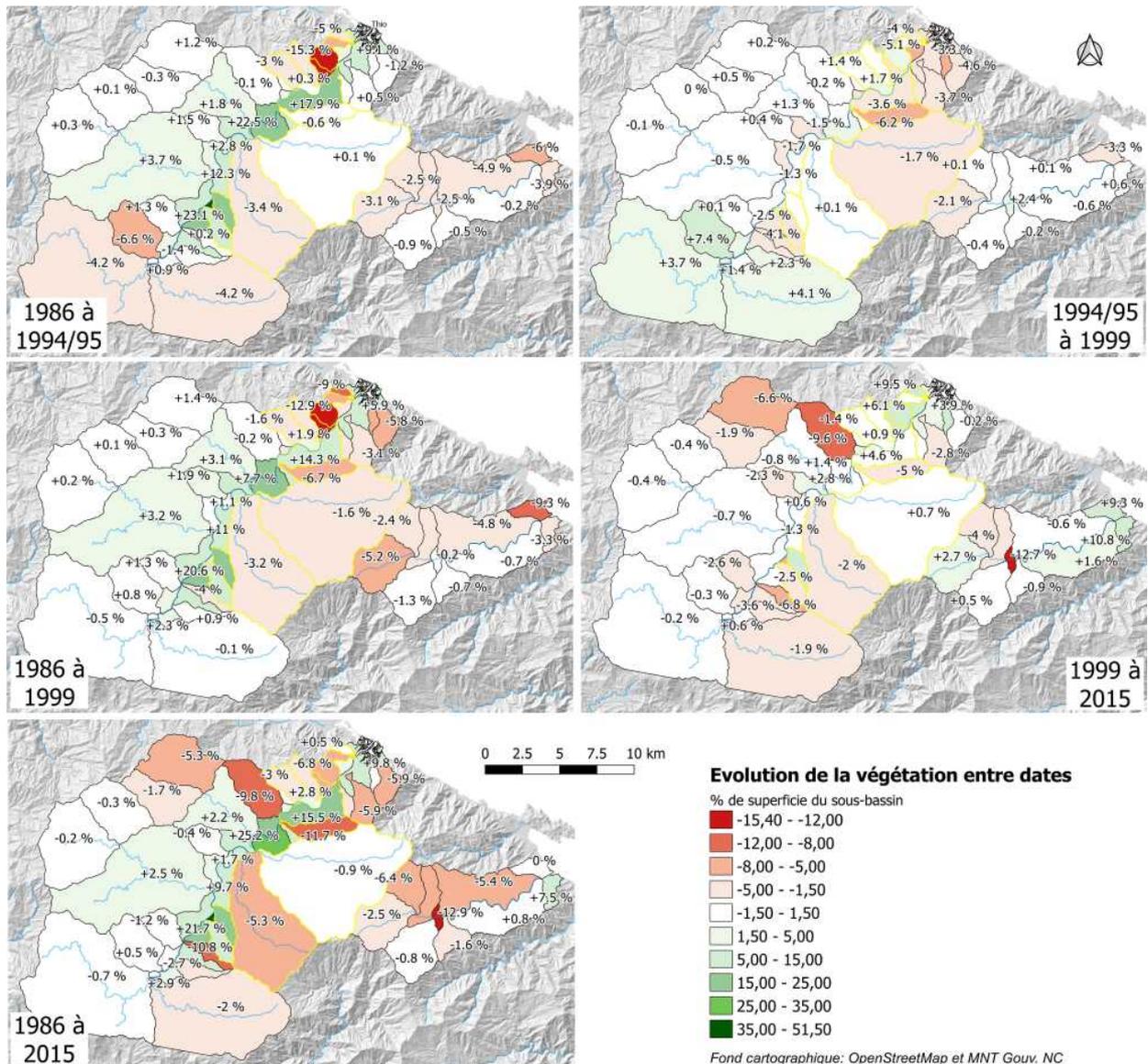


Figure 54 : Évolution de la superficie de végétation par sous-bassin versant entre 1986 et 1999 (en haut) et entre 1986 et 2015 (en bas)

Entre 1999 et 2015 (Fig. 54), le sous-bassin 17 se distingue par une perte de surface végétale au profit des sols nus (plus de 0,8 km² soit 80 ha), essentiellement du fait de l'état de la végétation dégradée des versants mais aussi d'une zone d'érosion qui semble s'installer ou s'accroître sur un petit versant de la partie amont non anthropisée (environ 0,01 km² soit 1 ha).

Pour mieux évaluer les changements sur l'ensemble des périodes d'observations, les comparaisons ont aussi été réalisées entre les années 1986 et 2015 (Fig. 54). Sur cette période globale, le bassin de la Todré présente une tendance du tandem sols nus-végétation à la dégradation de la végétation. Cette dégradation de la végétation se manifeste par une alternance de recul et d'avancée de la végétation active sur les versants dégradés, sans qu'il soit mis en évidence une incidence anthropique. Le manque d'informations sur les conditions hydriques dans ce bassin versant ne permet pas de proposer des hypothèses pour expliquer ces variations. Dans le bassin de la Thio, quelques grands sous-bassins voient leur végétation se développer légèrement et les autres sont plutôt stables sauf pour 3 d'entre eux : 0 (Kwe Hwaa, état de

la végétation dégradée des versants surtout et extension des surfaces décapées sur Camp de Sapins), 8 (Xwe Tawa, état de la végétation) et 13 (Nakare, état de la végétation). Les plus petits sous-bassins sont partagés en 2 catégories : ceux situés en fonds de vallée qui présentent une recolonisation de la végétation, et ceux situés en zones d'exploitations minières présentant un recul de la végétation au profit des sols nus (essentiellement sur des sols nus peu favorables à l'érosion et en lien avec l'état de la végétation sur ces versants).

En conclusion, à l'échelle du sous-bassin versant, les résultats ne mettent pas en évidence de colonisation végétale importante des superficies qui serait liée à des surfaces impactées par les activités humaines en dehors des incendies comme les zones d'habitat ou de culture et *a fortiori* par la mine de manière directe (plateformes).

À l'échelle des bassins versants de la Thio et de la Todré, la carte Fig. 55 présente l'évolution de la classe des « sols nus à érosion dominante autre » entre 1986 et 2015. Nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, cette classe est majoritairement représentée dans les sols nus et est directement corrélée à celle de la végétation. Ainsi dans le sous-bassin 35 (Thio Riv. amont), le recul de 43,5% de cette classe de sol revient à montrer un gain de végétation de 43,5%. Il s'agit d'une petite superficie (0,09 km² soit 5 ha) impactée par un incendie. On peut remarquer également un gain de superficie de végétation de plus de 20% pour 2 autres sous bassin-versants proches numérotés 38 et 29 (Contact Kuenthio Thio et Xwe Pexwawi), qui ont aussi subi le feu en début de période analysée.

Ainsi les évolutions positives les plus marquées concernent bien la végétation (avec un gain de superficie maximum de 43,50 % et minimum de 0,27 %). Les variations positives pour les sols sont, quant à elles, moins marquées et sont comprises entre 0,19 et 11,84 %.

L'essentiel des impacts sur la limite sols nus-végétation mis en évidence au cours de la période 1986-2015 est lié aux incendies dans le bassin de la Thio, ainsi qu'à l'état fluctuant de la végétation dégradée des versants, notamment dans les milieux ultramafiques.

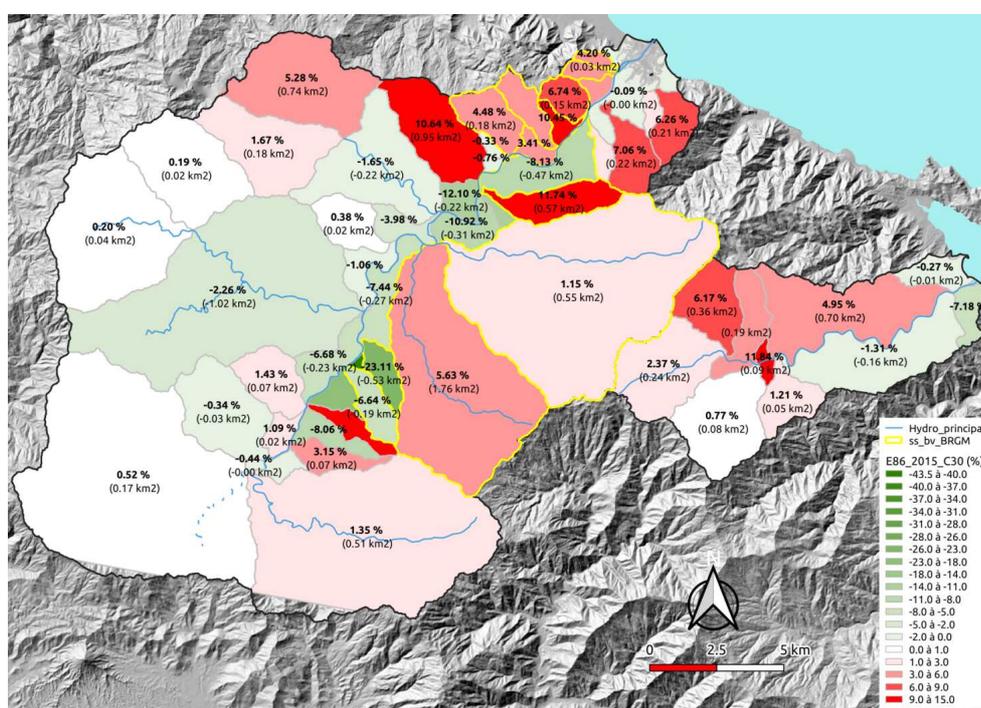


Figure 55 : Évolution des sols nus à érosion dominante autres entre 1986 et 2015

⊙ Comparaison de résultats

Au-delà des statistiques sur lesquelles est basé ce volet d'évaluation de l'évolution générale du tandem sols nus-végétation, rappelons qu'un contrôle expert des résultats a permis de s'assurer que les détections attribuées à des sols nus étaient cohérentes au sein de chaque image.

L'étude basée sur la classification des sols nus de niveau 2 (végétation et sols nus sans/avec érosion dominante) apporte un éclairage sur les conditions d'évolution des sols nus dans ces zones. Afin de pouvoir valider nos résultats sur la répartition de ces classes de sols nus, nous nous sommes appuyés sur les résultats du BRGM (Garcin *et al.* BRGM/RP-66840-FR de 2017 et section 3.4 du présent rapport) sur la base de 12 sous-bassins versants communs (en jaune sur les figures précédentes). Y sont distinguées les zones productives et les zones actives pour les dates de 1954, 1976 et 2008. Ce travail a été réalisé par photo-interprétation, observations de terrain et vectorisation à partir de photographies aériennes, donc à une résolution plus précise qu'avec l'imagerie SPOT et Landsat. La figure 53 suivante (extraite de la figure « Évolution des surfaces des « Zones Productives » et « Zones Actives » tous types confondus entre 1954 et 2008 » (Fig. 56)..

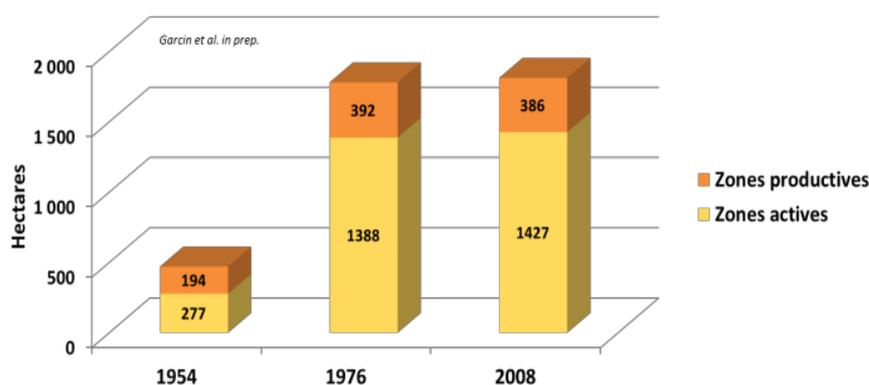


Figure 56 : Évolution des sols nus entre 1945 et 2008, Garcin *et al.* 2017

Ces deux classes (productives et actives) ont été additionnées par année et comparées à nos résultats (Fig. 57). La courbe en bleu correspond à l'évolution des superficies des sols nus obtenue selon notre méthode pour les mêmes sous-bassins versants et la courbe en orange aux chiffres du BRGM. La bonne corrélation des courbes montre une cohérence entre les résultats des deux approches. On peut noter une tendance à la baisse qui s'amorcerait après 2008 (diminution de la superficie des sols nus au profit de la végétation dans la zone commune).

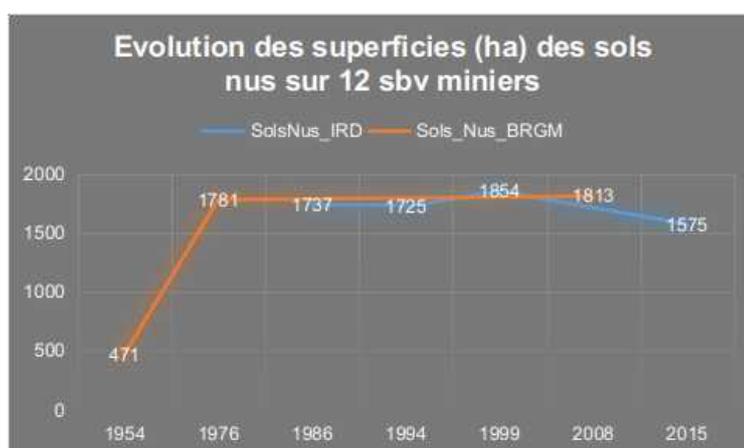


Figure 57 : Évolution générale des surfaces de sols nus sur 12 sous-bassins versants miniers de la Thio étudiés par le BRGM

Plus précisément au sein des résultats issus des traitements de télédétection et SIG, le graphique suivant (Fig. 58) présente l'évolution de toutes les classes sous forme de courbes sur tous les sous bassins versants.

On constate que les classes « Végétation » (courbe verte) et « Sols Nus à érosion dominante autre » (courbe rouge) sont complémentaires et représentent à elles seules les plus grandes variations.

Cette complémentarité est expliquée par le fait que l'essentiel des pixels sont classés soit en végétation ou en « sol nu à érosion dominantes autres ».

Cela permet de vérifier la reproductibilité de la méthode d'analyse. Ainsi, l'évolution de la végétation est directement corrélée à cette classe de sol nu et/ou pour certains sous-bassins à la classe des sols nus sans érosion autres.

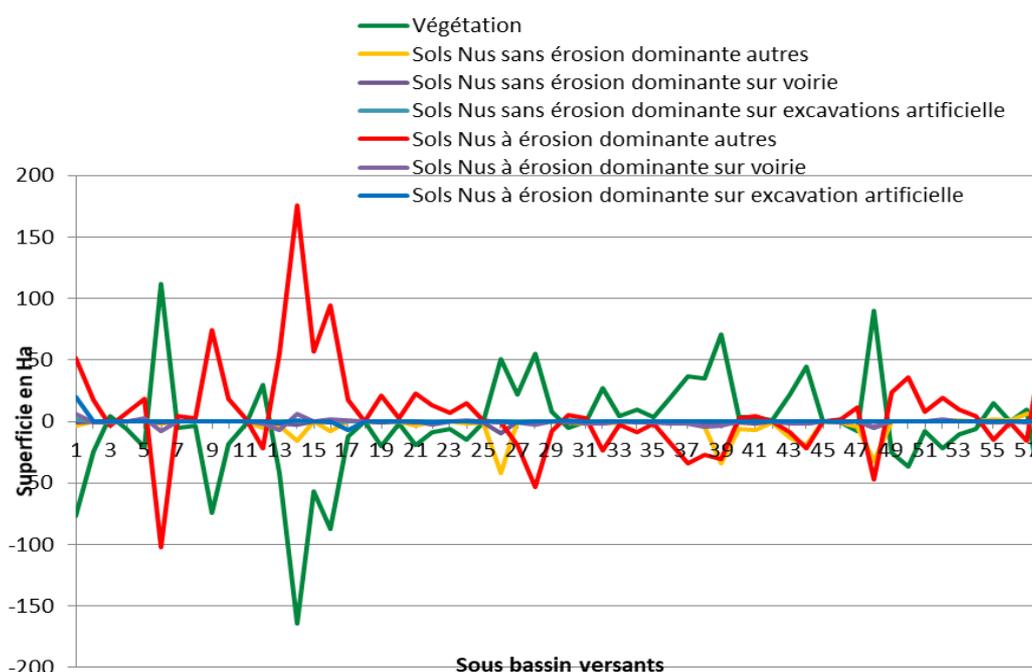


Figure 58 : Évolution (ha) de 1986 à 2015 des classes de sols nus et de végétation pour les 58 sous BV analysés

Pour les sols nus à érosion dominante autres, la figure 59 suivante montre que sur les 12 sous bassins versants analysés par le BRGM, seuls 3 présentent un recul de cette classe au profit de la végétation sur la période 1986 à 2015. Il s'agit des bassins versants de la Xwê Méa (28), Xwê Péxwâwi (29), Thio Riv. pétroglyphe rive droite (49).

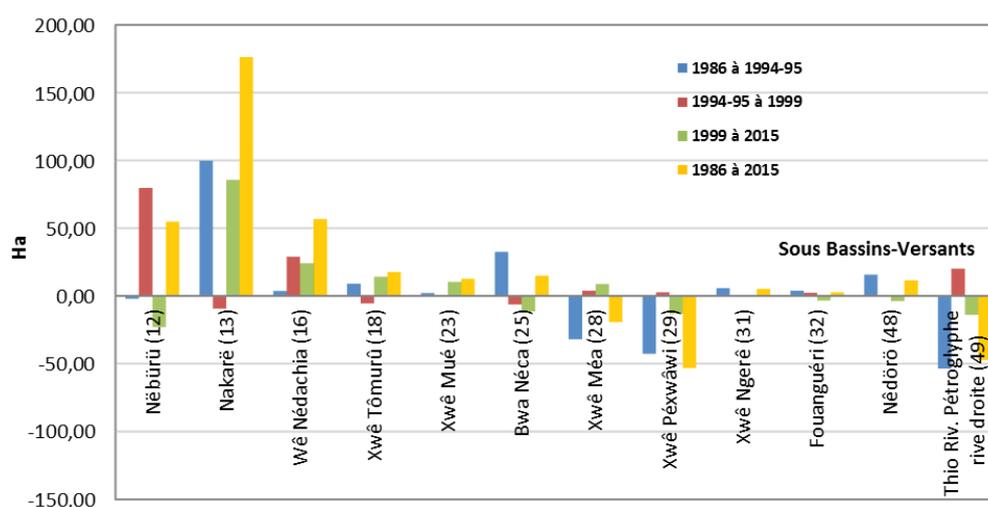


Figure 59 : Évolution en superficie d'une date à l'autre des sols nus à érosion dominante autres

3.2.2.4. Conclusions

La quantification des surfaces du tandem sols nus/végétation et l'analyse statistique réalisées introduisent donc un cadre environnemental général sur les bassins de la Thio et de la Todré. Ce volet apporte des informations quant à l'étendue des surfaces émettrices de particules fines et au comportement de la végétation des versants. C'est une contribution à une réflexion plus large sur les phénomènes d'érosion-sédimentation dans les bassins étudiés. Les transferts de matière, non traités ici, sont évoqués à une échelle plus localisée dans les sections 5 et 6 du présent rapport : Transport solide grossier et en suspension.

Il en ressort que **l'essentiel des impacts sur la limite sols nus-végétation mis en évidence au cours de la période 1986-2015 est lié aux incendies dans le bassin de la Thio, ainsi qu'à l'état fluctuant de la végétation dégradée des versants, notamment dans les milieux ultramafiques.**

Ce volet a aussi permis de dégager les principaux freins au suivi environnemental par télédétection à haute résolution portant sur l'érosion à l'échelle du bassin versant sur la Grande Terre. Dans le cadre d'une étude temporelle à l'échelle du bassin versant sur la Nouvelle-Calédonie nécessitant une différenciation des types de sols impliqués dans les processus d'érosion, il est nécessaire de considérer les points suivants :

- Les données satellitaires ne suffisent pas. Il est primordial d'introduire dans l'étude des données exogènes (Pentes, Gradients de pentes, Éboulis, météorologie, suffisamment résolues à l'échelle du BV et continues dans le temps)
- Les données satellitaires doivent :
 - Être à des résolutions spatiales plus fines (métriques, voire sub-métriques) qui permettraient d'apporter une information plus différenciée. Dans le domaine des satellites d'observation, à cette échelle, nous ne pouvons pas remonter très loin dans le temps (8 ans tout au plus avec SPOT6 et 7 lancés en 2012 pour le premier). SPOT5 (2,5 m) est peu efficace car la résolution spatiale est une fusion de 2 barrettes de capteurs de 10 m décalées d'une demi LED. Ceci a pour effet de construire une image à 5 m pour du multi spectral et de 2,5 m en panchromatique qui ne génèrent pas d'image de bonne qualité radiométrique. Par ailleurs, les capteurs de cette génération possèdent un canal très intéressant pour les sols (dans le moyen infrarouge) mais qui est à 20 m
 - Avoir une répétitivité importante (2 fois par mois au minimum) pour disposer d'une base d'image suffisante afin de palier au problème de couverture nuageuse.

D'autres satellites sub-métriques existent (Ikonos, Quickbird, GeoEye, Worldview) mais ils ont des répétitivités peu intéressantes, des couvertures au sol très restreintes et un coût élevé qui impliquent un budget conséquent (multiplication des images, commande d'images en acquisition programmée...), ce qui n'était pas envisageable pour ce projet.

3.2.3. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE (ESTUAIRE DE LA THIO)

Cet axe d'étude a fait l'objet du mémoire de master 2^e année d'Arthur Leroux, 2016. L'évolution de trait de côte à l'estuaire de la Thio a été étudiée à partir de photographies aériennes et d'images satellitaires couvrant une période allant de 1954 à 2015.

3.2.3.1. Données

Les données d'imagerie utilisées pour étudier cette évolution sont présentées dans le tableau 13 suivant.

Tableau 13 : Données d'imagerie utilisées pour l'étude du trait de côte à l'embouchure de la Thio (A. Leroux, 2016).

Date des images	Source	Type d'image	Résolution spatiale ou échelle du rendu de la photo	Couleur
1954	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	Noir et blanc
1971	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	Noir et blanc
1976	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	Noir et blanc
1982	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	Noir et blanc
1985	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	Noir et blanc
1989	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	RVB
1995	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	RVB
2004	Google earth	Satellite	-	RVB
2008	DITTT	Aérienne	1/40 000ème	RVB
2013	Google earth	Satellite	-	RVB
2015	Airbus	Satellite	0.5 m	RVB

3.2.3.2. Méthodologie

Le principe est d'étudier la mobilité du trait de côte en prenant la végétation comme indicateur de référence.

Les données d'imagerie ont été géoréférencées dans la zone d'intérêt pour celles qui n'étaient pas géométriquement calées. Les orthophotos de 2008 de la DITTT ont été utilisées comme référence géographique et les images géoréférencées dans le système de projection RGNC 1991-93 / Lambert Nouvelle-Calédonie. L'erreur moyenne sur la zone étudiée est inférieure à 3,77 m.

Pour chaque date, le trait de côte a été digitalisé sous ArcGIS.

Pour analyser l'évolution du trait de côte, l'extension Digital Shoreline Analysis System 4.3.3703 (DSAS), développée par l'USGS pour ArcGIS (Thieler *et al.*, 2009), a été utilisée. Cet outil permet d'établir des

statistiques sur les variations de distance des traits de côte vectorisés à une ligne de référence (base line) positionnée arbitrairement en mer. Il permet notamment de générer des taux d'évolution pour quantifier les changements de position du trait de côte (Faye *et al.*, 2011).

Les calculs statistiques sont basés sur de très nombreux transects perpendiculaires à la ligne de base, permettant ainsi le calcul fin des distances du trait de côte à la ligne de référence (figure 60 suivante).

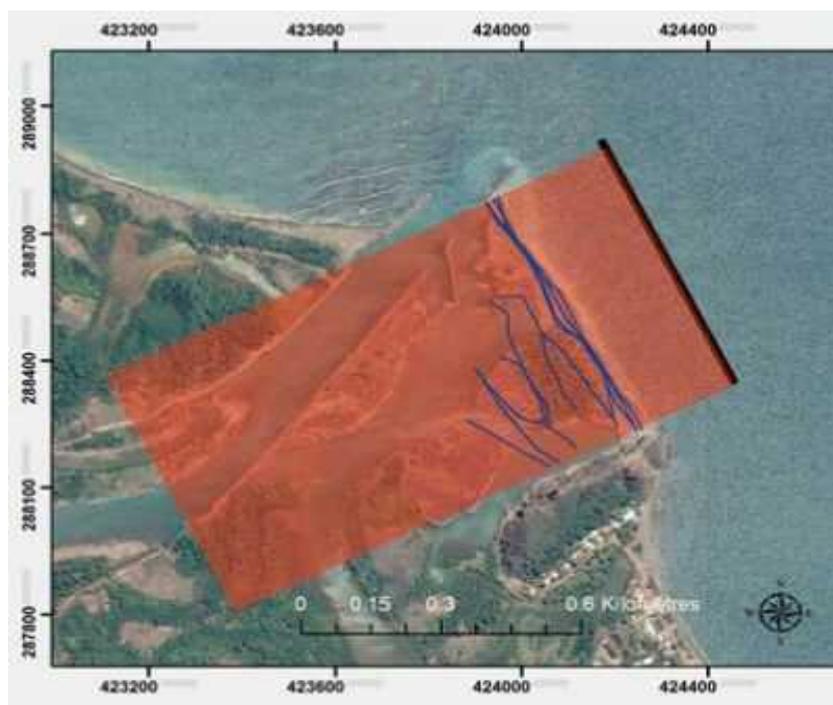


Figure 60 : Exemple de positionnement des transects pour l'étude du trait de côte (Leroux, 2016)

Cette démarche a été appliquée à 3 zones littorales de la baie de Thio :

- La plage d'Ouroué ;
- L'embouchure de la Thio ;
- La plage de St Philippo II

3.2.3.3. Résultats

Les résultats pour la plage d'Urué sont basés sur l'analyse de 222 transects espacés de 10 mètres. Cette zone, localisée entre les embouchures de la Thio et de la Dothio, montre des taux d'évolution compris - 0,41 m/an et 4,35 m/an (figure 61 suivante). Cela met en évidence un secteur en accrétion au niveau de la digue d'une part et un secteur en érosion au milieu de la plage. La partie nord de la plage semble plus ou moins stable sur la période.

Le secteur de l'embouchure de la Thio, entre la Thio et le Botaméré, a été étudié sur la base de 124 transects distants de 5 mètres. Le linéaire de littoral est court : seulement 600 mètres, situé dans le delta de la Thio. Les tendances annuelles varient de -0,06 m/an à 5,86 m/an (figure 63). Une zone se distingue

très nettement avec une différence d'environ 6 mètres d'un point à l'autre, mettant en évidence une accrétion sur la plus grande partie de la zone. L'érosion est faible près de la rivière et ne concerne qu'une petite partie.

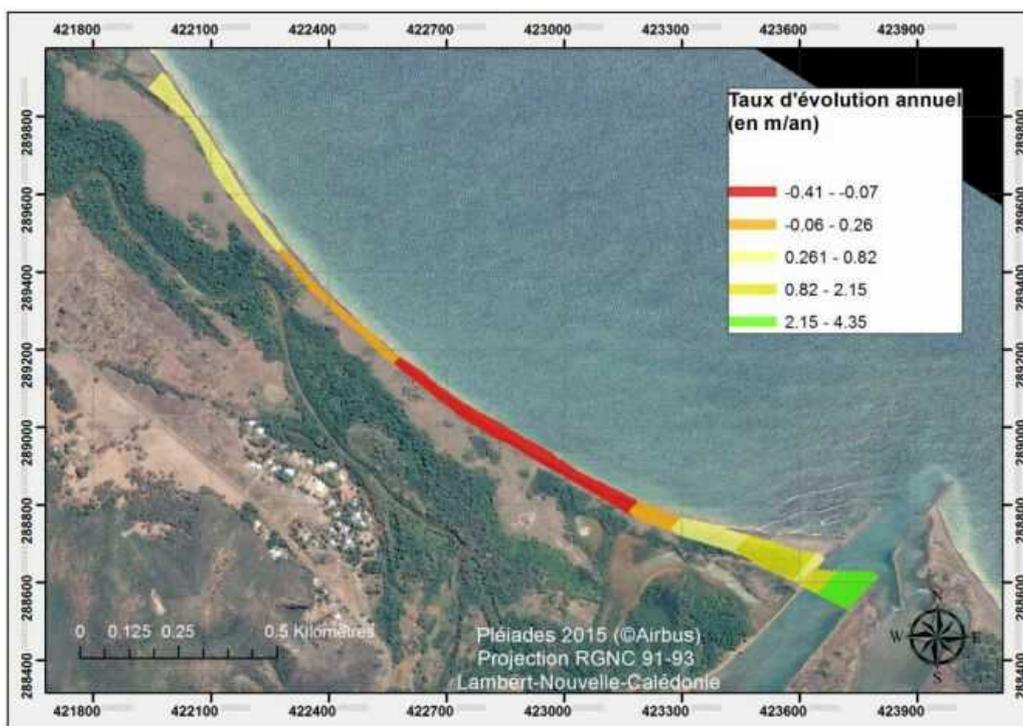


Figure 61 : Tendence de l'évolution du trait de côte au niveau de la plage d'Urue entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).

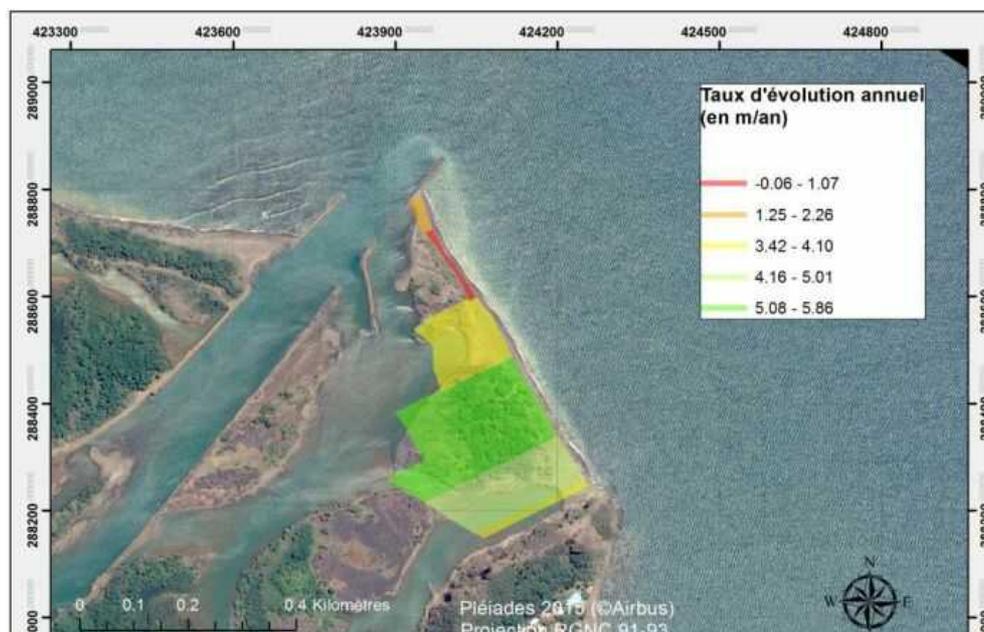


Figure 62 : Tendence de l'évolution du trait de côte au niveau de l'embouchure de la Thio entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).

Dans le secteur de la plage de St Philippo II, entre le Botaméré et le wharf, l'espacement des transects analysés est de 10 mètres, pour un total de 170 transects. Les tendances annuelles sont comprises entre -0,06 m/an et 0,46 m/an (figure 63 suivante). Cette évolution est plus modérée que la zone du delta, l'amplitude étant de 0,40 m/an. L'essentiel de la baie est en érosion, du Botaméré à la fin de la plage au sud, et en présence d'aménagements sur le littoral. Quelques points d'accrétion sont identifiés au pied du Botaméré et du port jusqu'au wharf, à l'ombre des courants dominants de la baie.



Figure 63 : Tendence de l'évolution du trait de côte au niveau de la tribu de St Philippo entre 1954 et 2015 (A. Leroux, 2016).

3.2.4. CONCLUSION

L'étude de l'évolution spatiale et temporelle des surfaces de sols nus et de la végétation à l'échelle du grand bassin versant et à l'échelle du sous-bassin à l'aide d'imagerie satellitale à une résolution spatiale de 20 mètres permet de mettre en évidence les principaux changements environnementaux entre deux dates et plus encore à partir d'une série de dates comprises entre 1986 et 2015.

Cette approche par télédétection et SIG propose une quantification des surfaces impactées par les évolutions du milieu, qu'elles soient positives ou négatives, pour mettre le focus sur les événements importants et les grandes tendances. C'est ainsi que les changements majeurs détectés s'avèrent être une conséquence de l'état très dégradé de la végétation des versants qui évolue au gré des conditions météorologiques et des incendies à répétition. Cela conduit à détecter cette végétation très dégradée parfois en sol nu, parfois en végétation active. Le maximum de variation de surfaces nues détectées s'élève à 322 ha, ce qui reste modeste devant l'étendue de la zone d'étude (plus de 40 000 ha), mais qui ne préjuge pas des quantités de matière érodées à partir de ces surfaces.

Les éventuels impacts liés à l'activité minière ou à des événements météorologiques extrêmes, qui étaient ici attendus, n'ont pas pu être mis en évidence à ces échelles car le bassin de la Thio subit fortement des

incendies, ce qui influence beaucoup les résultats. Les zones brûlées laissent place à une reprise de végétation détectable, même si celle-ci est précaire.

Une évolution différente a été identifiée pour les deux grands bassins étudiés : au cours des périodes 1986-1999 et 1999-2015, les bassins de la Thio et de la Todre évoluent à l'opposé, ce qui est lié à l'activité intermittente de la végétation dégradée des versants. Il semble donc que d'autres paramètres sont à prendre en considération, les conditions environnementales naturelles étant certainement différentes malgré la proximité immédiate des deux bassins versants (pluviométrie, exposition...).

L'impact de l'activité minière sur le bassin de la Thio se traduit par un peu plus de 500 ha d'excavations détectées dans les images sur la base des informations de la BDTPO et un peu plus de 300 ha de voirie indifférenciée. Ces surfaces, bien que non négligeables, sont moins étendues que celles liées à la végétation dégradée qui apparaît souvent comme inactive et propice à l'érosion par ruissellement. En termes de mobilisation de matériaux par l'érosion, les excavations et les pistes restent tout de même des types de sols nus bien plus sensibles car installés dans la durée et décapés mécaniquement. L'analyse de l'évolution de ces classes montre d'ailleurs qu'aucune reconquête significative de végétation n'a été identifiée entre 1986 et 2015 concernant les impacts directs de la mine (plateformes ou pistes). Une modeste reprise de végétation a tout de même été observée sur certains bancs sédimentaires de la Thio (~1 ha), ce qui reste peu significatif devant les surfaces anthropisées, les incendies et l'état de la végétation dégradée. La quantification des surfaces du tandem sols nus/végétation et l'analyse statistique réalisées introduisent donc un cadre environnemental général sur les bassins de la Thio et de la Todre. Ce volet apporte des informations quant à l'étendue des surfaces émettrices de particules fines et au comportement de la végétation des versants. C'est une contribution à une réflexion plus large sur les phénomènes d'érosion-sédimentation dans les bassins étudiés. Les transferts de matière, non traités ici, sont évoqués à une échelle plus localisée dans les autres volets de l'étude.

Concernant l'évolution du trait de côte dans la baie de Thio, l'essentiel à retenir est la progression importante de la plaine deltaïque, avec un développement de plus de 300 mètres sur le littoral entre 1954 et 2015. Si ce processus est en partie naturel, la contribution de l'activité minière à la dynamique du delta n'en est pas pour autant à écarter, tout comme l'influence des aménagements réalisés et modifiés au cours de la période étudiée, comme l'a déjà souligné une précédente étude (Allenbach et Hoibian, 2002).

Ce volet a aussi permis de dégager les principaux freins au suivi environnemental par télédétection à haute résolution portant sur l'érosion à l'échelle du bassin versant sur la Grande Terre de Nouvelle-Calédonie : absence de chronologie dans les données exogènes (ici BDTPO), indisponibilité de données météorologiques dans certains bassins, très grande sensibilité des capteurs satellitaires à l'état de la végétation très dégradée. Des capteurs satellitaires à résolution spatiale plus fine pourraient apporter une information plus différenciée, mais les budgets à allouer sont conséquents.

3.3. ETUDE MORPHODYNAMIQUE DE L'HYDROSYSTÈME

Auteurs : F. Liébault (IRSTEA), M. Bertrand (IRSTEA) – Annexe 2

Il s'agit, dans cette section, de réaliser :

- L'analyse et la photo-interprétation de photos aériennes et d'images satellites à haute résolution couvrant les dernières décennies jusqu'à aujourd'hui ;
- La cartographie diachronique des corps sédimentaires, des figures d'érosion et des autres marqueurs géomorphologiques ;
- Et la caractérisation de l'état actuel appuyé par des observations de terrain.

3.3.1. ANALYSE DIACHRONIQUE DES BANDES ACTIVES : BASSINS VERSANTS DE LA THIO ET DE LA TODRÉ

L'objectif est d'effectuer une analyse cartographique diachronique du surengrèvement de la Thio en se basant sur une métrique caractérisant la migration vers l'aval des sédiments grossiers : la largeur de la bande active au cours du temps. L'analyse régionale des bandes actives dans les massifs de péridotites de la Grande Terre, réalisée dans le cadre du projet Gestion du Passif, a en effet démontré que la largeur de bande active pouvait être considérée comme un très bon indicateur de l'impact sédimentaire minier (Bertrand et Liébault, 2019). L'analyse est également réalisée sur le site témoin (bassin versant de la Todré) afin de pouvoir faire des comparaisons. Ce travail a fait l'objet d'un stage de 6 mois, réalisé par Perrine Drain à Irstea Grenoble (TFE, CNAM-ESGT du Mans), de février à juillet 2016 (Drain 2016).

Pour cela, plusieurs jeux de photographies aériennes ont été récupérés sur le georep.nc et orthorectifiés en utilisant le logiciel Photoscan (les photographies brutes ont été déformées pour coller au relief dans les zones de fond de vallées) à l'aide du Lidar de 2012 et en se basant sur des points de calage repérés sur les orthophotographies les plus récentes (2008 pour la Thio). Un contrôle de la précision planimétrique de ces recalages a été effectué dans l'emprise du Lidar. Des images satellites Pléiades de 2015 ont été acquises dans le cadre du projet pour obtenir une date récente permettant d'évaluer les effets morphologiques des crues de 2014 et 2015. Les dates de campagnes pour le bassin versant de la Thio et de la Tôdré sont présentées dans le tableau 14.

Tableau 14 : Imagerie utilisée pour la reconstitution de l'évolution des bandes actives dans les bassins versants de la Thio et de la Todré

Date	Couverture Thio	Couverture Tôdré	Type	Source
1943	partielle	partielle	Photographies aériennes panchromatiques	US Navy
1954	totale	totale	Photographies aériennes panchromatiques	IGN
1971	totale	totale	Photographies aériennes panchromatiques	IGN
1976	totale	totale	Photographies aériennes panchromatiques	IGN
1985	totale	totale	Photographies aériennes panchromatiques	IGN
1989	totale	néant	Photographies aériennes couleur	SPP
1995	néant	totale	Photographies aériennes couleur	SPP
1998	néant	partielle	Photographies aériennes couleur	SPP
2008	totale	totale	Orthophotographies RVB	IGN
2015	totale	totale	Images satellites Pléiades	AIRBUS

Pour chacune de ces dates, les bandes actives ont été digitalisées dans un SIG. L'utilisation de l'outil FluvialCorridor (Roux et al., 2015) a ensuite permis d'en extraire les largeurs à pas de 50 m.

L'analyse des tendances obtenues sur différents sites montre une très grande variabilité spatiale des réponses morphologiques. L'interprétation de ces tendances doit se faire à la lumière des principaux forçages susceptibles d'influencer les bandes actives, à savoir l'exploitation minière et les épisodes hydrométéorologiques majeurs des dernières décennies. À l'issue du projet, nous pouvons proposer une représentation schématique de ces forçages, à partir des grands repères chronologiques de l'histoire minière (premières exploitations, boom du nickel, code minier...) et de l'occurrence des cyclones qui ont affecté la région de Thio, tels qu'ils ont été répertoriés par Météo France. Ceci nous conduit à proposer une fresque des forçages (Fig. 64), sur laquelle nous avons positionné les photographies aériennes disponibles.

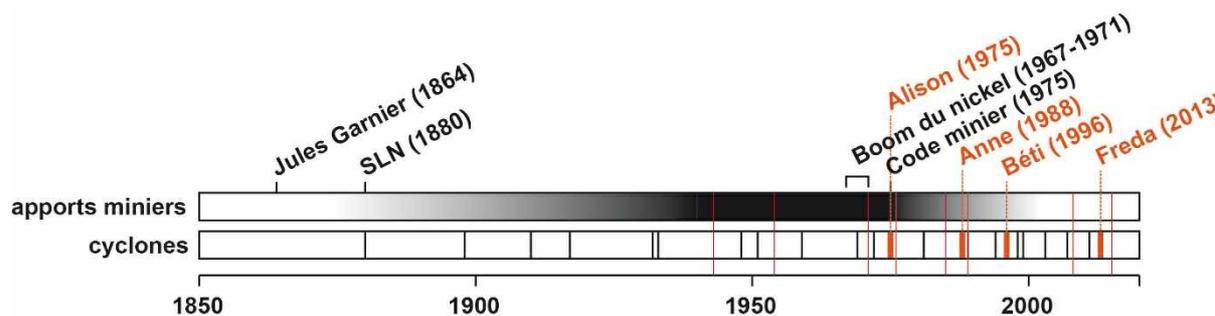


Figure 64 : Représentation schématique des forçages d'origine minière et hydrométéorologique susceptibles d'expliquer les réponses morphologiques ; les dates des photographies aériennes disponibles sont représentées en rouge

Les principales observations qui peuvent être faites sur l'évolution des bandes actives dans le bassin de la Thio sont les suivantes :

- La Thio, qu'elle soit considérée en amont ou en aval des confluences avec les principaux contributeurs miniers (Nakalé et Néburu), montre les mêmes tendances lourdes (Fig. 66), à savoir un paroxysme d'engravement sur les photos de 1954, puis 2 phases de rétraction successives, la première entre 1954 et 1971, puis la deuxième entre 1989 et 2008. La différence principale entre l'amont et l'aval des confluences concerne le retour dans le fuseau de référence⁵, qui intervient dès les années 1970 en amont, et seulement à partir des années 2000 en aval. Les cyclones qui semblent avoir eu un effet morphologique, à savoir un élargissement de bande active, sont ceux de 1975 (Alison) et 2013 (Freda). Il faut noter que les photos aériennes sont trop récentes pour permettre de voir l'arrivée des vagues sédimentaires d'origine minière sur la Thio.
- La Nakalé et la Néburu (Fig. 65) montrent des bandes actives impactées sur l'ensemble de la période, qui ne reviennent jamais dans le fuseau de référence, même si la Nakalé semble plus s'en rapprocher sur la période récente. On note aussi des fluctuations beaucoup plus marquées sur la Nakalé, qui présente une réactivité forte aux cyclones, notamment à ceux de 1975 (Alison) et 1988 (Anne), et dans une moindre mesure, à celui de 2013 (Freda). La Néburu montre les mêmes tendances, mais les fluctuations sont plus faibles, sans doute parce que l'espace de divagation est beaucoup plus confiné que sur la Nakalé. C'est ce qui ressort également des observations de terrain réalisées suite au cyclone Cook de 2017, qui montrent une réponse beaucoup plus marquée sur la Nakalé. Même si une phase de rétraction est bien observée à partir de la mise en place du code minier, on voit que ces systèmes sont encore très engravés, ce qui s'explique par leur proximité aux

⁵ Le fuseau de référence correspond à la gamme de variabilité des largeurs de bande active observée dans les bassins versants non impactés par l'activité minière, dans les massifs de péridotite. Elle est obtenue à partir d'une loi statistique largeur active vs. surface drainée, qui a été développée dans le projet Gestion du Passif (Bertrand et Liébault, 2019).

sources d'érosion minière. Comme pour la Thio, les photos sont trop récentes pour visualiser l'arrivée des premières vagues sédimentaires.

- La Tomuru (Fig. 65) montre de manière exemplaire la mise en place des vagues sédimentaires d'origine minière, ainsi que leur stabilisation à partir des années 1970 sous l'effet de l'incision du lit. On voit ainsi une tendance très nette à l'élargissement entre 1954 et 1976, puis une phase de rétraction qui démarre à partir de 1989. L'état actuel est encore très au-dessus du fuseau de référence, mais la trajectoire montre un possible retour à l'équilibre dans les années à venir. Il s'agit également du seul site qui ne montre pas d'élargissement suite au cyclone de 2013 (Freda).

L'évolution morphologique observée sur la Todré, notre système de référence (ou site témoin du projet), montre que la bande active est restée très stable sur l'ensemble de la période (Fig. 66). On note une réponse aux cyclones de 1975 (Alison) et 2013 (Freda), même si les élargissements sont de faible ampleur. Il est également intéressant de constater que la bande active de cette rivière est située légèrement au-dessus du fuseau de référence, ce qui signifie qu'elle est relativement large par rapport aux conditions moyennes observées dans les massifs de péridotite non miniers. Ceci pourrait s'expliquer par un régime hydrologique plus soutenu, notamment des crues plus puissantes, compte tenu de la situation géographique du bassin situé sur la côte sous le vent.

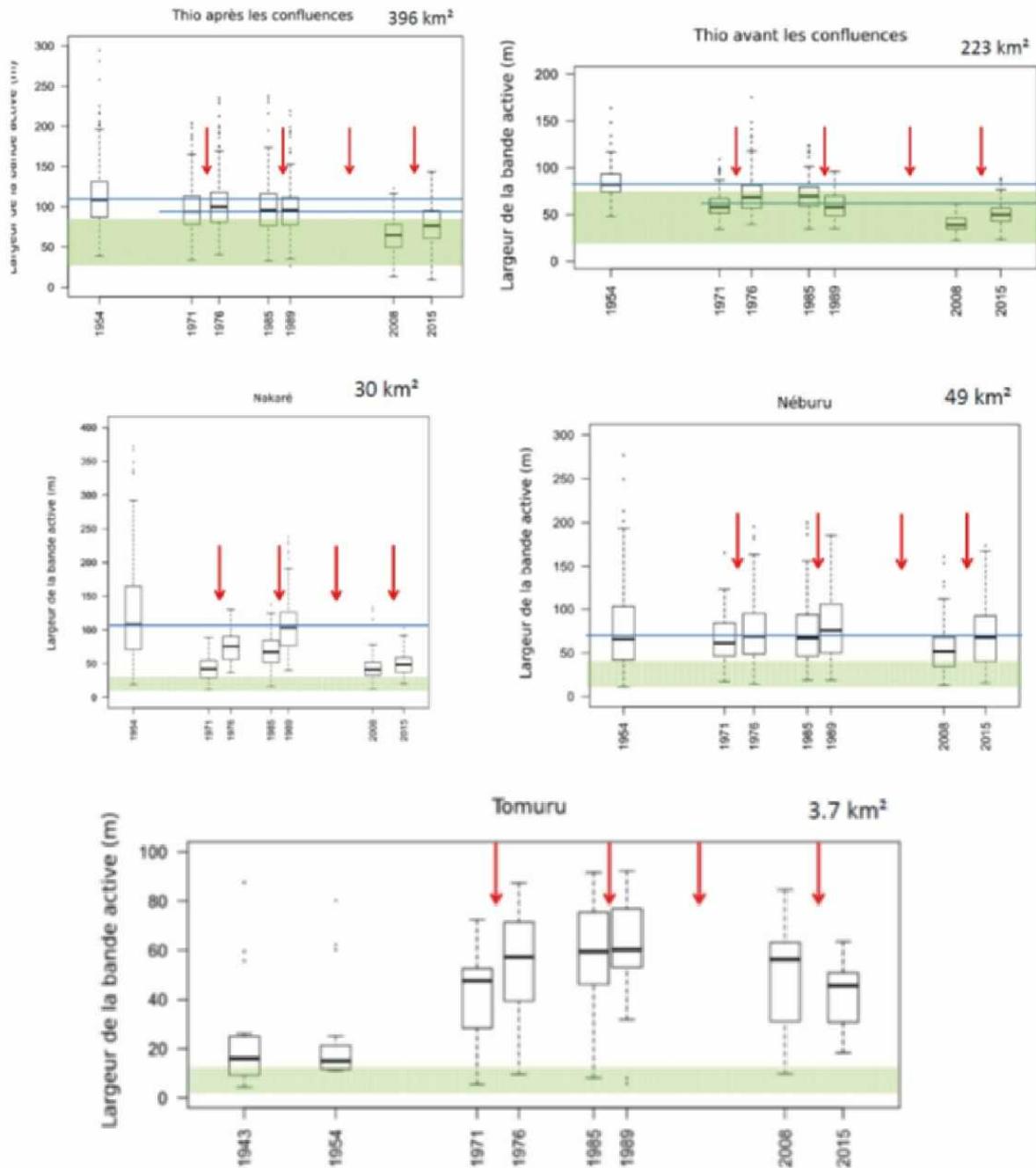


Figure 65 : Évolutions de la bande active de la Thio et de ses affluents entre 1954 et 2015

Sur la figure précédente (Fig. 66), les dates des grands cyclones apparaissent en rouge ; la zone verte correspond à la gamme des largeurs de bande active de référence, telle qu'elle a été reconstituée à partir des sites non impactés par les mines

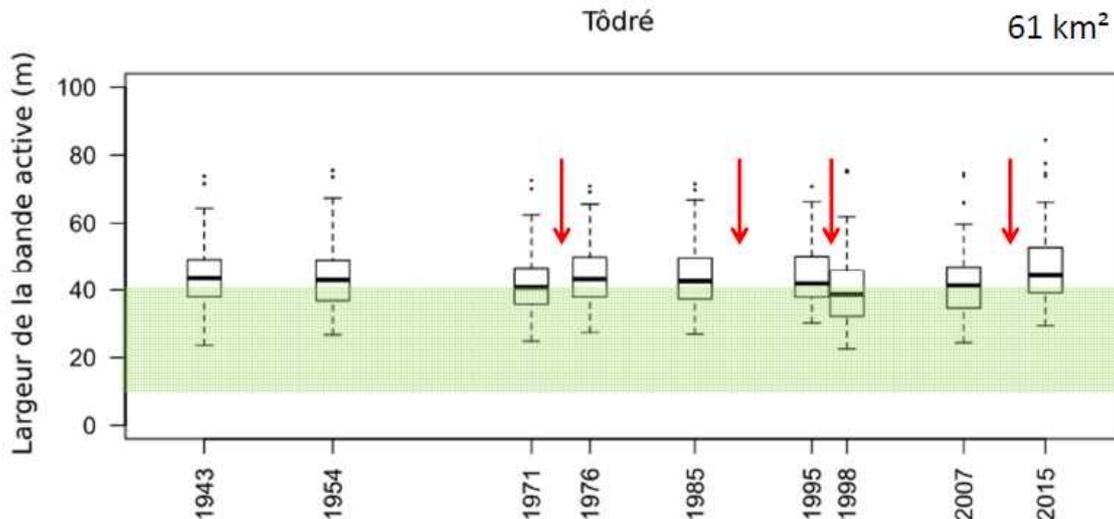


Figure 66 : Évolution de la bande active de la Toderé entre 1943 et 2015

Là encore, les dates des grands cyclones apparaissent en rouge ; la zone verte correspond à la gamme des largeurs de bande active de référence, telle qu'elle a été reconstituée à partir des sites non impactés par les mines

À l'issue de ces reconstitutions historiques, plusieurs questions restent encore ouvertes : pourquoi la rétraction sur la Thio démarre-t-elle dès les années 1950, alors que les apports miniers ont sans doute diminué à partir des années 1970, avec la mise en place du code minier ? Est-il possible que cette phase précoce de rétraction, d'origine probablement climatique (période d'accalmie hydrologique), ait été interrompue par le cyclone Alison de 1975, qui aurait initié une période de latence d'une quinzaine d'années, avant que la deuxième période de rétraction ne redémarre ?

3.3.2. RECONSTITUTION DES PHASES RÉCENTES D'EXHAUSSEMENT ET D'INCISION DE LA NÉBURU À PARTIR DE L'ANALYSE CROISÉE DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES HISTORIQUES ET DES DONNÉES LIDAR DE 2012

Les plaines alluviales soumises à des apports sédimentaires grossiers exceptionnels connaissent des phases d'ajustement morphologique caractérisées par un exhaussement et un élargissement du lit actif (phase d'aggradation), suivis par un retour à l'équilibre, qui se traduit par une incision et une rétraction du lit actif (phase d'incision). Cette dynamique a été maintes fois documentée, notamment dans les plaines alluviales situées en aval d'apports miniers excessifs (Gilbert 1917 ; Knighton 1989 ; James 2006). Lorsque les apports sédimentaires sont concentrés dans l'espace, l'intensité des changements morphologiques décroît avec la distance aux sources sédimentaires, et un gradient longitudinal apparaît dans l'évolution du profil en long. On observe ainsi un exhaussement (et une incision) plus marquée à proximité des sources où prennent naissance les vagues sédimentaires.

Le cas de la Néburu dans le bassin versant de la Thio offre un cas d'étude intéressant pour tester ce modèle d'évolution morphologique, car la plaine alluviale a été ici particulièrement impactée par les apports sédimentaires en provenance de la Mine Bornet, en rive gauche du cours d'eau. Les orthophotos récentes montrent encore aujourd'hui très clairement la présence de quatre ravines actives qui alimentent la Néburu en sédiments depuis ce secteur minier. D'autre part, nous disposons ici d'un levé LiDAR aéroporté de 2012, qui couplé aux photographies aériennes historiques, offre la possibilité d'extraire la topographie des surfaces alluviales perchées, issues des phases d'exhaussement récentes, qui ont été conservées dans la plaine alluviale. Ces terrasses récentes permettent ainsi de reconstituer l'évolution du profil en long de la Néburu, et de mieux retranscrire la réponse de cette plaine aux apports miniers. L'intérêt d'une telle approche rétrospective dépend en grande partie de l'état de conservation des surfaces alluviales

résiduelles, et donc de la dynamique temporelle de la recharge sédimentaire. Si celle-ci montre une décroissance rapide après perturbation, alors l'état de conservation des terrasses doit être de qualité suffisante pour reconstituer l'évolution du profil en long. En revanche, si la recharge reste soutenue longtemps après les premiers apports, les terrasses sont détruites par les vagues sédimentaires successives et la reconstitution risque d'être plus incomplète. Nous avons donc testé cette approche sur la Néburu, avec pour objectif principal de reconstituer l'évolution du profil en long, sur un tronçon de l'ordre de 3 km (Fig.67).

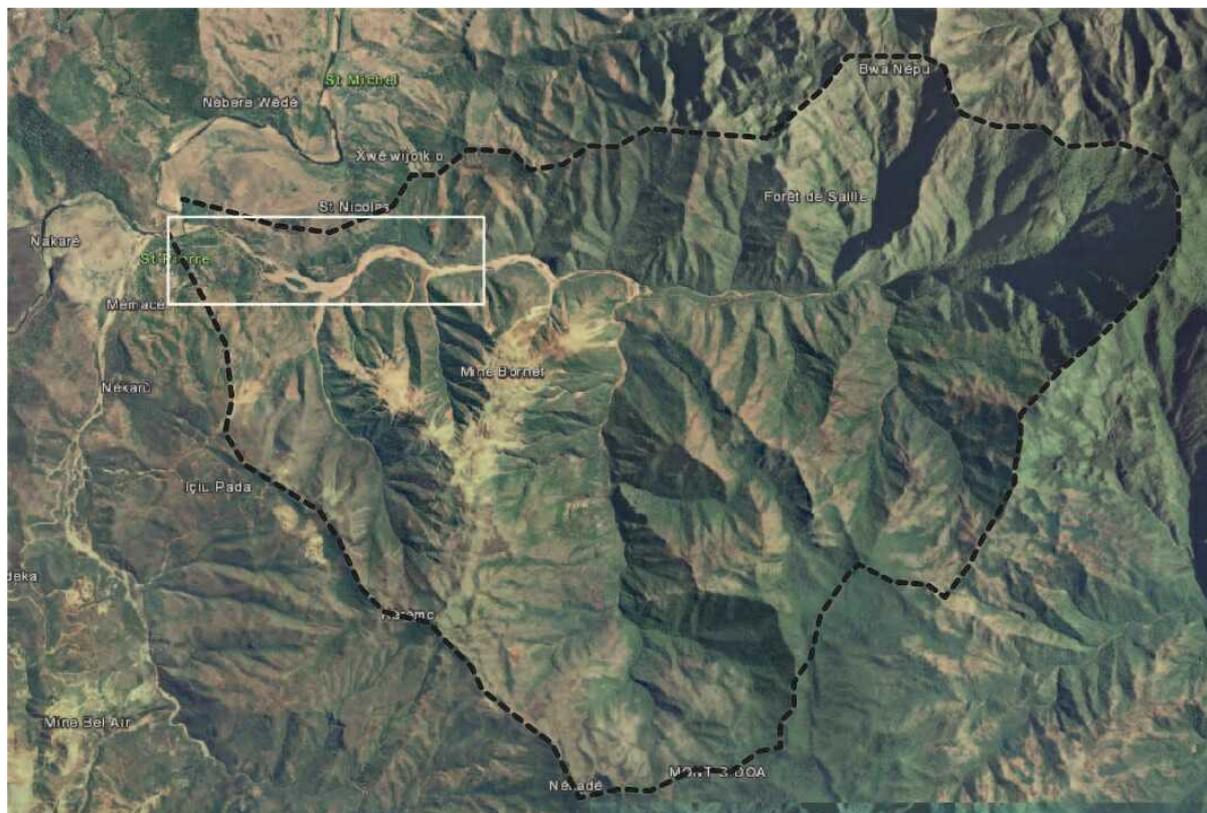


Figure 67 : Localisation du tronçon étudié (cadre blanc) dans le bassin versant de la Néburu ; ce tronçon correspond à la zone couverte par le levé LiDAR de 2012

3.3.2.1. Démarche méthodologique

La démarche méthodologique repose sur l'extraction de profils en travers de la plaine alluviale, dans les secteurs où un bon état de conservation des terrasses est observé. L'examen attentif des photographies aériennes historiques (1954, 1971, 1976, 1985, 1989) et des orthophotos récentes (2008) permet de détecter ces secteurs d'intérêt. Nous en avons identifié 11 sur les trois derniers kilomètres de la Néburu (Fig. 69), ce qui donne un pas d'échantillonnage moyen de 300 m. D'autres secteurs intéressants existent plus en amont, mais malheureusement, la haute vallée n'a pas été couverte par le levé LiDAR de 2012.

L'extraction des points LiDAR est réalisée sous ArcGIS, à partir d'une zone tampon de 2 m de part et d'autre du transect. On obtient ainsi un profil moyen sur une bande de 4 m de large, ce qui permet d'avoir un nombre suffisant de points pour extraire la topographie. L'intégralité des points bruts du levé LiDAR ont été extraits, peu importe leur classification (sol ou sursol), de façon à pouvoir réattribuer au sol les points du nuage sursol qui ont été mal classés.

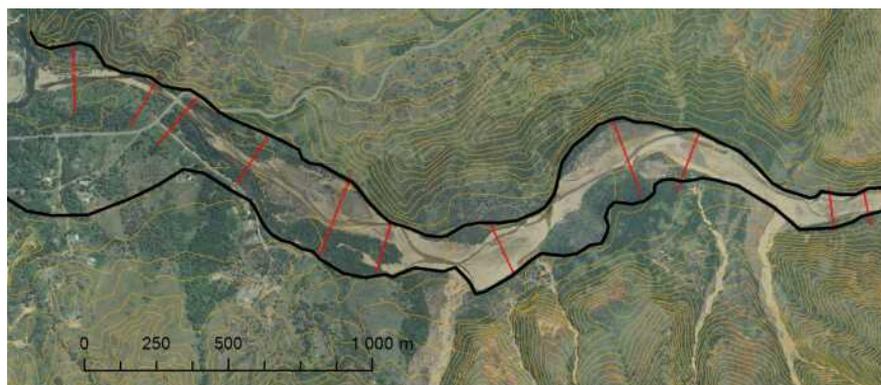


Figure 68 : Localisation des 11 profils en travers (en rouge) extraits des données LiDAR de 2012 sur les trois derniers kilomètres de la Néburu ; l'extension de la plaine alluviale est représentée en noir ; courbes de niveau 10 m en orange

Il est en effet apparu que le filtrage des points sol dans les données brutes était beaucoup trop restrictif (Fig. 69). Notre reclassification manuelle a permis de réattribuer 42% du nuage sursol au nuage sol, et d'augmenter ainsi de manière substantielle le nombre de points par transect (Tab. 15). Une fois les points extraits, une projection orthogonale sous ArcGIS est réalisée à partir d'une table de proximité. Ceci revient à repositionner tous les points dans le plan vertical du transect, de façon à pouvoir produire une vue 1D du transect sous Excel, et de calculer ensuite les altitudes moyennes des différentes surfaces d'intérêt (bande active et terrasses). Les distances à l'exutoire de chaque transect, mesurées à partir du tracé actuel du cours d'eau, permettent au final de tracer le profil en long des différentes surfaces. L'absence de points bathymétriques est une limite bien connue des capteurs LiDAR infrarouge. L'altitude moyenne de la bande active extraite des données LiDAR n'est donc représentative que des surfaces hors d'eau le jour du levé, et elle est donc légèrement surestimée par rapport à l'altitude moyenne réelle, telle qu'elle peut être obtenue à partir de levés terrestres classiques.

Tableau 15 : Position et caractéristiques des profils en travers extraits du levé LiDAR de 2012 sur la Néburu

Profil en travers	Distance à l'exutoire (m)	Longueur du transect (m)	Nombre de points	Interdistance moyenne entre les points
XS1	140	242	116	2.1
XS2	421	186	100	1.9
XS3	561	221	148	1.5
XS4	847	201	157	1.3
XS5	1201	308	340	0.9
XS6	1399	193	188	1.0
XS7	1829	202	300	0.7
XS8	2369	271	348	0.8
XS9	2627	228	265	0.9
XS10	3168	143	212	0.7
XS11	3290	133	192	0.7

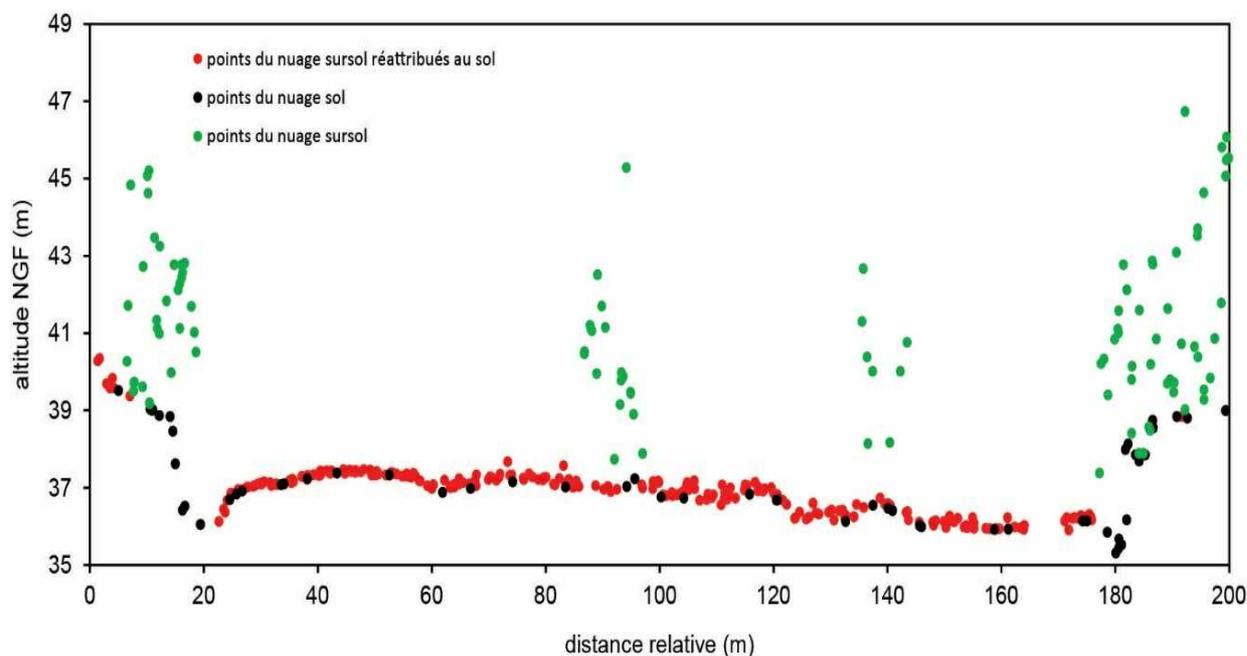


Figure 69 : Effet de la réattribution manuelle des points LiDAR du nuage brut sursol sur la topographie du transect XS7 (projection orthogonale des points sur une bande de 4 m centrée sur le transect)

3.3.2.2. Résultats

Les données topographiques extraites du LiDAR de 2012 nous montrent la présence de 3 surfaces alluviales perchées reconnaissables sur plusieurs profils en travers.

Le niveau le plus ancien, d'après les vieilles photographies aériennes, correspond à une surface boisée, présente sur la quasi-totalité des transects (9/11).

L'analyse des archives photographiques montre très clairement que cette surface est antérieure à 1954, car elle était déjà boisée à cette date (la plus ancienne disponible dans les photographies aériennes historiques). Les points LiDAR du nuage sursol montrent que les peuplements forestiers sont composés d'arbres d'une dizaine de mètres de hauteur. Cette surface est généralement perchée entre 1.5 et 2.4 m au-dessus du lit actif actuel. La reconstitution de son profil en long montre une structure des pentes conforme à celle du lit actuel, avec deux ruptures de pente majeures (au droit des transects XS2 et XS6) (Fig. 70). L'incision du lit actuel par rapport à cette surface montre une homogénéité remarquable sur l'ensemble du linéaire étudié. Les orthophotos récentes montrent que cette surface est présente dans la haute vallée de la Néburu, en amont des apports miniers. Les reconnaissances de terrain réalisées au printemps 2016 montrent par ailleurs une sédimentologie typique de plaine d'inondation, avec des dépôts grossiers recouverts par des limons de débordement (Fig. 71).

Une deuxième surface alluviale abandonnée et reconnaissable sur plusieurs profils se présente sous la forme de bancs à patine sombre, colonisés de manière sporadique par des patches de végétation arbustive (Fig. 72).

Cette surface n'est observée que sur 2 transects (XS5 et XS8). Les points LiDAR du nuage sursol montrent que les peuplements arbustifs présentent une hauteur de l'ordre de 3 m. Le faible état de conservation de cette surface sur les trois derniers kilomètres de la Néburu ne permet pas de reconstituer un profil en long ; en revanche, la topographie des transects XS5 et XS8 montre très clairement que cette surface est située au même niveau que la surface boisée décrite précédemment (Fig. 71). Il faut de surcroît considérer que le niveau d'alluvionnement grossier de cette surface dépasse celui de la surface boisée, dans la mesure

où celle-ci est recouverte de fines. Les archives photographiques montrent que cette surface a commencé à se stabiliser entre 1976 et 1985, et que la patine sombre est déjà bien visible sur les photos de 1989.

