



Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré (Nouvelle-Calédonie)

Perrine Drain

► To cite this version:

Perrine Drain. Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré (Nouvelle-Calédonie). Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01687006

HAL Id: dumas-01687006

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01687006>

Submitted on 18 Jan 2018

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.

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS
ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES

MÉMOIRE

présenté en vue d'obtenir

le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM

Spécialité : Géomètre et Topographe

par

Perrine DRAIN

Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré
(Nouvelle-Calédonie)

Soutenu le 05 Juillet 2016

JURY

PRESIDENT : **M. Jean-Marie SEITÉ**

MEMBRES : **Mme Mélanie BERTRAND** **Co-maître de stage**
M. Mathieu BONNEFOND **Professeur référent**
M. Jean-Michel FOLLIN
Mme Marie FOURNIER
Mme Élisabeth SIMONETTO

MAÎTRE DE STAGE : **M. Frédéric LIÉBAULT**

Remerciements

Je souhaiterais dans un premier temps remercier Mme Mélanie Bertrand et M. Frédéric Liébault de m'avoir permis de participer à ce projet sur la Nouvelle-Calédonie qui m'intéressait tout particulièrement. Je les remercie pour les échanges enrichissants que nous avons pu avoir autour de leurs domaines de compétence et concernant les problématiques rencontrées durant ce stage. Je tiens à saluer tout particulièrement Mme Mélanie Bertrand pour avoir suivi mon travail continuellement au cours de ces 5 mois, mais je la remercie également de m'avoir intégrée à la fine équipe de l'IRSTEA.

Je tiens ensuite à remercier M. Mathieu Bonnefond pour les conseils qu'il a pu m'apporter dans mon approche scientifique et dans la rédaction de mon mémoire. Je remercie également Mme Elisabeth Simonetto, M. Eric Labergerie et M. Jean-Michel Follin pour avoir répondu à mes (nombreuses) sollicitations dans des délais toujours très brefs. Enfin je voudrais remercier Mme Nathalie Thommeret de m'avoir fournie de la documentation qui m'a été utile durant mon travail.

Je salue également les secrétaires de l'école Mme Nathalie Chutel-Le Roi et Mme Hélène Massot pour leur disponibilité et pour leur gestion parfaite de la partie logistique de nos stages.

Enfin je remercie ma sœur Alice Drain d'avoir pris le temps de relire à plusieurs reprises mon rapport et pour tous les conseils qu'elle a pu m'apporter sur la rédaction d'un document scientifique conventionnel.

Table des matières

Introduction	1
1 Contexte et problématique du surengravement des rivières en NC.....	2
1.1 Le fonctionnement des rivières en NC	4
1.1.1 La dynamique fluviale.....	4
1.1.2 Les styles fluviaux.....	6
1.2 La rivière de la Thio, figure du surengravement en NC.....	9
1.2.1 Zone d'étude.....	10
1.2.2 Zone témoin.....	12
2 Présentation du matériel et des méthodes utilisées.....	15
2.1 Les données à disposition.....	15
2.1.1 Photographies aériennes	15
2.1.2 Données altimétriques	17
2.1.3 Données vectorielles.....	19
2.2 Les outils de traitement	19
2.2.1 Stéréophotogrammétrie	19
2.2.2 Géorectification	21
2.2.3 Langages de programmation	22
2.3 Réalisation des traitements	23
2.3.1 Orthorectification des images.....	23
2.3.2 Géorectification des images	24
2.3.3 Éléments de contrôle	25
2.3.4 Digitalisation des bandes actives.....	26
2.3.5 Extraction des largeurs des bandes actives.....	27
2.3.6 Création de graphes à partir des données de largeurs des bandes actives	28
3 Résultats et discussions	30
3.1 Contrôle des traitements sur les images	30
3.1.1 Contrôles planimétriques.....	30
3.1.2 Contrôle qualitatif.....	32
3.2 Largeur de la bande active sur chaque époque	34
3.3 Évolution des bandes actives d'une époque à l'autre	40

4 Perspectives	45
Conclusion.....	48
Bibliographie	50
Table des annexes.....	52
Annexe 1	53
Annexe 2	54
Table des illustrations.....	55
Résumé/Abstract	56

Introduction

La Nouvelle-Calédonie est située dans le Pacifique Sud à 1 500 km à l'Est de l'Australie et à 1 800 km au Nord de la Nouvelle-Zélande (**figure 1A**). Cet archipel au climat tropical tempéré est constitué de la Grande-Terre, des îles Loyauté (Maré, Lifou et Ouvéa), de l'île des Pins, de l'archipel des Belep et de quelques îlots périphériques (**figure 1B**). La superficie totale de la Nouvelle-Calédonie est de 18 575 km² dont presque 90% sont représentés par la Grande-Terre, orientée Nord-Ouest/Sud-Est et qui forme une bande d'environ 450 km de long sur 50 km de large.

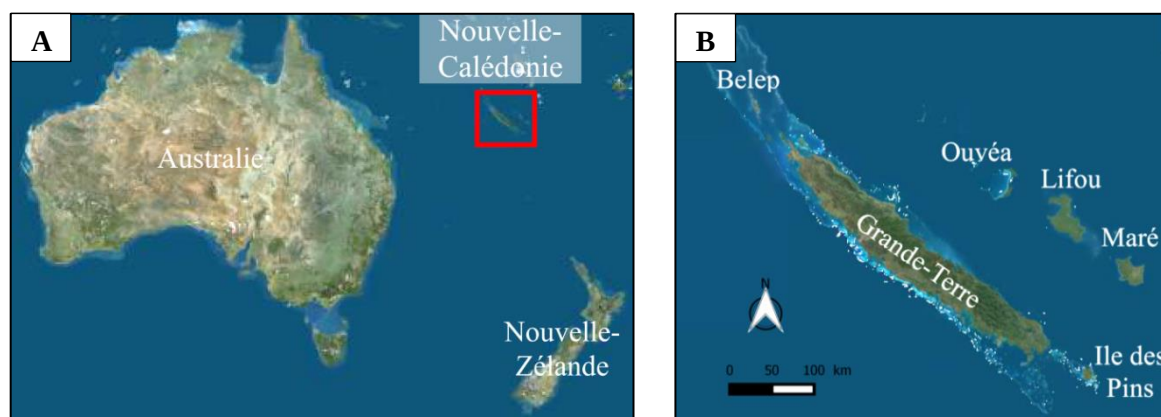


Figure 1 : Localisation de la Nouvelle-Calédonie (A) et identification des îles de l'archipel (B)
(source : IGN* modifié)

C'est un pays minier dont les origines remontent à environ 37 millions d'années lorsque la dérive du socle continental néocalédonien a fait émerger par chevauchement la partie supérieure et profonde du manteau de la croûte océanique qui s'est ensuite érodée pour ne laisser que la partie inférieure constituée de péridotites, roche mère du minerai de nickel. Du fait de cette histoire géologique, les zones exploitées pour le nickel se situent en zone de plateau ou au sommet des massifs de péridotites (appelés « massifs miniers »), donc en tête des bassins hydrographiques. Or ces massifs sont extrêmement sensibles aux phénomènes d'érosion et aux mouvements de terrain car le déboisement nécessaire à l'extraction du minerai entraîne l'instabilité des sols, et à cause de la richesse en métaux et la pauvreté en minéraux de ce type de sols (Jaffré *et al*, 1977), la végétation peine ensuite à se réinstaller, pérennisant ainsi cette instabilité. Enfin les ruissellements et productions de matériaux, fins comme grossiers, issus de l'érosion de ces massifs sont ensuite amenés à perturber les systèmes hydrographiques situés à l'aval (Mathys & Richard, 2007), et dans les systèmes les plus impactés on parle alors de « surengrèvement » des rivières.

Les travaux ainsi présentés dans ce rapport tenteront d'apporter des éléments de compréhension sur les dynamiques singulières de ces cours d'eau impactés par l'exploitation minière, en réalisant une analyse historique de l'évolution d'une rivière surengravée. Pour ce faire, des images aériennes anciennes datant de 1943 à 1989 ont été traitées par géorectification ou orthorectification puis les bandes actives des rivières de l'étude ont été digitalisées sur chaque époque pour en extraire les largeurs et les analyser.

Après avoir resitué le contexte des rivières néocalédoniennes et explicité la problématique du surengrèvement, les différents traitements réalisés pour cette étude seront exposés puis les résultats présentés et discutés, avant d'aborder les perspectives de ces travaux et conclure.

1 Contexte et problématique du surengravement des rivières en NC

Pour comprendre les systèmes fluviaux en Nouvelle-Calédonie, il convient d'avoir en premier lieu quelques connaissances sur son climat et son relief ainsi que sur l'exploitation minière puisque les dynamiques fluviales des rivières sont influencées par ces paramètres.

➤ Climat, relief et exploitation minière en Nouvelle-Calédonie

La Grande-Terre est traversée en son centre et sur toute sa longueur par une chaîne montagneuse dont le point culminant - le Mont Panié - s'élève à 1629 m (**figure 2A**). Cette chaîne centrale coupe l'île en deux régions distinctes :

- la côte Ouest au relief plat et au climat sec avec des plaines et des savanes étendues.
- la côte Est avec des montagnes aux vallées profondes et luxuriantes plongeant en pente raide face au lagon et où le climat est très humide.

La Nouvelle-Calédonie alterne entre saison chaude et pluvieuse de mi-Novembre à mi-Avril et saison fraîche de mi-Mai à mi-Septembre, avec des hauteurs de pluie annuelle comprises entre 2 et 3 m sur la côte Est contre 1 m sur la côte Ouest (**figure 2B**). Aussi la région dans laquelle se trouve l'archipel est l'une des plus touchée par les cyclones avec en moyenne 8 à 9 dépressions tropicales par an dont près de 16% affectent la Grande-Terre, et particulièrement les secteurs Nord et Est (Danloux & Laganier, 1991). Ces événements engendrent des pluviométries journalières très importantes pouvant atteindre jusqu'à 700 mm sur la côte Est (Gentien-Baudry, 1999) ; ils jouent alors un rôle important dans les phénomènes d'érosion des versants (Baltzer & Trescases, 1971) dont les conséquences se répercutent sur les cours d'eau par des apports sédimentaires abondants.

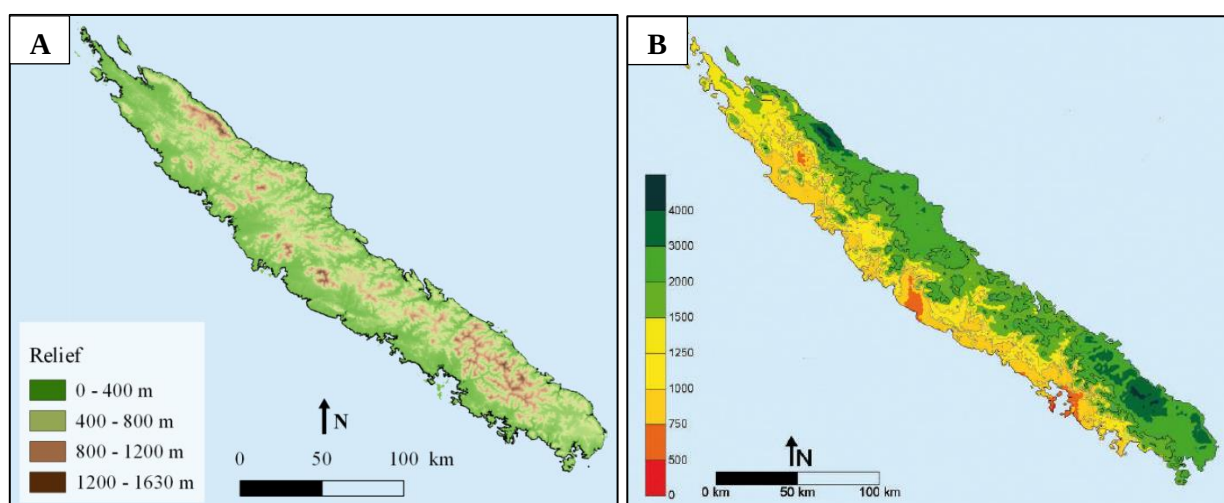


Figure 2 : Relief de la Grande-Terre (A) (conception : Perrine Drain*) et précipitations moyennes annuelles 1991-2000 en mm (B) (source : Météo-France NC)

* Carte issue du MNT à 10 m fourni par la Direction des Infrastructures, de la Topographie et des Transports Terrestres de la Nouvelle-Calédonie (DITTT)

L'archipel néocalédonien possède entre 30 et 40% des ressources mondiales en nickel (Bird *et al*, 1984) et en est le 3^{ème} producteur, derrière le Canada et la Russie. C'est l'ingénieur Jules Garnier qui repère en 1864 la présence de nickel et son exploitation débutera 10 ans plus tard. Les premières extractions seront réalisées à la pelle et au marteau jusqu'à l'arrivée de la mécanisation après la Seconde Guerre mondiale, qui permettra une nette augmentation de la production. Entre 1965 et 1971, la croissance des pays industrialisés et la guerre du Vietnam entraînent une très forte demande en nickel, et la Nouvelle-Calédonie connaît alors un véritable boom dans sa production passant de 2.5 à 7.7 millions de tonnes de minerai extrait. Puis, suite au choc pétrolier, à la dévaluation du dollar et à la nouvelle concurrence de l'Indonésie et des Philippines, la production retrouvera petit à petit une activité normale (Maison de la Nouvelle-Calédonie, 2016). À cette époque le respect de l'environnement n'est pas règlementé, et le pic de production de la fin des années 60 et l'arrivée de la mécanisation ont eu des conséquences environnementales désastreuses dans les paysages ainsi que sur l'état des versants et des cours d'eau. En effet, le mode d'exploitation à ciel ouvert dans un pays au climat tropical avec de fréquents cyclones a engendré une érosion intense de grandes surface latéritiques mises à nues par la prospection, l'extraction et le stockage non contrôlé des stériles (résidus miniers). Cette érosion a alors généré des apports importants de sédiments fins comme grossiers dans les cours d'eau, dont le fonctionnement s'est alors trouvé perturbé (Mathys & Richard, 2007). Ces gros volumes de matériaux semblent d'ailleurs se propager sous forme de vagues sédimentaires dans les réseaux hydrographiques (James, 1991). C'est à partir des années 1975 qu'une prise de conscience est née et que la seule société minière en place à l'époque - la SLN (Société Le Nickel) - en partenariat avec l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique en Outre-Mer) et de nombreux autres spécialistes, a mis en place de nouvelles pratiques dans le but de limiter son impact sur l'environnement (**figure 3**) (Jaffré & Pelletier, 1992) telles que :

- Création de versées à stériles pour stocker proprement et durablement les matériaux stériles en empêchant leur remobilisation par les écoulements.
- Extraction du minerai à la pelle hydraulique en créant des merlons pour limiter l'impact sur les flancs
- Mise en place de dispositifs de gestion des eaux et de contrôle de la sédimentation sur mines
- Reconstitution d'un couvert végétal,

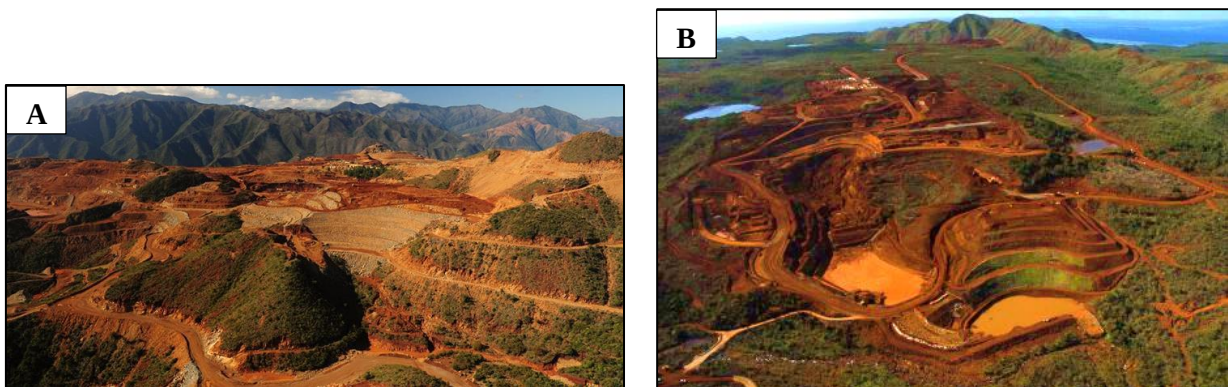


Figure 3 : Mines d'exploitation de nickel en Nouvelle-Calédonie
(sources : Martial Dosdane [A] et Julien thomazo [B])

Le plateau de Thio sur la côte Est de la Nouvelle-Calédonie (A) et la mine de Goro dans le Sud du territoire (B) se situent en sommet de massifs miniers. Les bassins de stockage des résidus (B) et les versées à stériles (A et B) sont clairement visibles.

Aujourd'hui 4 sociétés exploitent le minerai en Nouvelle-Calédonie : la Société Le Nickel (SLN, filiale d'ERAMET, groupe minier et métallurgique français), la Société Minière du Sud Pacifique (SMSP, groupe minier et métallurgique français), Vale NC (entreprise minière brésilienne) et Koniambo Nickel SAS (KNS, filiale de la SMSP et de Glencore, entreprise anglo-suisse). En 2015, environ 14.3 millions de tonnes de minerai de nickel ont été extraits du sol néocalédonien par l'ensemble de ces acteurs (<https://dimenc.gouv.nc/mines-et-carrieres/les-statistiques>) et malgré tous les efforts notables pour limiter les impacts sur l'environnement, l'extraction du nickel reste une activité génératrice de perturbations fortes sur l'aspect visuel des paysages, sur la végétation et les cours d'eau, avec les répercussions qu'elles impliquent sur les populations (**figure 3**).

1.1 Le fonctionnement des rivières en NC

La Nouvelle-Calédonie présente un réseau hydrographique dendritique, ramifié de part et d'autre de la chaîne centrale d'où il prend sa source. Il convient de rappeler quelques notions d'hydromorphologie pour comprendre et caractériser les cours d'eau en Nouvelle-Calédonie.

1.1.1 La dynamique fluviale

Les rivières constituent un système dynamique dont le fonctionnement et la morphologie sont régis par un certain nombre de variables dites de contrôle. En fonction de ces éléments, la rivière va s'adapter en transformant des variables internes à son fonctionnement dites variables de réponse.

- **Variables de contrôle**

Les variables de contrôle jouent à l'échelle du bassin versant et s'imposent directement à la rivière en contrôlant son évolution physique. On note comme principales variables de contrôle le débit liquide et la charge solide, qui dépendent eux-mêmes de la taille et de la pente du bassin versant ainsi que de l'imperméabilité des sols ou encore de l'érosion des versants. On peut donc déjà percevoir que dans le cas de la Nouvelle-Calédonie, l'exploitation minière joue probablement un rôle important sur les variables de contrôle à travers une diminution des surfaces végétalisées et des apports abondants en charge solide.

Parmi les facteurs de contrôle de la morphologie fluviale se trouve donc cette charge solide qui est transportée de différentes façons dans le cours d'eau en fonction du diamètre des matériaux et de l'énergie de la rivière. On distingue deux types de charge solide dont le déplacement diffère :

- La **charge en suspension**, lorsque le courant est suffisamment puissant et les matériaux de faible diamètre de sorte que ces derniers sont transportés au sein de la colonne d'eau sans atteindre le fond.
- La **charge de fond** (ou charriage) lorsque le diamètre des matériaux dépasse un certain seuil sans que le débit ne puisse les mettre en suspension.

Parmi ces deux charges, c'est principalement le charriage qui contrôle la morphologie fluviale car la majorité des sédiments composant le lit d'une rivière (souvent de type « bancs de graviers »), sont transportés de cette façon.

En Nouvelle-Calédonie le transport de la charge de fond par charriage intervient parfois de façon violente lors d'épisodes pluvieux intenses (dépressions tropicales et cyclones), et les dégâts causés peuvent alors être conséquents et durables : érosion et dégradation des versants, engravement des lits (**figure 4A**) et augmentation des risques d'inondation du fait de leur exhaussement. Concernant le transport des sédiments fins en suspension, lorsque cette charge est importante elle cause alors un phénomène appelé "eaux rouges" (**figure 4B**) puis arrivés à l'aval ces matériaux sédimentent dans les plaines côtières et atteignent le lagon dans lequel ils causent un risque de colmatage et d'étouffement des fonds (Mathys & Richard, 2007).

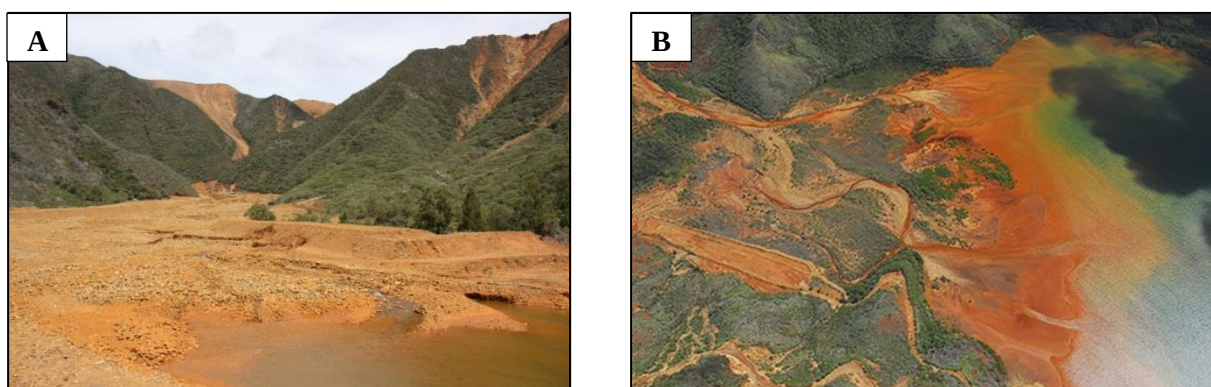


Figure 4 : Réseaux hydrographiques surengravés
(sources : IRSTEA [A] et Richer de Forges & Pascal, 2008 [B])

Exemple de lit d'une rivière engravée (A) et du phénomène d'hypersédimentation dans un delta (B) en Nouvelle-Calédonie.

- **Variables de réponse**

Les variables de réponse jouent à l'échelle de tronçons de la rivière et permettent à cette dernière de s'ajuster à des changements sur les variables de contrôle. On note comme principales variables de réponse la largeur de bande active¹, la sinuosité, la pente du lit, la profondeur moyenne et également la texture granulométrique du lit, qui vont s'ajuster aux variables de contrôle.

Ainsi le principe de la dynamique fluviale correspond à un ajustement perpétuel de la morphologie du cours de la rivière et de ses variables internes, par le biais de processus d'érosion-dépôt afin d'atteindre un équilibre entre le débit liquide et la charge alluviale transportée (Malavoi & Bravard, 2010).

¹ La bande active est constituée du chenal en eau et des bancs alluviaux non végétalisés (**annexe 1**)

1.1.2 Les styles fluviaux

Le style fluvial représente la forme en plan du lit, il dépend du fonctionnement hydro-géomorphologique de la rivière, et principalement des quantités de sédiments apportées au cours d'eau et de sa capacité à les transporter.

Les recherches scientifiques ont montré que les grands styles fluviaux ne sont jamais rectilignes, hormis quelques cas particuliers (torrents de montagnes, contraintes latérales très fortes, pente très faible,...). Aussi les styles fluviaux des rivières peuvent être amenés à évoluer en fonction de la fluctuation des variables de contrôle définies précédemment. Dans le cas de faibles changements des variables de contrôle, le style fluvial de la rivière varie généralement peu et oscille autour de ses valeurs moyennes. Lorsque des changements importants mais ponctuels surviennent, le cours d'eau peut évoluer vers une nouvelle morphologie, mais ses variables de réponses tendront à revenir progressivement à leur état initial, et donc son style fluvial également. Enfin si la rivière subit de fortes perturbations de ses variables de contrôle persistant dans le temps (suite à l'installation d'un ouvrage hydraulique par exemple), son style fluvial risque de changer radicalement pour trouver une forme nouvelle d'équilibre (Malavoi & Bravard, 2010).

