Rapport scientifique

Edition 2018

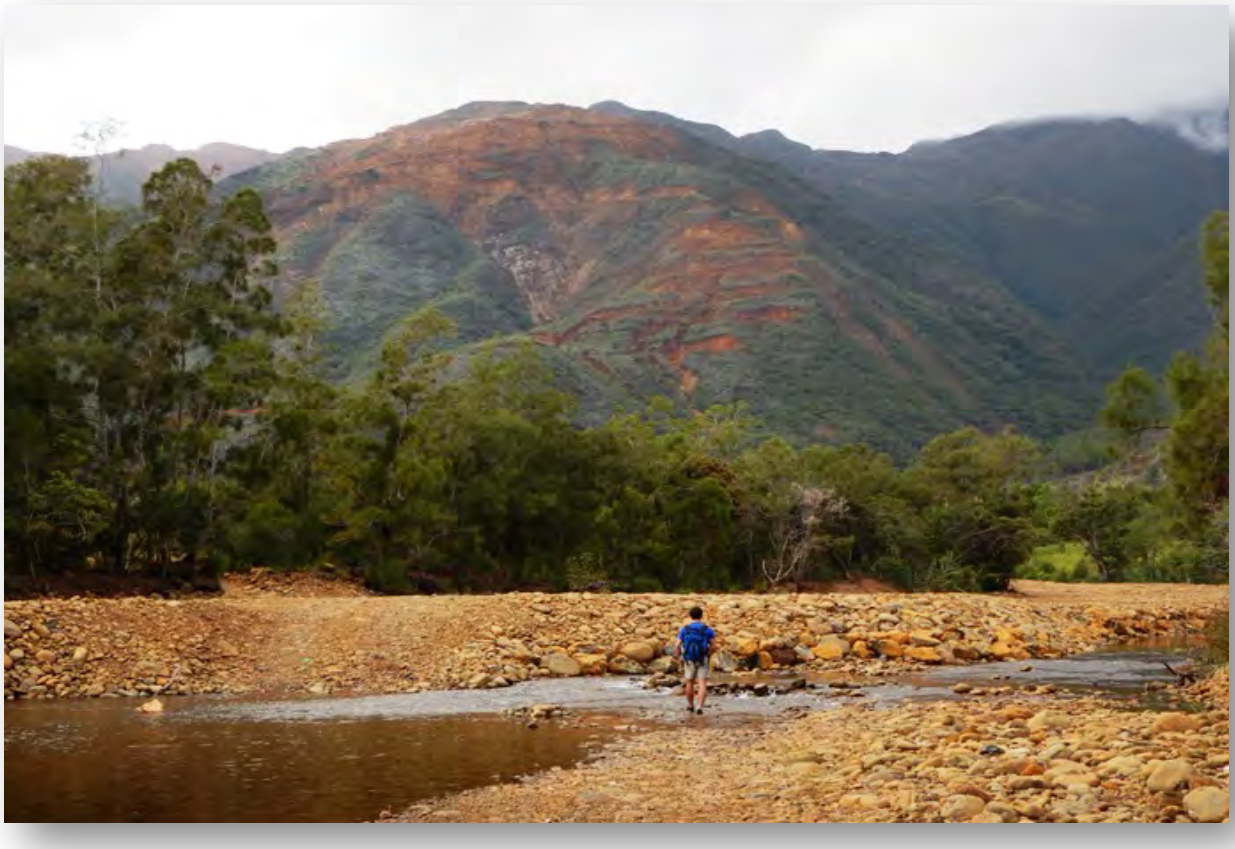
GESTION DU PASSIF DE L'ACTIVITE MINIERE

CNRT "Nickel et son environnement"

Tome Nickel et Envionnement

Rapport Scientifique
2018

GESTION DU PASSIF DE L'ACTIVITE MINIERE



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

Janvier 2018

« GESTION DU PASSIF »

Rapport scientifique

Décembre 2017

Ouvrage collectif coordonné par Manuel GARCIN (BRGM/DRP)

AUTEURS :

Manuel GARCIN (BRGM)

Didier RICHARD (Irstea) / Frédéric LIEBAULT (Irstea) / Alain RECKING (Irstea)

Guillaume PITON (Irstea) / Catherine SABINOT (IRD) / Elisabeth WORLICZEK (E.W.)