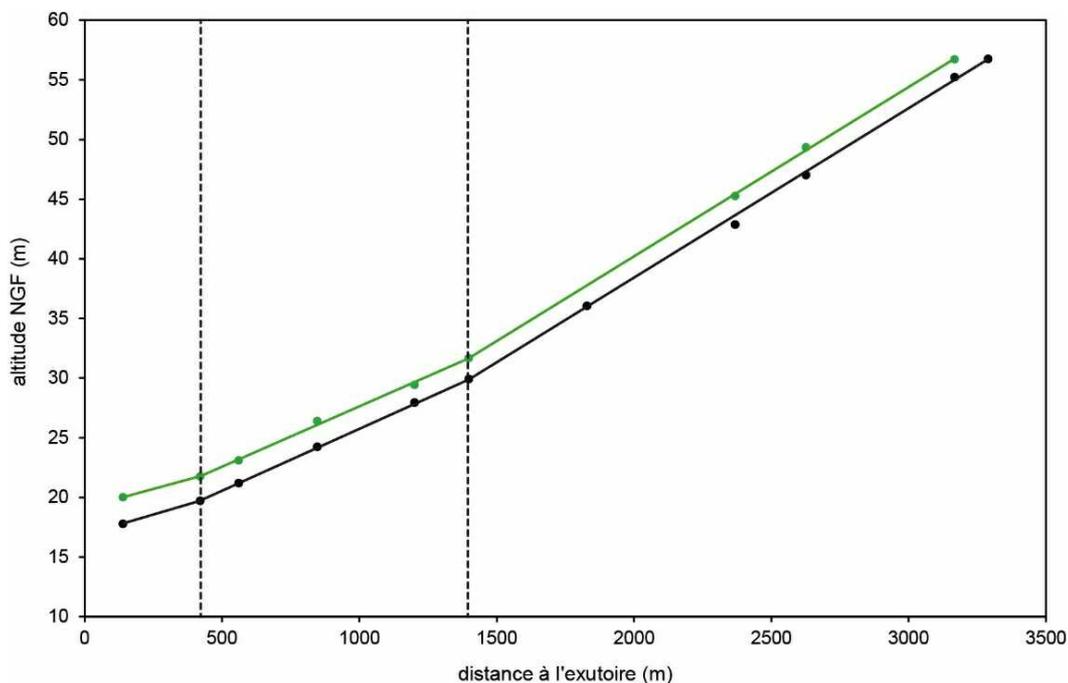


Figure 70 : Reconstitution du profil en long de la surface alluviale boisée du cours inférieur de la Néburu (en vert) ; le profil du lit actif actuel est représenté en noir ; les traits verticaux discontinus représentent les ruptures de pente majeure du profil en long



Figure 71 : Surface alluviale boisée en rive gauche de la Néburu, entre les transects XS7 et XS8; les graviers sont recouverts par des dépôts fins, typiques des plaines d'inondation (© F. Liébault)



Figure 72 : Banc perché à patine sombre occupé par des patches arbustifs, en rive droite de la Néburu, au droit du transect XS8 (© F. Liébault)

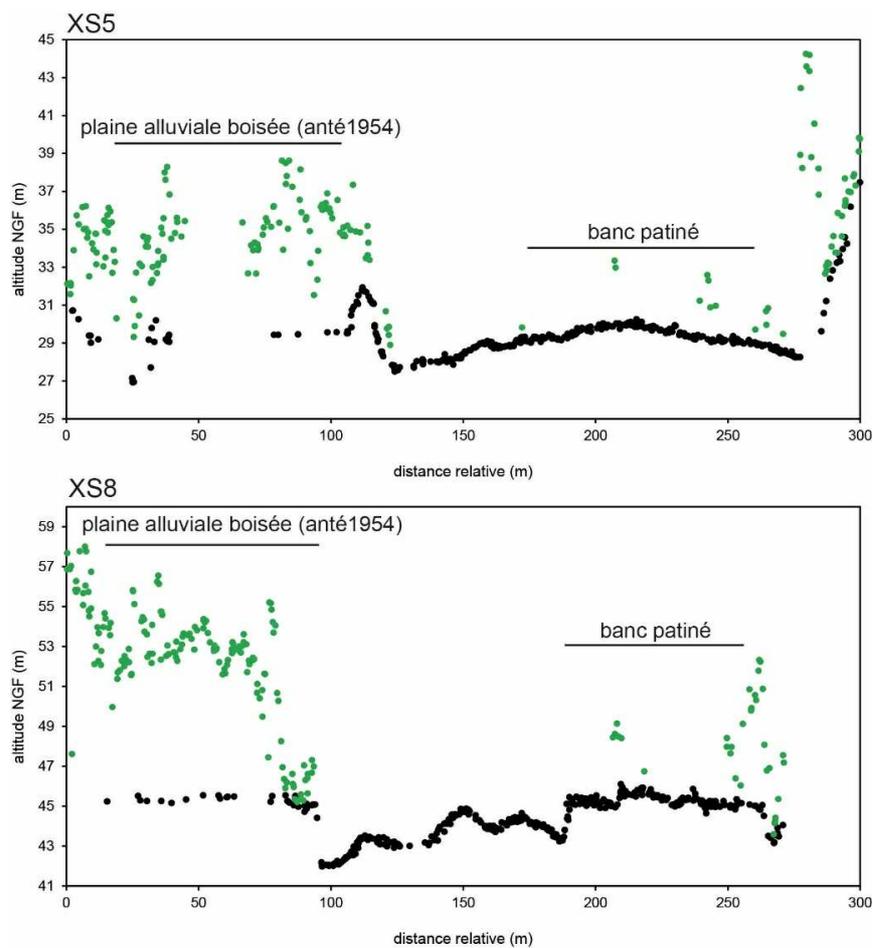


Figure 73 : Transects topographiques sur lesquels les bancs à patine sombre avec végétation arbustive sont observés

Sur la figure 73, on voit en vert, les points du nuage sursol ; en noir, les points du nuage sol ; on observe que les bancs à patine sombre sont au même niveau que la surface alluviale boisée antérieure à 1954.

La troisième surface détectée correspond elle aussi à des bancs patinés, mais qui contrairement au niveau décrit précédemment, ne présentent aucune trace de colonisation arbustive (Fig. 74). Ces bancs sont observés sur 7 profils, et une reconstitution du profil en long peut donc être réalisée (Fig. 75). L'incision du lit actif par rapport à cette surface est comprise entre 1 et 1.5 m et elle présente une régularité remarquable d'amont en aval (excepté pour le profil XS6, qui montre une incision plus marquée de 1.9 m).

Les ajustements linéaires sur les points où la surface est observée montrent que la pente du profil en long est conforme à celle du lit actif actuel, avec une valeur de 0.014 (Fig. 75). Cette surface apparaît très active sur les photos de 1989, et aucune patine sombre n'est observée à cette date. Sur les 2 profils pour lesquels cette surface peut être comparée aux bancs à patine sombre végétalisés (XS5 et XS8), une incision de l'ordre de 0.6 à 1.2 m est observée.

La phase d'exhaussement correspondante est donc moins marquée que celle qui la précède. Il faut également souligner que les 2 niveaux de bancs à patine sombre ne sont pas observés en amont des derniers apports miniers, d'après les orthophotos de 2008.



Figure 74 : Banc perché à patine sombre, sans végétation arbustive, observé en rive gauche de la Néburu, au droit du transect XS9 (© F. Liébault)

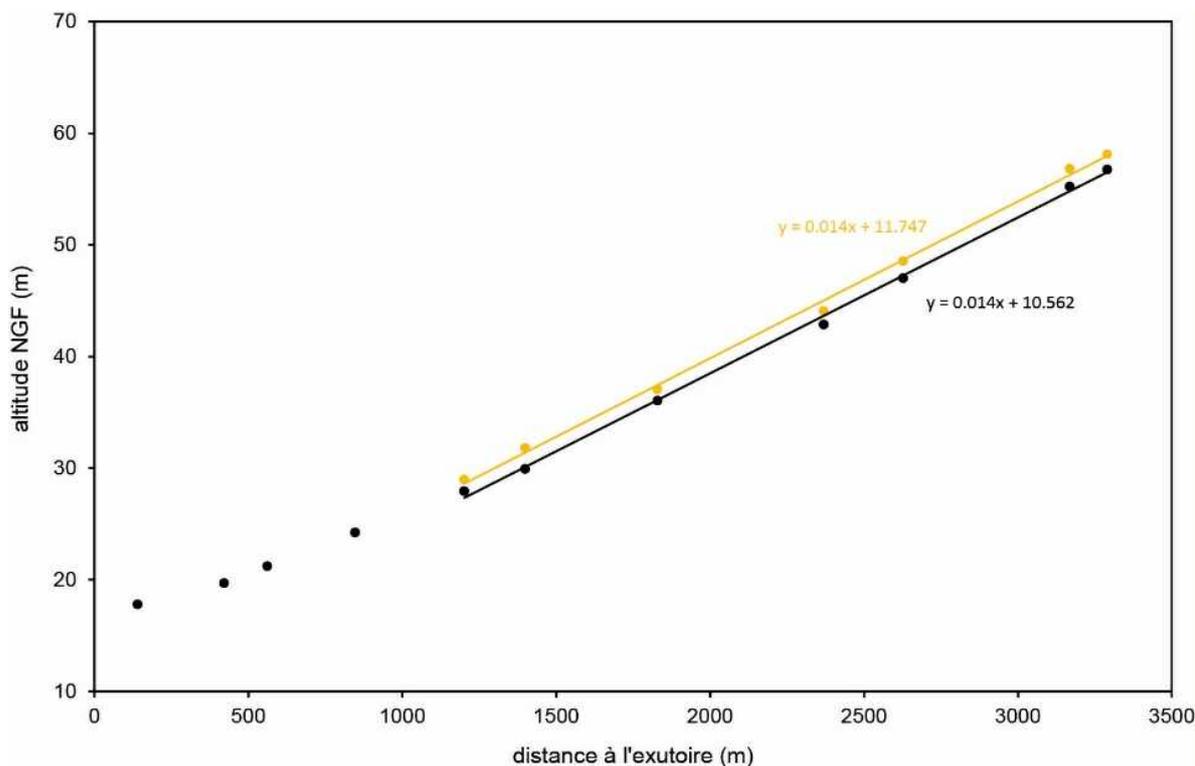


Figure 75 : Reconstitution du profil en long des bancs à patine sombre non végétalisés sur le cours inférieur de la Néburu (en orange)

Sur la figure 75, le profil du lit actif actuel est représenté en noir ; les traits continus correspondent aux droites de régression linéaire ajustées sur les points recouverts par les droites ; les ajustements montrent une pente équivalente de 1.4%

Quelques observations complémentaires ont pu être réalisées sur certains transects, à partir de la présence de niveaux ne pouvant pas être directement rattachés aux surfaces précédemment décrites. Sur les profils XS2 et XS3, un niveau en rive gauche occupé par un peuplement forestier composé d'arbres de 5 m de haut a pu être rattaché à la bande active visible sur les photos de 1976. Cette surface est perchée à 2 m du lit actif, et elle est au même niveau que la surface boisée antérieure à 1954. Elle est donc très probablement de même âge que les bancs patinés à végétation arbustive observés plus en amont. Sur le profil XS4, une portion de la bande active de 1989 a été conservée en rive droite. Elle est occupée par un peuplement arbustif de 2 m de hauteur, et elle est perchée à 1.3 m au-dessus du lit actif. Cette surface peut sans doute être rattachée aux bancs patinés non végétalisés observés plus en amont.

3.3.2.3. Interprétation

Une interprétation des différentes surfaces est proposée ici, sur la base des observations issues de l'analyse des données LiDAR, des archives photographiques, et de la reconnaissance de terrain réalisée au printemps 2016. Elle s'appuie également sur la chronologie des principaux événements cycloniques ayant impacté le bassin versant de la Thio au cours des dernières décennies.

Plusieurs éléments nous conduisent à interpréter la surface alluviale boisée observée sur l'ensemble du linéaire d'étude comme l'ancienne plaine d'inondation de la Néburu qui s'est constituée avant l'arrivée des premières vagues sédimentaires d'origine minière.

Cette surface étant observée dans la haute vallée préservée de la Néburu, elle peut difficilement être associée à d'éventuelles vagues sédimentaires minières antérieures à 1954. Les fronts de berge observés sur le terrain montrent par ailleurs une sédimentologie typique de plaine d'inondation, avec une épaisse couche de surface constituée de fines (limons et sables). Une terrasse alluviale consécutive à une vague

sédimentaire se forme généralement rapidement par incision du lit, et la sédimentation fine de surface est soit absente, soit insignifiante (ce qui est le cas des bancs à patine sombre).

La présence d'un peuplement forestier qui semble être assez âgé conforte également cette interprétation. Le fait que la structure des pentes de cette ancienne plaine d'inondation soit conforme à celle du lit actuel pose question, car on pourrait s'attendre à une pente actuelle plus forte, compte tenu de l'excès de charge sédimentaire.

Il faut néanmoins garder à l'esprit que le profil reconstitué s'appuie sur le tracé actuel du cours d'eau, qui est sans doute moins sinueux que celui qui prévalait lorsque la plaine alluviale était encore fonctionnelle.

On sait en effet depuis longtemps qu'un excès de charge sédimentaire conduit à une diminution de la sinuosité en plan des cours d'eau (Schumm, 1969). Le haut niveau de bancs à patine sombre correspond vraisemblablement à l'atterrissement associé au cyclone Alison de 1975. La patine apparaît entre 1976 et 1985, et ce niveau se raccorde bien aux portions de la bande active de 1976 qui ont été conservées sur les transects XS2 et XS ».

Le niveau atteint en 1976 constitue probablement le paroxysme de la phase d'aggradation d'origine minière. Son faible état de conservation le long du tronçon s'explique par le passage de vagues sédimentaires ultérieures, et notamment celle associée au cyclone Anne de 1988, qui est probablement à l'origine du niveau à patine sombre non végétalisé.

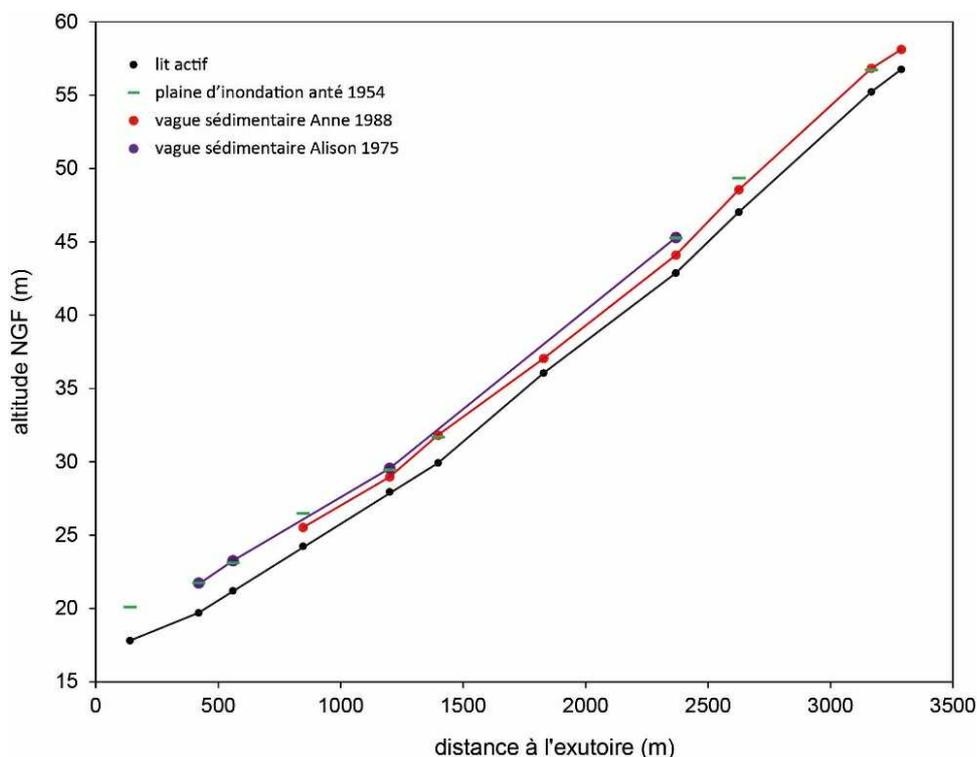


Figure 76 : Reconstitution du profil en long des vagues sédimentaires de 1988 et 1975 sur les trois derniers kilomètres de la Néburu

Ces éléments montrent que la Néburu a connu plusieurs phases d'exhaussement au cours des 50 dernières années :

- Une première phase dans les années 1940 ou 1950, liée aux premières vagues sédimentaires d'origine minière ; les photographies aériennes de 1954 montrent en effet que le lit est déjà très impacté par les apports sédimentaires ; même si une bande active très large est observée, elle n'occupe pas la totalité du fond de vallée, et des portions de plaine d'inondation sont conservées ; elles le sont encore aujourd'hui ;

- L'exhaussement se poursuit vraisemblablement jusqu'au cyclone Alison de 1975, qui marque sans doute le paroxysme de l'aggradation minière (aucun niveau supérieur n'est observé sur le cours inférieur de la Néburu) ; l'interdiction de la mise en verse des stériles date du début des années 1970, et il faut donc considérer que la recharge sédimentaire depuis les ravines est encore très élevée lorsque le cyclone Alison se produit ;
- Une troisième phase d'exhaussement se produit suite au cyclone Anne de 1988, sans doute après une période d'encaissement du lit, sous l'effet de la réglementation minière ; une nouvelle vague sédimentaire se forme, mais elle est moins puissante que celle de 1975, même si sa mise en place remobilise une grande partie des atterrissements de 1975 ; la comparaison des vagues sédimentaires de 1975 et 1988 montre bien que la recharge sédimentaire depuis les sites miniers, même si elle reste forte aujourd'hui, connaît une tendance à la diminution.

Le lit actuel est fortement incisé dans tous ces dépôts, et tend à retrouver un équilibre proche de celui avant perturbation, comme semble le montrer la structure des pentes actuelles, très proche de celle de la plaine alluviale anté 1954. La bande active actuelle montre néanmoins un lit encore très large, qui subit encore des apports sédimentaires soutenus depuis les sites miniers.

La mise en place des vagues sédimentaires successives de la Néburu peut être illustrée sous forme d'une série de profils type, depuis la situation avant l'exploitation minière jusqu'à la situation actuelle (Fig. 77). Il s'agit d'une représentation schématique de la succession des événements qui ont pu conduire à la situation actuelle, dont certains éléments restent de nature hypothétique. Le faible état de conservation de la bande active de 1954 ne permet pas d'établir une comparaison altimétrique avec les nappes alluviales qui se mettent en place en 1975. L'exhaussement du lit représenté entre 1954 et 1975 est donc incertain. Il repose principalement sur le fait que la largeur de bande active est restée stable entre 1954 et 1975, et que la réglementation minière est sans doute trop récente en 1975 pour avoir un effet marqué sur la recharge sédimentaire. L'incision du lit entre 1975 et 1988, qui précède la mise en place de la vague sédimentaire du cyclone Anne, repose quant à elle sur l'emboîtement des dépôts de 1988 dans ceux de 1975. Elle traduit bien par ailleurs les effets de la réglementation minière.

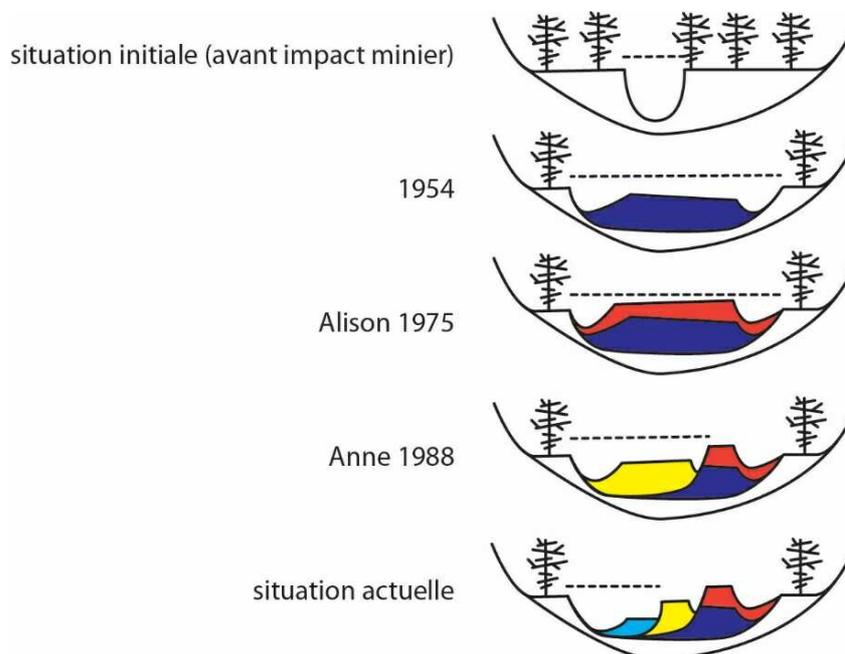


Figure 77 : Mise en place schématique des vagues sédimentaires successives de la Néburu ; le trait discontinu représente l'extension latérale de la bande active

Cette reconstitution historique montre bien que l'exploitation minière s'est traduite par la formation de puissantes nappes sédimentaires dont l'essentiel du volume est encore stocké dans la plaine alluviale de la Néburu. L'estimation basse du volume stocké sur les trois derniers kilomètres du cours d'eau, en prenant

comme niveau de base l'altitude moyenne du lit actif actuel, comme sommet le profil en long reconstitué de 1975, et comme largeur celle de la bande active des années 1970 (avec un profil de forme rectangulaire simple) donne un chiffre de 830 000 m³. Il est fort probable que le niveau actuel du lit soit encore surélevé par rapport à la situation initiale avant impact, et ce chiffre doit donc être considéré comme un minimum. Si on le compare avec l'estimation des stériles produits dans le bassin de la Néburu depuis 1975, évalué à 2 Mm³ (cf. § 3.4) il apparaît que la moitié des apports miniers se sont déposés dans la plaine alluviale de la Néburu ; l'autre moitié est donc restée piégée sur les versants, sous forme de talus d'éboulis et de cônes de déjections. Les estimations du déstockage entre 1975 et 1988, puis entre 1988 et 2012, donnent des valeurs de 223 000 et 166 000 m³, soit un cumul de 389 000 m³. Le déstockage des quarante dernières années, qui est donc parvenu jusqu'à la Thio, représente donc moins de la moitié du passif minier stocké dans la plaine alluviale, et seulement 20% des apports miniers reconstitués d'après les archives.

3.3.3. PRINCIPAUX ENSEIGNEMENTS DE L'ANALYSE HISTORIQUE DES CHANGEMENTS FLUVIAUX

- La mise en place des vagues sédimentaires minières (le surengrèvement) dans le bassin versant de la Thio est antérieure aux plus vieilles photos aériennes disponibles (1954) ; les formes fluviales ont donc été impactées par les mines dès la première moitié du 20^e siècle, et les archives photographiques ne permettent pas de visualiser l'apparition des premiers engrèvements (excepté sur la Tomuru, où l'exploitation minière est plus récente).
- Les premières vagues sédimentaires visibles sur les photographies aériennes de 1954 ont été très puissantes ; elles constituent d'ailleurs un paroxysme sur le cours de la Thio en aval et en amont des confluences avec la Nakaré et la Néburu, ainsi que sur la Nakaré. Elles sont sans doute à mettre en relation avec les grands cyclones survenus en mars 1948 et février 1951, qui ont touché l'ensemble de la Grande Terre ; le fait que ces nappes sédimentaires se mettent en place avant la phase d'accélération des apports miniers, qui intervient à partir de la fin des années 1950 (cf. rapport tâche B2) pose question ; il est possible que les archives minières ne permettent pas de reconstituer fidèlement l'activité minière ancienne (antérieure aux années 1950), car les photos aériennes de 1954 montrent que dès cette période, les apports depuis les sites miniers étaient déjà très marqués dans certains sous bassins versants (Néburu, par exemple).
- Les évolutions morphologiques depuis les années 1970 montrent partout des trajectoires de retour à l'équilibre, plus avancées sur la Thio que sur ses affluents, car ceux-ci étant plus proches des ravines minières actives, ils subissent encore des recharges sédimentaires importantes ; l'ensemble des sites visités montrent des dynamiques d'incision et de rétraction des bandes actives, et ce malgré l'occurrence de nombreuses crues cycloniques récentes (1996, 2013, 2015, 2017) ; ces trajectoires montrent que les apports miniers sont en nette diminution, même si des entrées encore importantes peuvent survenir localement ; des vagues sédimentaires récentes sont par exemple apparues sur la Néburu, notamment en 1988 (cyclone Anne), mais elles n'atteignent plus les niveaux d'exhaussement observés avant 1975.
- L'analyse des terrasses récentes de la Néburu montre que plus de la moitié des apports miniers qui ont recouvert la plaine alluviale sont stockés aujourd'hui sous forme de terrasses alluviales. Ces terrasses sont systématiquement présentes en aval des sites miniers majeurs. Si on ajoute à cela les stocks de versant (cônes de déjections, nappes d'éboulis), on voit que la majorité des apports miniers sont restés piégés à proximité des sources de production (estimé à 80% sur la Néburu) ; ces formes héritées de l'activité minière constituent aujourd'hui des stocks pérennes de sédiments meubles, dont l'érosion devrait se faire de manière très lente et progressive, au gré des divagations latérales, sur une période de temps longue (sans doute plusieurs siècles).
- L'application dans le programme IMMILA aux cas de la Thio et de la Todre de la méthode d'analyse diachronique de la largeur de bandes actives développée dans le programme « Gestion du Passif » donne des résultats significatifs. Il s'agit donc, à nos yeux, d'un bon proxy de l'apport sédimentaire aux rivières drainant les massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. À ce titre, le CNRT pourrait certainement en assurer la promotion pour mieux contraindre la connaissance des dynamiques d'évolution des rivières et bassins versants en d'autres lieux du Pays.

3.4. ÉVOLUTION DES APPORTS MINIERS DANS LE BASSIN VERSANT DE LA THIO

Auteur : M. Garcin (BRGM) – Annexe 4

3.4.1. OBJECTIFS

Les travaux réalisés antérieurement sur l'impact des mines sur les cours d'eau ont visé essentiellement à caractériser et cartographier le surengrèvement des rivières calédoniennes (Bird et al. 1984, Garcin 2009, 2010, Garcin et Lesimple 2013). L'analyse des sources de matériaux issus des mines a consisté le plus souvent à évaluer l'évolution des surfaces mises à nu par les exploitations minières (Fig. 78).

Les évolutions de ces surfaces sont évidemment liées à l'expansion dans le temps de la prospection et des mines. Les sols mis à nus qui en résultent sont autant de sources potentielles de matériaux. En effet, ces sols une fois dénudés ne se végétalisent que très difficilement et sont très sensibles au ruissellement et à l'érosion lors des événements pluvieux.

Ils sont la source d'une grande partie des fines latéritiques qui transitent ensuite dans les cours d'eau pour finir par se sédimenter en partie au niveau des estuaires et dans le lagon (Garcin et al. 2013).

Toutefois, cette évolution de la surface des sols nus n'est pas la seule source des apports miniers. En effet, en Nouvelle-Calédonie, les stériles ont été versés directement dans des décharges localisées dans les versants jusqu'à l'établissement de la loi 1975⁶. En aval immédiat de ces décharges, il est fréquent d'observer, par exemple, de grands cônes alluviaux constitués uniquement de déchets miniers de granulométrie variée. Ces cônes, dont la base atteint les lits des creeks, sont entaillés par les rivières.

Les matériaux sont alors transportés par la rivière à la faveur des crues et redistribués en aval. Ce sont ces apports de stériles qui constituent l'alimentation principale en matériaux d'origine minière, notamment grossière, des creeks et des rivières des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie.

L'approche souvent utilisée (Garcin et al. 2013, Garcin & Lesimple 2013) visant à évaluer les surfaces mises à nus par l'exploitation minière doit être affinée. En effet, les observations de terrain, les retours d'expériences des sociétés minières, les témoignages et les analyses des photographies aériennes et des images satellites démontrent la variété des états des « sols nus » et des processus les affectant.

À titre d'exemple, les pistes de prospections même dans les secteurs où il n'y a pas eu d'exploitation ultérieure, sont autant de surfaces soumises au ruissellement qui constituent des discontinuités à l'origine de zones d'érosion (érosion régressive, lavaka, coulées boueuses ...). Elles peuvent être la source d'une quantité non négligeable de fines latéritiques.

⁶ Loi N°75-663 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux

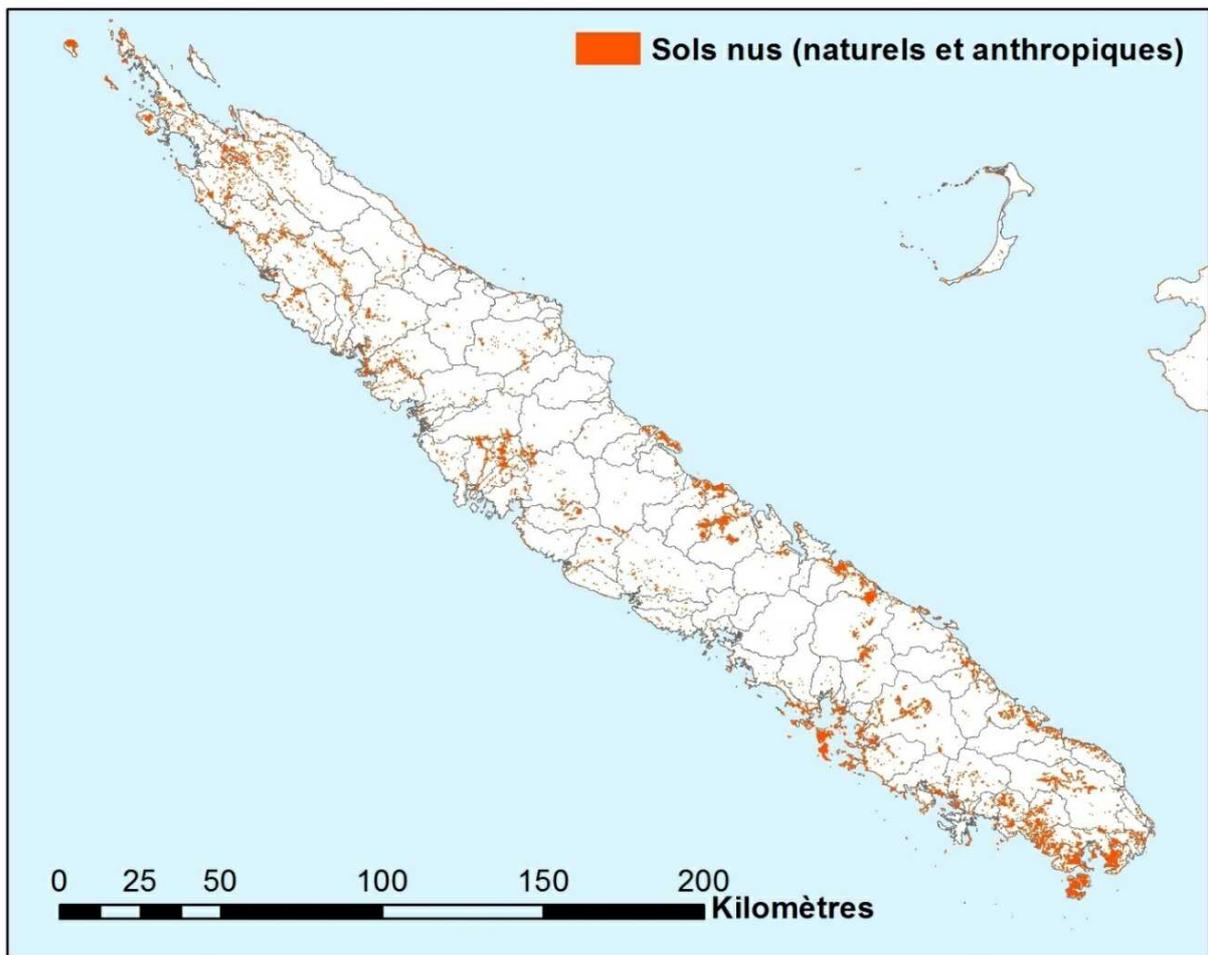


Figure 78 : Répartition des surfaces de sols nus naturels et d'origine minière à l'échelle de la Grande-Terre (Garcin et al. 2013, modifié)

Les différents partenaires du projet CNRT *IMMILA* issus de champ disciplinaires variés (Garcin et al. 2016 ; Allenbach et al. 2016), réalisent des recherches concernant :

- Les impacts de la mine sur les rivières et sur l'environnement au sens large ;
- Les perceptions des populations et des parties-prenantes de ces phénomènes, les attentes et les besoins en termes de remédiation des milieux ;
- Les modalités de transfert des sédiments de la mine au lagon.

Ce dernier thème qui est résolument une approche « *source to sink* » nécessite une évaluation plus approfondie que ce qui a été réalisé jusqu'à présent du terme « *source* ». C'est dans ce cadre qu'une quantification des apports miniers a été proposée et réalisée. Deux approches conjointes ont été réalisées :

- Une quantification des tonnages et volumes mis en décharge ;
- Une évaluation de l'évolution des surfaces de sols nus réalisée selon une typologie des sols nus spécifique.

3.4.2. MÉTHODES

Remarque préliminaire : En accord avec l'esprit des deux programmes lauréats de l'appel à projet du CNRT, la méthodologie qui est présentée ci-après a été développée dans le programme « *Gestion du passif*⁷ » et testée dans IMMILA sur le bassin versant de la Thio

3.4.2.1. Quantification des volumes

L'approche suivie a consisté à quantifier les volumes de stériles extraits à partir des données de production de minerai extrait. Cette approche (tâche A du projet « *Gestion du Passif* ». a été appliquée à l'ensemble du bassin versant de la Thio, mais aussi à l'échelle de ses sous bassins afin de permettre une analyse spatiale fine des impacts de ces apports sur l'évolution des lits des cours d'eau situés en aval

Les tonnages produits par an et par concessions minières sont issus de la base de données de production historique du SMC⁸. Cette base de données contient l'ensemble des tonnages de minerai de nickel produits pour toute la Nouvelle-Calédonie depuis 1904. Les limites des bassins versants sont issues d'une extraction automatique sous SIG à partir du MNT à 10m de résolution de la DITTT⁹. Ces limites ont ensuite été contrôlées et corrigées manuellement quand cela s'est avéré nécessaire puis fusionnées. La méthode se décompose en trois phases (Fig. 79) :

- **Phase 1** : Elle a consisté dans un premier temps à sélectionner toutes les concessions minières présentes dans le bassin versant de la Thio à l'aide du cadastre minier (Fig. 80). Ensuite pour chaque concession, les données ont été traitées afin de fournir une courbe de production annuelle et cumulée de minerai.

À partir du ratio production de stérile par rapport à la production de minerai, une courbe de production annuelle et cumulée de stérile a été réalisée. Le ratio minerai/stériles est variable dans le temps et est celui utilisés par le SMC (Tabl. 16). Ce ratio qui peut paraître relativement simpliste est, pour chaque période, une moyenne représentative de l'ensemble des mines de Nouvelle-Calédonie et ne tient pas compte des spécificités propres à chaque concession.

Son évolution dans le temps est le reflet de l'évolution des teneurs en minerai des roches exploitées et des technologies mises en œuvre. Nous avons considéré que jusqu'à la mise en œuvre du code minier de 1975 la totalité des stériles étaient mis en décharge. Ce postulat est une simplification dans le sens où une partie des stériles ont probablement été utilisés par les compagnies minières pour réaliser des plateformes, des remblais etc. autour des mines et des prospections.

Il n'en reste pas moins vrai que cette part de stérile qui n'a pas été versée directement en décharge a quand même, du fait, à l'époque, de l'absence de gestion des eaux et des flux sédimentaires, contribué directement aux apports dans les creeks.

- **Phase 2** : Une fois les concessions minières sélectionnées, les anciennes décharges associées à chaque concession ont été recherchées (sur les photographies aériennes), puis chaque décharge a été assignée au sous bassin versant dans lequel elle se jette. Il a été alors possible d'associer directement à toutes les concessions un bassin-versant de décharge.
- **Phase 3** : Une fois les deux phases précédentes réalisées, on peut consolider à l'échelle de chaque bassin versant le tonnage de stérile minier qu'il a reçu. Il est alors possible de fournir une courbe annuelle d'apport en stérile et une courbe cumulée. L'évaluation des volumes de stériles peut alors être effectuée. La somme des apports reçus par tous les sous bassins constitue l'apport en stériles à l'échelle du bassin versant.

⁷ *Gestion du passif*

⁸ *Service Mines et Carrières (DIMENC)*

⁹ *Direction Des Infrastructures de la Topographie et des Transport Terrestres de Nouvelle-Calédonie*

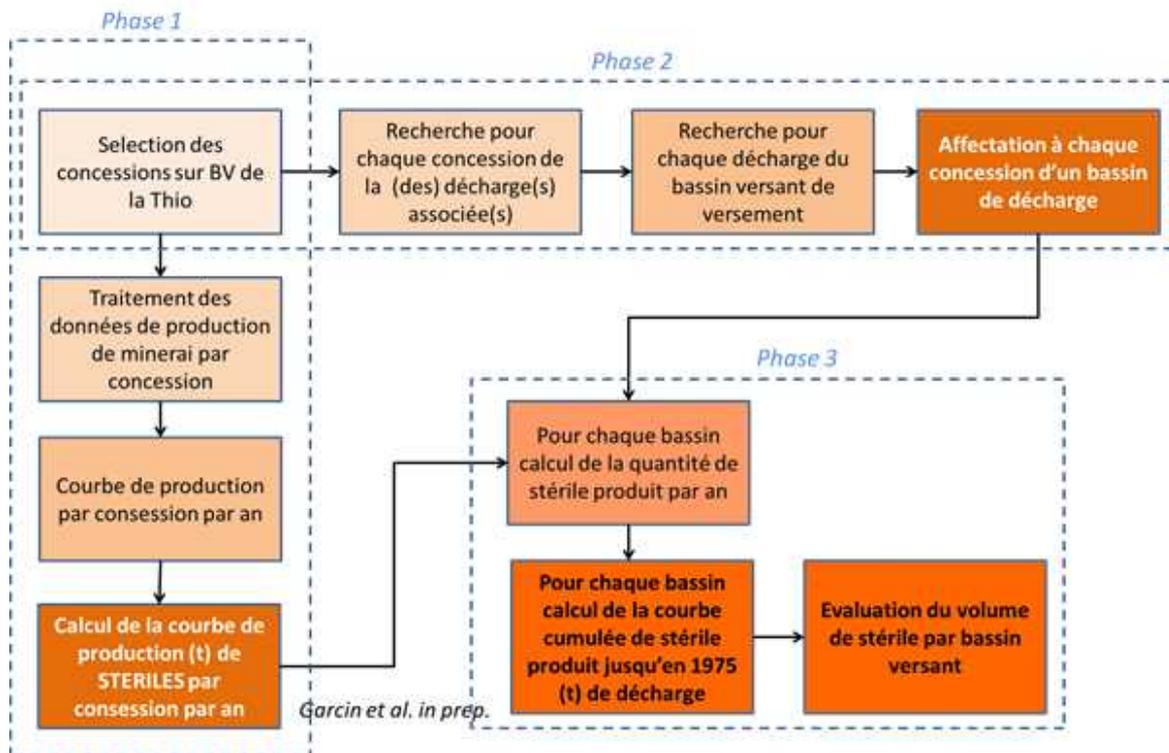


Figure 79 : Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volume de stérile minier mis en décharge

Tableau 16 : Ratio entre la quantité de minerai et la quantité de stérile produit (source : DIMENC/SMC)

Période	Ratio
de l'origine à 1920	1
de 1921 à 1950	1.5
de 1951 à 1975	2
de 1976 à 2001	3.5

3.4.2.2. Évolution des surfaces

Les observations de terrain, les retours d'expériences des sociétés minières, les témoignages et les analyses des photographies aériennes et des images satellites démontrent la variété des types de « sols nus » et des processus qui les affectent. La typologie réalisée comprend deux familles et cinq types. Cette typologie à deux niveaux n'est pas basée uniquement sur la cause de la dénudation des sols (naturelle, anthropique, résultant de l'exploitation minière sens strict, la création de pistes etc.), mais aussi sur un critère de fourniture avérée de matériaux.

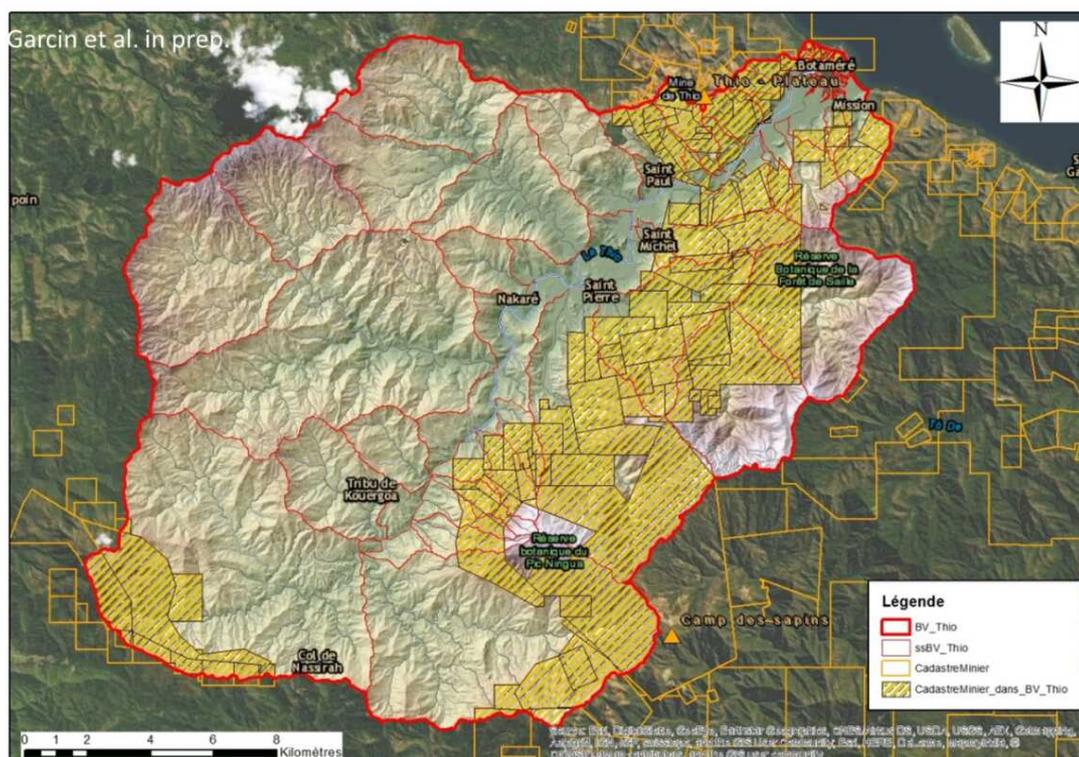


Figure 80 : Les sous-bassins versants et le cadastre minier du bassin de la Thio

La première famille comprend les surfaces dont on sait, soit par contrôle terrain soit par interprétation de photographies aériennes ou d'images satellites, qu'elles sont en érosion et produisent des matériaux de toutes les classes granulométriques. Nous avons nommé ces surfaces « Zones Productives », elles sont soit d'origine naturelle soit d'origine anthropique. Trois types de « Zones Productives » sont distingués (Tableau 17) :

- Zone d'érosion naturelle (Figure 81 a, b, c, d) ;
- Zone de décharge minière (Figure 82) ;
- Zone d'érosion sur mine où les morphologies indiquent clairement que des érosions significatives sont en cours (Figure 83).

La seconde famille « Zones Actives » correspond à des sols nus dont l'origine est anthropique. Les observations démontrent que les ruissellements qu'elles subissent contribuent à un apport essentiellement en particules fines latéritiques dans les cours d'eau. Elles ne montrent pas toutefois par télédétection ou photo-interprétation, de formes d'érosion suffisamment importantes pour être détectables et interprétables (résolution et qualité des images insuffisantes). Nous avons distingué deux types principaux dans cette famille :

- Les zones d'exploitations (Fig. 82 et Fig. 83 a) ;
- Les pistes minières (Fig. 83 b et c).

Par contre, quand des érosions notables ou des déstabilisations de versants induites par ces pistes ou dans les zones d'exploitation sont détectées, elles ont été assignées au type « zone d'érosion sur mine » de la première famille.

Une fois cette typologie établie, une photo-interprétation de trois campagnes de photographies aériennes a été réalisée. Les dates qui ont été traitées sont 1954, 1976 et 2008. Les deux premières couvertures de photographies aériennes ont été géoréférencées (Gastaldi 2016) en veillant à la précision du calage même dans les zones montagneuses tout en conservant une qualité d'image suffisante pour être interprétée. La cartographie des différentes surfaces a été réalisée selon la typologie présentée précédemment. Les pistes ont été saisies sous forme de ligne puis transformées en polygone en leur affectant une largeur standard.

Cette largeur a été évaluée par des mesures sous SIG sur les orthophotographies de la DITTT. Les surfaces de chaque type (Type 1 à 5) ont été calculées pour chaque campagne (1954, 1976, 2008). L'évolution temporelle des surfaces de chaque type a ensuite été restituée puis analysée.

Tableau 17 : Les différents types de surface analysés

Famille	Type	
Zone productive (Apport toute granulométrie)	Érosion naturelle	Type 1
	Décharge minière	Type 2
	Érosion sur mine	Type 3
Zone active (sols nus)	Exploitation	Type 4
	Piste	Type 5

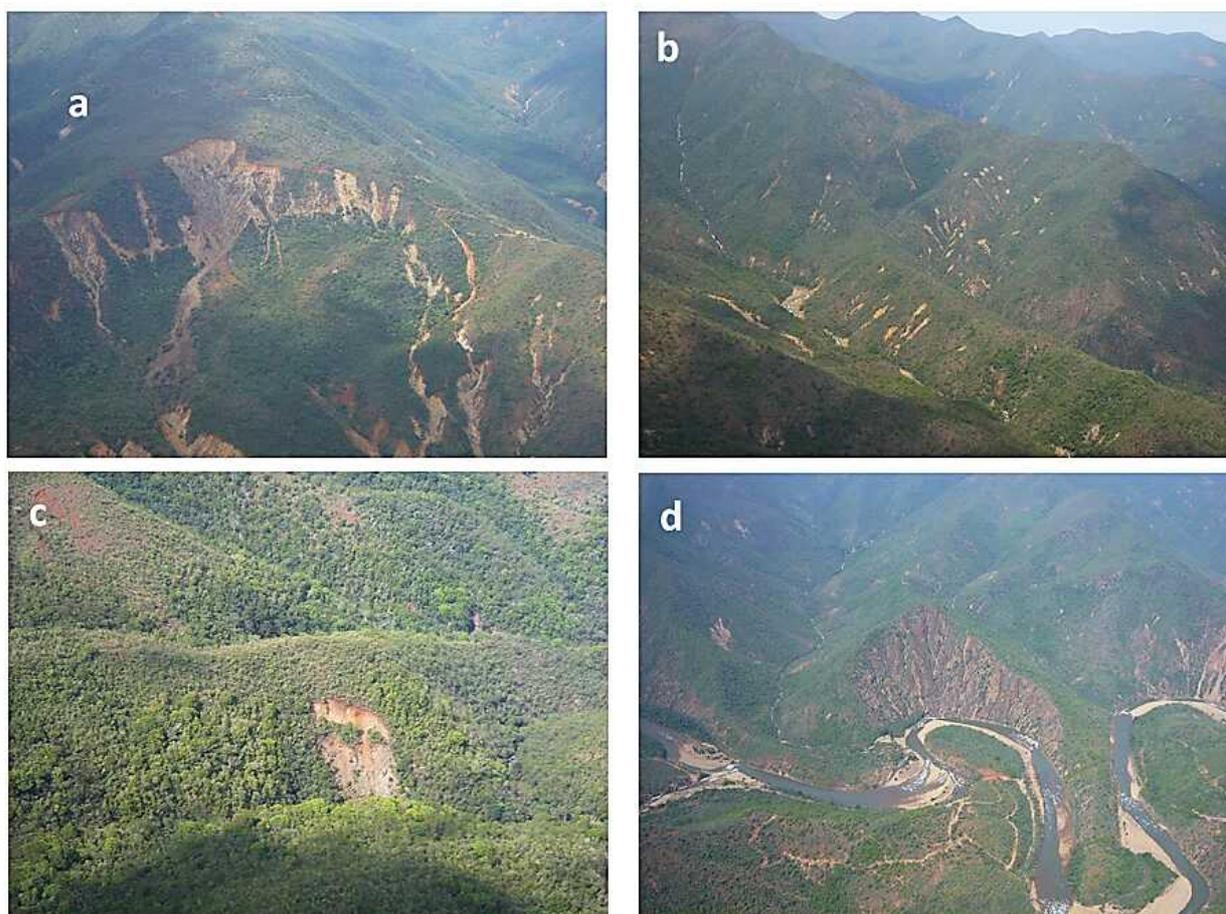


Figure 81 : Différents types de zones productives naturelles de type 1 – a) Grand mouvement de terrain, b et c) Petites loupes d'arrachement, d) Ravinement sur morphologie naturelle



Figure 82 : a) cônes dans le creek Liliane en aval des décharges minières ; b) eaux rouges latéritiques lors d'un orage (Hwa No)



Figure 83 : a) Anciennes décharges, érosion en zone d'exploitation, érosion induites par les pistes, mouvement de terrain et sur-engravement des creeks en contre-bas (Hwa No); b et c) érosion liée aux pistes

3.4.3. RÉSULTATS

3.4.3.1. Quantification des apports solides par décharges minières

Le bassin versant de la Thio couvre 397 km² (Fig. 84). Son altitude moyenne est de 411 m et son altitude maximale est de 1352 m au niveau de la réserve Botaméré du Pic Ningua. Il s'agit donc d'un bassin montagnard qui présente toutefois un contraste entre sa rive droite qui est assez escarpée avec une morphologie plus montagneuse et une altitude moyenne de 477 m, et la rive gauche aux reliefs moins accusés avec une altitude moyenne de 368 m.

Cette différenciation est à mettre en relation avec le contexte géologique. En effet, les lithologies présentes sur le bassin sont très variées sans dominante marquée (Tab. 18 ; Fig. 85). Les massifs miniers exploités sont essentiellement localisés dans la partie médiane orientale (rive droite) et aval du bassin (rive gauche), seule une faible activité minière ancienne a affecté le haut bassin.

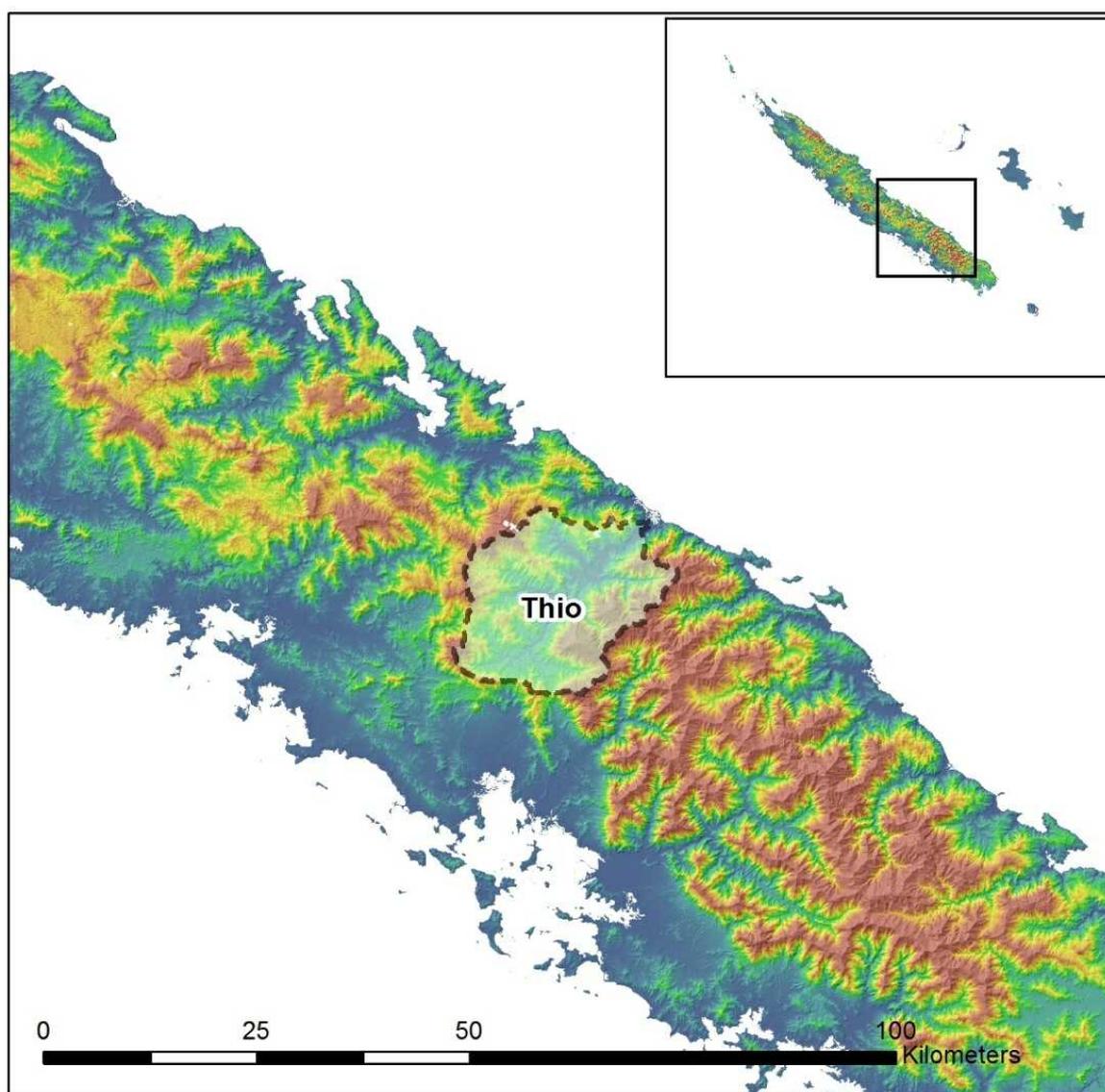


Figure 84 : Localisation du bassin versant de la Thio

Tableau 18 : Pourcentage de surface occupé par les principales lithologies affleurant dans le bassin de la Thio (Les lithologies sur fond rose correspondent au massif minier)

Lithologie	Pourcentage
Cherts	21.64
Latérites	17.64
Péridotites	16.49
Serpentinites	9.74
Grès	8.62
Basaltes, dolérites et gabbros	5.99
Polymétamorphiques	5.41
Alluvions	4.37
Brèches	3.22
Argilites	2.17
Siltites	1.68
Hazburgites	1.11

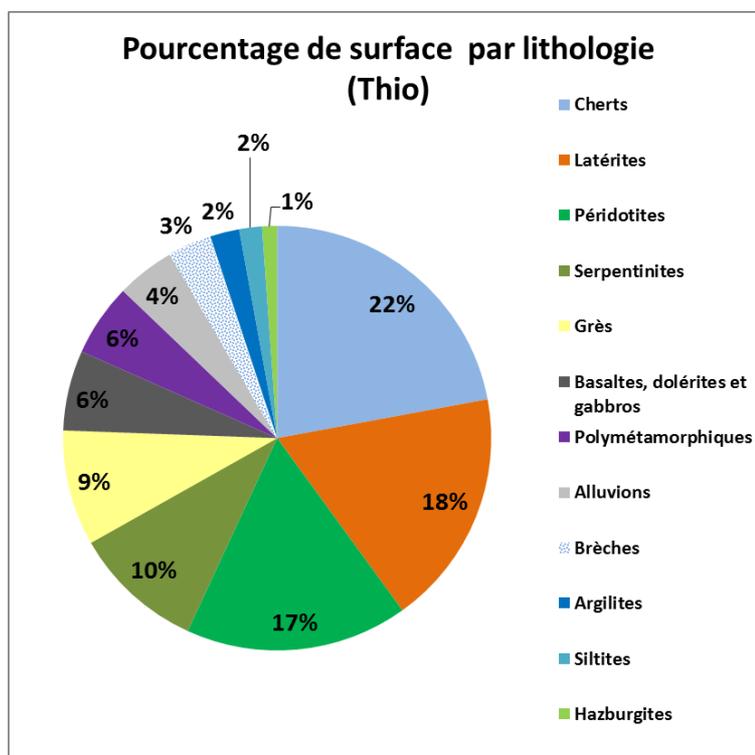


Figure 85 : Pourcentage de surface par lithologie du bassin de la Thio

L'évaluation des tonnages de stériles produits par an et par sous bassin est présentée dans la figure 86. On y remarque :

- Les pics de production de stériles qui se situent entre les années 50 et le milieu des années 70 correspondant au boom du nickel postérieur à la seconde guerre mondiale ;
- La forte disparité temporelle des pics de production de stériles en fonction des bassins versants en lien avec la découverte de gisements, leur rentabilité et les fluctuations de la demande mondiale en nickel ;
- Des apports en stériles très précoces (dès le début du XXème siècle et surtout entre les années 20 et la seconde guerre mondiale) dans certains bassins versants historiques de l'exploitation du nickel. Les tonnages de stériles de ces périodes anciennes sont beaucoup moins importants que ceux de la période 1950-1970, mais n'en restent pas moins significatifs.

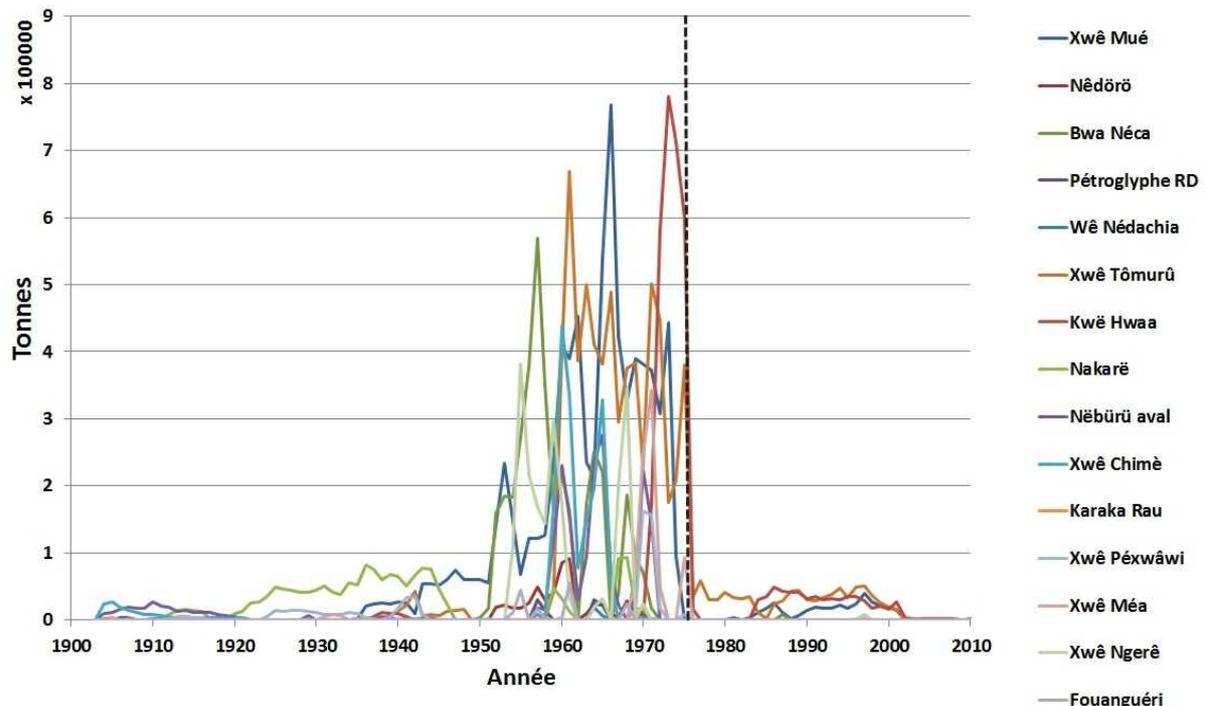


Figure 86 : Tonnage de stériles produit dans les sous-bassins versants de la Thio (la ligne verticale en tiret violet correspond à l'année 1975, date de la mise en œuvre du code minier interdisant la mise en décharge des stériles)

La figure 87 présente la courbe cumulée du tonnage de stérile par grand sous bassins. La droite en tirets correspond à l'année 1975, année de l'arrêt de la mise en décharge. La valeur totale du tonnage de stérile mis en décharge par sous bassin est fournie par l'intersection entre la courbe cumulée et le tiret représentant l'année 1975.

Cette figure montre la variabilité de la quantité de stériles mis en décharge selon le bassin versant, les valeurs s'échelonnant **entre 500 000 tonnes et près de 8 millions de tonnes**.

On y remarque que l'activité sur les bassins de la Neburu et de la Nakaré est beaucoup plus précoce que celle des bassins plus à l'aval tel que ceux des creeks Tomuru, Bwa Néca etc.

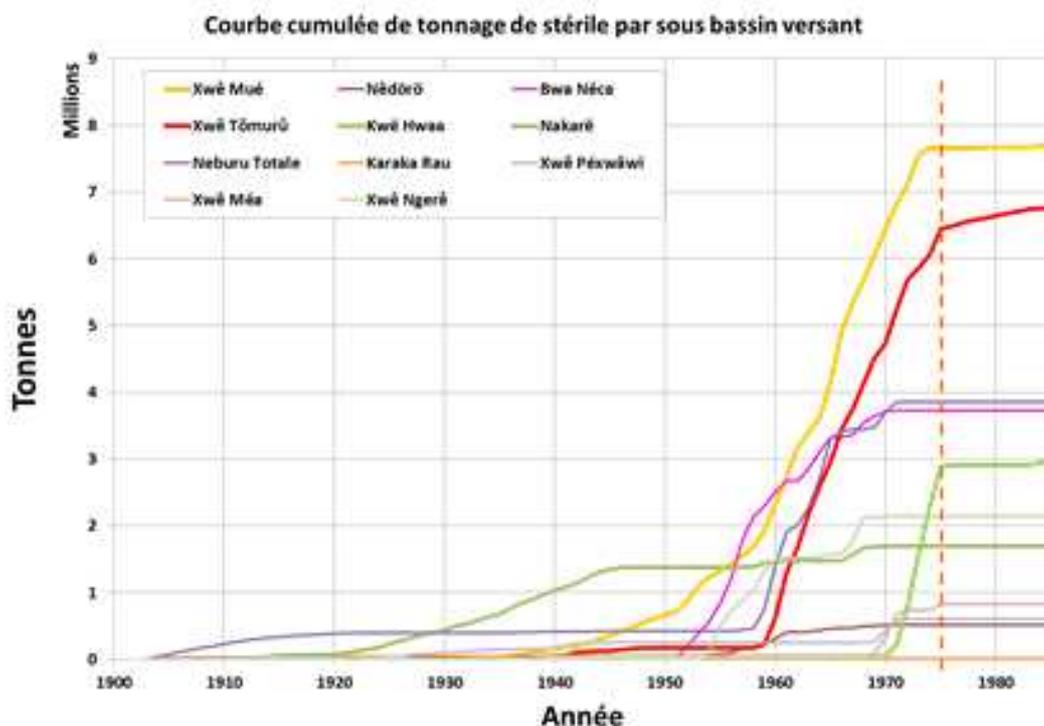


Figure 87 : Courbes cumulées de tonnage de stérile (en millions de tonnes) par sous bassin versant de la Thio

Pour l'ensemble du bassin de la Thio (Figure 88), la **quantité de stérile mis en décharge dépasse les 30 millions de tonnes** en considérant l'application immédiate du code minier de 1975 soit un **volume de stérile supérieur à 10 millions de m³**.

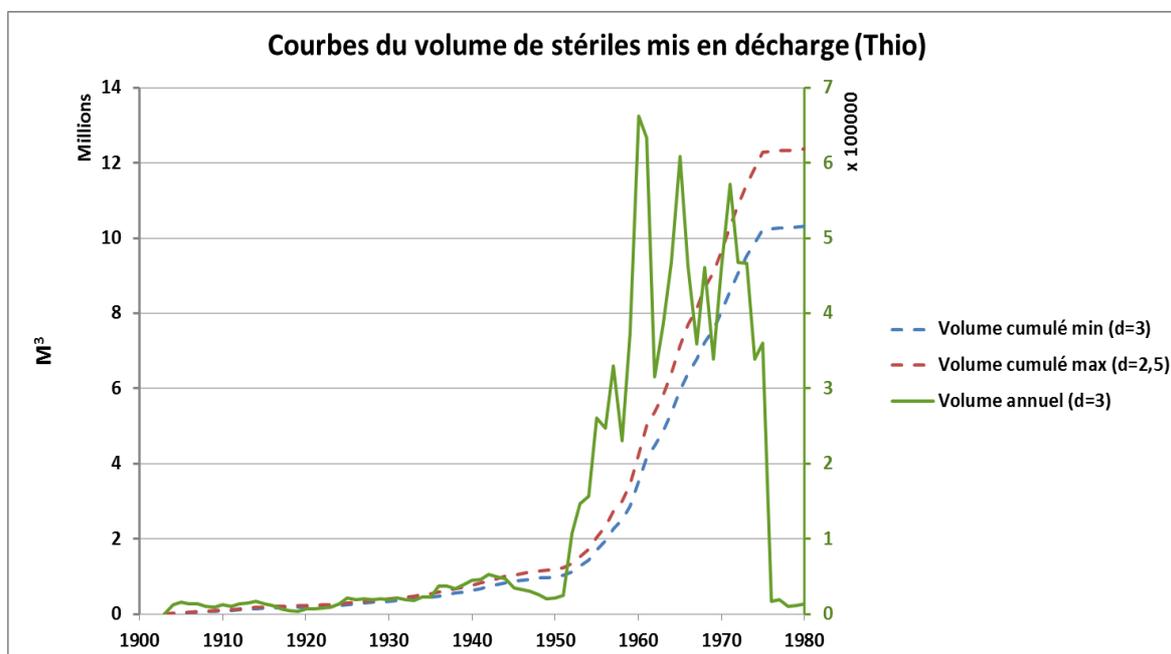


Figure 88 : Évaluation du volume de stériles mis en décharge sur l'ensemble du bassin versant de la Thio

La figure 89 présente une carte des tonnages de stérile mis en décharge par sous bassin. On y note la forte disparité spatiale des apports en stériles avec des bassins fortement affectés comme ceux du Creek Tomuru, de la Xwe Mue, de la Nakaré et de la Kwe Whaa.

La figure 90 présente une carte des apports spécifiques, c'est-à-dire le tonnage de stérile rapporté à la surface du bassin versant (tonnes/hectares). L'apport spécifique permet d'avoir une représentation de

l'intensité de la perturbation en apport solide subit par le bassin versant : plus l'apport spécifique est élevé plus la perturbation pour le bassin considéré est forte. Par rapport à la carte de la figure 89, la hiérarchie est bousculée. En effet, les grands bassins qui ont pourtant subi des apports importants (Néburu, Xwe Hwaa par exemple) sont beaucoup moins impactés proportionnellement que les bassins versants de petite taille.

Les petits bassins de rive droite de la Thio aval apparaissent comme les plus affectés (Tomuru, Bwa Néca, Xwe Mué), ce qui concorde avec les observations de terrain. De petits bassins versants plus à l'amont, où l'apport de stériles en décharge paraissait relativement modéré tels que ceux de Xwe Méa et Xwe Pexwawi sont eux aussi, selon ce critère, fortement perturbés, ce qui est là aussi confirmé par les observations de terrain.

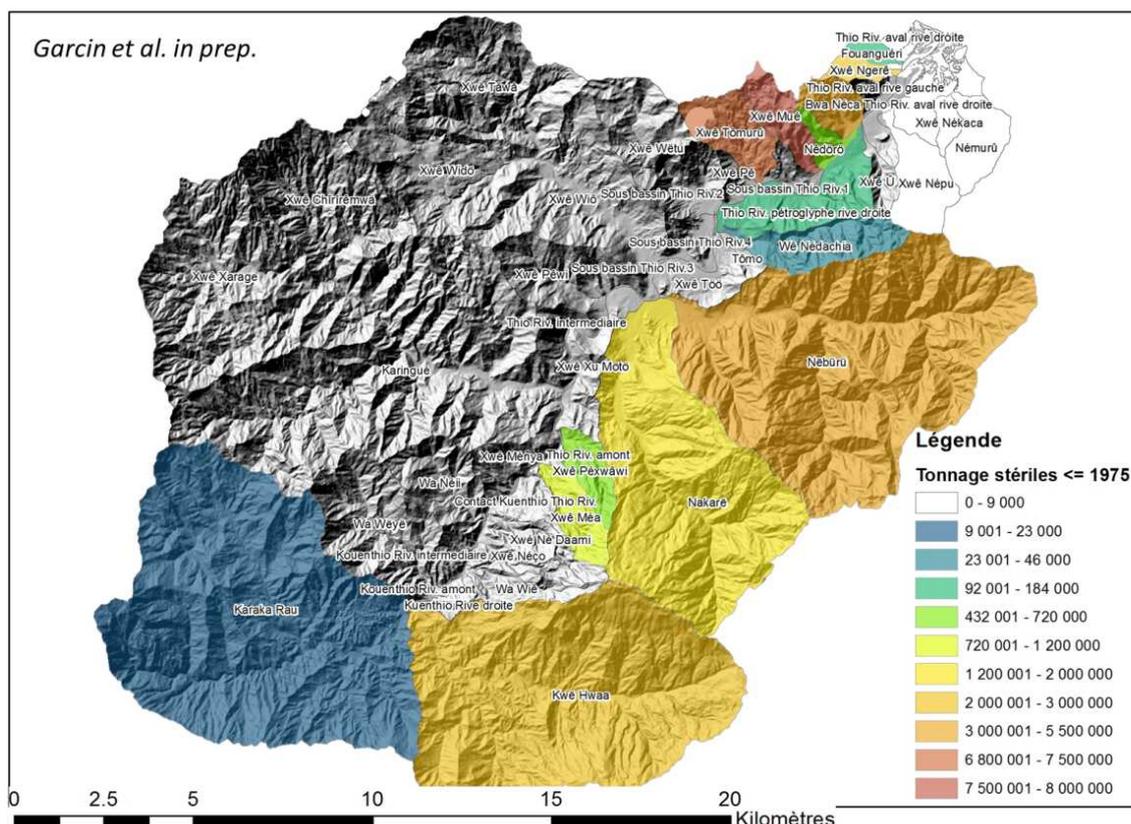


Figure 89 : Tonnage de stérile total mis en décharge par bassin versant

Les profils en long de la Thio et des rivières drainant les bassins affectés par des apports en stériles ont été réalisés à l'aide du MNT de la DITTT à 10m et des tracés hydrographiques (source : DITTT). Les distances à l'estuaire ont été portées le long du profil de la Thio. Les distances portées sur les profils des affluents correspondent aux distances par rapport à la confluence avec la Thio.