Les styles fluviaux se décomposent en 3 grandes catégories - répondant à un ratio fourniture sédimentaire/capacité de transport différent - qui sont le méandrage, le tressage et le style intermédiaire divagant.

- **Les méandres**

Il s'agit de rivières de plaines à chenal unique qui présentent une sinuosité prononcée et dont le lit mineur (**annexe 1**) évolue peu au fil du temps (**figure 5**) (Malavoi & Bravard, 2010).

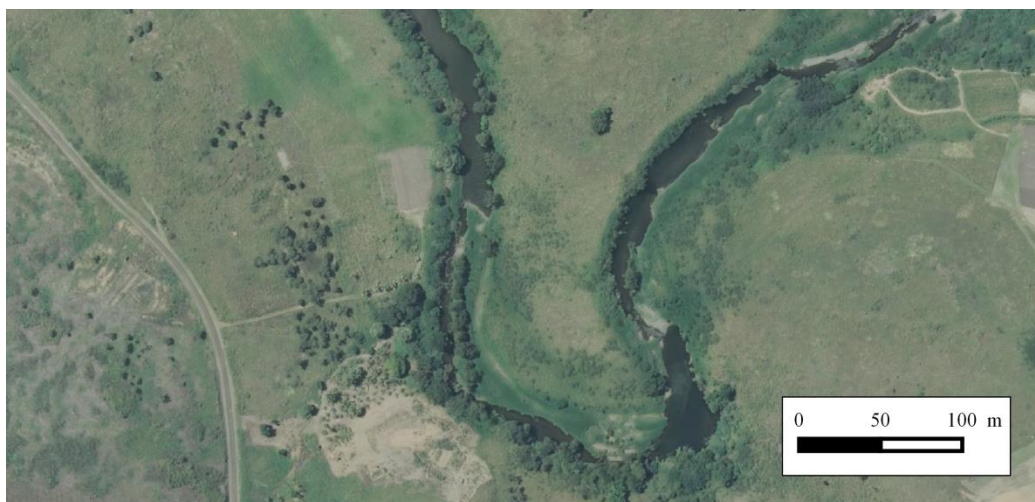


Figure 5 : Style fluvial en méandres sur la rivière de la Fanama, Nouvelle-Calédonie (source : DITTT)

- **Les tresses**

Les rivières en tresses sont également des rivières de plaines mais dont les chenaux sont multiples et très mobiles dans l'espace et dans le temps, séparés par de larges bancs alluviaux généralement peu ou pas végétalisés car régulièrement submergés par la rivière (**figure 6**). Deux conditions majeures favoriseraient ce type de morphologie : une charge alluviale surabondante, que la pente et le débit de l'eau ne parviennent pas à transporter, et des berges érodables facilitant l'élargissement de la rivière (Malavoi & Bravard, 2010).



Figure 6 : Style fluvial en tresses sur la rivière de Hurunui, Nouvelle-Zélande (source : Centre National d'Etudes Spatiales)

- **Le style divagant**

Le style divagant est un style intermédiaire entre le méandrage et le tressage. Les rivières divagantes présentent des bancs d'alluvions importants, et le chenal en eau est très mobile dans la bande active. Il arrive que le chenal soit multiple mais ce nombre reste alors modéré (2 à 3 maximum) (**figure 7**).

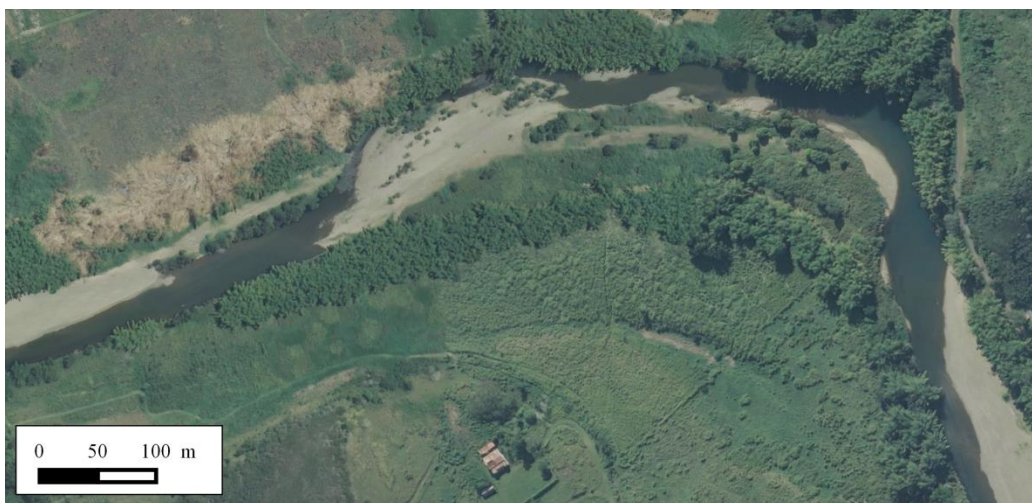


Figure 7 : Style fluvial divagant sur la rivière de la Thio, Nouvelle-Calédonie (source : DITTT)

En Nouvelle-Calédonie les rivières en tresses ne peuvent se développer dans les plaines calédoniennes car le débit des rivières y est trop important et les fonds de vallées souvent trop étroits pour permettre à la rivière de s'élargir. Les cours d'eau se présentent donc en majorité sous forme de méandres mais également sous forme divagante, notamment au niveau de rivières subissant de forts apports sédimentaires bien souvent liés aux exploitations minières.

➤ **Le problème de surengravement des rivières néocalédoniennes**

Les rivières qui subissent des apports solides largement supérieurs à leur capacité de transport actuelle, induisant de forts engravements de leur lit sur un linéaire significatif, sont caractérisées de rivières « surengravées ». Ce phénomène conduit alors à une modification de la morphologie de la rivière marquée par une remontée et à un élargissement du lit (Garcin & Lesimple, 2013).

Le surengravement des rivières calédoniennes est fortement lié à l'exploitation minière des terres. Il est en effet souvent causé par des apports sédimentaires conséquents provenant de l'érosion d'anciens stériles miniers déversés dans les rivières par le biais de ravines, ou encore de l'érosion de versant déstabilisés suite à la réalisation d'une mine ou de pistes minières. La granulométrie de ces apports solides varie généralement de celle de poussières à galets et peut parfois atteindre la taille de blocs rocheux selon la distance à la zone de production et l'état du versant érodé. Ces mines se trouvant sur des massifs de péridotites, la proportion de latérites y est importante, ce qui provoque un apport majoritairement constitué de particules fines. L'impact de ces dernières est principalement localisé au niveau des embouchures avec le lagon car les particules en suspension sont rapidement transportées dans le cours d'eau et viennent à stagner puis se déposer dans le delta où les débits sont moins puissants. Lorsque le débit augmente les particules sont alors remobilisées jusqu'au lagon, elles participent ainsi à l'évolution de la zone côtière et à la dégradation de l'environnement lagunaire (**figure 4B**) (Garcin & Lesimple, 2013).

1.2 La rivière de la Thio, figure du surengrèvement en NC

Dans ce contexte de dégradation de l'environnement généré par l'exploitation minière, un groupement d'intérêt public (GIP) a été créé en 2007 pour promouvoir les recherches scientifiques et techniques visant à favoriser une exploitation des ressources minières qui soit compatible avec la protection de l'environnement, le respect des populations et l'innovation technologique. Ce GIP a été formé par les principaux acteurs politiques publics du pays, les groupes industriels miniers en place ainsi que des organismes de recherche qui se sont regroupé en formant un Centre National de Recherche Technologique nommé « CNRT Nickel et son environnement ».

➤ **Projet du « CNRT Nickel et son environnement »**

C'est dans ce cadre qu'en 2013 un appel à projet intitulé « Bassin versant : de la mine au lagon » a été lancé par le « CNRT Nickel et son environnement » et dont les deux thématiques sont les suivantes :

- Sous appel à projet 1 (SAP1) « Gestion du passif de l'activité minière : état des lieux, historique et propositions de remédiation ». Ce projet vise à caractériser les mécanismes de transport et de dépôt des sédiments dans une rivière surengravée afin de connaître leur dynamique temporelle et spatiale, permettant ensuite d'anticiper sur les évolutions à venir et proposer des scénarios de remédiation. En parallèle, des études physico-chimiques des sédiments dans les estuaires devront être réalisées ainsi qu'une analyse du ressenti moral des populations concernant l'impact de l'activité minière sur leur environnement. Ces études devront être mises en relation avec celles d'un bassin versant non impacté par l'activité minière ou dont les impacts sont connus et mesurables en terme de transport et de dépôts sédimentaires.

- Sous appel à projet 2 (SAP2) « Qualification et quantification des flux de la mine au lagon et leurs impacts ». Ce projet consiste à étudier la nature et l'importance des flux d'eau et de sédiments fins comme grossiers à l'échelle des bassins versants miniers ainsi que leurs interactions avec les divers milieux (bassin versant/mangrove et bassin versant/lagon). Il est également prévu une analyse l'impact de ces flux par une approche comparative spatiale et temporelle en choisissant comme référence un bassin versant similaire (dimension, climat, ...) qui soit peu ou pas impacté par l'exploitation minière afin de distinguer les impacts naturels des impacts liés aux activités anthropiques. Enfin le dernier volet de ce projet consiste à étudier les conséquences de l'exploitation minière sur les populations et leurs activités (urbanisation, agriculture, pêche, ...)

Le site pilote qui a été sélectionné pour ce projet est le bassin versant de la Thio sur la côte Est de la Nouvelle-Calédonie et qui se situe dans un contexte de surengrèvement des rivières, propice aux études envisagées.

1.2.1 Zone d'étude

➤ Le bassin versant de la Thio

Thio est une commune située sur la côte Est de la Grande-Terre. Le bassin versant de la Thio (**figure 8**) est relativement étendu puisqu'il représente une surface d'environ 386 km², avec une altitude moyenne de 416 m pour un maximum à 1352 m. Toute la partie située en rive droite de la rivière principale de ce bassin (la Thio) ainsi que la partie aval de la rive gauche est formée de roches métamorphiques composées principalement de péridotites, tandis que la partie amont de la rive gauche est formée de roches plus diversifiées telles que des grès volcanoclastiques, des roches argileuses ou des roches magmatiques. Les sites d'exploitation minière se trouvent donc en rive droite et sur la partie aval en rive gauche de la rivière (**figure 8**).

Historiquement le plateau de Thio (**figure 8 – photo a**) est considéré comme le berceau du nickel, puisque qu'il fût le premier site d'extraction de ce métal. L'exploitation, qui débuta en 1874, perdure encore à ce jour sur deux sites principaux, la mine du Plateau (600 m d'altitude) et la mine du Camps des Sapin (800 m), tandis que les mines Bornet (900 m d'altitude) et les mines Bel Air et Zizette (850 m) sont des exploitations un peu moins conséquentes, mais qui restent des sources d'apports en sédiments certaines pour les réseaux hydrographiques. La surface de mines et décharges minières dans ce bassin est estimée à 12.15 km² (Dumas & Cohen, 2014).

Depuis quelques années des inondations considérables engendrant de nombreux dégâts matériels ont donné lieu à des mouvements de mécontentement général des populations. Ces dernières mettent directement en cause l'activité minière et estiment que ces phénomènes s'amplifient au fil du temps. C'est pourquoi des études sont réalisées régulièrement dans cette zone afin d'évaluer l'impact de l'activité minière sur l'environnement et les phénomènes observés par les populations (Danloux & Laganier, 1991, Mathys & Richard, 2007 et Garcin & Lesimple, 2013).

Aussi pour faire face à l'exaspération et aux menaces de blocage des mines, un protocole d'accord a été signé en 2013 entre la SLN, le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, la Province Sud et la commune de Thio. Cet accord propose notamment des apports financiers importants pour la prévention et la réparation des préjudices causés par les inondations (Protocole d'accord de fin de conflit relatif aux inondations du 2 juillet 2013) :

- La Province Sud s'engage à attribuer une enveloppe de 40 millions de francs pacifique (soit environ 335 000 euros) pour le curage des rivières surengravées.
- La SLN s'engage d'une part à verser une subvention de 20 millions de francs pacifique (soit environ 170 000 euros) à la commune de Thio, et d'autre part à réviser les mesures d'indemnisation des populations victimes d'inondations.

➤ Les rivières

- La **Thio (figure 8 – photo b)** est la rivière principale du bassin. Son linéaire mesure environ 20 km pour une pente moyenne² de 0.15% déterminée sur un tronçon de 16.6 km depuis le delta vers l'amont. Son style fluvial alterne entre le méandrage relativement peu sinueux et le style divagant avec des bandes actives parfois larges sur certains tronçons. Les affluents de la Thio, ravines ou ruisseaux, sont directement ou non connectés aux mines (**figure 8 – photo f**), contribuant ainsi à un surengrèvement modéré de son lit (Garcin & Lesimple, 2013). En revanche il semblerait qu'au niveau de l'embouchure avec le lagon, le delta de la Thio fasse l'objet d'un envasement considérable du fait de l'accumulation des particules fines qui sédimentent dans ces zones où les vitesses d'écoulement sont lentes. Pour limiter les phénomènes de crues et les inondations de la basse-vallée de la rivière, des digues prolongeant le chenal de la Thio dans le lagon (**figure 8 – photo d**) ont été réalisées dans les années 2000, et des travaux de dragage pour extraire les matériaux situés au fond du lit sont régulièrement réalisés (Allenbach & Hoibian, 2002).
- La **Nakaré (figure 8 – photo h)** est un affluent de rive droite de la Thio. D'un linéaire d'environ 10 km avec une pente moyenne de 2.38% déterminée sur une portion de 4.0 km depuis sa confluence avec la Thio, son style fluvial est divagant sur environ 4.5 km depuis la confluence, pour revenir sur un style en méandres peu sinueux en amont. Cette partie du cours d'eau divagant présente un phénomène de surengrèvement par des stocks alluvionnaires très importants fournis principalement par les mines Zizette et Bel Air (Garcin & Lesimple, 2013). La Nakaré a fait l'objet de travaux de curage et d'enrochement du fond du lit réalisés par la SLN afin de faciliter son écoulement, stabiliser le fond du lit et limiter l'apport de matériaux dans la Thio. Cependant des questions se posent sur la pérennité de tels travaux puisqu'il semblerait que les matériaux curés soient simplement remis sur les berges du cours d'eau ou remontés et stockés dans les zones d'activité minière « dans l'attente du choix d'une zone de stockage appropriée » (Protocole d'accord de fin de conflit relatif aux inondations du 2 juillet 2013).
- La **Néburu (figure 8 – photo g)** est également un affluent de rive droite de la Thio dont la confluence est située à moins de 500 m en aval de celle avec la Nakaré. Elle dispose d'un linéaire d'environ 8 km pour une pente moyenne de 1.47% calculée sur une portion de 5.8 km depuis la confluence avec la Thio. Elle présente un style fluvial à tendance divagante sur les 5.4 premiers km depuis sa confluence avec la Thio, pour évoluer en méandres plus en amont. Cette rivière est directement connectée à la mine Bornet par des ravines, et comme sur la Nakaré des curages et enrochements du fond du lit y sont régulièrement effectués.
- La **Fanama** est une rivière qui rejoint la Thio sur sa rive gauche (**figure 8**). D'un linéaire en méandres de 8 km, elle est située relativement loin du plateau de Thio (à environ 4 km en amont) et n'est pas impactée par le surengrèvement. Sa pente moyenne déterminée sur une portion de 2.4 km depuis la confluence avec la Thio est de 0.29%.
- La **Tomuru** et le **Creek cimetière (figure 8)** sont des creeks (ou ruisseaux) en rive gauche de la Thio qui sont directement connectés à la mine du plateau de Thio. Leur pente est très importante, entre 5 et 8% (Mathys & Richard, 2007), et la distance entre la Thio et la mine est aujourd'hui d'à peine 1 km, ce qui implique un transfert très rapide des sédiments dans la Thio. Ces creeks drainent le massif minier du Plateau de Thio et présentent un surengrèvement important (Garcin & Lesimple, 2013). Aussi pour limiter les transferts de sédiments dans la Thio, un barrage en peigne (**figure 8 – photo c**) a été construit sur le Creek cimetière, et un passage à gué a été construit à l'aval de la Tomuru lors de la construction de la route menant au village de Thio dans les années 1960.

² Les pentes moyennes des rivières ont été déterminées sur les tronçons étudiés dans ce projet et non pas sur tout leur linéaire.

1.2.2 Zone témoin

➤ Le Bassin versant de la Tôdré

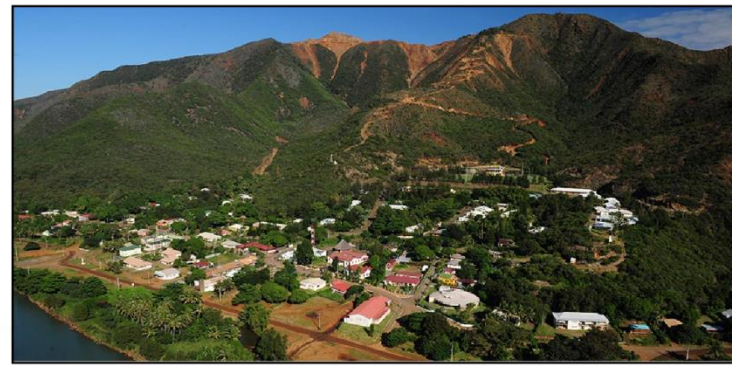
Comme prévu dans le projet, les différentes analyses réalisées sur le bassin versant de la Thio doivent être mises en comparaison avec un bassin similaire peu ou pas impacté par l'activité minière. C'est donc le bassin versant de la Tôdré (**figure 8**) qui a été choisi, d'une part pour sa proximité avec celui de la Thio, et d'autre part pour le faible impact minier qui y a été constaté. C'est donc ce bassin qui servira de référence aux études réalisées sur celui de la Thio.

Le bassin versant de la Tôdré (prononcé « Tondeu ») jouxte par le Sud-Est celui de la Thio et s'inscrit dans un massif de péridotites. Plus petit que ce dernier, sa surface est d'environ 61 km² pour une altitude moyenne de 555 m et un maximum à 1345 m. Il a la particularité de n'être que très peu impacté par l'exploitation minière, ce qui laisse sous-entendre que son réseau hydrographique n'est que très peu, voire pas du tout impacté par le surengrèvement.

➤ La rivière

La rivière principale de ce bassin (**figure 8 – photo e**) porte le même nom et présente un linéaire méandrique de 14.5 km pour une pente de 1.64% définie sur un linéaire de 10.6 km depuis le delta vers l'amont. Bien qu'également située sur un massif de péridotites, la rivière ne semble pas surengravée, même si des bancs d'alluvions sont visibles sur les rives de certains tronçons. Aussi le lit semble serpenter en grande partie sur du substratum rocheux, ou bedrock (roche cohésive et peu érodable), limitant ainsi la mobilité du cours d'eau. Or si la morphologie du cours d'eau est trop contrainte alors la pertinence de cette référence peut être remise en cause ; il conviendra donc de prendre cet aspect en considération lors des analyses, et de s'attarder sur les tronçons de la Tôdré les moins contraints.

Figure 8 : Présentation de la zone d'étude



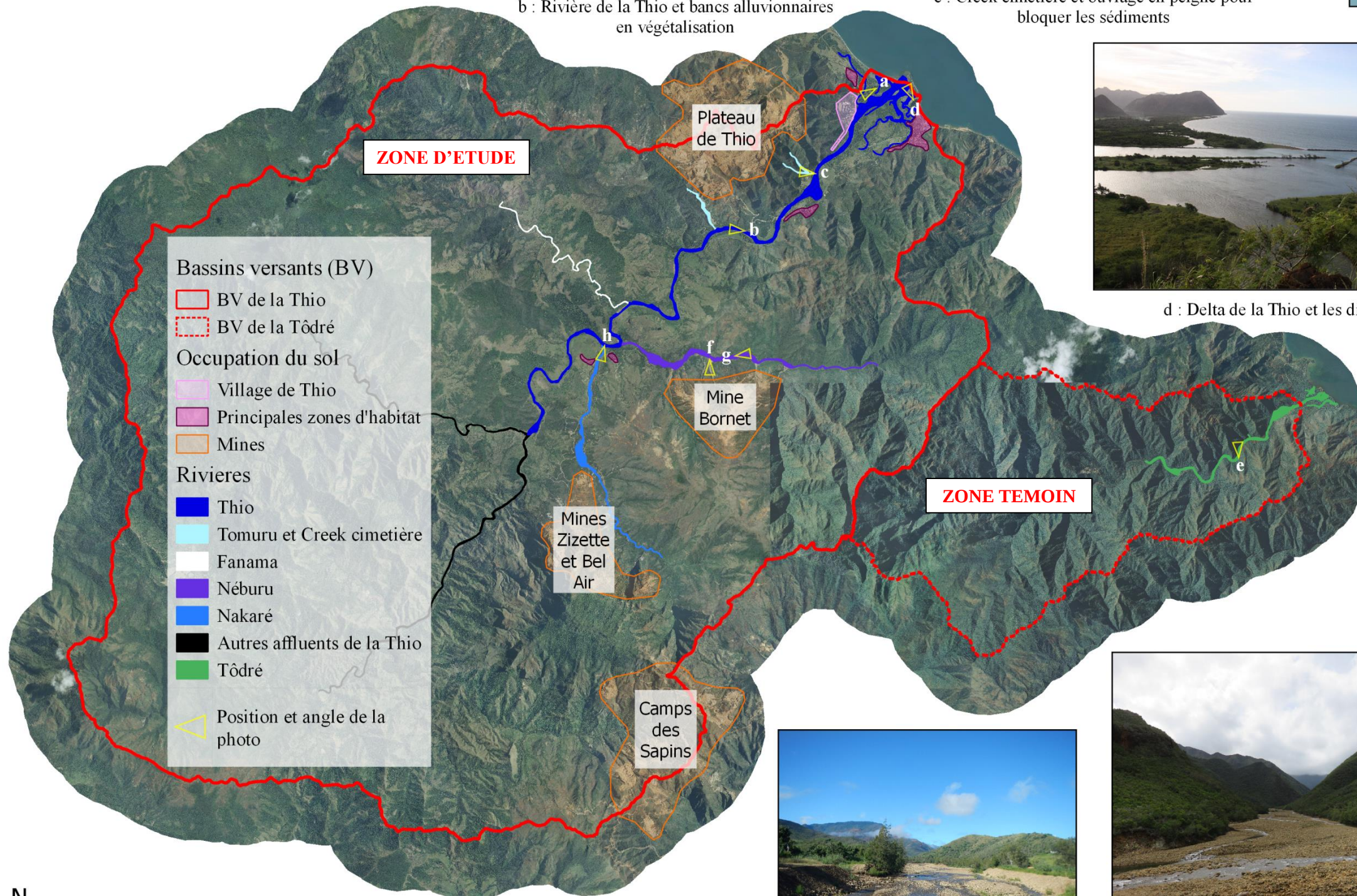
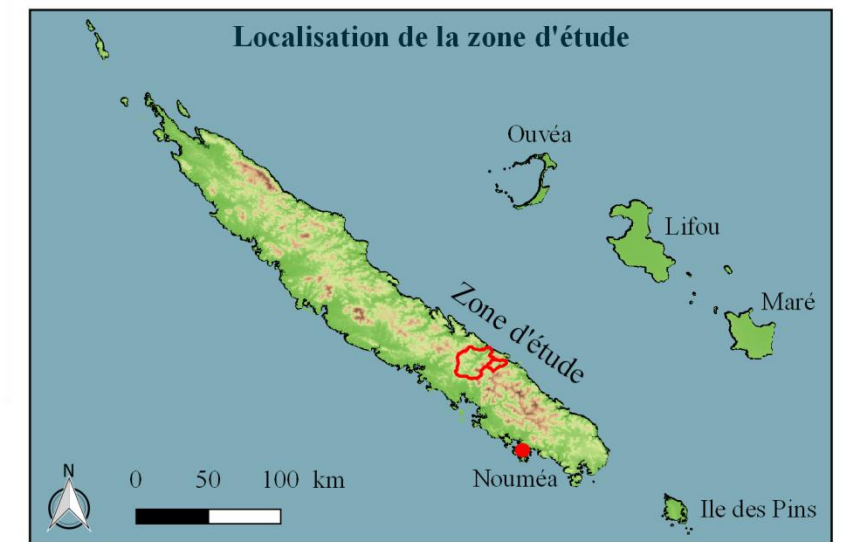
a : Village de Thio et mine du Plateau sur les hauteurs
(source : Martial Dosdane)



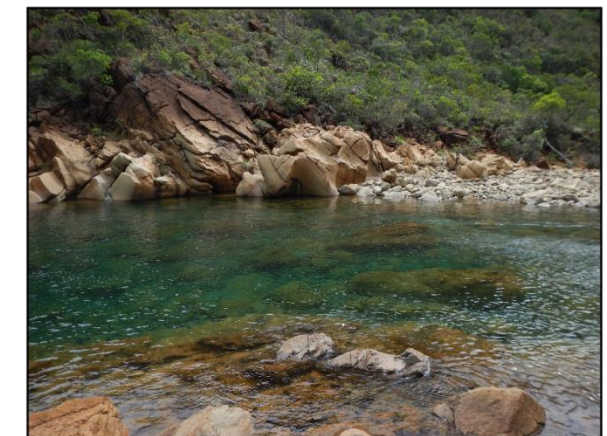
b : Rivière de la Thio et bancs alluvionnaires en végétalisation



c : Creek cimetière et ouvrage en peigne pour bloquer les sédiments



d : Delta de la Thio et les digues



e : Tôdré sur du bedrock et banc d'alluvions grossiers



f : Affluent de la Néburu fortement surengravé



g : Néburu surengravée



h : Nakaré après currage



0 2.5 5 km

➤ Objectifs du projet

C'est dans ce contexte que le centre grenoblois de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (IRSTEA) a pris part aux recherches en répondant à l'appel d'offre du « CNRT Nickel et son environnement ». Il travaille conjointement avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), l'Institut de Recherche pour le Développement de la Nouvelle-Calédonie (IRD, ex ORSTOM), l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC), le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), le Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives (CEA), ainsi que deux entreprises privées (Rouetis & D et EW Consultant). Du fait du très grand nombre d'acteurs les échanges peuvent s'avérer complexes, d'autant que la distance et le décalage horaire entre la Métropole et la Calédonie ne facilitent pas la fluidité de la communication.