Stéphane LESIMPLE (DIMENC/SGNC) / Mélanie BERTRAND (Post-doc Irstea)

Yann GASTALDI (stagiaire BRGM) / Tom BURLAT (stagiaire Irstea)

Lucie GOSSET (Stagiaire IRD) / A-Tena PIDJO (Stagiaire IRD)

REVISION DU DOCUMENT

Réf.	**CSF n° 3PS2013-CNRT.BRGM/Gestion du passif du 05/05/2015**			
Version	**Date**	**Rédacteur(s)**	**Qualité du rédacteur(s)**	**Révision pour CNRT**
V1	30/01/2018	Garcin M., Richard D., Liébault F., Recking A., Piton G., Sabinot C., Worliczek E., Lesimple S., Bertrand M., Gastaldi Y., Burlat T., L. Gosset, A-T. Pidjo	Participants au projet Gestion du Passif Minier	France Bailly

CITATION DU DOCUMENT

Mots clés : Nouvelle-Calédonie, rivières, mines, nickel, sur-engravement, remédiation, décharges, érosion, transport solide, bande active, impact anthropique, migrations, adaptation, activités vivrières

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

Garcin M. et coll. (2017) – Gestion du passif minier – Rapport scientifique. CNRT « *Nickel & son environnement* ». 131 pages, 42 fig., 18 Tab.1 ann.

SOMMAIRE

1. SYNTHESE 11

2. PREAMBULE 12

3. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE 12

3.1. L'histoire du Nickel et la problématique de l'engravement 12

3.1.1. Contexte géologique 12
3.1.2. Bref historique minier du nickel de Nouvelle-Calédonie 14
3.1.3. Évolution des méthodes d'extraction 15
3.1.4. L'hyper-sédimentation dans les rivières calédoniennes : l'engravement et le sur-engravement .. 16

3.2. Impacts sur les populations et les enjeux 17

4. LE PROJET « GESTION DU PASSIF MINIER » 18

4.1. Objectif du projet 18

4.1.1. Caractériser l'engravement et le sur-engravement 18
4.1.2. Caractériser la dynamique actuelle du sur-engravement à partir de l'analyse de sa dynamique passée, comment envisager et surveiller son évolution future ? 19
4.1.3. Comment analyser les incidences sur les populations, les besoins et les perceptions des populations et des élus ? 20
4.1.4. Comment classer chaque site en fonction de la typologie élaborée dans le projet à partir des besoins / ressentis sociétaux et des critères physiques ? 20
4.1.5. Quelle remédiation est possible/ souhaitable/ durable pour un type de site donné (matrice type de problème / méthode / avantages et inconvénients) 20

4.2. Méthode suivie 20

4.3. Les campagnes de terrain 22

4.4. Communication et diffusion de l'information 24

4.5. Les stages et post-doc 25

5. ETAT DE L'ART 27

5.1. Transport sédimentaire 27

5.1.1. Typologie des cours d'eau 27
5.1.2. Typologie des modes de transport 28
5.1.2.1. Charriage et suspension 28
5.1.2.2. Laves torrentielles 30
5.1.3. Synthèse 32
5.1.4. Production sédimentaire à l'échelle d'un bassin versant 33

5.2. Morphodynamique des cours d'eau 35

5.2.1. L'équilibre morphologique dynamique 35
5.2.2. Les types morphologiques 37
5.2.3. Réponses morphologiques 39
5.2.4. Évolution du profil en long 43