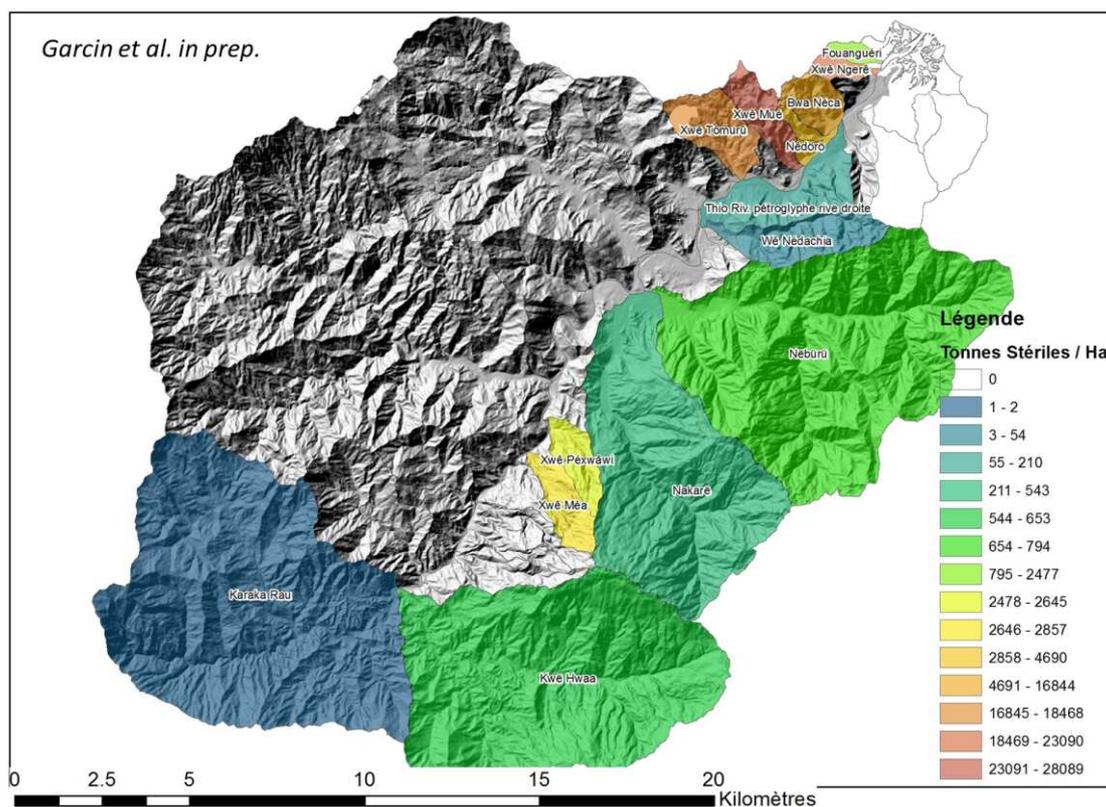


Figure 90 : Apport spécifique total de stérile mis en décharge en tonnes/hectare par bassin versant

Ces profils présentés dans la figure 91 sont très variés. Le profil de la Thio est très penté entre 40 km et 38,5 km, puis diminue rapidement pour avoir entre 33 km et 25 km une pente faible. Ensuite, une rupture de pente y est observable et correspond au segment où la Thio limite en rive droite la nappe des péridotites et en rive gauche l'unité de Thio (cherts, argilites, silts et grès volcanoclastiques). C'est dans cette partie plus pentue que viennent confluer les creeks Pexwawi et Méa dont l'amont est à plus de 900m d'altitude et les pentes très fortes largement supérieures à celle de la Thio à ce niveau. C'est en aval de la rupture de pente vers le 14 km, que la Thio reçoit la Nakaré et la Néburu. Ces deux cours d'eau, bien qu'en apparence similaires, montrent des profils en long très différents. Le profil de la Nakaré dans sa moitié aval ne montre pas de rupture de pente contrairement à celui de la Néburu. Ces deux cours d'eau ont toutefois des profils en long plus matures que ceux des creek Pexwawi et Méa et offrent une pente quasi-constante de l'amont jusqu'à leur confluence avec la Thio.

Les profils des creeks de rive gauche à l'aval de la Thio (Tomuru, Bwe Néca etc.) quant à eux sont très tendus, leurs raccords avec le profil de la Thio sont très brutaux.

Le positionnement et la courbe du tonnage des apports cumulés en stériles portés sur les profils en long (Fig. 91) montrent :

- Que les apports par les décharges minières sont très diversement répartis par rapport à la structure du réseau hydrographique. Certains apports sont très distaux comme ceux de la Kwe Hwaa à plus de 40 km de l'embouchure de la Thio, d'autres, notamment dans le bassin médian, sont à une distance comprise entre 17 et 24 km de l'embouchure alors qu'enfin certains sont très proches de 1 km à 7 km seulement.

Il en résulte que le temps de transfert des sédiments pour rejoindre un site particulier sera plus ou moins long en fonction de la position des rejets dans l'hydrosystème. Même si la mise en décharge sur deux sites est synchrone, compte tenu de cette répartition spatiale hétérogène, il n'y aura pas synchronisme des arrivées de matériaux à un endroit donné, mais au contraire un déphasage temporel ;

- Que la localisation des apports issus des décharges par rapport au profil en long de chaque cours d'eau est elle aussi diversement placée. Ainsi, certains apports se font dans le haut des profils (creeks aval RG, Kwe Whaa), d'autres en partie médiane (e.g. Xwé Méa, Pexwawi,

Nakaré) alors que certains sont plutôt dans le bas des profils (Néburu). Ainsi, certains cours d'eau sont ou seront affectés sur l'ensemble de leur lit alors que certains autres ne le seront qu'en partie médiane ou même aval. Le surengrèvement qui en découle affectera donc diversement l'ensemble des lits ;

- Qu'en fonction du paramètre précédent et de la pente générale du profil, les transferts de matériaux et la réaction des lits (sur-engrèvement, puis déstockage) seront plus ou moins rapides.

Dans le cas où le profil du cours d'eau est très raide (comme pour les creeks aval en rive gauche de la Thio), le sur-engrèvement tout comme son déstockage ultérieur se produira rapidement après l'apport en matériaux. La forte pente des lits favorisera donc un transit rapide.

Par contre, la rupture de pente très forte qui existe entre les pentes aval de ce type de creek et la pente du lit de la Thio favorisera le dépôt en bas de profil, la reprise et le transport vers l'aval de ces sédiments par la Thio seront beaucoup plus lents compte-tenu de la capacité de transport plus faible en matériaux grossier de la Thio ;

- Que les apports en parties médianes des profils dans les secteurs où les pentes des cours d'eau sont modérées (Xwé Méa, Pexwawi, Nakaré pro parte) conduiront dans certains cas à un stockage au moins temporaire de la fraction plus grossière des apports dans les segments à plus faibles pentes du lit.

Les dépôts auront tendance à s'étaler en aval des cônes issus des décharges et à sur-engraver les secteurs immédiatement en aval. Les apports en matériaux auront tendance à sur-engraver la rivière dont le lit et la bande active s'élargiront lors de la phase paroxysmale des apports. Ultérieurement, une partie du stock sédimentaire pourra être transportée en aval lors des crues les plus importantes sans toutefois que l'ensemble des sédiments soient remobilisés.

Il en résultera des nouvelles terrasses dont le toit correspond à la phase paroxysmale de l'engrèvement. Ces terrasses dont les galets sont patinés, ne sont que très partiellement végétalisées. Elles sont en voie de fixation et ne participent plus au bilan sédimentaire ; seul l'occurrence de débit exceptionnels induits par de fortes pluies lors de cyclones majeurs ou de très fortes dépressions tropicales pourraient être en mesure de les remobiliser.

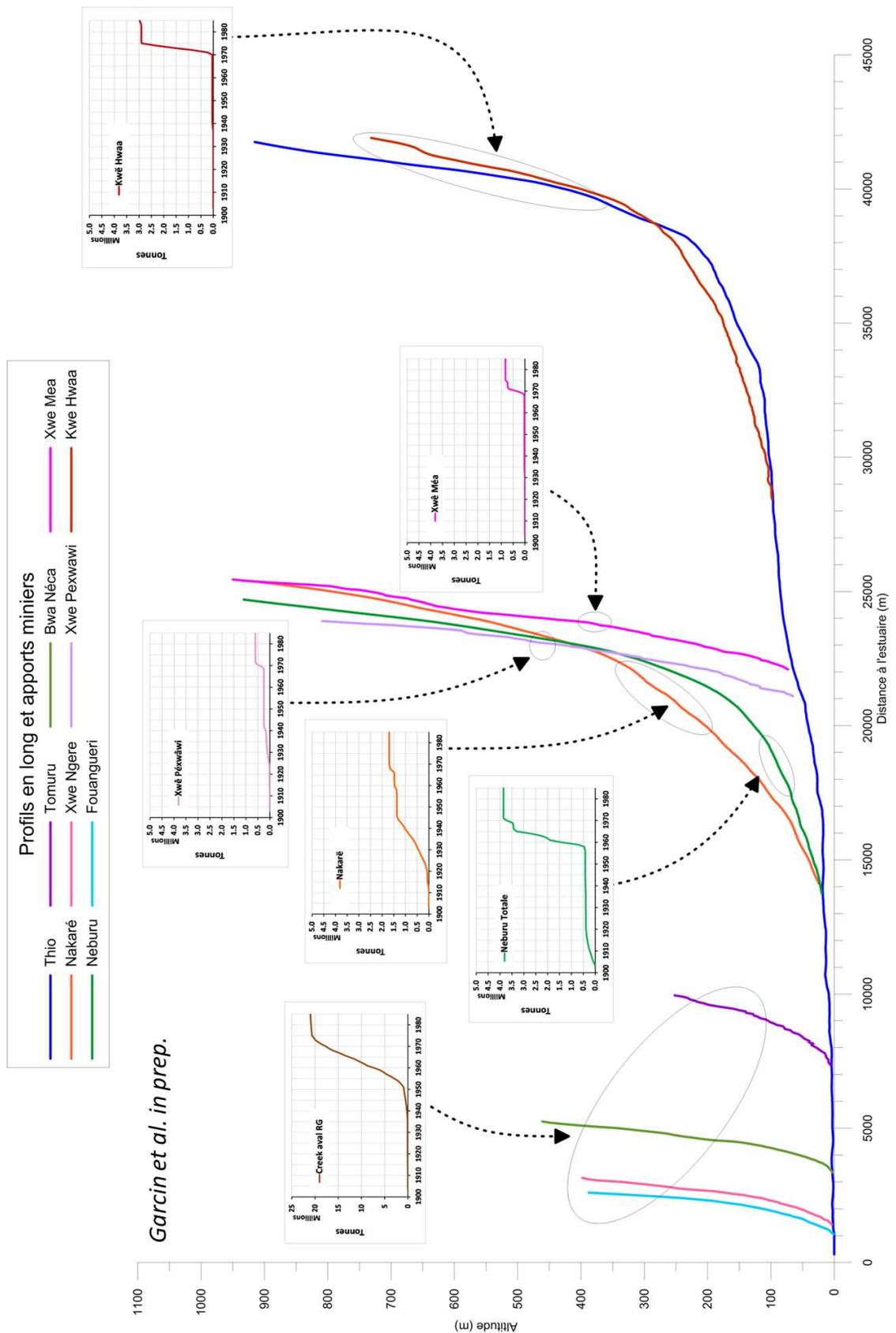


Figure 91 : Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau

Nous avons regroupé les apports miniers selon leur position dans le bassin versant amont, médian et aval (Figure 92) afin de mieux visualiser et caractériser leurs contributions respectives.

La courbe des tonnages annuels montre que l'essentiel des pics de production se situe comme évoqué plus haut des années 50 au milieu des années 70. La courbe des tonnages cumulés met en évidence le déphasage entre des apports du bassin médian qui sont nettement plus précoces que ceux du bassin aval et amont. Dans le bassin médian, les apports s'opèrent du début du XXème siècle jusqu'à la seconde guerre mondiale puis reprennent de la fin des années 50 jusqu'au milieu des années 70. La zone aval est contributive essentiellement de 1950 jusqu'à milieu des années 70 tandis que la zone amont montre une courte mais intense activité durant la première moitié des années 70. Ce graphique montre qu'en termes quantitatifs c'est le bassin aval qui produit le plus de stériles (20 millions de tonnes) puis le bassin médian (un peu plus de 5 millions de tonnes) tandis que l'apport tardif bassin amont est légèrement inférieur à 5 millions de tonnes.

Garcin et al. in prep.

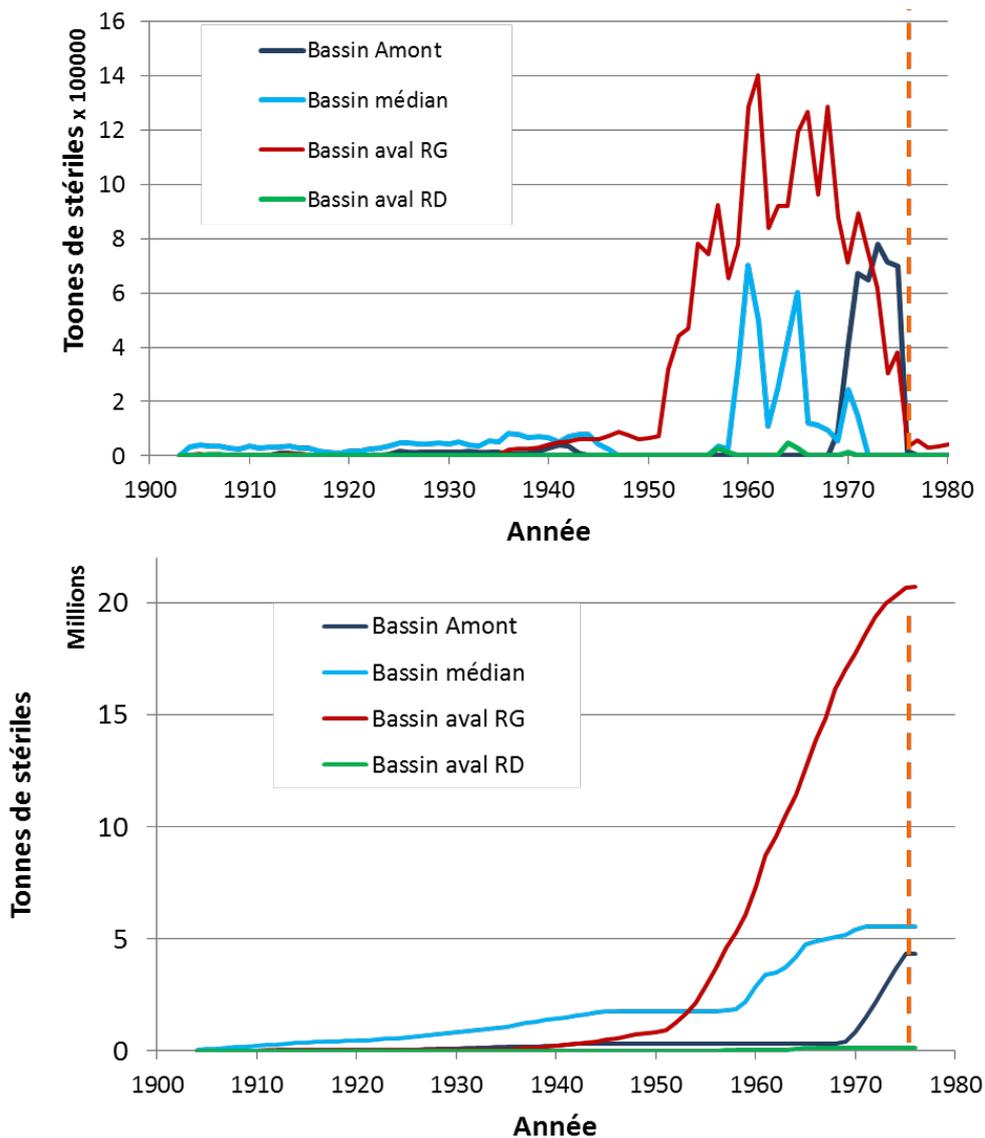


Figure 92 : Tonnage des apports miniers issus des décharges regroupées selon leur localisation dans le bassin amont, médian ou aval de la Thio (en haut tonnage annuel, en bas tonnage cumulé)

3.4.3.2. Quantification des surfaces soumises à l'érosion

3.4.3.2.1. Évolution de la surface des zones productives

Les cartographies des deux familles de surfaces (zones productives et zones actives) réalisées en 1954, 1976 et 2008 sont présentées dans la figure 93.

En 1954, les surfaces de « zones productives » sont de 194 ha, elles passent à 1 388 ha en 1976 et se stabilisent autour de 1 427 ha en 1988 (Figure 94).

Dans le détail, les trois catégories qui constituent ces zones productives ont des évolutions contrastées. Les surfaces d'érosion naturelles sont de l'ordre de 59 ha en 1954, elles augmentent et passent à 71 ha en 1976 (facteur 1.2) puis 76 ha en 2008. Nous constatons donc une augmentation de 20% de la surface des érosions naturelles entre 1954 et 1976 dont les causes restent à déterminer. Il est probable que cette augmentation des surfaces soumises à l'érosion naturelle résulte d'événements météorologiques (tel que le cyclone Alison) ayant affecté ce secteur et qui auraient pu initier de nouveaux mouvements de terrain ou réactiver les anciens. Il est aussi possible que cette augmentation soit en partie liée à des biais d'interprétation et qu'une partie de ces surfaces en érosion résulteraient indirectement d'activités humaines. En revanche, entre 1976 et 2008, l'augmentation de ces surfaces est faible.

La surface des décharges minières quant à elle passe de 110 ha en 1954 à 218 ha en 1976. Ce doublement des surfaces des décharges est en accord avec le développement des mines et de leur production entre ces deux périodes. Inversement, la surface des décharges entre 1976 et 2008 diminue très légèrement 218 ha à 211 ha. Ceci s'explique d'une part par l'application du code minier de 1975 qui interdit la création de nouvelle décharge et par la végétalisation partielle voir marginale de certaines d'entre-elles (Gastaldi, 2016).

3.4.3.2.2. Évolution de la surface des zones actives

Concernant les surfaces minières en érosion, nous notons leur très forte augmentation entre 1954 et 1976. Elles passent de 25 ha à 104 ha ce qui est en lien avec le développement des exploitations (cf. paragraphe suivant). Entre 1976 et 2008, elles subissent une légère diminution à mettre en relation avec une meilleure gestion des sites et l'application du code minier.

En ce qui concerne la seconde famille dite « zones actives » nous notons une très forte augmentation de la surface des zones d'exploitation entre 1954 et 1976 qui passe de 233 ha à 775 ha (facteur 3,3) puis une augmentation faible entre 1976 et 2008 qui passe à 831 ha.

Dans le même temps, la surface occupée par les pistes minières qui était de seulement 44 ha en 1954 passe à 613 ha en 1976 (facteur proche de 14) et régresse légèrement en 2008. Les pistes ne représentaient que 15,8% des surfaces actives (somme des surfaces des exploitations et pistes) en 1954 alors qu'elles représentent 44,2% de ces mêmes surfaces actives en 1976 puis 41,7% en 2008. Cela indique que l'augmentation des surfaces de pistes est proportionnellement beaucoup plus importante que celle des surfaces d'exploitation. La contribution des pistes à l'apport de fines par ruissellement suit donc potentiellement la même tendance. Cela paraît d'autant plus important que sur mine, des efforts sont faits pour gérer les eaux d'écoulement, par contre les pistes, notamment les pistes anciennes qui ne sont plus utilisées, ne sont pas nécessairement traitées.

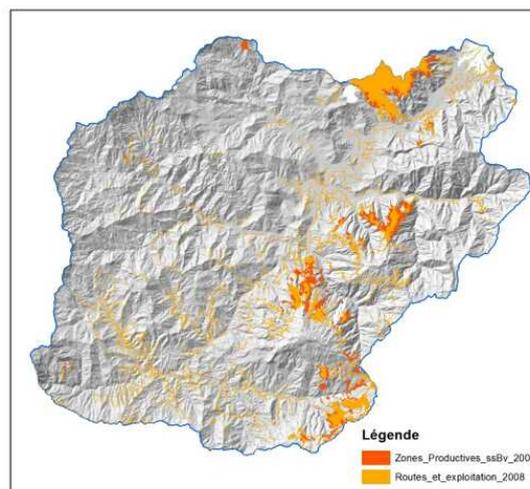
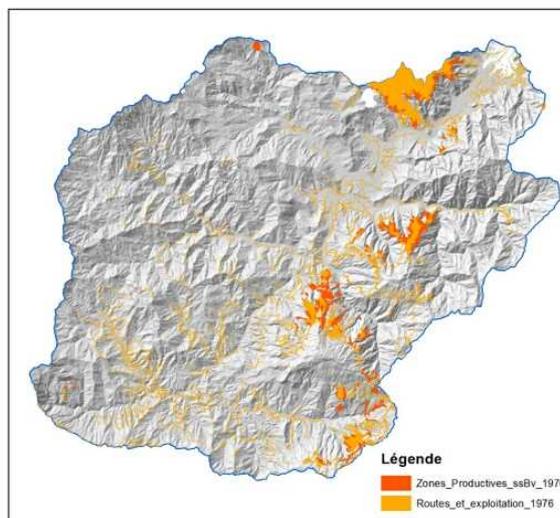
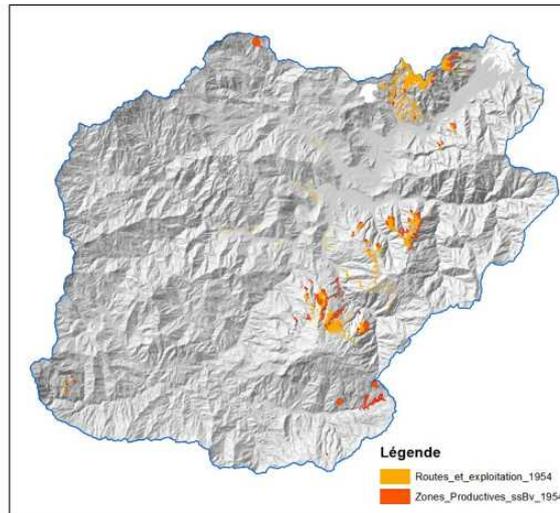


Figure 93 : Cartographie des surfaces des « Zones Productrices » et des « Zones Actives » sur le bassin versant de la Thio avec en haut et de de gauche à droite : 1954, 1976 et en bas 1988

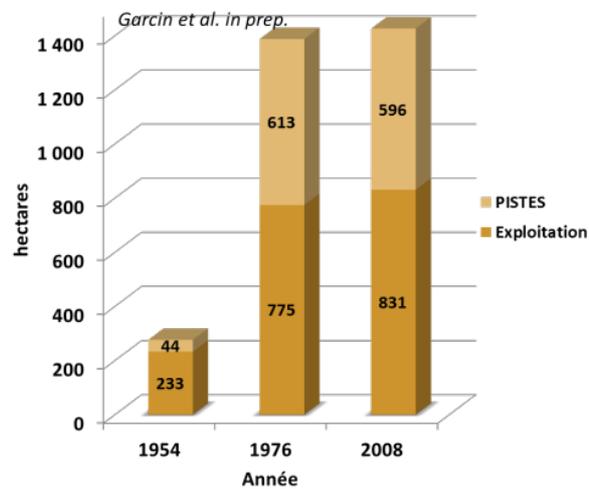
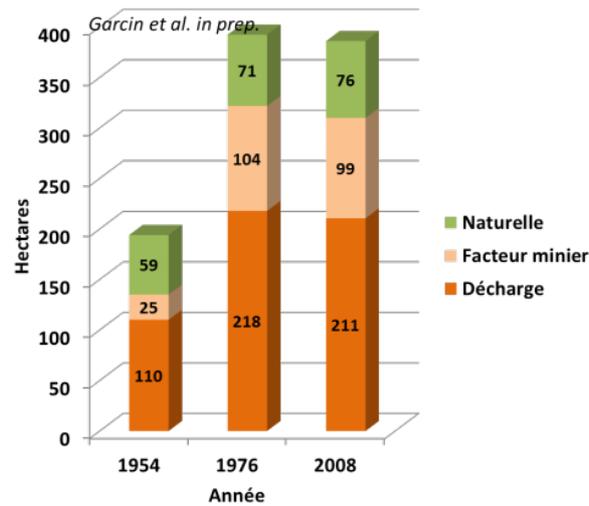
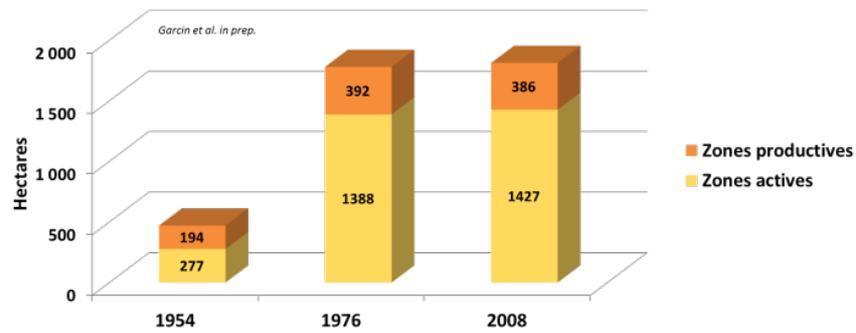


Figure 94 : Évolution des surfaces des « Zones Productives » et « Zones Actives » tous types confondus entre 1954 et 2008 (haut à gauche), détail de l'évolution des « Surfaces Productives » entre 1954 et 2008 (en bas à gauche), détail des « Surfaces Actives » entre 1954 et 2008 (en bas à droite)

3.4.3.2.3. Comparaison de l'évolution des volumes de stériles mis en décharge par rapport à la surface des décharges

Sur l'ensemble du bassin versant de la Thio, entre 1954 et 1976 les surfaces des décharges minières passent de 110 ha à 218 ha soit un doublement de la surface. Aux mêmes dates, le tonnage de stériles mis en décharges passe de 4,29 millions de tonnes à 30,7 millions de tonnes soit un facteur de 7,15. L'évolution de la surface des décharges minières n'est donc pas représentative de l'apport en matériaux réellement effectué dans le temps. En effet, si l'on prenait comme indicateur l'évolution de la surface des décharges pour calculer l'apport en stériles en utilisant les valeurs de 1954 (4,29 millions de tonnes pour 110 ha) nous obtiendrions en 1976 un tonnage de seulement 8,5 millions de tonnes de stériles à comparer aux 30,7 millions de tonnes réellement mis en décharge.

En conséquence, l'évolution de la surface des décharges ne peut donc pas être considérée comme un indicateur pertinent de la quantité de stérile mis en décharge et donc, comme un indicateur de la source des matériaux grossiers d'origine minière.

3.4.4. DISCUSSION

La méthode de quantification utilisée permet d'évaluer les apports solides issus des décharges minières de manière réaliste à l'échelle d'un bassin versant mais aussi de ses sous bassins. Elle permet d'évaluer les ordres de grandeur des tonnages mais aussi des volumes. Les valeurs obtenues semblent en accord avec les impacts plus ou moins intenses observés sur le terrain et permettent à travers l'évaluation des apports spécifiques (valeurs de tonnage ou de volume ramenés à la surface du bassin versant des creeks et rivières) de classer celles-ci en fonction de l'intensité de la perturbation induite. Toutefois certaines limites de l'approche suivie sont à noter :

- La possibilité que les archives ne contiennent pas toutes les données de la production historique (com. orale SMC), ce qui aboutirait dans ce cas à une sous-évaluation des tonnages de minerai produit et donc de stérile pour certains sous bassins versant. Ces manques concerneraient toutefois plutôt les productions les plus anciennes du début du XXème siècle, périodes où les tonnages produits étaient faibles par rapports à ceux qui ont prévalu à partir des années 60 et surtout 70. La sous-évaluation induite serait donc relativement peu préjudiciable à notre approche.
- Les matériaux mis en décharge jusqu'en 1975 représentent une quantité très importante qui selon les localisations a été plus ou moins concentrée dans le temps. Certaines décharges ont eu des durées d'activité étalées sur plusieurs décennies alors que d'autres ont été en activité durant des périodes beaucoup plus courtes.
- Dès la mise en décharge, les processus d'érosion et de transport ont de façon variable dans le temps (en fonction notamment de la séquence météorologique, de la pluviométrie, de l'occurrence ou non de cyclones et de dépressions tropicales) ou de l'espace aboutit à un déstockage partiel de matériaux qui ont alors participé à l'engrèvement du lit des rivières. En fonction des vitesses d'érosion et de transport de matériaux au niveau des décharges le déstockage de matériaux peut se poursuivre pendant plusieurs décennies.
- Par ailleurs, dans certains cas même si tout le volume de matériaux mis en décharge a été érodé puis transporté en aval, la déstabilisation des versants induite par ces décharges a favorisé la persistance d'une forte érosion sur ces zones. Cette persistance de l'érosion s'effectue aux dépens du massif en place. Ainsi, le secteur anciennement recouvert par la décharge est susceptible de continuer à fournir des apports solides même si tous les déchets miniers ont déjà été érodés.

La méthode d'évaluation des surfaces mises à nu en fonction de leur typologie a permis d'affiner leur rôle dans la fourniture de matériaux. Ces sols nus, comme les pistes par exemple, fournissent plutôt des fines et contribuent de façon continue à l'apport de particules même si leur création est ancienne : tant que les sols restent nus et les écoulements « non gérés », ils continuent à fournir des fines. Il y a donc dans ce cas une persistance des apports et une rémanence des effets de la dénudation des sols.

Alors que pour les déchets miniers, l'évaluation du tonnage et du volume sont les paramètres importants, dans le cas des sols nus, la surface soumise au ruissellement est l'indicateur qui permettra d'évaluer les contributions potentielles en apport de fines.

Les approches présentées dans cette étude permettent d'analyser l'évolution spatio-temporelle du sur-engravement dans les creek et rivières à la lumière des tonnages et volumes fournis par les décharges minières au cours du temps.

De même, l'hypersédimentation des fines au niveau des zones aval (notamment les estuaires, les embouchures et le proche système côtier), peut être analysée en regard de l'évolution des surfaces actives (mines et pistes). Toutefois, la démarche sera moins directe car une partie de la fraction fine est aussi issue des décharges minières et des mouvements de terrain naturels.

Le tableau 19 présente les liens entre les différents types d'impact sédimentaire, leurs sources potentielles et leurs origines. Il en ressort qu'une majorité de ces sources sont d'origine anthropique. Les sources responsables de l'engravement et sur-engravement sont nettement moins nombreuses que celles participant à l'hypersédimentation en fines. Ainsi, le nombre important de sources d'apport en fines à l'échelle d'un bassin versant ne peut pas être attribué à une seule cause.

Tableau 19 : Relation entre les types d'impact, leurs sources potentielles et leurs origines

Type d'impact sédimentaire	Granulométrie dominante	Sources potentielles	Origine
Engravement des lits, sur-engravement,	Grossière à moyenne : blocs, galets, graviers et sables	Mouvements de terrain (type 1)	Naturelle
		Décharges minières	Anthropique
Hypersédimentation estuarienne, Accrétion trait de côte, colmatage, « eaux rouges »	Fine : sables et fines (boues latéritiques)	Érosion sur mines (s.l.)	Anthropique
		Mouvements de terrain (type 1)	Naturelle
		Décharges minières	Anthropique
		Érosion sur mines (s.l.)	Anthropique
		Surfaces mis à nu sur exploitation	Anthropique
		Pistes minières	Anthropique
Sols dénudés par surpâturage (cerf)	Anthropique		
Incendies	Pro parte naturelle (climat) / anthropique		

3.4.5. CONCLUSION

Dans l'objectif d'évaluer et de quantifier les apports solides induits par les mines de nickel en Nouvelle-Calédonie, deux approches méthodologiques ont été mises au point et appliquées :

- Une quantification des volumes de matériaux issus des décharges minières à l'échelle de grands bassins versants calédoniens mais aussi à celle de leurs sous bassins,
- Une quantification des surfaces contributives basée sur une typologie spécifique. Cette typologie distingue les surfaces productrices de fines telles que les pistes, les surfaces dénudées de prospection ou d'exploitation minière et les surfaces de zones productrices de matériaux de granulométrie variée comme les mouvements de terrain, les décharges ou les zones en érosion significatives sur mines.

La première approche d'évaluation des tonnages et volumes de déchets mis en décharge a été appliquée sur le bassin de la Thio. Le tonnage de déchets mis en décharge jusqu'en 1975 est de l'ordre de 30 millions pour la Thio. Dans le détail, les tonnages par sous bassin versant sont très variables dans le temps et l'espace. La localisation des apports au sein des hydrosystèmes est très distribuée et se

produit dans différents secteurs des profils en long. Cette spatialisation des apports tout comme leur asynchronisme explique la complexité des phénomènes de sur-engravement observés notamment sur les sites sous l'influence de plusieurs sources. La position des apports par rapport au profil en long des creeks et rivières conditionnent (tout comme leur séquence temporelle et celle des phénomènes météorologiques), les modalités du transfert de cette charge solide vers l'aval, le stockage de matériaux plus ou moins temporaire dans les lits, les évolutions hydro-géomorphologiques etc. Les intensités des perturbations induites (apport spécifique en t/ha) par ces apports en matériaux sont extrêmement variables d'un sous bassin versant à l'autre. Certains sous bassins sont particulièrement impactés expliquant l'ensemble des désordres constatés et les difficultés rencontrées lors des tentatives de remédiation ou d'aménagement.

La seconde approche consistant à analyser l'évolution temporelle des surfaces des sols nus qui contribuent à l'apport en matériaux notamment en fines, a été appliquée sur le bassin de la Thio. Pour chaque type de sol nu, une analyse de l'évolution de leurs surfaces de 1954 à 2008 a été effectuée. Elle montre que :

- L'évolution des surfaces des décharges minières dans le temps n'est pas représentative des tonnages et des volumes de stériles réellement mis en décharge ; ces surfaces ne peuvent donc être utilisées comme un indicateur pertinent des apports miniers issus des décharges.
- L'évolution temporelle des surfaces des pistes n'est pas proportionnelle à celles des mines et augmente beaucoup plus rapidement. En conséquence, l'augmentation très forte des surfaces de pistes a probablement participé pour une part majeure à l'augmentation des apports en fines à l'échelle du bassin versant. La prise en compte des surfaces de piste est donc primordiale dans toute analyse des apports sédimentaires induit par l'activité minière.
- Une augmentation significative des surfaces des mouvements de terrain se produit entre 1954 et 1976. La cause de cette augmentation de surface sera à rechercher probablement du côté de l'évolution des conditions météorologiques au cours de ces décennies (impact probable du cyclone Allison). Si cette hypothèse était prouvée, ces modifications des conditions météorologiques ont par ailleurs probablement favorisé les érosions des décharges minières et le transfert des déchets miniers dans les lits des rivières. Ces changements météorologiques se sont par ailleurs produits lors des phases paroxysmales des apports de matériaux dans les décharges minières. Cette conjonction expliquerait les évolutions morphologiques très rapides des lits des cours d'eau notamment entre 1971 et 1976.

Les deux méthodes présentées donnent des résultats prometteurs et complémentaires. Elles mériteraient d'être appliquées sur d'autres sites notamment dans le cadre d'études visant à proposer des solutions de remédiation au sur-engravement. Elles permettent de prendre toute la mesure de la perturbation induite par la mise en décharge des déchets miniers jusqu'au milieu des années 70 sur les cours d'eau de Nouvelle-Calédonie et des impacts induits par la dénudation des sols. Enfin, elle permet de hiérarchiser les bassins versants en fonction de l'intensité de la perturbation induite et offre des clés de compréhension de leurs évolutions passées et à venir.

3.5. QUANTIFICATION DES TAUX DE SÉDIMENTATION DANS LA ZONE LITTORALE

Des approches complémentaires ont été mises en œuvre, tant au niveau de la zone terrestre que de la zone marine proximale, afin d'estimer la quantification des taux de sédimentation dans la zone littorale à différents pas de temps à partir d'une analyse interprétative des évolutions morphologiques du delta.

- Une première partie de l'étude est présentée à la section 2. Elle est consacrée à l'étude de l'architecture du système deltaïque présent dans la partie aval du bassin versant de la Thio. Elle a consisté en l'acquisition de profils de sismique réflexion très haute résolution (méthode minisparker et boomer) qui ont fourni les « images acoustiques » du sous-sol marin et estuarien. Préférentiellement axée sur la compréhension de l'évolution sur le « *temps long* », elle n'en contribue pas moins à la connaissance des faits récents et actuels que la géophysique permet d'imager.

Les résultats de la sismique réflexion sont complétés par des sondages à la tarière qui ont été faits pour tenter de caler lithologiquement et chronologiquement les horizons visibles sur les enregistrements sismiques. L'objectif est de mieux contraindre les taux de sédimentation.

- Une seconde partie s'intéresse à l'évolution morphologique du système, de 1900 à aujourd'hui. Elle cible donc la connaissance de la « période récente ». L'étude est basée sur l'analyse des documents bathymétriques anciens et récents, les orthophotos et les images satellites disponibles a pour finalité d'améliorer la compréhension de l'évolution morphologique de l'hydrosystème deltaïque sur la période récente et actuelle.

Ce travail initié par l'UNC avant même le programme *IMMILA* (Allenbach, 2002) a fait l'objet de deux contributions complémentaires, l'une produite par l'IRD et Rouetis R&D dans le cadre du stage de master 2 de A. Leroux (2016) et l'autre, par l'UMR 5600 à travers le stage de master 2 de M. Schneider (2018).

Ce sont les résultats de cette seconde partie qui sont présentés ci-après.

3.5.1. ETUDE DES SYSTÈMES CÔTIERS DES EMBOUCHURES DE LA THIO ET DE LA TODRÉ

Autieurs : O. Navratil, L. Schneider (Univ. Lyon) – Annexe 5

Depuis 1870, le bassin du fleuve Thio (340 km²) joue un rôle important dans l'activité minière du Nickel en Nouvelle-Calédonie. Cette exploitation manuelle a été conduite à petite échelle jusqu'en 1950 environ, et a ensuite explosée avec un pic d'extraction industrielle dans les années 1970 (appelé "boom du nickel"). Dans une zone tropicale sujette aux cyclones (ex. 518mm/jour pour le cyclone Anne en 1988 ; 409 mm sur Thio pour le récent cyclone Cook), cette période d'exploitation a ensuite été associée à une augmentation significative de l'érosion des sols attribuée (1) à la dénudation rapide des surfaces par l'industrie minière, (2) à la production de grandes quantités de sédiments d'extraction de déchets directement déversés sur des pentes raides (jusqu'en 1975) et (3) à la création d'un réseau dense de pistes de prospection minière dès les années 50. Au début des années 80, le delta a été rectifié par des enrochements afin d'exporter rapidement les sédiments vers le lagon, de limiter la sédimentation du delta et son inondation. Cependant, depuis 2013, trois inondations majeures se sont produites dans le delta (deux en 2013, une en 2015) avec d'importantes pertes matérielles pour les gens vivant dans cette zone deltaïque.

L'objectif de cette étude est de mieux comprendre la dynamique de la sédimentation du delta du fleuve Thio et la façon dont elle pourrait influencer l'occurrence des inondations. L'évolution biogéomorphologique du delta a été analysée à la lumière des facteurs climatiques et de l'histoire des activités humaines dans le bassin (activités minières) et dans le delta du fleuve (rectification/enrochements). Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'évolution du trait de côte. Nous avons combiné différentes données pour effectuer une analyse diachronique de 1870 à nos jours : cartes historiques (1870-1900) ; photos aériennes (1954-2017) ; séries chronologiques des précipitations (1900 à nos jours) ; données hydrologiques (1981-2017). Ce travail est issu d'un stage de M2 (Schneider, 2018).

3.5.1.1. Les données utilisées

Dans cette partie, les données à disposition sont présentées, ainsi que la méthode suivie lors de cette étude. Des cartes anciennes et photos aériennes ont été collectées. Les données hydro-météorologiques 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 (*cf.* section analyse pluviométrique).

⊙ **Présentation des cartes anciennes (fin XIX^{ème} siècle)**

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. Elles sont centrées sur la côte ouest principalement. Les cartes représentant la zone d'étude ont donc été triées et elles sont présentées dans le tableau 20. Un code est attribué à chacune pour faciliter leur identification (c1 à c5).

Tableau 20 : Données cartographiques issues des fonds d'archive de la Nouvelle Calédonie

Code de la donnée	Date de création	Zone d'intérêt	Échelle	Source	État de la donnée
c1	1874	Village de Thio	1/2000	Archives territoriales de NC	Abîmée, indications de crues.
c2	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
c3	Sans date	Delta jusqu'à St Paul	Sans échelle	Archives territoriales de NC	Bon état, carte détaillée
c4	Sans date	Bassin de la Thio	1/40000	Archives territoriales de NC	Bon état, occupation des sols moins détaillée
c5	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

Ces cartes au format *.tiff et ont été scannées, et sont donc à disposition au format numérique. Les cartes visent à représenter des sujets variés : certaines offrent une vue globale du bassin, comme la carte codée c4, d'autres sont centrées sur le delta (cartes c3 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 (Fig. 95) 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^{ème} siècle.

⊙ **Les images aériennes (1953-2017)**

Les photos aériennes ont été récupérées sur le géoportail de Nouvelle-Calédonie et issues du fonds de la DITTT. Les photos ont été acquises lors de missions d'acquisition détaillées dans le tableau 21. De la même façon que pour les cartes, un code a été attribué aux différentes missions effectuées et utiles pour la zone d'étude.

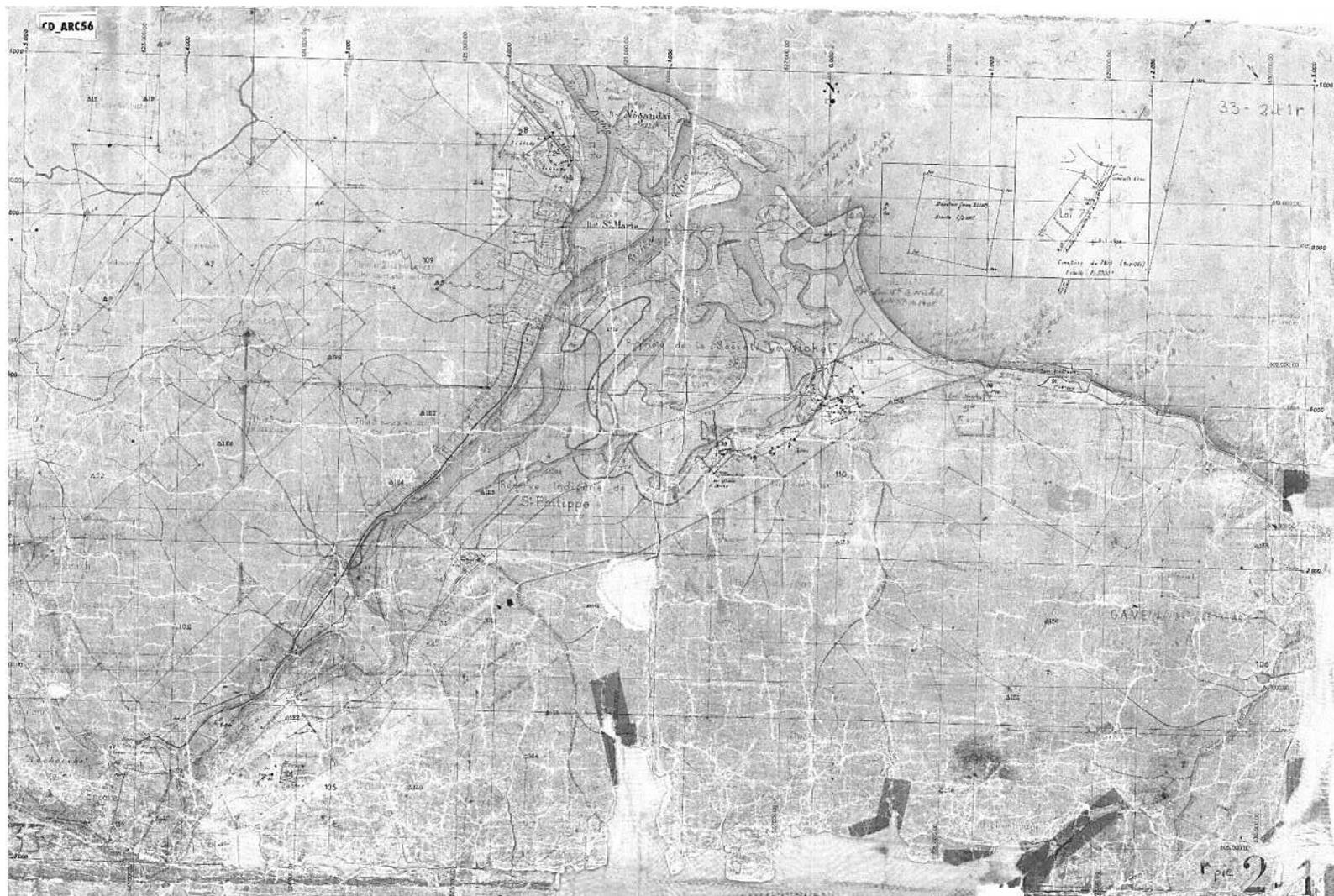


Figure 95 : Exemple de la carte C3 (la plus complète) source DITTT

Tableau 21 : Images étudiées provenant de la DITTT

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 ²)	Etat de la donnée
<i>p1</i>	1943		Delta			50	Image oblique. Panchromatique. Images non géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p2</i>	1954		Delta et plus en amont	5000	1/40000	45	Panchromatique. Images non géoréférencées 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 géoréférencées 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 géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p5</i>	1982		Delta et plus en amont		1/40000	4	Panchromatique. Images non géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p6</i>	1985	25/10 02/12	Delta et plus en amont	6120	1/40000	95	Panchromatique. Images non géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p7</i>	1989		Delta et plus en amont		1/40000	4	Couleur. Images non géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p8</i>	1995		Delta et plus en amont		1/40000	25	Couleur. Images non géoréférencées ni orthorectifiées. Prise verticale.
<i>p9</i>	2008		Delta et plus en amont		1/40000	25	Couleur. Images non géoréférencées ni orthorectifiées.

Des métadonnées sont disponibles sur Georep GouvNC, 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 Drain (2016) qui a obtenu ces données par l'IGN. Les indications d'échelle ont été collectées dans le rapport de stage de 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 (Gestion du Passif CNRT-SAP 1) et permettent ainsi de gagner du temps sur la partie du géoréférencement ou de gagner en qualité d'image et en résolution (Liébault, *pers. com.*). 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 22.

Tableau 22 : Images orthorectifiées

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

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 artefacts 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.

3.5.1.2. Méthodes d'analyse des données

⊙ *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 géo-référencement 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 Botaméré, 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 tableaux 23 et 24.

Tableau 23 : Résultats de géo-référencement et de paramètres de digitalisation des photos aériennes

Date de création	Image	Surface de recouvrement d'une image (km ²)	RMS finale (m)	Type transformation	Référence pour géoréférencement	Echelle de digitalisation Zones en eau Forêt dense	
1954	400_208	45	1.78	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
1971	orthophoto_1971	7					
1976	orthophoto_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					
1989	orthophoto_1989						
	80c	4	1.8	Polynomiale 3ème ordre	image orthorectifiée (validation orthophoto actuelle)		
	80c		0.69	Polynomiale 3ème ordre	image orthorectifiée (validation orthophoto actuelle)		
1995	68	25	1.8	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		
	27		1.7	Polynomiale 2nd ordre	orthophoto (2008)		
2008	Images orthorectifiées et géoréférencées georep.nc	25					
2017	photo aérienne 2017 (DITT)	4	1.24	Polynomiale 3ème ordre	orthophoto (2008)		

Tableau 24 : Résultats de géoréférencement et paramètres de digitalisation des cartes anciennes

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	
			2.02	Polynomiale 3ème degré	1ère partie de c4 et orthophotos	
<i>c5</i>	1885	1/40000	1.72	Polynomiale 3ème degré	Orthophotos et cadastre minier	

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 sépare ces cartes des documents de référence géoréférencés. Pour compléter la liste de points d'amer, la couche SIG du cadastre minier est utilisée 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.

3.5.1.3. 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° 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 (Fig. 96).

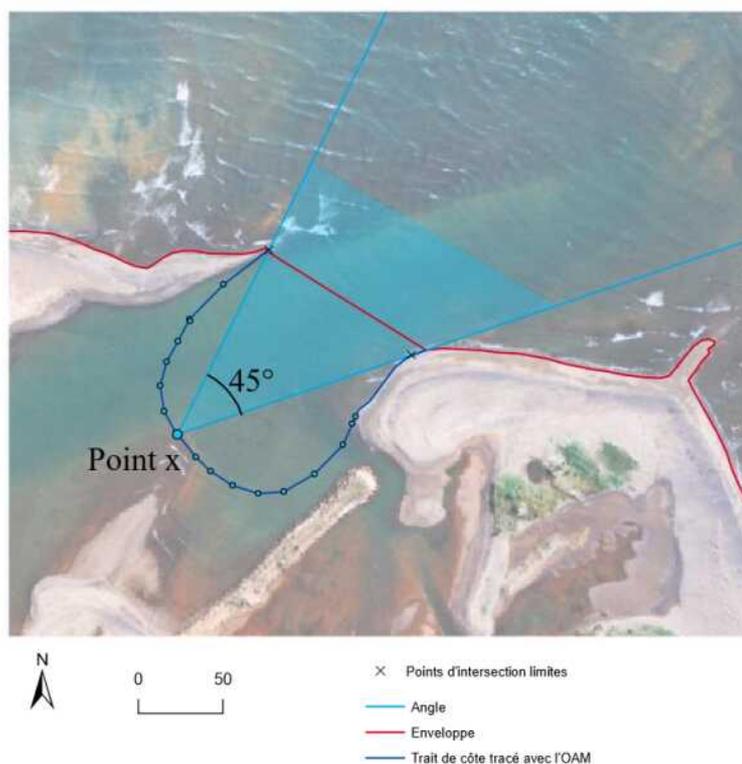


Figure 96 : Schéma de la méthode de l'Open Angle Method (OAM)

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 (Fig. 97).



Figure 97 : 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 ; Fig. 98). 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.

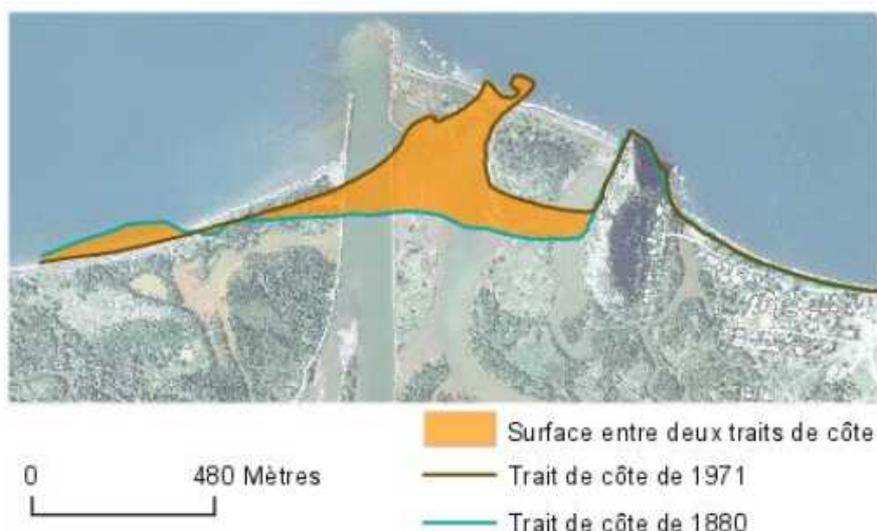


Figure 98 : Méthode de calcul des surfaces entre le trait de côte de 1880 et celui d'autres dates (1971 pour cet exemple)

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 (Fig. 99).

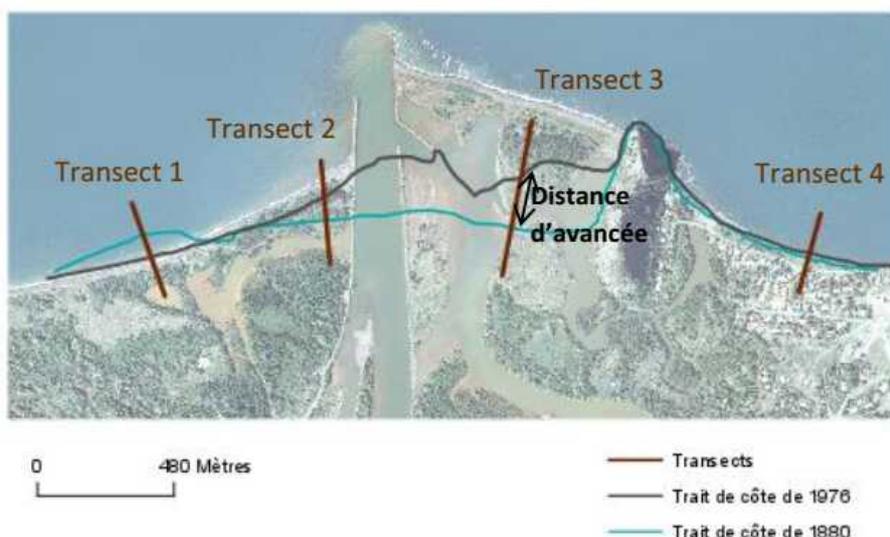


Figure 99 : Schéma de la méthode d'analyse du trait de côte par transects

Les transects n°1 et 2 sont situés sur la rive gauche de l'embouchure existante en 1880. 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 Botaméré là où une avancée significative du trait de côte avait été observée. Le dernier transect est placé sur la droite du Botaméré, où il avait été remarqué une certaine stabilité. Le Botaméré 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 Botaméré (Fig. 100), peu soumis au courant et stable.

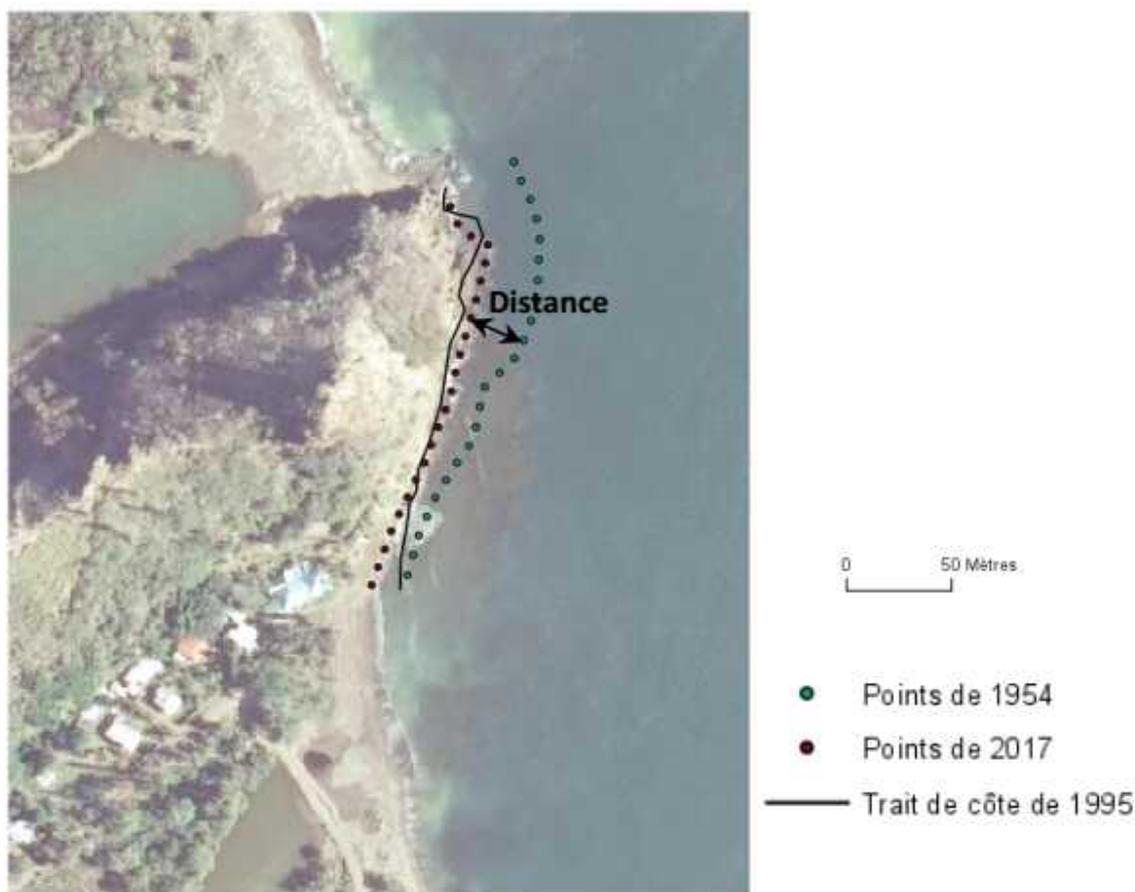


Figure 100 : Schéma de la méthode de détermination des incertitudes sur le trait de côte

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. 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 la mesure des surfaces des bancs de gravier/sable sans végétation (nus) et avec végétation rapportés à la surface du delta.

3.5.1.4. Résultats

- **Analyse du trait de côte**

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.

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 (Tabl. 25 et 26). 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.

Tableau 25 : Incertitudes du trait de côte des cartes anciennes

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

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 Botaméré, 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 Botaméré, ou encore le trait à la droite du Botaméré (planche traits de côte).

Tableau 26 : Incertitudes du trait de côte sur les photos aériennes

	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

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 Botaméré. 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 Botaméré. 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 Botaméré, 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 Botaméré.

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 Botaméré, 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. À gauche du Botaméré, 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 Botaméré, 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 Botaméré, 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 dans le tableau 27 et sur la figure 101. La longueur du trait de côte de 1880 est estimée à 2590 m.

Tableau 27 : Résultats des mesures de surface des zones et du ratio de la surface sur la longueur de la ligne de 1880.

Année	Nombre d'années d'écart	Surface (m ²)	Surface/longueur	Vitesse moyenne (m ² /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

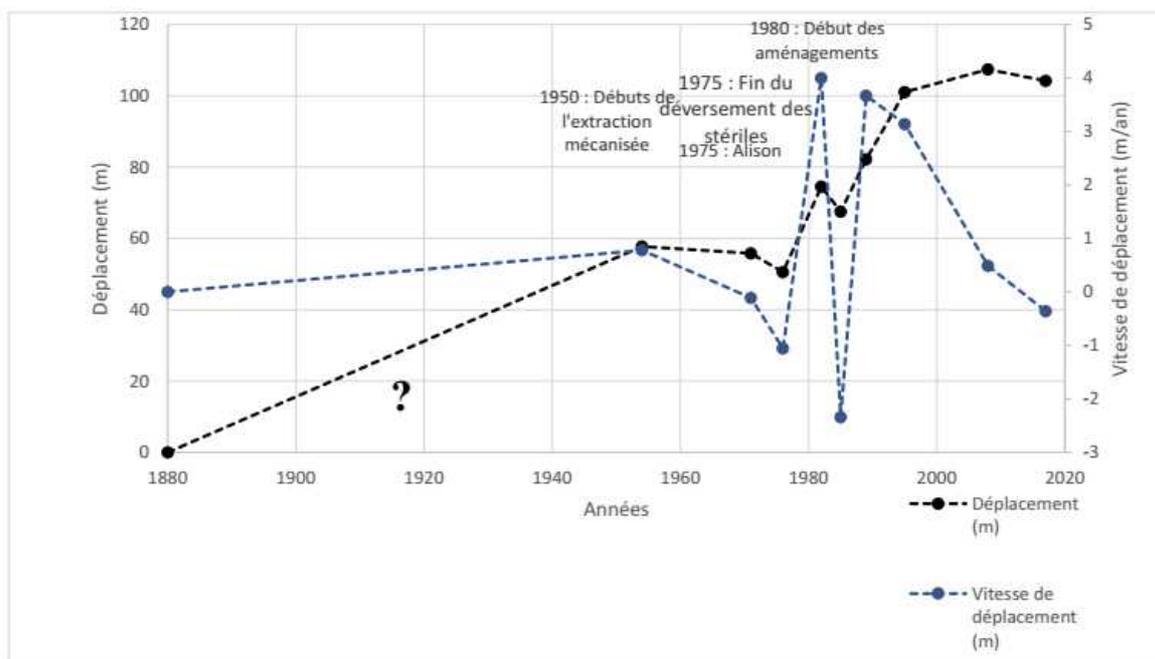


Figure 101 : Distance moyenne de déplacement et vitesse de déplacement du trait de côte de 1880 à 2017, par rapport au trait de côte de 1880

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 qui pourraient être disponibles entre 1880 et 1954 mais qui n'ont pas été trouvées.

De 1954 à 1976, il n'est pas remarqué de déplacement significatif du trait de côte, voire même un léger retrait moyen 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 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.

Les résultats au niveau des transects sont détaillés dans le tableau 28. Dans ce tableau 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.

Tableau 28 : 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

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

Afin de mieux visualiser l'évolution, des graphiques représentant la distance entre 1880 et chaque trait de côte au cours du temps sont tracés (Fig. 102). La valeur de 1880 est nulle puisque cette date constitue la référence.

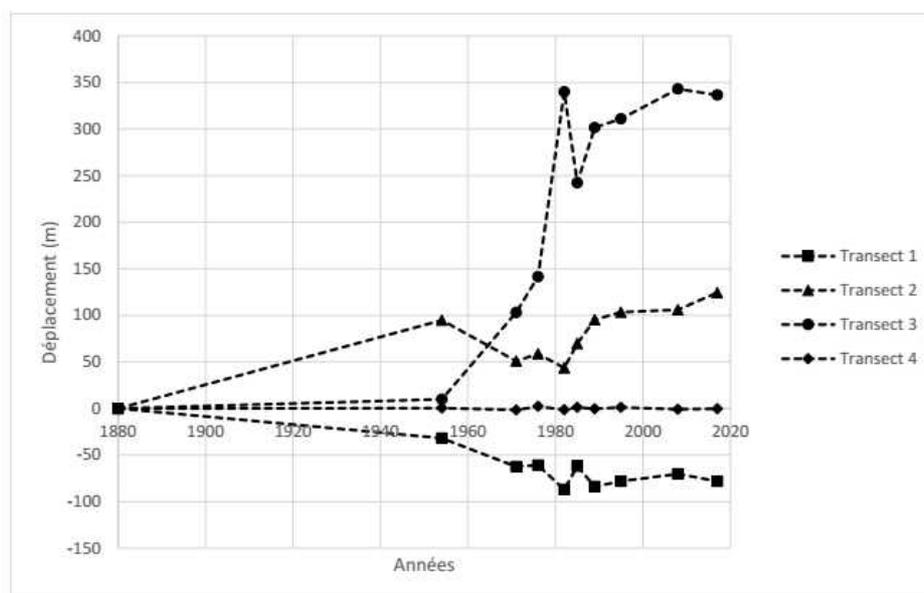


Figure 102 : Évolution du trait de côte au niveau de 4 tronçons différents

On peut observer sur la Figure 109 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 103 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 1954 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 étonnamment 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 Botaméré 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 a peut-être été 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.

4. ETAT ET FONCTIONNEMENT ACTUEL : TRANSPORT SOLIDE GROSSIER

Auteurs : A. Recking, N. Gosselin, T. Burlat (IRSTEA) – Annexe 8

Cette première partie de l'étude de l'état et fonctionnement actuel du bassin versant concerne le transport solide grossier.

Estimer la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau est un exercice difficile. Cela s'explique par le fait que les processus concernés sont extrêmement compliqués (souvent non linéaires) et que nous n'en avons à ce jour qu'une connaissance partielle, que les données disponibles sont souvent limitées et difficilement mesurables (forte stochasticité des événements, forte variabilité des paramètres physiques, quasi absence de mesures et d'observations durant les événements extrêmes, échelles temporelle et spatiale non compatibles avec une étude de court terme). Cette complexité est bien sûr accrue lorsqu'on s'intéresse à des zones tropicales soumises à des événements cycloniques d'une extrême intensité. Au mieux on accèdera à des observations « statiques », c'est-à-dire à l'agencement morphologique du lit observé hors événement.

Afin de pallier le manque d'observations et notre quasi incapacité à mesurer la dynamique sédimentaire pendant les crues, depuis maintenant près d'un siècle la science a essayé de proposer des outils de calcul (lois de l'hydraulique, équations de transport solide). Cependant les résultats issus de ces outils restent entachés de fortes incertitudes ; les modèles eux même peuvent être remis en cause lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions éloignées de celles utilisées pour leur conception (souvent au laboratoire) ; mais même dans l'hypothèse où un modèle serait suffisamment pertinent pour reproduire la physique concernée, on ne pourra jamais garantir la qualité des données d'entrée de ce modèle étant donné la forte variabilité naturelle sur le terrain.

Ces limitations de la mesure et du calcul ne permettant pas un accès direct et certain à la connaissance de la dynamique sédimentaire d'un cours d'eau, on procède en général en combinant toutes les approches, et on cherche à proposer, sur la base d'une convergence de preuves, ce qui semble le plus réaliste, sachant qu'on ne sera jamais dans la certitude absolue. C'est ce que nous avons fait pour cette étude, qui combine une analyse géomorphologique basée sur une reconnaissance de terrain, une analyse de données mesurées sur place, et enfin une série de calculs permettant de valider ou d'invalidier les conclusions préalables déduites de l'observation.

4.1. ANALYSE GÉOMORPHOLOGIQUE DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

4.1.1. RECONNAISSANCE GÉOMORPHOLOGIQUE

La reconnaissance géomorphologique a concerné la Thio et ses affluents (Fig. 103) mais aussi la Todrè et la cascade de Wellington. Pour chaque cours d'eau, le principe a consisté à le parcourir à pied (d'aval en amont ou d'amont en aval selon l'accessibilité) et de réaliser un maximum d'observations (mesures sommaires, photos). Ces visites avaient pour objectif d'acquérir une vision aussi globale que possible des bassins versants, afin d'en déduire une dynamique et les unités fonctionnelles. Les mesures de détail (topographie, granulométrie) ne pouvaient être réalisées de façon pertinente que dans un deuxième temps sur la base d'une stratégie d'échantillonnage découlant de cette première expertise.

L'observation des différentes unités morphologiques en place a été déterminante dans notre interprétation de la dynamique sédimentaire en jeu, actuelle et passée. C'est ce que nous allons décrire dans cette première partie.

4.1.1.1. La Thio

La figure 104 présente un photomontage de la reconnaissance de la rivière Thio. Le premier constat est que la rivière Thio, contrairement à ce que l'on aurait pu attendre, ne présente pas les caractéristiques d'une rivière à forte activité sédimentaire. On a pu observer un style morphologique à

chenal unique sinueux en seuil-mouille-banc, très clairement incisé dans un ensemble de bancs fixes (Fig. 106) très végétalisés, qui marquent probablement le paroxysme d'une phase d'engravement en lien avec les apports miniers (hypothèse à vérifier par analyse historique des changements fluviaux).