L'IRSTEA participe aux études suivantes :

- Quantification des taux de sédimentation dans la zone littorale
- Transport solide et grossier en suspension
- Évolution récente des bassins versants et des hydrosystèmes
- Élaboration d'une stratégie de remédiation des impacts et rédaction d'un guide méthodologique

Dans le cadre de ces différentes études, une mission en Nouvelle-Calédonie a été réalisée en Mars 2016 par une partie de l'équipe de l'IRSTEA afin d'avoir une meilleure connaissance du terrain, mais également pour rencontrer les différents partenaires du projet installés sur place. Ainsi dès leur arrivée à Thio, une réunion publique a été tenue à la mairie afin d'informer la population des objectifs du projet, puis des visites et des photos des différents cours d'eau ont été réalisées. Deux stagiaires sont restés jusqu'à fin Juin afin d'effectuer des levés topographiques (profils en travers le long des cours d'eau) et pour répertorier les différents aménagements réalisés pour limiter le surengravement des cours d'eau.

Le rapport présenté ici s'intègre dans l'étude « Évolution récente des bassins versants et des hydrosystèmes ». Il consistera à essayer de déterminer le déplacement des vagues sédimentaires et comment la rivière s'est adaptée au fil du temps afin de mieux comprendre et appréhender la situation actuelle. Il serait également intéressant de voir si les réglementations environnementales imposées aux mineurs dès le milieu des années 70 ont eu un impact notable sur le surengravement des rivières. C'est à ces questions que les travaux qui vont être présentés ici tentent de répondre. L'objectif sera donc d'effectuer une analyse cartographique diachronique de la largeur de la bande active de la Thio et de ses affluents, ainsi que de la Tôdré, rivière témoin. Cette analyse consistera en premier lieu à analyser les largeurs des bandes actives de la Thio et de certains de ses affluents ainsi que de la Tôdré, et d'étudier leurs variations au cours du temps. Dans un second temps nous analyserons géographiquement les tendances d'évolution des bandes actives (rétraction/élargissement) d'une époque à l'autre pour chacun des cours d'eau et essayerons d'établir des liens entre les dynamiques de la Thio et de ses affluents.

Le travail à réaliser consistera ainsi à élaborer un SIG (Système d'Information Géographique) à partir duquel - après rectification et géoréférencement des images dans un même système de coordonnées - les bandes actives de chaque époque pourront être digitalisées et leurs largeurs extraites pour être analysées.

2 Présentation du matériel et des méthodes utilisées

Afin de pouvoir réaliser les analyses prévues dans cette étude un certain nombre de données ont été récupérées auprès de divers organismes. Ces données se présentent sous de multiples formes (raster/vecteur) et offrent des précisions hétérogènes qu'il conviendra de traiter avec les outils les plus adaptés et en extraire les meilleurs résultats.

2.1 Les données à disposition

La plupart des données récupérées proviennent de la DITTT, et les images aériennes anciennes constitueront la base de notre étude tandis que les autres données nous serviront à rectifier ces images pour les rendre exploitables.

2.1.1 Photographies aériennes

Le géoportail de la Nouvelle-Calédonie, appelé « Georep »³, contient un très grand nombre d'informations géographiques sur l'archipel. Comme son homologue métropolitain, il est possible d'y télécharger librement des photos de campagnes aériennes anciennes réalisées sur le territoire. Ce sont ces images (argentiques numérisés) qui serviront de support à la digitalisation des bandes actives. Au total 9 campagnes couvrant le bassin de la Thio et/ou de la Tôdré ont été obtenues et parmi lesquelles se trouve la campagne de 2007-2008 qui nous a été fournie directement orthorectifiée par la DITTT. Ces orthophotos couvrant toute la zone d'étude nous serviront de référence aux traitements ; elles ont été prises en 2007 dans le bassin versant de la Tôdré et en 2008 dans le bassin versant de la Thio, et sont fournies en couleur avec une résolution de 50 cm. Pour les autres campagnes, leurs caractéristiques ont été renseignées dans le **tableau 1**.

³ Il est à noter qu'entre 1 h et 3 h du matin en heure locale (soit entre 15 h et 17 h ou 16 h et 18 h l'été en heures métropolitaines) les serveurs du Georep sont éteints et il est impossible d'utiliser l'application.

Années	Zone couverte	Couleur (C) ou panchromatique (P)	Taille du pixel au sol (m)	Recouvrement au sol pour une photo (km ²)	Organisme ayant réalisé les levés	Type de levé photo-grammétrique	Focale (mm)	Altitude de vol (m)	Type de caméra	Jour de prise de vue
1998	Tôdré (partiel)	P	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	152,53			
1995	Tôdré	C	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	151,93			
1989	Thio	C	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	151,93			
1985	Thio et Tôdré	P	≈ 3	≈ 95	IGN	stéréo	151,83	6120	15.UAG.104 1	25/10 2/12
1976	Thio et Tôdré	P	≈ 1,5	≈ 25	IGN	stéréo	153,23	3040	15.UAG.602 3	entre le 14/9 et le 24/11
1971	Thio et Tôdré	P	≈ 1	≈ 5	IGN	stéréo	152,70	1520	15.UAG.454	30/8 21/9 10/10
1954	Thio et Tôdré	P	≈ 3	≈ 50	IGN	stéréo	125	5000		4/6 25/7 24/9
1943	Thio et Tôdré (partiel)	P	≈ 3	≈ 50	US Navy	tri-stéréo				

Tableau 1 : Caractéristiques des prises de vues aériennes

Les cellules grisées indiquent que les informations qu'elles contiennent n'ont été obtenues qu'après réalisation des traitements et qu'elles n'ont donc pas pu être prises en compte dans les calculs. Les cellules barrées signifient qu'aucune information n'a pu être obtenue.

Les photos téléchargeables se trouvent au format JPEG et ne contiennent aucune métadonnée. Sur certaines campagnes, il est cependant possible de lire sur le cadre des clichés argentiques la focale utilisée, mais aucune information sur la date de la prise de vue aérienne (PVA) n'est lisible. Cette donnée aurait beaucoup aidé lors des traitements car il s'avèrera que les campagnes se déroulent parfois sur plusieurs jours espacés de plusieurs semaines. Or la numérotation des clichés sur une même campagne reste continue, même si le jour de la PVA a changé. Le manque de cette information aura un impact sur les résultats des traitements photogrammétriques et sera abordé postérieurement.

Aussi la campagne de 1943 a été réalisée en tri-stéréophotogrammétrie (avec 2 clichés obliques et 1 cliché vertical pour chaque prise de vue), contrairement aux autres campagnes photogrammétriques exécutées par stéréophotogrammétrie (clichés verticaux avec des recouvrements longitudinaux et transversaux entre les clichés).

Concernant la taille du pixel au sol dans le bassin versant de la Thio, elle a été calculée en prenant comme référence le toit d'un hangar situé dans la plaine au niveau du delta et dont la longueur a été déterminée grâce à l'orthophoto de 2007/2008. Dans le bassin versant de la Tôdré, c'est une portion de route qui a servi de référence. Ces zones ayant servi à déterminer la taille de pixel au sol se situent dans des endroits les plus bas des bassins, et donc la taille du pixel au sol qui y a été déterminée est des plus conséquentes sur les images.

Pour obtenir les métadonnées, nous avons dans un premier temps contacté les services du Georep ainsi que ceux du cadastre de la Nouvelle-Calédonie, qui nous ont répondu qu'ils ne disposaient pas de ces informations.

Nous avons donc dans un second temps contacté l'IGN qui nous a fourni les métadonnées relatives aux campagnes réalisées par ses équipes en 1985, 1976, 1971 et 1954 (focales, altitudes de vol et dates de PVA) ainsi que les fiches de calibration des caméras (coordonnées du point principal d'autocollimation et des repères de fond de chambre ainsi que les paramètres de distorsion). Concernant l'entreprise sous l'acronyme « SPP », il semblerait qu'il s'agisse d'une société privée Australienne mais à l'heure de la rédaction de ce rapport cette société n'existerait plus, et il paraît difficile d'obtenir ces métadonnées. Enfin pour les données relatives à la campagne de 1943 réalisée par l'US NAVY nous n'avons pas contacté ces services, d'une part parce qu'il paraît évident que les échanges risquent de prendre un certain temps, et d'autre part parce que ces informations ne s'avèrent finalement pas essentielles pour la méthode de traitement photo qui en sera faite.

2.1.2 Données altimétriques

➤ MNT et MNS issus d'un levé LiDAR

En Juin 2012, un levé LiDAR (Light Detection And Ranging) aéroporté commandité par les collectivités locales, la province Sud et le gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, a été réalisé par une société australienne en collaboration avec une entreprise calédonienne. Son objectif premier étant d'obtenir un nuage de points avec une résolution minimale de 2 m pour modéliser en 3D les zones potentiellement inondables.

Le principe du LiDAR aéroporté est d'évaluer pour une position (X,Y) fournie par un GPS embarqué sur une plateforme (avion, hélicoptère, drone, ...), la distance séparant la plateforme du sol grâce à la mesure du temps de retour de l'impulsion d'un rayon LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). La longueur d'onde du rayon laser est souvent comprise dans le proche infrarouge entre 1000 et 1500 nanomètres, et le laser est généralement émis par un système de balayage pouvant couvrir un angle allant jusqu'à 75° de part et d'autre de la verticale (De Joinville *et al*, 2003). Ayant la connaissance de l'altitude de la plateforme et de son inclinaison grâce à une centrale inertielle, il est alors possible de déterminer en chaque point (X,Y) son altitude sur Terre correspondante. L'une des caractéristiques principales du LASER est qu'il est renvoyé sous forme d'écho multiple se divisant généralement en deux parties : une partie est réfléchiée par un objet en sursol (végétation, constructions, ...) et la seconde par le sol. Le résultat final est un nuage de points qui, selon les applications, devra subir des traitements automatiques et/ou manuels afin de distinguer les points au sol des points de sursol. L'ensemble des points au sol formeront le modèle numérique de terrain (MNT) tandis que l'ensemble des points de sursol formeront le modèle numérique d'élévation (MNE). Le modèle numérique de surface (MNS) correspondra quant à lui à la différence du MNE et du MNT. La précision de tels levés, cumulant les imprécisions du GPS embarqué, de la centrale inertielle et du distancemètre, est d'environ 10 cm en altimétrie pour 40 cm en planimétrie (Mallet, 2010).

Le levé de 2012 a été réalisé à une altitude moyenne de 800 m produisant une densité d'environ 4 pts/m². Le nuage a ensuite subi un premier traitement automatique afin de distinguer les points au sol des points de sursol, puis un traitement manuel a permis d'affiner cette classification.

La précision annoncée pour cette donnée correspondrait à « la précision requise pour les levés traditionnels au 1:500 » (bulletin de la Géomatique en Nouvelle-Calédonie n° 31, 2012), et bien que cette précision semble un peu surestimée, elle s'avère compatible avec la précision attendue à l'issue des traitements à la vue de la taille de pixel de nos images.

C'est la Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales de la Nouvelle-Calédonie (DAVAR) qui a fourni l'ensemble des données relatives au levé LIDAR sur la zone de la Thio, comprenant le nuage des points au sol et le nuage complet ainsi que le MNT et le MNS sous forme de raster à 1 m de résolution. Cette résolution d'1 m semble plus compatible avec le type de levé réalisé, et on considèrera que la précision en altimétrie est également de 1 m.

L'emprise du levé LIDAR réalisé à Thio (**figure 9**) ne couvre pas l'ensemble de la zone d'étude mais uniquement la rivière de la Thio sur une longueur d'environ 13.5 km pour une largeur d'environ 2.5 km. Les points de calage nécessaires aux traitements photogrammétriques seront donc limités à l'emprise de ces données altimétriques.

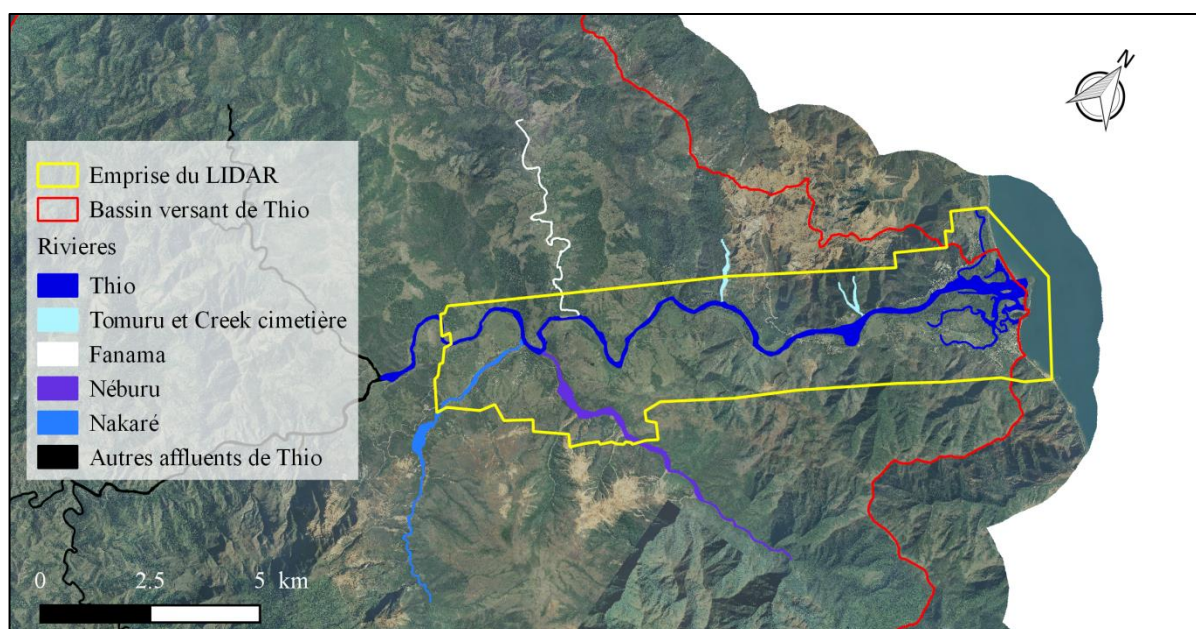


Figure 9 : Emprise du levé LiDAR (source : DITTT modifié)

Le levé LiDAR recouvre une partie centrée sur la Thio et la zone d'étude pour le bassin de Thio est donc restreinte à cette zone.

➤ MNT de la Base de Données Topographiques

En plus de ces données LiDAR, nous disposons du MNT en couche raster à une résolution de 10 m couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Ce MNT a été généré principalement à partir des données topographiques de la DITTT et sa précision en altitude est estimée à ± 2 m, avec des écarts pouvant avoisiner les 10 m sur certains sommets ou zones de relief très accidenté (Boyeau & Juffroy, 2012).

Pour réaliser les traitements nous avons choisi d'utiliser uniquement les données du LiDAR, plus précises que le MNT à 10 m, et nous limiterons donc notre zone d'étude à l'emprise du levé.

2.1.3 Données vectorielles

La DITTT nous a également fourni les données vectorielles de sa BD TOPO®, et notamment la couche des routes qui permettra un premier contrôle sur la précision de rectification et géoréférencement des images. Cette couche nous permettra en effet de voir que si les routes visibles sur les photos rectifiées ne collent pas à cette couche vectorielle, alors il sera nécessaire de relancer les traitements sans même avoir à effectuer un contrôle plus poussé.

2.2 Les outils de traitement

Avec toutes ces données récupérées il convient ensuite de déterminer le ou les outils les plus adaptés pour tirer de ces images un maximum d'informations pertinentes pour notre étude.

2.2.1 Stéréophotogrammétrie

Le principe général de la stéréophotogrammétrie est de percevoir le relief d'une scène à partir d'un couple de photos, ou « couple stéréoscopique », portant sur cette même scène vue sous deux angles différents. La photogrammétrie permet alors – par appariement de points homologues (vus sur les 2 images) et en renseignant des points connus en X, Y et Z sur le terrain - de créer des nuages de points 3D ainsi que des orthophotos géoréférencées. Une orthophoto est une photo ayant été corrigée des déformations dues au relief, à l'inclinaison de l'axe de PVA et à la distorsion optique ; ces éléments étant corrigés respectivement par un MNT ou MNS, la fonction de localisation de l'image (ou formule d'image) et le certificat d'étalonnage.

➤ Historique

Des années 1900 à 1960 la stéréophotogrammétrie était effectuée par des machines optico-mécaniques, on parlait alors de restitution analogique. Puis, les années 1960 ont vu arriver la photogrammétrie analytique, qui se réalisait à l'aide de systèmes optico-mécano-numériques et qui mettait en place une modélisation mathématique de la géométrie de prise de vue. Dans le cas de la photogrammétrie analogique et analytique, la stéréovision était requise aux différentes étapes de traitement, et les images étaient traitées couple par couple. Puis avec les développements de l'informatique, tous les traitements sont alors devenus numériques et la stéréovision optionnelle. Différentes méthodes de traitement ont alors été développées parmi lesquelles se trouve la photogrammétrie numérique classique dont la chaîne de traitement est la même que pour la photogrammétrie analogique et analytique, à la différence que toutes les manipulations et les calculs sont réalisés numériquement.

Puis est arrivée la photogrammétrie multi-vue permettant d'accélérer les traitements en réduisant le nombre de points de calage nécessaires, grâce à l'aérotriangulation et la méthode de calcul par compensation des faisceaux. Enfin la technique la plus moderne est la photogrammétrie rapprochée qui permet également un traitement par bloc avec l'aérotriangulation, mais qui permet également de se passer de l'étape d'orientation interne des images et de l'obligation du parallélisme des axes de prise de vue.

Il se détache ainsi 2 grandes « écoles » dans la photogrammétrie : la photogrammétrie classique qui nécessite que les axes des prises de vues soient parallèles et qui impose de travailler avec une caméra calibrée (connaissance des paramètres internes de la caméra), et la photogrammétrie rapprochée pour laquelle l'utilisateur peut se passer de cette connaissance et dont le parallélisme des axes de prises de vues n'est plus une obligation.

➤ **Photogrammétrie classique**

- **Principes de la photogrammétrie analogique, analytique et numérique classique**

Parmi les méthodes de photogrammétrie classique se trouvent les photogrammétries analogique, analytique et numérique classique dont la chaîne de traitements est la suivante :

- une **orientation interne** pour chacun des clichés, permettant de corriger les déformations de l'image et de lier les coordonnées « fond de chambre » (en mm) aux coordonnées « image » (en pixels) de la photo.
- une **orientation relative** consistant à replacer les clichés dans la même position que lors de la prise de vue. Pour ce faire, un des deux clichés sera réorienté par rapport à l'autre, c'est pourquoi on parle d'orientation relative.
- une **orientation absolue** permettant de passer les deux clichés du repère « modèle » au repère terrain.

Ces méthodes fonctionnant par couples d'images, elles nécessitent donc que les opérations soient réitérées sur chaque couple, et les temps de traitements peuvent alors rapidement devenir très importants dès lors que la zone d'étude est étendue.

- **Principes de la photogrammétrie multi-vue**

La photogrammétrie multi-vue permet de traiter l'ensemble des couples stéréoscopiques en un bloc grâce à l'aérotriangulation. Cette dernière consiste à déterminer pour chaque photo la position exacte de la caméra au moment de la prise de vue aérienne grâce à un nombre réduit de points de calage connus sur le terrain. A l'aide de cette position, l'orientation des images pourra être déterminée et le modèle stéréoscopique créé.

Très adaptée aux données à notre disposition, cette méthode nous aurait permis d'obtenir un nuage de points et une orthophoto avec la meilleure précision possible ; cependant elle n'a pas été choisie pour ce projet, car nous ne disposons pas encore des paramètres de calibration des caméras au moment des traitements.

➤ Photogrammétrie rapprochée

Cette autre méthode de restitution, qui est utilisée dans tous les logiciels modernes de photogrammétrie - comme Photoscan© d'Agisoft - permet de traiter un ensemble d'images numériques d'un seul bloc par aérotriangulation. Aussi, les photos étant obtenues par des capteurs numériques il n'est plus nécessaire de réaliser une orientation interne puisque la photo est directement dans le repère « image » en pixels. L'autre gros avantage de cette méthode pour notre projet est qu'il n'est plus nécessaire d'avoir la connaissance des paramètres internes de la caméra.

Cette méthode, également appelée SfM-MVS pour Structure from Motion – Multi View Stereo (Javernick *et al*, 2014), a suscité l'intérêt dans de nombreux domaines autres que ceux de la topographie. Les géomorphologues se sont notamment intéressés à cette méthode car elle nécessite peu de matériel et présente un faible coût de mise en œuvre. Ainsi de nombreuses études sur l'analyse historique de l'évolution géomorphologique des rivières se sont basées sur cette méthode pour produire des données exploitables (Ioana-Toroimac *et al*, 2010, Depret, 2014, Frankl *et al*, 2015)

La méthode SfM-MVS semble donc plus adaptée pour le traitement de nos données car seules les photos brutes sont disponibles sans aucune métadonnée (mis à part la focale pour certaines campagnes). C'est donc cette méthode qui a été choisie, avec le logiciel Photoscan© dont l'IRSTEA est équipé.