5.3. Techniques et moyens de contrôle des flux sédimentaires 44

5.3.1. La correction des torrents 44
5.3.2. Stratégies de protection contre les risques torrentiels 45
5.3.2.1. Techniques de correction active 45
5.3.2.2. Les barrages de correction torrentielle 47

5.3.2.3. Méthodes de défense passive 48
5.3.2.4. Les plages de dépôt 50

5.4. Apports des Sciences Humaines et Sociales pour appréhender la question des perceptions des transformations environnementales 52

6. COMMENT CARACTERISER LE SUR-ENGRAVEMENT 53

6.1. LA BANDE ACTIVE COMME indicateur DES APPORTS MINIERS 53

6.2. Méthode 54

6.3. Eléments marquant les étapes du surengravement et de l'hypersédimenation dans les mémoires 59

6.3.1. Transformations observées par les populations dans les rivières et creeks 59
6.3.1.1. Diminution de la profondeur 60
6.3.1.2. Diminution de la ressource en poisson 61
6.3.2. Facteurs impliqués dans l'identification des transformations 61
6.3.2.1. Les phénomènes cycloniques et les fortes pluies 61
6.3.2.2. Les processus d'accumulation de sédiments et le changement climatique 62

7. COMMENT CARACTERISER LA DYNAMIQUE PASSEE DU-SURENGRAVEMENT 63

7.1. Objectif 63

7.2. évolution de la largeur de bande active de chaque segment d'une même rivière 63

7.3. évolution temporelle du volume des décharges minières dans le bassin versant et par sous-bassins 65

7.3.1. Objectif 65
7.3.2. Méthode 66
7.3.3. Résultats 67

7.4. Méthode d'analyse croisée 73

8. COMMENT ENVISAGER ET SURVEILLER L'EVOLUTION FUTURE DU SUR-ENGRAVEMENT ? 75

8.1. Objectif 75

8.2. Les indicateurs 75

8.2.1. Indicateurs physiques 75

9. COMMENT EVALUER LES INCIDENCES SUR LES POPULATIONS ET COMMENT ANALYSER LES BESOINS ET LES PERCEPTIONS DES POPULATIONS ET DES ELUS ? 77

9.1. Les différents indicateurs 77

9.1.1. Indicateurs socio-culturels et socio-participatifs 77
9.1.2. Indicateurs d'incidences sur l'habitat 78
9.1.3. Indicateurs d'incidences sur les cultures 79
9.1.4. Indicateurs d'incidences sur les déplacements 80
9.1.5. Indicateurs d'incidences sur les autres activités vivrières 80
9.1.6. Indicateurs de suivi du lit de la rivière 81

9.2. METHODES 82

9.3. Typologie des aménagements 89

10. UNE REMEDIATION A QUOI, POUR QUOI ? 90

10.1. Quels objectifs, pour quels enjeux ? 90

10.2. Quels ouvrages pour quelles fonctions ? 92
10.2.1. Quels processus hydro-sédimentaires (production / transfert ; eau / sédiments ; sédiments grossiers / sédiments fins) peut-on essayer d'influencer ? 92
10.2.2. Quels sont les ouvrages, aménagements et interventions qui sont susceptibles d'être mobilisés ? 93
10.2.2.1. Synthèse des retours d'expérience 93
10.2.2.2. Particularités néo-calédoniennes 94
10.2.3. Quelles fonctions remplissent ces différents O/A/I ? 98
10.2.3.1. Sur mine 98
10.2.3.2. Sur les cours d'eau 101
10.2.4. Quelles perceptions en ont les populations, les élus ? 105
10.2.4.1. Perception de la problématique d'engravement par les élus 105
10.2.4.2. Une gestion complexe et source de malentendus 107