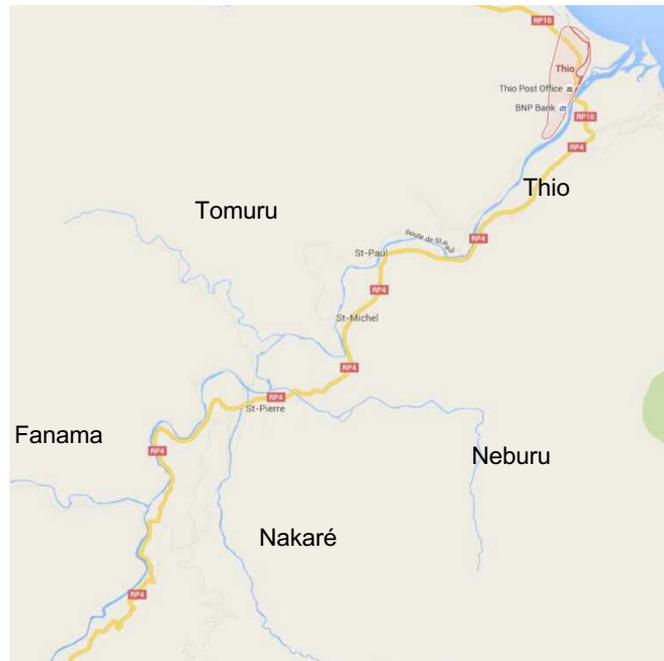


Figure 103 : Plan d'ensemble



Figure 104 : Photomontage de la Thio (flèches rouges= témoins d'incision)



Figure 105 : Bancs végétalisés

Ces bancs, bien marqués en amont, sont plus ou moins visibles à l'aval, selon la hauteur de l'eau contrôlée par la marée. De larges dépôts de fines et de sables sont observés principalement sur les terrasses (dépôts induits par les débordements en hautes eaux, et accélérés par effet de peigne de la végétation), mais globalement la Thio au niveau de son lit mineur conserve une granulométrie plutôt grossière qui, considérée dans le contexte de pente très faible, suggère une granulométrie de pavage (Fig. 105).



Figure 106 : La Thio (au niveau de Saint Paul, Sections 7-8)

L'estuaire (Fig. 107) ne semble pas non plus, à première vue, présenter de dépôts grossiers susceptibles de perturber les écoulements. Des digues sont en partie détruites.



Figure 107 : Estuaire de la Thio

4.1.1.2. Les creeks

La situation est différente au niveau des creeks. Trois creeks ont été identifiés comme gros pourvoyeurs de sédiments : la Néburu, la Nakaré, la Tomuru (+Creek « cimetière », mais déconnecté par des peignes).

Pour ces sites (Fig. 108, 109, 110 et 111), le constat est le même : il y a des signes évidents de déstockage, avec la présence de très fortes incisions dans de gros dépôts à charge grossière. Même si la recharge solide reste très importante depuis l'amont des BV, de toute évidence le paroxysme du surengrèvement est derrière nous (étant donné l'ampleur des incisions dans des terrasses perchées), ce qui confirmerait les analyses préliminaires sur photos aériennes, qui montrent une tendance à la rétraction des bandes actives depuis les années 1970.

L'analyse préliminaire des données LiDAR montre également que les bandes actives actuelles sont incisées dans un niveau qui semble correspondre au paroxysme du surengrèvement (constat sur la Thio et sur la Néburu).

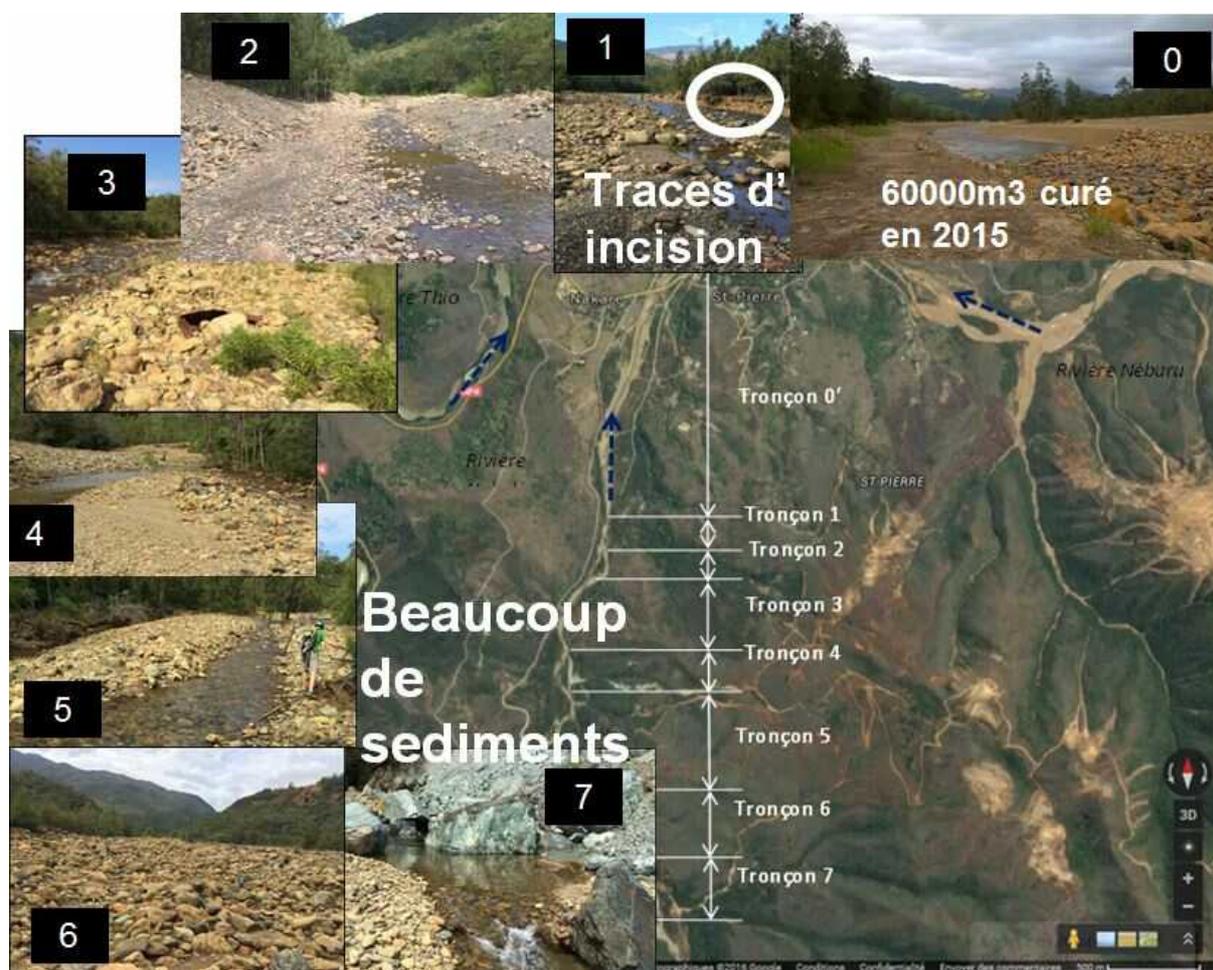


Figure 108 : Photomontage de la Nakalé

Sur la Néburi, nous avons pu constater la présence de bancs grossiers perchés à +/- 2.5 m au-dessus du niveau d'eau, en cours de végétalisation, qui se distinguent clairement sur le terrain et sur les photos aériennes par leur couleur sombre, liée à l'altération des galets (patine sombre). Ceci témoigne du caractère figé de ces bancs qui doivent être considérés comme un niveau de terrasse. Ce niveau de terrasse se raccorde bien avec un ancien cône de déjection à l'exutoire du Creek de la Mine Bornet, qui pourrait correspondre au paroxysme de l'engravement minier dans les têtes de bassin. Le creek qui draine ce bassin versant fortement impacté par les mines est actuellement incisé de plusieurs mètres dans son ancien cône.

La Néburi montre également des portions très bien préservées d'une ancienne plaine alluviale boisée à sédimentation fine surmontant un niveau grossier, lui-même situé légèrement en-dessous de l'altitude du lit actif actuel. Les photos aériennes historiques montrent que cette plaine boisée n'a jamais été intégrée dans la bande active et qu'elle ne peut être attribuée aux apports miniers. Une pédogénèse vient d'ailleurs confirmer que ces niveaux sont anciens et qu'ils correspondent vraisemblablement à des phases d'aggradation d'origine naturelle (dernière période froide ?). On trouve d'ailleurs sur le site d'anciens cônes de déjection sur des affluents non miniers qui se raccordent à cette plaine boisée. Il serait intéressant de pouvoir dater ces formes afin de les interpréter. Elles signalent néanmoins que le niveau d'engravement atteint lors du passage de la vague sédimentaire d'origine minière est proche de celui des dernières crises détritiques d'origine naturelle.

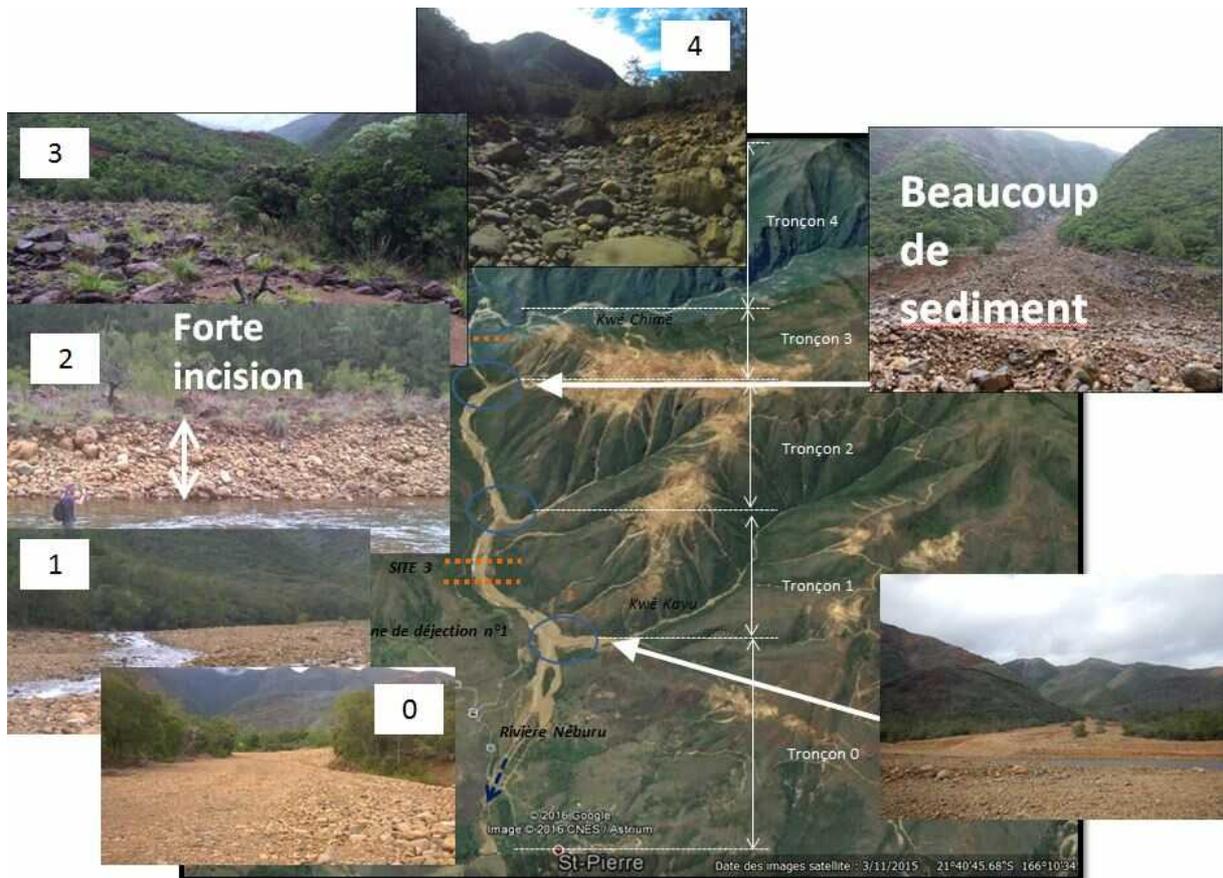


Figure 109 : Photomontage de la Nèburu



Figure 110 : La Tomuru



Figure 111 : Creek Bwa Néca (ou Creek Cimetière) avec peigne

On retrouve pour tous ces creeks une configuration commune :

- Forte incision dans les dépôts ;
- Une alimentation toujours importante depuis l'amont, mais clairement en baisse par rapport à ce qu'elle fut dans un passé proche ;
- Une partie aval se comportant en plage de dépôt, avec un lit élargi, de moindre pente, et barré par une digue routière. Cette partie aval est cruciale, car :
 - C'est là que se font les dépôts ;
 - Ce sont généralement des zones habitées, donc où se produisent les risques liés aux inondations ;
 - Ce sont des zones de curage (60 à 70 000 m³ récemment curés sur la Nakaré avec remontée des volumes sur site minier).

4.1.1.3. La Todré

La Todré avait été choisie comme bassin de référence non (ou peu) impacté.

La visite de terrain indique cependant un torrent à forte pente, au socle rocheux apparent, et charge sédimentaire très grossière distribuée sur des bancs peu nombreux. Seule la partie aval (encore une fois immédiatement en amont de la digue routière – Fig. 112) présente une charge sédimentaire similaire à celle observée sur la Thio.



Figure 112 : Dépôts en amont de la digue routière sur la Todré

En première analyse, il semblerait que le lit soit progressivement lessivé de sa charge fine par les crues courantes, avec accumulations en aval. Les bancs grossiers (Fig. 113) seraient, eux, probablement mobilisés lors des crues à très forte énergie (morphologie de crues cycloniques ?). Ils sont souvent associés à d'importantes fosses de surcreusement en amont (grosses mouilles).



Figure 113 : Banc sur la Todré

4.1.1.4. La cascade de Wellington

Bien que ne faisant pas partie du bassin versant de l'étude, il était intéressant de visiter la cascade de Wellington (Fig. 114, 115 et 116), qui a subi des engravements très importants depuis la mine de Thio. Elle alimente la Dothio, située sur un bassin versant contigu à celui de la Thio, et qui a connu aussi de graves inondations par sédimentation au niveau de son embouchure.

Il y a des signes de déstockage dans ce bassin mais de toute évidence, les sédiments n'ont fait que transiter depuis un immense cône en amont, pour s'étaler plus en aval dans la vallée, mais sans qu'il y ait réellement d'export en aval du remblai routier.

Après discussions avec les acteurs locaux, cette hypothèse faite sur site semble corroborée avec un événement survenu en 1973 : un cyclone aurait emporté le cône de déjection de la « décharge » qui bouchait la vallée entraînant une vague sédimentaire qui alla jusqu'à recouvrir la route d'une hauteur de 2m de sédiments.

De part et d'autre de la zone d'incision, le cône historique est encore bien présent, avec traces de laves.

Par ailleurs, des traces de mise en décharge sont encore bien visible jusqu'en tête de BV, avec des stocks de sédiments meubles non négligeables, mais qui restent stables sur le versant à forte pente. Cela traduit probablement le fait que l'arrêt des mises en décharge s'est accompagnée de plans de gestion des eaux sur mine, et que seuls des orages très localisés sur l'impluvium relativement réduit contenant ces dépôts seraient susceptibles de les remobiliser.

La visite de l'estuaire indique la présence de digues et d'un cordon littoral entre la rivière et la mer, mais il est difficile de définir s'il s'agit d'apports de la rivière ou marins.



La cascade, zone de forte incision dans les dépôts (encore présents latéralement)



Volumes exportés, avec étalement dans la vallée



Contrôle hydraulique des dépôts en aval
Sédimentation de fines

Figure 114 : Vue d'ensemble de la Cascade de Wellington



Figure 115 : Traces de barrage naturel visibles sur les deux versants



Figure 116 : Le cône

4.1.1.5. Bilan du diagnostic géomorphologique

Si tous les cours d'eau du bassin versant ont en commun les traces d'une importante phase d'exhaussement passée (avec des volumes importants encore stockés dans les terrasses), suivi d'une purge dans ces dépôts (forte incision du lit mineur dans les terrasses), ce que l'on retiendra de ces visites de terrain c'est le fort contraste qui semble exister entre la dynamique sédimentaire actuelle de la Thio et de ses creeks.

La Thio présente un lit sinueux, végétalisé, sans véritables dépôts meubles récents très marqués. Sa granulométrie grossière associée aux faibles pentes est symptomatique d'un pavage, c'est-à-dire d'un fonctionnement avec déficit d'apports amont conduisant progressivement à un lessivage du lit de ses matériaux meubles (on parle ici des sédiments grossiers apportés par charriage, les dépôts de sédiments fins issus de la suspension étant eux très importants sur les zones latérales de débordement)

Les creeks présentent quant à eux, des stocks très importants de dépôts meubles, fraîchement mobilisés, dans leur partie aval juste en amont de la confluence avec la Thio. Ce contraste est visible sur le terrain pour l'ensemble des creeks (Fig. 117 à 119) mais est encore plus évident lorsqu'on observe les photos aériennes (Figure 117, gauche).

Cette différence de dynamique constatée entre la Thio et ses creeks nous amène à conclure qu'ils sont déconnectés : les Creeks transportent encore aujourd'hui des volumes de sédiments grossiers importants jusqu'à la Thio mais ceux-ci ne sont pas transférés à la Thio.

Les raisons de cette déconnexion sont différentes pour chaque creek. Pour le creek Cimetière la raison est évidente puisque des peignes à sédiments ont été construits pour bloquer la charge sédimentaire. Pour la Nakalé et la Néburu, il semblerait que c'est le rétrécissement local du lit (à la fois naturel et induit par la construction de la digue routière) qui soit responsable de cette déconnexion. On retrouve au droit de cette digue une situation classique de régulation sédimentaire telle qu'on la pratique dans les alpes en construisant des barrages de plage de dépôt (Fig. 120), en réduisant la capacité hydraulique (perte de charge au droit de la contraction) ces ouvrages réduisent la pente d'énergie, ce qui a un effet immédiat sur la mobilité des sédiments (dépôt).

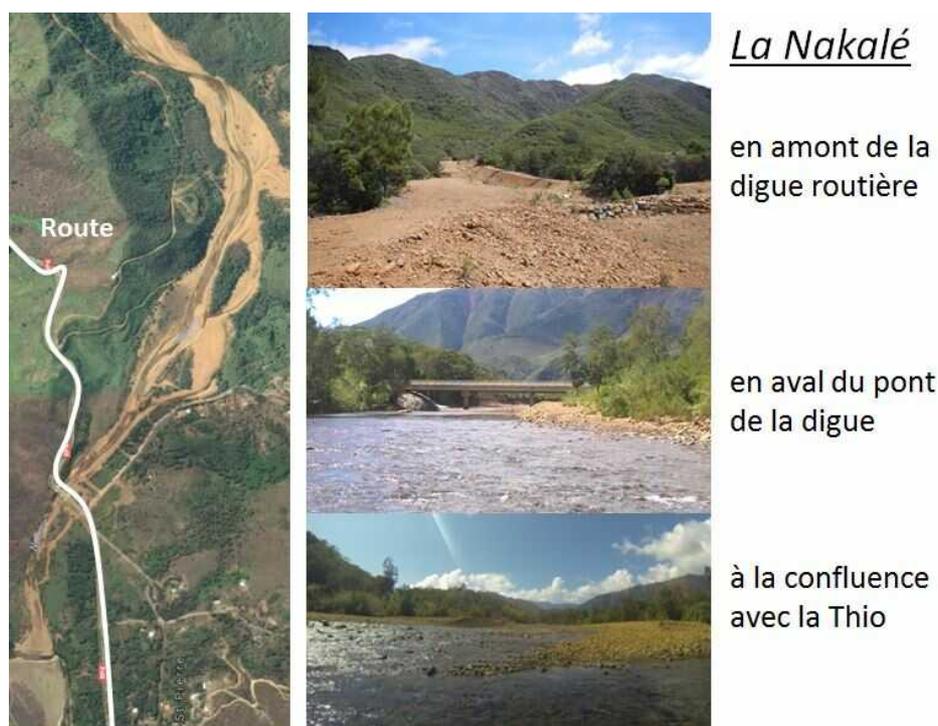


Figure 117 : Confluence Nakalé-Thio, vue du ciel et depuis les berges



Figure 118 : Confluence Tomuru/Thio



Figure 119 : a) Confluence Neburu/Thio et b) La Thio juste en aval de la confluence

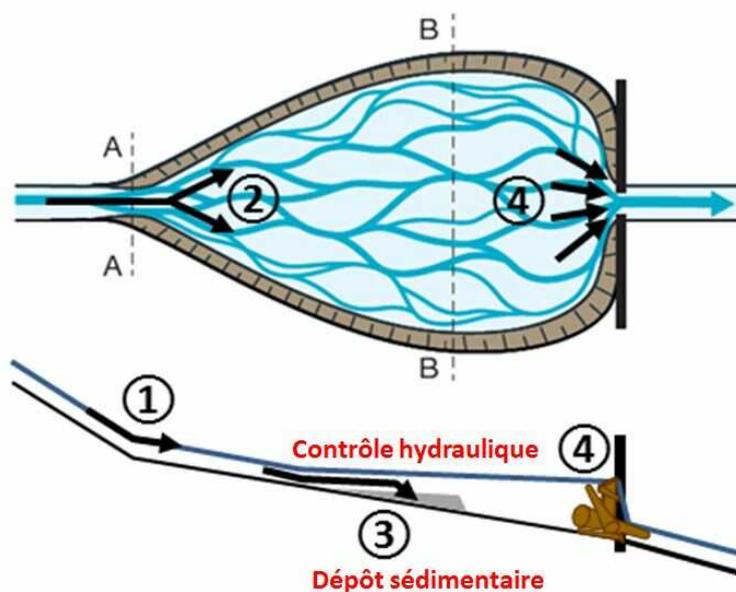


Figure 120 : Principe de fonctionnement d'une plage de dépôt (d'après [Piton and Recking, 2015])

Tout comme cela se produit dans les plages de dépôt, on peut supposer que lors des crues extrêmes, l'amont de la digue piège très efficacement les sédiments grossiers, et que lors des crues courantes (et des fins de crues extrêmes), une purge selon la section d'écoulement permettrait un transfert d'une fraction relativement plus fine (le reste étant remanié et régalié en berges en amont de la digue routière, ou sur mine). À défaut d'observations directes, on en restera sur cette hypothèse mais il conviendra par la suite de mieux considérer le comportement de la charge sédimentaire au droit des digues routières pendant les fortes crues.

4.1.2. QUELQUES MOTS SUR LA PROBLÉMATIQUE INONDATION

Bien que la problématique « inondation » ne soit pas explicitement incluse dans cette étude, elle est très présente dans les esprits et les discours, et on peut essayer d'apporter quelques éléments d'information issus de notre analyse de terrain. Cette problématique semble de nature très différente selon les secteurs.

Pour les creeks, les inondations semblent être directement liées aux sur-engravements en amont des digues routières. Par exemple, les inondations récentes (2015) sur la Nakalé sont expliquées par une obstruction du lit ayant conduit les écoulements à emprunter la piste d'exploitation parallèle au creek et menant jusqu'aux habitations.

Pour la Thio, la situation est plus complexe à analyser. Les inondations récentes ont semble-t-il touché beaucoup d'habitations (l'eau est montée jusqu'à la mairie), mais le schéma ayant conduit à cette montée des eaux n'est pas clair. Deux causes possibles sont identifiées :

- Contrôle hydraulique aval (« bouchon » sédimentaire dans l'estuaire, ou modification des conditions hydrauliques liée à la progradation du delta ?)
- Accélération des crues depuis l'amont par présence de forts dépôts dans le lit : réduction des volumes d'écrêtement, végétation haut perchée augmentant considérablement la cote de la ligne d'eau en crue....

La présence d'un bouchon sédimentaire pourrait s'expliquer par le déstockage des sédiments depuis la Thio, mais il reste à prouver car rien n'indique sur le terrain l'existence d'un tel bouchon.

On peut donc s'interroger sur les volumes réellement déstockés depuis le lit de la Thio : Où sont-ils passés (à l'estuaire ou ont-ils été transportés au large ou latéralement par les courants lagunaires) ? Comment a évolué l'estuaire depuis 1975 ?

Si l'activité sédimentaire actuelle du lit de la Thio semble faible, les volumes qui y sont stockés sont encore importants, et créent des terrasses haut perchées, très végétalisées, qui lors des crues extrêmes, peuvent justifier des cotes d'eau très importantes. Par exemple, des laisses de crues à + de 3 m ont été relevées sur des terrasses situées elles-mêmes à + 3m environ au-dessus du fil d'eau (Figure 121).



Figure 121 : a) Terrasse dans le lit de la Thio
et b) Végétation sur terrasse avec laisse de crue à +3m

Étant donné les très faibles pentes, la réduction de l'espace disponible (Figure 139) à l'étalement des crues pourrait à elle seule expliquer un aggravement de la sensibilité aux crues. Selon ce scénario, les inondations pourraient donc venir plutôt de l'amont par débordement du lit mineur.

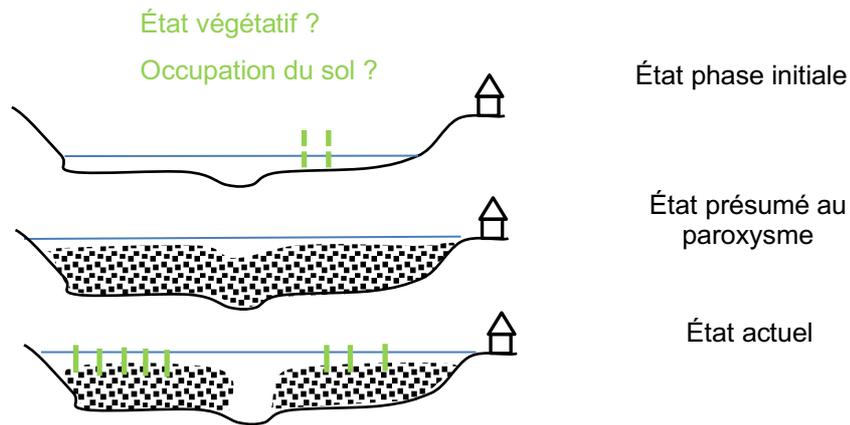


Figure 122 : Représentation schématique de l'évolution de la ligne d'eau avec sur engrèvement

Mais une incision du lit mineur dans des terrasses pourrait aussi avoir pour conséquence une accélération des crues par déformation de l'hydrogramme (Fig. 122), avec de conséquence sur les zones situées à l'embouchure. Cependant, comme on le verra plus loin, l'analyse du profil en long suggère que l'on pourrait avoir en crue une courbe de remous contrôlée par l'aval (surtout en cas de marée haute) et qui se qui se répercuterait très loin vers l'amont. Ces deux mécanismes conjugués sont complexes à analyser sans un modèle numérique détaillé ce qui ne fait pas partie de cette étude.

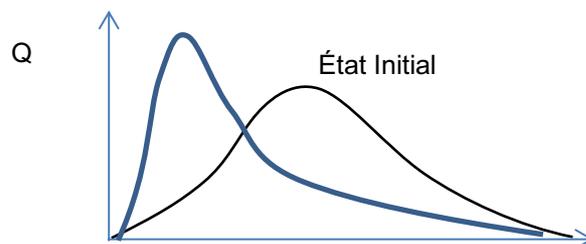


Figure 123 : Possible évolution de l'hydrogramme de crue avec le sur-engrèvement

Par ailleurs, il a été souvent mentionné une aggravation des crues. Mais sur quelle période ? En effet, la Thio a connu 3 crues majeures en 2 ans (dont deux à 6 mois d'intervalle). Est-ce cette succession d'événements qui est à l'origine de la perception d'une aggravation, ou parle-t-on d'une évolution au cours des dernières décennies ? Peut-il s'agir de crues naturellement plus fortes parce que répondant à des forçages pluviométriques plus forts ?

4.1.3. CONCLUSION

L'analyse géomorphologique du bassin versant a permis de retracer l'évolution de la Thio et ses creeks depuis les débuts de l'exploitation minière, et de poser un diagnostic sur leur fonctionnement actuel. Nous avons mis en évidence un passé commun à la Thio et ses affluents, avec notamment une forte période d'exhaussement qui a engendré de hautes terrasses, suivie d'une période de purge avec enfouissement du lit mineur dans ces terrasses.

La Thio et ses creeks présentent cependant un fonctionnement actuel très contrasté, la Thio étant peu dynamique, voire pavée, alors que les creeks transportent encore abondamment des sédiments grossiers. Nous l'interprétons par l'existence de déconnexions sédimentaires qui pourrait être due en partie aux digues routières.

Il nous faut pour aller plus loin essayer de quantifier cette dynamique ce qui est l'objet de la seconde partie de l'étude.

4.2. LA QUANTIFICATION DES FLUX

La quantification des flux comprend classiquement trois étapes :

- La collecte des données ;
- L'utilisation de modèles ;
- Une analyse critique des résultats.

4.2.1. COLLECTE DES DONNÉES

La collecte des données a été réalisée pendant une période de 3 mois par deux étudiants en stage Master. Comme il s'agit d'une tâche fastidieuse et coûteuse, la stratégie d'échantillonnage a été optimisée sur la base des conclusions de l'analyse géomorphologique présentée ci-dessus.

Les données collectées sont :

- La granulométrie du lit ;
- La topographie : des sections en travers du lit ont été mesurées au niveau. Le profil en long (pour les pentes) a été calculé à partir du MNT de la Thio ;
- Les données hydrologiques ont été récupérées auprès de la DAVAR ;
- Les différentes informations utiles à la modélisation telles que l'état de la végétation.

4.2.1.1. Choix des emplacements des stations de mesures

Dix sections ont été retenues pour la Thio et sont présentées dans le tableau 29.

Deux sections ont été choisies sur les creeks en amont des zones de terrassement : une sur la Nakalé

Le résultat principal que l'on retient de l'analyse géomorphologique est l'hypothèse d'apports toujours importants en aval des creeks, avec une déconnexion et un transport faible dans la Thio jusqu'à l'embouchure (nous parlons ici de sédiments grossiers transportés par charriage, la charge fine faisant l'objet d'une discussion à part en fin de chapitre. Pour tester la cohérence de ces hypothèses, les sections d'étude ont été choisies tout le long de la Thio depuis l'amont des confluences avec les creeks Neburu et Nakalé jusqu'à l'embouchure.

Les transects ont tous été choisis dans des zones non remaniées, où la section d'écoulement s'est formée naturellement dans des matériaux meubles, en réponse à l'hydrologie et au transport solide associé (condition indispensable à l'utilisation des formules). Cela correspond en général aux zones où le lit mineur est associé à des bancs sédimentaires.

Tableau 29 : Distance des sites de mesure aux affluents et ponts.

Numéro site de mesure	Distance affluent à	Distance pont à proximité
Site 1	950 m en amont de la confluence Nakalé	750 m en amont du pont
Site 2	300 m à l'aval de la confluence Nakalé & 80 m en amont de la confluence Néburu	x
Site 3	500 m à l'aval de la confluence Néburu	1,1 km en amont de confluence Fanama
Site 4	1,1 km à l'aval de la confluence Fanama	1,2 km en amont du pont St-Michel
Site 5	x	600 m en aval du pont St-Michel
Site 6	400 m en amont de la confluence Tomuru	x
Site 7	20 m à l'aval de la confluence Tomuru	x
Site 8	1,2 km à l'aval de la confluence Tomuru	1,2 km en amont du Pont des Pétroglyphes
Site 9	Sur le banc situé à l'exutoire du creek cimetière	x
Site 10	X	1 km en amont du Pont de Thio

4.2.1.2. La granulométrie

Elle a été collectée sur la base d'un comptage de Wolman [Wolman, 1954]. Cette technique standardisée consiste à prélever de façon aléatoire, sur une placette ou un profil, 100 cailloux et de mesurer leur taille avec un calibre (Fig. 124).



Figure 124 : Mesure de la granulométrie par la méthode Wolman

La partie délicate de cette opération est le choix de l'emplacement de l'échantillonnage. Pour estimer la capacité de transport la plus réaliste possible, il convient de choisir un banc alluvionnaire ne paraissant pas figé ainsi que la zone du banc ayant la granulométrie la plus représentative du tronçon, en évitant par exemple de prélever sur des patches localisés de granulométrie fine qui résulterait d'un nappage de surfaces dus aux dépôts de suspension de fin de crue.

Une courbe granulométrique (Fig. 125) a été établie pour chaque section d'étude.

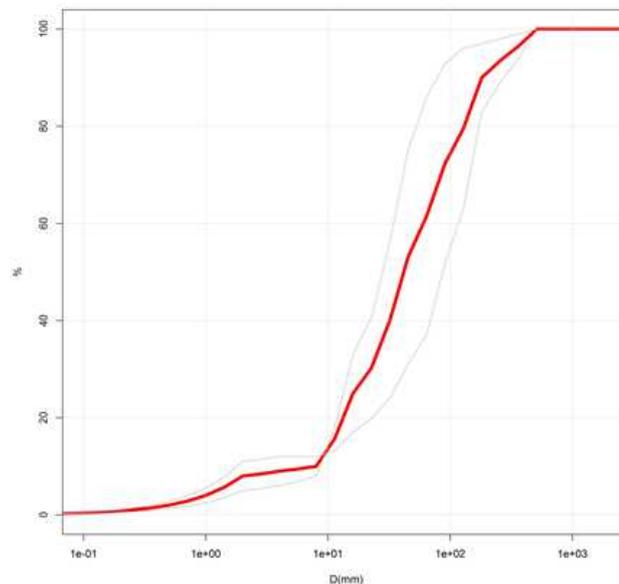


Figure 125 : Exemple de courbe granulométrique mesurée sur la Nakalé (2 échantillons et la moyenne)

4.2.1.3. Les sections en travers

Les relevés topographiques ont été réalisés à l'aide d'un niveau optique SOKKIA C410. En plus de la topographie du banc alluvionnaire adjacent, la mesure des sections en travers a pour la grande majorité des sites pris en compte la surface mouillée étant donnée la faible profondeur d'eau rendant une bathymétrie possible avec le matériel à disposition. Les sections (Fig. 126) contraintes par

des terrasses nettes et celles où l'on distinguait clairement le lit actif de la rivière ont préférablement été choisies.

Sur certains sites de mesure, la côte altimétrique de terrasses perchées a été évaluée visuellement car une végétation trop dense et la hauteur des terrasses rendaient l'accessibilité très compliquée. Les points de mesure ont été choisis en lien avec les ruptures de pente observables sur la section en travers.

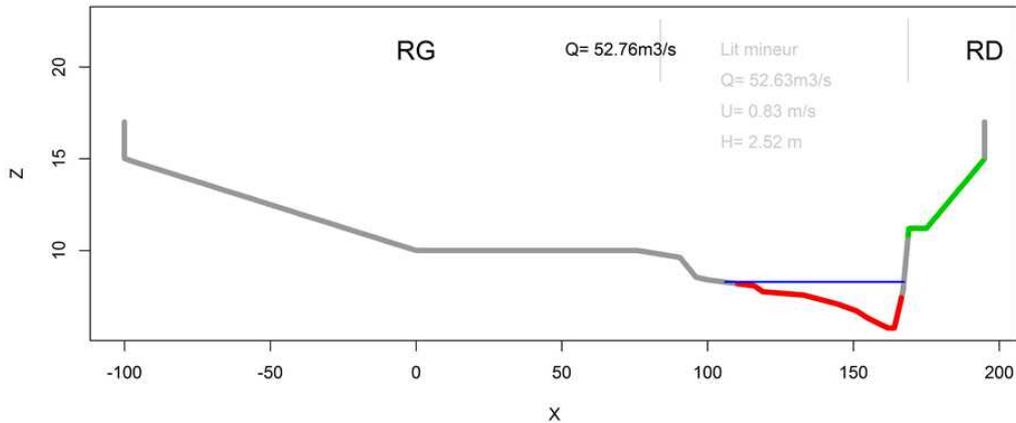


Figure 126 : Exemple de section en travers (Section 8, Pont des pétroglyphes)

La topographie du lit majeur a été déduite de la carte IGN (la précision est approximative mais ça n'a pas de conséquences pour les calculs car l'hydraulique associée concerne les débits extrêmes eux même entachés de fortes incertitudes).

4.2.1.4. Le profil en long

Le profil en long (Fig. 127) est intéressant pour calculer les pentes locales (nécessaires aux calculs) et déceler des éventuelles ruptures. Les pentes locales ont été mesurées au niveau sur une distance avoisinant au minimum dix fois la largeur du lit ; elles ont été complétées par les pentes calculées à partir du MNT issu du relevé lidar.

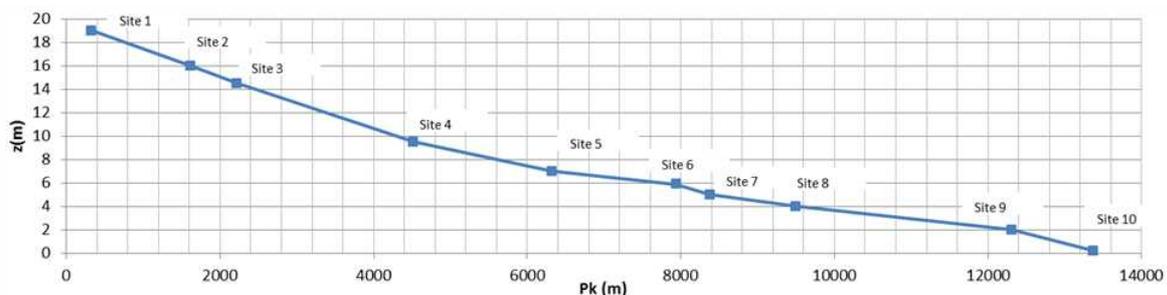


Figure 127 : Profil en long de la Thio depuis l'embouchure jusqu'en amont des creeks Nakalé et Tomuru

4.2.1.5. L'hydrologie

Les données hydrologiques ont été récupérées auprès de la DAVAR. On dispose d'une chronique (Fig. 128) de débits journaliers moyens mesurés à la station du Pont Saint Michel, sur une période de 34 ans (26/12/1981 au 08/11/2015), et d'une chronique de débits au pas de temps 5 minutes pour la crue de février 2015.

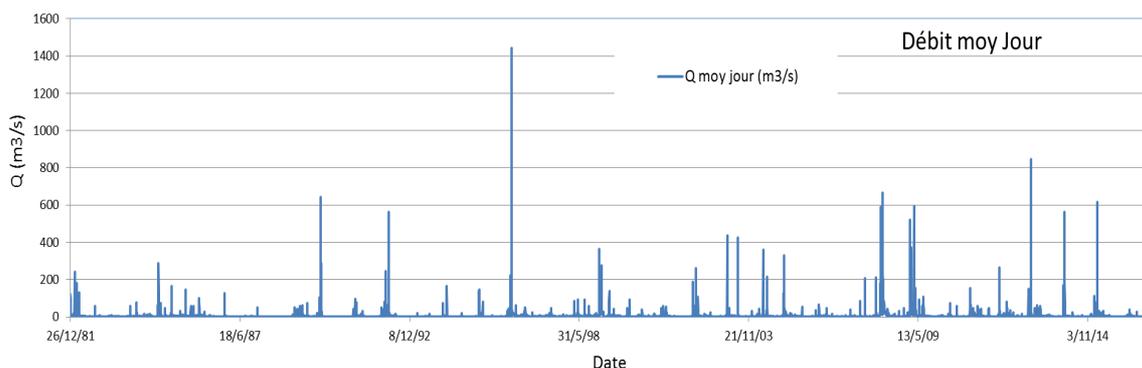


Figure 128 : Chronique des débits moyens journaliers sur la Thio

Hormis quelques valeurs qui nous semblaient erronées, les données sont telles qu'elles ont été transmises par la DAVAR. On notera des différences notables entre la crue instantanée de 2015 (3500 m³/s, Fig. 129) et la valeur moyenne journalière (860 m³/s). L'impact de telles différences sera testé dans nos calculs.

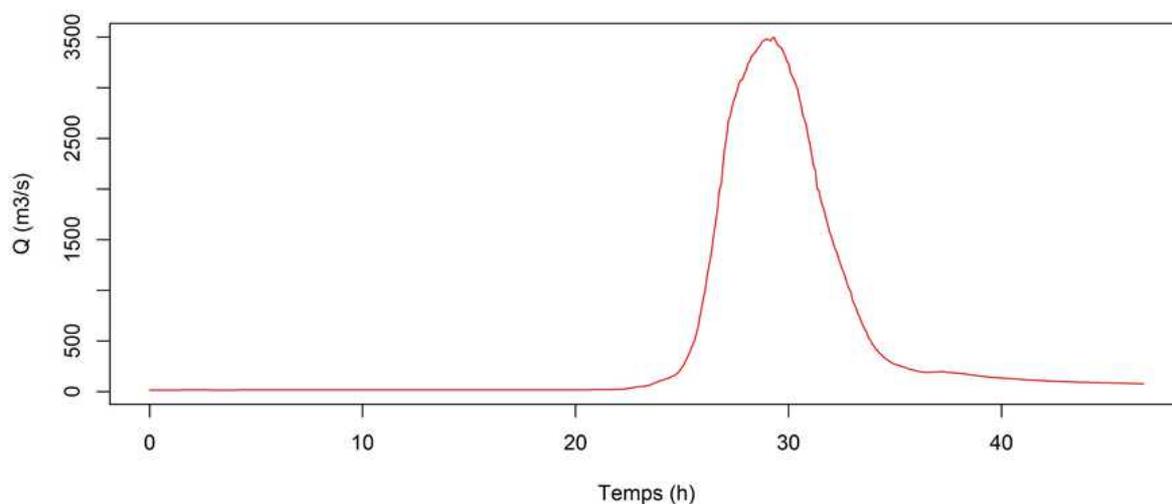


Figure 129 : Crue de février 2015

N'ayant pas d'autres données, ces débits ont été affectés à chaque sous bassin versant au prorata de la surface concernée avec la transformation suivante (formule de Myer) :

$$Q_{sous\ BV} = Q_{BVPont\ St\ Michel} \left(\frac{S_{sous\ BV}}{S_{BV\ Pont\ St\ Michel}} \right)^{0.75}$$

Le coefficient 0.75 pourrait être discuté dans ce contexte tropical, mais les études disponibles tendent à montrer que ce coefficient est assez stable dans différentes parties du monde (entre 0.7 et 0.8 dans les alpes françaises et au Colorado par exemple). Mais sa valeur ne devrait pas changer grand-chose aux conclusions de l'étude, vu les nombreuses incertitudes par ailleurs.

Les tailles des sous-bassins utilisées pour la transformation sont les suivantes (Tabl. 30).

Tableau 30 : Les bassins versants et sous bassins

Section	Localisation	BV (km ²)
Nakale	Partie aval	30
Neburu	Partie aval	49
Site 1	Thio amont confluences	221
Site 2	Amont Confluence Neburu	253
Site 3	Aval confluence Neburu	302
Site 4	Amont pont St Michel	341
Site 5	Pont Saint Michel	349
Site 6	Amont confluence Tomuru	360
Site 7	Confluence Tomuru	364
Site 8	Pont pétroglyphes	366
Site 9	Confluence creek cimetièrè	374
Site 10	Amont Pont de Thio	378

4.2.1.6. Analyse des données

Une inspection des données collectées permet de dresser quelques premiers constats.

Tout d'abord en ce qui concerne la granulométrie, le profil établi pour la Thio ne montre pas à première vue une tendance nette à l'affinage des tailles de grain, comme c'est en général le cas, depuis l'amont vers l'aval (Fig. 130).

On observe plutôt deux pics, un au pK 2000 qui correspond aux confluences avec la Nakalé et la Néburu, et un second au pK8500, qui correspond approximativement à la confluence avec la Tomuru.

Cette correspondance granulométrique (confirmée par les mesures présentées aux figures 131 et 132) confirme que la déconnexion n'est pas totale et que des matériaux passent, au moins lors des grosses crues.

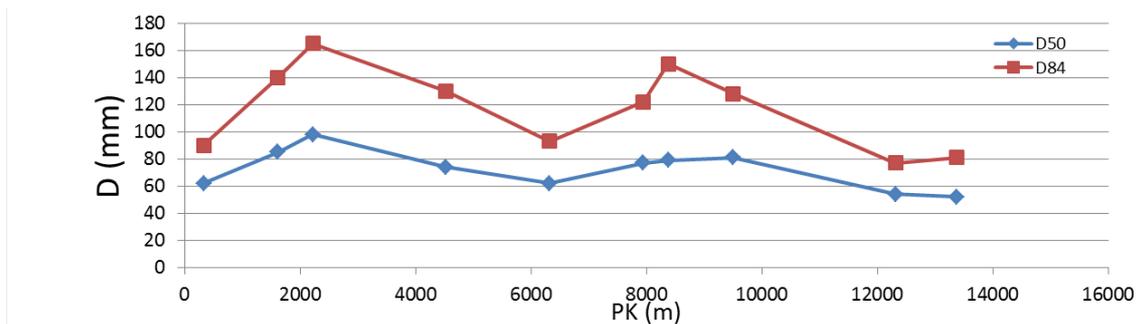


Figure 130 : : Évolution du D50 et du D84 sur la Thio

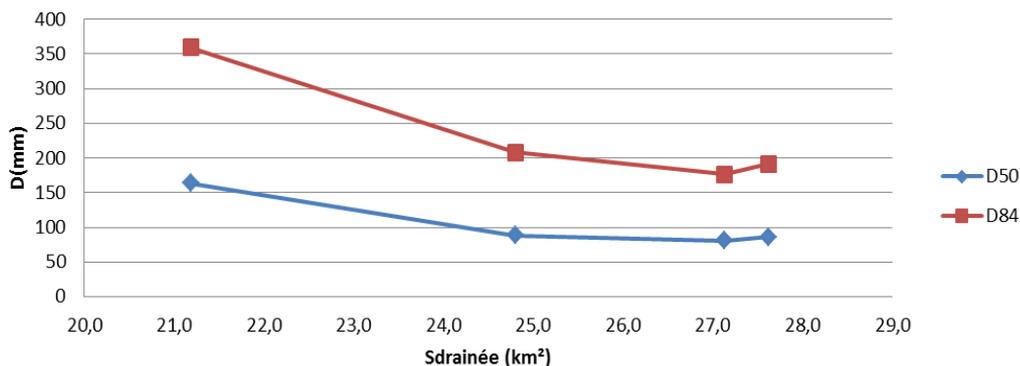


Figure 131 : : Évolution du D50 et du D84 sur la Nakale

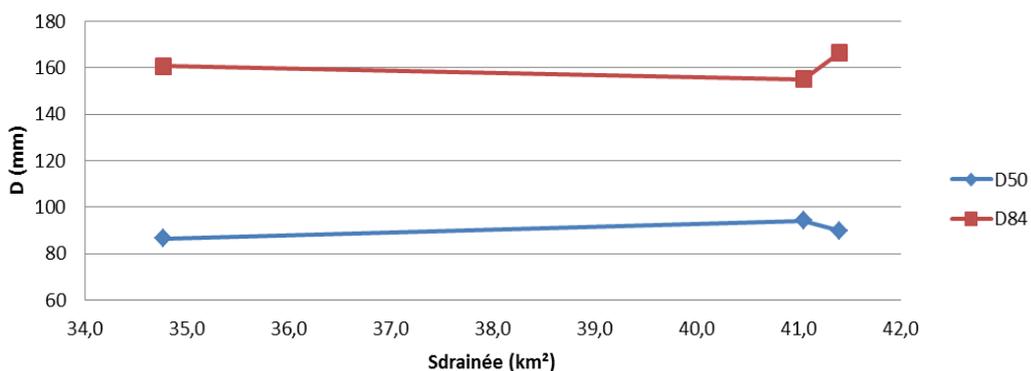


Figure 132 : Évolution du D50 et du D84 sur la Néburu

Le pic granulométrique aval, est associé à une singularité sur le profil en long, où on peut noter une rupture de pente (Fig. 133) avec une pente locale très forte.

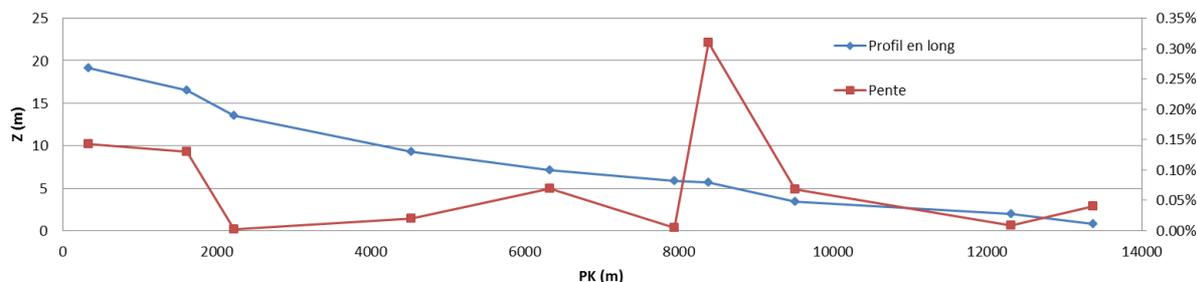


Figure 133 : Évolution de la pente sur la Thio

Cette forte rupture de pente nous amène à penser que cette zone pourrait correspondre à un front de dépôt pour la Thio, contrôlé par une pente hydraulique faible en aval. Cette hypothèse est renforcée si on met en correspondance les niveaux des laisses de crues relevées sur les terrasses à cet endroit (+7m au-dessus du fond du lit mineur) et l'évolution du profil en long depuis l'estuaire (Fig. 13 4). Dans cette hypothèse la pente géométrique locale s'effacerait devant une pente d'énergie beaucoup plus faible contrôlée (Fig. 134) par le niveau d'eau en aval (hypothèse importante pour les calculs).

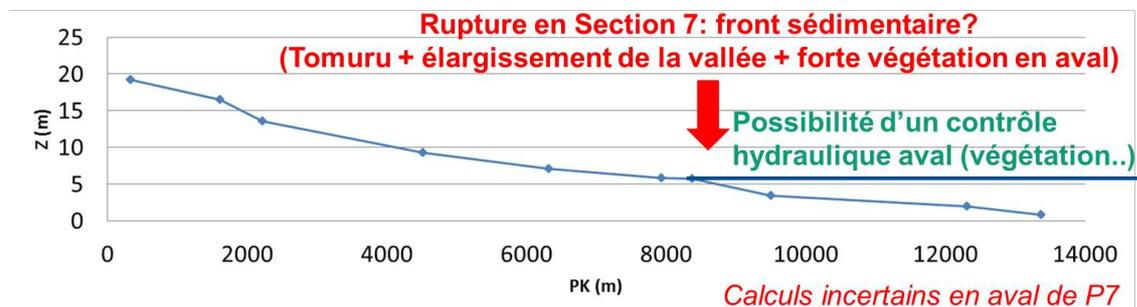


Figure 134 : Hypothèse d'un contrôle hydraulique aval

Dans la suite de notre propos, nous utiliserons la pente du lit (0.05% à 0.1%) pour les calculs en aval de la section 7, mais les résultats seront entachés de fortes incertitudes car il faudrait en toute rigueur utiliser la pente d'énergie en crue, qui peut être influencée par les niveaux de marée (il faudrait construire un modèle numérique pour être plus précis).

L'évolution de la largeur active (partie du lit vraisemblablement mobilisée lors des grosses crues, Fig. 135) montre les mêmes singularités, avec un élargissement au niveau des confluences Nakalé, Néburu, et Tomuru.

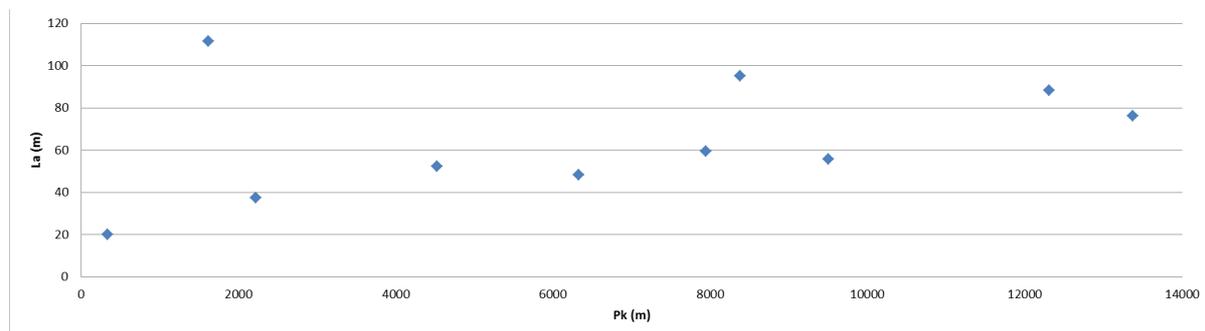


Figure 135 : Évolution de la largeur active sur la Thio

4.2.1.7. Les calculs

Nous allons estimer les flux de sédiments transportés par **charriage**, c'est-à-dire de la charge grossière (depuis les sables jusqu'aux blocs) se déplaçant près du fond, et responsable des changements de la morphologie du lit des cours d'eau. Le transport de fines sera discuté en fin de chapitre.

La méthode proposée est classique, et relie la force hydraulique de l'écoulement à un flux de matériau en mouvement, ce qui se fait via deux lois (Fig. 136) :

- **Une loi de frottement** : elle transforme le débit (Q) s'écoulant sur la surface rugueuse du lit (granulométrie des sédiments) en force F ; on parle plus couramment de contrainte τ , qui n'est autre que la force divisée par la surface du lit (la force exercée par m²) ;
- **Une loi de transport** : elle donne une estimation du flux de matériaux que cette force de l'écoulement est capable de mobiliser.

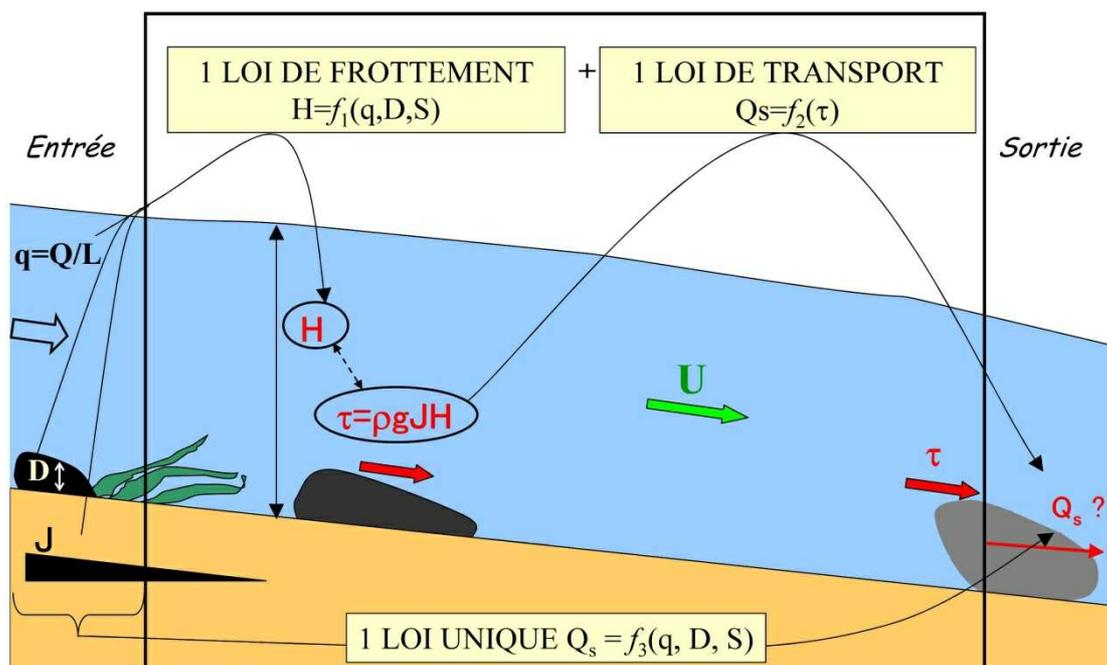


Figure 136 : Principe de modélisation de l'hydraulique et du transport solide en rivière (Extrait du guide Onema : Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière)

L'ensemble des calculs a été réalisé avec le programme BedloadWeb disponible en ligne sur internet (<http://www.bedloadweb.com/>) et spécialement conçu pour assister les non spécialistes ; des guides d'approfondissement sont par ailleurs disponibles [Malavoi et al., 2011; Recking et al., 2013].

4.2.2. RÉSULTATS

Le programme offre la possibilité de tester plusieurs formules de transport solide : [Meyer-Peter and Mueller, 1948; Einstein, 1950; Schoklitsch, 1962; Engelund and Hansen, 1967; Bagnold, 1977; Parker, 1979; Smart, 1983; Van Rijn, 1984; Parker, 1990; Rickenmann, 1991; Wilcock and Crowe, 2003; Wong and Parker, 2006; Camenen and Larson, 2007; Lefort, 2007; Recking, 2013]. Lorsque toutes ces formules sont testées ensemble, le résultat indique une nette différence de comportement entre la Thio et ses creeks (Fig. 137).

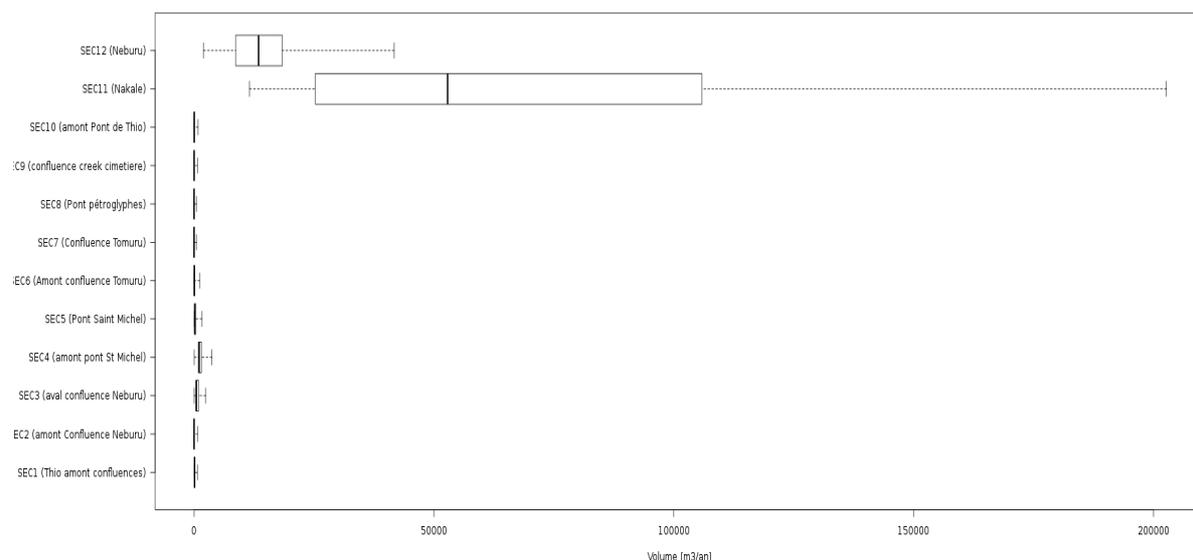


Figure 137 : Valeurs du transport solide (m3/an) prédit par toutes les formules pour chaque section (les barres indiquent la médiane, les quartiles les min et max)

Lorsqu'on restreint l'analyse aux seules formules a priori valides (Fig. 138) pour les fortes pentes [*Meyer-Peter and Mueller, 1948; Smart, 1983; Rickenmann, 1991; Lefort, 2007; Recking, 2013*], le contraste est toujours bien marqué.

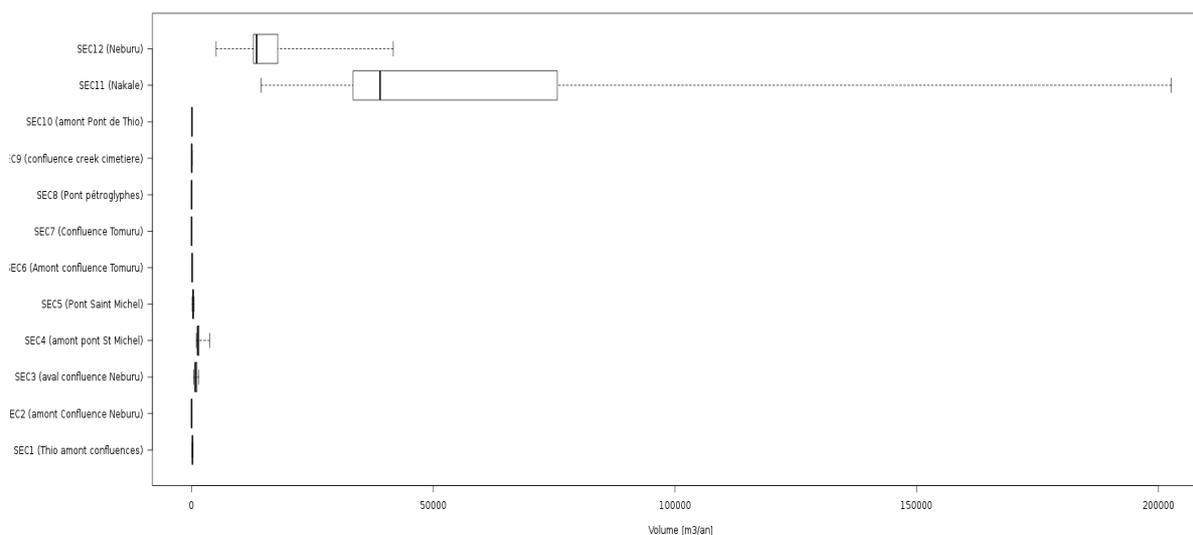


Figure 138 : Valeurs du transport solide (m3/an) prédit par les formules spécifiques aux fortes pentes (les barres indiquent la médiane, les quartiles les min et max)

Pour la suite, la formule Recking [2013] a été considérée dans la mesure où c'est la seule qui a réellement été validée sur des données de terrain (10000 valeurs, 3000 ayant servi à la construction de la formule et 7000 ayant servi à sa validation). Les résultats indiquent quelques centaines de m3/an pour la Thio et plusieurs milliers de m3/an pour les creeks (Fig. 139, Tabl. 31).

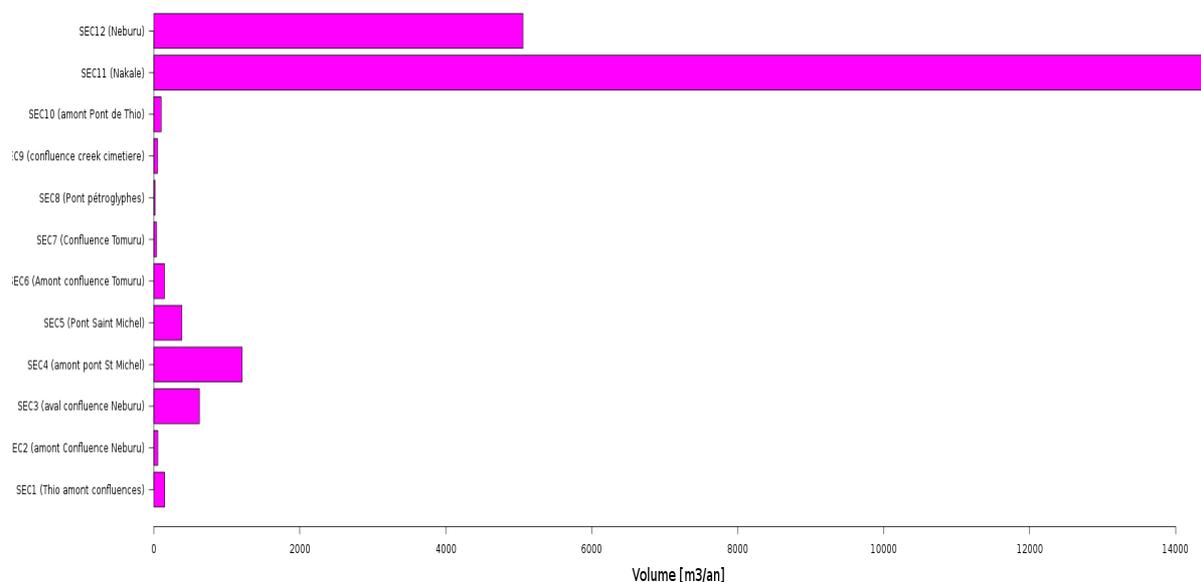


Figure 139 : Valeurs du transport solide (m3/an) prédit par la formule Recking (2013) validée pour le terrain

Tableau 31 : Valeurs du transport solide (m3/an, à multiplier par 2.65/2 pour les volumes apparents) prédits par la formule Recking (2013) validée pour le terrain

Section	m3/an
SEC1 (Thio amont confluences)	148
SEC2 (amont Confluence Neburu)	56
SEC3 (aval confluence Neburu)	625
SEC4 (amont pont St Michel)	1210
SEC5 (Pont Saint Michel)	384
SEC6 (Amont confluence Tomuru)	148
SEC7 (Confluence Tomuru)	38
SEC8 (Pont pétroglyphes)	18
SEC9 (confluence creek cimetièrè)	51
SEC10 (amont Pont de Thio)	102
SEC11 (Nakale)	14372
SEC12 (Neburu)	5059

Il est très difficile d'interpréter les petites variations de transport calculées d'une section à une autre sur la Thio. Cela peut traduire qu'on est en présence de zones préférentielles de dépôt ou d'érosion. Mais les différences sont suffisamment faibles pour nous placer dans la zone d'incertitude des calculs et la seule conclusion qu'on peut faire à ce stade est que les calculs confirment bien les conclusions de l'approche géomorphologique, à savoir un transport important dans les creeks, et un transport quasi nul

à faible dans la Thio. Comme le phénomène de transport répond de façon non linéaire aux changements de l'hydraulique, on peut s'interroger sur les conséquences d'une utilisation d'un hydrogramme moyenné au pas de temps journalier, car les débits maximums ne sont pas pris en compte dans le calcul. Pour tester cet effet on a utilisé l'hydrogramme de la crue de 2015 relevé au pas de temps 5 min. Les résultats présentés dans le tableau 32 indiquent que les différences du calcul au pas de temps journalier et au pas de temps 5 min sont réelles, mais pas démesurées, et ne remettent pas en cause les conclusions du calcul au pas de temps journalier

Tableau 32 : Calculs de transport solide effectués pour la crue de 2015, au pas de temps journalier et au pas de temps 5 min

Section	Volume m3 dt Jour	Volume m3 dt min	Ratio volumes dt Jour/ dt min
SEC1 (Thio amont confluences)	252	477	1.89
SEC2 (amont Confluence Neburu)	91	222	2.44
SEC3 (aval confluence Neburu)	930	989	1.06
SEC4 (amont pont St Michel)	1961	1943	0.99
SEC5 (Pont Saint Michel)	575	580	1.01
SEC6 (Amont confluence Tomuru)	238	608	2.56
SEC7 (Confluence Tomuru)	52	311	5.98
SEC8 (Pont pétroglyphes)	27	115	4.24
SEC9 (confluence creek cimetièrè)	75	315	4.18
SEC10 (amont Pont de Thio)	167	448	2.68
SEC11 (Nakale)	11383	5296	0.47
SEC12 (Neburu)	8599	7812	0.91

4.2.2.1. Quelques mots sur la suspension

En général, on aborde la problématique de la suspension par de la mesure en continu, avec un turbidimètre couplé à des échantillonnages de MES pour la calibration.

L'approche calculatoire est très compliquée (probablement plus compliquée que l'estimation du charriage de la charge grossière). Des formules ont été proposées mais uniquement pour des rivières à lits de sables, où la transition entre charge de fond et charge en suspension se fait progressivement au fur et à mesure que la contrainte augmente. Pour pallier cette lacune, des travaux récents [Misset et al., 2019] ont utilisé la mobilité du lit comme un proxy de la charge en suspension. Cette approche est partie du constat qu'une grande partie de la charge fine transportée en crue se trouve actuellement déjà en place, avant la crue, dans les interstices du lit du cours d'eau. Elle ne prend pas en compte les apports directs des versants pendant la crue, et ne permet donc d'accéder qu'à une fourchette basse.

La formulation relie par une loi puissance la concentration en suspension et le débit solide par charriage. Lorsqu'on l'applique à la Nakare par exemple, on obtient un volume transporté de l'ordre de 60 000m³/an (80 000 m³/an en volume apparent). Ce calcul devrait être appliqué à la Thio et à chaque Creek, et le chiffre total ne serait qu'une sous-estimation du transport réel.

Cela nous amène à la conclusion que probablement plusieurs centaines de milliers de m³ de sédiments sont transportés chaque année par suspension vers l'océan (une partie non négligeable de cette charge se trouvant piégée sur les terrasses par effet peigne de la végétation).

4.2.3. CONCLUSION

Deux approches ont été mises en œuvre pour essayer de comprendre la dynamique sédimentaire de la Thio et de ses creeks : l'approche géomorphologique et l'approche calculatoire.

L'analyse géomorphologique du bassin versant a permis de retracer l'évolution de la Thio et ses creeks depuis les débuts de l'exploitation minière, et de poser un diagnostic sur leur fonctionnement actuel.

Nous avons mis en évidence un passé commun à la Thio et ses affluents, avec notamment une forte période d'exhaussement qui a engendré de hautes terrasses, suivie d'une période de purge avec enfoncement du lit mineur dans ces terrasses. La figure 140 propose une schématisation résumant la dynamique actuelle de la Thio.

La Thio et ses creeks présentent cependant un fonctionnement actuel très contrasté, la Thio étant peu dynamique, voire pavée, alors que les creeks transportent encore abondamment des sédiments grossiers. Ces conclusions ont été confortées par les résultats des calculs. Nous l'interprétons par l'existence de déconnexions sédimentaires qui pourrait être due en partie aux digues routières.