2.2.2 Géorectification

Les traitements photogrammétriques d'orthorectification imposent d'avoir des points de calage (X,Y,Z) connus dans le système de référence, il n'est donc pas possible de traiter les photos sur la Tôdré par cette technique puisque nous ne disposons pas de donnée altimétrique suffisamment précise sur cette zone. Ainsi nous avons décidé de les traiter en réalisant un géoréférencement d'image sous le logiciel QGIS©.

Pour cela, ce procédé nécessite d'avoir une donnée planimétrique de référence – l'orthophoto de 2007-2008 dans notre cas – et de pouvoir identifier des points communs entre le cliché à géoréférencer et la référence avant de lancer les traitements.

- **Transformation de l'image**

Différents algorithmes permettent le géoréférencement de l'image, avec déformation ou non du cliché :

- La **transformation linéaire** qui consiste à réaliser une translation et un changement d'échelle ; elle ne déforme pas le cliché. Cette technique n'est semble-t-il pas suffisante pour le traitement de nos photos.

- La **transformation Helmert** qui consiste à réaliser à la fois une translation, une rotation et une homothétie ; il s'agit d'une transformation polynomiale d'ordre 1. Cette méthode ne déforme pas l'image et ne permet donc pas corriger les distorsions de l'image (distorsion optique et déformations dues à la numérisation des photos).

- Les **transformations polynomiales** de degré 2 et 3 qui permettent en plus de déformer le cliché (selon une forme parabolique ou cubique). Cette technique est adaptée à nos données.
- La **transformation Thin Plate Spline (TPS)** qui permet de prendre en compte les déformations locales, il est donc nécessaire pour cette méthode d'avoir un plus grand nombre de points afin d'avoir un bon rendu global. Cette méthode convient également à nos données.
- La **transformation projective** qui déforme le parallélisme des lignes de l'image. Cette méthode est plutôt adaptée aux images obliques et ne convient pas dans notre cas.

Pour notre projet, les transformations polynomiales de degré 2 ou 3 et la transformation TPS seraient les plus adaptées. Il a cependant été démontré que - à condition d'avoir un nombre suffisant de points - la méthode TPS s'avérerait être celle qui permet d'obtenir une meilleure qualité de géoréférencement (Bakkouch *et al*, 2015).

• Rééchantillonnage

Dans le cas des transformations polynomiales d'ordre 2 et 3, de la transformation Thin Plate Spline ou de la transformation projective, l'image à géoréférencer est déformée et la taille des pixels est variable sur l'image. Il convient alors de la rééchantillonner et plusieurs modes d'échantillonnage sont possibles :

- **Plus proche voisin**, qui consiste à attribuer au pixel de la nouvelle image la valeur du pixel de l'ancienne image le plus proche. Cette méthode permet de garder la texturation de l'image origine sans créer de nouvelles valeurs.
- **Linéaire**, qui attribue au nouveau pixel la moyenne des 4 pixels les plus proches sur l'ancienne image et qui crée donc un lissage de l'image.
- **Cubique**, dont la valeur du nouveau pixel est déterminée à partir des 16 pixels les plus proches. Le lissage de l'image est encore plus prononcé avec cette méthode.

Pour l'interprétation fluviale que nous voulons réaliser il semblerait que le rééchantillonnage cubique soit le plus adapté car il permet de lisser les bords irréguliers le long de frontières linéaires et ainsi de mieux identifier les limites de bandes actives. (Hughes *et al*, 2006)

2.2.3 Langages de programmation

Au cours du stage réalisé à l'IRSTEA, une formation au langage de programmation R a été proposée. Il s'est avéré que l'obtention de graphiques sur R était relativement simple et que ce langage offrait des rendus très intéressants visuellement, c'est pourquoi le logiciel R Studio sera utilisé pour réaliser l'ensemble des graphiques relatifs aux contrôles des traitements sur les photos et à l'exploitation des données extraites sur les largeurs de bandes actives digitalisées.

2.3 Réalisation des traitements

L'obtention d'orthophotos ou de photos géorectifiées vont nous permettre de digitaliser les bandes actives des cours d'eau à chaque époque et de les comparer entre elles ; or ayant des données altimétrique sur la Thio grâce au levé LiDAR - en plus des informations planimétriques fournies par l'orthophoto de 2007/2008 - nous avons décidé de traiter les photos de cette zone par stéréophotogrammétrie.

Avec une donnée altimétrique de référence - issue du levé LiDAR - d'une précision d'environ 1 m, ainsi qu'une donnée planimétrique de référence issue de l'orthophoto de 2007/2008 d'une résolution de 50 cm, et à la vue de la taille des pixels au sol des images à traiter - dont la taille maximal est évaluée à 3 m - nous nous fixons comme objectif d'obtenir une précision de rectification des images aériennes en dessous de 5 m dans l'idéal.

2.3.1 Orthorectification des images

Les campagnes aériennes réalisées dans le bassin versant de Thio ont donc été traitées à l'aide du logiciel Photoscan©. Bien que nous ne pouvions disposer que de points de calage situés dans l'emprise du LiDAR, nous avons décidé d'ajouter des photos pour étendre la zone de traitement afin d'avoir une orthophoto couvrant les zones d'intérêt (mines du plateau de Thio et Bornet, rivières de Thio, Fanama, Tomuru, Néburu et Nakaré), en ayant conscience que cet ajout aura un impact sur la précision de l'orthophoto et en sachant qu'en dehors de l'emprise du LiDAR les imprécisions seront plus importantes.

Aussi toutes les campagnes ont été référencées par rapport à l'orthophoto de 2007-2008 afin de ne pas transmettre les imprécisions d'une campagne à la suivante et ce, même s'il s'avérait parfois complexe de trouver des éléments communs à l'orthophoto de référence et aux plus vieilles campagnes.

Avant de lancer les traitements il a été nécessaire de créer des masques sur les cadres des argentiques scannés ainsi qu'au niveau des nuages afin que ces zones ne soient pas prises en compte lors des calculs et lorsqu'elle était inscrite sur les clichés, la focale a été renseignée dans le logiciel.

Pour le choix des cibles, les points en coin et aux bords tranchants tels que les toits de bâtiments ou angles de trottoirs ont été privilégiés car ils sont plus évidents à identifier et à pointer sur les photos, on parle de point « dur » (Hughes *et al*, 2006). Seulement ces points se situent majoritairement en zones d'habitations concentrées au niveau du delta de la Thio et il devient rare d'en trouver en remontant la Thio. Il a donc fallu utiliser des points de calage se trouvant sur des bords irréguliers comme des rochers, des arbres ou des intersections de chemins, on parle de point « léger » (Hughes *et al*, 2006). Ainsi le nombre de points durs sur chaque campagne est largement inférieur au nombre de points légers (**tableau 2**).

Années	Zone traitée	Recouvrement pour une image (km ²)	Nombre de photos traitées	Nombre de photos dans l'emprise du levé LiDAR	Nombre de points de calage	
					Points durs	Points légers
1989	Thio	≈ 25	28	15	5	11
1985		≈ 95	18	10	2	8
1976		≈ 25	53	24	2	7
1971		≈ 5	99	48	4	6
1954	Thio partiel	≈ 50	12	6	2	4

Tableau 2 : Informations relatives aux traitements sur Photoscan©

Pour chaque campagne, environ la moitié des photos se situe dans l'emprise du LiDAR et le nombre de points légers est bien plus important que le nombre de points durs pour toutes les campagnes.

La campagne de 1971 présente un nombre particulièrement important de photos car le recouvrement au sol de chaque image est très faible, tandis que pour la campagne de 1954 très peu d'images sont nécessaires aux traitements du fait de leur fort recouvrement. Concernant la campagne de 1954, nous avons traité au départ 61 photos couvrant toute la zone à étudier, mais l'imprécision sur l'orthophoto résultante dépassait largement le seuil des 5 m, nous avons donc réduit au maximum les photos et écarté celles qui se situaient au niveau du delta car les erreurs y étaient maximales. Si nous avions eu la connaissance des dates de prises de vues pour cette campagne - de même que pour toutes les autres - nous aurions pu classer les images par date de prise de vue et sélectionner uniquement celles qui ont été prises sur une même journée, ce qui nous aurait permis d'améliorer la qualité de nos traitements. À l'issue des traitements, des orthophotos à 1 m de résolution ont été exportés, ainsi que les nuages de points issus des calculs. Concernant l'orthophoto de chaque campagne, plusieurs exports avec différentes méthodes de texturation ont été réalisés car il s'avérera lors de la digitalisation que l'identification de la bande active est plus nette sur l'une ou l'autre des méthodes.

2.3.2 Géorectification des images

Les photos relatives à la partie manquante sur la Thio en 1954 ont été traitées sur QGIS©, de même que toutes les photos sur la Tôdré. Aussi la campagne de 1943 sur la Thio réalisée en tri-stéréophotogrammétrie n'a pas pu être traitée sur Photoscan© car ce logiciel ne permet pas de gérer de telles données, et les clichés verticaux ont donc été géorectifiés sur QGIS© (**tableau 3**).

Pour la géorectification de ces images, nous avons utilisé la méthode TPS en choisissant un maximum de points de calage les plus proches du cours d'eau (à environ 100 m), et c'est le rééchantillonnage cubique qui a été utilisé pour les raisons précédemment évoquées, avec une résolution d'1 m.

Années	Zone traitée	Nombre de photos traitées	Nombre de points de calage par photo	
			Points durs	Points légers
1998	Tôdré partiel	2	.	≈ 14
1995	Tôdré	4	.	≈ 12
1985		2	.	≈ 18
1976		4	.	≈ 14
1971		6	.	≈ 10
1954	Thio partiel	1	4	9
	Tôdré partiel	4	.	≈ 10
1943	Thio partiel	1	.	29
	Tôdré partiel	1	.	17

Tableau 3 : Informations relatives aux traitements sur QGIS©

En moyenne 2 à 4 photos sont traitées par campagne et les points de calage sont quasiment tous des points légers puisque le bassin de la Tôdré n’abrite aucune habitation, même sur les dates les plus récentes.

2.3.3 Éléments de contrôle

Une fois les traitements réalisés et les images rectifiées importées dans le SIG, des points de contrôles - visibles à la fois sur l’orthophoto de 2007/2008 et sur chaque image à contrôler - ont été placés afin d’évaluer la qualité des traitements. Concernant le bassin de la Thio, les points de contrôle ont été placés - dans un premier temps - uniquement à l’intérieur de l’emprise du LiDAR, puis lorsqu’il a été décidé d’étendre les digitalisations en dehors de cette zone, de nouveaux contrôles ont été implantés autour des nouvelles digitalisations. Pour chaque époque, une trentaine de points a été placée sur les orthophotos dans l’emprise du LiDAR contre une douzaine en dehors de l’emprise, et enfin sur les campagnes géorectifiées sur la Tôdré c’est entre 5 et 10 points qui ont été placés (**figure 10**).

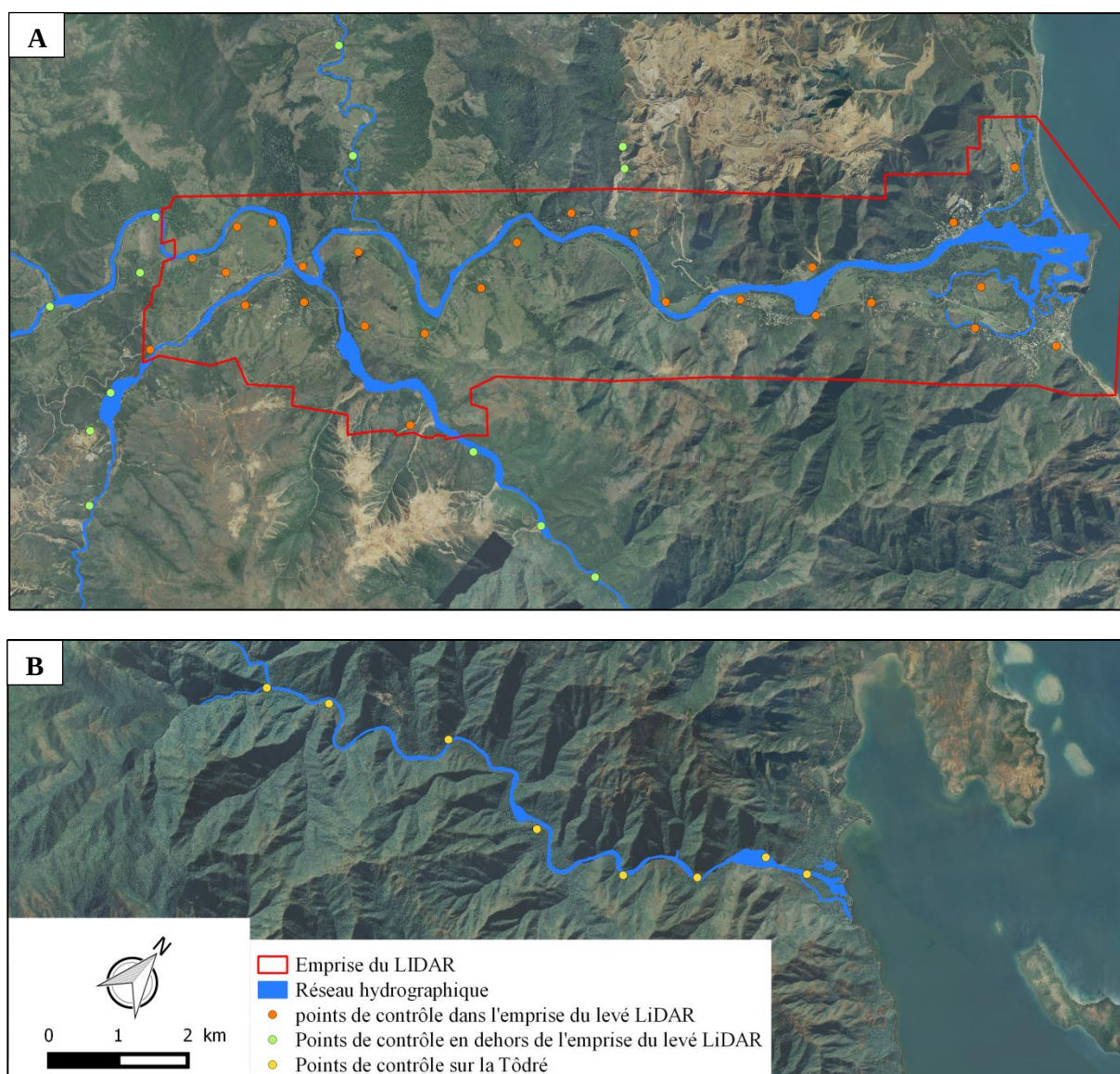


Figure 10 : Position des points de contrôle de la campagne de 1985 dans le bassin versant de la Thio (A) et dans le bassin versant de la Tôdré (B) (source : DITTT modifié)

Les points de contrôle ont été implantés au plus proche des cours d'eau à étudier et un nombre relativement important de points a été fixé pour pouvoir réaliser une analyse statistique des écarts planimétriques.

2.3.4 Digitalisation des bandes actives

Les bandes actives ont ensuite pu être digitalisées sur l'ensemble des cours d'eau à étudier. Pour garder un même niveau de détail, il a été décidé de digitaliser les bandes actives de chaque campagne à l'échelle du 1:1500 car cette échelle offrait le meilleur confort visuel avec une précision assez fine pour digitaliser.

Aussi, sachant que nous cherchons à extraire les largeurs des bandes actives - comprenant donc le chenal en eau et les bancs alluviaux non végétalisés - il convenait également de digitaliser les îlots végétalisés afin qu'ils ne soient pas pris en compte lors du calcul de ces largeurs.

Ont ainsi été digitalisées la rivière d'étude (la Thio) sur tout son linéaire - soit environ 20 km - ainsi que la rivière témoin (la Tôdré) sur un linéaire d'environ 9 km. Aussi, du fait de leur surengrèvement et que les dynamiques de la Thio sont très probablement liées à celles-ci, les rivières de la Nakaré sur un linéaire d'environ 8 km, de la Néburu sur presque 10 km, et de la Tomuru sur moins d'1 km ont également été digitalisées. Enfin la rivière de la Fanama a été digitalisée sur environ 7 km car elle ne semble pas impactée par le surengrèvement et elle pourrait donc servir de seconde rivière témoin en plus de la Tôdré.

2.3.5 Extraction des largeurs des bandes actives

Pour extraire les largeurs des bandes actives digitalisées, c'est l'outil *fluvial corridor*⁴ (Roux *et al*, 2015) qui a été utilisée. Cet outil consiste à créer la ligne médiane d'une bande active de référence – soit celle de 2007/2008 dans notre cas – puis à générer le long de cette ligne des points espacés d'une distance préalablement paramétrée – soit tous les 50 m dans notre étude – pour ensuite attribuer à ces points la largeur de bande active correspondante pour chacune des époques.

Le fichier en sortie est un fichier Shapefile des points de la ligne médiane et dont les informations sont les suivantes :

- numéro du point
- distance linéaire par rapport au point de référence 0
- largeur de bande active pour chaque époque

Aussi des colonnes ont été ajoutées à ce fichier afin de calculer entre chaque époque successive les différences de largeurs de bande active, en soustrayant à la largeur de bande active de l'époque N celle de l'époque N-1. Ainsi une valeur négative dans cette colonne indiquerait qu'un phénomène de rétraction de la bande active a eu lieu au cours du temps, et à l'inverse une valeur positive indiquerait un élargissement de la bande active.

⁴ Boîte à outils téléchargeable sur le site : <http://www.sedalp.eu/download/tools.shtml>

2.3.6 Création de graphes à partir des données de largeurs des bandes actives

Après avoir extrait les largeurs de bande active des rivières aux différentes époques, deux analyses en ont été faites : une première analyse statistique de la répartition des largeurs des rivières à chaque époque, puis une analyse géographique de l'évolution des largeurs entre époques successives.

➤ Diagrammes en boîtes des largeurs

Pour chacun des cours d'eau dont la bande active a été digitalisée (Thio, Nakaré, Néburu, Tomuru, Fanama et Tôdré), des diagrammes en boîtes ont été réalisés sous R à chaque époque. Le paramétrage de ces diagrammes en boîtes (ou boxplots) est détaillé sur la **figure 11** :

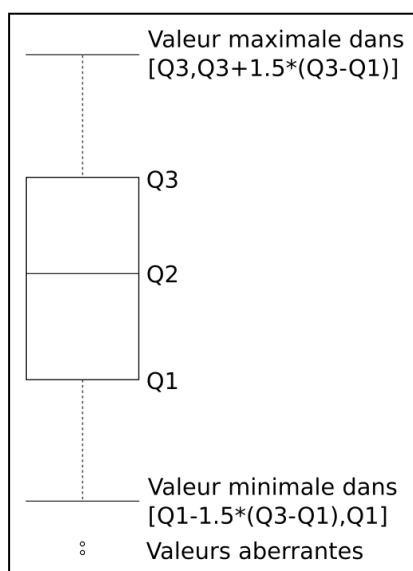


Figure 11 : Paramètres des boxplots créés sous R

Les seuils Q1 et Q3 correspondent aux 1^{er} et 3^{ème} quartiles, et Q2 correspond à la médiane. Concernant la valeur encadrante maximale, il s'agit de la valeur dans le jeu de données qui est directement inférieure au seuil $Q3+1.5*(Q3-Q1)$, et pour la valeur encadrante minimale il s'agit de la valeur directement supérieure au seuil $Q1-1.5*(Q3-Q1)$. Les valeurs aberrantes sont toutes les valeurs qui sortent de l'intervalle formé par les valeurs encadrantes minimales et maximales.

Ces boxplots seront également utilisés pour l'analyse des écarts planimétriques issus des points de contrôle sur les images aériennes rectifiées.

➤ Diagrammes des évolutions de largeur

En plus des boxplots sur les largeurs de bandes actives des cours d'eau à chaque époque, nous avons réalisé des diagrammes sous R à partir des différences de largeurs de bandes actives entre époques successives afin de pouvoir localiser spatialement les zones de rétraction et d'élargissement des bandes actives des cours d'eau.

Aussi nous avons ajouté à ces graphes des rectangles grisés pour signifier l'imprécision sur la détermination des différences de largeurs, liée à l'imprécision sur la rectification des images et sur la digitalisation des bandes actives. La détermination de la valeur de ces imprécisions est détaillée ci-dessous.

- La différence de largeur de bande active ΔL entre deux époques successives est définie ainsi :

$$\Delta L = L1 - L2 \quad \text{où } L1 \text{ est la largeur de bande active à l'époque } N \text{ et } L2 \text{ celle de l'époque } N-1$$

- L'imprécision σ_{dL} sur ΔL est donc la suivante :

$$\sigma_{dL} = \sqrt{(\sigma_{L1})^2 + (\sigma_{L2})^2} \quad \text{où } \sigma_{L1} \text{ est l'imprécision sur bande active à l'époque } N \text{ et } \sigma_{L2} \text{ l'imprécision sur la bande active à l'époque } N-1$$

- Or les imprécisions σ_{L1} et σ_{L2} dépendent de l'imprécision de géoréférencement de l'image σ_{ref} à l'époque correspondante ainsi que de l'imprécision σ_{dig} relative à la digitalisation :

$$\sigma_{Li} = \sqrt{(\sigma_{refi})^2 + (\sigma_{dig})^2} \quad \text{où } \sigma_{Li} \text{ est l'imprécision sur la bande active à l'époque } i, \text{ } \sigma_{refi} \text{ l'imprécision sur le géoréférencement de l'image à l'époque } i \text{ et } \sigma_{dig} \text{ l'imprécision sur la détermination de la bande active}$$

- L'imprécision σ_{dL} sur ΔL devient alors :

$$\sigma_{dL} = \sqrt{(\sigma_{ref1})^2 + (\sigma_{ref2})^2 + 2 * (\sigma_{dig})^2}$$

L'imprécision sur la tendance d'évolution entre deux époques successives est donc de $\pm \sigma_{dL}$.

3 Résultats et discussions

Une fois les rectifications sur les images effectuées, des contrôles ont été réalisés pour s'assurer qu'elles soient bien exploitables pour notre étude. Puis après avoir estimé les précisions sur ces images, les analyses sur les largeurs des bandes actives ont pu être faites.

3.1 Contrôle des traitements sur les images

3.1.1 Contrôles planimétriques

Comme énoncé précédemment des jeux de points de contrôle ont été placés dans le SIG afin de contrôler la qualité des traitements réalisés sur les images anciennes. Ces contrôles ont été faits sur les photos géorectifiées à partir de QGIS© (**figure 13**) ainsi que pour chaque orthophoto du bassin de la Thio (**figure 12**) en distinguant les points situés dans l'emprise du LiDAR (**figure 12A**) de ceux situés en dehors de cette zone (**figure 12B**).

Les écarts ont été rassemblés dans des diagrammes en boîte dont le paramétrage a été présenté dans la partie 2.3.6 (**figure 11**).