11. DEMARCHE GLOBALE D'ELABORATION D'UNE STRATEGIE DE REMEDIATION 110

11.1. Les démarches de remédiation 110
11.1.1. Démarche de remédiation générique 110
11.1.2. Démarche de remédiation des bassins versants 111
11.1.3. Démarche de remédiation prenant en compte les contraintes socio-anthropologiques et physiques 114

11.2. Points de vigilance 115
11.2.1. Dimensionnement 115
11.2.2. Ordre des travaux 116
11.2.3. Le curage de biefs : une intervention qui pose question 116
11.2.4. Défauts et pathologies constatés 117
11.2.4.1. Mobilité des enrochements 117
11.2.4.2. Étanchéité et hydraulique souterraine 118
11.2.4.3. Érosion régressive ou locale 118
11.2.4.4. Affouillement 119

11.3. Perspectives 119

12. REFERENCES 121

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC/SGNC) *14*
Figure 2 : Courbes annuelle (vert) et cumulée (rouge) de la production de nickel pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie (données DIMENC/SMC) *15*
Figure 3 : Courbes annuelle (rouge) et cumulée (violet) des stériles miniers produits de 1904 à 2002 pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie (données DIMENC/SMC) *16*
Figure 4 : Méthode suivie dans le projet *21*
Figure 5 : Localisation des sites visités *23*
Figure 6 : Schéma des modes de transport (d'après Graf et Altinakar) *29*
Figure 7 : Composition d'une lave torrentielle *31*
Figure 8 : Les types de crues en fonction des types de cours d'eau et les types de transports solides en fonction de la pente et de la concentration en sédiments (d'après Besson et Meunier, 1995) *32*
Figure 9 : Typologie des sollicitations exercées par les écoulements torrentiels (d'après Carladous) *33*
Figure 10 : Les processus de production sédimentaire à l'échelle du bassin versant (d'après Brochot) *34*
Figure 11 : Processus de production sédimentaire sur les versants (d'après Brochot) *35*
Figure 12 : La balance morphologique illustrant le concept d'équilibre morphologique (modifié d'après Lane 1955 et Borland 1960) *36*
Figure 13 : Continuum des styles morphologiques de montagne sur le gradient amont-aval *38*
Figure 14 : Réponse morphologique au déboisement des versants en Nouvelle-Zélande. *40*
Figure 15 : Modèle d'ajustement du lit sous l'effet de la propagation d'une vague sédimentaire, inspiré des observations réalisées dans le bassin versant de la Sacramento impacté par l'activité minière (James, 2006). .. *41*
Figure 16 : Évolution des bandes actives *42*
Figure 17 : Principe de la dépendance amont/aval (Richard, d'après Bezzola, Schilling, Oplatka ; 1996) *44*
Figure 18 : Principales techniques de correction active (source RTM 05) *46*
Figure 19 : Fonctions des barrages de correction torrentielle (Piton, 2016) *47*
Figure 20 : Principales techniques de défense passive (source RTM 05) *49*
Figure 21 : Schéma d'une plage de dépôt type (source Piton et Recking, 2016a) *50*
Figure 22 : Largeur de bande active en fonction de la surface drainée *56*
Figure 23 : Résidus des sites impactés au modèle statistique dit « naturel », expliqués par la proportion des sources sédimentaires minières majeures (RE) *57*
Figure 24 : Spatialisation de l'indicateur de surengravement - Résidus au modèle naturel *58*
Figure 25 : Évolution de la largeur de bande active de la Tomuru, affluent de rive gauche de la Thio, entre 1943 et 2015 ..... *65*
Figure 26 : Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volumes de stérile minier mis en décharge *67*
Figure 27 : Tonnage de stériles produit dans les sous bassin versant de la Thio (la ligne verticale en tiret noir correspond à l'année 1975, date de la mise en œuvre du code minier interdisant la mise en décharge des stériles). *68*
Figure 28 : Courbe cumulée de tonnage de stérile (en millions de tonnes) par sous bassin versant de la Thio *69*
Figure 29 : Évaluation du volume de stériles mis en décharge sur l'ensemble du bassin versant de la Thio *69*
Figure 30 : Tonnage de stérile total mis en décharge par bassin versant (t) *70*
Figure 31 : Apport spécifique total de stérile mis en décharge en tonnes/hectare par bassin versant *71*
Figure 32 : Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau *73*
Figure 33 : Liens entre l'apport de stériles en décharge et l'évolution de la bande active (exemple du Creek Tomuru) *74*
Figure 34 : Sens d'écoulement de l'eau durant les inondations de 2016 à Saint-Michel (I. Rouet) *78*
Figure 35 : Schéma relatif aux différentes étapes d'une étude pour comprendre le contexte socio-environnemental *88*
Figure 36 : Processus de formation des crues avec transport solide (d'après Brochot) *92*
Figure 37 : Interactions entre phase liquide et phase solide *93*
Figure 38 : Proposition de décomposition particulière des bassins versants miniers néocalédoniens *96*
Figure 39 : Graphe de présentation de la démarche globale d'élaboration d'une stratégie de remédiation (Carladous, 2016) *111*
Figure 40 : Les quatre grandes phases de la définition d'une stratégie de remédiation (Piton et al, 2016) *112*