La dynamique de la Thio pourrait donc être essentiellement une dynamique de fines (transport par suspension) qui seraient apportées depuis les creeks de façon non négligeable pour se déposer sur les terrasses (un dépôt accentué par effet peigne de la végétation), ainsi qu'à l'estuaire. Dans ce scénario, les sédiments grossiers de la Thio ne seraient mobilisés que lors des crues extrêmes (cyclones).

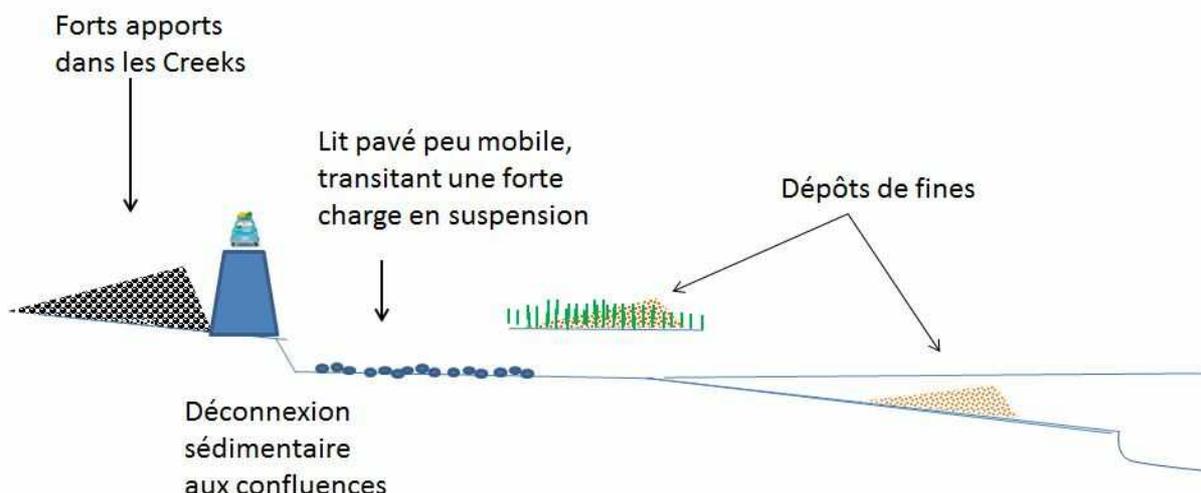


Figure 140 : Schématisation et résumé de la dynamique actuelle

Concernant les creeks, étant donné la dynamique actuelle et les stocks toujours en place sur les versants, on peut envisager que le déstockage pourrait se produire encore sur de longues années (ce qui limite les possibilités de remédiation pour les populations vivant en aval des creeks). En ce qui concerne la Thio, il est peu probable que les stocks présents dans les terrasses (très haut perchées par rapport au lit actif actuel) puissent être remobilisés par des crues, même extrêmes, ce qui signifie que le paysage est probablement impacté pour des très longues périodes.

5. ETAT ET FONCTIONNEMENT ACTUEL : LES MATIÈRES EN SUSPENSION

La capacité de prédire la variabilité spatiale et temporelle des flux de matières en suspension (MES ; fraction de sédiments <63µm) et les impacts sociétaux, économiques et environnementaux associés, impliquent non seulement la compréhension des mécanismes de l'érosion par les particules fines des mines et d'autres sources (e.g. griffes d'érosion, feux de forêt), mais aussi leur devenir - suspension, dépôt et remobilisation - le long du réseau hydrographique. Une meilleure compréhension de ces processus de transfert sur la Thio, doivent permettre d'améliorer nos estimations du bilan sédimentaire à l'échelle du bassin versant et d'évaluer, par exemple, l'efficacité de programmes de restauration et de gestion des eaux pluviales (EP) sur terrain minier.

Le travail sur les sédiments en suspension (MES) dans le cadre du programme IMMILA a été mené en trois phases complémentaires :

- La mise en place et l'application de méthodes pour évaluer l'**origine des sédiments** en suspension dans le bassin versant, à savoir les sédiments d'origine minière (ou déchets miniers) vs. les sédiments provenant d'autres sources sédimentaires (feux, glissement de terrain naturels) ;
- La **quantification du colmatage** du substrat des chenaux de la Thio et des affluents par les sédiments fins pouvant constituer une source importante de sédiments en suspension dans le réseau hydrographique de la Thio facilement remobilisables lors des cyclones ;
- L'estimation **des flux** de MES à l'exutoire de la Thio qui transitent ensuite jusqu'au lagon.

Les méthodes, résultats et discussion de ces trois phases sont détaillés dans les parties suivantes.

5.1. TRAÇAGE DES MATIÈRES EN SUSPENSION DANS LE BASSIN VERSANT DE THIO

Auteurs : V. Sellier et O. Evrard (LSCE-CEA), O. Navratil (Univ. Lyon), G. Mériaux, L. Nemouadjou – Annexe 9-1

Les travaux présentés dans cette section s'insèrent dans la thèse de Virginie Sellier, soutenue en Juin 2020 : « Développement de méthodes de traçage sédimentaire pour quantifier l'impact des mines de nickel sur l'hyper-sédimentation des rivières et l'envasement des lagons de Nouvelle-Calédonie ».

5.1.1. OBJECTIF

Ce volet de l'étude, vise à mettre en place et à appliquer des méthodes de traçage des matières en suspension (MES). L'objectif est d'évaluer l'origine des MES (qualification) dans le bassin versant, à savoir les sédiments d'origine minière (ou déchets miniers) vs. les sédiments provenant d'autres sources sédimentaires (feux, glissement de terrain naturels).

De nombreuses approches de traçage sédimentaire qualifiées de *fingerprinting* dans la littérature scientifique sont développées depuis les années 1970 pour déterminer l'origine spatiale et la dynamique temporelle des sédiments transportés par le réseau hydrographique (Walling et al. 1979, Collins et al., 1996). Ces techniques reposent sur l'analyse d'un ensemble de propriétés physiques et chimiques conservatives tant au sein des sédiments que de leurs sources potentielles. La capacité d'une ou plusieurs de ces propriétés à discriminer les sources entre elles permet alors, par le biais d'un modèle de mélange, d'estimer la contribution relative de chacune de ces sources.

Sur le bassin versant de Thio, nous pouvons distinguer différentes sources sédimentaires (Tabl. 33) :

- Type 1 : les sources minières associées aux activités minières actuelles et passées à savoir : les surfaces d'exploitation minières à ciel ouvert en activité et abandonnées, les décharges sur les versants (arrêtée en 1975), les zones de prospection minières (pistes créées de 1952 à 1976 principalement), ainsi que les arrachements et loupes d'érosion qu'elles ont entraînées (déstabilisation de versant). Ces sources minières se situent exclusivement sur une lithologie de type péridotite.
- Type 2 : les sources d'érosion naturelle, i.e. griffes d'érosion liées à l'activité cyclonique et aux fortes pentes. Ces sources se situent indifféremment sur lithologie de péridotite et volcano-sédimentaire (griffes d'érosion de type lavaka) ;
- Type 3 : les sources d'érosion associées aux feux de forêts (érosion de surface et glissement de terrain) ; ces feux de forêts sont d'origine anthropique et touchent en grande majorité des lithologies de type volcano-sédimentaire (d'après les cartographies des feux menés à partir d'images satellites Sentinel-2) ;
- Type 4 : les érosions liées au surpâturage par les cervidés et autres invasifs qui touchent indifféremment des lithologies de péridotites et volcano-sédimentaires.

Tableau 33 : Synthèse des différentes sources sédimentaires et lithologies associées

Source d'érosion sur le bassin versant de la Thio		Lithologie		Part de la surface des zones érodées occupée par ces sources (Garcin, 2017)
		Péridotite	Volcano-sédimentaire	
Type 1	Minière	•		95%
Type 2	Naturelle	•	•	} 5% pour ces 3 types
Type 3	Feu		• (majoritairement)	
Type 4	Cervidé/invasifs	•	•	

Nous cherchons dans cette étude à discriminer les sédiments provenant des sources minières (type 1), des sédiments issus d'autres sources sédimentaires, ie. sources non-minières (types 2, 3, 4). Ainsi, les objectifs de ces travaux sont (1) de mettre en place une méthode pour évaluer les contributions respectives de différentes sources sédimentaires aux sédiments transitant dans la Thio jusqu'à son delta ; (2) d'appliquer cette méthode à plusieurs événements cycloniques.

Nous rappelons ici que les résultats de la méthode appliquée sur des sédiments déposés à l'exutoire du bassin versant depuis plusieurs décennies portaient sur l'analyse d'un carottage sédimentaire afin d'essayer de remonter sur les contributions passées des différentes sources ayant contribué aux dépôts échantillonnés dans la carotte.

5.1.2. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Pour estimer la contribution de chacune de ces sources, des laisses de crues (n=43), qui offrent une alternative aux prélèvements de matières en suspension, ont été collectées le long de la rivière Thio et de ses affluents selon **l'approche de traçage par type d'affluents développée** par Lacey et al. (2017).

Dans notre cas, nous cherchons à évaluer la part relative des sources minières (type 1) et non-minières (type 2, 3, 4). Nous avons donc identifié des sous-bassins versants miniers et des sous-bassins versants non-minières.

Il est important de noter à ce stade que les sous-bassins versants miniers drainent des sources minières, mais également d'autres sources, sédimentaires, (essentiellement de type 2 et 4), complexifiant ainsi l'analyse.

Deux campagnes de prélèvement ont été réalisées ; la première après la crue du 25 février 2015 générée par une dépression tropicale et la seconde après la crue associée au Cyclone Cook (10 avril 2017). Au niveau de chaque site d'échantillonnage, l'opérateur a collecté à l'aide d'une spatule en plastique un échantillon de sédiment déposé par la crue et composé de 5 à 10 sous-échantillons prélevés sur une surface de 10 m². Seize prélèvements ont été réalisés sur l'ensemble des sous-bassins miniers (Tomuru, Mué, Creek, cimetièrre, Nakalé, Nembrou, Koua, Creek Jeanne et Marie, Creek Vincent et la section amont de la Thio) tandis que huit ont été échantillonnés sur des sous-bassins versants non-miniers (Fanama, Kouaré, Kouergoa, Watou).

Aucune laisse de crue n'a été trouvée à l'aval des sous-bassins drainant des massifs de péridotites sans exploitation minière, à l'exception de la Watou pour laquelle un glissement de terrain naturel récent a eu lieu. Dix-neuf échantillons ont, quant à eux, été prélevés le long de la rivière Thio afin de caractériser les matières en suspension qui y sont transportées (Fig. 141).

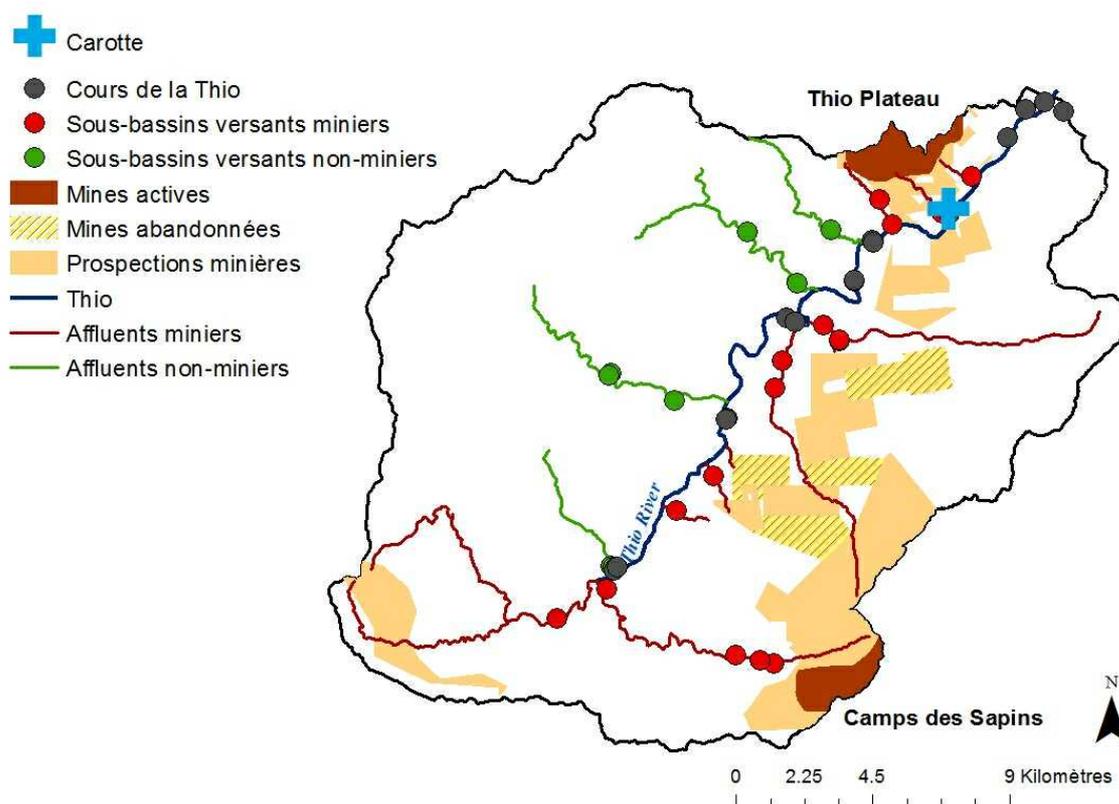


Figure 141 : Localisation des prélèvements des sédiments déposés i) le long de la Thio, ii) au niveau des sous-bassins versants miniers et non miniers, et iii) au niveau de la zone deltaïque (carotte sédimentaire).

Une carotte sédimentaire a également été prélevée dans la plaine alluviale du bassin versant de Thio (Latitude : 21.635784 (Sud); Longitude: 166.196738 (Est)) en avril 2016 (Figure 142). Cette dernière a été réalisée à l'aide d'une tarière manuelle dans un champ. Une accumulation sédimentaire très importante a été observée par le propriétaire du champ dans cette zone et celle-ci serait due au transport de matériaux provenant des affluents situés en amont de ce champ et plus particulièrement de Tomuru, Nembrou, Nakalé et Mué (Gosset, 2016). Aucun signe d'érosion n'a été observé à proximité du site de carottage, c'est pourquoi il a été émis l'hypothèse que ce profil sédimentaire correspondait à des dépôts sédimentaires successifs générés par d'anciennes crues. Cette carotte sédimentaire mesure 1,62 m de longueur et se traduit visuellement par la succession de couches de différentes couleurs (rouge-orangé, gris-noir) et de différentes granulométries (fins, sableux) (Figure 143). Cette carotte sédimentaire a donc été découpée en 32 sous-échantillons selon ces caractéristiques (couleur, granulométrie).



Figure 142 : Carotte sédimentaire prélevée en aval du bassin de la Thio

Les échantillons ont été séchés à l'étuve à 40 °C pendant 48 h et tamisés à 63 μm . Des analyses de spectrocoulométrie, de fluorescence X et de spectrométrie gamma ont été menées sur ces échantillons.

5.1.2.1. Spectrocoulométrie

Collaboration avec C. Legout, UMR-CNRS 5100 IGE

L'appareil utilisé est un spectrocoulomètre Minolta 2600d (Fig. 143) disponible à l'IGE, anciennement le L.T.H.E (Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et en Environnement) à Grenoble. Portable, à sphère d'intégration et à l'ergonomie horizontale, il est parfaitement adapté pour la mesure précise des couleurs des échantillons plans ou de grandes dimensions. Il intègre une technologie brevetée par Konica Minolta, pour le contrôle de la réflexion spéculaire (NGC). Une technologie mathématique permet de réaliser les mesures simultanées en mode SCI/SCE (réflexion spéculaire incluse et exclue) (Minolta color communication). Sa résolution de 10 nm couvre le domaine du visible, c'est-à-dire de 360 à 740 nm. Les mesures sont faites par une ouverture de mesure de 3 mm de diamètre.

Avant de démarrer les mesures, une calibration automatique de l'appareil doit être faite. Celle-ci se fait d'abord dans l'air puis sur une calibration blanche fournie avec l'instrument. Une deuxième calibration dite de vérification se fait sur des plaques témoins de couleur verte, rouge, noir, blanche et jaune. Cette manipulation est répétée en fin de mesures afin d'identifier une éventuelle dérive de l'appareil. Nous utilisons un piège à lumière pour que seule la lumière diffuse soit enregistrée. Ceci donne une évaluation de la couleur de l'échantillon telle que la voit un observateur et elle est indépendante de son état de surface.



Figure 143 : Spectrocoulomètre Minolta

Les échantillons de fraction $<63 \mu\text{m}$ ont été tamisés et conditionnés dans des flacons en polystyrène. Pour évaluer l'incertitude de la mesure, des triplicats sont réalisés à différents endroits dans la zone de mesure, puis une moyenne est calculée. La spectrocoulométrie fournit un spectre de réflectance compris entre 360 et 740 nm. Ce spectre est ensuite traité pour déterminer différents paramètres couleurs : L^* , a^* , b^* , L , a , b , C^* , h , x , y , z , u^* , v^* , u' et v' . À titre d'exemple, dans l'espace couleur $L^*a^*b^*$, lorsque que les valeurs de L^* sont positives, la clarté de l'échantillon est orientée vers le blanc

(l'échantillon mesuré est donc plus clair ; Fig. 144). Les indices a^* et b^* indiquent la couleur du sédiment. Si les valeurs a^* sont positives, la couleur tend vers le rouge et, si elles sont négatives, elle tend vers le vert. Et pour les valeurs de b^* , si celles-ci sont positives, la couleur tend vers le jaune et au contraire, négatives, elle s'oriente vers le bleu (Fig. 145).

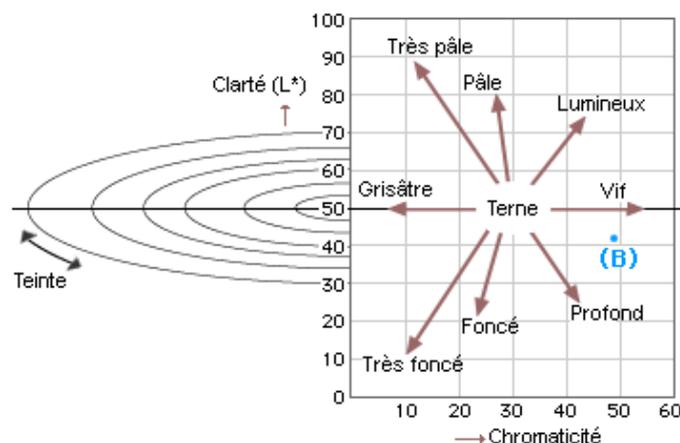


Figure 144 : Diagramme représentant différents niveaux de clarté (konikaminolta.eu)

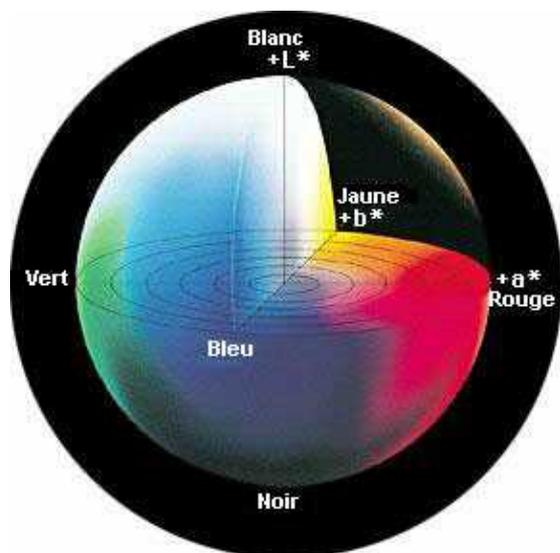


Figure 145 : Diagramme de représentation des coordonnées chromatiques (a^* et b^*) et de la clarté (L^*) (konikaminolta.eu)

5.1.2.2. Fluorescence des rayons X

La fluorescence des rayons X (XRF : *X-ray fluorescence* en anglais) est une technique non destructive qui sert à quantifier la composition élémentaire des échantillons solides et liquides. Les rayons X sont envoyés pour exciter les atomes présents dans l'échantillon, ce qui leur fait émettre à leur tour des rayons X à l'énergie caractéristique de chaque élément présent.

Les mesures en fluorescence X ont été menées au Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE) sur un appareil de fluorescence X à énergie dispersive (Epsilon 3, Malvern Panalytical) (Fig. 146). Les échantillons ont été analysés dans des cellules SMH (*Small Mass Holder*) composées de deux films Mylar. Une calibration de l'appareil a été nécessaire afin de pouvoir analyser les éléments suivants : Mg, Al, Si, K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Co et Zn. Cette calibration s'est faite en utilisant des standards certifiés dont certains provenant de l'Agence Internationale de l'Energie



Atomique (IAEA) . Les coefficients de corrélation associés aux droites de calibration des différents éléments (R^2 entre 0,90 et 0,99) sont très satisfaisants. Pour valider la calibration de l'appareil, trois standards certifiés différents de ceux utilisés pour la calibration ont été testés. Le pourcentage d'erreur moyen entre les concentrations estimées par l'appareil et celles attendues était de 17 %. En revanche, les tests de validation sur le Co ne se sont pas révélés probants ; cet élément n'a donc pas pu être analysé. Les mesures de fluorescence X ont été réalisées en triplicats pour chacun des échantillons.

Figure 146 : Photographie de l'appareil de fluorescence X à énergie dispersive (ED-XRF)

5.1.2.3. Analyses de spectrométrie gamma

La spectrométrie gamma est une technique de mesures non-destructive utilisée en physique nucléaire pour quantifier l'activité ($Bq.kg^{-1}$) d'un grand nombre de radionucléides présents naturellement ou artificiellement dans l'environnement. Ces radionucléides ont la propriété de pouvoir émettre des rayonnements gamma à un niveau d'énergie qui leur est propre. Ces rayonnements sont interceptés par un détecteur à rayons gamma et convertis en activité. Dans le cas présent, il s'agit d'un détecteur gamma composé d'un cristal de germanium installé au Laboratoire Souterrain de Modane (LSM). Ce laboratoire présente le bruit de fond cosmique le plus faible de France et est adapté à l'analyse d'échantillons pouvant présenter de très faibles activités. Deux catégories de radionucléides ont été analysées :

- Radionucléides géogéniques : le thorium 228 (^{228}Th), l'uranium 238 (^{238}U) et le potassium 40 (^{40}K) ; ces radionucléides sont naturellement présents dans les roches. L'activité du ^{228}Th est déterminée à partir de celles de ses deux radionucléides-fils produits en équilibre séculaire, le plomb 212 (^{212}Pb) à 239 keV et le thallium 208 (^{208}Tl) à 583 keV. De la même façon, l'activité en ^{238}U a été déterminée par l'activité du ^{214}Pb à 295,2 et 351,9 keV. Enfin, l'activité du ^{40}K a été calculée à partir de son pic d'émission à 1460 keV. Pour la présentation des résultats, les activités de ces radionucléides géogéniques ont été converties en $mg.kg^{-1}$, soit en concentrations.
- Radionucléides issus de retombées atmosphériques : le césium 137 (^{137}Cs) et le plomb 210 ($^{210}Pb_{xs}$) ; le ^{137}Cs est un radionucléide artificiel émis dans l'environnement par les essais thermonucléaires des années 1952-1974. Ce dernier, formé dans l'atmosphère, retombe et se fixe de façon presque irréversible aux argiles fines situées à la surface du sol. L'activité du césium 137 a été quantifiée à partir de son pic d'émission à 662 keV. Le plomb 210 (^{210}Pb) est un radionucléide naturel issu de la chaîne de désintégration de l'uranium 238 (^{238}U) présent lui aussi naturellement dans les sols (Le Gall, 2016). Au cours de la désintégration de ce dernier, du radon 222 est produit. Celui-ci s'échappe en partie vers l'atmosphère où il se désintègre et produit du ^{210}Pb . Ce ^{210}Pb s'ajoute à celui produit dans le sol par désintégration de ^{238}U . Le plomb de l'atmosphère se retrouve en excès par rapport au ^{210}Pb , produit en équilibre séculaire par rapport au matériau parental. La différence entre ces deux plombs est nommée excès de ^{210}Pb ($^{210}Pb_{xs}$). Ce $^{210}Pb_{xs}$ dont les apports sont continus dans le temps (apports par les pluies) se retrouve également adsorbé aux particules fines du sol situées en surface. Son activité est mesurée en soustrayant l'activité totale du mesurée à 46.5 keV aux activités du plomb 214 (^{214}Pb) mesurée à 295,2 et 351,9 keV et du bismuth (^{214}Bi) à 609,3 keV.

5.1.2.4. Traçage sédimentaire

Trois approches de traçage sédimentaire basées respectivement sur la géochimie élémentaire, l'activité des radionucléides géogéniques et celle des radionucléides issus des retombées atmosphériques ont été appliquées dans cette étude. Une hypothèse d'utilisation de ces éléments a été associée à chacune de ces approches en se basant sur des données fournies à la fois dans la littérature et par des observations de terrain.

⊙ **Géochimie**

Les minerais nickélifères exploités en Nouvelle-Calédonie, à savoir les minerais latéritiques et saprolitiques, présentent des concentrations élevées en métaux lourds (Fe, Ni, Mn, Cr) (Schwertmann and Latham, 1986). L'érosion de ces zones pourrait donc fournir des sédiments présentant également des concentrations plus élevées en ces métaux que ceux fournis par les zones dépourvues d'activités minières (Tabl. 34).

⊙ **Radionucléides géogéniques**

Sevin (2014) a montré que les deux lithologies principales de la Nouvelle-Calédonie, à savoir les massifs de péridotites et les formations volcano-sédimentaires présentaient des concentrations très différentes en U, Th et K. Les formations volcano-sédimentaires sont enrichies en U, Th et K alors que les massifs de péridotites en sont appauvris (Fig. 148). Ces deux lithologies couvrent approximativement 90% de la superficie du bassin versant de Thio (Fig. 149).

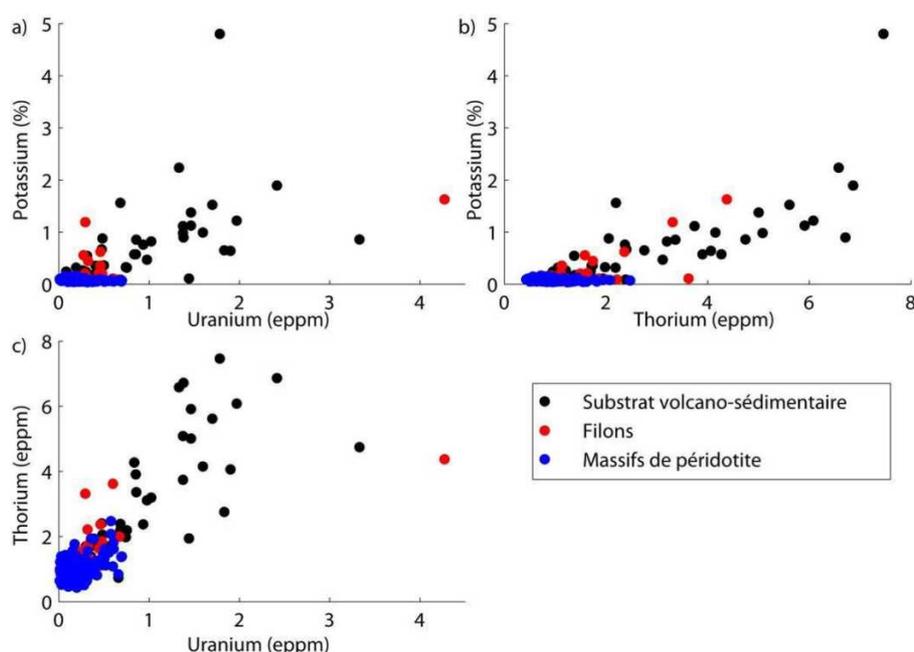


Figure 147 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium (a), de celles du potassium en fonction de celles du thorium (b) et de celles du thorium en fonction de celles de l'uranium (c) au sein de substrats volcano-sédimentaires ou, au contraire, de filons et massifs de péridotites (Sevin, 2014)

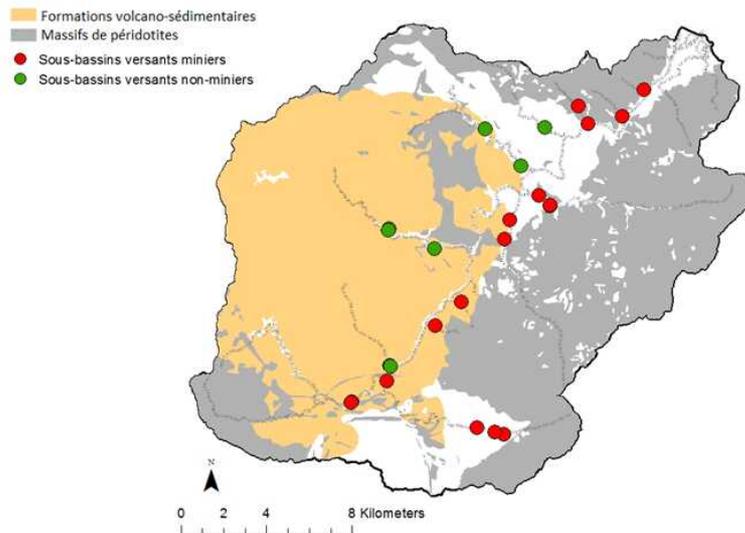


Figure 148 : Principales lithologies du bassin versant de Thio

Les concessions minières recouvrent les massifs de péridotites (cadastre minier, Garcin et al., 2018). Étant donné que ces radionucléides discriminent une lithologie plutôt qu'une occupation des sols, ils ne permettent pas *sensu stricto* de discriminer l'érosion naturelle des massifs de péridotites (type 2, 3, 4) de celle associée aux zones d'activités minières (type 1).

Néanmoins, Garcin et al. (2017) a montré que, sur l'ensemble du bassin versant de Thio, les « zones productives », autrement dit les zones en érosion et productrices de matériaux de différentes granulométries (zones d'érosion naturelle, de décharges et de sites minières) et les « zones actives », ie. zones potentielles d'apport en particules fines d'origine anthropique à la Thio, se situaient principalement sur les massifs de péridotites (Fig. 148).

Ces zones identifiées par télédétection ne constituent toutefois que des sources potentielles de sédiments à la Thio. Il est indispensable de caractériser l'érosion réelle de ces sources et leur connectivité avec la Thio ; ces processus pouvant être très variables spatialement et d'un événement cyclonique à l'autre (en lien avec la variabilité spatio-temporelle des pluies et la connectivité des sources avec la Thio).

D'après cette même étude, l'érosion naturelle représentait approximativement 12% des zones productives en 1954 (début de la mécanisation de l'activité minière), <5% en 1976 (après le « boom » du nickel) et moins de 5% en 2008 (pourcentage calculé à partir de la superficie estimée des zones productives de 1988 dont il est indiqué que cette superficie n'a pas évolué depuis 1988).

De ce fait, les surfaces érodées associées aux sources minières et d'origine minière ont dominé et dominent toujours actuellement sur les massifs de péridotites (à plus de 95% actuellement). Les teneurs en U, Th, K pourraient donc fournir des informations indirectes sur l'origine dominante des sédiments à la Thio en lien avec l'occupation des sols.

De faibles concentrations en U, Th et K dans les sédiments de la Thio seraient associées aux massifs de péridotites et donc majoritairement aux sources minières (type 1 ; à plus de 95%), alors que des sédiments présentant des concentrations élevées en U, Th et K seraient associés aux formations volcano-sédimentaires (sources non-minières de type 2, 3, 4) (Tableau 34).

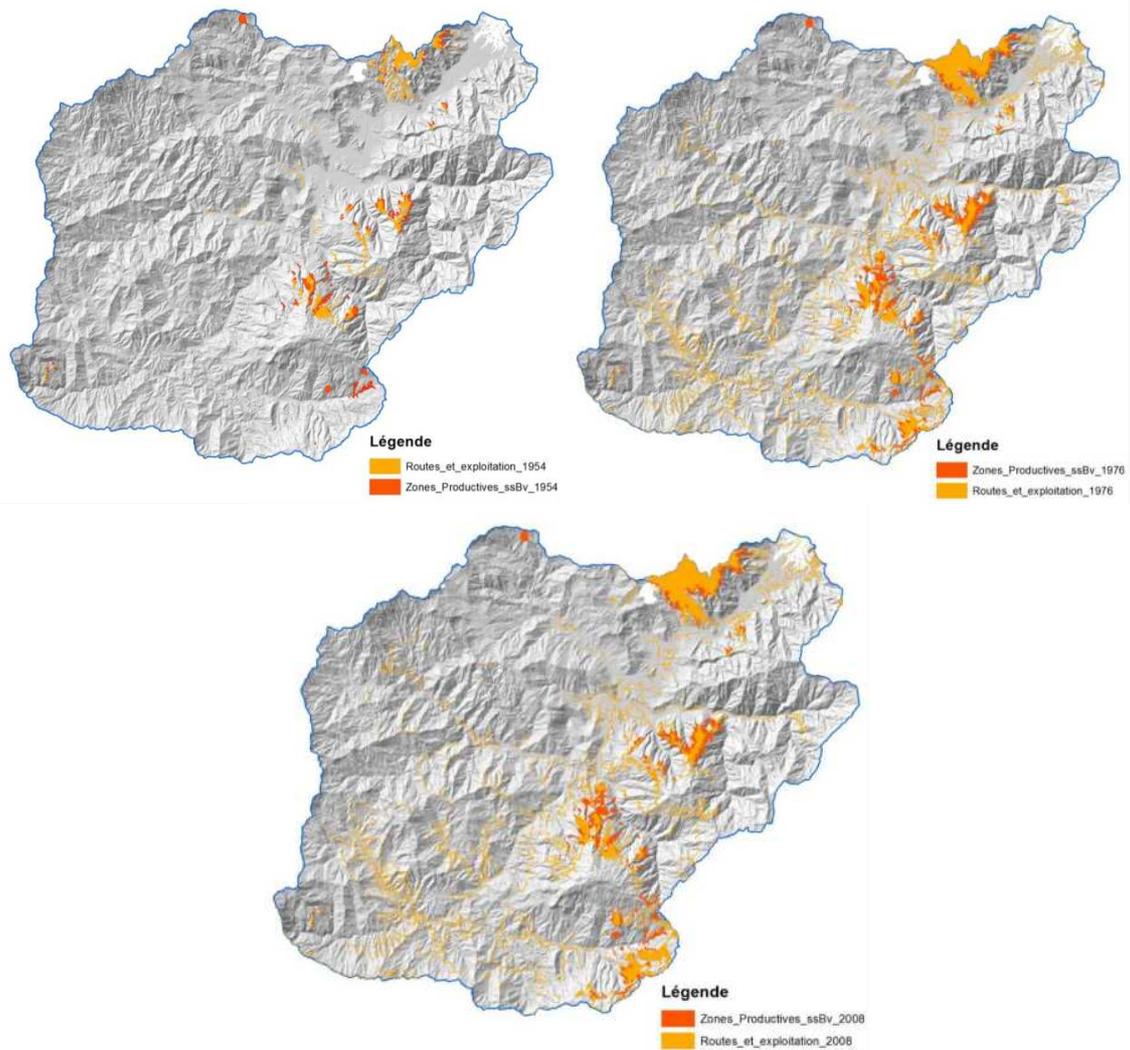


Figure 149 : Cartographie des surfaces des « Zones Productrices » et des « Zones Actives » sur le bassin versant de la Thio avec en haut et de gauche à droite : 1954, 1976 et en bas 1988 (source : Garcin et al., 2017)

Ces radionucléides sont généralement utilisés comme des traceurs d'érosion de surface/subsurface (Le Gall et al., 2016). Dans les zones touchées par les feux de brousse et le pâturage, les sédiments peuvent provenir d'un mélange de matériaux de surface (érosion due à la pente) et de sols de subsurface (glissements de terrain et érosion des berges).

⊙ **Radionucléides issus des retombées atmosphériques**

À l'inverse, les sédiments associés aux activités minières (stériles miniers, sols miniers, prospections et pistes minières) seront probablement composés principalement de matériaux de subsurface. L'hypothèse qui est faite ici est de considérer des sédiments présentant des activités faibles en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ comme pouvant provenir davantage de sources de subsurface (sources minières) alors que des sédiments présentant des activités plus élevées en ces radioéléments seront davantage associés à un mélange de sources de subsurface et de surface (sources non-minières) (Tabl. 34).

Tableau 34 : Récapitulatif des hypothèses de traçage sédimentaire envisagées

	Géochimie	Radionucléides géogéniques	Radionucléides issus de retombées atmosphériques
Cibles des familles de traceurs	Minerais nickélifères	Lithologies	Érosion de surface/ subsurface
Sous-bassins miniers	Enrichies en Ni, Fe, Mn, Cr	Appauvries en - U, Th, K	Appauvries en- ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$
Sous bassins non-miniers	Appauvries en Ni, Fe, Mn, Cr	Enrichies en U, Th, K	Enrichies en ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$

Une approche statistique a été menée sur chacune de ces familles de traceurs pour sélectionner la combinaison optimale de traceurs qui discrimine « le mieux » les sources entre elles. Cette approche se décompose en 3 étapes qui se déroulent selon l'ordre suivant : test de conservativité des propriétés, test discriminant et analyse factorielle discriminante.

La première étape sélectionne les propriétés conservatives, autrement dit cette étape vérifie que les concentrations/ activités mesurées dans les sédiments sont bien comprises dans la gamme de ces mêmes propriétés observées dans les sources potentielles (exemple du Ni, Fig.150). L'hypothèse faite ici est de considérer que les sédiments sont bien issus d'un mélange de sources minières et non-minières.

Pour tester statistiquement la conservativité des traceurs potentiels, un *range test* intégrant les valeurs minimales et maximales de chacune des distributions sources/ sédiments est appliqué sur l'ensemble des données.

La seconde étape a pour but de sélectionner parmi les propriétés conservatives, celles qui discriminent les sources entre elles. Le test statistique utilisé est le test U de Mann-Whitney ($\alpha = 0.05$).

Enfin, la troisième étape, à savoir l'analyse factorielle discriminante ($\alpha = 0.05$) en mode *backward*, sélectionne le nombre optimal de traceurs en sélectionnant ceux qui maximisent collectivement la discrimination entre les deux sources. Ces traceurs sont sélectionnés en minimisant la valeur de Lambda de Wilk avec $p < 0.5$ pour sélectionner un traceur et $p < 0.5$ pour supprimer un traceur.

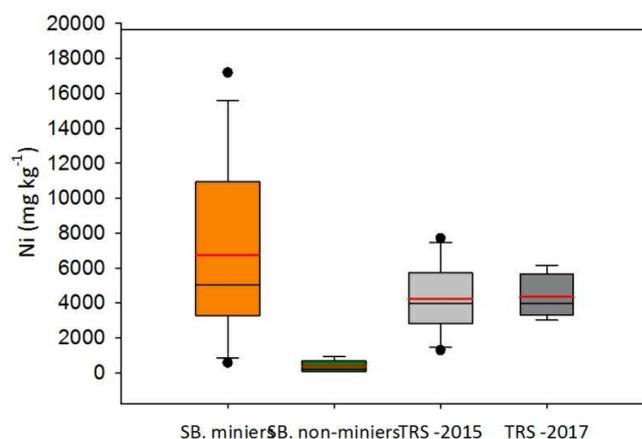


Figure 150 : Concentrations en Ni au sein des sédiments des bassins miniers, non-miniers, des sédiments de la Thio de 2015 et 2017

Un modèle de mélange statistique à deux sources, développé par Laceby and Olley (2015) et basé sur l'Equation 1 a ensuite été utilisé pour quantifier les contributions respectives des sources minières et non-minières dans les sédiments de la rivière Thio.

$$Ax + B(1 - x) = C \text{ (Equation 1)}$$

où A et B intègrent les distributions des paramètres moyens (traceurs) mesurés respectivement dans les sources minières et non-minières, x est la contribution de la source A , et C est la distribution des paramètres moyens (traceurs) modélisée pour les sédiments. Ce modèle a été appliqué via l'algorithme d'Opquest du logiciel Crystal Ball.

5.1.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

5.1.3.1. Description des sources

Les différences de couleurs observées entre les échantillons des sous-bassins miniers et des sous-bassins non-minières ont encouragé l'utilisation de la spectrorimétrie pour caractériser ces sources respectives.



Figure 151 : Photographies représentatives des sources minières (à gauche) et des sources non-minières (à droite)

En effet, les observations visuelles ont montré que les échantillons des sous-bassins miniers présentaient une couleur rouge-orangée alors que ceux présentant une teinte grise étaient davantage associés aux échantillons des sous-bassins non-minières (Fig.151).

Les analyses spectrorimétriques ont confirmé les différences de couleurs observées visuellement entre les deux sources. Les valeurs plus élevées en a^* (indicateur chromatique : vert \rightarrow rouge) et plus faibles en L^* (indicateur de clarté) montrent que les sources minières présentent des teintes plus foncées tirant sur le rouge-orangé. À l'inverse, les sources non-minières sont plus claires avec des valeurs en L^* plus élevées et moins rouges avec des valeurs en a^* plus faibles (Fig. 152). L'ensemble des paramètres colorimétriques analysés ($n=15$) confirment cette tendance.

Les couches latéritiques et saprolitiques exploitées par l'industrie minière présentent des teneurs élevées en oxydes de fer (goethite, hématite) (Schwertmann and Latham, 1986) et de manganèse (Ploquin et al., 2017) qui expliquent cette couleur rouge-orangée des sous-bassins miniers.

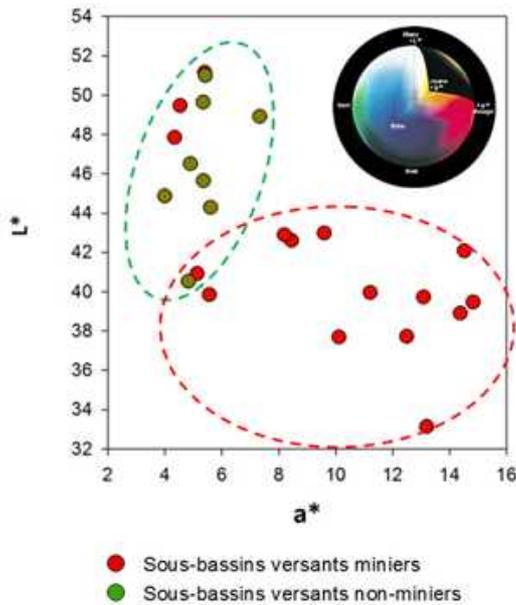


Figure 152 : Valeurs des paramètres colorimétriques L* (clarté) et a* (indicateur chromatique du vert au rouge) au sein des bassins miniers et non-miniers

Les analyses géochimiques réalisées par fluorescence X soulignent d'autant plus cet enrichissement en Fe et Mn pour les sous-bassins miniers que leurs concentrations y sont 2 fois plus élevées que dans sous-bassins non-miniers (Tab. 35). Néanmoins, ce sont les teneurs en Ni et Cr qui différencient davantage les sous-bassins miniers des sous-bassins non-miniers. Les teneurs en Ni mesurées dans les sous-bassins miniers sont 19 fois supérieures à celles mesurées dans les bassins non-miniers ; le facteur de proportionnalité (F) entre les deux sous-bassins est quant à lui de 10 pour le Cr. À l'inverse, ce sont les sources non-minières qui présentent des teneurs plus élevées en Ti (F= 4) et en Al (F= 3) que les sources minières.

Tableau 35 : Teneurs (moyennes \pm écarts-type) des différents éléments géochimiques analysés au sein des sources minières et non-minières

	Sous-bassins versants miniers (n=16)	Sous-bassins versants non-minières (n=8)
Al (g.kg ⁻¹)	21 \pm 21 4 - 71	67 \pm 8 51 - 78
Ca (mg.kg ⁻¹)	3731 \pm 470 297 - 14985	9286 \pm 5194 4524 - 21074
Cr (mg.kg ⁻¹)	7480 \pm 4606 1832 - 17682	706 \pm 967 45 - 2872
Cu (mg.kg ⁻¹)	26 \pm 18 0 - 60	50 \pm 18 26 - 87
Fe (g.kg ⁻¹)	144 \pm 70 63 - 256	62 \pm 24 48 - 119
K (mg.kg ⁻¹)	1657 \pm 2160 81 - 7030	14019 \pm 3702 5761 - 17440
Mg (g.kg ⁻¹)	99 \pm 59 16 - 203	16 \pm 13 5 - 37
Mn (mg.kg ⁻¹)	2531 \pm 1317 1171 - 4805	1439 \pm 606 957 - 2532
Ni (g.kg ⁻¹)	7 \pm 5 1 - 17	0.4 \pm 0.3 0.1 - 0.9
Si (g.kg ⁻¹)	178 \pm 42 52 - 230	254 \pm 28 196 - 281
Ti (mg.kg ⁻¹)	1409 \pm 2077 20 - 5940	5446 \pm 835 4452 - 6962
Zn (mg.kg ⁻¹)	146 \pm 47 91 - 224	125 \pm 4 118 - 130

Les teneurs en radionucléides géogéniques (U, Th, K) diffèrent entre les sous-bassins versants ; ces dernières sont 10 fois supérieures dans les sous-bassins non-minières par rapport aux sous-bassins miniers (Fig. 171 - a, c), ce qui corrobore les observations faites par Sevin (2014). Les sous-bassins miniers localisés exclusivement sur les massifs de péridotites présentent de faibles teneurs en U, Th, K alors que les sous-bassins non-minières principalement localisés sur des formations volcano-sédimentaires présentent des valeurs plus faibles en U, Th, K (Fig. 153 a, b et c).

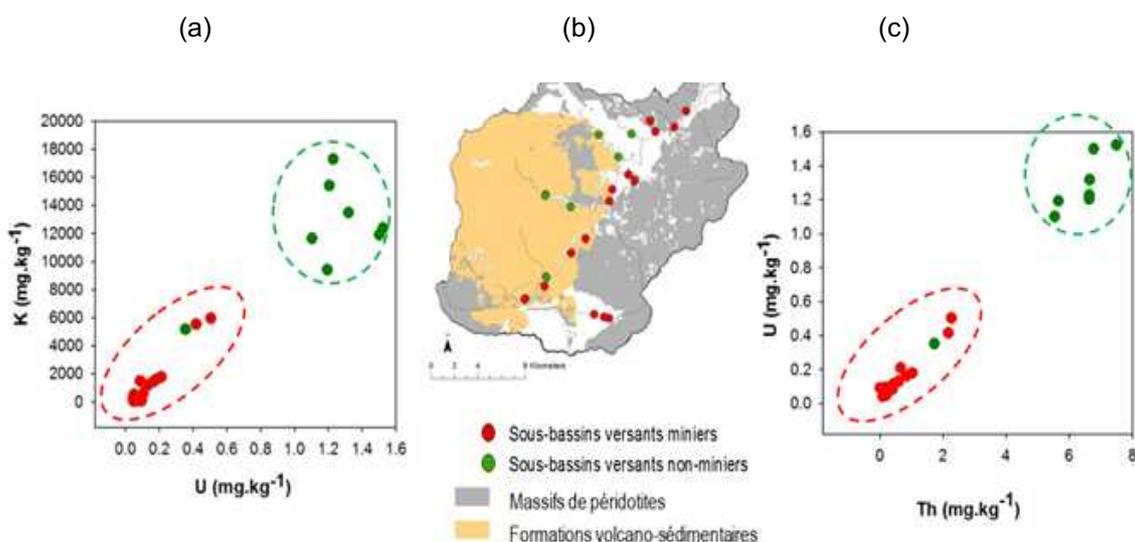


Figure 153 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium (a), et celles de l'uranium en fonction de celles du thorium (c) au sein des sous bassins miniers et non-minières en lien avec leurs sites de prélèvements (b)

Les activités en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ d'une dizaine d'échantillons-sources (sur un total de 25) n'ont pas pu être quantifiées car le niveau d'activités qu'ils présentaient était en dessous de la limite de détection de l'appareil. Les analyses de ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ faites sur les échantillons restants n'ont pas montré de différences significatives entre les deux sources (Fig. 155). De ce fait, l'approche de traçage sédimentaire basée sur ces radionucléides a été abandonnée.

Néanmoins, certaines observations peuvent être faites à partir de ces analyses. L'hypothèse initiale était de tester la capacité de ces éléments à discriminer les sources non-minières caractérisant à la fois des apports de subsurface (glissement de terrain, érosion le long des Creeks) et de surface (dégradation des sols liées aux feux de forêts et au pâturage) et les sources minières uniquement associées aux sources de subsurface (érosion des sols miniers, des pistes minières, des décharges minières). Le ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ se fixant de façon préférentielle aux particules fines à la surface du sol, des activités en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ plus élevées étaient attendues dans les sources non-minières que minières.

Cependant, les sédiments issus des sous-bassins non-minières ont montré des faibles activités en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (Fig. 154), qui ne permettaient pas de les différencier des sous bassins miniers. Elles ont même présenté des activités jusqu'à 10 fois inférieures à ce que l'on a pu observer pour des sources de surface dans sur la côte orientale de l'Australie (Gammes de moyennes en ^{137}Cs : 5 – 7 Bq.kg⁻¹, $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$: 79-144 Bq.kg⁻¹, Wilkinson et al., 2013). En raison des très faibles activités trouvées dans les sources non-minières, on peut en déduire que celles-ci traduisent une érosion importante des sols depuis la période des retombées en radionucléides dans cette région du monde (1952-1974). En conclusion, les processus d'érosion de subsurface dominant les apports sédimentaires arrivant dans la Thio.

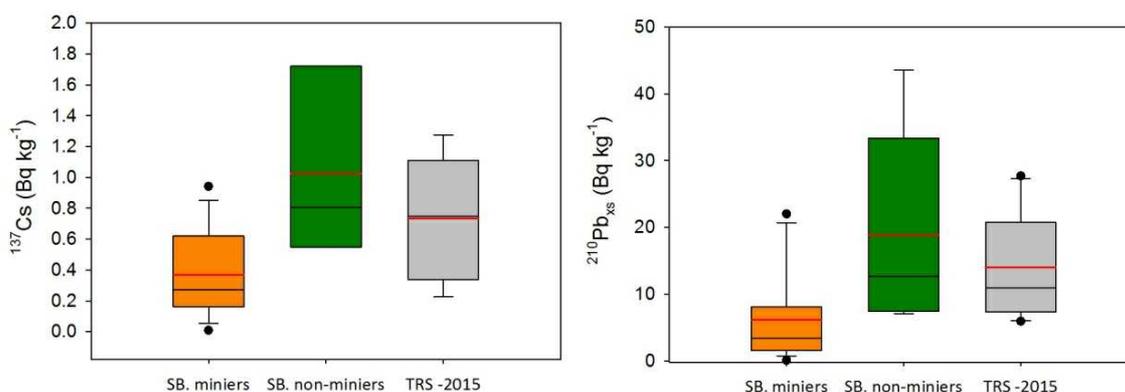


Figure 154 : Activités des radionucléides ^{137}Cs (à gauche) et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ (à droite) au sein des sédiments des sous-bassins miniers, non-minières et des sédiments déposés le long de la Thio lors de la crue de février 2015

Les résultats de l'approche statistique menée pour sélectionner les traceurs pour chaque approche de traçage sont résumés dans le tableau 36. Un seul traceur a été sélectionné pour chacune des approches, respectivement K pour la géochimie élémentaire et U pour les radionucléides géogéniques. Il est fréquent de combiner plusieurs propriétés pour discriminer les sources entre elles (Evrard et al., 2013). Néanmoins, dans le cas présent, ces éléments (K et U) se sont révélés suffisamment discriminants d'après l'analyse statistique pour être utilisés comme unique traceur des sous-bassins miniers et non-minières.

Les deux approches montrent des résultats similaires au niveau du Lambda de Wilk, de la variance expliquée par les variables et du pourcentage d'échantillons correctement classés. Cela s'explique par le fait que le K (géochimie) et l'U (spectrométrie gamma) discriminent tous deux les lithologies dominantes du bassin versant : les massifs où sont localisés les mines (représentant plus de 95% des sources d'érosion connectées) versus les formations volcano-sédimentaires.

Tableau 36 : Résultats des analyses statistiques menées pour sélectionner les traceurs optimaux sur chacune des familles de traceurs : « géochimie », et « radionucléides géogéniques »

	Géochimie (n = 11)	Radionucléides géogéniques (n = 3)
Étape 1 : Conservativité	Tous	Tous
Étape 2 : Test discriminant (test de Mann-Whitney)	Tous sauf Zn	Tous
Étape 3 : Analyse fonctionnelle discriminante	K	U
Lambda de Wilk	0.1691	0.1742
Variance expliqué par les variables (%)	83.1	82.6
Échantillons-sources correctement classés (%)	96	96

Les modèles de mélange associés à ces approches ont fourni des résultats similaires en termes de contributions des sources sur les deux événements météorologiques suivis. Pour l'événement de 2015, une différence maximale de 29% de contributions des sources a été observée entre les deux modèles alors que celle-ci était de 7% pour la crue engendrée par le cyclone Cook de 2017. Les résultats du modèle de mélange associé à l'approche de traçage géochimique (K) sont présentés ici.

5.1.3.2. Origines des sédiments transportés au cours de la crue de 2015

Les résultats du modèle de mélange montrent qu'en moyenne, 68 ± 25 % des sédiments transitant dans la Thio au cours de la crue de février 2015 proviennent des sous-bassins miniers (Tabl. 37). Néanmoins, la valeur plutôt élevée de l'écart-type associé à cette moyenne indique que la contribution des sous-bassins miniers fluctue le long de la Thio. La figure 173 montre notamment que, selon la nature de la confluence, c'est-à-dire soit entre un affluent minier et la Thio, soit entre un affluent non-minier et la Thio, les contributions des sources peuvent varier localement en aval de ces confluences.

En amont de la Thio, la contribution des affluents miniers domine les apports sédimentaires avec une contribution de 80 %. Néanmoins, c'est la contribution des affluents non-miniers qui domine (95 %) après la confluence avec la Kouaré. La proportion des sous-bassins miniers augmente à nouveau jusqu'à atteindre 86 % au niveau des affluents drainant la mine Thio Plateau (Creek cimetièrre, Tomuru, Mué). À l'estuaire, ce sont là encore les sous-bassins miniers qui dominent avec une contribution de 66 % (Tabl. 37, Fig. 155)

Tableau 37 : Contributions des sous-bassins miniers et non-miniers le long de la Thio au cours de la crue de février 2015

N° des échantillons des sédiments	Contributions des sous-bassins miniers (%)	Contributions sous-bassins non-miniers (%)
1 (amont)		
2		
3	95	5
4	95	5
5	20	80
6	69	31
7	46	54
8	79	21
9	33	67
10	86	14
	89	11
11 (aval ; estuaire)	69	31
	63	37
Moyenne (%)	68	32
Ecart-type (%)	25	25
Minimum (%)	46	5
Maximum (%)	95	80

La crue de février 2015 présente une valeur maximale de débit instantané à 3500 m³.s⁻¹, ce qui la catégorise comme étant une crue décennale. La dépression tropicale de février 2015 à l'origine de cette crue a généré 7 % des précipitations enregistrées cette année-là sur le bassin versant de Thio. La distribution spatiale de ces précipitations tend à expliquer la forte contribution de l'affluent non-minier Kouaré. En effet, la figure 156 montre une répartition spatiale des pluies plutôt hétérogène où la partie occidentale du bassin versant a été soumise à davantage de précipitations (F=2, 230 mm de précipitation enregistrés à la station pluviométrique Kouaré) que la partie orientale (136 mm de précipitation à la station Bel-Air).

Le sous-bassin versant de Kouaré a donc reçu deux fois plus de précipitations que le reste du bassin versant. Cependant et bien que les précipitations se soient concentrées sur ce sous-bassin versant, les contributions des affluents miniers sont restées majoritaires sur l'ensemble du bassin versant avec une proportion de 68 ± 25 %.

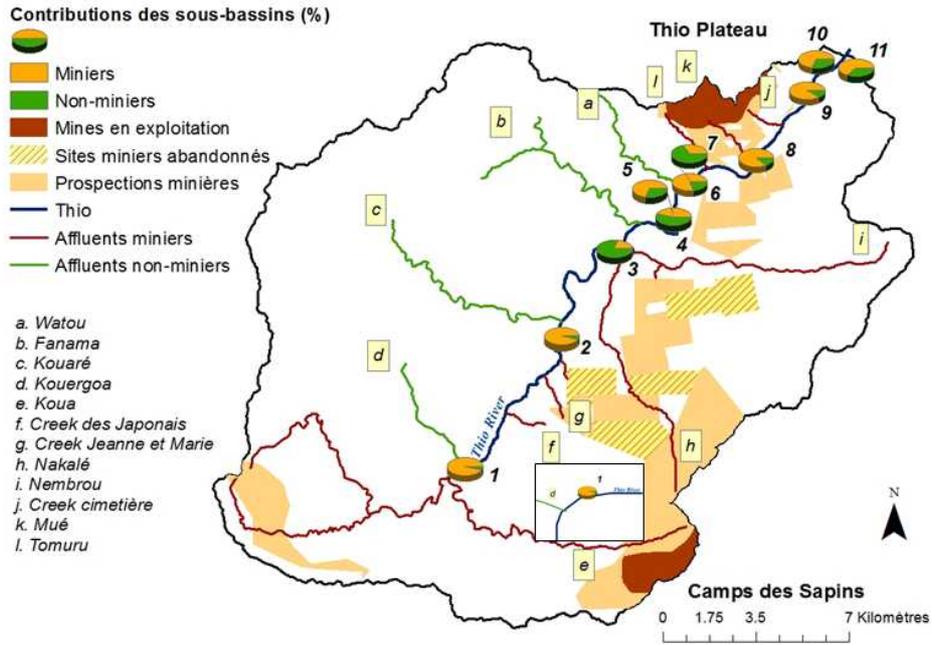


Figure 155 : Carte des contributions relatives des sous-bassins miniers et non-miniers aux sédiments transitant dans la Thio au moment de la crue de février 2015 (DT)

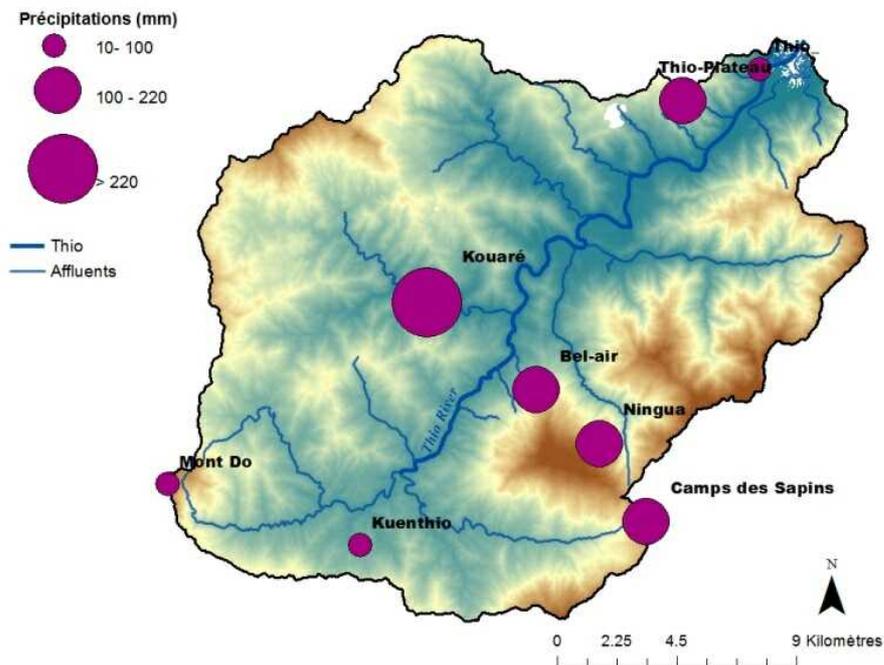


Figure 156 : Répartition spatiale des précipitations générées par la dépression tropicale de février 2015

5.1.3.3. Origines des sédiments transportés au cours d'avril 2017

La crue d'avril 2017 générée par le cyclone Cook a, quant à elle, mobilisé des sédiments dont 84 ± 7 % (en moyenne) provenaient de sous-bassins miniers. Les contributions des sous-bassins miniers restent élevées tout le long de la Thio mais décroissent là encore en aval de la confluence avec la Kouaré (Tabl. 38).

Les contributions des sous-bassins non-miniers à cet endroit du bassin versant présentent une proportion légèrement plus importante que sur le reste du bassin versant (27 % contre 16 % en moyenne).

De la même façon que pour l'événement précédent, la contribution des sous-bassins miniers augmente à nouveau au niveau des confluences avec les affluents drainant la mine de Thio Plateau (Creek cimetièrre, Tomuru, Mué). Au niveau de l'estuaire, ce sont les sous-bassins miniers qui dominent à nouveau très nettement les apports sédimentaires avec une contribution de 82 % (Fig. 157).

Tableau 38 : Contributions des sous-bassins miniers et non-miniers le long de la Thio au cours de la crue d'avril 2017

N° des échantillons des sédiments de la Thio	Contributions des sous-bassins miniers (%)	Contributions des sous-bassins non-miniers (%)
1 (amont)		
2	90	10
3	93	7
4	90	10
5	73	27
6	83	17
7	81	19
8 (aval ; estuaire)	84	16
Moyenne (%)	84	16
Ecart-type (%)	7	7
Minimum (%)	73	7
Maximum (%)	93	27

La crue d'avril 2017 a également été considérée d'après le débit instantané maximal enregistré ($3500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) comme une crue décennale. Les précipitations associées au cyclone Cook ont représenté 25 % des précipitations de l'année 2017. Dans ce cas, c'est principalement la partie orientale du bassin versant qui a majoritairement reçu les précipitations (409 mm à la station Thio-Plateau, 493 mm à Camps des Sapins contre 60 mm à la station de Kouaré pour la partie ouest).

Comme le montre la figure 158, le maximum de précipitations a été enregistré aux stations situées à proximité des mines en activité (Thio Plateau, Camps des Sapins). Les affluents miniers ont donc fortement contribué aux apports sédimentaires sur l'ensemble du bassin versant pour cet événement. Il est intéressant de noter que bien que les précipitations aient été principalement localisées sur la partie orientale du bassin versant, le sous-bassin versant de Kouaré a contribué localement à une légère augmentation des sous-bassins non-miniers.

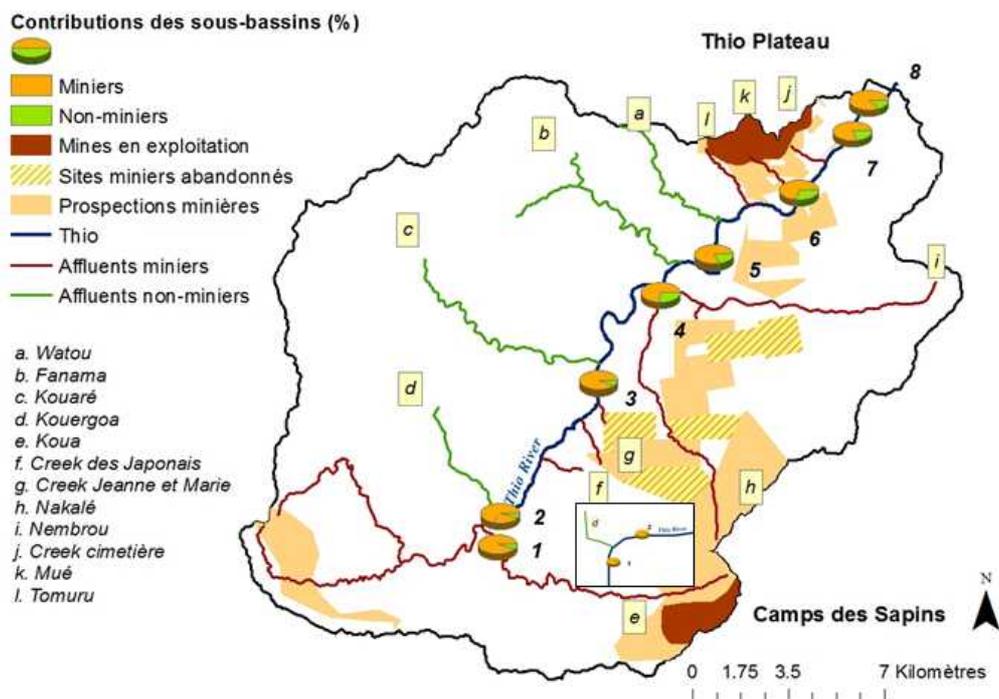


Figure 157 : Carte des contributions relatives des sous-bassins miniers et non-miniers aux sédiments transitant dans la Thio au moment de la crue d'avril 2017 (Cyclone Cook)

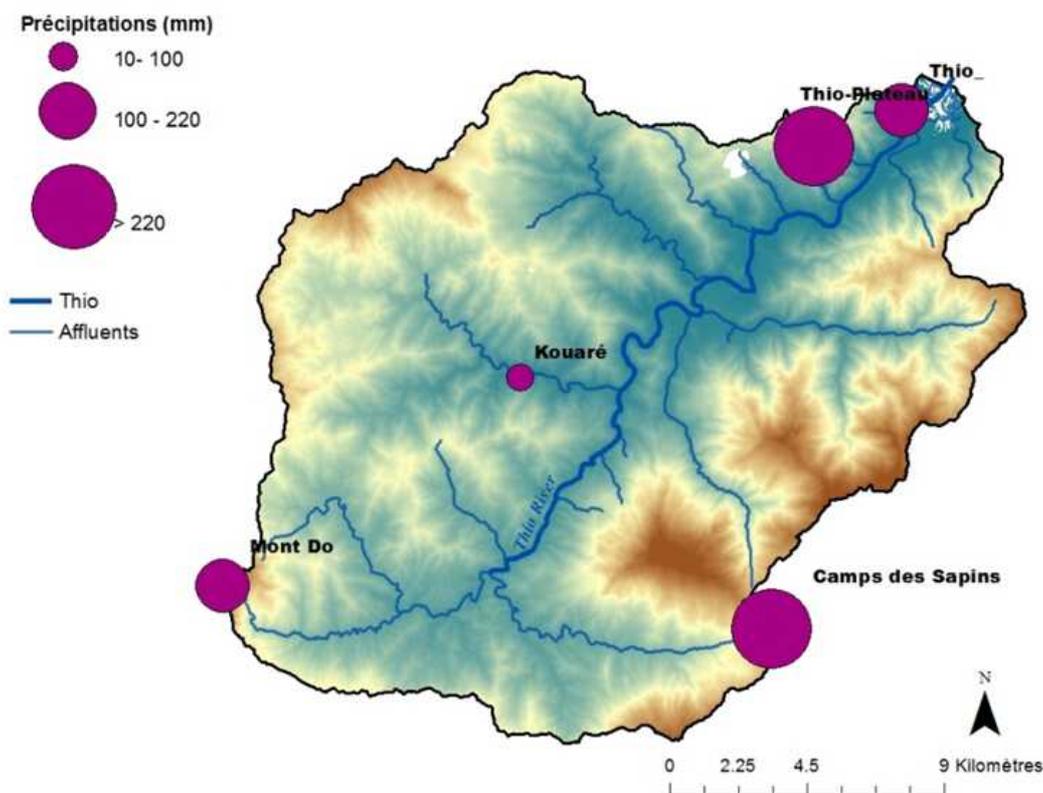


Figure 158 : Répartition spatiale des précipitations générées par le cyclone Cook (avril 2017)

En conclusion, les sous-bassins miniers sont les principales sources d'apport sédimentaire arrivant dans la Thio aussi bien pour l'événement de 2015 ($68 \pm 25 \%$) que celui de 2017 ($84 \pm 7 \%$).

Cependant, la distribution spatiale des précipitations peut modifier de façon locale et sporadique l'apport de sédiments dans la Thio. Les précipitations générées par la dépression tropicale de février 2015 et principalement localisées sur le sous-bassin versant de la Kouaré ont permis à ce dernier affluent de contribuer de façon conséquente aux apports sédimentaires. Néanmoins, avec des précipitations plus faibles sur cette zone au cours de l'événement de 2017, on observe toujours une contribution plus importante de sédiments issus des sous-bassins non-miniers que des autres affluents non-miniers. Bien que cet affluent contribue aux apports sédimentaires, les sous-bassins miniers dominent largement en aval du bassin versant et à l'estuaire avec l'apport des affluents miniers (Creek cimetiére, Tomuru, Mué) qui drainent la mine Thio Plateau.

5.1.3.4. Datation du profil sédimentaire de la plaine inondable de la Thio

5.1.3.4.1. L'approche hydrologique

L'étude des taux de sédimentation nécessite des datations du profil. Les activités en ^{137}Cs et $^{210}\text{Pb}_{\text{xs}}$ sont classiquement utilisées dans les études de traçage sédimentaire pour dater les carottes sédimentaires (Foucher et al., 2015). Néanmoins, ces dernières n'ont pas permis de réaliser une datation des différentes sections de la carotte sédimentaire en raison de leurs trop faibles activités au sein du profil.