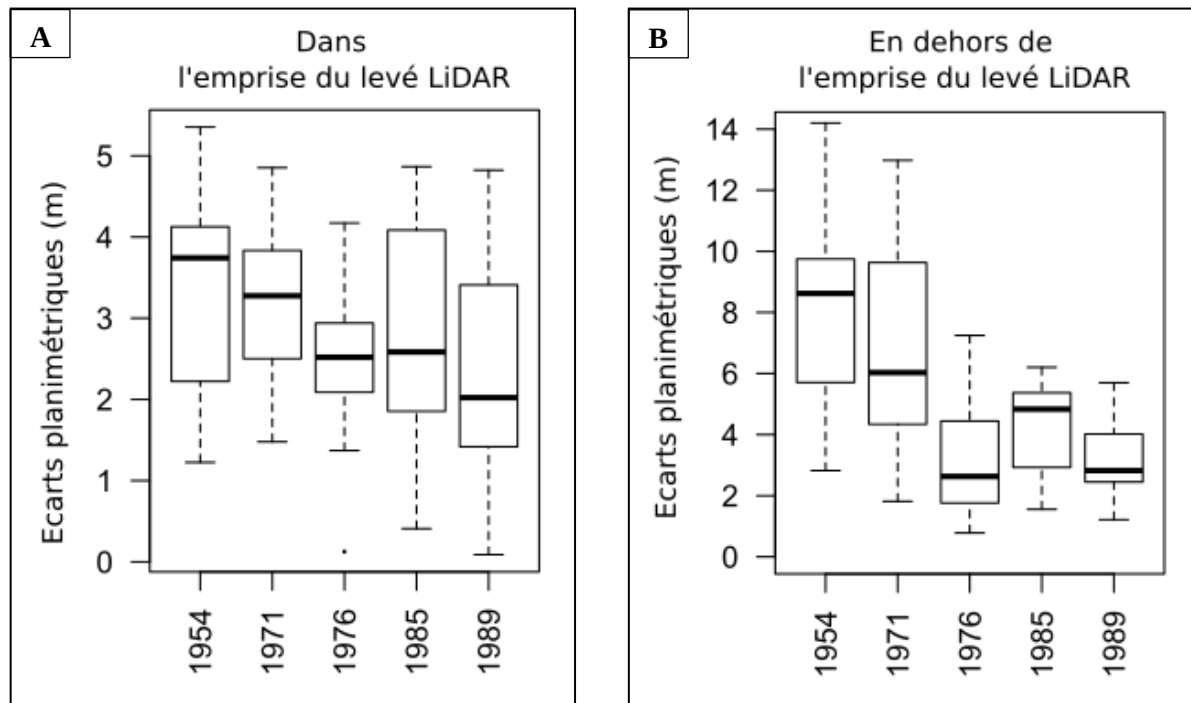


Figure 12 : Boxplots des écarts planimétriques sur les images orthorectifiées

À l'intérieur de l'emprise du LiDAR (**figure 12A**), les écarts sont en majorité inférieurs à 5 m tandis qu'en dehors de cette zone (**figure 12B**) ils doublent en moyenne. Aussi plus la campagne est ancienne et plus l'imprécision augmente ce qui peut s'expliquer par le fait que moins de points de calage ont pu être identifiés lors des traitements. On note aussi pour toutes les campagnes une distribution des écarts relativement importante, entre 1 m et 2 m pour les points dans l'emprise du LiDAR contre 3 à 5 m en dehors de l'emprise, ce qui est très probablement dû aux points « légers » dont la détermination reste plus approximative que celle de points « durs ».

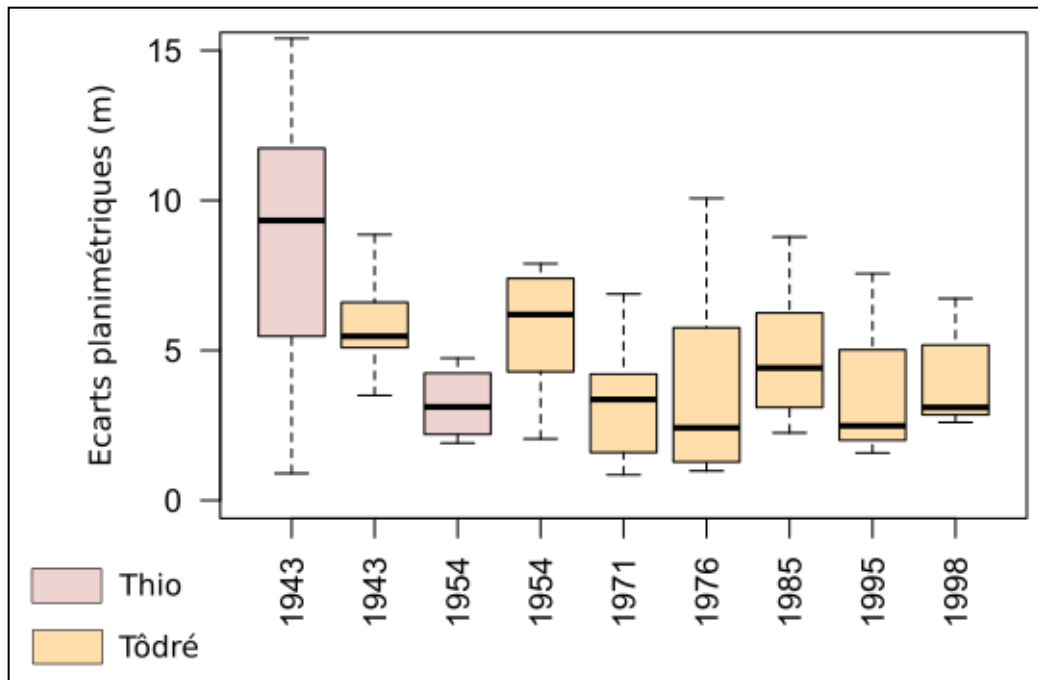


Figure 13 : Boxplots des écarts planimétriques sur les images géorectifiées

Les écarts planimétriques moyens sur les images géorectifiées sur QGIS© (**figure 13**) sont compris entre 3 et 6 m sauf pour la campagne de 1943 réalisée sur la Thio dont l'écart moyen avoisine les 10 m.

Concernant la détermination de la largeur de la bande d'imprécision sur le calcul de la différence de largeur de bande active, ce sont les écarts planimétriques moyens des images rectifiées qui constitueront l'erreur σ_{ref} présentée dans la partie 2.3.6. Aussi, ayant rééchantillonné les photos à 1 m de résolution nous estimons la précision sur la digitalisation à ± 5 pixels soit ± 5 m, et les calculs pour la détermination de l'erreur sur la différence de largeur de bande active est détaillée dans l'**annexe 2**.

3.1.2 Contrôle qualitatif

➤ Influence des modes de texturation

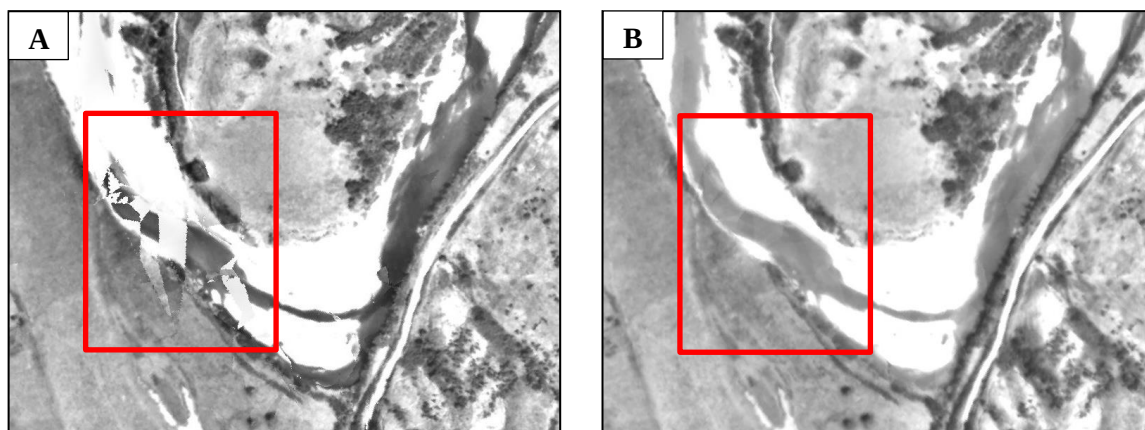


Figure 14 : Orthoimages de 1976 avec un mode de texturation en mosaïque (A) et moyen (B)

Si la texturation en mosaïque (**figure 14A**) présente l'avantage d'être souvent plus contrastée, permettant ainsi une identification plus aisée de la bande active, il arrive qu'un effet de cisaillement apparaisse sur certaines zones, rendant alors la détermination de la bande active presque impossible. La texture en mode moyen (**figure 14B**) permet alors de lever le doute sur ces zones problématiques, même si cette texturation crée souvent un effet de lissage des contrastes.

➤ Influence des différences radiométriques

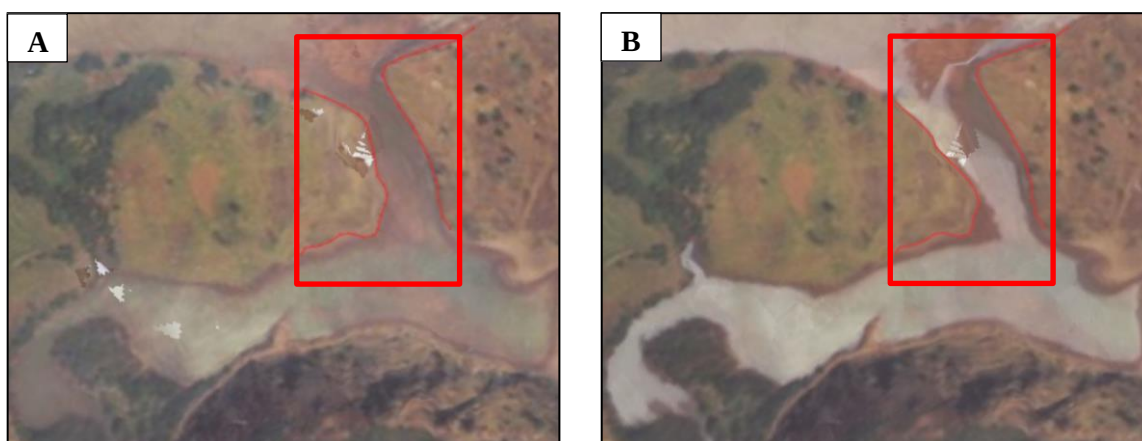


Figure 15 : Orthoimages de 1989 avec un mode de texturation en mosaïque (A) et moyen (B)

Lors de la digitalisation du delta de la Thio sur la campagne de 1989, nous nous sommes aperçus qu'en fonction du mode de texturation, la localisation de la bande active pouvait varier de manière assez importante (**figure 15**).

Ce phénomène pourrait être dû au fait que les prises de vues n'ont pas été réalisées le même jour, et que la marée ait été basse (**figure 15A**) puis haute (**figure 15B**) lors des deux prises de vues, d'où l'importance d'obtenir au préalable les métadonnées relatives aux campagnes aériennes pour éviter de traiter des photos n'ayant pas été prises à la même date.

Cependant lorsqu'on s'attache à la position des prises de vue et à l'heure (visible sur le cadre des clichés) à laquelle elles ont été prises (**figure 16 A' et B'**), il apparaît que ces dernières ont été prises à quelques secondes d'intervalle et qu'elles soient positionnées sur une même ligne de vol, ce qui semble plutôt conforter l'hypothèse qu'elles ont été prises le même jour. Aussi en analysant les photos brutes ayant servi à la texturation (**figure 16 A et B**) on s'aperçoit que la radiométrie est très différente puisque sur l'une des deux photos la lumière du soleil se reflète sur les surfaces en eau (**figure 16A**) tandis que sur l'autre photo un nuage devait cacher le soleil, réduisant ainsi l'exposition de l'eau à la lumière (**figure 16B**). Il est donc possible que ces grosses différences radiométriques soient à l'origine des différences de texturation de l'îlot et il apparaît assez clairement que l'orthophoto la plus fidèle à la réalité est l'orthophoto en mosaïque.

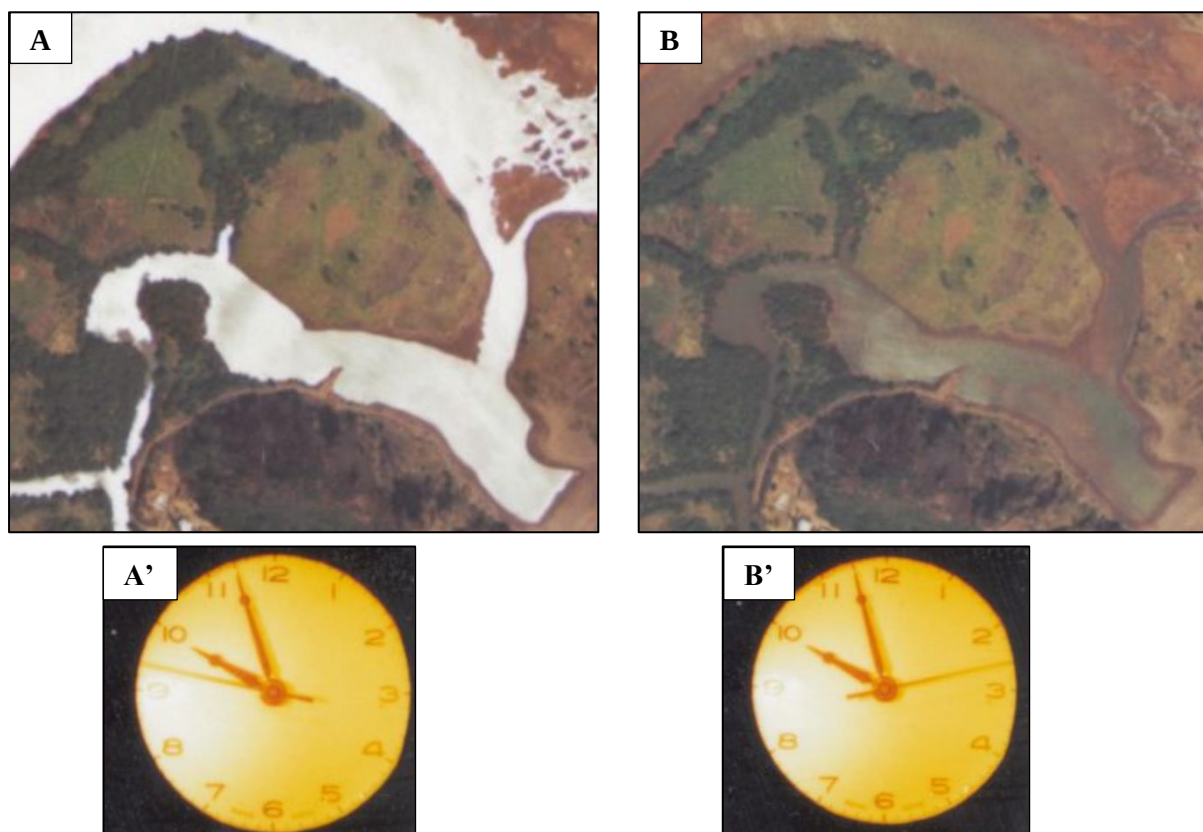


Figure 16 : Images brutes de 1989 (A et B) et heure des prises de vues correspondantes (A' et B') (source : DITTT)

3.2 Largeur de la bande active sur chaque époque

➤ Largeur de la bande active de la Thio

Pour pouvoir comparer les bandes actives de la Thio aux différentes époques il faut que les mesures aient été réalisées sur les mêmes linéaires, et sur une étendue la plus grande possible afin d'avoir une analyse plus complète. Or la campagne de 1943 est très partielle, ne couvrant qu'un linéaire d'environ 10 km sur la Thio, elle a donc été écartée pour cette analyse et nous avons déterminé les diagrammes en boîte des largeurs de la Thio de 1954 à 2008 sur un linéaire d'environ 18 km. Dans cette analyse nous avons distingué les mesures effectuées avant la première confluence avec les affluents majeurs (Nakaré et Néburu), sur une longueur d'environ 4 km, de celles réalisées après les confluences sur une longueur d'environ 13 km. Enfin les mesures en aval s'arrêtent presque 3 km avant l'embouchure car le système estuarien présente un comportement morphologique spécifique, lié notamment à l'influence de l'océan.

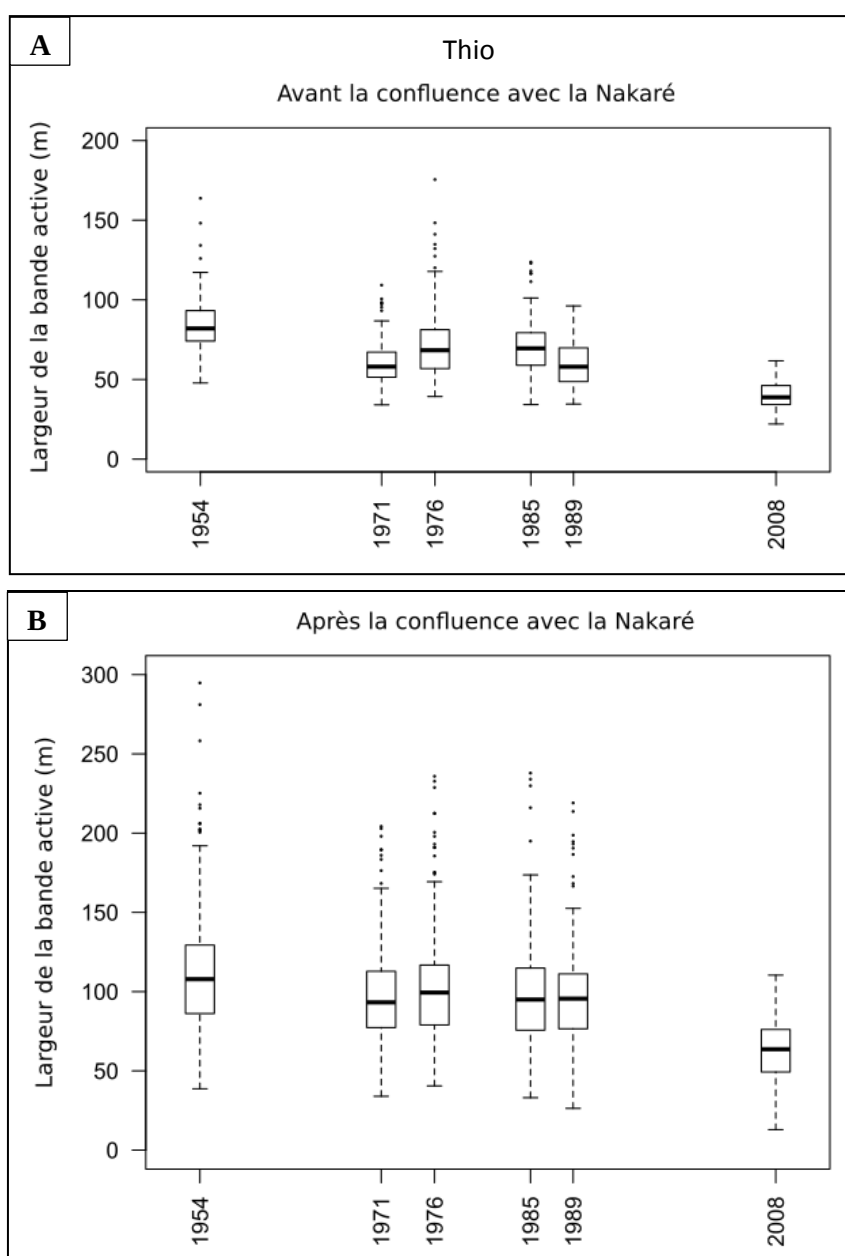


Figure 17 : Largeur de la bande active de la Thio de 1954 à 2008 avant (A) et après la confluence avec la Nakaré (B)

Nous remarquons qu'après les confluences avec la Nakaré et la Néburu (**figure 17B**), la bande active de la Thio est en moyenne 15 à 30 m plus large et la distribution de ces largeurs est bien plus étalée qu'avant les confluences (**figure 17A**), ce qui peut conforter l'hypothèse que ces deux affluents fortement engravés influent sur la dynamique fluviale de la Thio.

Les tendances d'évolution des bandes actives de 1954 à 1976 sont similaires avant et après les confluences, avec une rétraction de la bande active entre 1954 et 1971 puis un élargissement entre 1971 et 1976. Les tendances diffèrent ensuite avec un léger élargissement de la bande active de 1976 à 1985 sur la partie amont des confluences tandis que la partie aval présente une faible rétraction. Entre 1985 et 1989 les tendances diffèrent encore avec une rétraction de la bande active de la Thio avant les confluences contre une stabilisation en aval des confluences. Enfin entre 1989 et 2008, la bande active de la Thio se rétracte avant comme après les confluences avec cependant une rétraction plus importante après les confluences.

Bien qu'elles présentent quelques différences, les tendances globales d'évolution de la largeur de la bande active de la Thio avant et après les confluences sont les mêmes, avec une rétraction de la bande active entre 1954 et 1971 puis une évolution de la largeur en forme de plateau très étalé dans le temps avec un pic d'élargissement dans les années 1976 correspondant à la période d'exploitation intensive du nickel et potentiellement corrélée à des événements pluvieux importants dans le bassin. La rétraction de la bande active entre 1954 et 1971 est peut-être liée à une capacité de transport sédimentaire réduite des affluents de la Thio pouvant être expliquée par des forçages hydro-météorologiques moins importants. Ces hypothèses sur les pluviométries seraient à confirmer avec des données de débits des rivières dans le bassin versant de la Thio à ces époques, données dont nous ne disposons pas à l'heure de la rédaction de ce rapport.

La partie amont se comportant sensiblement comme la partie aval, on peut se demander si cette portion amont ne serait pas également impactée - dans une moindre mesure - par un engravement lié aux mines Zizette et Bel Air situées plus en amont (**figure 8**).

Enfin la donnée de 1943 n'a pas été prise en compte dans la réalisation des boxplots de la **figure 17** pour les raisons précédemment exposées, mais en comparant la médiane des largeurs sur la portion située en aval des confluences digitalisée en 1943 avec celle de 1954 (**figure 18**), il apparaît un léger élargissement de la bande active de 10 m entre ces 11 années.

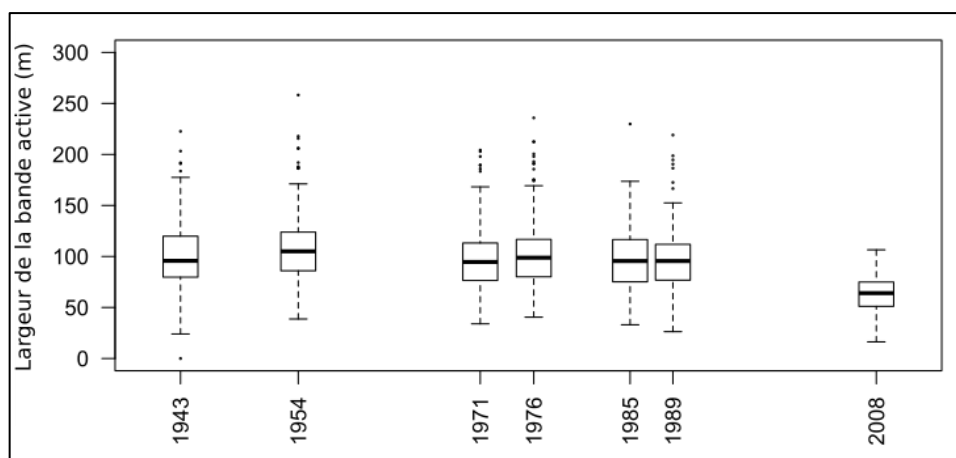


Figure 18 : Largeur de la bande active de la Thio de 1943 à 2008

➤ **Largeur de la bande active des affluents surengravés de la Thio**

- **Nakaré et Néburu :**

Les affluents surengravés majeurs de la Thio, soit la Nakaré et la Néburu, n'ont pas été digitalisés en 1943 car cette campagne ne couvrait pas ces deux cours d'eau ; ainsi les boxplots des largeurs de bande active de ces rivières ont été réalisés entre les époques 1954 et 2008. Les largeurs de la bande active ont été déterminées sur un linéaire de 4.0 km et de 5.8 km respectivement pour la Nakaré et la Néburu.