Figure 41 : Logigramme d'aide à la décision pour l'élaboration de stratégies de remédiation 113
Figure 42 : Démarche globale de la stratégie de remédiation du surengravement prenant en compte les contraintes socio-anthropologiques et physiques 115

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des contacts mobilisés pour l'organisation des visites de retour d'expérience 24
Tableau 2 : Classification des types de cours d'eau (d'après Surell, 1841, limites basses reprises de Lefort 1996) 27
Tableau 3 : Fonctions des barrages de correction torrentielle selon leurs caractéristiques et leur localisation (d'après Piton, 2016) : 48
Tableau 4 : Typologie des sources sédimentaires adoptée pour la cartographie des zones de production sédimentaire des 149 bassins versants utilisés dans l'analyse régionale de la bande active 55
Tableau 5 : Campagnes de photographies aériennes utilisées sur la Thio et la Todré pour l'analyse diachronique des bandes actives (source : Drain 2016) 64
Tableau 6 : Contexte et enjeux spécifiques des tribus de St Pierre, St Paul et St Michel 83
Tableau 7 : Tableau thématique descriptif précisant les impacts des engravements, de l'hypersédimentation et des inondations 85
Tableau 8 : Caractérisation des déplacements des tribus de St. Pierre, St. Paul et St. Michel 86
Tableau 9 : Type et terminologie des boues selon les habitants 87
Tableau 10 : Les types d'ouvrages, leurs perception par la population et leur caractéristiques 89
Tableau 11 : Localisations privilégiées des différents processus de formation des crues 97
Tableau 12 : Mesures mobilisables sur mine 98
Tableau 13 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Pistes-fossés-décanteurs » 99
Tableau 14 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Décharges » 100
Tableau 15 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Versants » 101
Tableau 16 : Mesures mobilisables sur les cours d'eau 102
Tableau 17 : Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Versants » 102
Tableau 18 : Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Biefs » 104

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

Organismes	
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
DAVAR	Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales de Nouvelle-Calédonie
DIMENC	Direction de l'Industrie des Mines et de l'Environnement de Nouvelle-Calédonie
DITTT	Direction Territoriale de la Topographie, des Infrastructures et des Transports
EW	Elisabeth Worliczek Consultant
IRD	Institut de Recherche et Développement
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
SGNC	Service de la Géologie de Nouvelle Calédonie (DIMENC)
SMC	Service Mines et Carrières (DIMENC)
Signification des abréviations	
AIC	Critère d'information d'Akaike
BV	Bassin versant
CS	Charge solide
GDPL	Groupement de Droit Particulier Local. *Statut créé en 1982 et propre à la Nouvelle-Calédonie*
GDPS	Global Differential Positioning System - topographie
MNT	Modèle Numérique de Terrain
REX	Retour d'expérience
RMSE	Root Mean Square Error / Erreur moyenne quadratique - *écart de la prédiction par rapport à la valeur réelle*