Par contre, l'étude statistique des données journalières de pluviométrie et d'hydrologie collectées respectivement depuis 1952 et 1981 sur le bassin versant de Thio (Fig. 160) ont permis d'isoler plusieurs événements de crues débordantes à l'endroit du carottage. Les témoignages des habitants de Thio ont permis de corroborer et de compléter cette chronologie d'événements avec notamment l'ajout d'événements plus anciens tels que le cyclone Alison (1975) et le cyclone Anne (1988) pour lesquels on ne disposait pas de données hydrologiques et/ou de données complètes de pluviométrie (Tableau 39).

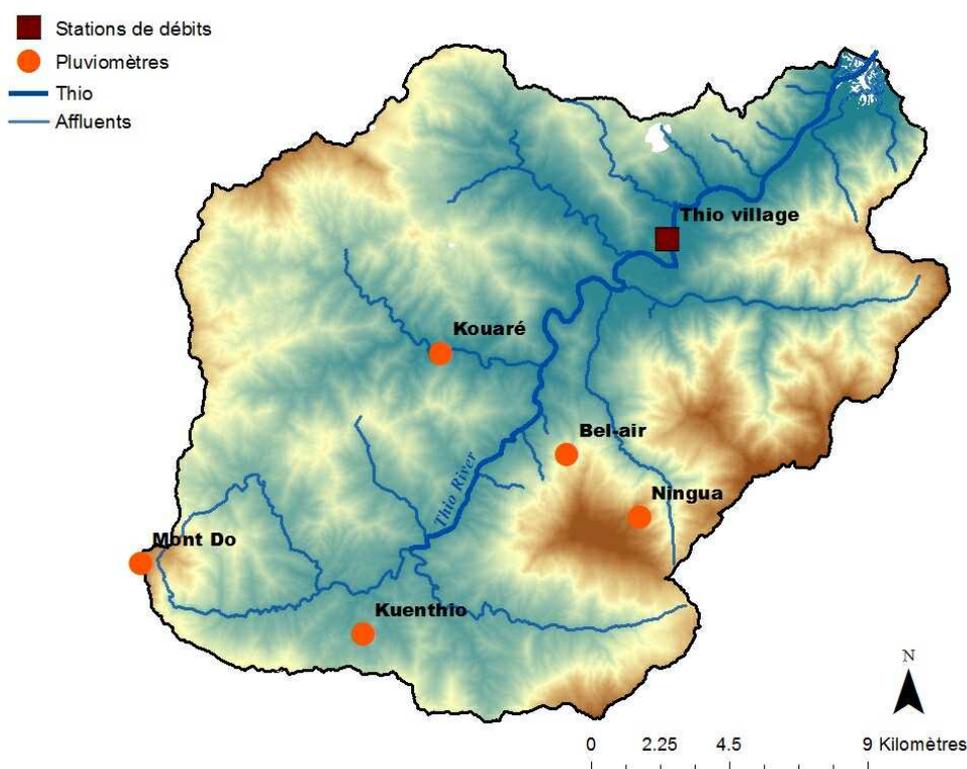


Figure 159 : Localisation des pluviomètres et de la station de mesure de débits

Tableau 39 : Chroniques des crues débordantes à l'endroit du carottage

Année	Types d'événements	Données de débit disponibles	Moyens d'identification
1975	Cyclone Alison	-	Témoignages
1988	Cyclone Anne	-	Témoignages
1990	Evénement non nommé du 20-23 janvier	Q = 899 m ³ .s ⁻¹	Approche statistique
1996	Cyclone Beti	Q = 2014 m ³ .s ⁻¹	Approche statistique
2008	Evénement non-nommé du 28 février	Q = 825 m ³ .s ⁻¹	Approche statistique
	Evénement non-nommé du 22 mars	Q = 931 m ³ .s ⁻¹	Approche statistique
2009	Dépression tropicale Jasper	Q = 829 m ³ .s ⁻¹	Approche statistique, Témoignages
2013	Cyclone Freda	Q = 1182 m ³ .s ⁻¹	Approches statistiques, Témoignages
	Evénement non-nommé du 1 ^{er} juillet	Q = 1200 m ³ .s ⁻¹	Approches statistiques, Témoignages
2015	Dépression tropicale	Q = 860 m ³ .s ⁻¹	Approches statistiques, Témoignages

Parmi l'ensemble des événements mentionnés, le cyclone Alison (1975) semble avoir particulièrement retenu l'attention des habitants : « *Et puis voilà la grande inondation Alison là, c'est là qu'on a commencé vraiment à avoir la boue rouge. Mais vraiment rouge de rouge. Ça nous a vraiment marqués [...]* ». (Citation du rapport de stage de Lucie Gosset, 2016).

Ils le désignent de façon unanime comme étant l'événement déclencheur des problèmes de sur-engravement et d'hypersédimentation des rivières et du lagon.

Ces témoignages concordent également avec les observations faites par Garcin et al. (2018) et notamment la quantité de stériles miniers mis en décharge qui fut maximale avant 1975. Le cyclone Alison a fortement contribué au déversement de ces stériles miniers dans le réseau hydrographique ; c'est pourquoi après 1975, les pratiques de mise en décharge de ces stériles miniers ont évoluées.

Le cyclone Alison a donc entraîné un bouleversement notable en termes d'apport sédimentaire qu'il serait intéressant de reconstruire au sein du profil sédimentaire.

5.1.3.4.2. L'apport de la géochimie et de la colorimétrie

La mention du cyclone Alison comme événement déclencheur des problèmes de sur-engravement et d'hypersédimentation du bassin versant de Thio a constitué une information capitale au moment de l'analyse de cette carotte sédimentaire. L'ensemble des profils réalisés, qu'ils soient basés sur les paramètres de couleurs, les concentrations en éléments géochimiques ou sur celles des radionucléides géogéniques, montrent tous deux unités sédimentaires distinctes. Certains de ces profils sont présentés dans cette section.

Le profil des dérivées premières du spectre de réflectance dans le visible (Fig. 160 - a) et le profil a^* (Fig. 160 - b) montrent un changement de composition géochimique et colorimétrique à partir de 102 cm de profondeur. Le changement de composition géochimique peut être observé entre 520 et 580 nm sur la Figure 160 - a. Celui-ci caractérise l'apparition d'oxy-hydroxydes de fer dont l'hématite qui est particulièrement observable au niveau de ces longueurs d'onde (Scheinost et al., 1998).

Bien que les premiers changements géochimiques et colorimétriques apparaissent à 102 cm de profondeur, les maxima observés pour ces deux paramètres sont atteints à ~ 83 cm de profondeur (Fig. 160 - a, b). Cette profondeur reflète également l'augmentation soudaine et maximale de la concentration en Ni. Cette tendance se vérifie sur les profils de tous les autres métaux lourds.

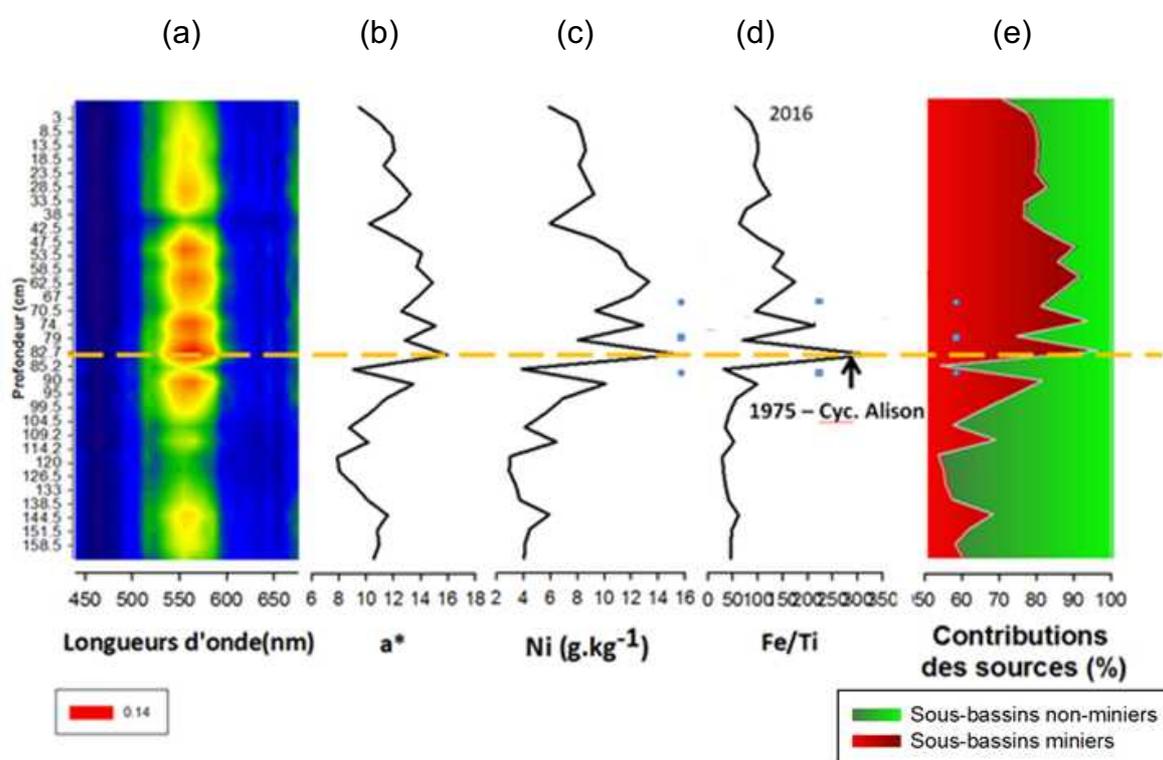


Figure 160 : Profil spectrocolorimétrique (dérivées premières du spectre de réflectance (a) et indicateur chromatique a^* (b)), géochimique avec le Ni (c), des changements de faciès (d) et des contributions minières et non-minières (e) de la carotte sédimentaire

L'ensemble des analyses menées montre un changement de composition des sédiments à ~ 83 cm de profondeur. Les sédiments sur cette unité (0- 83cm) présentent une teinte rouge auxquels sont associées des concentrations plus élevées en métaux lourds caractéristiques des sources minières (Fig. 161). À l'inverse, ils présentent des concentrations plus faibles en U, Th, K caractéristiques là encore des sources minières (Fig. 162).

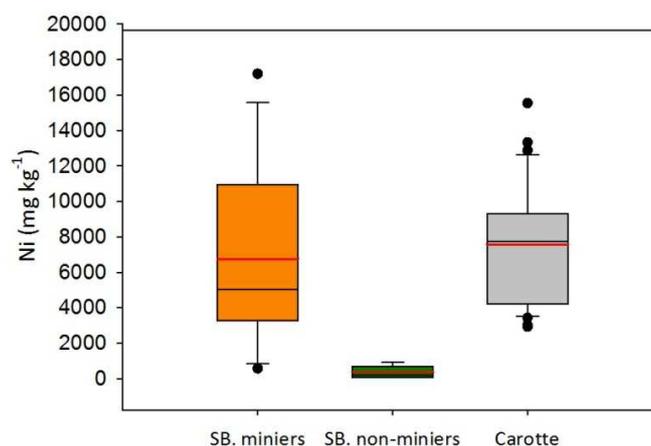


Figure 161 : Concentrations en Ni au sein des sources minières, des sources non-minières et de la carotte sédimentaire

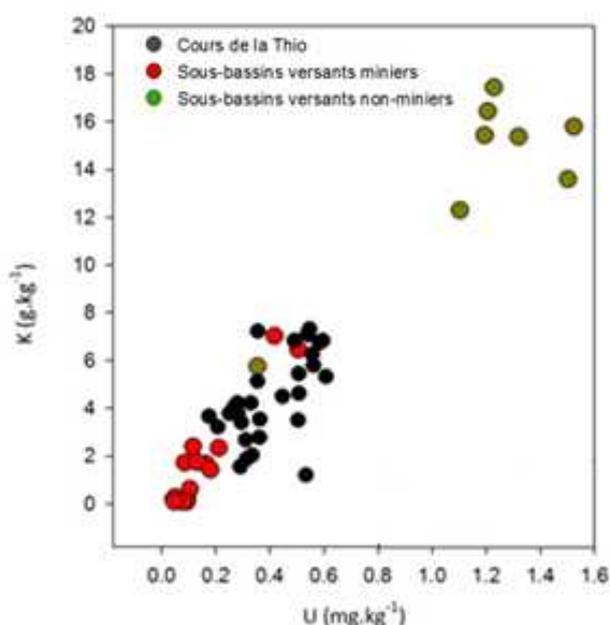


Figure 162 : Concentrations en potassium en fonction de celles de l'uranium au sein des sources minières, des sources non-minières et des sédiments

5.1.3.4.3. Datation relative

Dix crues ont été comptabilisées sur le bassin versant de Thio depuis 1975. L'hypothèse faite ici était de pouvoir retrouver ces dépôts successifs au sein de la carotte sédimentaire. Pour cela, certains paramètres classiquement utilisés dans les milieux lacustres pour repérer les changements de faciès au sein des profils sédimentaires ont été appliqués sur cette carotte sédimentaire de plaine alluviale (Croudace et Rothwell, 2015). Le rapport Fe/Ti représentatif de changements granulométriques montre qu'au sein de la carotte sédimentaire, 8 changements de faciès peuvent être identifiés : à ~33, ~53, ~62, 74, ~83, 90, ~102 et ~138 cm de profondeur. Là encore, le maximum du rapport Fe/Ti est associé à la profondeur de ~83 cm.

5.1.3.4.4. Traçage sédimentaire

Le modèle de mélange basé sur le K (géochimie) montre que 74 ± 13 % des apports sédimentaires de ce profil sont associés aux sources minières. Une augmentation soudaine de la contribution des sources minières (96 %) a également été observée à partir de ~83 cm de profondeur (Fig. 161 - e). Sur la partie supérieure du profil (0-83 cm), les sources minières dominent avec 83 ± 7 % de contribution alors qu'elles sont de 62 ± 8 % sur la partie inférieure (83-162 cm) (Fig. 160 - e). L'ensemble des analyses

réalisées (colorimétrie, géochimie + paramètres de discontinuité) montrent qu'il y a eu un apport majeur de sédiments miniers à ~ 83 cm de profondeur. En raison des témoignages unanimes de la population quant au cyclone Allison déclaré comme événement déclencheur des problèmes de sur-engravement et d'hypersédimentation, cette profondeur (83 cm) a pu être associée à l'année 1975.

Bien qu'il soit impossible de dater de façon plus précise le reste de la carotte sédimentaire, on peut néanmoins observer une diminution des contributions minières sur la partie supérieure du profil où en 1975, 96 % des apports sédimentaires étaient issus des affluents minières alors qu'en 2016 (année du carottage), elles n'étaient plus que de 71 %. Enfin, les 10 dernières crues sur la période 1975-2016 ont généré 83 cm de dépôt sédimentaire (soit un taux moyen de 2cm/an) dans cette zone de la plaine inondable dont 83 % sont issus de sources minières.

5.1.4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Différentes techniques de traçage sédimentaire ont été expérimentées pour discriminer les sources minières (type 1) des sources non-minières (type 2, 3, 4). L'approche de traçage sédimentaire basée sur les radionucléides issus des retombées atmosphériques n'a pas été concluante. Néanmoins, les résultats obtenus avec cette dernière montrent que ce sont principalement les processus d'érosion de subsurface qui dominent les apports sédimentaires sur le bassin versant de Thio. Les deux autres approches de traçage sédimentaire testées (géochimie et radionucléides géogéniques) ont toutes deux sélectionné un traceur lithologique, respectivement K et U, pour discriminer les sous-bassins minières et non-minières. Ces traceurs permettent de classer correctement 96% des sous-bassins versants, ce qui constitue un excellent résultat. Toutefois, ces traceurs ne peuvent pas discriminer *sensu stricto* les occupations des sols et donc les différents types d'érosion identifiés dans le bassin versant. Néanmoins, l'étude de télédétection de Garcin et al. réalisée dans le cadre du programme « *Gestion du Passif* » (2018) a permis de montrer que l'érosion d'origine minière est largement dominante sur les massifs de péridotites (plus de 95%). Ces deux approches permettent d'estimer que les contributions des sources minières (type 1) sont les sources sédimentaires connectées dominantes pour le cours d'eau de la Thio (soit 68% et 84% en moyenne pour les cyclones de 2015 et 2017) par opposition aux sources non-minières (type 2, 3, 4).

L'étude de traçage sédimentaire réalisée sur la carotte sédimentaire nous montre que ces sources minières dominent les apports sédimentaires à l'estuaire de façon récurrente depuis les années 1975 suite au passage du cyclone Alison. Bien qu'un maximum d'apports minières ait été observé à cette période, ces derniers restent dominants lors des crues plus récentes (dont celles de 2015 et 2017) et ont notamment très majoritairement contribué (83%) aux 83 cm de dépôts sédimentaires observés dans la plaine inondable de la Thio.

Le traçage sédimentaire réalisé sur les événements récents de 2015 et 2017 montre également l'importance de la distribution spatiale des précipitations pour expliquer la variabilité des apports sédimentaires des deux sources. Le sous-bassin versant de la Kouaré semble notamment prédisposé à fournir plus de sédiments que d'autres sous-bassins versants non-minières s'il est fortement exposé aux précipitations (crue de 2015). Malgré cela, les sources minières dominent très nettement sur l'ensemble du bassin versant pour ces deux événements. On observe généralement la tendance suivante : en amont, les sources minières dominent, leurs contributions diminuent à partir de la confluence entre la Thio et la Kouaré ; en aval, celles-ci ré-augmentent fortement à partir des confluences entre la Thio et les affluents qui drainent la mine de Thio Plateau (Mué, Tomuru, Creek cimetière). La mine de Thio Plateau semble donc contribuer de façon conséquente aux apports sédimentaires observés en aval et dans l'estuaire.

5.2. CARACTÉRISATION ET QUANTIFICATION DU COLMATAGE DE LA THIO ET DE SES AFFLUENTS

O. Navratil (Univ. Lyon), L. Nemoadjou, G. Mériaux, C. Legout – Annexe 9.-2

Dans les creeks surengravés de Thio, les processus de suspension, dépôt et remobilisation de sédiments fins du lit des creeks peuvent être beaucoup plus importants que pour d'autres types de rivière. Tout d'abord, la largeur du chenal actif de ces rivières sur-engravées offre un vaste espace pour le stockage des sédiments, atteignant parfois une centaine de mètres (cf. Programme CNRT_Gestion du Passif). D'autres caractéristiques sédimentaires et morphologiques, comme l'étendue de la distribution granulométrique (Lunt et Bridge, 2004) ou la concentration élevée de sédiments en suspension (Hicks, 2000 ; Mathys *et al.*, 2003 ; Mano *et al.*, 2009), ainsi que la présence d'îles végétales dans le canal actif et le delta, sont des facteurs qui peuvent entraîner un piégeage important des particules fines provenant de sources amont. D'autre part, les caractéristiques hydrauliques des cours d'eau de Nouvelle Calédonie permettent une remobilisation fréquente d'une grande partie des réserves de sédiments fins. Des études de ces mécanismes dans les rivières à tresses proglaciaires ou alpines (Maizels, 1979 ; Warburton, 1990, 1999 ; Hodgkins *et al.*, 2003 ; Orwin et Smart, 2004 ; Patton, 2004 cité par Stott et Mount (2007) ; Meunier *et al.*, 2006 ; Stott et Mount, 2007 ; Navratil *et al.*, 2010) ont souligné le rôle majeur du dépôt dans les lits et des processus de re-suspension en aval. Des exemples à l'aval de mines montrent eux aussi la présence de stocks sédimentaires temporaires très importants potentiellement disponibles dans le lit des cours d'eau à l'aval des territoires miniers (Balaban *et al.*, 2015). Cependant, bien qu'ils représentent un processus majeur de transfert de sédiments contrôlant la dynamique du SSY¹⁰, les mécanismes de stockage et de libération des sédiments fins restent mal compris. La question du temps de transfert de ces matières en suspension et des métaux associés et du retour possible du système à des sédiments « propres » après la mise en place de bassins de rétention de sédiments fins ou l'arrêt d'une exploitation minière est essentielle dans le cadre d'une évaluation environnementale à long-terme des impacts miniers sur l'environnement.

Cette phase du programme IMMILA porte donc sur l'évaluation de la quantité de fines dans le système – i.e. colmatage du substrat grossier, qui peut potentiellement être mis en suspension lors des cyclones majeurs, comme des crues fréquentes, à des intensités différentes. Nous nous sommes posé la question de la distribution spatiale de ces fines, de leur composition chimique et de leur origine (minier/non-minier) et en particulier l'évolution de ce colmatage de l'amont vers l'aval de la rivière Thio. Ces travaux ont profité des contributions de Laetitia Nemoadjou (stage de L3 ; Université de Lyon), de Germain Mériaux (stage de L3 ; Université de Lyon), et de Cédric Legout (MCF ; UMR 5001-IGE).

5.2.1. MATÉRIEL ET MÉTHODES

5.2.1.1. Présentation du protocole de mesure des fines dans le réseau

Pour évaluer le colmatage du substrat des creeks, des échantillons de sédiments ont été prélevés sur les bancs de sédiments de la Thio et de ses affluents (Figure 163), en suivant un protocole s'appliquant sur les bancs de rivière (lit majeur). Il est basé sur un protocole défini par Navratil *et al.* (2010) afin d'estimer une quantité de sédiments fins pour un volume prélevé dans les bancs de la rivière (en [kg/m²] de rivière).

¹⁰ SSY : *Suspended Sediment Yield* ou flux spécifique total de sédiments en suspension (t/s)

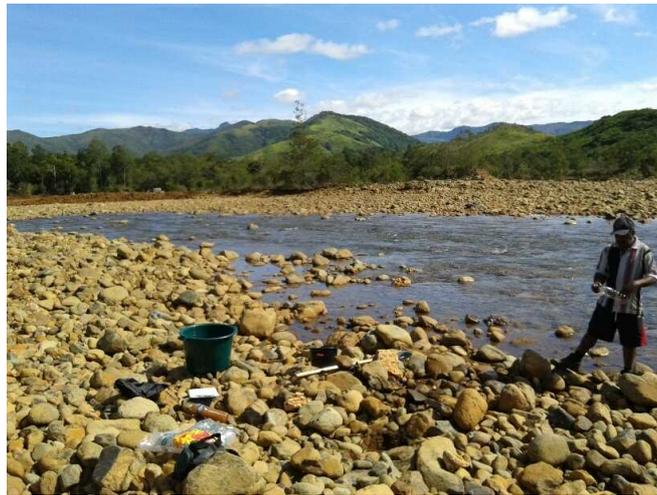


Figure 163 : Lieu de prélèvement (banc) des échantillons de fines

Le principe consiste à prendre une surface équivalente à un volume de dimensions 30 x 30 x 10 cm environ ou un volume de sédiment de l'ordre de 10 litres (celui d'un seau). La quantité de matériaux (gros et fins) prélevée est versée dans une grande bassine, puis complétée par 50 litres d'eau de rivière (Figure 164). À l'aide d'une pelle, une action de brassage est exercée pour permettre la remise en suspension des sédiments fins récupérés dans une bouteille de 1.5 litres (goulot placée 10 cm sous la surface). Le surnageant de cette bouteille est ensuite enlevé après décantation totale des sédiments fins dans la bouteille de prélèvement (durée de 24 à 72 h).



Figure 164 : Volume de 30x30x10 cm pour le prélèvement des échantillons + bassine remplie de 50L d'eau

La deuxième phase de l'analyse a eu lieu au laboratoire de l'Université de la Nouvelle-Calédonie. Le contenu de la bouteille (sédiments fins humides) est versé dans une coupelle en aluminium (préalablement pesée) et mis à l'étuve pendant 5 jours à 105 °C. Après séchage complet, celui-ci est à nouveau pesé pour obtenir la quantité de sédiments fins et sa concentration dans 50 L d'eau (+/- 10%). Cette estimation permet alors d'estimer la quantité totale de fines dans un volume de sédiment prélevé dans le lit de la rivière (équations 1, 2, 3).

$$C = \frac{P_t}{V_t} \times 1000 \quad \text{Equation 1}$$

Avec C, la concentration en [g L⁻¹] ; P_t, le poids total des sédiments en [g] ; V_t le volume total en [mL]

$$Q_f = C * V_d \quad \text{Equation 2}$$

Avec Q_f, la quantité de fines obtenue en [g], V_d, le volume d'eau dilution en [L]

$$Q = \frac{Q_f}{V_r} \quad \text{Equation 3}$$

avec Q, la quantité de fines par unité de volume du substrat lit en [kg/m³], V_r, le volume retenu dans le sceau ou sur la parcelle de prélèvement en [L].

Au total 29 échantillons ont été réalisés : 13 dans le lit principal de la Thio après chaque confluence et 16 échantillons sur les principaux affluents miniers et non-miniers (Figure 165).

Représentation spatiale des tronçons de mesures

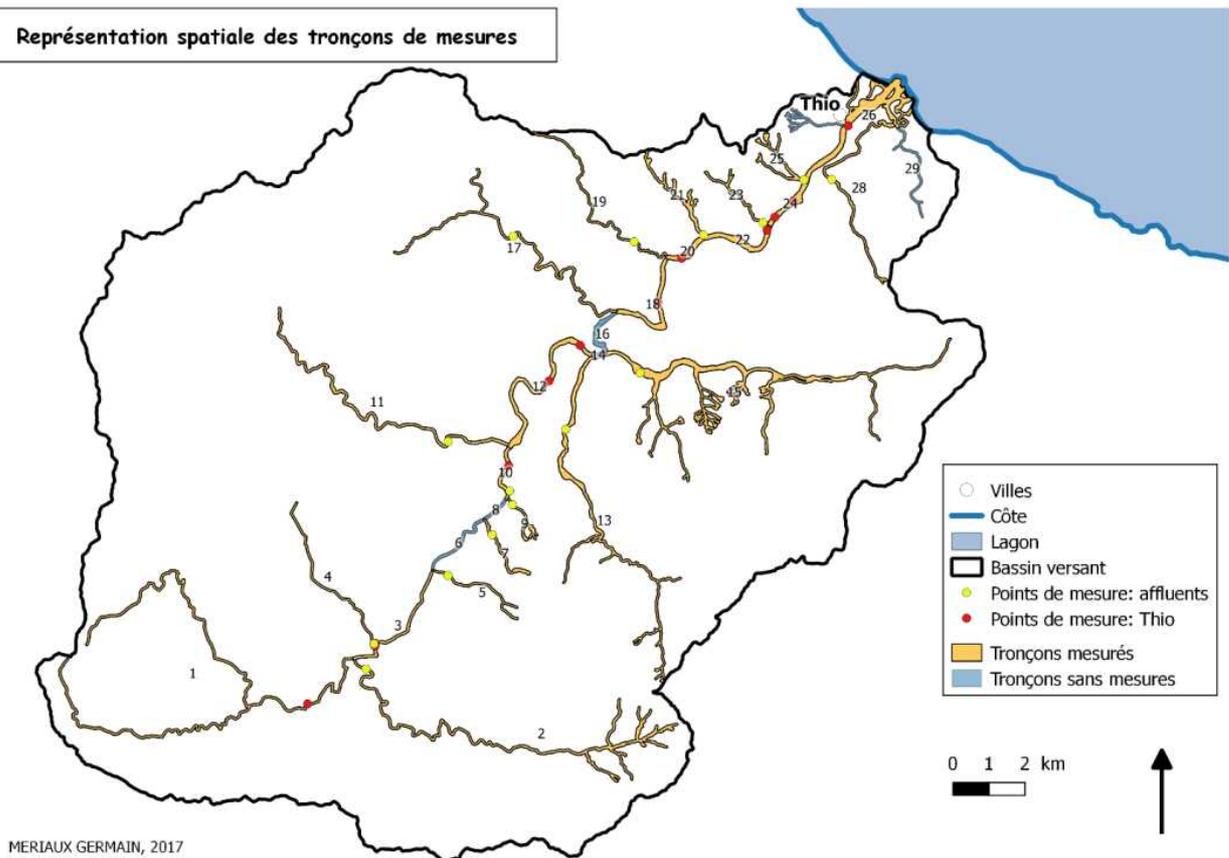


Figure 165 : Échantillons prélevés sur la Thio et ses affluents numérotés de 1 à 29

5.2.1.2. Analyse de granulométrie laser

L'analyse granulométrique est une opération consistant à étudier la répartition en taille des sédiments d'un échantillon. La granulométrie laser permet de mesurer la variation angulaire de l'intensité de lumière diffusée lorsqu'un faisceau laser traverse un échantillon, la diffraction laser mesure les distributions granulométriques des particules. Les plus grosses particules diffusent la lumière avec de petits angles par rapport au faisceau laser et les petites particules diffusent la lumière à des angles supérieurs. Les données relatives à l'intensité diffusée en fonction de l'angle, sont analysées pour calculer la taille des particules qui crée l'image de diffraction et ceci grâce à la théorie de Mie.

Le granulomètre laser utilisée de type « Hydro 2000G » de Malvern, n'accepte pas les fragments solides supérieurs à 1.6 mm et la matière organique est déconseillée dans l'appareil. Les mesures au granulomètre laser sont faites sur les échantillons tamisés à 1.6 mm pour enlever les éléments grossiers. Pour éliminer toute la matière organique, les échantillons sont donc calcinés pendant 16 heures à 375 °C (calcimétrie). L'ajout de sédiments dans le granulomètre a lieu par voie humide. L'échantillon est versé dans l'eau puis brassé et soumis à des ultrasons afin de détruire les agrégats (ie. flocs), avant d'être envoyé dans le compartiment où a lieu la diffraction laser. Des triplicats sont réalisés puis une moyenne est calculée.

5.2.1.3. Fluorescence des rayons X (XRF)

Le principe de la mesure de fluorescence X a été expliqué dans la section précédente (voir partie 5.1.2.2). L'appareil utilisé est un spectromètre type « xSORT » utilisé en station disponible à l'École Normale Supérieure de Lyon. Les échantillons de sédiments restants ont été tamisés à 63 µm et seule cette fraction est utilisée pour les mesures XRF. Pour optimiser les mesures, il est fortement conseillé de travailler sur des matrices sèches. Les sédiments sont versés dans des cupules en plastique (montés avec un film de prolène de 4 micromètres) de 2.5 cm de diamètre et 1 cm de hauteur. Placés au-dessus du rayon X dans l'appareil, des triplicats sont réalisés sur chacun des échantillons. Lors des analyses

XRF, certains échantillons ne remplissaient pas la cupule de 10 mm d'épaisseur. De ce fait, des tests ont été réalisés sur cinq échantillons pour en mesurer l'impact.

5.2.1.4. Analyse couleur (collaboration avec C. Legout, UMR-CNRS 5100 IGE)

L'analyse couleur dont le principe a été explicité dans la section précédente (5.1.2.1) a également été menée sur la fraction <63 µm des sédiments.

Méthode de cartographie des sédiments fins dans le réseau hydrographique (d'après Meriaux, 2017)

Pour estimer la quantité de fines dans les creeks, nous devons ensuite estimer la surface de la bande active du réseau hydrographique et évaluer l'épaisseur de charriage (ie. le volume remobilisé lors des crues). Ainsi, la première étape de ce travail cartographique a été d'estimer la surface occupée par la bande active du réseau hydrographique. Elle a été estimée par la digitalisation de la bande active du réseau hydrographique et des creeks principaux susceptibles d'apporter de fortes quantités de fines. Les photos satellites utilisées proviennent du satellite Landsat 8, capturées en 2017.

En utilisant cette vue satellite à l'échelle 1/1250, nous avons ainsi pu obtenir une bande active plus précise et plus représentative de la réalité. Néanmoins, pour trois tronçons, la variabilité en largeur du lit semblait négligeable, nous avons donc appliqué pour ces tronçons un « buffer » en spécifiant pour chacun une largeur moyenne, mesurée à l'aide de l'outil « règle » en plusieurs points du linéaire du tronçon et validée sur le terrain. Le travail s'est poursuivi par la fusion de l'ensemble de ces polygones, nous avons ainsi pu acquérir une estimation de la surface de la bande active sur le bassin versant de la Thio en 2017. Nous avons ensuite réalisé un découpage de l'ensemble de la bande active, au niveau de la confluence avec un affluent et en amont de la confluence. En effet, nous disposons de différents points de mesures tout au long du réseau hydrographique, des points de mesures sur la Thio et sur la plupart des affluents. Ainsi, nous avons effectué une jointure spatiale des points de mesure avec notre digitalisation permettant de joindre à chaque tronçon les valeurs de mesures. Pour certains tronçons, notamment sur la Thio avec les tronçons 6 ; 8 ; 4 et 16, nous ne possédons aucune valeur de mesures (Figure 165). Effectivement, aucun point de mesure n'a été effectué sur ces linéaires, nous avons alors choisi d'affecter pour ces linéaires les valeurs du tronçon situé plus en amont.

À propos des mesures, nous avons cherché à déterminer également la variabilité de la mesure de concentration de fines à une échelle locale. Nous avons réalisé des calculs d'incertitudes avec un indice de 95 % et 99% de précision à l'aide de la loi de Student sur des mesures répétées localement. Enfin, après avoir associé à chaque tronçon les valeurs des mesures ainsi qu'une surface, nous avons fixé une hauteur de lit mobilisable. Aucune étude n'a encore été effectuée permettant de définir sur le bassin versant de la Thio une épaisseur moyenne de charriage. Nous avons fixé arbitrairement une valeur de lit mobilisable de 0,10 mètre. Ainsi, nous avons pu calculer les quantités de fines sur la bande active, du réseau hydrographique principal du bassin de la Thio. Nous avons ensuite souhaité présenter spatialement sous forme de cartes, quelques paramètres et résultats, notamment les valeurs de concentration des fines, nous donnant une vision sur les zones les plus colmatées en fines. De plus, nous avons voulu représenter spatialement avec des cartes les quantités de métaux dans les matériaux prélevés lors de la mesure, avec notamment le Nickel (Ni), le Fer (Fe), le Chrome (Cr), le Mercure (Hg), et le Cadmium (Cd). Il faut noter que ces concentrations en métaux sont à interpréter de manière relative ; aucune mesure n'ayant été réalisée avec la technique de référence (ICP-MS). Ainsi, nous avons fait le choix pour la présentation des résultats sur les cartes, d'appliquer à la bande active que nous avons digitalisée un « buffer » permettant de rendre les résultats plus visibles et de faciliter l'interprétation de ceux-ci.

5.2.2. ESTIMATION DE LA QUANTITÉ ET QUALITÉ DES FINES PRÉSENTES DANS LE LIT DE LA RIVIÈRE

5.2.2.1. Variabilité spatiale des concentrations de fines dans le bassin de Thio

Les quantités de fines dans le lit des creeks et de la Thio varient de 2.4 à 50.6 kg/m³ (Figure 166).

Globalement, nous notons une augmentation des concentrations en fines de l'amont vers l'aval du réseau hydrographique de la Thio. En effet, à l'amont du bassin, nous commençons par des valeurs de

concentrations très faibles pour le tronçon 1, de l'ordre de 2 à 3 kg/m³. Ensuite, nous notons une première hausse brutale des concentrations (variation de 10 à 16 kg/m³ environ sur ce linéaire) liées à l'arrivée des premiers affluents miniers, et d'une légère rupture de pente. La concentration monte progressivement jusqu'au tronçon n°10, nous notons ensuite au niveau de la Kouaré (affluent : tronçon n°11) une valeur très élevée de 50.59 kg/m³. Or, cet affluent ne draine pas de bassin minier, mais une zone forestière connaissant d'importants feux de forêt, nous pouvons donc affirmer que les exploitations minières ne sont pas les seules responsables de la production de fines dans le bassin versant. De plus, les mesures ont été réalisées à la suite d'une crue (cyclone de 2015) ayant principalement touché ce bassin et entraînant de nombreux glissements de terrain. Néanmoins, nous avons observé une légère baisse de la concentration de fines sur le tronçon à l'aval de la confluence (de l'ordre de 10 kg/m³ de fines). Le réseau hydrographique récupère ensuite une quantité importante de fines liée aux exploitations minières en rive droite dans la partie centrale du bassin versant. Plus loin, au niveau de la confluence entre la Thio et la Fanama (affluent, tronçon 17), nous retrouvons la même observation que pour la Kouaré, en effet la Fanama traverse également des zones forestières soumises à des feux de forêts et des glissements, et elle a été fortement touchée par le cyclone de 2015. Elle apporte une grande quantité de fines s'élevant à 44 kg/m³. L'association de l'arrivée des fines des sites miniers et des feux de forêts/glissements entraîne une hausse de la concentration dans la Thio. Sur la partie terminale, la Thio draine les exploitations minières notamment de « Thio plateau » situées à l'aval en rive gauche (Creeks Tumutu et Mué). Nous notons alors au niveau de l'exutoire des concentrations de fines proches de 20 kg/m³, cette forte concentration s'explique par la résultante de l'ensemble des surfaces drainées productrices de fines et par une rupture de pente et une influence côtière importante dans la partie aval de la Thio.

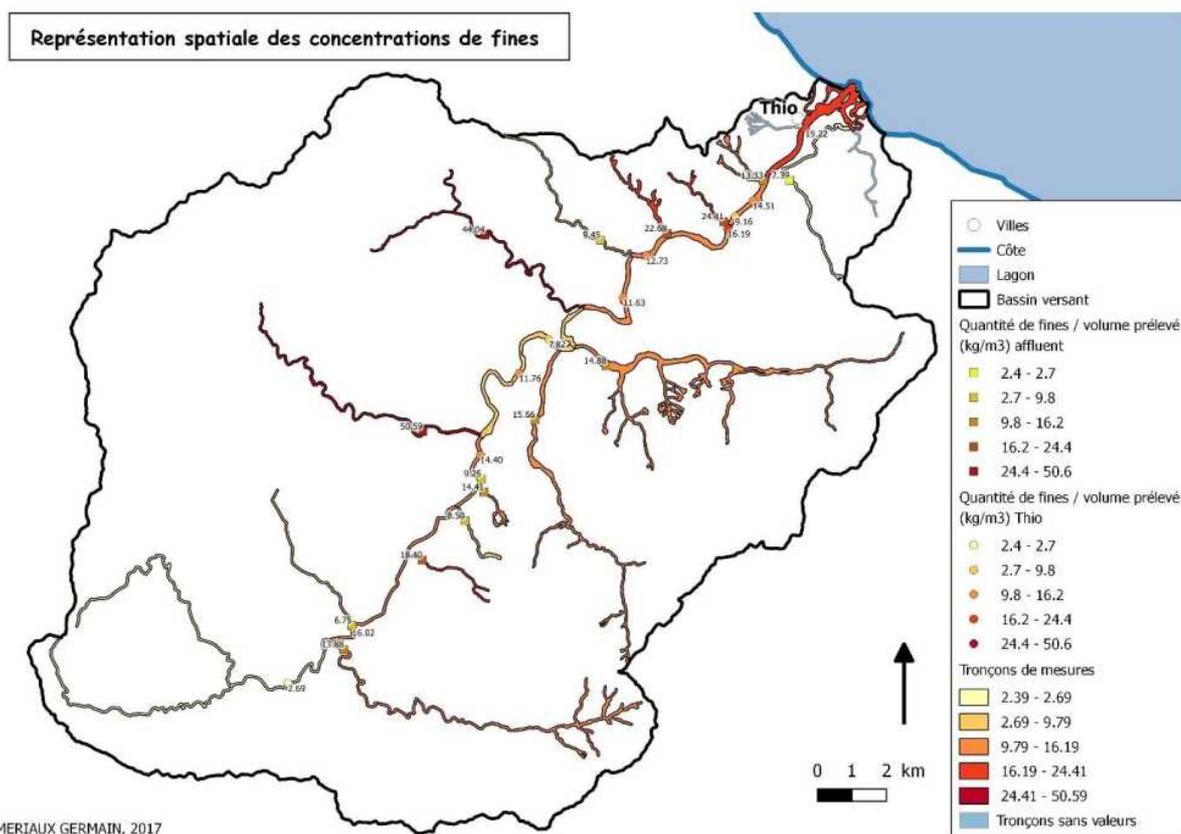


Figure 166 : Variabilité spatiale des quantités de fines dans les creeks et sur la Thio

Le cumul des sédiments fins sur le réseau hydrographique de la Thio considéré est estimé à 8 500 tonnes en considérant une épaisseur de charriage de 10 cm en moyenne sur les cours d'eau.

5.2.2.2. Variabilité spatiale des teneurs en métaux

Les sédiments à l'aval des zones minières et plus généralement des zones de péridotite présentent globalement des teneurs élevées en nickel et en chrome (Figure 167). Certains cours d'eau, comme la Koua à l'aval de CDS, présentent toutefois des teneurs en Ni et Cr peu élevées par rapport aux autres creeks drainant des mines. Les teneurs en Ni et Cr sont très importantes pour l'affluent non minier présentant une géologie de péridotite (en rive droite de la Thio, tout à l'aval). Ce creek présente une griffe d'érosion naturelle qui produit beaucoup de sédiments fins. À l'inverse des autres creeks drainant des mines, ce dernier présente des teneurs en Cadmium très faibles (8.8 mg/kg), soit du même ordre de grandeur que les affluents non-miniers drainant des roches volcano-sédimentaires situés en rive gauche de la Thio (Kouergoua, Fanama...). C'est probablement lié aux couches remobilisées lors de l'érosion naturelle.

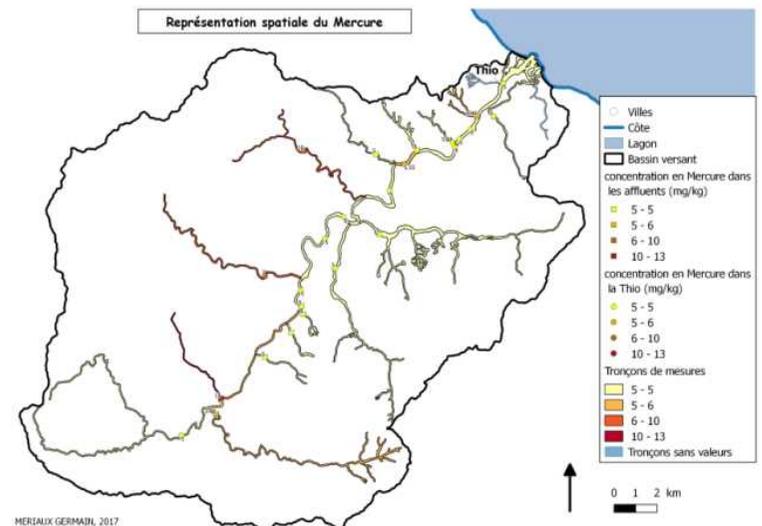
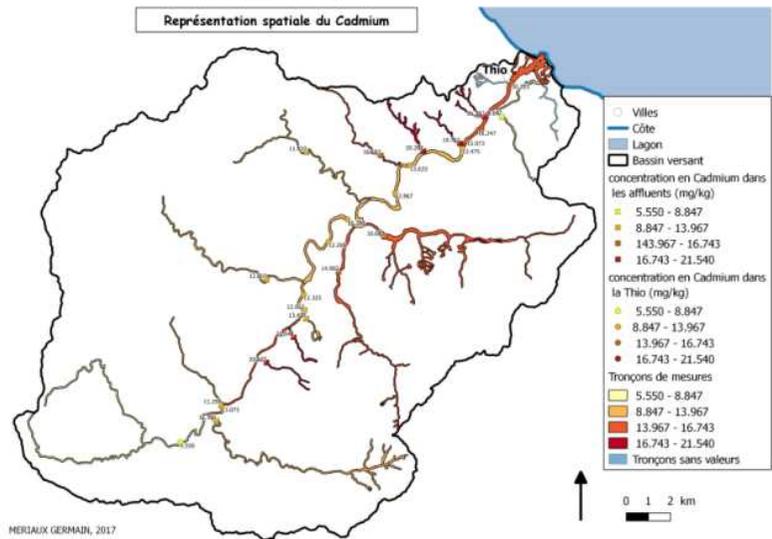
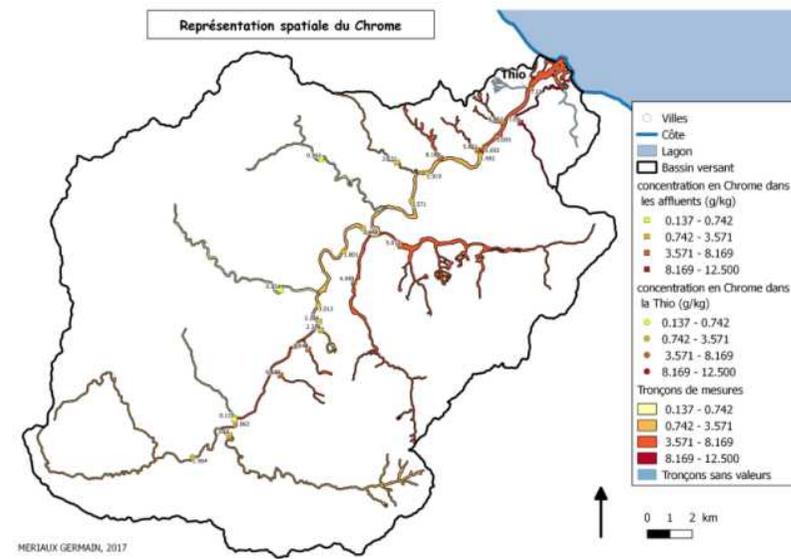
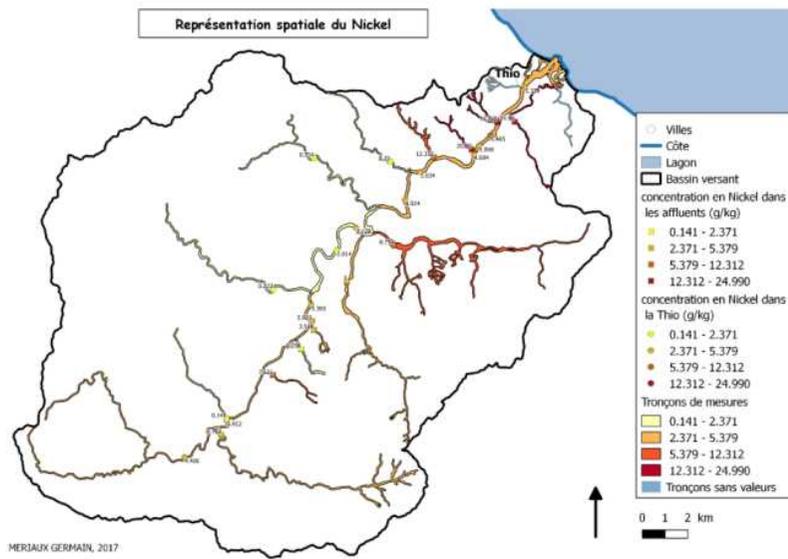


Figure 167 : Variabilité spatiale du nickel, chrome, cadmium et mercure dans les sédiments du lit des rivières

Enfin, seuls les creeks drainant les entités volcano-sédimentaires présentent des teneurs élevées en mercure. Le mercure peut provenir naturellement des roches, mais les feux de forêts importants dans cette zone pourraient aussi être une source importante d'émissions dans le milieu (Friedli *et al.*, 2009).

5.2.2.3. Variabilité spatiale de la couleur de ces sédiments stockés

Nous avons également réalisé des cartes prenant en compte la répartition spatiale des paramètres a^* , b^* et L^* de la couleur des sédiments. Les paramètres a^* et b^* déterminent la couleur du sédiment prélevé, avec respectivement une tendance à tendre vers le rouge et le jaune lorsque les valeurs sont positives et vers le vert et le bleu quand a^* et b^* sont négatifs. Le paramètre L^* correspond lui à la clarté du sédiment, et détermine donc la teinte plus ou moins claire des sédiments (une valeur forte indique une teinte claire).

Nous constatons donc pour les paramètres a^* et b^* des couleurs tendant vers le rouge et le jaune respectivement dans les tronçons drainant des surfaces minières (Figures 168 et 169). Pour le paramètre L^* , nous notons une baisse de la valeur d'amont en aval, avec une tendance à avoir des sédiments plus sombres. Cela s'explique par le fait que les exploitations minières entraînent une coloration orange. Pour certains affluents, plus particulièrement la Kouaré et la Fanama, nous relevons des valeurs très fortes pour le paramètre L^* (couleur claire), en cohérence avec la clarté observée des MES drainées par ces bassins.

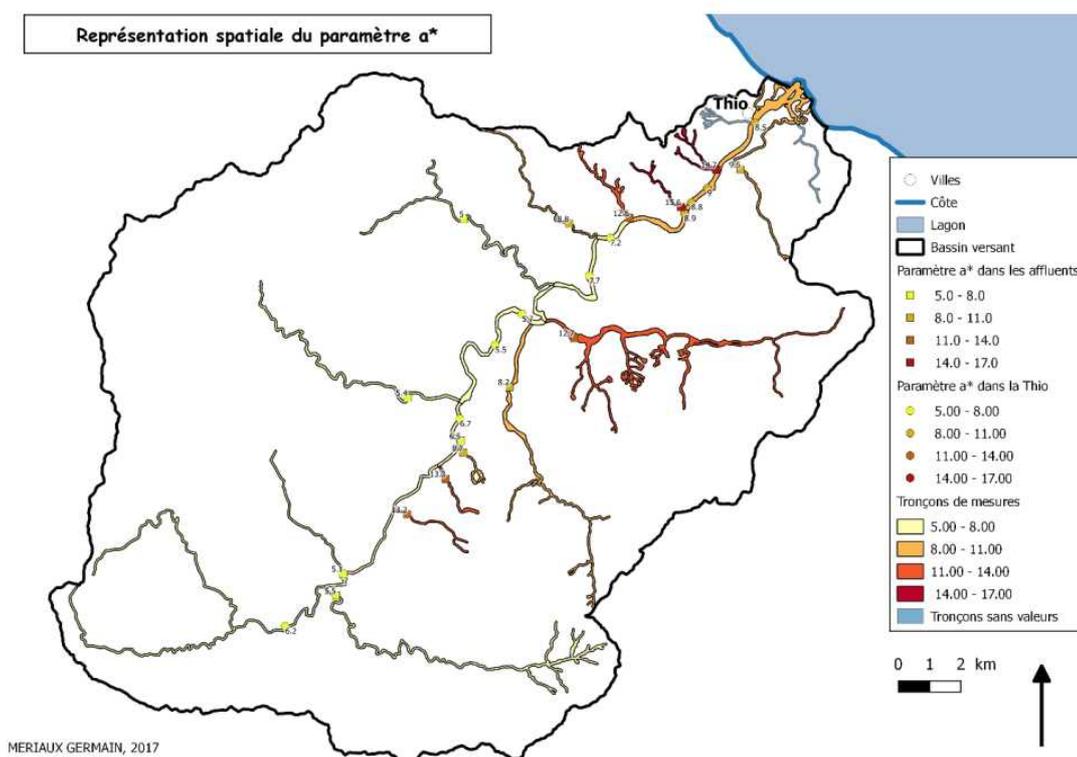


Figure 168 : Variabilité spatiale de l'indice a^* sur le bassin versant

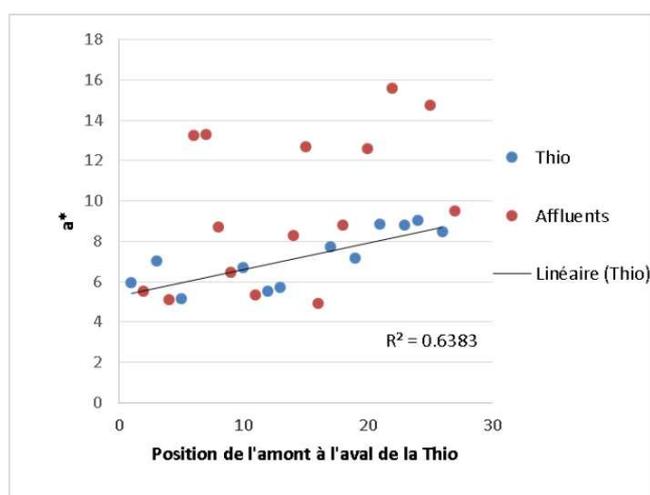


Figure 169 : Évolution du paramètre a^* de l'amont vers l'aval de la Thio et valeur sur les affluents de la Thio

5.2.3. CONCLUSION

Dans cette section, nous avons montré que les stocks de fines déposées et potentiellement remobilisables sont importants. Ce colmatage est essentiellement contrôlé par les bassins miniers. Toutefois, pour la crue de 2015, les bassins non miniers (Fanama et Kouaré) ont aussi fortement contribué à la production de MES en raison de la localisation des pluies sur ces bassins lors de ces événements.

5.3. MESURE DES CONCENTRATIONS ET DES FLUX DE MATIÈRES EN SUSPENSION À L'EXUTOIRE DE LA THIO

O. Navratil (Univ. Lyon) – Annexe 9-3

La quantification des rejets de matières en suspension sur terrain minier lors des temps de pluie est essentielle et exigée par la réglementation (*i.e.* *Projet CNRT « Petits bassins miniers »*). Toutefois, elle ne répond pas à la question des flux et concentrations de MES arrivant dans les milieux aquatiques plus à l'aval, dans la Thio, son delta et son lagon.

Couplée aux méthodes de traçage sédimentaire, l'estimation des concentrations et des flux de MES à l'échelle du bassin de la Thio revêt des enjeux importants en matière de suivi et d'évaluation environnementale des impacts des activités minières dans les zones à forts enjeux que ce soit pour l'agriculture (dépôt de boue dans les champs), pour les inondations (travaux importants de nettoyage et pertes de biens), pour la pêche (diminution des ressources par colmatage du substrat et risques de contamination liés aux substances chimiques associées aux particules fines).

Nous présentons ici les premiers résultats issus d'une station de mesure de la turbidité installée à proximité de l'exutoire de la Thio dans le cadre du programme *IMMILA* de 2015 à 2018. Ce suivi permet d'estimer les concentrations de MES à haute fréquence, ainsi que les flux de MES rejetées lors des crues dans la Thio, le delta et le lagon. Ces informations sont essentielles pour une connaissance approfondie des biocénoses en milieux dulçaquicoles et marins et les activités humaines afférentes.

5.3.1. INSTRUMENTATION ET ANALYSES

La station de jaugeage de Thio Saint Michel a été équipée par la DAVAR en 1981 d'un capteur pour mesurer en continu le niveau d'eau. Les débits (noté Q, en m³ s⁻¹) sont estimés à l'aide d'une courbe de tarage. En 2015, nous avons complété cette station par un turbidimètre néphélométrique (WTW Visolid® 700-IQ) pour mesurer la turbidité à un pas de temps de 10 minutes. Ce signal est enregistré par une station environnementale Campbell Scientific (CR1000). Cette station se trouve à l'aval de la Thio, en aval du Creek Mué et Tomuru. Ces mesures ont été complétées par une mesure de la hauteur d'eau afin d'estimer l'hydrogramme de crue au droit de cette station de mesure. En 2017, nous avons complété cette mesure par une sonde de mesure de la couleur de l'eau de la rivière (pas de temps de 10 minutes).

Des sédiments en suspension ont été collectés à l'aide de pièges passifs afin de caler les mesures du turbidimètre et obtenir des concentrations en MES [g L⁻¹]. Une relation turbidité-SSC¹¹ a été construite à partir d'un ajustement polynomial pour obtenir des mesures de concentration en sédiment. Les rendements en sédiments en suspension (SSY en tonnes, t) pour chaque événement de crue, ont été calculés comme suit :

$$SSY = \int_{t_0}^{t_f} Q \cdot SSC \cdot 10^{-3} dt \quad [4]$$

avec t_0 et t_f correspondant respectivement au début et à la fin de chaque crue de 2015 à 2018 ; SSY, les flux de MES en t/s ; SSC, la concentration en g/L et Q, le débit en m³/s.

5.3.2. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Deux événements de crue de faible intensité (<200 m³/s) ont pu être mesurés lors de ce projet (2015-2017).

L'analyse des pollutogrammes mesurés à l'exutoire de la Thio nous a permis de mesurer des concentrations élevées pour cette gamme de bassin versant (SSC max > 1g/L pour de petits événements de crue ; Fig. 170). Cet ordre de grandeur est souvent observé à l'exutoire de bassins alpins de taille similaire (Navratil *et al.*, 2010).

L'analyse des relations entre les concentrations en MES (SSC) et le débit permet de mettre en évidence des hystérésis horaires marquées (Fig. 171 - a). Pour la première crue, l'augmentation des SSC est rapide et en avance sur l'augmentation des débits, puis les concentrations diminuent de façon linéaire avec la diminution du débit (Fig. 171- b ; crue du 10/02/2017). Cette relation traduit un apport de bassins versants très proches de l'estuaire (comme la Mué ou la Tomuru) avec des eaux très chargées dès le début de la crue (de l'ordre de 1g/l). Pour la seconde crue, la relation SSC-débit est plus linéaire en début de crue (Fig.171- c ; crue du 18/02/2017), avec la présence d'une petite hystérésis horaire en milieu de crue (juste avant le pic). La relation forte dans la seconde partie de crue entre Q et SSC pourrait s'expliquer par une reprise des sédiments du lit de la rivière ; ie. Plus le débit augmente, plus les sédiments sont rapidement remis en suspension.

¹¹ SSC : Concentration en sédiments en suspension (g/L)

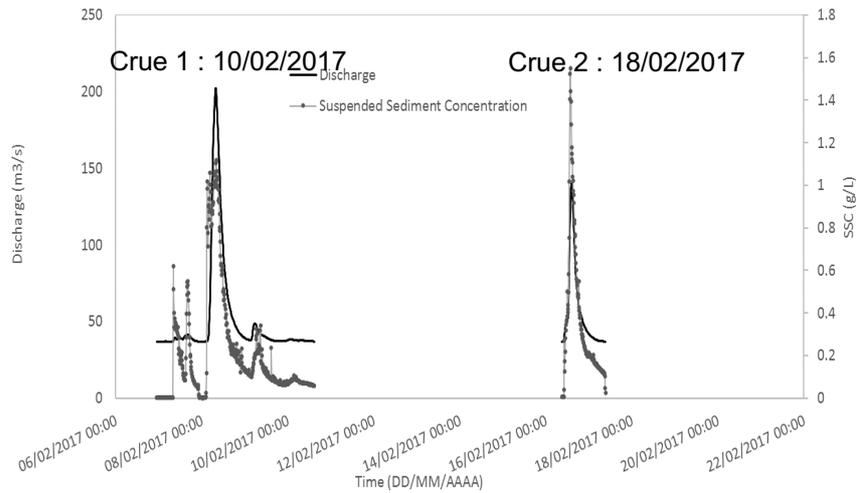
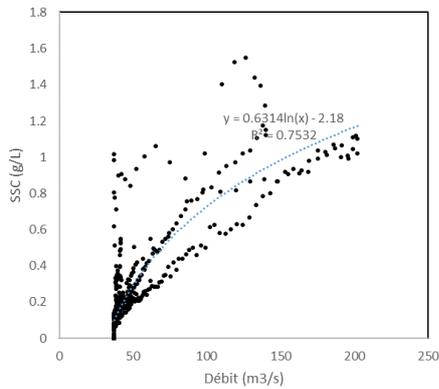


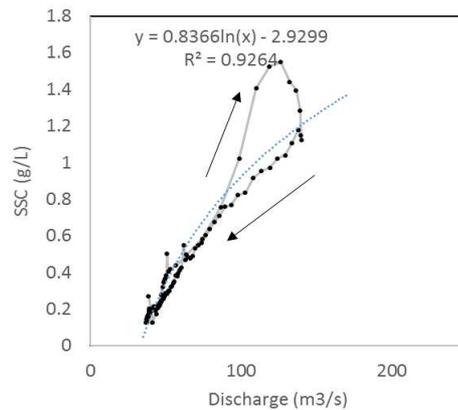
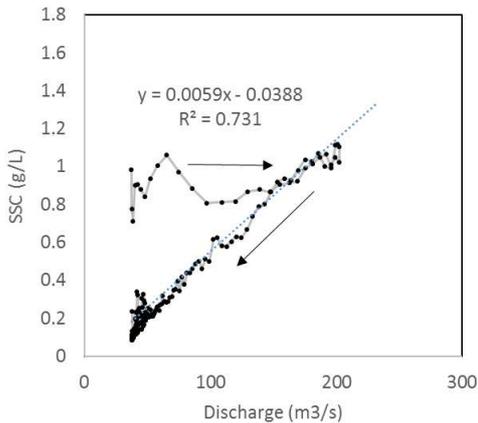
Figure 170 : Évolution des débits et des concentrations en MES pour deux évènements de crues de faible intensité sur la Thio (hauteur max : 2m) en 2017



(a) Évolution des concentrations en MES en fonction des débits pour la même période (02/2017) (02/2017)

(b) 10/02/2017

(c) 18/02/2017



Évolution des concentrations en MES en fonction des débits pour les deux crues individuellement : (b) crue 1 et (c) crue 2

Figure 171 : Évolution des concentrations en MES en fonction des débits

Les flux sédimentaires pour ces deux crues sont de l'ordre de 2600 – 5500 tonnes de MES (Tab. 40). Ces flux sont du même ordre de grandeur que les cumuls estimés de sédiments fins dans le lit de la Thio (8 500 tonnes/10 cm). Ces flux correspondent à 8 et 16 t/km² respectivement pour les crues du 18/02 et 10/02/2018.

Tableau 40 : Estimations des différents paramètres de crue et de transport de MES au cours de 3 évènements de crue

Date	Qmax (m ³ /s)	Concentration max (g/L)	Flux max (kg/s)	Débit cumulé (t)	Mesure/estimation
10/02/2017	200	1.1	220	5 500	Mesure
18/02/2017	140	1.5	190	2 600	Mesure
25/02/2015	3 490	2.9	10 000	440 000	Estimation

La relation de la figure 171 a été reprise et utilisée pour estimer les concentrations et flux pour la crue de 2015. Les résultats montrent des concentrations <3g/L et des flux globaux à l'échelle de l'évènement de l'ordre de 440 000 tonnes de MES. Ces flux correspondent à 1 000 t/km² pour la crue du 25/02/2015 (pluie de période de retour 20 ans). Cette valeur est du même ordre de grandeur que les mesures réalisées par Danloux et Lagagnier (1991) sur la Ouenghi (Tabl. 41) pour des débits spécifiques similaires (crue du 7/3/1975, correspondant au cyclone Alison).

Ces estimations pour la crue du 25/02/2015 constituent toutefois des estimations indirectes à considérer avec une grande prudence et doivent être validées par des mesures directes de la turbidité et des concentrations.

Tableau 41 : Information des crues mesurées sur la Ouenghi (245 km²) par Danloux et Lagagnier (1991)

Date	Débit maximum Q. Max m ³ /s	Volume ruisselé 10 ⁶ m ³	Hmm ruisselé	Temps de base mn	Débit moyen ruisselé m ³ /s	Tonnage transporté Qs en t
03-05/02/74	1 590	119	486	3 090	642	215 000
12-12/02/74	377	9	38	1 200	129	5 600
07-08/03/75	2 070	105	429	2 190	799	182 000
17-18/04/75	420	12	48	1 260	155	4 170
14-19/01/76	1 260	117	478	6 300	310	83 100
27-27/16/77	64	1	4	630	27	56
06-08/01/78	608	38	156	3 435	185	40 300
12-14/03/80	282	7	29	2 640	44	19 200
12-13/02/81	1 280	53	218	1 380	644	40 700
06-07/03/81	436	13	52	2 020	106	4 420
24-25/12/81	1 660	59	240	1 710	572	40 300

5.3.3. SYNTHÈSE ET PERSPECTIVES

Une station environnementale de mesure à l'aval de la Thio est en place depuis 2015 et permet de mesurer la hauteur d'eau et la turbidité à un pas de temps de 10 minutes. Cette station de mesure a permis de réaliser des sédigrammes et hydrogrammes sur la période de 2015-2018, avec toutefois de très nombreuses lacunes.

Les flux spécifiques mesurés pour les petites crues sont de l'ordre de 10 t/km² tandis que le flux spécifique de MES estimé pour la crue de 2015 est de 1000 t/km² (crue de période de retour estimée à 20 ans). Cette dernière estimation devrait cependant être validée par des mesures directes des concentrations.

Au titre des perspectives que l'implantation de cette station de mesure environnementale pourrait permettre de faire dans un programme dédié à venir si des moyens étaient dédiés à sa maintenance et à la récupération des données, il serait sans doute intéressant de travailler sur le couplage des approches de traçage (présentées au paragraphe suivant) et de mesure de couleur de l'eau dans la rivière. Un capteur a été installé en 2017 au niveau de la station de Thio Saint-Michel pour vérifier la faisabilité de la mesure couleur de l'eau avec du matériel peu onéreux. Des données ont été enregistrées mais la fin du programme *IMMILA* n'a pas permis de tester plus avant cette approche qui pourrait peut-être permettre d'estimer au cours de la crue les contributions relatives des mines vs celle du reste du bassin.

De même, un travail de couplage avec les mesures de couleur réalisées dans le lagon (des collègues de L'IRD font ce type de travail) après chaque événement cyclonique serait sans doute également intéressant à mener.

6. PERCEPTION DES HABITANTS ET ACCEPTATION SOCIALE DES TRANSFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Auteurs : C. Sabinot, L. Gosset, A. Pidjo, (IRD), E. Worliczek – Annexe 10

L'IRD, associé à une partenaire patentée, a été en charge du volet anthropologique du projet *IMMILA*. Ce dernier a été conduit de manière complémentaire au volet anthropologique du projet « Gestion du passif » coordonné par Manuel Garcin. Les éléments partagés dans l'ensemble du rapport *IMMILA* ont pu être produits grâce à l'investissement de l'équipe principale ainsi que de deux étudiantes recrutées sur le projet et travaillant en binôme ainsi que de leurs contributions en tant que patentées durant la phase 2 : Lucie Gosset et A-Tena Pidjo.

Dans un contexte d'engravement des rivières où les phénomènes d'hypersédimentation se déploient jusqu'à l'interface terre-mer, l'objectif de ce volet était, d'une part, de décrire et d'analyser l'évolution des perceptions des transformations de l'environnement et de les spatialiser, et d'autre part, de décrire et analyser les changements dans les activités des populations liées au lagon et à l'embouchure. En adoptant une approche classique à l'anthropologie basée sur de l'observation, de l'observation participante, des entretiens semi-directifs, il s'est agi de réaliser une analyse des discours et des pratiques des différents acteurs (habitants, coutumiers, élus, industriels). En collaboration avec les géographes-géomaticiens de l'équipe, les participants au volet anthropologique ont contribué à construire un SIG qui vise croise les couches géologiques et environnementales avec celles relevant des perceptions et des activités humaines.

La première phase de l'étude a été alimentée par deux travaux de master d'anthropologie accueillis à l'IRD et co-encadrés par C. Sabinot et E. Worliczek qui ont permis de mieux appréhender les représentations que les habitants se faisaient de l'engravement et de l'hypersédimentation du bassin versant, ainsi que les transformations qu'ont rencontrées les savoirs et les pratiques sociales et culturelles des habitants depuis une cinquantaine d'années (cf. mémoires). La seconde phase de l'étude a eu pour objectif d'articuler les résultats produits par les différentes disciplines et à en extraire les résultats les plus pertinents pour la production de deux référentiels méthodologiques « *Gestion du passif* » et *IMMILA* (rapport et SIG) visant à une meilleure compréhension des enjeux sociaux et environnementaux pour l'organisation de l'adaptation aux contraintes de l'engravement et de l'hypersédimentation des rivières, de l'embouchure et du platier.

⊙ **Lexique des termes employés et décrits par les habitants de Thio**

Les termes présentés ci-après sont des termes mobilisés par les habitants lors des entretiens effectués avec eux pour décrire un certain nombre d'éléments en lien avec le phénomène d'engravement et d'hypersédimentation des cours d'eau. Certains ont pu être traduits en langue vernaculaire par eux (en xârâcùù), mais d'autres sont toujours employés en français, même lorsque les habitants communiquent entre eux en « langue ». C'est le cas notamment des termes de pollution, de nickel, et d'engravement, qui ont fait émergence récemment dans le vocabulaire des habitants

Boue : elle est constituée de fines particules et peut-être marron ou rouge. Lorsque les habitants évoquent la boue en lien avec l'engravement et les inondations, ils font exclusivement référence à cette boue rouge. Celle-ci est directement associée à la pollution et à l'activité minière et remplace dans les discours les termes de « pollution » et de « nickel ». Pour les habitants, cette boue est apportée dans les habitations, dans les champs et dans la mangrove lors des inondations. Le terme de boue est utilisé à la fois pour évoquer le mélange d'eau et de sédiments fins et pour parler de la couche sèche de fines particules qui se dépose lorsque l'eau se retire. Cette couche est épaisse, difficile à retirer pour « retrouver la bonne terre » dans les champs et rends la terre moins fertile.