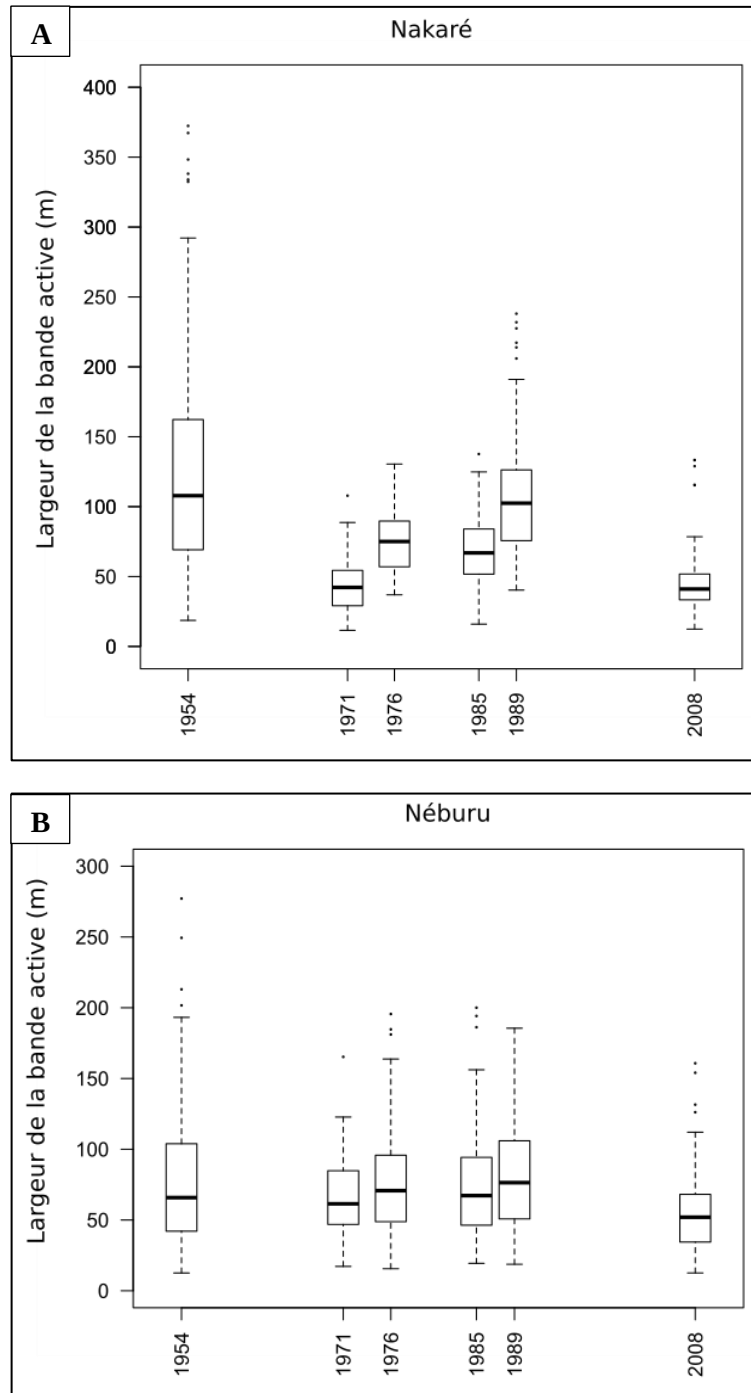


Figure 19 : Largeur de la bande active de la Nakaré (A) et de la Néburu (B) de 1954 à 2008

Les largeurs moyennes se situent environ entre 50 et 100 m sur la Nakaré (**figure 19A**) comme sur la Néburu (**figure 19B**), et si l'évolution des largeurs de bande active de la Néburu semble suivre une tendance relativement proche de celle de la Thio, on remarque que la largeur de la bande active de la Nakaré évolue en dents de scie au cours du temps. Ce constat s'explique probablement par le fait que de nombreuses îles végétalisées se sont développées dans la Nakaré (**figure 20A**) alternant avec des périodes de disparition de ces îles au fil du temps (**figure 20B**), contrairement à la Néburu dans laquelle aucun îlot ne s'est formé. On peut encore supposer que si la végétation pionnière dans la bande active a pu se développer entre deux époques c'est parce que la fréquence des crues suffisamment puissantes a fortement diminué entre ces dates. Encore une fois, cette hypothèse serait à confirmer en analysant l'évolution des débits dans la Nakaré.

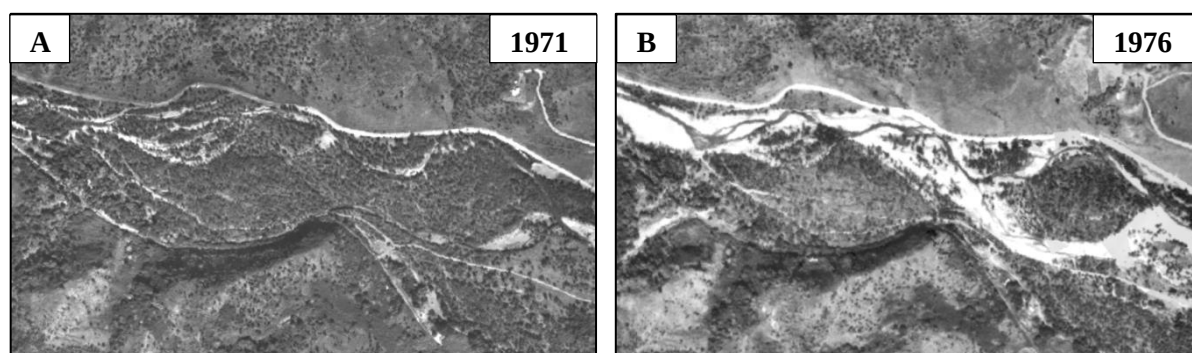


Figure 20 : Photos de la Nakaré en 1971 (A) et 1976 (B)

En 1971 (A) la Nakaré présente de nombreux îlots végétalisés avec des bancs alluviaux quasiment inexistantes tandis que 5 années plus tard une grande partie de la végétation a disparue pour laisser la place à de larges bancs alluvionnaires.

- **Tomuru**

Le creek Tomuru a été digitalisé sur une portion de 1.5 km, et puisque la campagne de 1943 couvrait ce cours d'eau, les boxplots relatifs à cet affluent ont été réalisés de 1943 à 2008.

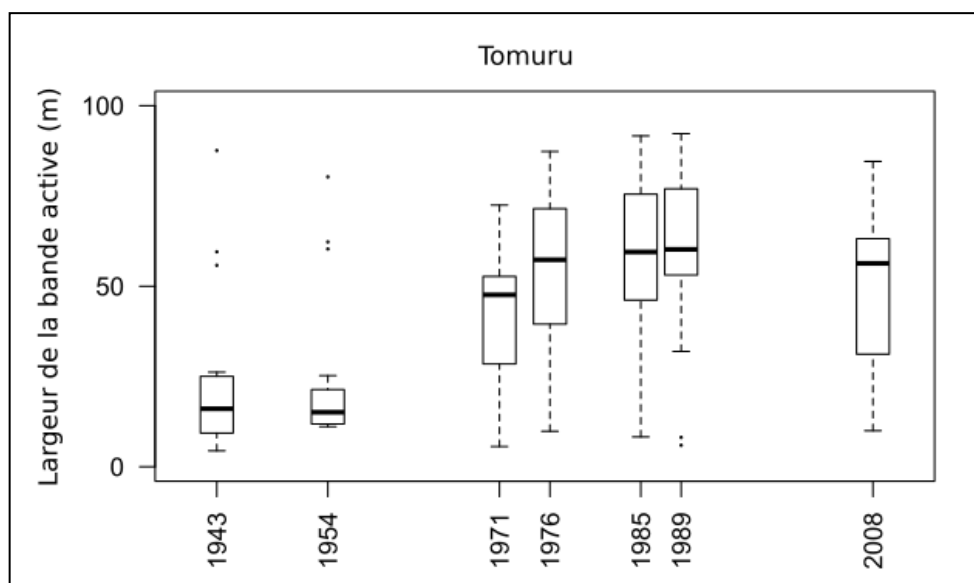


Figure 21 : Largeur de la bande active de la Tomuru de 1943 à 2008

On remarque un élargissement important de la bande active de la Tomuru entre les années 1954 et 1971 (**figure 21**) ce qui s'explique par le fait que ce creek n'a subi l'influence des mines qu'après 1954 (**figure 22**). Si ce creek est moins large que les deux autres affluents analysés précédemment (Nakaré et Néburu), c'est parce que son bassin versant est plus petit que ces deux autres affluents.

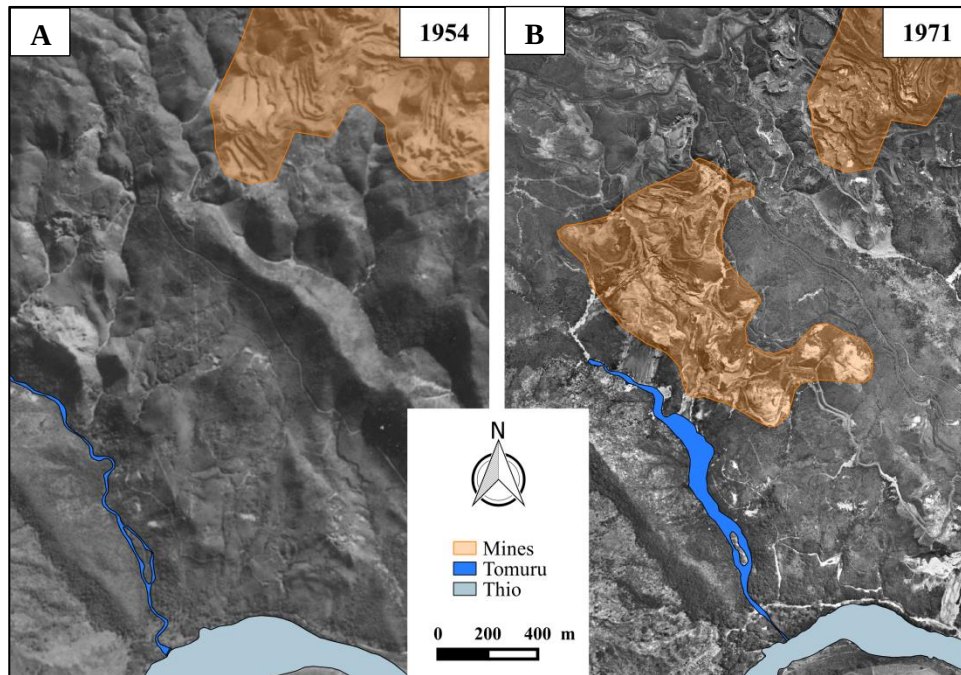


Figure 22 : Position des mines par rapport à la Tomuru en 1954 (A) et 1971 (B)

On remarque qu'en 1954 (A) les mines se situent à plus d'un kilomètre de la Tomuru tandis qu'en 1971 (B) elles ne se trouvent plus qu'à une centaine de mètres, et la largeur de la Tomuru devient alors bien plus importante.

➤ Largeur de la bande active des cours d'eau non impacté par le surengrèvement

Pour comparer les cours d'eau surengravés par l'exploitation minière avec des rivières à fonctionnement naturel, nous avons digitalisé la Fanama située dans le bassin versant de la Thio sur un linéaire d'environ 2.4 km de 1954 à 2008 et nous avons également digitalisé la Tôdré dans le bassin versant voisin sur une longueur de 8.4 km entre 1943 et 2007.

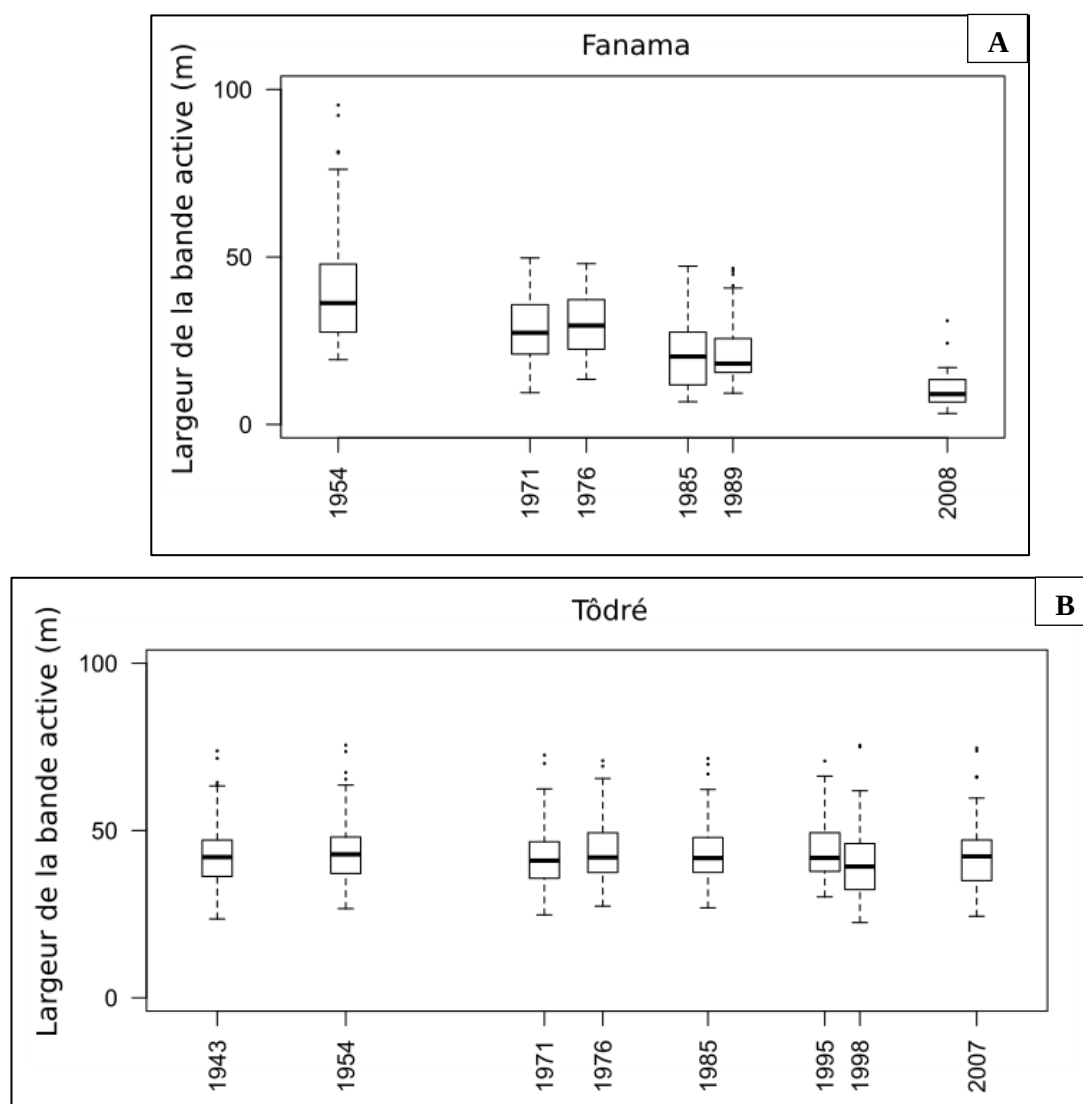


Figure 23 : Largeur de la bande active de la Fanama (A) et de la Tôdré (B)

Bien que n'étant pas définie comme une rivière surengravée, l'évolution de la bande active de la Fanama (**figure 23A**) révèle la même tendance en plateau que celle identifiée sur la Thio avec un pic de largeur entre 1971 et 1976 et cette tendance constitue donc probablement la signature de forçages hydro-météorologiques particulièrement puissants dans les années 1970. En 2008 la Fanama a atteint son minimum de largeur depuis 1954 et s'est donc rétractée au fil du temps ; ce constat étant la conséquence d'un transport sédimentaire faible et d'une végétalisation progressive de la bande active du cours d'eau. Aussi le transport sédimentaire étant très faible dans la Fanama, sa bande active digitalisée correspond la plupart du temps au lit mineur du cours d'eau puisqu'il n'existe presque pas de bancs alluvionnaires, et cette largeur est très dépendante du débit et donc des précipitations ayant précédées la prise de vue.

Concernant la Tôdré (**figure 23B**) on note a très peu évolué, et à la différence des autres rivières de cette étude, aucune variation notable n'est à constater entre 1971 et 1976 bien que des événements pluvieux importants semblent avoir eu lieu. Il se pourrait donc que le confinement de ce cours d'eau ne permette pas à sa bande active de s'ajuster à ces phénomènes pluvieux (**figure 24**).

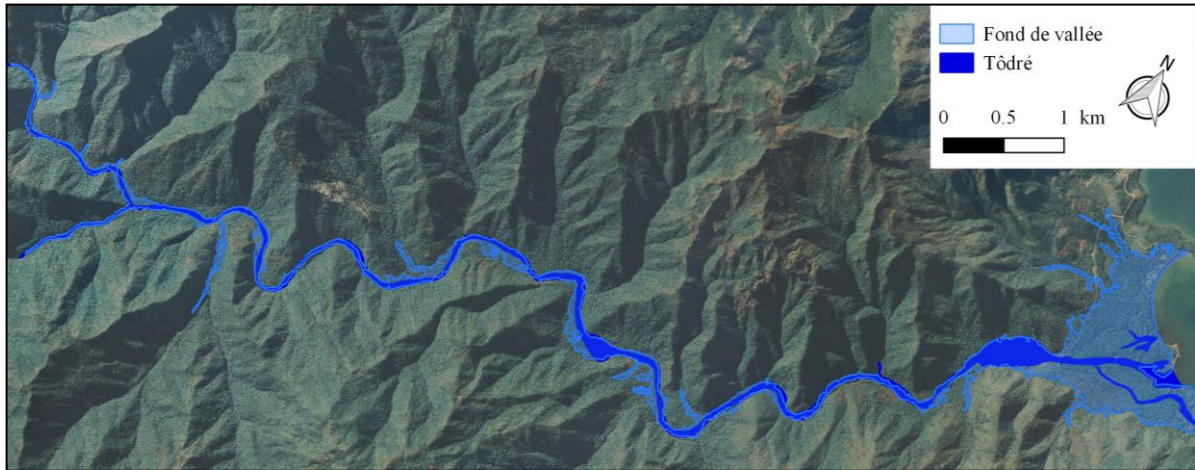


Figure 24 : Configuration du fond de vallée sur la Tôdré

À partir du MNT à 10 m, la couche du fond de vallée a été créée avec l'outil *fluvial corridor* et la **figure 24** nous permet de confirmer l'hypothèse que la rivière de la Tôdré est très contrainte latéralement et donc que les variations de sa bande active en sont limitées.

De plus la rivière de la Tôdré s'écoule sur du bedrock, et la distinction entre ces amas rocheux et les bancs alluvionnaires est presque impossible à réaliser lors de la digitalisation, notamment sur les campagnes en noir et blanc, ce qui expliquerait encore les minimes variations de largeur de bande active.

Finalement les faibles changements observés sur la Fanama et la Tôdré au fil du temps (**figure 23**) appuient l'hypothèse que la Thio et ses principaux affluents ne constituent pas des systèmes naturels et que leurs évolutions sont très probablement dues à des apports sédimentaires conséquents liés notamment aux exploitations minières.

3.3 Évolution des bandes actives d'une époque à l'autre

Pour identifier géographiquement les zones de rétraction et d'élargissement sur la Thio, et percevoir éventuellement le déplacement des vagues sédimentaires au fil du temps, nous avons tracé les diagrammes des tendances d'évolution de la bande active entre chaque époque successive (1943/1954, 1954/1971, 1971/1976, 1976/1985, 1985/1989 et 1989/2008).

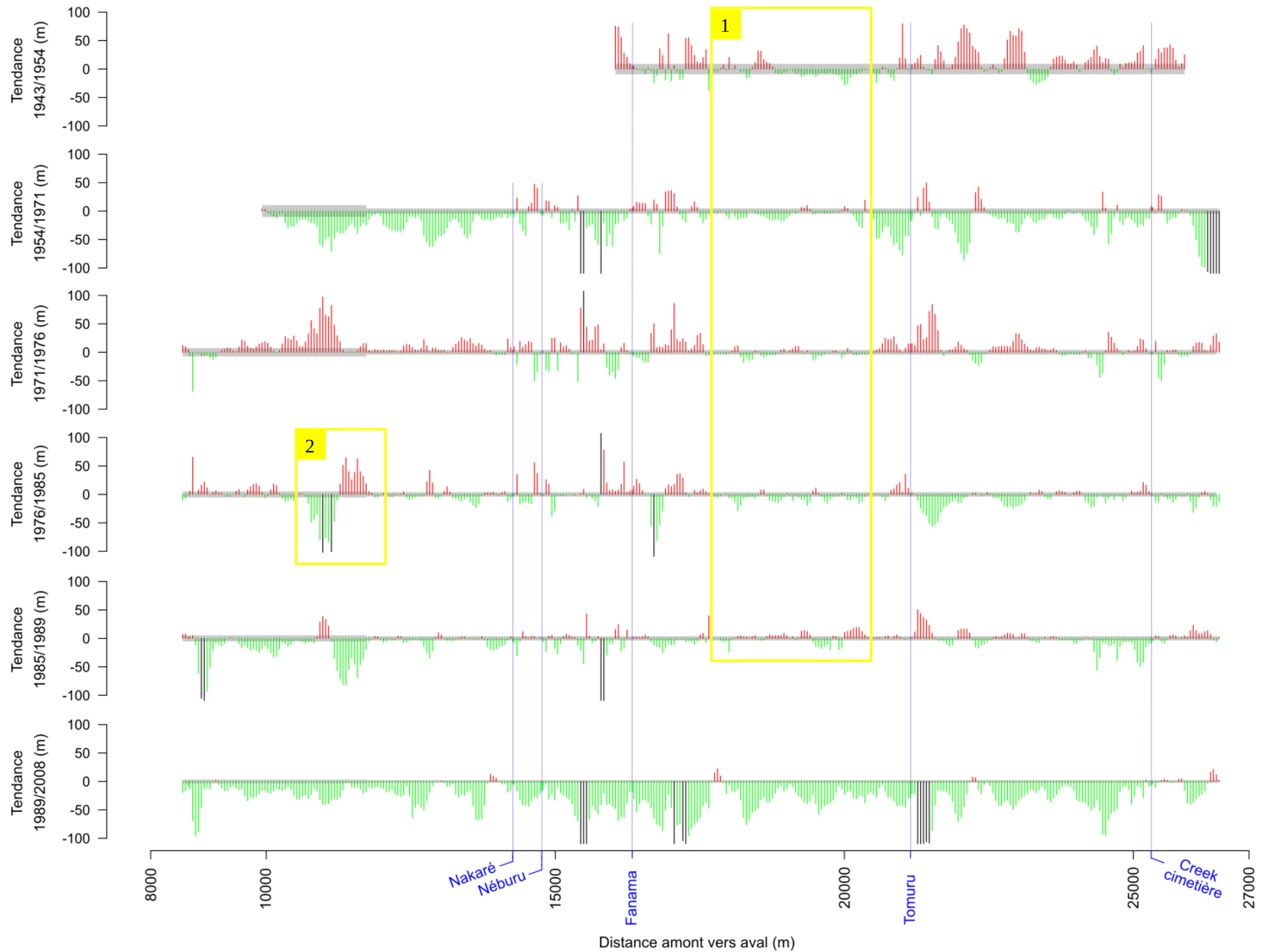
La **figure 25** présentée ci-dessous permet d'identifier géographiquement les limites du graphe de la **figure 26** qui s'étend sur presque 20 km.



Figure 25 : Localisation de l'emprise commune aux digitalisations de la Thio entre 1954 et 2008 (source : DITTT modifié)

Le graphe des tendances d'évolution de la bande active de la Thio ne commence pas à 0 mais à 8000 m car sur la campagne de 2008, la Thio a été digitalisée 8 km en amont de ce point. Aussi le graphe s'arrête avant le delta de la Thio car les largeurs de bandes actives sont faussées par la présence de bras multiples.