1. SYNTHESE

Sur la Grande -Terre de Nouvelle-Calédonie, les anciennes décharges minières et les sols mis à nus par les exploitations ont largement contribué, et contribuent encore, à alimenter en débris rocheux (charge solide) les cours d'eau, au point que certains cours d'eau sont considérablement engravés. Ce sur-engravement a, entre autres, pour conséquence une remontée et l'élargissement des lits des rivières et des creeks augmentant ainsi l'aléa inondation et les risques pour les personnes et les biens. Il entraîne de surcroit une altération des écosystèmes aquatiques, une détérioration des alimentations en eau potable, des apports de boue sur les cultures lors des inondations, des endommagements des voies de communication et affecte pratiques et activités coutumières.

L'objectif du projet « Gestion du Passif minier » financé par le CNRT, est d'élaborer un guide méthodologique visant à aider la mise en place de remédiations au phénomène de sur-engravement qui soit adapté à chaque contexte local. La remédiation du fait de son interaction avec la société et les populations ne saurait être abordée, pour être efficace, que sous ses aspects techniques. C'est pourquoi, une approche conjointe mettant en œuvre des sciences physiques et humaines a été mise en œuvre.

Il est probablement illusoire d'imaginer ramener les cours d'eau engravés de Nouvelle-Calédonie à l'état dans lequel ils étaient avant le début de l'activité minière. Sans parler de la difficulté à caractériser ce que devrait être cet « état initial », un retour à cet hypothétique état est a priori hors de portée des capacités technico-économiques mobilisables. L'objectif de « remédiation » doit donc plutôt s'entendre comme permettant d'atteindre ou de retrouver un état des cours d'eau, pas forcément identique à un état antérieur réputé « initial », mais qui puisse être jugé comme « satisfaisant ».

Dans un premier temps, est présenté un état de l'art des connaissances sur les phénomènes et processus de transport sédimentaire affectant les rivières et les principes qui conduisent à leur évolution. Ensuite, les différentes techniques de contrôle sédimentaire dans les rivières et torrents mise en œuvre en Nouvelle-Calédonie, en France et dans le monde sont décrites. Enfin, un point sur les travaux et recherches déjà réalisés sur les perceptions par les populations des changements environnementaux est effectué.

Le rapport est ensuite consacré à fournir des éléments méthodologiques et de réponses à certaines questions induites par la problématique du sur-engravement : comment le caractériser ? Comment évolue-t-il dans le temps ? Comment surveiller son évolution future ? Comment évaluer les incidences sur les populations et comment analyser les besoins et perceptions des populations et des élus ? Pour répondre à ces questions des méthodes sont proposées et font intervenir des techniques variées et complémentaires.

Les chapitres suivants sont consacrés aux actions de remédiation. En premier sont présentés :

- les objectifs à atteindre en fonction des enjeux,
- les actions à entreprendre pour contrôler les processus aboutissants au sur-engravement.

Ensuite, une synthèse sur les actions de remédiation sur l'ensemble du territoire est présentée. Elle présente les particularités néo-calédoniennes, les différents types d'actions possibles en fonction de leurs fonctions et de leurs localisations (sur le bassin versant, sur mine, sur cours d'eau etc.).

Une démarche globale de remédiation est proposée, elle présente les différentes étapes nécessaires au choix du/ des dispositifs. Les points de vigilance à prendre en compte lors de sa mise en œuvre y sont détaillés (dimensionnement, ordre des travaux). Les défauts, défaillances et pathologies constatés lors du retour d'expérience y sont présentés.