Caillasse : pour les habitants il s'agit d'un mélange de graviers et de sable. La caillasse peut se déposer près de la rivière, près des habitations et dans les creeks.

Cailloux (sège) : ils constituent des pierres de taille assez volumineuse (environ 20 centimètres de diamètre). Les habitants distinguent les cailloux de la mine de ceux de la rivière (Gosset 2016) par leur couleur et leur texture. Ceux provenant de l'activité minière sont marrons-caramels et ceux provenant de la rivière sont noirs et lisses.

Creek (xwârè) : il est défini par les habitants comme un cours d'eau assez étroit, pouvant s'assécher durablement ou de manière épisodique. Il existe de nombreux creek dans la commune de Thio et chaque tribu est généralement parcourue par plusieurs d'entre eux. Ce terme traduit l'influence culturelle anglo-saxonne, puisque par exemple en Amérique du Nord, il est employé pour désigner les petits ruisseaux.

Cyclone (kwâdé pia) : De manière générale, les cyclones sont décrits par les habitants comme des phénomènes régénérant la nature et ayant une fonction nettoyante de la rivière (en enlevant les algues et les bouts de bois notamment). Dans le contexte d'engravement des rivières, le rôle régulateur des cyclones est affaibli puisqu'en nettoyant la rivière, ils charrient également des sédiments fins et grossiers. Les habitants distinguent deux types de cyclones et ceux-ci auraient des effets différents sur les trous d'eau et les cours d'eau : les cyclones avec des fortes pluies et générant des courants importants seraient à même de nettoyer la rivière et d'évacuer la caillasse contenue dans les lits des cours d'eau et les trous d'eau. À l'inverse, les cyclones induisant de faibles courants augmenteraient la quantité de sédiments retrouvés dans ces espaces.

Déplacement / déplacer : terme employé par les habitants pour lorsqu'ils évoquent la délocalisation de leurs habitations ou champs dans d'autres zones non inondables. Le terme de « déplacement » est un terme assez large car il peut concerner la relocalisation d'un logement dans d'autres espaces au sein de la tribu, mais également dans une autre tribu (cas des personnes accueillies dans une tribu par exemple). Les déplacements correspondent donc à une mobilité définitive (ce terme ne décrit pas la mobilité des habitants au moment des inondations pour qu'ils puissent trouver refuge) pour s'installer dans d'autres espaces non inondables.

Engrèvement : il est associé par les habitants comme le phénomène d'accumulation de cailloux et surtout de caillasse dans les cours d'eau, qui viennent les « remplir ». En « remplissant » les cours d'eau, il aurait une influence sur le phénomène d'inondation. Les habitants constatent qu'elles sont plus récurrentes que par le passé et qu'elles sont facilitées avec la présence de « caillasse » dans la rivière (ils observent que les inondations apparaissent après quelques jours de pluie au lieu de délais plus importants antérieurement).

Inondations (dée) : les habitants font référence au terme d'inondation lorsque les cours d'eau débordent de leur lit et que l'eau s'étend aux alentours inondant notamment les champs et les habitations. Ils disent aussi que « l'eau monte » pour parler des inondations. La commune a toujours connu des phénomènes d'inondations, mais les habitants distinguent celles qui avaient lieu par le passé (moins étendues, moins fréquentes et n'amenant pas la boue rouge) et celles qui ont lieu depuis les années 1975 avec la descente des rejets miniers dans les cours d'eau. Ces dernières sont perçues comme une conséquence directe de l'engravement des cours d'eau. Au fil du temps, elles surviendraient plus facilement, seraient devenues plus fréquentes que par le passé (en partie à cause de l'accumulation de sédiments), s'étendraient davantage et amèneraient de la boue rouge.

Nickel : le nickel englobe plusieurs termes pour les habitants, il est employé comme une synecdoque puisqu'il fait référence à la fois à la matière en elle-même (très largement associée à la boue rouge), à la provenance de l'élément retrouvé, ou bien à l'exploitant minier.

Pollution : pour les habitants, ce terme fait directement écho à l'activité minière et aux rejets miniers, qui accrochés à flanc de montagne, sont peu à peu descendus dans les creeks, les rivières et sont transportés dans les zones cultivées, la mangrove et les habitations lorsqu'il y a des inondations. Ce terme est général et fait à la fois référence aux cailloux, à la caillasse, mais aussi et surtout à la boue. La couleur associée à la pollution est la couleur rouge de la boue, ou caramel des cailloux.

Rivière (xwârè) : elle est décrite avant tout par sa largeur (plusieurs mètres), la présence continue de l'eau et sa plus grande profondeur. Pour illustration, les rivières évoquées par les habitants de Thio sont celles de la Thio elle-même - appelée communément « la grande rivière » - celles de Nembrou (Xwâ Nèbürü) et de Nakalé (Xwâ Nakaré).

Trous d'eau mwââ kwé (« la maison de l'eau ») ou pôô kwé : les trous d'eau sont des lieux plus profonds dans la rivière qui forment des bassins. Ils sont considérés comme l'habitat principal des poissons et constituent des espaces de pêches et de baignade privilégiés. Certains d'entre eux sont dotés en plus d'une valeur sociale et culturelle importante : ils ont été des lieux de réserve pour les coutumes par le passé et la pêche y était donc restreinte à certaines périodes (cette pratique semble être moins présente aujourd'hui), d'autres sont des lieux sacrés/tabous du fait de l'histoire qui y est associée.

6.1. DIFFÉRENCES DE PERCEPTION ET DE VÉCU DES CHANGEMENTS SOCIO-ENVIRONNEMENTAUX ENTRE LES TRIBUS AMONT ET AVAL

De l'amont à l'aval du bassin de la Thio, les vécus, les représentations et les perceptions des habitants de la commune vis-à-vis du sur-engravement des creeks et de la Thio et de l'hypersédimentation du delta sont très variées. Un point commun les lie, celui de l'association systématique des inondations aux transformations géomorphologiques des cours d'eau et de l'estuaire de la Thio. Ces dernières sont perçues par les populations comme étant plus fréquentes et de plus forte intensité, en particulier à la suite de deux inondations du bassin versant en 2013, et une en 2015. Ces inondations ont entraîné des dommages importants à quelques mois d'intervalle sur les biens, les habitations et les champs, et ont engendré un sentiment de crainte très fort des habitants les plus exposés lors de chaque pluie.

De manière générale, les habitants décrivent les transformations des cours d'eau par l'accumulation de cailloux, de « caillasse » et de boue dans la rivière et la mangrove. Cette accumulation, en obstruant les passages, vient en effet limiter le passage de l'eau, élargir les lits de la rivière et des creeks, diminuer leur profondeur et rendre l'eau trouble. Même si ces trois termes sont associés par les habitants à la « pollution », la boue y fait davantage référence (un lexique des termes employés du point de vue des habitants est disponible dans la partie précédente). La mine est considérée par les habitants comme responsable des inondations de grande ampleur qui se produisent depuis le milieu des années 1970 et plus particulièrement depuis le cyclone Alison (1975). Ce dernier est perçu comme un moment clef pour les habitants, puisqu'en accélérant un processus d'érosion déjà en cours, il a également amené la pollution à laquelle les habitants font souvent référence. Ceux-ci associent le sur-engravement et l'hypersédimentation du delta à des changements physiques, géomorphologiques, écologiques, sociaux et culturels, ainsi qu'à des risques de santé publique.

6.2. LES IMPACTS EN LIEN AVEC LA PROBLÉMATIQUE D'ENGRAVEMENT ET D'HYPERSÉDIMENTATION

Les tableaux présentés ci-après permettent de mieux comprendre les impacts vécus par les tribus de la chaîne et de l'estuaire en lien avec la problématique d'engravement et d'hypersédimentation des cours d'eau. De plus, ils montrent que face à une problématique commune, les effets de l'engravement et de l'hypersédimentation sont spécifiques à chaque tribu et qu'ils dépendent largement de critères tels que : la morphologie du territoire, la présence et la proximité de cours d'eau, l'organisation spatiale, la présence d'une exploitation minière à proximité de la tribu, etc. Tout comme les effets de l'engravement sont à appréhender de manière localisée selon les tribus, il est important de souligner qu'ils sont également différents au sein des tribus elles-mêmes.

Le tableau 42 a pour objet de restituer de façon synthétique les éléments du contexte général et des enjeux spécifiques des tribus de St Pierre, St Paul et St Michel à partir des entretiens menés entre 2016 et 2018 par A. Pidjo, L. Gosset et C. Sabinot

Tableau 42 : Descriptif du contexte général et des enjeux spécifiques des tribus de la chaîne

Tribus	Saint-Pierre	Saint-Michel	Saint-Paul
<p><u>Contexte général</u></p> <p><u>Problématique d'engravement :</u> - Influence directe de la mine (<i>oui/non</i>) - Foncier disponible (<i>oui/non</i>) - Foncier disponible inondable (<i>oui/non</i>) - Foncier disponible non inondable (<i>situer</i>)</p> <p><u>Apport de sédiments par :</u> (<i>préciser</i>) Décharge Rivière Creek</p> <p><u>Type de sédiments :</u> - Cailloux - « Caillasse » - Boue</p>	<p>Oui Oui Non À l'arrière de « la tribu », Nebürü (hauteurs), Nekaré.</p> <p>Décharge, creeks, rivière</p> <p>Cailloux, « caillasse », boue</p>	<p>Non Oui Non Xwê Töö, GDPL face à « l'ancienne tribu », au-dessus de Xwê Töö</p> <p>Creeks, rivière</p> <p>« Caillasse », boue</p>	<p>Oui Oui Non Saint-Paul 2, Shan-Poro, « hauteur ancienne tribu »</p> <p>Décharge, creeks, rivière</p> <p>Cailloux, « caillasse », boue</p>
<p><u>Le phénomène d'inondation</u></p> <p><u>Exposition aux risques d'inondations :</u> (<i>échelle 0 (faible) -1-2-3 (forte)</i>) Selon les habitants toujours !)</p> <p><u>Surface inondée dans la tribu (en %)</u> (Selon les habitants toujours !)</p> <p><u>Origine inondation (spécifier)</u> - Par la rivière (<i>à nommer</i>) - Les creeks - Influence de la marée</p> <p>Habitations inondées (<i>oui/ non</i>)</p>	<p>2</p> <p>30 %</p> <p>Nebürü, Nakalé, La Thio, creeks</p> <p>Oui</p>	<p>2</p> <p>50 %</p> <p>La Thio, creek Tomwa</p> <p>Oui</p>	<p>1,5</p> <p>30 %</p> <p>La Thio</p> <p>Oui</p>
<p><u>Déplacements¹² :</u></p> <p>- Distance de déplacements (<i>km, m</i>)</p> <p>- Type : isolé ou collectif (<i>préciser</i>)</p>	<p>Variable selon les habitants (max 1 km)</p> <p>Isolés (habitations)</p>	<p>Variable selon les habitants (max 600 m)</p> <p>Isolés (habitations)</p>	<p>Variable selon les habitants (max 2 km)</p> <p>Isolés (habitations)</p>

¹² On a repris ici le terme utilisé par les populations pour désigner les relocalisations éventuelles de leur habitat

- Lié à l'engravement (<i>oui/non</i>)	Oui (après 1975 et +)	Oui (après 1975 et +)	Oui (après 1975 et +)
- Vague de déplacement ? (<i>une ou plusieurs</i>)	Plusieurs	Plusieurs	Plusieurs
<u>Changements sur la rivière : (préciser)</u>			
- Profondeur (+ ou -)	Moins	Moins	Moins
- Modification du lit (<i>comment</i>)	Aménagé : curé (Nebürü, Nakalé) ; => plus large, droit	Encaissé, ensablé	Encaissé, ensablé, passe vers la rive droite devant « l'ancienne tribu
- Débordement de l'eau (<i>où</i>)	vers « l'ancienne tribu », Matché, Nakalé (terrain foot), habitations Nebürü, refoulement avec affluents de la Thio	Vers « l'ancienne tribu », refoulement avec le creek.	vers « l'ancienne tribu »
<u>Aménagements à proximité ou dans :</u>			
- Présence (<i>oui/non</i>)	Oui	Non (nettoyage des creeks par le passé)	Non (curage à certains endroits par le passé)
- Type (<i>préciser</i>)	Curage 2015		
- Satisfaction (<i>oui/non</i>)	Majorité = non		
- Crainte de l'aménagement (<i>oui/non</i>)	Oui		
- Attentes (<i>préciser quels aménagements</i>)	curer + profond, enrochements	curage	curage

Il est ensuite présenté deux tableaux thématiques précisant les impacts des phénomènes d'engravement, d'hypersédimentation et d'inondation tels que rapportés par les populations interrogées. Ces deux tableaux (Tabl. 43 et Tabl. 44) sont respectivement relatifs aux réponses des tribus de la chaîne et du littoral.

Tableau 43 : Impacts des phénomènes d'engrèvement, d'hypersédimentation et d'inondation –Tribus de la chaîne

	Saint Pierre	Saint Paul	Saint Michel
Quels sont les impacts majeurs liés à l'engrèvement (l'E) et à l'hypersédimentation (l'HS) du point de vue des habitants ?	La descente des sédiments des décharges (cailloux, caillasse, boue) dans la Nembrou, la Nakalé et les creeks ; le refoulement de l'eau dans la tribu avec la confluence des creeks et rivière.	Les inondations à l'ancienne tribu, le risque d'isolement de la tribu pendant les inondations	La sortie du lit de la Thio en amont de la tribu (xwê töö) et inondations à "l'ancienne tribu"
Quel est l'impact de l'E et de l'HS sur le foncier habitable et cultivable disponible ? (fort/moyen/ faible)	Impact moyen Menace sur la disponibilité du foncier mais moindre que pour l'estuaire. Possibilité d'habiter sur l'arrière de l'espace de la tribu (entre Nembrou et Nakalé) Les cultures sont également inondées. Certaines personnes cultivent près de leurs zones d'habitations également.	Impact moyen à faible. Après agrandissement de la réserve par le passé et déplacement des populations : le foncier habitable et cultivable non inondable est disponible sur le GDPL de Shan Poro.	Impact moyen Menace sur la disponibilité du foncier mais moindre par rapport aux tribus de l'estuaire. Possibilité d'habiter au-dessus de Xwê Töö et en aval de la tribu (avant le pont des lépreux). Les zones de cultures sont inondées, certaines personnes cultivent près de leurs zones d'habitations également.
Qu'est-ce qui est le plus problématique pour les habitants avec l'E et l'HS et le phénomène d'inondations : l'impact sur les habitations ou sur les cultures ?	L'impact sur les champs, et celui sur les habitations menacées par les forts courants (notamment près de la Nembrou)	L'impact sur les habitations. Principalement celles situées sur l'espace de l'ancienne tribu en bas	L'impact sur les zones de culture près de la Thio, mais aussi certaines habitations (ancienne tribu)
Quelle est la distance de la tribu /des habitations par rapport à la rivière en temps normal ?	Variable selon les habitations, de 100 à 400 mètres	100 à 300 mètres	100 à 500 mètres
Les habitants sont-ils isolés et immobilisés pendant les inondations ?	Oui, le pont de la Nakalé s'est déjà cassé pendant les crues ; difficulté de sortir du chemin de Nembrou pour rejoindre RP4	Oui, le pont entre St Michel et St Paul s'est déjà cassé ; passage à gué de la Tomuru impraticable	Oui, pour les habitants de manière générale qui doivent attendre que le niveau de l'eau redescende

Tableau 44 : Impacts des phénomènes d'engravement, d'hypersédimentation et d'inondation –Tribus du littoral

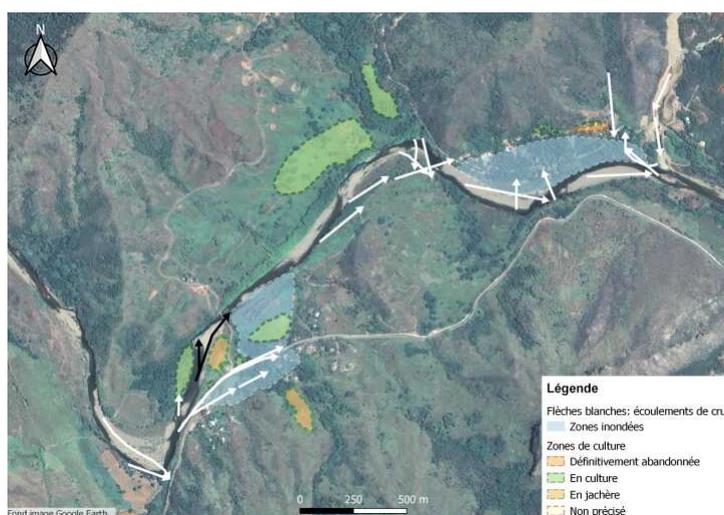
	Saint- Philippo 1	Saint-Philippo 2	Urué
Quels sont les impacts majeurs liés à l'engravement et à l'hypersédimentation du point de vue des habitants ?	Les inondations et l'apport de sédiments (sable et boue) qui impactent le foncier habitable, les activités vivrières	Les inondations et l'apport de boue induit qui impactent le foncier habitable et les activités vivrières	L'apport de sédiments qui « bouche » la rivière et les arroyos (caillou, caillasse, boue), les inondations et l'apport de boue induit qui impacte les activités vivrières (champs notamment)
Quel est l'impact de l'érosion et de l'hypersédimentation sur le foncier habitable et cultivable disponible ? (fort/ moyen/ faible)	Impact fort. Très peu d'espace habitable non inondable restant. Les cultures sont toutes situées en zone inondable	Impact fort. Très peu d'espace habitable non inondable restant. Les cultures sont toutes situées en zone inondable ⇒ retour vers la tribu de Koua pour habitat et culture, ou tribu de Saint-Gabriel (selon les clans)	Impact fort. Pas d'espace habitable disponible à l'ancienne tribu. L'espace habité de « la plaine » est inondable. Possibilité d'étendre la zone habitée, mais facteurs sociaux qui rendent complexe la situation. Les cultures sont toutes situées en zone inondable (pour le lieu-dit « la plaine », l'îlot Sainte-Marie et l'ancienne tribu).
Qu'est-ce qui est le plus problématique pour les habitants : l'impact sur l'habitation ou sur les cultures ?	Dépend de la localisation des habitations : habitation sera plus problématique que le champ si celle-ci est inondée. Questionnement important sur le foncier habitable disponible non inondable et constructible et sur l'espace disponible.	Dépend de la localisation des habitations : habitation sera plus problématique que le champ si celle-ci est inondée. Questionnement important sur le foncier habitable disponible non inondable et constructible et sur l'espace disponible.	Dépend de la localisation des habitations : habitation sera plus problématique que le champ si celle-ci est inondée. L'impact sur les cultures est fort pour ceux qui cultivent près de la mangrove notamment.
Quelle est la distance de la tribu /des habitations par rapport à la rivière en temps normal ?	Située entre 400 m à 1 km	Située à plus d'un km de la Thio, mais proche de plusieurs arroyos.	Les habitations de l'ancienne tribu sont situées à environ 100 m de la Dothio. Celles situées au lieu-dit « la plaine » sont à 1 km minimum de la Thio. Les habitations de la plaine sont cependant proches

			d'arroyos dont les écoulements sont liés à la Thio et la Dothio
Les habitants sont-ils isolés et immobilisés pendant les inondations ?	Oui, ils sont isolés du village, et doivent attendre que l'eau s'évacue	Oui, ils sont isolés et doivent attendre que l'eau s'évacue	Oui, ceux de l'ancienne tribu sont isolés à cause de la submersion du pont de Pétrél. Ceux dans la plaine sont coupés du village par les creeks et le débordement de la Thio

Sur certains sites, les habitants ont été invités à spatialiser leur vécu des périodes d'inondation. Les cartes présentées dans le SIG et dont deux exemples sont fournis aux figures 172 et 173 permettent non seulement de localiser les espaces concernés par les inondations mais aussi le sens des écoulements de crue. Ces informations géoréférencées deviennent une mémoire partagée utile au dialogue et aux réflexions d'adaptation à mettre en œuvre impliquant des changements dans les usages des lieux, des aménagements permettant de maintenir les zones à enjeux hors d'eau, des éventuels déplacements de populations. Il convient notamment de noter que le fait d'avoir vécu des transformations fortes de son habitat et/ou de ses cultures par le passé modifie la manière d'aborder les aménagements ou une politique de déplacements ou de relocalisation des habitants.

6.2.1. CONSÉQUENCES SUR LE FONCIER

De manière générale, le foncier habitable et cultivable est plus fortement impacté dans les tribus de l'estuaire. Cependant, bien qu'il y ait plus de foncier disponible dans les tribus de la chaîne, d'autres facteurs sont à prendre en compte. Pour la tribu de Saint-Paul par exemple, le foncier disponible cultivable non inondable se situe sur le GDPL¹³ de Shan Poro, c'est-à-dire relativement loin par rapport aux habitations des personnes habitant toujours près de la maison commune (les champs les plus proches se situent à plus de 2,5 km en passant par la route). De plus, ces personnes étant majoritairement des personnes âgées (plus de 60 ans), le déplacement vers ces zones de culture devient complexe. Elles cultivent d'ailleurs autour de chez elles. De plus, même si le foncier non inondable est accessible pour cette tribu, son utilisation pour les habitations amène une reconfiguration importante de l'organisation spatiale au sein de la tribu.



¹³ GDPL : Groupement de droit particulier local structure originale à la Nouvelle-Calédonie ayant pour principal objet la rétrocession foncière (dès 1988).

Figure 172 : Représentation spatialisée des dynamiques de crue vécues sur des zones à enjeux à Saint Paul et Saint-Michel. Source : Entretiens sur photo aérienne menés en 2016 et 2017 par A. Pidjo et L. Gosset

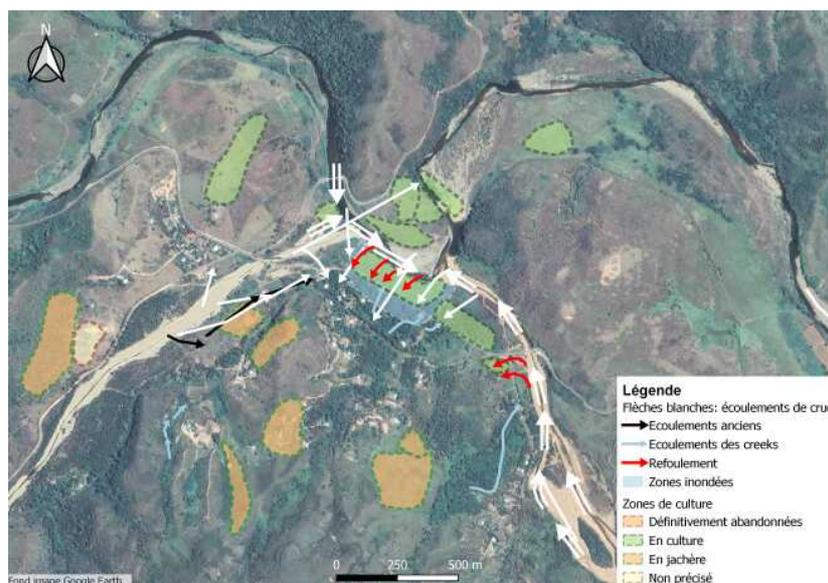


Figure 173 : Représentation spatialisée des dynamiques de crue vécues sur des zones à enjeux à Saint Paul et Saint-Michel. Source : Entretiens sur photo aérienne menés en 2016 et 2017 par A. Pidjo et L. Gosset

Les discours collectés ont permis d'établir deux tableaux synthétiques (Tabl. 45 et Tabl. 46) qui récapitulent les propos des populations relatives aux dynamiques de déplacement envisageables en réponses aux contraintes foncières. Le tableau 45 concerne les tribus de la chaîne et le tableau 46 celles du littoral.

Tableau 45 : Synthèse des discours collectés à propos des dynamiques de déplacement envisageables en réponses aux contraintes foncières. Tribus de la chaîne.

Source : Entretiens menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

En cas de déplacement nécessaire	Saint Pierre	Saint Paul	Saint Michel
o Les déplacements sont possibles sur la zone de la tribu (habitat / cultures)	Oui, il y a des espaces libres vers la Nembrou et sur l'arrière de « la tribu », endroits où des constructions sont déjà présentes. Mais nécessité de se référer à l'histoire des clans.	Oui, sur le GDPL de Shan Poro	Oui, au-dessus de Xwé Töö et du côté du pont des lépreux, endroits où des constructions sont déjà présentes. Mais nécessité de se référer à l'histoire des clans.
o Les déplacements seraient possibles par d'autres liens de familles extérieurs à la tribu ?	Non renseigné	Oui, en lien avec l'histoire des clans et de la chefferie	Non renseigné
o Comment les nouveaux espaces sont-ils occupés (cultures/habitations) ?	Par des habitations	Par des habitations et des champs (Shan Poro)	Par des habitations

La possibilité de se déplacer à l'intérieur de la tribu, comme potentiellement à l'extérieur, dépend bien sûr de la disponibilité du foncier non inondable, mais aussi et surtout de l'organisation clanique et des relations entre les clans au sein de la tribu (répartition spatiale des clans, position de chaque clan et légitimité). Il convient de noter que les lieux d'habitations sont toujours « habités de la présence des Ancêtres ». Ils portent l'histoire des clans et cet élément ne doit jamais être négligé dans la réflexion sur les déplacements. C'est un élément qui influence tant la réticence de certains habitants à vouloir se déplacer que le choix des zones qui pourront être investis.

Les transformations de la rivière induites par l'engravement sont très mobiles. Elles varient d'un événement à un autre. En effet, chaque forte pluie et chaque événement météorologique intense (cyclones, crues) modifient les zones d'accumulation de sédiments (fins ou grossiers), le passage de l'eau, la profondeur de la rivière et la largeur du lit, la turbidité de l'eau, ou encore la forme et la taille des trous d'eau. De plus, les habitants observent que lorsque les événements météorologiques importants génèrent de forts courants, cela permet d'évacuer les sédiments vers l'aval. À l'inverse, ils constatent que lorsque les courants induits sont faibles, même si une nouvelle quantité de sédiments est charriée, celle-ci a tendance à s'accumuler davantage le long du lit des rivières et comble les trous d'eau. Ces transformations ont des impacts sur les ressources aquatiques et les zones cultivées qui sont situées en zones inondables.

Tableau 46 : Synthèse des discours collectés à propos des dynamiques de déplacement envisageables en réponses aux contraintes foncières. Tribus du littoral.

Source : Entretiens menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

En cas de déplacement envisagé :	Saint-Philippo 1	Saint-Philippo 2	Urué
<p>o Les déplacements sont possibles sur la zone de la tribu (habitat / cultures)</p>	<p>Oui, un projet de lotissement tribal est en cours de réflexion pour les jeunes. Le foncier habitable non inondable est cependant restreint. Certains ayant la possibilité de cultiver sur des espaces en dehors de la tribu (lié à l'histoire et liens des clans) le font. Le déplacement de parcelle cultivée en tant que telle n'est pas évoqué</p>	<p>Problème de disponibilité de foncier habitable non inondable. Déplacements vers la tribu de Koua pour certains membres des clans liés à Koua. Les espaces destinés à l'agriculture sont tous situés en zone inondable. Certains ont également des parcelles cultivées en dehors de la Mission (Koua, Saint-Gabriel), ce qui est permis par l'histoire et les liens entre les clans. Le déplacement de parcelle cultivée en tant que telle n'est pas évoqué</p>	<p>Des terrassements ont été réalisés au niveau de « la plaine » pour loger les jeunes. Mais les projets sont bloqués en raison de tensions internes à la tribu.</p> <p>Des espaces habitables et constructibles semblent être disponibles. Le déplacement des zones de cultures n'a pas été évoqué.</p>
<p>o Les déplacements sont-ils envisageables dans une autre tribu ou un autre foncier ?</p>	<p>Oui, en lien avec l'histoire des clans</p>	<p>Oui, en lien avec l'histoire des clans</p>	<p>Par le passé oui. Non renseigné pour des déplacements envisagés (les habitants réfléchissent à un agrandissement de réserve plutôt qu'à un déplacement dans une autre tribu).</p>
<p>o Comment les nouveaux espaces sont-ils occupés (cultures/ habitations) ?</p>	<p>Par des projets de lotissement, envisagés en priorité</p>	<p>Les habitations sont construites en priorité, mais aussi des espaces de cultures sont investis (tribu de Koua, tribu de Saint-Gabriel)</p>	<p>Par des projets de lotissement</p>

6.2.2. CONSÉQUENCES SUR LES CULTURES VIVRIÈRES

Les activités de pêche, d'horticulture et d'agriculture sont en conséquence touchées par ces transformations écologiques vécues. Les tableaux suivants (Tabl. 47 et Tabl. 48) qui concernent respectivement les tribus de la chaîne et du littoral précisent les types de transformations mis en avant par les habitants des tribus de la chaîne et de l'estuaire.

Tableau 47 : Synthèse des impacts de l'hypersédimentation constatés sur les activités vivrières.
Tribus de la chaîne

Source : Entretiens menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

Impact sur les activités	Saint Pierre	Saint Paul	Saint Michel
Impact sur la pêche			
o Zones de pêche	Trous d'eau existant en partie comblés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek	Trous d'eau existant en partie comblés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek	Trous d'eau existant en partie comblés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek
o Quantité et espèces pêchées	Oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale.	Oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale.	Oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale .
Impact sur les cultures			
o La fertilité des sols	Fertilité diminuée	Non renseigné	Fertilité diminuée avec le passage des inondations.
o La qualité des produits	Moins bonne qualité de manière générale	Non renseigné	Moins bonne qualité de manière générale
o Variétés les plus impactées	Non renseigné	Non renseigné	Non renseigné

Tableau 48 : Synthèse des impacts de l'hypersédimentation constatés sur les activités vivrières.
Tribus du littoral

Source : Entretien menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

	Saint-Philippo 1	Saint-Philippo 2	Urué
Impact sur la pêche			
o Zones de pêche	En face de la tribu et en amont (remonte la rivière jusqu'à la falaise), dans la mangrove de la Népou, en mer	Principalement la mangrove ; près de la côte ; en mer	Dans la mangrove (à l'ancienne tribu et au lieu-dit « la plaine »), pêche en mer, pêche dans les trous d'eau de la Dothio
o Quantité et espèces pêchées	Disparition du mullet noir, diminution de la quantité de poissons pêchés et de la diversité des espèces (carpes toujours présentes, mais moins de loches (bê), mullets (palétuviers, eau douce) ; dans les palétuviers : diminution des crabes, coquillages, loches de palétuviers)	Diminution et raréfaction des espèces pêchées : poisson sabre (xoro dê), mullets (mwâmara, nââmîrî), moules, crabes, petits requins, lochons (pöowé), palourdes, crevettes ; vers le Botaméré : coquillages (bigorneaux, chapeau chinois)	Impact sur les mullets des palétuviers (nââmîrî), le poisson barbillon, le mullet noir, le crabe, loches (powé), poisson sabre, crevettes, anguilles
Impact sur les cultures			
o La fertilité des sols	Fertilité diminuée avec l'apport de boue et de sable/caillasse fine.	Fertilité diminuée : surtout pour les champs où se forme une épaisse couche de boue (ex : Nôonma)	Apport de boue. Présence d'eau saumâtre causant la perte des récoltes pendant les crues
o La qualité des produits	Moins bonne qualité de manière générale : texture changée pour les maniocs ; diminution taille, rendement	Moins bonne qualité (goût changé pour les maniocs) ; moins de rendements	Diminution des rendements : taille des tubercules réduite ; absence de tubercule malgré la croissance des tiges et feuilles
o Variétés les plus impactées	Manioc, chou kanak, banane chouchoute, citrouille, papayer, taros de montagne, taros d'eau	Ignames chef, banane chef, canne à sucre chef, taros de montagne, taros d'eau, pomme de terre, patate, banane	Ignames, bananiers (bananes desserts, ordinaires), patates, taros d'eau, légumes (salades, haricots, etc.)

De manière générale, les habitants constatent qu'il y a moins de poissons dans la rivière et dans les creeks. Cela est dû à différents facteurs : engravement des creeks et absence d'eau en surface ; réduction de la taille, voire disparition des trous d'eau favorables à l'habitat des poissons et leur maintien ; présence de boue et de sédiments fins empêchant la bonne oxygénation de l'eau.

La carte présentée à la figure 174 montre que les habitants ont une mémoire des transformations de leurs cours d'eau et des impacts de ces transformations sur leurs trous d'eau. Ils mentionnent en particulier et avec regret la disparition d'un certain nombre d'entre eux (au moins 4 sur 10 sur la carte). Les conséquences sur les espèces recherchées par les pêcheurs sont évidentes.

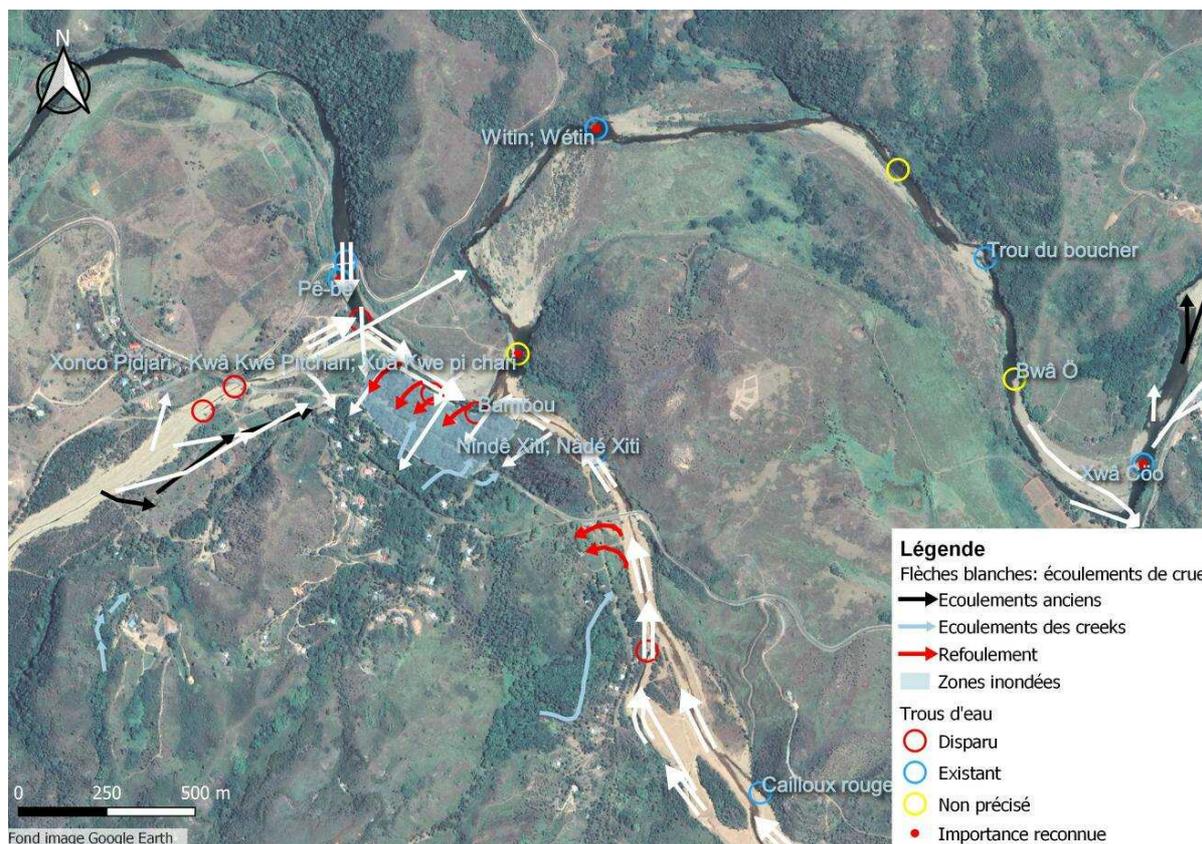


Figure 174 : Représentation spatiale des écoulements d'eau anciens et récents ayant conduit entre autres à la transformation de trous d'eau à Saint-Pierre

Source : Entretiens menés par L. Gosset en 2017 et 2018.

Les espèces de poissons les plus touchées, celles le plus citées par nos interlocuteurs, sont le mulot noir, l'anguille, les loches de rivières et les crevettes pour les tribus de la montagne. Les tribus de l'estuaire font également référence à des espèces vivant dans l'eau saumâtre comme le poisson sabre, le mulot de palétuvier, les crabes et les palourdes. En plus d'avoir un impact sur la quantité d'espèces piscicoles présentes, le comblement des trous d'eau induit une diminution des zones de pêche. Les habitants évoquent également la difficulté de pêcher en plongeant car certaines zones dans la rivière sont trop peu profondes aujourd'hui.

Concernant le travail agricole, bien que les habitants des tribus de la montagne et de l'estuaire ont parlé de la présence de boue dans les champs après le passage d'une inondation, celle-ci semble être plus importante en quantité pour les tribus de l'estuaire. Les habitants des tribus de la montagne ont également parlé de la présence de « caillasse ». Tous évoquent la dureté de la couche de boue présente dans les champs et la difficulté à retravailler la terre par la suite. Les habitants attendent que la boue sèche et soit plus légère pour retravailler leurs champs. Les techniques diffèrent alors selon les habitants, certains retravaillent la terre en la mélangeant à la couche de boue et d'autres préfèrent l'enlever car elle rendrait la terre moins fertile. Nombreux sont les témoignages qui décrivent les moins bons rendements de leurs champs (taille et quantité de produits récoltés), la moins bonne qualité des produits récoltés (texture, goût). Bien que le changement climatique ait été cité comme un des facteurs intervenant dans cette transformation, la population cible davantage les conséquences de l'exploitation minière passée.

Les habitants précisent qu'ils ont pris l'habitude de récupérer rapidement leurs produits vivriers après le passage des inondations afin de limiter les pertes. De plus, pour maximiser les chances de garder leurs produits, en particulier dans les tribus de la montagne où les animaux sauvages (chevaux, cochons et poules sultanes) endommagent souvent les cultures, plusieurs femmes ont fait remonter leur choix de planter autour de leurs maisons.

6.2.3. FOCUS SUR LES DÉPÔTS DE BOUE

Des entretiens ont été menés pour mieux appréhender quelles étaient les conséquences spécifiques dues à la boue pour les tribus de l'estuaire : épaisseur des dépôts, qualité, circonstances du dépôt, etc. Les tableaux 49 et 50 présentent les connaissances des habitants des tribus de la chaîne et du littoral à ce propos.

Tableau 49 : Synthèse à dire d'habitants de l'impact de la boue sur les tribus de la chaîne et de l'estuaire. Tribus de la chaîne.

Source : Entretiens menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

	Saint Pierre	Saint Paul	Saint Michel
Dépôt des boues et autres matériaux			
o Couleur de la boue	Marron et rouge	Rouge	Rouge
o Épaisseur de la boue	Une dizaine de centimètres dans les cultures	Quelques centimètres déposés dans les habitations de "l'ancienne tribu"	De quelques centimètres à une vingtaine de centimètres.
o Types de matériaux	Terre et minerai (appellation boue nickel)	Terre et minerai (appellation boue nickel). "Caillasse" et cailloux retrouvés dans certains champs	Terre et minerai (appellation boue nickel)
o Dans quelles circonstances attend-t-on un dépôt de boue ?	Avec le refoulement d'eau dans la zone de culture située près de la rivière	Lors des fortes crues qui entraînent des sorties d'eau de la Thio.	Lors de fortes crues qui entraînent des sorties d'eau de la Thio

Tableau 50 : Synthèse à dire d'habitants de l'impact de la boue sur les tribus de la chaîne et de l'estuaire. Tribus du littoral.

Source : Entretiens menés par L. Gosset, A. Pidjo et C. Sabinot en 2017 et 2018

	St. Philippo 1	St. Philippo 2	Urué
Dépôt des boues et autres matériaux			
o Couleur de la boue	Rouge et marron	rouge et marron	rouge
o Épaisseur de la boue	Pendant les années 70 : parle de 20 cm dans les champs ; 15 cm dans les habitations à St Philippe avant 58.	A Nôonma, épaisseur de boue entre 5 et 30 cm dans les champs et habitations	Une couche de 15 cm dans les champs à l'ancienne tribu, 50 cm dans les champs à l'îlot Sainte Marie.
o Types de matériaux	Terre et minerai (appellation boue nickel) / arrivée du sable/caillasse (depuis les années 2000)	Terre et minerai (appellation boue nickel)	terre et minerai
o Dans quelles circonstances attend-t-on un dépôt de boue ?	Lors des sorties d'eaux de la Thio	Lorsque la marée est montante, avec la confluence des creek, arroyos dans la tribu pendant les inondations	À chaque inondation : la descente d'eau de la Dothio, le débordement de la Thio et des arroyos. L'eau et la boue stagnent avec les effets de la marée.

Les dépôts de boue décrits par les habitants sont plus importants vers l'estuaire que pour les tribus de la chaîne et sont qualifiés selon leur couleur, leur quantité et leur qualité (mélange de terre et minerai). Les tribus de Saint-Philippo 1 et d'Urué ont évoqué aussi les dépôts de sable et de « caillasse ». D'après un témoignage de Saint-Philippo 1, la présence de ce type de sédiments serait plus récente et serait apparue ans les années 2000.

Lors de la dernière phase de terrain, les analyses du transport sédimentaire ayant été produites par les géophysiciens, les habitants de l'estuaire ont été invités à spatialiser les dépôts de boue et de fines sur leurs territoires. Les zones de culture sont celles les plus mentionnées par les habitants et les cartes présentées aux figures 175 et 176 ci-dessous distinguent les zones concernées par la boue de celles touchées par les fines et précisent les écoulements de crues connus par les habitants ainsi que le zones d'apport sédimentaire particulièrement énoncées.

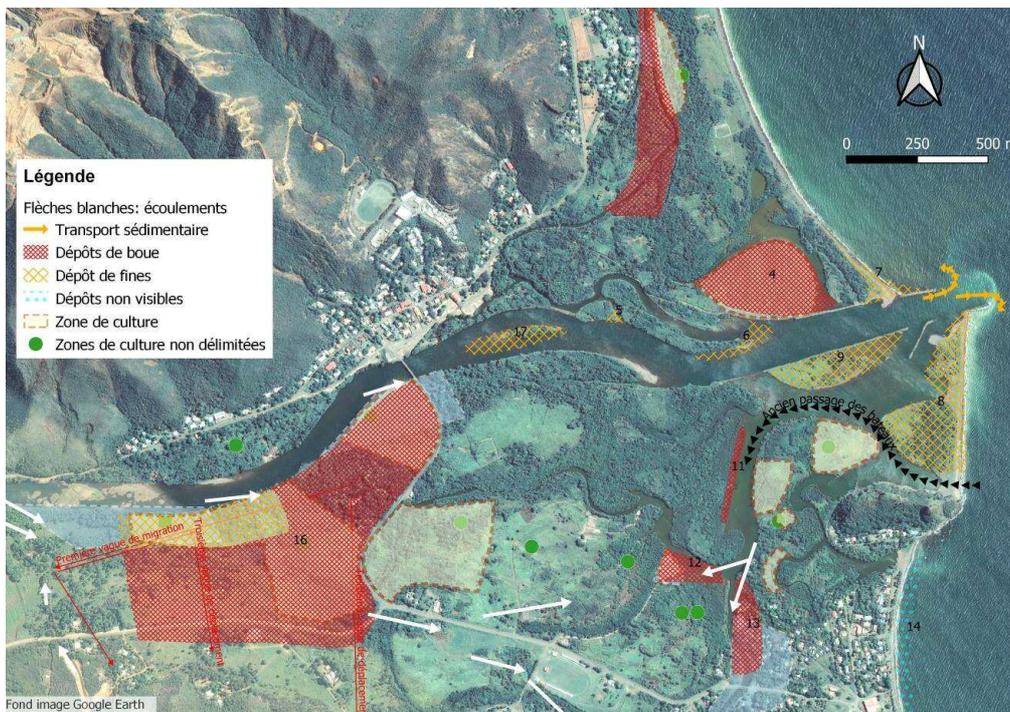


Figure 175 : Représentation spatialisée de la dynamique sédimentaire constatée par les habitants des tribus de l'estuaire à l'embouchure de la Thio.

Source : Entretiens menés entre 2016 et 2018 par A. Pidjo et L. Gosset



Figure 176 : Représentation spatialisée de la dynamique sédimentaire constatée par les habitants d'Urué à l'embouchure de la Dothio.

Source : Entretiens menés en 2018 par L. Gosset

Pendant les inondations, l'élément le plus contraignant et le plus craint par les habitants est le courant qui entraîne en particulier la descente de cailloux depuis les décharges pour Saint-Paul et Saint-Pierre et qui, pour ceux qui doivent quitter leur logement pour sauver leur vie, peut conduire à une mise en danger des personnes. Les deux autres conséquences particulièrement craintes par ordre d'importance sont les dégâts portant sur les habitations et les biens d'équipements onéreux, et les dégâts sur les champs qui en plus de détenir une fonction sociale et culturelle importante, constituent un garde-manger encore pour beaucoup.

6.2.4. CONSÉQUENCES SUR LES REPRÉSENTATIONS DES HABITANTS À PROPOS DES COURS D'EAUX ET LEUR PERCEPTION DES RISQUES

Bien qu'aucun entretien à Thio n'ait été engagé sur le thème des inondations, ces dernières ont toujours été le premier sujet sur lequel nos interlocuteurs se sont exprimés lorsqu'il s'agissait d'identifier les impacts de l'engravement et de l'hypersédimentation des cours d'eaux et de l'estuaire. C'est le risque majeur associé aux changements que les populations ont constaté dans leurs rivières. Depuis les inondations répétées et qui, d'après les habitants, semblent s'être amplifiées ces dernières années du fait de la quantité de sédiments contenue dans les cours d'eau, les habitants de Thio n'ont plus la même représentation de la rivière, des cyclones et des pluies. Une peur de la rivière a émergé qui n'existait pas auparavant et les habitants en sont venus à témoigner également de leurs inquiétudes vis-à-vis des phénomènes cycloniques.

Pourtant, les cyclones ont toujours fait partie intégrante de l'environnement et de la vie des habitants de Thio, assurant une fonction « nettoyante » de la rivière et de l'environnement de manière générale. Dans la plupart des communes de Nouvelle-Calédonie, les cyclones sont en effet attendus par les habitants, tant pour leurs effets bénéfiques pour le lagon que pour leurs effets bénéfiques pour les rivières : « le cyclone nettoie » témoignent les personnes et si aucun cyclone d'importance n'a eu lieu depuis un ou deux ans, le phénomène devient attendu avec impatience. La tendance change dans les communes minières où l'impact des grosses pluies et des cyclones est différent. La crainte de la population est ainsi réactivée au moment des événements météorologiques intenses. Elle se traduit, en particulier, par leurs observations du niveau de l'eau des creeks et des rivières lors des fortes pluies, et par leurs anticipations de l'évènement consistant à surélever les meubles sur des parpaings, à préparer un sac contenant les ressources de première nécessité afin de permettre de quitter rapidement les lieux en cas de danger. En conséquence, l'un des enjeux majeurs pour les autorités (locales, provinciales, etc.) est de restaurer un sentiment de sécurité auprès des populations lorsque cela est justifié et d'encourager la prise de mesures de prévention permettant de rendre la population plus résiliente.

6.3. CONSÉQUENCES ET ENJEUX ASSOCIÉS POUR LE FUTUR

6.3.1. CONSÉQUENCES SUR LES HABITATIONS : ENJEUX DE MAINTIEN DE LA POPULATION SUR SES TERRES OU DE RELOCALISATION

L'habitat peut être touché de manières variées. En général, la remise en état des maisons est la première priorité identifiée par les habitants après une inondation. Les principales craintes des habitants sont le passage de l'eau dans les maisons, les pertes de biens ainsi que l'accumulation de boue et d'autres matériaux (caillasses, etc.) dans les maisons. Traiter les dégâts causés nécessite du temps et du budget pour assurer la remise en état de l'habitat (nettoyage, réparations, remplacements). La plupart des familles ont au fur et à mesure réparé, rehaussé leurs maisons ou se sont déplacées de quelques dizaines de mètres pour s'éloigner des berges de la rivière ou des zones inondées lorsque cela était possible.

Des relocalisations de l'habitat induites par les inondations ont déjà eu lieu. Parfois, elles se sont déroulées en adéquation avec les « coutumes » kanak, en particulier celles relatives à l'accueil des clans entre eux. Autrement dit, il est d'usage que les liens entre certaines familles ou clans permettent l'accès à d'autres terres au sein de la tribu-même ou dans une autre. Ce système, soutenu par une approche coutumière de la gestion des terres, peut en effet constituer un élément utile en cas de relocalisation. Pourtant, il n'est pas applicable d'une manière universelle et il faut étudier chaque cas de

manière spécifique. Aujourd'hui, le relogement, voire la relocalisation des habitations inquiète beaucoup la population et les élus de la commune. En effet, la question de la disponibilité du foncier non inondable pour les habitants de l'estuaire (village et tribus) constitue l'une de leurs principales préoccupations. Depuis le mandat de l'ancien maire de la commune, Monsieur Roger Gaillot (entre 1975 et 1985), des réflexions en matière de relogement sont en cours, sans avoir pour autant permis de trouver des solutions viables, acceptées et durables. Le quartier de Bourgade et la zone de l'îlot Saint-Benoit sont identifiés depuis cette période comme des zones prioritaires pour plusieurs raisons :

- Elles sont les plus vulnérables,
- Ce sont les plus impactées lors des inondations.

La zone de l'îlot est très peuplée et sa situation est perçue par les différents acteurs devant gérer cette question (Province, Mairie, coutumiers) comme la plus problématique car elle ne relève pas du district coutumier de Thio. Ceci est lié à l'historique de l'usage de cet espace et au statut des personnes y résidant. Le cas de l'îlot monopolise depuis des dizaines d'années les discussions traitant des questions de relocalisation à Thio (cf. ordre du jour du COTEC¹⁴ relogement du 12 juin 2018), ce qui est source de tensions dans la commune. Le traitement de cette question, centralisé sur la zone de Borendy, s'est trouvé jusqu'à présent dans une impasse, et en captant l'attention, elle fait passer au second plan les tribus du district de Thio, également dans l'attente et le besoin de la construction de nouveaux lotissements : « *Les autres, on n'en parle pas. Quand il y a une grosse inondation oui, mais sinon on n'en parle pas* ».

6.3.2. CONSÉQUENCES SUR LES ZONES DE CULTURE ET ENJEUX DE MAINTIEN DES CULTURES ET DES VARIÉTÉS CULTIVÉES

Les zones de culture sont particulièrement touchées par les inondations et les sédiments que les eaux transportent. D'une part, le passage de l'eau peut conduire à la destruction complète ou à la dégradation des produits cultivés ou bien ceux-ci sont emportés par les courants (ignames, taros, etc.). La stagnation de l'eau dans les champs mène à la décomposition des produits plantés. D'autre part, les dépôts de boue qui se produisent lors des crues « étouffent » les plantations, forment une couche dure et diminuent la fertilité du sol. La couche de boue est alors souvent retirée afin de cultiver à nouveau le champ.

De plus, il convient de préciser qu'au-delà de la dimension utilitaire rattachée à la culture des champs (cultiver pour s'alimenter), ces lieux de plantations sont empreints de valeurs culturelles importantes. Ils ont en plus de leur valeur nourricière – on parle de « garde-manger » –, une valeur socio-symbolique – il s'agit aussi du lieu où sont plantés les produits attendus pour les échanges coutumiers, en particulier les ignames. La destruction ou la dégradation des champs n'est donc pas uniquement associée à une perte financière. Elles impactent, d'une part, le mode de vie des habitants et d'autre part, elles créent un espace vide dans la chaîne des échanges coutumiers, qui doit ensuite être comblé par d'autres moyens.

Une haute fréquence d'inondations peut mener à un découragement et donc, à un abandon du travail dans les champs (voir le SIG) malgré son importance culturelle. Pour beaucoup, des stratégies d'échanges et d'achats se sont mises en place pour pouvoir replanter des ignames ou des taros à grande valeur socio-symbolique. Pour d'autres, la culture du manioc, moins exigeante, a été privilégiée. Les enjeux pour l'avenir se situent à ce niveau-là : maintenir des cultures nourricières et identitaires pour maintenir un mode de vie ou modifier encore un peu plus ces pratiques et dépendre des autres pour se nourrir de tubercules et assurer son rôle coutumier lors des cérémonies.

¹⁴ COTEC : Comité technique

6.3.3. CONSÉQUENCES SUR LES ZONES DE PÊCHE ET ENJEUX DE MAINTIEN D'UNE PRATIQUE FAMILIALE NOURRICIÈRE

À Thio, parmi les activités vivrières, la pêche constitue une activité importante dans les tribus, surtout pour les tribus de l'estuaire. Dans les échanges coutumiers, les tribus de la mer contribuent avec les prises de la mer (poissons, crabes, moules, langoustes, ...). Toutefois, les activités de pêche pour les tribus de la chaîne, concentrées dans les rivières, sont également importantes.

L'engrèvement et l'hypersédimentation dans le lit de la rivière diminuent et modifient la distribution des habitats aquatiques. Ceci entraîne une raréfaction de la ressource en poisson (mulet, anguille, loches). Par ailleurs, les curages impactent fortement l'écosystème des rivières qui met longtemps pour retrouver un équilibre. Ainsi, des endroits connus pour la pêche de certaines espèces ont été désertés comme dans la rivière de Nakalé ou la Nembrou, qui, pour les habitants, ne sont plus propices à cette pratique.

Dans l'estuaire et notamment dans les zones de palétuviers, les habitants ont constaté un dépôt de sédiments fins important qui rend le sol très vaseux, et impacte l'habitat des espèces, en particulier les crabes. Parfois ces dépôts dégagent une très mauvaise odeur ; ils ne sont pas perçus comme du sable « normal » et les pêcheurs se questionnent également sur la concentration de polluants potentiels dans les ressources qu'ils pêchent, mangent et parfois commercialisent.

6.4. REGARDS CROISÉS ENTRE SAVOIRS SCIENTIFIQUES ET SAVOIRS LOCAUX

Il est apparu intéressant à l'ensemble des partenaires du programme *IMMILA* d'esquisser au terme du travail réalisé un dialogue entre les vécus et les représentations des populations avec les analyses des transformations environnementales réalisées par les experts des différentes disciplines. C'est dans cet esprit que les résultats du volet anthropologique ont été retravaillés pour être l'une des composantes conclusives du paragraphe de synthèse de ce rapport.

Ces regards croisés sont présentés ci-après sur deux sujets :

- © **Tout d'abord, la confrontation des savoirs, vécus et représentations locales aux analyses scientifiques du sur-engrèvement des creeks et de la Thio concernant les déchets miniers, la caillasse et les sédiments charriés.**

Les travaux d'enquête montrent que, d'après les habitants, les creeks situés en aval des zones de mise en verse des déchets miniers sont particulièrement sujets au phénomène de sur-engrèvement. Le cyclone Alison de 1975 est une date clef qui a marqué les esprits. Il correspond dans les mémoires aux premières grosses inondations associées à ce que les habitants nomment la pollution et attribuent à l'histoire minière. L'analyse historique des formes fluviales à partir des photographies aériennes d'archive montre néanmoins que dès le milieu des années 1950, de puissantes vagues sédimentaires étaient déjà en place sur la Thio et ses grands affluents miniers (Néburu, Nakalé). Même si le cyclone Alison a laissé une empreinte morphologique remarquable dans le paysage, encore nettement visible aujourd'hui (comme par exemple des bancs perchés à patine sombre sur la Néburu), les analyses historiques montrent que l'origine du sur-engrèvement est antérieure aux plus vieilles photographies aériennes disponibles (1954). Au moment des cyclones ou des fortes pluies, certains cours d'eau débordent et inondent en partie les tribus. Les creeks peuvent aussi renforcer le courant de la « grande rivière », la Thio. À l'inverse, certains creeks engravés et asséchés une bonne partie de l'année ne débordent pas pendant les événements météorologiques intenses. C'est le cas du *creek* de *xwâ perûpéé* à Saint-Paul par exemple. Chaque cours d'eau a donc un fonctionnement particulier, et il convient d'identifier avec les habitants des différentes tribus et du village, quels sont ceux qui présentent un risque important d'inondation ou d'érosion de berge, mettant ainsi en péril les aménagements, les biens et les personnes.

- **Récit partagé par les habitants rencontrés**

Les habitants ont fréquemment raconté l'histoire de la montée d'embarcations dans la rivière jusqu'au col de Saint-Pierre. Certains habitants ont parlé de pirogues, d'autres de chaloupes ; toujours est-il que ce récit est devenu une référence pour évoquer l'état de la rivière par le passé et ainsi montrer la différence avec son état actuel. Il s'agit d'une histoire transmise de générations en générations et qui retrace des faits situés autour du début du 20e siècle. Si cette histoire est relatée par la plupart des personnes rencontrées, aucune d'entre elles n'a observé ces déplacements en amont.

La morphologie de la Thio avant le dépôt des premières vagues sédimentaires minières n'a pas pu être reconstituée à partir des photographies aériennes historiques, dans la mesure où la rivière montrait déjà en 1954 un lit très engravé, beaucoup plus large qu'aujourd'hui. Il est en revanche possible d'imaginer qu'avant les premières phases d'engravement, la rivière présentait un lit à méandres, avec un tirant d'eau plus important et une largeur à pleins bords plus faible par rapport à la situation actuelle. On voit d'ailleurs que les évolutions morphologiques récentes sur la Thio se traduisent par un retour vers ces conditions « naturelles », avec une dynamique de rétraction et d'incision des bandes actives bien marquée. Le retour à la situation « naturelle » est beaucoup moins avancé sur les affluents (Néburu, Nakalé), qui subissent encore des apports en sédiments grossiers importants du fait de leur proximité avec les sites miniers.

La transformation du lit des rivières et de leurs berges par le dépôt de « caillasse », la diminution généralisée de la profondeur des creeks et de la Thio entraînent un encaissement et le remplissage des « trous d'eau » diminuant de manière générale leur valeur vivrière, et ayant une influence sur les repères coutumiers et culturels (certaines espèces de poissons comme le mulot noir ne sont plus présentes dans les coutumes). D'après les habitants, l'engravement en sédiments grossiers a entraîné un assèchement entier ou partiel (certaines zones et petits bassins peuvent perdurer), ce qui a nécessairement des impacts sur les écosystèmes inféodés à ces milieux.

Les transformations des rivières et de l'estuaire sont souvent associées à des histoires transmises entre les générations. D'autres, portant sur des expériences vécues par les habitants rencontrés, permettent d'estimer la variation de la profondeur de la rivière, le déplacement de son lit et l'effondrement de ses berges, la hauteur des crues (identifiée par les laisses de crue, repères visibles sur les ponts ou dans les maisons) ; mais aussi indiquent la diminution de la ressource en poissons. Ces récits apparaissent alors comme des supports de mémoire pour dire l'état des rivières. Quelques illustrations de ces transformations sont reprises dans les récits suivants :

- **Récit de Saint-Michel**

Un homme racontait une anecdote de son enfance, dans les années 70, sur l'importance des prises à la pêche. Il était parti pêcher avec sa famille dans le trou d'eau avant l'embouchure de la Fanama. Ils avaient posé la senne à la tombée de la nuit et avaient prévu de rester camper sur place. Or, peu de temps après, ils avaient dû rentrer chez eux car le filet était déjà plein de poissons.

Les discours des habitants relatifs à l'évolution de l'état de la rivière, portent sur deux types de transformations qui s'entremêlent. Elles reposent sur deux temporalités spécifiques : celle de l'événement (un temps court) et celle de la durée (temps long). Ces transformations font écho respectivement à des phénomènes différents : les cyclones et les fortes pluies générant des inondations et le changement climatique. Même si les cyclones et des fortes pluies sont davantage associés à des transformations sur le temps court, leur répétition et l'accumulation de sédiments peut amener les habitants à les évoquer également sur le temps long.

⊙ **La confrontation des perceptions et des analyses scientifiques de l'hypersédimentation des creeks et de la Thio, jusqu'au delta : les boues, la pollution et les matières en suspension (MES)**

La Thio aval et la zone de l'estuaire seraient, d'après les habitants des zones concernées, particulièrement touchées par l'accumulation de particules fines et de sables, entraînant une hypersédimentation du delta. D'après les descriptions des habitants, l'observation de la présence de ces particules remontent au milieu des années 60 et se serait systématisée avec les événements météorologiques des années 70 à 90. Les analyses diachroniques d'imagerie aérienne menées sur le delta ont, en effet, identifié une progradation maximale de 350 m sur la période comprise entre 1870 (début de l'activité minière) et 2018 (Schneider et al., 2018). D'après les habitants, le phénomène d'inondation serait accentué sur la Thio aval, en raison de la confluence de plusieurs cours d'eau, et pourrait être exacerbé dans certains cas lors de la concomitance avec de forts coefficients des marées. Par exemple, ce phénomène aurait été observé à la confluence de la Poudeux à Saint-Philippo 1. Toutefois, aucune information ou donnée ne permettent à ce stade de mettre en évidence l'importance de ces marées vis-à-vis du phénomène d'inondation observé, mis à part le cas de crues survenant en période de surcote cyclonique mais ce phénomène n'est pas renseigné scientifiquement à Thio.

D'autre part, le manque de données historiques quant à l'occurrence des inondations dans le delta de la Thio empêche d'attester clairement si l'augmentation des inondations récentes dans le delta est liée directement à l'activité minière ou à une augmentation des précipitations et de leurs intensités. À notre connaissance, aucun travail d'enquête poussé avec des levés des plus hautes-eaux n'a été réalisé sur Thio. Ce manque de connaissance renforce la controverse sur le sujet de l'origine anthropique ou climatique de l'augmentation de la fréquence des inondations dans le delta.

Bien que la source supposée d'hypersédimentation soit perçue comme principalement associée à l'activité minière, les habitants considèrent aussi que d'autres agents érosifs peuvent y contribuer. Ils identifient les feux de brousse et la présence des cochons et des cerfs comme des facteurs de vulnérabilité des sols face à l'aléa érosion (par ex. par la déstabilisation des berges, ou les glissements de terrain). Les analyses de traçage sédimentaire menées dans le cadre d'IMMILA et de la thèse de Virginie Sellier (thèse CEA-LSCE) ont cherché à caractériser la fraction de sédiments provenant d'une érosion de terrains miniers et la fraction non-minière. Les analyses de traçage géochimiques des sédiments fins mises en œuvre sur le bassin de Thio montrent que lors d'une dépression tropicale (2015) et pour un cyclone (Cook, 2017), les déchets provenant des terrains miniers sous la forme de MES représentent plus de 80 % des MES déposées dans le delta, et plus de 50 % en moyenne déposés sur le bassin de la Thio (Sellier et al., 2019). Ces résultats montrent le rôle déterminant de l'apport des terrains miniers sur l'hypersédimentation du delta lors des cyclones et dépressions tropicales.

La couleur de l'eau est un indicateur important pour les habitants, leur permettant de juger rapidement si les sédiments fins sont des déchets miniers ou issus de l'érosion des versants en lien avec d'autres processus (érosion naturelle, feux, cerfs). Le fait qu'un creek « coule rouge » est un critère très utilisé localement pour attester du mauvais fonctionnement ou de la mauvaise gestion des eaux pluviales sur mines. Par exemple, en 2013, seule la première crue aurait été très chargée en sédiments fins et rouges, alors que la seconde l'aurait été beaucoup moins. Les travaux de V. Sellier et al. ont permis de montrer une convergence interprétative à ce sujet. Les différences de couleurs observées entre les échantillons miniers et non-miniers par spectrocolorimétrie peuvent être utilisées comme technique de traçage sédimentaire. En effet, des sédiments présentant une couleur rouge-orangée seront davantage associés aux sources provenant de terrains miniers alors que ceux présentant une teinte grise seront davantage associés aux sources de substrats non-miniers.

Au-delà de la seule problématique d'inondation déjà évoquée précédemment, de nombreuses transformations des creeks, de la Thio et de son estuaire sont évoquées par les habitants, en lien avec les sédiments fins. Tout d'abord, la transformation de la forme de l'embouchure et l'envasement progressif de la Thio aval ont été identifiés depuis les années 90. Des témoignages rapportent un plus récent envasement de la partie basse de la Thio (vers 2010). Les différentes approches de cartographie diachronique de la partie aval de la plaine alluviale sont en accord avec ces observations.

- **Exemple de récit de Saint-Phillipo 1**

Une habitante indique que dans les années 1970-80, son mari allait à la pêche en mer avec son bateau à moteur en partant de la tribu. Actuellement le niveau d'eau est trop bas pour qu'une barque à moteur ne puisse passer. De plus, la présence de caillasse sur le lit de la rivière n'était pas visible dans ces années-là.

D'après les populations, mais également d'après les hydromorphologues, les lits des creeks engravés accumulent aussi d'importantes quantités de sédiments fins entraînant alors un colmatage important du lit des rivières (que l'on peut facilement mettre en évidence en grattant le fond des rivières). Des analyses menées sur la Thio et ses affluents ont montré que les quantités de sédiments fins colmatant les lits des rivières sont très importantes. Elles sont estimées à 8 000 tonnes sur la Thio et ses affluents (Meriaux, 2016). Ces sédiments déposés dans le lit de la Thio et ses marges alluviales constituent des stocks hérités très importants pouvant être mobilisés lors de cyclones pendant encore de nombreuses années.

D'importants dépôts de sédiments fins rouges sont aussi observés par les habitants dans la plaine deltaïque et la plaine alluviale des creeks et cours d'eau. Les dépôts très importants de sédiments fins qui ont eu lieu à la suite du cyclone Alison (1975) restent présents dans toutes les mémoires : jusqu'à un mètre de boue déposée à certains endroits et près de 50 cm sur le delta. Ces dépôts ont entraîné une baisse de la productivité agricole et dans certains cas, un abandon progressif des champs. Les carottages sédimentaires réalisés dans la plaine deltaïque rapportent un dépôt de 20 cm à 1 m de sédiments au-dessus du toit de galets. Une carotte sédimentaire réalisée dans l'apex du delta (Sellier et al., 2019) montre qu'une sédimentation de l'ordre de 80 cm depuis le cyclone Alison (1975) a eu lieu, soit une sédimentation moyenne de 2 cm/an ou 5 cm/cyclone. Ces analyses concordent avec les résultats des enquêtes. Cette sédimentation serait constituée en 1975 de plus de 80 % de déchets miniers. Cette fraction tend vers 60 % actuellement.

D'après les populations, ces transformations environnementales vont de pair avec des changements écologiques et posent de nombreuses questions d'ordre de santé publique :

- L'arrivée ou la disparition de végétaux : roseaux, bambous, jameloniers qui sont transportés et implantés dans différents endroits ;
 - La diminution de la quantité de poissons et autres ressources présentes dans la zone récifale, dans la Thio et sur ses berges ainsi que la crainte de leur toxicité potentielle (particulièrement en ce qui concerne les crabes) ;
- La diminution de la production agricole et pour certains, la crainte de la toxicité des produits ;
- La baisse de qualité visuelle (taie, apparition de certaines caractéristiques : tâches noires sur les bananes, etc.) et gustative de certains aliments (ex. igname, manioc).

Aucune mesure n'a été réalisée dans le cadre de ce projet sur les volets écologique, éco-toxicologique ou en matière de santé publique. Ce seraient des pistes importantes pour la suite. Elles étaient hors sujet dans le cadre d'IMMILA mais elles demandent des réponses scientifiques claires pour satisfaire à la demande des populations locales.

Les échanges avec la population de Thio que le présent rapport a souhaité mettre en lumière à travers le dernier volet du paragraphe de synthèse (regards croisés) ont été très riches. Ils ont permis, grâce aux temps d'échanges de paroles entre sachants scientifiques et locaux, une meilleure compréhension mutuelle, un enrichissement réciproque et une connaissance améliorée des phénomènes naturels et anthropiques actifs dans le bassin versant de la Thio.

7. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Le programme *IMMILA* avait pour objectif de caractériser les flux de matières de l'amont du bassin versant de la Thio jusqu'au littoral. Ces flux ont varié au cours du temps. Les travaux réalisés s'organisent en trois grandes périodes : La section 2 présente des éléments de caractérisation concernant le « temps long », la section 3 présente successivement plusieurs contributions qui visent à décrire l'évolution récente du bassin versant. Par période récente, nous entendons la période débutant avec l'exploitation du nickel sur la zone, c'est-à-dire une période débutant il y a environ 150 ans. Durant ce laps de temps, l'anthropisation de l'espace et notamment la présence de mines de nickel à ciel ouvert et la pratique consistant à verser les déchets miniers sur les pentes jusqu'en 1975, a impacté le fonctionnement naturel de l'hydrosystème depuis l'amont du transect vers l'aval de la rivière. Enfin la section 4 aborde différents aspects de l'état et du fonctionnement actuel du bassin versant de la Thio.

La synthèse présentée ci-après va suivre « le fil de l'eau » Elle vise à dégager pour le lecteur les faits considérés comme importants par le consortium et renvoie aux contributions détaillées des partenaires pour d'éventuelles précisions aux éléments conclusifs présentés.