Figure 26 : Tendances d'évolution de la bande active de la Thio entre époques successives de 1943 à 2008



Apparaissent ainsi sur la figure 26 :

- en vert des rétractions de la bande active entre les deux époques
- en rouge des élargissements de la bande active entre les deux époques
- en noir des élargissements ou rétractions dont la valeur dépasse le seuil des ± 100 m
- en gris l'intervalle d'imprécision lié aux mesures, d'une largeur de $2 \cdot \sigma_{dL}$ (**annexe 2**)

Nous retrouvons sur ce graphe les tendances évoquées dans la partie 3.2 sur la Thio (**figure 17**) avec une tendance générale à l'élargissement entre 1943 et 1954 puis une tendance à la rétraction entre 1954 et 1971 potentiellement liée à une période creuse en termes d'évènements cycloniques. Entre 1971 et 1976 nous remarquons des élargissements relativement importants sur la Thio, correspondant à l'époque d'exploitation intensive du Nickel et à l'occurrence potentielle d'évènements pluvieux conséquents. Puis entre 1976 et 1985 la tendance sur tout le linéaire de la Thio est une alternance à peu près constante de secteurs à élargissement et à rétraction ; il est possible que cette tendance soit liée aux réglementations imposées aux mineurs au début des années 1980 concernant le respect de l'environnement dont notamment l'obligation de stockage des stériles miniers. Entre 1985 et 1989 nous percevons une légère tendance à la rétraction, particulièrement visible en amont des confluences. Et enfin entre 1989 et 2008 nous notons des rétractions très importantes de la bande active de la Thio sur presque tout son linéaire laissant à penser que la Thio est en train de revenir vers un fonctionnement plus naturel et que son surengrèvement est en diminution.

En analysant les tendances immédiatement en aval des confluences avec la Nakaré et la Néburu, nous ne constatons pas de pics conséquents d'élargissement ou rétraction que l'on retrouverait également sur les variations de ces affluents ; ainsi l'influence de ces cours d'eau fortement surengravés sur la Thio n'est pas aussi perceptible que ce que nous aurions pu attendre. De même nous avons constaté que la Tomuru s'était fortement élargie entre 1954 et 1971 mais nous ne remarquons pas de pics d'élargissement notable sur la Thio juste après cette confluence à cette même époque, ce qui peut s'expliquer par la construction du passage à gué construit dans les années 1960 et qui piègerait les sédiments en empêchant leur transfert à la Thio. Des élargissements apparaissent cependant à cette confluence mais entre 1971 et 1976 ; il se pourrait donc que cet élargissement soit dû à des apports sédimentaires fournis par la Tomuru qui seraient parvenus à franchir le passage à gué lors d'un évènement pluvieux important, mais il se pourrait également que ces pics ne soient pas liés à cet affluent et qu'ils correspondent à une accumulation des sédiments transportés depuis l'amont.

Aussi nous remarquons que sur une portion de la Thio d'environ 2.8 km (**figure 26 – 1**) la bande active ne subit que de très faibles variations au fil du temps ; il s'agirait donc d'une zone où les sédiments transitent rapidement. Une explication possible à ce phénomène serait le confinement de la rivière sur cette portion et afin de confirmer ou d'infirmer cette hypothèse nous avons analysé la configuration du fond de vallée sur cette portion (**figure 27**).

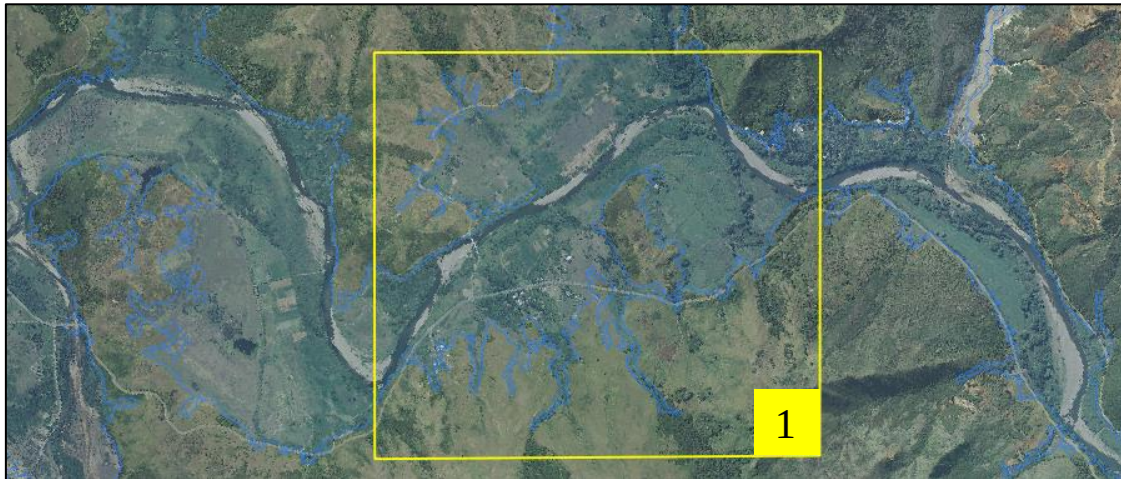


Figure 27 : Fond de vallée sur une portion du bassin versant de la Thio
(source : DITTT modifié)

À la vue de la configuration du fond de vallée (en bleu sur la **figure 27**) il ne semblerait pas que cette portion (encadré jaune des **figures 26–1** et **27**) soit contrainte latéralement. L'explication de ce phénomène est donc probablement lié au fait qu'une grande partie des vagues sédimentaires semble se déposer en amont et que ce tronçon reçoit donc des volumes de sédiments beaucoup moins importants. Ceci rejoint les observations faites sur le terrain et qui ont montré que l'essentiel des volumes sédimentaires d'origine minière restent stockés près des sources, et que les fractions qui ont migré vers l'aval ne représentent qu'une faible proportion de ce qui a été produit. On note d'ailleurs sur la **figure 26** que les élargissements les plus significatifs se produisent préférentiellement en aval immédiat des systèmes productifs que sont la Nakaré, la Néburu et la Tomuru.

Enfin sur certaines portions des graphes nous apercevons des phénomènes de rétraction suivis immédiatement par un élargissement (**figure 26–2** et **figure 28**) ce qui est caractéristique d'une migration de la vague sédimentaire vers l'aval. En revanche nous ne parvenons pas à suivre le déplacement de ces vagues au cours du temps, probablement parce que nous manquons de données plus rapprochées dans le temps.

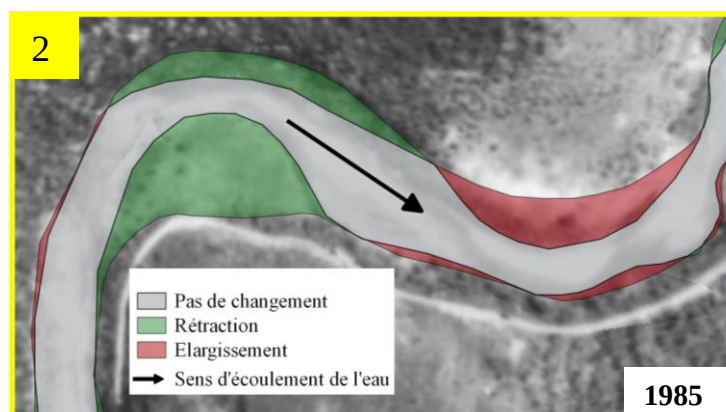


Figure 28 : Déplacement d'une vague sédimentaire sur la Thio entre 1976 et 1985

4 Perspectives

➤ Approfondir l'exploitation des données

Mélanie Bertrand, qui travaille sur ce projet en tant membre de l'équipe de l'IRSTEA, utilisera les données de largeurs de bandes actives pour les intégrer à un modèle statistique qu'elle a développé et qui nous permettra d'évaluer le surengrèvement d'une rivière. Ce modèle permet de produire une information de largeur de bande active théorique d'un cours d'eau fonctionnant dans des conditions naturelles (donc non impacté par le surengrèvement), à partir de 5 paramètres en entrée : surface et pente du bassin versant, largeur et pente du fond de vallée et densité de la couverture forestière. L'écart entre largeur théorique et largeur observée, fortement corrélé à la surface relative en érosion dans le bassin versant, servira d'indicateur des apports sédimentaires et il permettra d'identifier les secteurs en surlargeur ayant donc enregistré le passage d'une vague sédimentaire. L'application sur l'ensemble du réseau hydrographique de la Thio permettra, grâce au travail réalisé pendant ce stage, de mettre en évidence les secteurs qui sont encore impactés par les apports sédimentaires massifs. L'application de ce modèle statistique sera également possible à différentes époques grâce aux analyses diachroniques réalisées.

Aussi les traitements d'orthorectification des images aériennes ont donné lieu à la création de nuages de points 3D. Il conviendra donc dans un premier temps de contrôler sous le logiciel CloudCompare les précisions de ces nuages en utilisant comme référence le nuage de points issu du levé LiDAR. Dans le cas où les précisions seraient suffisantes (entre 1 et 2 m maximum) nous pourrions reconstituer l'évolution du profil en long de la Thio, la Nakaré et la Néburu en mettant en lumière les zones d'incision et d'exhaussement du lit. Ces phases d'exhaussement ou d'incision seraient alors mises en relation avec l'analyse des changements morphologiques qui a été conduite pendant ce stage. Cependant à la vue des précisions planimétriques des orthoimages créées, la précision de 1 à 2 m en altimétrie paraît difficile à atteindre, et si cette précision s'avérait en pratique au-dessus du seuil que l'on s'autorise alors nous relancerons des traitements d'orthorectification ciblés sur les zones d'intérêt (où les phénomènes d'élargissement ou rétraction sont les plus importants) en réduisant au maximum le nombre d'images brutes en entrée tout en conservant suffisamment d'images afin d'identifier des points de calage pertinents.

➤ Etendre la zone d'étude

En analysant les largeurs de la bande active de la Thio (**figure 17**) nous nous sommes aperçus que la partie de la Thio située en amont des confluences avec la Nakaré et la Néburu semble impactée par l'exploitation minière. Il serait donc intéressant d'étendre encore les digitalisations des bandes actives sur les deux affluents de la Thio : la Kuentio au Sud sur 12 km et la Xwé Xârâge à l'Ouest sur 10 km (**figure 29**).

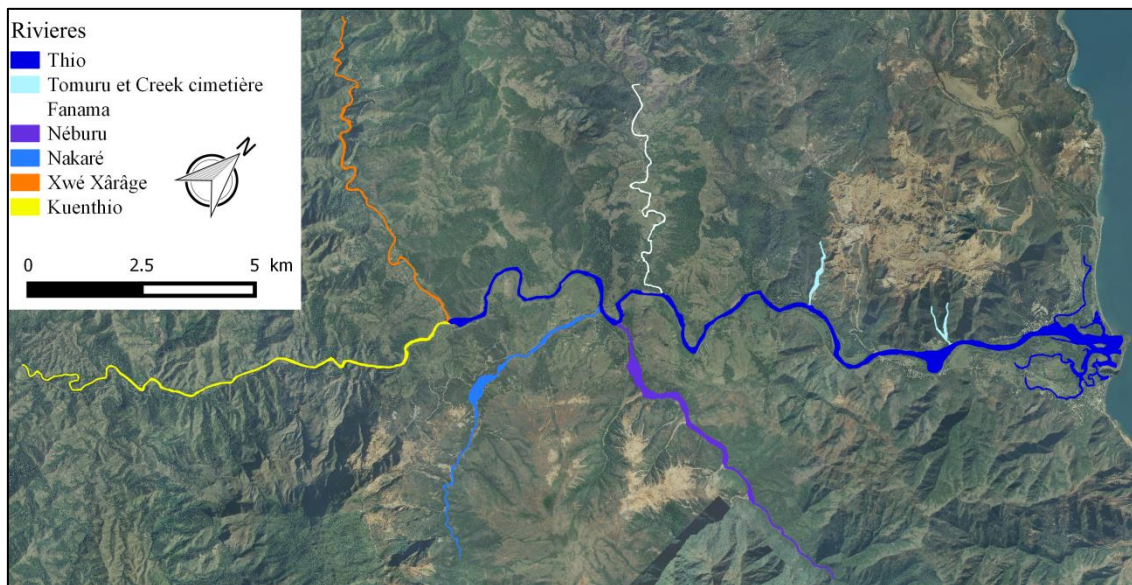


Figure 29 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Thio (source : DITTT modifié)

Pour pouvoir réaliser ces extensions de digitalisation, il conviendra alors de relancer les orthorectifications des images aériennes en fixant des points de calage autour de la nouvelle emprise d'étude car les imprécisions sur les orthophotos produites précédemment deviendront bien trop élevées. Ce serait donc le MNT à 10 m fourni par la DITTT qui servirait de référence altimétrique, tandis que les orthophotos de 2007/2008 constitueraient toujours la référence planimétrique.

Il serait également intéressant de comparer les précisions de ces futures orthoimages avec les précisions des orthoimages créées pour notre étude afin de constater l'intérêt – ou non – d'utiliser une source altimétrique précise pour réaliser notre étude sur l'évolution morphologique 2D des rivières.

➤ Etendre la période d'étude

Les données les plus récentes de cette étude datent de 2008, soit 8 ans auparavant, et il serait intéressant de récupérer des images plus récentes pour réaliser une analyse plus complète. Des images satellitaires Pléiades brutes avec une taille de pixel au sol d'environ 70 cm capturées le 3 Novembre 2015 sont en cours d'acquisition et il conviendra de les rectifier avant de pouvoir digitaliser les bandes actives et étendre les analyses. Ainsi l'analyse sur une date plus actuelle permettrait de confirmer ou d'infirmer les tendances à la rétraction que nous avons pu constater sur les périodes récentes.

Aussi pour les prochaines études à venir dans ces bassins versants, la mise en place de moyens techniques plus élaborés tels que des levés LiDAR terrestres ou aérien, permettraient d'obtenir des données avec une précision et un détail bien meilleurs, permettant alors un suivi plus fin de l'évolution de la Thio tant en planimétrie qu'en altimétrie.

➤ **Intégrer l'étude dans le projet global**

L'ensemble des données extraites à l'issue des travaux exposés dans ce dossier ne permet pas à lui seul de comprendre les changements fluviaux qu'ont subis les cours d'eau du bassin versant de la Thio, ni même d'affirmer que les exploitations minières sont les seules responsables des changements morphologiques des rivières de ce bassin.

L'étude présentée dans ce rapport ne constitue effectivement qu'une partie du projet du CNRT « Bassin versant : de la mine au lagon » bien plus conséquent, et il conviendra de rassembler les résultats de toutes les autres études de ce projet pour pouvoir envisager des analyses plus pertinentes et plus complètes.

En couplant l'analyse morphologique - aussi bien en terme de largeur de bandes actives qu'en terme d'exhaussement ou d'incision si cette étude s'avère possible - avec les données pluviométriques, permettant d'identifier les événements majeurs ayant pu impacter la morphologie de la Thio, il serait possible de quantifier la part respective des activités minières et de l'activité cyclonique sur le surengrèvement.

L'utilisation d'informations relatives aux tonnages de minerai extraits entre 1943 et aujourd'hui sur chacun des sites majeurs d'exploitation (mine du Plateau de Thio, mines Bornet, Zizette et Bel Air notamment) et la cartographie diachronique des sources sédimentaires liées à l'activité minière et connectées au réseau hydrographique (travail réalisé par le BRGM) permettraient également de quantifier les volumes sédimentaires transférés. Ces volumes extraits pourraient être mis en relation avec les changements morphologiques identifiés par l'analyse conduite au cours de ce stage. Si l'analyse des MNT anciens est possible (précisions suffisantes), ces tonnages pourraient être également comparés aux volumes d'exhaussement et d'incision aux différentes époques.

Les études conduites par le BRGM, et le travail de cartographie des interfaces sols-nus/végétation à différentes époques entrepris par l'IRD permettront d'identifier les versants les plus dégradés constituant des sources sédimentaires conséquentes pour les cours d'eau ; et cette information portée à la connaissance des autorités publiques et des exploitants miniers permettra que des mesures soient prises pour limiter l'érosion de ces versants.

Enfin l'analyse de l'évolution de la plaine deltaïque dans le bassin versant de la Thio et de son littoral - prévue dans le projet - permettra une étude plus complète du fonctionnement fluvial dans ce bassin et cette analyse permettra peut-être de mieux comprendre les raisons des fréquentes inondations du village de la Thio situé dans cette plaine deltaïque.

Conclusion

L'imagerie ancienne est une source très riche d'informations permettant de retracer l'évolution des éléments qu'elle a capturés au fil du temps. Elle a permis dans notre étude de réaliser une analyse historique des changements fluviaux de rivières impactées par l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie (rivières de Thio, Nakaré, Néburu et Tomuru dans le bassin versant de la Thio) et qui ont été mises en comparaison avec le fonctionnement de systèmes fluviaux naturels (rivières de Fanama et de Tôdré).

Pour ces travaux de multiples traitements ont été réalisés sur les images aériennes anciennes (orthorectification et géorectification) afin de les corriger et les géoréférencer. La précision moyenne des données produites a été déterminée en-dessous des 10 m en absolu avec une grande partie des images qui approxime plutôt les 5-6 m, ce qui s'est avéré suffisant pour réaliser des analyses à l'échelle des rivières sur des périodes étendues.

D'abord, l'étude des largeurs de la bande active de la Tôdré et de la Fanama – a priori non impactées par l'exploitation minière – a permis de confirmer qu'elles présentaient des fonctionnements naturels.

En analysant ensuite les évolutions de la largeur de la bande active de la Thio, rivière principale du bassin versant du même nom, nous avons pu constater que sa bande active a subi une forte rétraction entre 1954 et 1971 ce qui pourrait être lié à une baisse de l'activité minière et/ou à une période creuse en termes d'événements pluvieux. La bande active s'est ensuite élargie entre 1971 et 1976, ce qui s'explique très probablement du fait que l'exploitation minière a été très intensive à la fin des années 1960. Puis entre 1976 et 1989, la portion de la Thio située en aval des confluences avec ses principaux affluents, la Nakaré et la Néburu, n'évolue quasiment pas tandis qu'en amont des confluences on constate un élargissement de la bande active de 1976 à 1985 suivi d'une rétraction de 1985 à 1989. Cette période qui suit la promulgation de lois imposant aux mineurs des pratiques d'exploitation plus soucieuses de l'environnement à la fin des années 1970 semble donc être une période de stabilisation de la bande active, sans que les répercussions relatives à ces nouvelles obligations ne soient encore constatées sur la morphologie des cours d'eau. Enfin de 1989 à 2008 la Thio se rétracte de manière assez significative et sur tout son linéaire ce qui laisse à penser que la Thio est en train de revenir vers un fonctionnement plus naturel.

Concernant les affluents principaux de la Thio que sont la Nakaré et la Néburu il semblerait que leurs tendances d'évolution soient relativement similaires, bien que la Nakaré révèle des amplitudes d'élargissement et rétraction plus marquées que la Néburu, probablement du fait de la présence dans sa bande active de nombreux îlots tantôt végétalisés tantôt dépeuplés au fil du temps.

Enfin le creek de la Tomuru a été marqué par un fort élargissement de sa bande active entre 1954 et 1971, ce qui semble lié à l'extension des mines à proximité de ce cours d'eau. Sa bande active a ensuite continué de s'élargir jusqu'en 1976 et paraît s'être stabilisée depuis cette date. Pour autant ce creek ne semble pas constituer une source conséquente en apports sédimentaires pour la Thio car la mise en place d'un passage à gué à l'aval de la Tomuru dans les années 1960 aura vraisemblablement permis de minimiser voire de supprimer totalement sa contribution sédimentaire.

L'analyse par la spatialisation des évolutions de la largeur de bande active n'a pas été très éloquente et il n'a pas été possible de retracer le déplacement des vagues sédimentaires au fil du temps, ni de constater une véritable influence des affluents Nakaré et Néburu sur la morphologie de la Thio.

Il conviendra alors de lier l'ensemble des données extraites à l'issu de ce travail avec les résultats des autres études relatives au projet « Bassin versant : de la mine au lagon », et notamment les informations sur les débits des cours d'eau et les surfaces des sources sédimentaires à chaque époque pour pouvoir apporter des explications plus probantes sur les évolutions morphologiques des cours d'eau du bassin versant de la Thio.

Bibliographie

- [1] Allenbach, M. et 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. VII^{èmes} Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Anglet, France, 15-17 Mai 2002, p. 127-136.
- [2] Bakkouch, L., Bihl, H., Ruggeri, P., Follin, J.-M., Simonetto, E., et Touzard, P., 2015. Comparaison de méthodes de recalage d'images pour le géoréférencement de clichés anciens. XYZ 142, Association française de topographie, p. 53-61.
- [3] Baltzer, F. et Trescases, J.J., 1971. Erosion, transport et sédimentation liés aux cyclones tropicaux dans les massifs d'ultrabasites de Nouvelle-Calédonie. Cahiers ORSTOM Série Géologie 3, p. 221-244.
- [4] Bird, E.C.F., Dubois, J.P. et Itlis, J., 1984. The Impacts of Opencast Mining on the Rivers and Coasts of New Caledonia. Centre IRD de Bondy, Tokyo: United Nations University, 53 p.
- [5] Boyeau, Y.-E. et Juffroy, F., Révision 2012. Génération du Modèle Numérique de Terrain au pas de 10m sur la Nouvelle-Calédonie, Projet MNT10, Méthodologie et évaluation des résultats, DTSI, 15 p.
- [6] Danloux, J. et Laganier, R., 1991. Classification et quantification des phénomènes d'érosion, de transport et de sédimentation sur les bassins touchés par l'exploitation minière en Nouvelle Calédonie. ORSTOM, Nouméa. Hydrologie Continentale 6 : 1, p.15-28.
- [7] De Joinville, O., Saur, S. et Bretar, F., 2003. B. 3 Le levé laser aéroporté: techniques, applications et recherche. Bulletin d'Information de l'IGN 74 : 3, p. 37-52.
- [8] Depret, T., 2014. Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du cher, Thèse de doctorat, Université Paris 1, 529 p.
- [9] Dumas, P. et Cohen, O., 2014. Influence de la susceptibilité à l'érosion hydrique des bassins-versants sur l'évolution du rivage: exemples dans le sud de la Nouvelle-Calédonie. Conference: Colloque international « Connaissance et compréhension des risques côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations, Gestion », Brest, France, p. 269 – 278.
- [10] Frankl, A., Seghers, V., Stal, C., De Maeyer, P., Petrie, G. et Nyssen, J., 2015. Using image-based modelling (SfM-MVS) to produce a 1935 ortho-mosaic of the Ethiopian highlands. International Journal of Digital Earth 8 : 5, p. 421-430. doi:10.1080/17538947.2014.942715
- [11] Garcin M. et Lesimple S., 2013. Identification des rivières sur-engravées de la Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) Aptitude à l'exploitation pour granulats, rapport BRGM, 95 p.
- [12] Gentien-Baudry, V., 1999. La modélisation pluie-débit sur les bassins versants de Nouvelle Calédonie, Mémoire DEA, Cemagref, Université Pierre et Marie Curie, Université Paris-Sud, Ecole des Mines de Paris & Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 76 p.