7.1. L'ÉVOLUTION À LONG TERME

L'étude sédimentologique du forage S2 et sa corrélation avec les données sismiques THR acquises sur le delta de la rivière Thio permettent de dégager les conclusions suivantes :

- Le delta sous-marin "actuel" de la Thio, qui comprend deux lobes, constitue une proportion minime du remplissage de la plaine deltaïque côtière de la rivière Thio.
- L'ensemble du remplissage progradant deltaïque, qui s'installe sur les altérites, a débuté il y a environ 6000 ans. Cela correspond à la transition entre la fin de la transgression rapide holocène et le début du haut niveau marin (Baltzer, 1970 ; Yamano *et al.*, 2014). Les apports par la Thio sont apportés en quantité suffisante dès cette transition pour passer d'un système rétrogradant (transgressif) à un système deltaïque progradant. À cette évolution globale holocène s'ajoutent sans doute comme suggéré par M. Garcin (Rapport *IMMILA* datations 14C) les effets d'un accroissement des apports par les bassins versants en lien avec l'implantation de la culture Lapita à partir de 3500 ans BP. La progradation s'accélère probablement aussi à cette même époque en raison de la chute du niveau marin relatif (Cabiocch *et al.*, 2008) ;
- La construction deltaïque sableuse est interrompue à deux reprises par des épisodes de crues qui apportent des quantités importantes de sédiments fins recouvrant tout l'édifice comme le montrent la continuité des réflecteurs sismiques correspondant à ces épisodes ;
- Le dernier épisode de crue enregistré, sur la carotte et en sismique, est a priori associé à un événement extrême (ou série d'événements extrêmes) comme l'attestent son extension et son épaisseur qui induisent dans le remplissage une véritable barrière de perméabilité. Cet épisode se produit après 2200-2500 ans BP. Les datations 14C ne permettent pas d'affiner plus sa chronologie, et de conclure sur l'origine climatique ou anthropique (voire combinée climatique et anthropique) de cet épisode ;
- La construction deltaïque avec les deux lobes superposés débute après cet épisode majeur de crue, soit après 2200-2500 ans BP. Les datations et les données sismiques ne permettent pas de définir s'il y a un hiatus entre les deux (ou s'il y a un lien) ;
- Les données du forage S2 (sédimentologie et datations) ne permettent pas de préciser la chronologie de mise en place et l'évolution de conditions d'apports pendant la construction deltaïque "récente". Elles ne renseignent pas non plus sur la nature de la surface qui sépare les deux lobes. Sur la base de ces données, aucune conclusion ne peut donc être tirée sur les liens entre cette construction deltaïque et l'impact des exploitations minières de nickel dans le bassin versant de la Thio sur les apports sédimentaires jusqu'au lagon.

Les données sédimentologiques et chronologiques que fournira l'étude du forage S1 au nord de l'embouchure apporteront très probablement des éléments nouveaux à ce sujet.

7.2. L'ÉVOLUTION RÉCENTE DU SYSTÈME BASSIN VERSANT- RIVIÈRE - LITTORAL

7.2.1. DONNÉES GÉNÉRALES SUR LE BASSIN VERSANT DE LA THIO

7.2.1.1. Couvert végétal et sols nus

Pour introduire le propos sur les connaissances acquises sur le bassin versant de la Thio, nous nous appuyerons tout d'abord sur les résultats de l'analyse par télédétection (cf. paragraphe 3.2 et Annexe 3) réalisée par les collègues de l'IRD et Isabelle Rouet. Ils permettent de présenter une vision « macro » récente de la dynamique de répartition des surfaces sous végétation et des surfaces de sols nus à l'échelle du grand bassin versant dont la superficie totale avoisine les 40 000 ha. Cette vision récente s'étend jusqu'à la période actuelle ou peu s'en faut puisqu'elle couvre l'intervalle de temps 1986-2015. Par cette méthode, nous n'accédons donc pas à la connaissance des faits tels qu'ils étaient au moment où débute la mine dans la région, mais plutôt à celle des faits les plus récents concernant le bassin versant.

Si elles ne permettent pas de remonter aux premiers temps de la mine, l'analyse et le traitement des premières images satellitales offrent la possibilité de visualiser la situation du bassin versant au moment où la prise de conscience des dégradations anthropiques commence à être efficace après la mise en place d'une réglementation minière se voulant plus respectueuse de l'environnement naturel.

Sur cette période de 30 ans, les surfaces totales analysées de sols nus sont sensiblement équivalentes d'une date à l'autre. On a constaté, en effet, qu'un peu moins de 8 % de sols nus (3 429 ha) étaient détectés en 1986 sur la totalité de la zone d'étude. Ces surfaces diminuent en 1994-95, puis en 1999 où elles atteignent 7,6 % (3 276 ha), soit une réduction de 153 ha des sols nus détectés entre 1986 et 1999 (environ 0,35 % de perte de superficie). Cette période se distingue de la période 1999-2015 au terme de laquelle, le cumul des surfaces détectées comme nues en 2015 atteint 8,3 % (3 598 ha), soit une augmentation de 322 ha mais si l'on se réfère à 1986, le gain surfacique des sols nus n'est que de 169 ha (+0,40%), ce qui est très faible en regard de la superficie totale du bassin versant.

On peut donc considérer que, globalement, sur la période considérée, la proportion de sols nus favorables a priori à l'érosion n'a que très faiblement varié à l'échelle du grand bassin versant, ce qui ne préjuge pas pour autant des quantités de matières érodées à partir de ces surfaces. Le couvert végétal représente le complément à ces chiffres. Il est donc important puisque plus de 90 % des surfaces sont considérées comme végétalisées à des degrés différents de dégradation du couvert végétal.

Si en termes d'évolution surfacique sur les 30 années couvertes par cette étude diachronique, les faits évolutifs en termes de sols nus apparaissent modestes, l'impact de l'activité minière aujourd'hui visualisable sur l'imagerie satellitale du grand bassin versant par effet d'intégration au fil du temps (l'activité dans la zone de Thio a démarré il y a 150 ans environ) n'est pas négligeable pour autant. Un peu plus de 500 ha d'excavations ont été détectées dans les images sur la base des informations de la BDTPO ainsi qu'un peu plus de 300 ha de voirie indifférenciée. Ce sont des zones qui sont potentiellement les plus sensibles à la mobilisation de matériaux par l'érosion car installées dans la durée et décapées mécaniquement. L'analyse montre d'ailleurs qu'aucune reconquête significative de végétation n'a été identifiée entre 1986 et 2015 sur ces zones de plateformes et de pistes.

L'étude diachronique montre que les surfaces de sols nus qui ont progressé sur cette période se situent essentiellement dans la basse vallée de la Thio en aval du transect de la mine au lagon et qu'ils correspondent à la fois à des surfaces de voirie ou autres surfaces construites, ainsi qu'à des zones de dépôts de la rivière. Quelques zones du bassin de la Thio profitent clairement d'une progression de la végétation sur les sols nus alors que la plupart des surfaces montrent des tendances plus nuancées qui pourraient être en partie liées à l'occurrence d'incendies, par exemple. Les collègues du BRGM notent toutefois qu'une incidence de l'activité minière sur la progression des sols nus semble malgré tout se dégager pour les quelques sous-bassins versants affectés par les mines, en activité ou non. Elle a été décrite au paragraphe 5.3.

7.2.1.2. Les éléments de forçage de l'évolution du bassin versant.

Pour caractériser les flux de matières en transit depuis l'amont du bassin versant vers le littoral et notamment les phénomènes du sur-engravement de la Thio et de ses creeks affluents, d'une part, et de l'hypersédimentation à proximité du littoral, d'autre part, les collègues du consortium ont travaillé sur la mise en perspective de ces phénomènes avec les facteurs de forçage qui les contrôlent. De nombreux facteurs interviennent dans l'évolution temporelle du sur-engravement des cours d'eau (Garcin 2009, 2010, 2013) et de l'hypersédimentation de la zone deltaïque (Allenbach, 2002).

Le premier facteur de forçage important décrit dans ce rapport a été la séquence météorologique et notamment les pluies lors du passage des cyclones ou lors de fortes tempêtes tropicales. Ces pluies vont déclencher des ruissellements et des érosions notamment sur les versants où des décharges minières sont présentes ainsi que sur les sols mis à nus par l'érosion naturelle et/ou l'activité minière (zones d'exploitation, de prospection et pistes).

Les pluies, en fonction de leur intensité, de leur durée et de leur répartition spatiale vont générer des débits liquides plus ou moins importants dans les creeks et les rivières. Le transport solide en rivière sera conditionné en grande partie par ces débits. C'est ce transport solide qui assurera la migration des sédiments vers le bas des versants puis dans les creeks et ensuite leur transfert vers l'aval des cours d'eau et finalement leur migration jusqu'à l'embouchure de la rivière. Selon la capacité de transport des creeks et de la rivière lors des crues et les durées de ces dernières, des modifications des lits et des morphologies alluviales se produisent. Ce facteur de forçage a fait l'objet du paragraphe 3.3 et annexe 2.

Le second facteur de forçage décrit concerne le surplus d'apports en matériaux induit directement et indirectement par l'activité minière. Il s'agit, d'une part, de la quantité de stériles miniers qui ont été mis en décharge dans les versants jusqu'en 1975 et d'autre part de la mise à nus des sols autour des mines et par la réalisation des pistes et prospections minières (Garcin et al. 2017). L'impact de ce facteur a été traité au paragraphe 3.4 et annexe 4.

7.2.1.2.1. Les chroniques météorologique et hydrologique

Pour analyser le forçage météorologique et ses effets sur l'évolution des morphologies des cours d'eau de Nouvelle-Calédonie, de leur engravement et du transfert vers l'aval des sédiments, nous avons traité les données enregistrées sur le pluviomètre de Thio-P. Les premiers enregistrements de ce pluviomètre, qui est encore actif, ont commencé en 1952. La fréquence d'enregistrement est journalière et couvre 64 ans de données, soit 23 697 enregistrements non vides (92 jours sont manquants).

Les analyses réalisées ont porté sur les pluies journalières, les pluies mensuelles, les pluies saisonnières, la recherche de relation entre les oscillations climatiques (ENSO et IPO) et les pluies mensuelles et enfin les événements pluvieux. Une typologie des événements pluvieux a ensuite été proposée (événements pluvieux courts, événements pluvieux long, événements extrêmes, événements ordinaires...). Puis, une caractérisation des années de 1952 à 2016 selon cette typologie et les différents paramètres pluviométriques préalablement évalués a été réalisée. Enfin, afin de faciliter l'utilisation des données météorologiques pour interpréter les évolutions morphologiques des cours d'eau et l'évolution de leur sur-engravement, objet du programme « IMMILA », une agrégation de ces données par période entre chaque campagne de photographie aérienne disponible a été effectuée.

L'approche consistant à utiliser les enregistrements d'un pluviomètre sur de nombreuses années comme un indicateur de forçage météorologique a plusieurs limites. Cette approche a toutefois été mise en œuvre car c'est la seule donnée qui couvre de façon continue une longue période temporelle. La période couverte par les enregistrements du pluviomètre de Thio-P est comparable à celle de l'analyse hydro-géomorphologique et à celle des apports en stériles miniers par les décharges et de l'évolution des sols nus (Garcin et al. 2017).

La première limite de l'approche suivie est que les processus d'érosion des sols ne sont pas une simple fonction linéaire des pluies mais qu'ils résultent de processus complexes ayant trait aussi bien à la géomorphologie de la zone, la structure du sol, son degré d'humidité avant l'occurrence de l'événement, etc.

La seconde limite réside dans la complexité des relations pluie-débit et cela d'autant plus que les cours d'eau et creeks du bassin de la Thio ont des caractéristiques différentes (pente du linéaire, morphologie, lithologie et couverture végétale etc.). De plus, en fonction de la localisation dans le bassin versant, la

réponse en termes de débit de chaque cours d'eau sera très variée (hydrogramme, temps de concentration, vitesse du courant, hauteur d'eau...).

La troisième limite est la variabilité spatiale des pluies à l'échelle d'un bassin versant comme celui de la Thio. Ainsi, les pluies enregistrées à Thio-P ne sont pas nécessairement représentatives des pluies affectant d'autres secteurs du bassin versant notamment les secteurs les plus amont situés dans la chaîne centrale. À titre d'exemple, la figure 177 montre les relations entre les données de pluie journalières à Thio et à Canala. Bien que le pluviomètre de Canala ne soit qu'à environ 27 km de celui de Thio-P et qu'il soit situé lui aussi à proximité de la côte, le coefficient de corrélation de la droite de régression entre les pluies journalières à Thio et Canala est relativement faible (0,62).

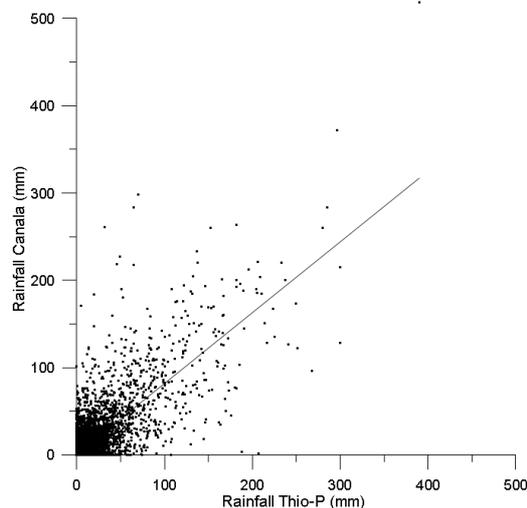


Figure 177 : Corrélation des pluies journalières entre Canala et Thio

(Coefficient de détermination R-Square = 0.62 ; 22 103 données utilisées, données Météo France)

Malgré ces limites, notre analyse permet de mettre en évidence certains enseignements (pour les résultats précis des analyses, nous renvoyons le lecteur aux différents chapitres du rapport).

La pluviométrie en 24h est, comme attendu, extrêmement variable. Sur les 23 697 jours d'enregistrement :

- Plus de 84% des pluies journalières (19 925 jours) sont comprises entre 0 et 5 mm/j ;
- Près de 8% sont comprises entre 5 et 15mm ;
- 2,7% entre 15mm et 25mm ;
- 2,9% entre 25mm et 50mm ;
- 1,6% entre 50mm et 100mm ;
- 7 pour mille entre 100mm et 200mm ;
- 1 pour mille entre 200mm et 300mm.

Une pluviométrie supérieure à 300mm n'a été atteinte qu'au cours de 4 jours.

De même, la pluviométrie annuelle est elle aussi très variable avec des valeurs comprises entre 804 mm/an et 4 111 mm/an, la moyenne se situant aux alentours de 1 764 mm/an.

Le nombre de jours de pluie par an est compris entre 88 j et 184 j avec une moyenne de 127 j. Une dérive positive du nombre de jour de pluie par an de 1952 à 2016 a été caractérisée, cette tendance est de l'ordre de +0,3 j de pluie en moyenne par an sur la période.

Il n'y a pas de corrélation significative entre le nombre de jours de pluie par an et la pluviométrie annuelle cumulée. Pour un même nombre de jours de pluie, on a une très forte dispersion de la pluviométrie annuelle. À titre d'exemple, aux environs de 160 j de pluie par an, les précipitations annuelles cumulées sont comprises entre 1 400 mm et plus de 4 000 mm.

La pluviométrie mensuelle est elle aussi extrêmement variable d'un mois à l'autre, mais aussi pour un même mois. Les mois les plus arrosés sont classiquement ceux de Janvier, Février et Mars soit la seconde partie de la saison cyclonique. La variabilité de la pluviométrie pour un même mois est très

variable sur la période 1952-2016. Ainsi, la pluviométrie moyenne du mois de Mars est de 249 mm alors que sa pluviométrie maximum a atteint 905 mm.

La pluviométrie moyenne de la saison cyclonique est de 1 168 mm avec un minimum de 310 mm et un maximum de 3 076 mm. Certaines années se singularisent par leurs fortes précipitations en saison cyclonique comme 1956, 1967, 1989 et 1990. La pluviométrie en saison sèche est, elle aussi, extrêmement variable d'une année à l'autre avec une moyenne à 597 mm. La valeur minimale est de 131 mm en 1981 et la maximale atteint tout de même 1 633 mm en 1967. Compte-tenu de la quantité de pluies qui peuvent se produire durant certaines saisons sèches, elles ne doivent pas être négligées dans l'analyse des processus d'érosion en versant et de transport solide en rivière.

Une recherche de corrélation entre les oscillations climatiques ENSO (Southern Oscillation Index) et l'IPO (Interdecadal Pacific Oscillation) et les paramètres pluviométriques a été réalisée. Cette analyse n'a pas montré de corrélation directe et significative entre ces oscillations et les différents paramètres pluviométriques calculés. Toutefois, il a été montré que plus la valeur du SOI annuel était élevée (El Niño fort) plus la variabilité de la pluviométrie annuelle était importante. Ainsi, pour de faibles valeurs de SOI (phase La Niña) l'intervalle de la pluviométrie annuelle est compris entre 1 000 mm/an et 2 000 mm/an alors qu'en période de fort El Niño l'intervalle est compris entre 1 000 mm/an et 3 500 mm/an. L'année 1967, en phase El Niño modéré, est caractérisée par une très forte pluviométrie, elle apparaît comme exceptionnelle (horsain ou *outlier*). En période ENSO positif, il est donc possible d'avoir des pluviométries très contrastées d'une année sur l'autre avec comme conséquence possible une forte variabilité des érosions des sols, des versants et du transport solide en rivière.

Nous avons reconstitué à partir de l'ensemble des pluviométries journalières les événements pluvieux (jours de pluie continue) de 1952 jusqu'à 2016. Nous avons ainsi obtenu 3 518 événements sur les 63 ans de chronique. La durée et la quantité cumulée de pluie pour chaque événement ont été calculées. L'analyse par quantiles a permis de définir des événements types : événements pluvieux (5% des événements les plus pluvieux : $P > 155$ mm), événement long (5% des événements les plus long, durée ≥ 6 jours), événements intense (0.2% des événements avec $P \geq 350$ mm). Nous avons donc créé les types « événement pluvieux long » ($P > 155$ mm, durée ≥ 6 jours), « événement pluvieux court » ($P > 155$ mm, durée < 6 jours), événements intense ($P > 350$ mm quel que soit la durée), événements ordinaires (tous les autres). Une classification de tous les événements a été réalisée sur ces critères. Elle a permis d'une part de faire ressortir les événements les plus marquants et d'autre part de caractériser chaque année en fonction du nombre d'événements de chaque type s'y étant produits.

L'analyse de fréquence des événements extrêmes montre qu'ils se produisent en grande majorité en janvier (34 %), en février (14%) et en Mars (25%).

À titre d'exemple, les événements les plus pluvieux se sont produits en 1967 (14j de pluie, 990 mm), en 2008 (11 jours de pluies, 804 mm) et en 1988 (10 j de pluie, 718mm). En termes de durée, les événements les plus marquants sont ceux de 1958 avec 18 j de pluie (359mm), de 1993 (16 j de pluie, 361 mm) et de 1956 (15 j de pluies 536 mm). En termes d'intensité moyenne « IM » (pluviométrie de l'événement / durée en jours), les trois événements les plus marquants sont ceux de juillet 2013 (IM 146 mm/j, P 439 mm), de 1990 (IM 133 mm/j, P 400 mm) et de janvier 2013 (IM 132, P 530 mm).

On retrouve dans ce classement les deux événements de 2013 dont les répercussions sur l'évolution de l'engrèvement des lits de la Néburu et de la Nakalé ainsi que les inondations et dégâts ont été très significatifs. Il est intéressant de noter que l'événement qui apparaît en tête du classement s'est produit en dehors de la saison cyclonique ce qui renforce son caractère exceptionnel (seulement 2,9% des événements extrêmes se produisent en juillet sur la période 1952-2016).

Pour chaque année, nous avons calculé la fréquence relative de chaque type d'événement (pluvieux court, pluvieux long, ordinaire) c'est-à-dire le nombre d'événement de chaque type en le normalisant entre la valeur minimale et maximale obtenues sur les 64 années. Les résultats montrent que certaines années sont largement dominées par des événements ordinaires alors que d'autres au contraire voient la proportion des événements pluvieux longs ou courts largement plus importante.

La proportion des différents types a été calculée indépendamment de la pluviométrie annuelle. Cela permet de donner la « signature » de chaque année mais pas nécessairement son impact sur les érosions et transport solide.

7.2.1.2.2. L'activité minière

Présente à Thio depuis 150 ans, elle a indéniablement impacté le bassin versant comme elle l'a fait en d'autres lieux du Pays. Il est donc nécessaire de l'introduire comme élément structurant de la synthèse.

Dans l'objectif d'évaluer et de quantifier les apports solides induits par les mines de nickel en Nouvelle-Calédonie, deux approches méthodologiques ont été mises au point par le BRGM dans le cadre du programme « Gestion du Passif ». Ces deux approches sont les suivantes :

- Une quantification des volumes de matériaux issus des décharges minières à l'échelle de grands bassins versants calédoniens, mais aussi à celle de leurs sous bassins,
- Une quantification des surfaces contributives basée sur une typologie spécifique. Cette typologie distingue les surfaces productrices de fines telles que les pistes, les surfaces dénudées de prospection ou d'exploitation minière et les surfaces de zones productrices de matériaux de granulométrie variée comme les mouvements de terrain, les décharges ou les zones en érosion significatives sur mines.

La première approche d'évaluation des tonnages et volumes de déchets mis en décharge a été appliquée sur le bassin de la Thio dans le cadre du programme *IMMILA* par Manuel Garcin. Le tonnage de déchets mis en décharge jusqu'en 1975 est de l'ordre de 30 millions pour la Thio. Dans le détail, les tonnages par sous bassin versant sont très variables dans le temps et l'espace. La localisation des apports au sein des hydrosystèmes est très distribuée et se produit dans différents secteurs des profils en long. Cette spatialisation des apports tout comme leur asynchronisme explique la complexité des phénomènes de sur-engravement observés notamment sur les sites sous l'influence de plusieurs sources. La position des apports par rapport au profil en long des creeks et rivières conditionne (tout comme leur séquence temporelle et celle des phénomènes météorologiques), les modalités du transfert de cette charge solide vers l'aval, le stockage de matériaux plus ou moins temporaire dans les lits, les évolutions hydro-géomorphologiques etc. Les intensités des perturbations induites (apport spécifique en t/ha) par ces apports en matériaux sont extrêmement variables d'un sous bassin versant à l'autre. Certains sous bassins sont particulièrement impactés expliquant l'ensemble des désordres constatés et les difficultés rencontrées lors des tentatives de remédiation ou d'aménagement.

La seconde approche consistant à analyser l'évolution temporelle des surfaces des sols nus qui contribuent à l'apport en matériaux notamment en fines, a également été appliquée sur le bassin de la Thio. Pour chaque type de sol nu, une analyse de l'évolution de leurs surfaces de 1954 à 2008 a été effectuée. Elle montre que :

- L'évolution des surfaces des décharges minières dans le temps n'est pas représentative des tonnages et des volumes de stériles réellement mis en décharge ; ces surfaces ne peuvent donc être utilisées comme un indicateur pertinent des apports miniers issus des décharges.
- L'évolution temporelle des surfaces des pistes n'est pas proportionnelle à celles des mines et augmente beaucoup plus rapidement. En conséquence, l'augmentation très forte des surfaces de pistes a probablement participé pour une part majeure à l'augmentation des apports en fines à l'échelle du bassin versant. La prise en compte des surfaces de piste est donc primordiale dans toute analyse des apports sédimentaires induit par l'activité minière.
- Une augmentation significative des surfaces des mouvements de terrain se produit entre 1954 et 1976. La cause de cette augmentation de surface est à rechercher probablement du côté de l'évolution des conditions météorologiques au cours de ces décennies (impact probable du cyclone Allison). Si cette hypothèse était prouvée, ces modifications des conditions météorologiques ont par ailleurs probablement favorisé les érosions des décharges minières et le transfert des déchets miniers dans les lits des rivières. Ces changements météorologiques se sont par ailleurs produits lors des phases paroxysmales des apports de matériaux dans les décharges minières. Cette conjonction expliquerait les évolutions morphologiques très rapides des lits des cours d'eau notamment entre 1971 et 1976.

Les deux méthodes présentées donnent des résultats prometteurs et complémentaires. Elles mériteraient d'être appliquées sur d'autres sites notamment dans le cadre d'études visant à proposer des solutions de remédiation au sur-engravement. Elles permettent de prendre toute la mesure de la perturbation induite par la mise en décharge des déchets miniers jusqu'au milieu des années 70 sur les cours d'eau de Nouvelle-Calédonie et des impacts induits par la dénudation des sols. Enfin, elle permet de hiérarchiser les bassins versants en fonction de l'intensité de la perturbation induite et offre des clés de compréhension de leurs évolutions passées et à venir.

7.2.2. LES IMPACTS SUR LA MORPHODYNAMIQUE DE L'HYDROSYSTÈME

Pour décrire la situation du sur-engravement de la Thio et de ses creeks affluents, nous nous appuyerons sur la connaissance dérivée de l'analyse diachronique des largeurs de bandes actives. Ce travail réalisé par les collègues de l'IRSTEA Grenoble a été présenté au paragraphe 3.3. et leur contribution originelle est produite à l'annexe 1. On s'y réfèrera pour les détails relatifs aux éléments conclusifs présentés ci-après.

Nous rappellerons tout d'abord que les résultats obtenus constituent une application à la question du sur-engravement de la Thio d'une méthode testée dans le cadre du programme « Gestion du Passif ». La méthode consiste en l'analyse cartographique diachronique du surengravement en se basant sur une métrique caractérisant la migration vers l'aval des sédiments grossiers : la largeur de la bande active au cours du temps. L'analyse effectuée sur la Thio a également été réalisée sur le site témoin (bassin versant de la Tôdré) afin de pouvoir faire des comparaisons.

Pour cela, plusieurs jeux de photographies aériennes couvrant la période 1943/2008 ont été récupérés sur le georep.nc et orthorectifiés et des images satellites Pléiades de 2015 ont été acquises dans le cadre du projet pour obtenir une date récente permettant d'évaluer les effets morphologiques des crues de 2014 et 2015. L'analyse permet donc de remonter à des informations datées de plus de 70 ans pour les plus anciennes, antérieures à la montée en puissance de la mécanisation sur mines et au « boom du nickel ».

L'analyse des tendances obtenues sur différents sites montre une très grande variabilité spatiale des réponses morphologiques. L'interprétation de ces tendances doit se faire à la lumière des principaux forçages susceptibles d'influencer les bandes actives, à savoir l'exploitation minière et les épisodes hydrométéorologiques majeurs des dernières décennies. À l'issue du projet, nous pouvons proposer une représentation schématique de ces forçages, à partir des grands repères chronologiques de l'histoire minière (premières exploitations, boom du nickel, code minier...) et de l'occurrence des cyclones qui ont affecté la région de Thio, tels qu'ils ont été répertoriés par Météo France. Ceci nous conduit à proposer une fresque des forçages (Fig. 178), sur laquelle nous avons positionné les photographies aériennes disponibles.

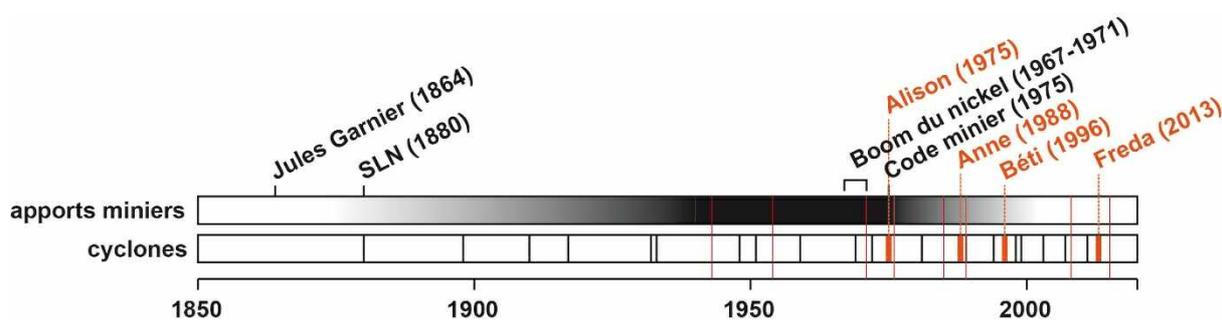


Figure 178 : Représentation schématique des forçages d'origine minière et hydrométéorologique susceptibles d'expliquer les réponses morphologiques ; les dates des photographies aériennes disponibles sont représentées en rouge

Les éléments les plus significatifs de cette analyse diachronique sont les suivants :

- La mise en place des vagues sédimentaires minières (le surengravement) dans le bassin versant de la Thio est antérieure aux plus vieilles photos aériennes disponibles (1954) ; les formes fluviales ont donc été impactées par les mines dès la première moitié du 20^e siècle, et les archives photographiques ne permettent pas de visualiser l'apparition des premiers engravements (excepté sur la Tomuru, où l'exploitation minière est plus récente).
- Les premières vagues sédimentaires visibles sur les photographies aériennes de 1954 ont été très puissantes ; elles constituent d'ailleurs un paroxysme sur le cours de la Thio en aval et en amont des confluences avec la Nakaré et la Néburu, ainsi que sur la Nakaré. Elles sont sans doute à mettre en relation avec les grands cyclones survenus en mars 1948 et février 1951, qui ont touché l'ensemble de la Grande Terre ; le fait que ces nappes sédimentaires se mettent en place avant la phase d'accélération des apports miniers, qui intervient à partir de la fin des années 1950 (cf. paragraphe 3.4 et annexe 4) pose question ; il est possible que les archives

minières ne permettent pas de reconstituer fidèlement l'activité minière ancienne (antérieure aux années 1950), car les photos aériennes de 1954 montrent que dès cette période, les apports depuis les sites miniers étaient déjà très marqués dans certains sous bassins versants (Néburu, par exemple).

- Les évolutions morphologiques depuis les années 1970 montrent partout des trajectoires de retour à l'équilibre, plus avancées sur la Thio que sur ses affluents, car ceux-ci étant plus proches des ravines minières actives, ils subissent encore des recharges sédimentaires importantes ; l'ensemble des sites visités montrent des dynamiques d'incision et de rétraction des bandes actives, et ce, malgré l'occurrence de nombreuses crues cycloniques récentes (1996, 2013, 2015, 2017); ces trajectoires montrent que les apports miniers sont en nette diminution, même si des entrées encore importantes peuvent survenir localement ; des vagues sédimentaires récentes sont par exemple apparues sur la Néburu, notamment en 1988 (cyclone Anne), mais elles n'atteignent plus les niveaux d'exhaussement observés avant 1975.
- L'analyse des terrasses récentes de la Néburu montre que plus de la moitié des apports miniers qui ont recouvert la plaine alluviale sont stockés aujourd'hui sous forme de terrasses alluviales. Ces terrasses sont systématiquement présentes en aval des sites miniers majeurs. Si on ajoute à cela les stocks de versant (cônes de déjections, nappes d'éboulis), on voit que la majorité des apports miniers sont restés piégés à proximité des sources de production (estimé à 80% sur la Néburu); ces formes héritées de l'activité minière constituent aujourd'hui des stocks pérennes de sédiments meubles, dont l'érosion devrait se faire de manière très lente et progressive, au gré des divagations latérales, sur une période de temps longue (sans doute plusieurs siècles).
- ***L'application dans le programme IMMILA aux cas de la Thio et de la Todré de la méthode d'analyse diachronique de la largeur de bandes actives développée dans le programme « Gestion du Passif » donne des résultats significatifs. Il s'agit donc, à nos yeux, d'un bon proxy de l'apport sédimentaire aux rivières drainant les massifs de péridotites de Nouvelle-Calédonie. À ce titre, le CNRT pourrait certainement en assurer la promotion pour mieux contraindre la connaissance des dynamiques d'évolution des rivières et bassins versants en d'autres lieux du Pays.***

La zone aval de la plaine alluviale de la Thio

Les paragraphes 3.2.3 et 3.5 ont permis de décrire les méthodologies et le détail des résultats obtenus par le biais de deux méthodes d'analyse diachronique légèrement différentes et complémentaires. La première s'appuyant sur l'imagerie satellitale et aérienne disponible a permis de mesurer très finement l'évolution de la morphologie du delta sur les 70 dernières années. La seconde s'est appuyée sur un corpus documentaire plus varié allant des cartes anciennes aux photographies des sites en passant par l'ensemble des photographies aériennes disponibles. Ce faisant, l'analyse a permis de remonter dans le temps jusqu'aux années 1880, couvrant ainsi quasiment toute la période de la mine à Thio. Sur la période commune aux deux méthodes, les résultats présentés dans les deux contributions sont concordants. Elles apportent chacune des éléments descriptifs détaillés complémentaires de l'évolution géomorphologique du delta. En regard à cette similitude des résultats et à la plus longue durée d'analyse, nous nous appuyerons préférentiellement sur l'analyse de Lyon pour apporter les éléments conclusifs suivants :

- Les études montrent des évolutions différenciées selon le positionnement des transects ayant servi de base à l'analyse.
- Le transect 4 situé au sud du Botaméré, au droit de la tribu de Saint-Philippe montre une quasi permanence du trait de côte au fil des 140 ans de l'analyse. Le transect 3 situé immédiatement au nord du Botaméré, à mi-chemin entre celui-ci et la digue sud de l'embouchure actuelle de la rivière est celui sur lequel l'évolution a été la plus spectaculaire. Le trait de côte stable jusqu'en 1960 avance sur la mer de 350 mètres entre cette date et 1980. Il se maintient depuis lors à ce niveau aux oscillations près associées aux ondes de crues et aux tempêtes. Cet important gain linéaire du trait de côte sur la mer qui caractérise l'ensemble du secteur littoral situé entre le Botaméré et la digue sud de la rivière démontre sur cette zone un phénomène d'hypersédimentation important qui est à mettre en relation avec les travaux d'endiguement et de linéarisation du lit aval de la rivière réalisés à ce moment-là (Allenbach, 2002). Ces dépôts traduisent, d'une part, la sédimentation des fines issues de l'amont du bassin versant dans les chenaux de rive droite de la plaine deltaïque privés d'exutoires vers le lit principal et d'autre part, les dérives sédimentaires littorales bloquées par la digue régulièrement prolongée vers le large au nom de la seule logique hydraulicienne.

- Le transect 2 situé immédiatement au nord de la digue de rive gauche de la rivière montre une accrétion totale vers le large de l'ordre de 120 mètres sur la période considérée. Cette accrétion est en fait irrégulière au fil du temps. Sur les 80 premières années (1880-1960), elle atteint la centaine de mètres, puis on observe un recul du trait de côte d'une soixantaine de mètres dont l'origine est à mettre en relation avec le blocage des dérives littorales en rive droite de la rivière (transect 3) par effet d'épi. La situation se stabilise ensuite lorsqu'une partie de la digue de rive gauche est détruite. Le transect 1 est représentatif du segment de côte situé entre l'embouchure de la rivière et celle de la Do-Thio dans le secteur d'Ouroué. À l'inverse de ce qui se passe au niveau du transect précédant, le trait de côte est globalement en recul de 80 mètres environ sur 140 ans. La déflation légère jusqu'en 1960 (30m) s'accélère pour approcher la centaine de mètres dans les années 1980/1990 en liaison avec le déficit de transit sédimentaire littoral depuis le sud (effet d'épi), puis le trait de côte se stabilise avec la destruction de la partie finale de la digue nord (Allenbach 2004).

La figure 179 synthétise l'évolution du trait de côte de 1880 à 2008 sur fond de l'imagerie aérienne de 2017. Indiscutablement, au vu de l'analyse diachronique réalisée sur cette période, la partie aval de la rivière a connu d'importantes modifications géomorphologiques. Si l'on se détache des analyses sectorielles commentées plus avant pour essayer d'avoir une vision intégratrice globale de la zone, on peut dire qu'en moyenne, sur l'ensemble du littoral étudié centré sur l'embouchure principale de la rivière, la côte a avancé de 60 m sur le lagon entre 1880 et 1954. Elle a ensuite connu une relative stabilité de 1954 à 1976. À partir de 1976, l'avancée s'est accentuée et a continué sa dynamique de progradation rapide jusqu'en 1995 (époque des travaux de linéarisation du lit et d'endiguage de la rivière), puis la morphologie s'est stabilisée (légère augmentation entre 1995 et 2017). La progradation moyenne du delta est d'environ 110m sur toute sa longueur. Les changements les plus rapides ont eu lieu entre 1976 et 1995, ralentissant actuellement.

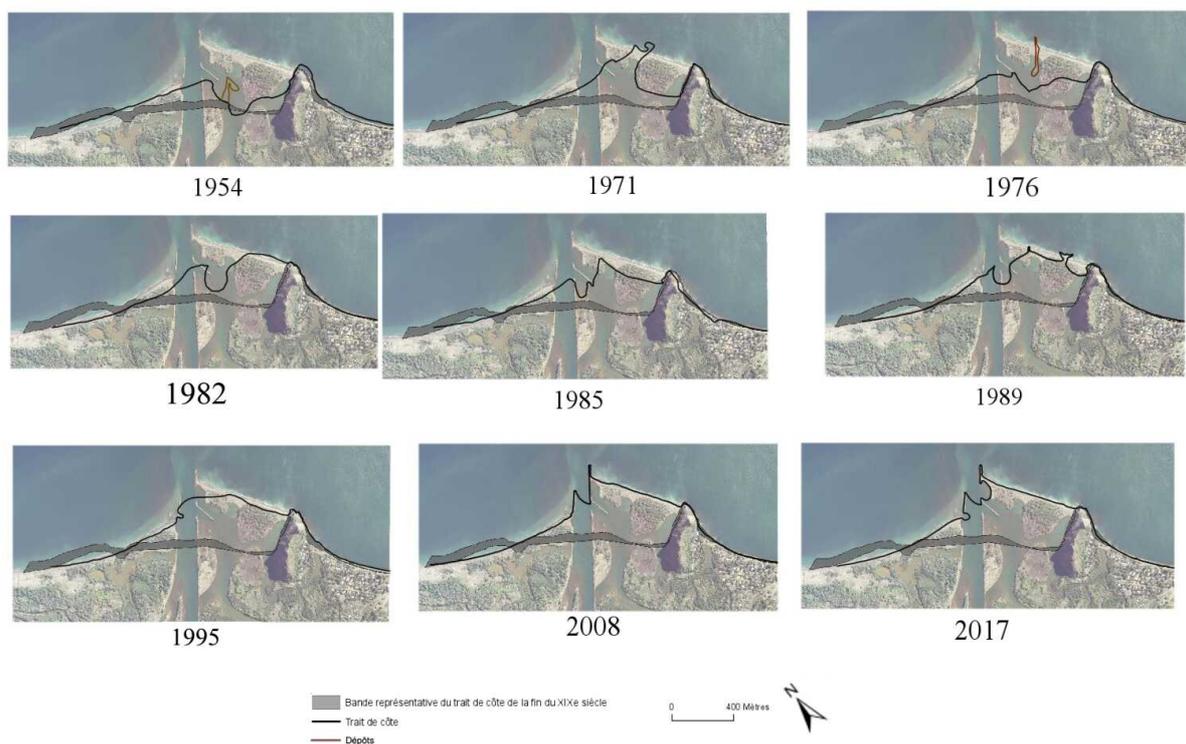


Figure 179 : Évolution du trait de côte de 1954 à 2008, sur fond d'image aérienne de 2017 et en comparaison avec la bande représentative du trait de côte de 1880

En conclusion le trait de côte a 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 proches de l'embouchure actuelle, et particulièrement en 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 à reculer jusqu'à presque 100 m depuis 1880.

7.3. L'ÉTAT ET LE FONCTIONNEMENT ACTUEL DU BASSIN VERSANT

Le programme prévoyait deux sous tâches visant, d'une part, à quantifier et à qualifier le transport solide et en suspension dans les hydrosystèmes et d'autre part, à évaluer la perception des habitants et l'acceptation sociale des transformations environnementales.

7.3.1. QUANTIFICATION DU TRANSPORT SOLIDE ET EN SUSPENSION

En ce qui concerne la première tâche, une première facette du travail a consisté à réaliser une reconnaissance géomorphologique classique de la Thio et des affluents mais aussi de la Todré et de la cascade Wellington avec pour objectif de réaliser un maximum d'observations (mesures sommaires, photos).

L'analyse géomorphologique du bassin versant a tout d'abord permis de retracer l'évolution de la Thio et ses creeks depuis les débuts de l'exploitation minière et de poser un diagnostic sur leur fonctionnement actuel. Nous avons mis en évidence un passé commun à la Thio et ses affluents, avec notamment une forte période d'exhaussement qui a engendré de hautes terrasses, suivie d'une période de purge avec enfoncement du lit mineur dans ces terrasses. Elle a, ensuite, mis en évidence un fort contraste entre la dynamique sédimentaire actuelle de la Thio et de ses creeks.

La Thio présente un lit sinueux, végétalisé, sans véritables dépôts meubles récents très marqués. Sa granulométrie grossière associée aux faibles pentes est symptomatique d'un pavage, c'est-à-dire d'un fonctionnement avec déficit d'apports amont conduisant progressivement à un lessivage du lit de ses matériaux meubles (on parle ici des sédiments grossiers apportés par charriage, les dépôts de sédiments fins issus de la suspension étant eux très importants sur les zones latérales de débordement)

Les creeks présentent, quant à eux, des stocks très importants de dépôts meubles, fraîchement mobilisés, dans leur partie aval juste en amont de la confluence avec la Thio.

Cette différence de dynamique constatée entre la Thio et ses creeks nous amène à conclure qu'ils sont déconnectés : les creeks transportent encore aujourd'hui des volumes de sédiments grossiers importants jusqu'à la Thio, mais ceux-ci ne sont pas transférés à la Thio.

Les raisons de cette déconnexion sont différentes pour chaque creek (construction de peignes à sédiments construits pour bloquer la charge sédimentaire (creek cimetièrre), rétrécissement local du lit (à la fois naturel et induit par la construction de la digue routière pour la Nakalé et la Néburu).

Tout comme cela se produit dans les plages de dépôt, on peut supposer que lors des crues extrêmes, l'amont de la digue piège très efficacement les sédiments grossiers, et que lors des crues courantes (et des fins de crues extrêmes), une purge selon la section d'écoulement permet un transfert d'une fraction relativement plus fine (le reste étant remanié et régalaé en berges en amont de la digue routière). À défaut d'observations directes, on en restera sur cette hypothèse mais il conviendra par la suite de mieux considérer le comportement de la charge sédimentaire au droit des digues routières pendant les fortes crues.

Pour aller plus loin et essayer de quantifier cette dynamique, il a été effectué un essai de quantification des flux. Pour ce faire, un lot de données très diversifiées a été collecté (granulométrie du lit, topographie du lit sous la forme de profils en travers et de profils en long, données hydrologiques, état de la végétation). À partir de ces données, une analyse a été effectuée qui a été présentée au paragraphe 6.1.2.2. Cette analyse débouche sur les constats suivants :

- En ce qui concerne la granulométrie, le profil établi pour la Thio ne montre pas à première vue, une tendance nette à l'affinage des tailles de grain, comme c'est en général le cas, depuis l'amont vers l'aval. On observe plutôt deux pics, l'un au pK 2000 qui correspond aux confluences avec la Nakalé et la Néburu, et un second au pK8500, qui correspond approximativement à la confluence avec la Tomuru. Ces pics tendent à montrer que la déconnexion entre la Thio et ses creeks affluents n'est pas totale et que des matériaux passent, au moins lors des grosses crues ;
- Le pic granulométrique aval évoqué à l'alinéa précédent est associé à une singularité sur le profil en long, où on peut noter une rupture de pente (Fig. 134) avec une pente locale très forte. Cette forte rupture de pente nous amène à penser que cette zone pourrait correspondre à un front de dépôt pour la Thio, contrôlé par une pente hydraulique faible en aval.

Les calculs pour l'estimation des flux de sédiments transportés par **charriage**, c'est-à-dire de la charge grossière (depuis les sables jusqu'aux blocs) se déplaçant près du fond, et responsable des changements de la morphologie du lit des cours d'eau sont d'un usage classique. Ils relient la force hydraulique de l'écoulement à un flux de matériau en mouvement, ce qui se fait via deux lois :

- **Une loi de frottement** : elle transforme le débit (Q) s'écoulant sur la surface rugueuse du lit (granulométrie des sédiments) en force F ; on parle plus couramment de contrainte τ , qui n'est autre que la force divisée par la surface du lit (la force exercée par m^2) ;
- **Une loi de transport** : elle donne une estimation du flux de matériaux que cette force de l'écoulement est capable de mobiliser.

L'ensemble des calculs a été réalisé avec le programme BedloadWeb disponible en ligne sur internet (<http://www.bedloadweb.com/>) qui a permis de tester plusieurs formules de transport solide. Dans tous les cas, le résultat a indiqué une nette différence de comportement entre la Thio et ses creeks. La formule Recking [2013] a été considérée dans la mesure où c'est la seule qui a réellement été validée sur des données de terrain (10000 valeurs, 3000 ayant servi à la construction de la formule et 7000 ayant servi à sa validation). Les résultats indiquent quelques centaines de m^3/an pour la Thio et plusieurs milliers de m^3/an pour les creeks. Les chiffres détaillés ont été fournis dans le tableau 32.

En matière de suspension, l'approche calculatoire, très compliquée (probablement plus compliquée que l'estimation du charriage de la charge grossière) a néanmoins été esquissée. Elle l'a été à partir de travaux récents [Misset *et al.*, 2019] qui ont utilisé la mobilité du lit comme un proxy de la charge en suspension. La formulation relie par une loi puissance la concentration en suspension et le débit solide par charriage. Lorsqu'on l'applique à la Nakale, par exemple, on obtient un volume transporté de l'ordre de 60 000 m^3/an (80 000 m^3/an en volume apparent). Cela nous amène à la conclusion que probablement plusieurs centaines de milliers de m^3 de sédiments sont transportés chaque année par suspension vers l'océan (une partie non négligeable de cette charge se trouvant piégée sur les terrasses par effet peigne de la végétation).

La dynamique de la Thio pourrait donc être essentiellement une dynamique de fines (transport par suspension) qui seraient apportées depuis les creeks de façon non négligeable pour se déposer sur les terrasses (un dépôt accentué par effet peigne de la végétation), ainsi qu'à l'estuaire. Dans ce scénario, les sédiments grossiers de la Thio ne seraient mobilisés que lors des crues extrêmes (cyclones).

Pour préciser la connaissance du transport en suspension, l'approche consistant à utiliser des capteurs *in situ* a été mise en œuvre selon une méthodologie présentée au paragraphe 5.3 et annexe 9-3. Ces capteurs ont permis d'échantillonner deux événements de crue de faible intensité (<200 m^3/s) entre 2015 et 2017. Les flux spécifiques mesurés pour ces petites crues sont de l'ordre de 10 t/km^2 tandis que le flux spécifique de MES estimé pour la crue de 2015 est de 1000 t/km^2 (crue de période de retour estimée à 20 ans). Cette dernière estimation devra cependant être validée par des mesures directes des concentrations.

La qualification des matières en suspension transportées par la Thio et ses affluents a consisté à appliquer des méthodes de traçage (*fingerprinting*) avec l'objectif de tenter d'évaluer l'origine des M.E.S dans le bassin versant, à savoir les sédiments d'origine minière (ou déchets miniers) vs. les sédiments provenant d'autres sources sédimentaires (feux, glissement de terrain naturels).

Ces méthodes reposent sur l'analyse d'un ensemble de propriétés physiques et chimiques conservatives tant au sein des sédiments que de leurs sources potentielles. La capacité d'une ou plusieurs de ces propriétés à discriminer les sources entre elles permet alors par le biais d'un modèle de mélange d'estimer la contribution relative de chacune de ces sources.

Les matériels utilisés et les méthodes mises en œuvre (spectrocolorimétrie, fluorescence X, spectrométrie gamma, géochimie, activité des radionucléides) ont été détaillés au paragraphe 5.1 et annexe 9-1.

Le modèle de mélange statistique à deux sources, développé par Laceby and Olley (2015) et basé sur l'Equation 1 a ensuite été utilisé pour quantifier les contributions respectives des sources minières et non-minières dans les sédiments de la rivière Thio.

$$Ax + B(1 - x) = C \text{ (Equation 1)}$$

où A et B intègrent les distributions des paramètres moyens (traceurs) mesurés respectivement dans les sources minières et non-minières, x est la contribution de la source A, et C est la distribution des

paramètres moyens (traceurs) modélisée pour les sédiments. Ce modèle a été appliqué via l'algorithme d'Opquest du logiciel Crystal Ball.

Le modèle de mélange a été appliqué aux crues de février 2015 et d'avril 2017 (toutes deux considérées comme des crues décennales avec des débits instantanés maxima enregistrés de $3500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Les conclusions apportées sont les suivantes : **les apports des sous-bassins miniers sont les principales sources d'apport sédimentaire arrivant dans la Thio aussi bien pour l'événement de 2015 ($68 \pm 25 \%$) que celui de 2017 ($84 \pm 7 \%$).**

Cependant, la distribution spatiale des précipitations peut modifier de façon locale et sporadique l'apport de sédiments dans la Thio. Les précipitations générées par la dépression tropicale de février 2015 et principalement localisées sur le sous-bassin versant de la Kouaré ont permis, par exemple, à ce dernier affluent de contribuer de façon conséquente aux apports sédimentaires. Bien que cet affluent contribue aux apports sédimentaires, les apports en provenance des sous-bassins miniers dominent largement en aval du bassin versant et à l'estuaire avec l'apport des affluents miniers (Creek cimetièrre, Tomuru, Mué) qui drainent la mine Thio Plateau.

7.3.2. PERCEPTION DES HABITANTS ET ACCEPTATION SOCIALE DES TRANSFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Dans un contexte d'engravement des rivières où les phénomènes d'hypersédimentation se déploient jusqu'à l'interface terre-mer, l'objectif de ce volet était, d'une part, de décrire et d'analyser l'évolution des perceptions des transformations de l'environnement par la population et de les spatialiser, et d'autre part, de décrire et analyser les changements dans les activités des populations liées au lagon et à l'embouchure.

Les vécus, les représentations et les perceptions des habitants de la commune vis-à-vis du sur-engravement des creeks et de la Thio et de l'hypersédimentation du delta sont très variés. Un point commun les relie cependant, celui de l'association systématique des inondations aux transformations géomorphologiques des cours d'eau et de l'estuaire de la Thio.

La mine est considérée par les habitants comme responsable des inondations de grande ampleur qui se produisent depuis le milieu des années 1970 et plus particulièrement, depuis le cyclone Alison (1975). Ce dernier est perçu comme un moment clef pour les habitants, puisqu'en accélérant un processus d'érosion déjà en cours, il a également amené la pollution à laquelle les habitants font souvent référence. Ceux-ci associent le sur-engravement et l'hypersédimentation du delta à des changements physiques, géomorphologiques, écologiques, sociaux et culturels, ainsi qu'à des risques de santé publique.

Un focus sur les dépôts de boue a été fait pour mieux appréhender quelles étaient les conséquences spécifiques dues à la boue pour les tribus (épaisseur des dépôts, qualité, circonstances du dépôt). Ce focus révèle que les dépôts de boue décrits par les habitants sont plus importants vers l'estuaire que pour les tribus de la chaîne et sont qualifiés selon leur couleur, leur quantité et leur qualité (mélange de terre et minéral). Les différents volets de la restitution des entretiens ont été consignés dans une série de tableaux récapitulatifs qui restituent tout d'abord de façon synthétique les éléments du contexte général et des enjeux spécifiques aux différentes tribus.

Les réponses apportées par la population montrent que face à une problématique commune, les effets de l'engravement et de l'hypersédimentation sont spécifiques à chaque tribu et qu'ils dépendent largement de critères tels que la morphologie du territoire, la présence et la proximité de cours d'eau, l'organisation spatiale, la présence d'une exploitation minière à proximité de la tribu, etc. Tout comme les effets de l'engravement sont à appréhender de manière localisée selon les tribus, il est important de souligner qu'ils sont également différents au sein des tribus elles-mêmes.

Les conséquences concernant différents aspects de la vie des populations ont ensuite été rapportées (conséquences sur le foncier, sur les cultures vivrières) qui démontrent des impacts forts. Ces derniers varient selon qu'ils concernent les tribus de la chaîne ou de la zone littorale. À titre d'exemple de cette variabilité, nous citerons le fait que, d'une manière générale, le foncier habitable et cultivable est plus fortement impacté dans les tribus de l'estuaire. Cependant, bien qu'il y ait plus de foncier disponible dans les tribus de la chaîne, d'autres facteurs sont à prendre en compte. Pour la tribu de Saint-Paul par exemple, le foncier disponible cultivable non inondable se situe sur le GDPL de Shan Poro, c'est-à-dire relativement loin par rapport aux habitations des personnes habitant toujours près de la maison

commune (les champs les plus proches se situent à plus de 2,5 km en passant par la route). De plus, ces personnes étant majoritairement des personnes âgées (plus de 60 ans), le déplacement vers ces zones de culture devient complexe. Elles cultivent d'ailleurs autour de chez elles. De plus, même si le foncier non inondable est accessible pour cette tribu, son utilisation pour les habitations amène une reconfiguration importante de l'organisation spatiale au sein de la tribu.

D'autres conséquences ont été analysées qui sont détaillées à la section 6 et annexe 10. Elles portent sur les représentations des habitants à propos des cours d'eaux et leur perception des risques, les enjeux pour le futur, les enjeux sur les zones de pêche et sur le maintien d'une pratique familiale nourricière

7.3.2.1.1. Regards croisés entre savoirs scientifiques et savoirs locaux

Il est apparu intéressant à l'ensemble des partenaires du programme *IMMILA* d'esquisser un dialogue entre les vécus et les représentations des populations avec les analyses des transformations environnementales réalisées par les experts des différentes disciplines.

Ce dialogue traduit de fait la richesse des échanges que les scientifiques ont pu avoir avec la population au cours des trois années de travail à Thio. Ce dialogue constant a permis grâce aux temps d'échanges de paroles entre sachants scientifiques et locaux, une meilleure compréhension mutuelle, un enrichissement réciproque et une connaissance améliorée des phénomènes naturels et anthropiques actifs dans le bassin versant de la Thio.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Allenbach M. et al. (2015). Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel & son environnement ».
- Allenbach M., Hoibian T., 2002. L'évolution géomorphologique récente du littoral à l'embouchure des rivières Thio et Dothio (Nouvelle-Calédonie) : Un exemple d'interactions anthropiques et naturelles. Génie civil, Anglet, 23-25 mai 2002. Ed. PARALLIA, Centre Français du littoral, Session V / Aménagement et protection du littoral, 577-5896.
- Allenbach M., Hoibian T., 2002. L'évolution géomorphologique récente du littoral à l'embouchure des rivières Thio et Dothio (Nouvelle-Calédonie) : Un exemple d'interactions anthropiques et naturelles. Génie civil, Anglet, 23-25 mai 2002. Ed. PARALLIA, Centre Français du littoral, Session V / Aménagement et protection du littoral, 577-5896.
- Bagnold, R. A. (1977), Bed load transport by natural rivers, *Water Resources Research*, 13(2), 303-312.
- Baltzer, 1970. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 271, 2251-2254.
- Bannari A., Ashali H., Teillet P.M. 2002. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In *IEEE int. Geoscience and Remote sensing Symposium*, vol. 5, 3053-3055.
- Bannari A., Ashali H., Teillet P.M. 2002. Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In *IEEE int. Geoscience and Remote sensing Symposium*, vol. 5, 3053-3055.
- Bannari A., Huete A. R., Morin D., Zagolski F., 1996. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *International journal of remote Sensing*, 17: 10, 1885-1906.
- Bannari A., Huete A. R., Morin D., Zagolski F., 1996. Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. *International journal of remote Sensing*, 17: 10, 1885-1906.
- Baret F., Guyot G., Begue A., Maurel P., 1988. Complementary of middle infrared with visible and near infrared reflectance monitoring wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, 26, 213-225.
- Baret F., Guyot G., Begue A., Maurel P., 1988. Complementary of middle infrared with visible and near infrared reflectance monitoring wheat canopies. *Remote Sensing of Environment*, 26, 213-225.
- Bertrand M, Liébault F. 2019. Active channel width as a proxy of sediment supply from mining sites in New Caledonia. *Earth Surface Processes and Landforms* 44: 67-76. DOI: doi:10.1002/esp.4478
- Cabioch et al., 2008. *Journal de la Société des Océanistes*, 126-127, 25-40.
- Camenen, B., and M. Larson (2007), A unified transport formulation for coastal inlet application (<http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA472064>), Report, 248 pp, US Army Corps of Engineers, ERDC/CHL CR-07-1
- Campbell J. B., 1987. Introduction of remote sensing. The Guilford Press, New York, Usa, 551p.
- Campbell J. B., 1987. Introduction of remote sensing. The Guilford Press, New York, Usa, 551p.
- Collins, A., Walling, D., Leeks, G. (1997) Use of the geochemical record preserved in floodplain deposits to reconstruct recent changes in river basin sediment sources. *Geomorphology* 19, 151-167
- Croudace, I. W., & Rothwell, R. G. (Eds.). (2015). *Micro-XRF Studies of Sediment Cores Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences* (Vol. 17). Springer.
- Devineau J.-L., Zombre P.N. 1996. Utilisation de l'indice de rougeur de Madeira pour la reconnaissance des sols de la région de Bondoukuy (ouest burkinabé) à partir d'images satellitaires SPOT. In: Escafadal R. (ED.) Mulders M.A. (ed.), Thiombiano L. (ed.) *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques*. Paris: ORSTOM, 121-134.
- Devineau J.-L., Zombre P.N. 1996. Utilisation de l'indice de rougeur de Madeira pour la reconnaissance des sols de la région de Bondoukuy (ouest burkinabé) à partir d'images satellitaires SPOT. In: Escafadal R. (ED.) Mulders M.A. (ed.), Thiombiano L. (ed.) *Surveillance des sols dans l'environnement par télédétection et systèmes d'information géographiques*. Paris: ORSTOM, 121-134.
- Drain, P., 2016. Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré. Mémoire TFE, CNAM-ESGT, 60 pp.

- Einstein, H. A. (1950), The bed-load function for sediment transportation in open channel flows, Report, 71 pp, United States Department of Agriculture - Soil Conservation Service, Washington
- Engelund, F., and E. Hansen (1967), A monograph on sediment transport in alluvial streams, Report, 62 pp, Technical University of Denmark
- Escafadal R., Huete A. 1991. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, série II, 1385-1391.
- Escafadal R., Huete A. 1991. Étude des propriétés spectrales des sols arides appliquée à l'amélioration des indices de végétation obtenus par télédétection. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 312, série II, 1385-1391.
- Escafadal, R. 1990. Les propriétés spectrales des sols. Journées Télédétection, 14-17.
- Escafadal, R. 1990. Les propriétés spectrales des sols. Journées Télédétection, 14-17.
- Faye, I., Giraudet, E., Gourmelon, F., Hénaff, A. 2011. Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte. M@ppemonde, 104, 1-12.
- Faye, I., Giraudet, E., Gourmelon, F., Hénaff, A. 2011. Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte. M@ppemonde, 104, 1-12.
- Foucher A., Salvador-Blanes S., Evrard O., Simonneau A., Chapron E., Courp T., Cerdan O., Lefèvre I., Adriaensen H., Lecompte F., Desmet M.(2015). Increase in soil erosion after agricultural intensification: evidence from a lowland basin in France. *Anthropocene*, 7, 30-41
- Foucher, A., Salvador-Blanes, S., Evrard, O., Simonneau, A., Chapron, E., Courp, T., ... & Desmet, M.
- Garcin et coll. 2018. Rapport scientifique. Programme Gestion du passif de l'activité minière. CNRT « Nickel et son environnement ». 131 p.
- Garcin M, 2017. Forçage météorologique de 1952 à 2016 sur le bassin de la Thio. Note technique BRGM DRP 17-182, 41 p., 10 fig., 10 tabl.
- Garcin M., Flehoc Ch. (2019) – Éléments radiochronologiques de la carotte Thio-1 (Nouvelle-Calédonie). Note technique BRGM DRP 19-257, juillet 2019, 17p., 8 fig., 6 tabl.
- Garcin M., Gastaldi Y., Lesimple S. (2017) Quantification et évolution temporelle des apports miniers dans les rivières calédoniennes. BRGM/RP-66840-FR, 44 p., 23 fig., 5. Bureau des Recherches Géologiques et Minières.
- Garcin M. et coll. (2017) – Gestion du passif minier – Rapport scientifique. CNRT « *Nickel & son environnement* ». 131 pages, 42 fig., 18 Tab.1 ann.
- Gilbert, G.K., 1917. Hydraulic-mining debris in the Sierra Nevada. United States Geological Survey Professional Paper.
- Hancock, G.J., Wilkinson, S.N., Hawdon, A.A., Keen, R.J. (2014) Use of fallout tracers ⁷Be, ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs to distinguish the form of sub-surface soil erosion delivering sediment to rivers in large catchments. *Hydrol. Process.* 28, 3855-3874
- James, L.A., 2006. Bed waves at the basin scale: Implications for river management and restoration. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 1692-1706.
- Knighton, A.D., 1989. River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875-1984. *Earth Surface Processes and Landforms* 14, 333-359.
- Lacey, J.P., Evrard, O., Smith, H.G., Blake, W.H., Olley, J.M., Minella, J.P.G., Owens, P.N. (2017) The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: A review. *Earth-Sci. Rev.* 169, 85-103
- Le Gall, M., (2016) Traçage des sources de sédiments à l'amont des hydrosystèmes agricoles: apport de la géochimie élémentaire, du rapport ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr et des radionucléides. Paris Saclay
- Le Gall, M., Evrard, O., Foucher, A., Lacey, J. P., Salvador-Blanes, S., Thil, F., Dapoigny, A., Lefèvre, I., Cerdan, O., Ayrault, S. (2016 b). Quantifying sediment sources in a lowland agricultural catchment pond using ¹³⁷Cs activities and radiogenic ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. *Science Total of the Environment* 566, 968-980.
- Lefort, P. (2007), Une formule semi-empirique pour le transport solide des rivières et des torrents, paper presented at Transport solide et gestion des sédiments en milieu naturel et urbain, SHF143-149, Lyon

- Legout, C., Poulenard, J., Nemery, J., Navratil, O., Grangeon, T., Evrard, O., Esteves, M. (2013) Quantifying suspended sediment sources during runoff events in headwater catchments using spectroradiometry. *Journal of Soils and Sediments* 13, 1478-1492
- Leroux A., 2016. 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). Mém. Master 2 univ. Paris 1 Panthéon Sorbonne, 104 p.
- Leroux A., 2016. 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). Mém. Master 2 univ. Paris 1 Panthéon Sorbonne, 104 p.
- Malavoi, J.-R., C. C. Garnier, N. Landon, A. Recking, and P. Baran (2011), *Elements de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*, 216 pp., ONEMA, ISBN: 978-2-9516393-5-5
- Mathys N., Caze N., Richard D. (2015) - « *Guide méthodologique pour le suivi hydrologique et sédimentaire des petits bassins versants miniers* ». Guide méthodologique. CNRT « Nickel & son environnement ».
- Meyer-Peter, E., and R. Mueller (1948), Formulas for bed-load transport, paper presented at Proceedings 2nd Meeting IAHR, Stockholm
- Misset, C., A. Recking, O. Navratil, C. Legout, A. Poirel, M. Cazihlac, V. Briguet, and M. Esteves (2019), Quantifying bed-related suspended load in gravel bed rivers through an analysis of the bedload-suspended load relationship, *Earth Surface Processes and Landforms*
- Mougel P. N., Selmaoui-Folcher N., 2013. A data mining approach to discover collections of homogeneous regions in satellite image time series. In 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS, 4360-4363.
- Mougel P. N., Selmaoui-Folcher N., 2013. A data mining approach to discover collections of homogeneous regions in satellite image time series. In 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium-IGARSS, 4360-4363.
- Parker, G. (1979), Hydraulic geometry of active gravel rivers, *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 105(9), 1185-1201
- Parker, G. (1990), Surface-based bedload transport relation for gravel rivers, *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), 417-428.
- Piton, G., and A. Recking (2015), Design of sediment traps with open check dams: a review- Part I: hydraulic and deposition processes, *Journal of Hydraulic Engineering*, 8, 1-16, doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048
- Ploquin, F., Fritsch, E., Juillot, F., Dublet, G., Estève, I., Fandeur, D., Fiallin, M., Guinier, J., (2017) Gisements de nickel latéritique, volume IV : les oxydes de manganèse associés aux latérites de transition. CNRT " Nickel et son environnement"
- Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of Environment*, 48, 119-126.
- Qi J., Chehbouni A., Huete A. R., Kerr Y. H., Sorooshian S., 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote sensing of Environment*, 48, 119-126.
- Rapport de stage de Lucie Gosset (2016). Rivières engravées à Thio, Nouvelle-Calédonie : vécus et attentes de la population
- Recking, A. (2013), A simple method for calculating reach-averaged bedload transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(1)
- Recking, A., D. Richard, and G. Degoutte (2013), Dynamique et aménagement des torrents et rivières de montagne, QUAE.
- Richard D., Garcin M., Liébault F., Recking A., Piton G., Sabinot C., Worliczek E., Lesimple S., Bertrand M., Gastaldi Y., Burlat T., Gosset L., Pidjo A., Gosselin N. (2017) – « *Gestion du passif minier en Nouvelle-Calédonie* ». Guide méthodologique. CNRT « Nickel & son environnement ». 79p, 20 fig. 9 tab.
- Rickenmann, D. (1991), Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes, *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 117(11), 1419-1439

- Roquin C., PION J., Dandjinou T. M., 1989. Étude des latérites par télédétection : corrélation des données géochimiques et radiométriques. Bul. S.F.P.T. n° 114, 6 p.
- Roquin C., PION J., Dandjinou T. M., 1989. Étude des latérites par télédétection : corrélation des données géochimiques et radiométriques. Bul. S.F.P.T. n° 114, 6 p.
- Rouet I., Gay D., Allenbach M., Selmaoui N., Ausseil A. G., Mangeas M., Lille D., 2009. Tools for soil erosion mapping and hazard assessment: application to New Caledonia, SW Pacific. MODSIM'09, 1986-1992.
- Rouet I., Gay D., Allenbach M., Selmaoui N., Ausseil A. G., Mangeas M., Lille D., 2009. Tools for soil erosion mapping and hazard assessment: application to New Caledonia, SW Pacific. MODSIM'09, 1986-1992.
- Rouse Jr J., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA special publication, 351, 301 – 317.
- Rouse Jr J., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W., 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. NASA special publication, 351, 301 – 317.
- Roux C, Alber A, Bertrand M, Vaudor L, Piégay H. 2015. "FluvialCorridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology* 242: 29-37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018>
- Scheinost, A. C., Chavernas, A., Barrón, V., & Torrent, J. (1998). Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils. *Clays and Clay Minerals*, 46(5), 528-536.
- Schoklitsch, A. (1962), *Handbuch des Wasserbaus* (in German), Springer Verlag (3rd edition), Wien
- Schumm SA. 1969. River metamorphosis. *American Society of Civil Engineers, Journal of the Hydraulics Division* 95: 255-273.
- Schwertmann, U., Latham, M. (1986) Properties of iron oxides in some New Caledonian oxisols. *Geoderma* 39, 105-123
- Sevin, B., (2014) *Cartographie du régolithe sur formation ultrabasique de Nouvelle-Calédonie : Localisation dans l'espace et le temps des gisements nickélicifères*. Nouvelle Calédonie
- Smart, G. M. (1983), Sediment transport formula for steep channels, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(3), 267-276.
- Thieler E., R., Himmelstoss E.,A., Zichichi J.L., and Ergul Ayhan 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline changes: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Thieler E., R., Himmelstoss E.,A., Zichichi J.L., and Ergul Ayhan 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline changes: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Van Rijn, L. C. (1984), Sediment transport, Part I: Bedload transport, *Journal of Hydraulic Engineering*, 110(10), 1431-1457
- Walling D, Peart M, Oldfield F, Thompson R (1979) Suspended sediment sources identified by magnetic measurements. *Nature* 281:110.
- Wilcock, P. R., and J. C. Crowe (2003), Surface-based transport model for mixed-size sediment, *Journal of Hydraulic Engineering (ASCE)*, 129(2), 120-128
- Wilkinson, S.N., Hancock, G.J., Bartley, R., Hawdon, A.A., Keen, R.J. (2013) Using sediment tracing to assess processes and spatial patterns of erosion in grazed rangelands, Burdekin River basin, Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 180, 90-102
- Wolman, M. G. (1954), *The natural channel Branywine Creek Pennsylvania*, Report, 56 pp, USGS report n°271
- Wong, M., and G. Parker (2006), Re-analysis and correction of bed load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database, *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(11), 1159-1168
- Yamano et al., 2014, *Geomorphology*, 222, 39-45.



2016/04/08