- [13] Hughes, M.L., McDowell, P.F. et Marcus, W.A., 2006. Accuracy assessment of georectified aerial photographs: Implications for measuring lateral channel movement in a GIS. *Geomorphology* 74 : 1-4, p. 1–16. doi:10.1016/j.geomorph.2005.07.001
- [14] Ioana-Toroimac, G., Dobre, R., Grecu, F. et Zaharia, L., 2010. Evolution 2D de la bande active de la Haute Prahova (Roumanie) durant les 150 dernières années. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 16, p. 275–286. doi:10.4000/geomorphologie.7988
- [15] Jaffré, T., Latham, M. et Schmid, M., 1977. Aspects de l'influence de l'extraction du minerai de nickel sur la végétation et les sols en Nouvelle-Calédonie. *Cah. ORSTOM, série Biol.*, XII : 4, p. 307-321.
- [16] Jaffré, T. et Pelletier, B., 1992. Plantes de Nouvelle Calédonie permettant de revégétaliser des sites miniers, ORSTOM, (Le Nickel- SLN), 114 p.
- [17] James, L.A., 1991. Incision and Morphologic Evolution of an Alluvial Channel Recovering from Hydraulic Mining Sediment. *Geological Society of America Bulletin* 103 : 6, p.723–736.
- [18] Javernick, L., Brasington, J. et Caruso, B., 2014. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology* 213, p. 166-182.
- [19] Le Coz, J., Camenen, B., Dramais, G., Ribot-Bruno, J., Ferry, M. et Rosique, J.L., 2011. Guide technique pour le contrôle des débits réglementaires. ONEMA, 132 p.
- [20] Levacher, D. et Maron, P., 2002. Génie civil-génie côtier Civil and coastal engineering: Actes des VIIèmes Journées nationales avec participation international, Anglet (France), Centre français du littoral, Le Loroux Bottereau , France, p. 127-136.
- [21] Maison de la Nouvelle-Calédonie, 2016. Le nickel en Nouvelle Calédonie, 17 p.
- [22] Malavoi, J.R. et Bravard, J.P., 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale, ONEMA, 224 p.
- [23] Mallet, C., 2010. LIDAR aéroportés topographiques & bathymétriques, Présentation à l'Ecole d'Eté Lidar Géophysique, Laboratoire MATIS – IGN, 1 juillet 2010, 106 p.
- [24] Mathys, N. et Richard, D., 2007. Nouvelle-Calédonie - Lutte contre l'érosion en domaine minier, Rapport de mission, Cemagref, 50p.
- [25] Protocole d'accord de fin de conflit relatif aux inondations du 2 juillet 2013, 2013. 6 p.
- [26] Richer de Forges, B. et Pascal, M., 2008. La Nouvelle-Calédonie, un « point chaud » de la biodiversité mondiale gravement menacé par l'exploitation minière. *Le Journal de la Société des Océanistes* 126-127, 20p.
- [27] Roux, C., Alber, A., Bertrand, M., Vaudor, L. et Piégay, H., 2015. "FluvialCorridor": A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology* 242, p. 29-37.
- [28] Service de la Géomatique et de la Télédétection (SGT) de la Direction des Technologies et des Services de l'Information, 2012. Le bulletin de la Géomatique en Nouvelle-Calédonie n° 31, 4 p.

Table des annexes

<u>Annexe 1</u> : Définition des différents milieux de fond de vallée.....	53
<u>Annexe 2</u> : Détails du calcul de l'erreur sur la différence de largeur de bande active.....	54

Annexe 1

Définitions des différents milieux de fond de vallée

Les principaux milieux de fond de vallée (lits mineurs, moyen et majeur) sont définis par rapport aux différents débits d'une rivière, il convient donc de définir ces débits avant de présenter ces milieux.

Le **débit** d'un cours d'eau est le volume d'eau liquide traversant une section transversale de l'écoulement par unité de temps. On distingue notamment :

- Le **module**, ou **débit moyen interannuel**, qui correspond à la moyenne des débits annuels sur une période minimale de 5 années d'observations (Le Coz *et al*, 2011).
- Le **débit d'étiage**, qui correspond au débit minimum d'un cours d'eau en période de basses eaux.
- Le **débit de pleins bords** correspond au débit avant débordement dans la plaine alluviale (cette notion décrit également l'emprise du domaine public fluvial sur les cours d'eau domaniaux).

Le **lit** est défini comme l'espace occupé par un cours d'eau, de façon permanente ou temporaire. Il se caractérise en trois catégories (**figure 30**) :

- Le **lit mineur** qui est la partie du lit en eau pour des débits compris entre le débit d'étiage et le module.
- Le **lit moyen** est la partie du lit en eau pour des débits compris entre l'étiage et la crue de plein bord. On parle également de « bande active » puisqu'elle est constituée du lit mineur et de bancs alluviaux non végétalisés et régulièrement mobilisés.
- Le **lit majeur**, ou plaine alluviale, correspond à la plaine inondable délimitée par les plus hautes eaux connues (Malavoi et Bravard, 2010).

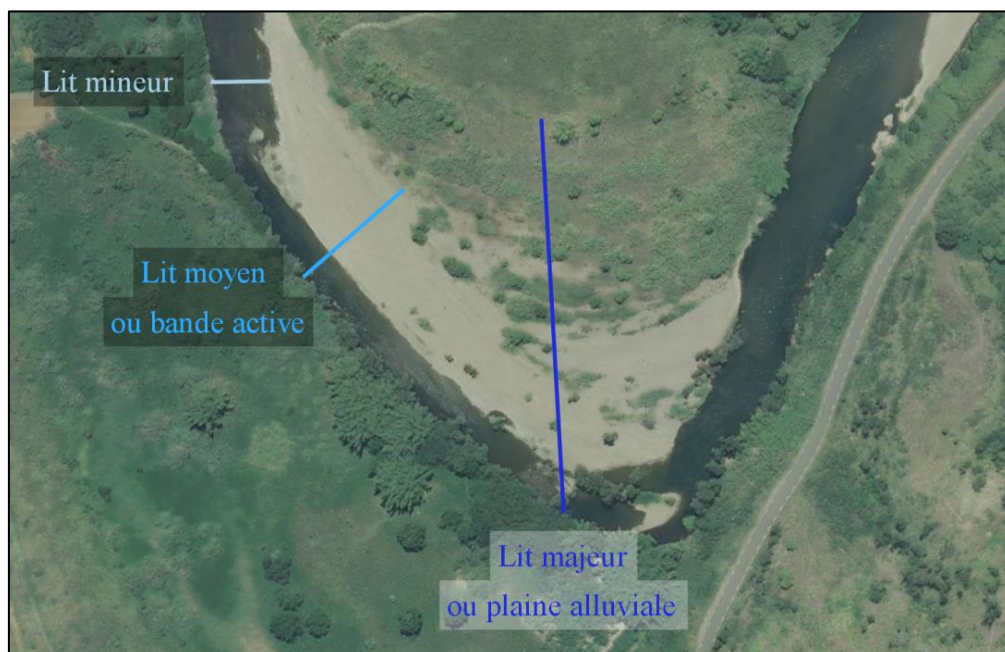


Figure 30 : Emprise des lits mineur, moyen et majeur (source : DITTT modifié)

Annexe 2

Détails du calcul de l'erreur sur la différence de largeur de bande active

A. Calculs sur les images dans le bassin versant de la Thio :

	Ecart-moyen planimétrique (m)		Erreur de digitalisation (m)	Erreur sur la détermination de la bande active (m)		Erreur sur la différence de largeur de bande active σ_{dL} (m)	
	Images dans l'emprise LiDAR	Images hors emprise LiDAR		Images dans l'emprise LiDAR	Images hors emprise LiDAR	Dans l'emprise LiDAR	Hors emprise LiDAR
1989	2,31	3,28	5,00	5,51	5,98		
1985	2,86	4,16		5,76	6,50	7,97	8,83
1976	2,57	3,23		5,62	5,95	8,05	8,81
1971	3,18	6,63		5,93	8,30	8,17	10,21
1954	3,37	7,93		6,03	9,37	8,46	12,52
1943	8,52			9,88		11,57	

B. Calculs sur les images dans le bassin versant de la Tôdré :

	Ecart-moyen planimétrique (m)	Erreur de digitalisation (m)	Erreur de détermination de la bande active (m)	Erreur sur la différence de largeur de bande active σ_{dL} (m)
1998	4,09	5,00	6,46	
1995	3,52		6,11	8,89
1985	7,04		8,63	10,57
1976	3,75		6,25	10,66
1971	3,26		5,97	8,64
1954	5,71		7,59	9,66
1943	5,83		7,68	10,80

Table des illustrations

Figure 1 : Localisation de la Nouvelle-Calédonie et identification des îles de l'archipel	1
Figure 2 : Relief de la Grande-Terre et précipitations moyennes annuelles 1991-2000	2
Figure 3 : Mines d'exploitation de nickel en Nouvelle-Calédonie.....	3
Figure 4 : Réseaux hydrographiques surengravés	5
Figure 5 : Style fluvial en méandres sur la rivière de la Fanama, Nouvelle-Calédonie	6
Figure 6 : Style fluvial en tresses sur la rivière de Hurunui, Nouvelle-Zélande.....	7
Figure 7 : Style fluvial divagant sur la rivière de la Thio, Nouvelle-Calédonie.....	7
Figure 8 : Présentation de la zone d'étude	13
Figure 9 : Emprise du levé LiDAR.....	18
Figure 10 : Position des points de contrôle de la campagne de 1985	26
Figure 11 : Paramètres des boxplots créés sous R.....	28
Figure 12 : Boxplots des écarts planimétriques sur les images orthorectifiées	30
Figure 13 : Boxplots des écarts planimétriques sur les images géorectifiées.....	31
Figure 14 : Orthoimages de 1976 avec un mode de texturation en mosaïque et moyen	32
Figure 15 : Orthoimages de 1989 avec un mode de texturation en mosaïque et moyen	32
Figure 16 : Images brutes de 1989 et heure des prises de vues correspondantes	33
Figure 17 : Largeur de la bande active de la Thio de 1954 à 2008 avant et après la confluence avec la Nakaré	34
Figure 18 : Largeur de la bande active de la Thio de 1943 à 2008.....	35
Figure 19 : Largeur de la bande active de la Nakaré et de la Néburu de 1954 à 2008	36
Figure 20 : Photos de la Nakaré en 1971 et 1976	37
Figure 21 : Largeur de la bande active de la Tomuru de 1943 à 2008	37
Figure 22 : Position des mines par rapport à la Tomuru en 1954 et 1971	38
Figure 23 : Largeur de la bande active de la Fanama et de la Tôdré.....	39
Figure 24 : Configuration du fond de vallée sur la Tôdré	40
Figure 25 : Localisation de l'emprise commune aux digitalisations de la Thio entre 1954 et 2008.....	41
Figure 26 : Tendances d'évolution de la bande active de la Thio entre époques successives de 1943 à 2008.....	42
Figure 27 : Fond de vallée sur une portion du bassin versant de la Thio	44
Figure 28 : Déplacement d'une vague sédimentaire sur la Thio entre 1976 et 1985	44
Figure 29 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Thio	46
Figure 30 : Emprise des lits mineur, moyen et majeur	53
Tableau 1 : Caractéristiques des prises de vues aériennes	16
Tableau 2 : Informations relatives aux traitements sur Photoscan©	24
Tableau 3 : Informations relatives aux traitements sur QGIS©	25

Résumé/Abstract

Résumé : Les exploitations minières à ciel ouvert de nickel en Nouvelle-Calédonie fragilisent beaucoup les massifs montagneux qui deviennent alors très sensibles aux phénomènes d'érosion. Or l'érosion sur ces sites d'exploitation, qui se trouvent en tête des bassins hydrographiques, et les pratiques d'extraction menées jusqu'aux années 1970 (mise en décharge des résidus d'exploitation) entraînent la production importante de matériaux, fins comme grossiers, transférés des creeks jusqu'au lagon. Ces apports conséquents en sédiments viennent donc perturber le fonctionnement et la morphologie de ces cours d'eau : ils contribuent à alimenter la charge solide des rivières qualifiées alors de « surengravées ». Les travaux présentés dans ce rapport se sont attachés à apporter des éléments de compréhension sur les dynamiques singulières de ces cours d'eau impactés par l'exploitation minière par la réalisation d'une analyse historique et spatiale de l'évolution de la bande active de rivières surengravées. Pour ce faire, des images aériennes anciennes datant de 1943 à 1989 ont été traitées par géorectification ou orthorectification, puis les bandes actives des rivières de l'étude ont été digitalisées sur chaque époque pour enfin en extraire leurs largeurs. De manière générale sur le bassin versant de la Thio, les apports sédimentaires semblent s'amenuiser progressivement, puisque les bandes actives montrent une rétraction significative. Mais il s'avère que l'étude de la bande active ne permet pas à elle seule d'expliquer ces dynamiques fluviales qui dépendent beaucoup des forçages hydro-météorologiques et des surfaces en sources sédimentaires connectées aux réseaux hydrographiques. Les résultats présentés dans ce rapport devront donc être complétés par ceux des autres études prévues dans le projet, et l'ensemble de ces données permettront de réaliser une étude plus complète sur le fonctionnement des rivières surengravées de la Nouvelle-Calédonie.

Mots-clés : surengravement, bande active, rétraction, élargissement, sédiment, photogrammétrie, géorectification, digitalisation.

Abstract : Opencast mining of nickel in New Caledonia is really damaging for mountain ranges which become highly susceptible to erosion. Erosion on these mining sites, which are located in upland catchments, and extraction practices carried out until the 1970s (dumping of exploitation wastes) lead to significant production of materials, as fine and coarse sediments, transferred from the creeks to the lagoon. These substantial contributions in sediments thus disrupt the dynamic and morphology of these rivers: they increase the bed load in rivers with massive aggradation and active channel widening. This study brings elements of understanding on the dynamics of these mine impacted rivers by analysing the historical and spatial evolution of the active channels. Archive aerial photographs from 1943 to 1989 were orthorectified or georectified and active channels were digitized at each date and their widths extracted. The Thio basin shows a progressive decrease in sediment supply, as active channels show significant narrowing. But it turns out that the study of the active channels can not alone explain these river dynamics that are highly dependent on hydro-meteorological forcing and sediment sources connected to the stream network. The results presented in this report will be complemented by other studies planned in the project, and all these data will conduct to a more comprehensive study on the functioning of rivers of New Caledonia impacted by mining activity.

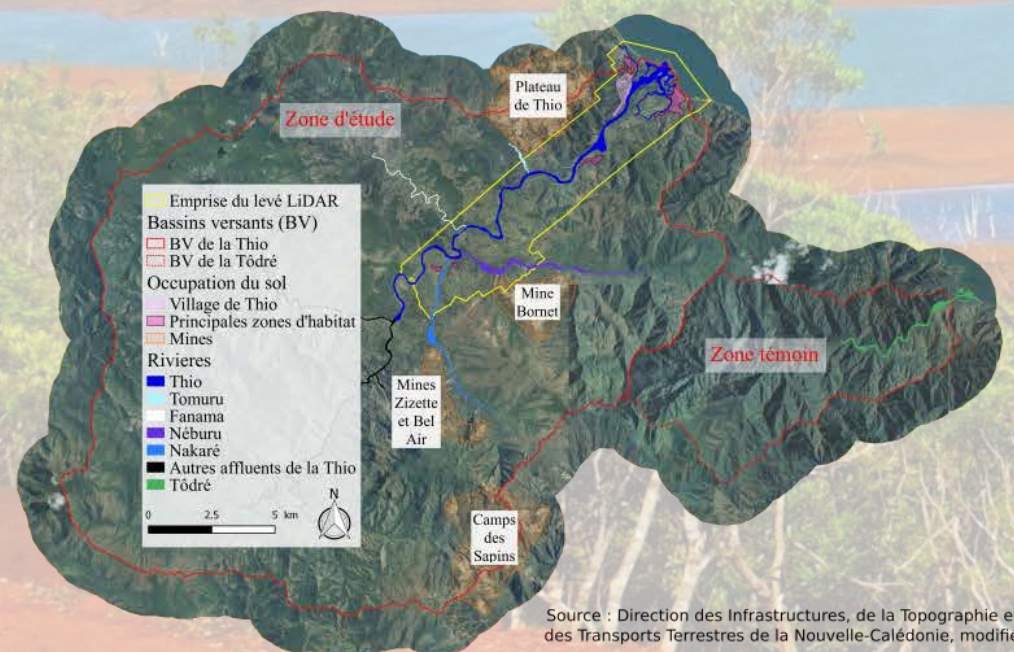
Keywords : massive sediment supply, active channel, narrowing, widening, sediment, photogrammetry, georectification, digitization.

Contexte du surengrèvement des rivières en Nouvelle-Calédonie

L'impact environnemental des **activités minières** en Nouvelle-Calédonie est une problématique majeure. Plusieurs facteurs favorisent la **production** de volumes conséquents de **sédiments** - fins comme grossiers - transférés vers les **rivières** jusqu'au **lagon**. Ces **facteurs** sont principalement les **exploitations à ciel ouvert** sensibilisant ainsi les sols à l'érosion, les forçages hydro-météorologiques (dépressions tropicales et cyclones) et les lacunes en matière de **gestion des résidus** d'exploitation qui ont perduré jusque dans les années 1970.



Ces **apports conséquents** de sédiments viennent donc **perturber** le fonctionnement et la morphologie des **cours d'eau** en contribuant à alimenter la charge solide des rivières qualifiées alors de "**surengravées**".

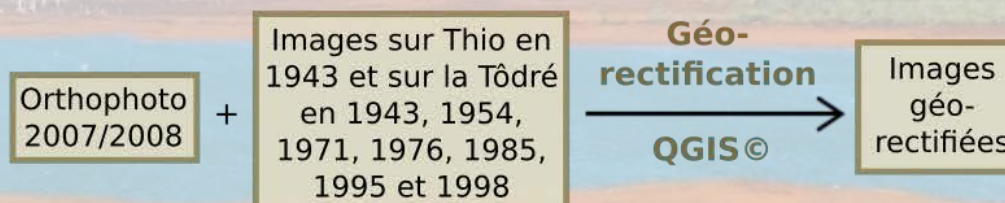
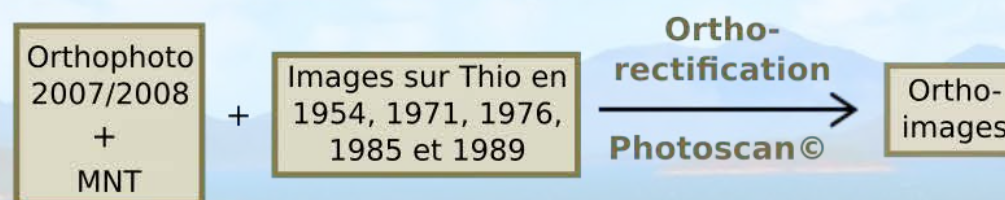


C'est dans ce contexte qu'un **projet** intitulé "Bassin versant : de la mine au lagon" a été lancé par le "CNRT Nickel et son environnement" afin de mieux comprendre les **dynamiques fluviales** des cours d'eau **impactés** par l'exploitation minière. L'IRSTEA a pris part à ce projet et l'étude présentée ici est une analyse historique de l'**évolution** des **largeurs** de la **bande active**¹ d'une rivière surengravée - la Thio - sachant que la bande active est une **variable** qui s'ajuste aux modifications d'**apports sédimentaires** et à la **capacité de transport** de l'eau. Afin de pouvoir tirer des conclusions de cette analyse, une rivière d'un bassin versant voisin et non impactée par les mines a été également étudiée en temps que "zone témoin".

Traitements réalisés

Pour ce faire des **images aériennes anciennes** datant de **1943** à **1989** ont été traitées par **géorectification** ou **orthorectification** puis les **bandes actives** ont été **digitalisées** sur chaque époque pour enfin en extraire les **largeurs** et les **analyser**.

Pour ces traitements une **orthophoto récente** (2007/2008) à 50 cm de résolution a servi de **référence planimétrique** et un **MNT** (Modèle Numérique de Terrain) à 1 m de résolution issu d'un levé LiDAR réalisé en 2012 a servi de **référence altimétrique** pour les traitements d'orthorectification des images dans le bassin versant de la Thio.



Précision des traitements sur les images

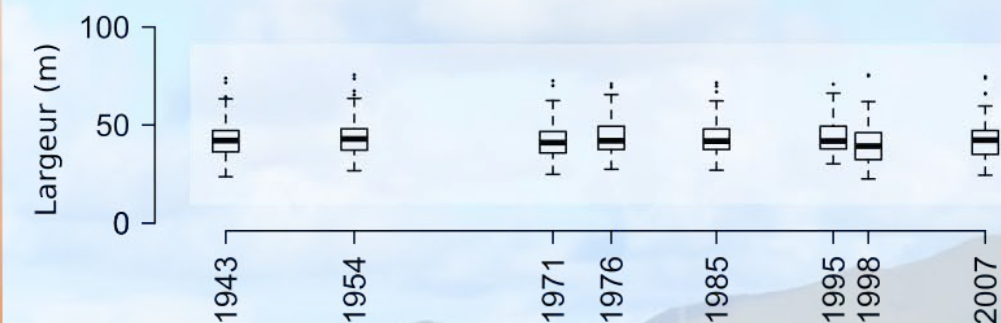
	Images dans le bassin versant de la Thio	Ecart-moyen planimétrique (m)		
		Orthoimages dans l'emprise LiDAR	Orthoimages hors emprise LiDAR	Images géo-rectifiées
1998				4,09
1995				3,52
1989	2,31	3,28		
1985	2,86	4,16		7,04
1976	2,57	3,23		3,75
1971	3,18	6,63		3,26
1954	3,37	7,93		5,71
1943				8,52 5,83

Les **écarts planimétriques** sont strictement **inférieurs à 10 m** et cette **précision** s'avère **suffisante** pour les **analyses projetées** et au regard de la précision des données traitées (taille de pixel au sol notamment).

¹ Bande active = chenal en eau + bancs alluviaux non végétalisés.

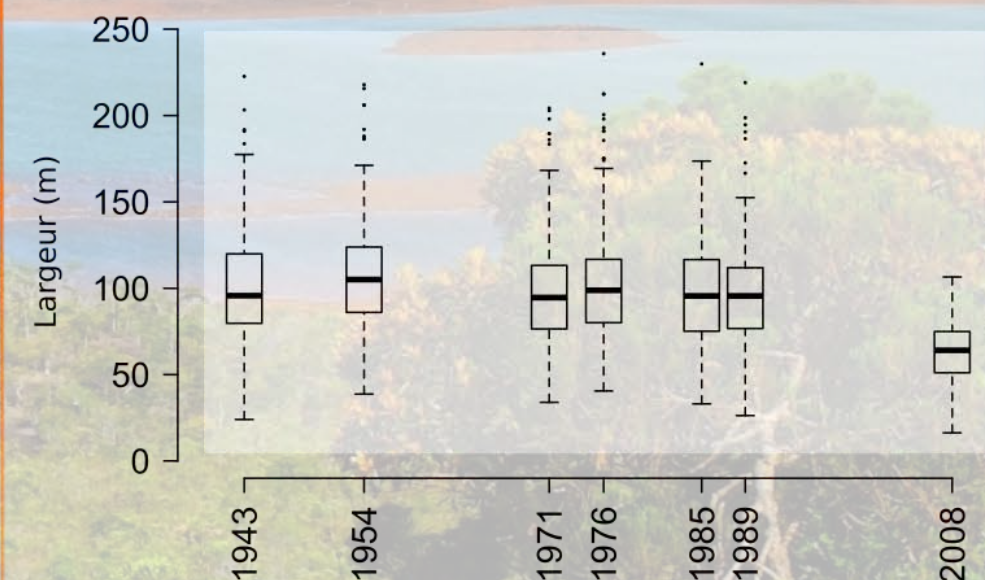
Analyse des largeurs de bande active

Largeur de la bande active de la rivière témoin la Tôdré de 1943 à 2007



L'étude de l'**évolution** de la largeur de bande active de la **Tôdré** permet de confirmer qu'elle présente un **fonctionnement naturel** puisqu'elle n'a quasiment pas évolué en l'espace de 64 ans.

Largeur de la bande active de la rivière d'étude la Thio de 1943 à 2008



L'**évolution** de la largeur de bande active de la **Thio** varie plus que celle de la Tôdré et ces **fluctuations** sont liées aux **tonnages de minerai extraits** - dépendants du cours du nickel - ainsi que de l'**intensité des forçages hydro-météorologiques** qui se sont produits entre ces époques.

On constate une forte tendance à la **rétraction** de la **bande active** entre **1989** et **2008**, conséquence probable des **règles environnementales** imposées aux mineurs au début des années 1970 (contrôle de la sédimentation, création de verses à stériles, ...).

Ainsi la **Thio** semble revenir vers un **fonctionnement naturel** et l'**analyse** de la bande active sur une **période plus récente** permettrait de **confirmer** cette **hypothèse**.