Enfin, les perspectives concernant cette problématique sont présentées. D'un point de vue réglementaire la mise en œuvre d'instruments de type Plans de Prévention des Risques d'Inondation pourrait être un outil de conciliation des intérêts parfois divergents entre les parties prenantes et d'anticipation des situations afin de réduire les nuisances et les risques. Par ailleurs, la complexité et le nombre de phénomènes et processus intervenant dans le sur-engravement tout comme la variabilité de chaque site et bassin versant pourrait bénéficier des développements récents dans la modélisation du fonctionnement hydro-sédimentaire. Enfin, avant toute action de remédiation, une analyse coûts-bénéfices devrait être conduite. Des analyses coûts-bénéfices sont testées depuis peu dans le domaine des risques torrentiels, même si elles demandent encore certains développements. Ce type d'analyse pourrait être réalisé après une phase d'adaptation au contexte néo-calédonien.

2. PREAMBULE

Le champ d'application de ce rapport est limité à l'engravement dans les creeks et les rivières. Il n'a pas vocation à traiter du transport en suspension des particules fines ni de la problématique de l'hypersédimentation dans les zones estuariennes.

Il est accompagné d'un guide pour la gestion du passif minier en cours de rédaction.

3. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE

3.1. L'HISTOIRE DU NICKEL ET LA PROBLEMATIQUE DE L'ENGRAVEMENT

3.1.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

La « Grande Terre » de la Nouvelle-Calédonie est située sur la ride de Norfolk s'étendant de l'atoll de la Surprise jusqu'au nord de la Nouvelle-Zélande. C'est une relique d'un bloc

continental détaché du Gondwana à la fin du Crétacé (85 Ma[1]) lors de la mise en place d'un bassin d'arrière-arc. Les âges des formations du « socle » de la Nouvelle-Calédonie sont compris entre le Carbonifère (300 Ma) et le Crétacé inférieur (100 Ma). Elles sont constituées en majeure partie de roches sédimentaires et volcaniques. Soumis initialement à une subduction[2] de la plaque Pacifique sous la plaque Australienne, le bloc continental subit un changement de régime tectonique. Une subduction de la plaque Australienne sous la plaque Pacifique est alors amorcée entre 55 et 40 Ma. Ce changement de régime tectonique serait à l'origine de la formation d'un alignement d'édifices volcaniques constituant le soubassement des îles Loyautés. Celles-ci sont actuellement entièrement couvertes par des formations carbonatées récifales et péri-récifales. Entre 40 Ma et 30 Ma, la subduction se trouve bloquée par l'arrivée de la masse continentale que représente la ride de Norfolk. S'opère alors un soulèvement des formations constituant la croûte océanique par un phénomène d'obduction[3]. Cette obduction est responsable de la présence de roches métamorphiques à l'affleurement dans le Nord de la Grande-Terre et du charriage de roches du manteau (péridotites) sur la ride.

Les péridotites sont ensuite soumises à l'altération qui entraîne leur fragmentation et leur érosion ; elles forment aujourd'hui des massifs importants tels que le massif du Sud (MS) ou des klippes[4] telles que le massif du Koniambo (Kn) ou le massif de Tiébaghi (T) (Figure 1). Durant la phase d'altération, l'olivine (constituant majeur des péridotites) est soumise à un lessivage entraînant une importante élimination de magnésium (Mg) et de silice (Si) et une augmentation des concentrations en éléments résiduels tels que le fer (Fe), le chrome (Cr) et le nickel (Ni) dans le profil d'altération. C'est cette concentration importante en métaux qui fait de ces massifs des gisements potentiellement exploitables et qui est à l'origine de l'importante activité minière de la Nouvelle-Calédonie.

[1] *Ma : Million d'années*
[2] *Enfoncement d'une croute océanique sous une croute continentale*
[3] *Chevauchement d'une croute océanique sur une croute continentale*
[4] *Portion d'unité tectonique allochtone (nappe de charriage), isolée du reste de celle-ci du fait de l'érosion*

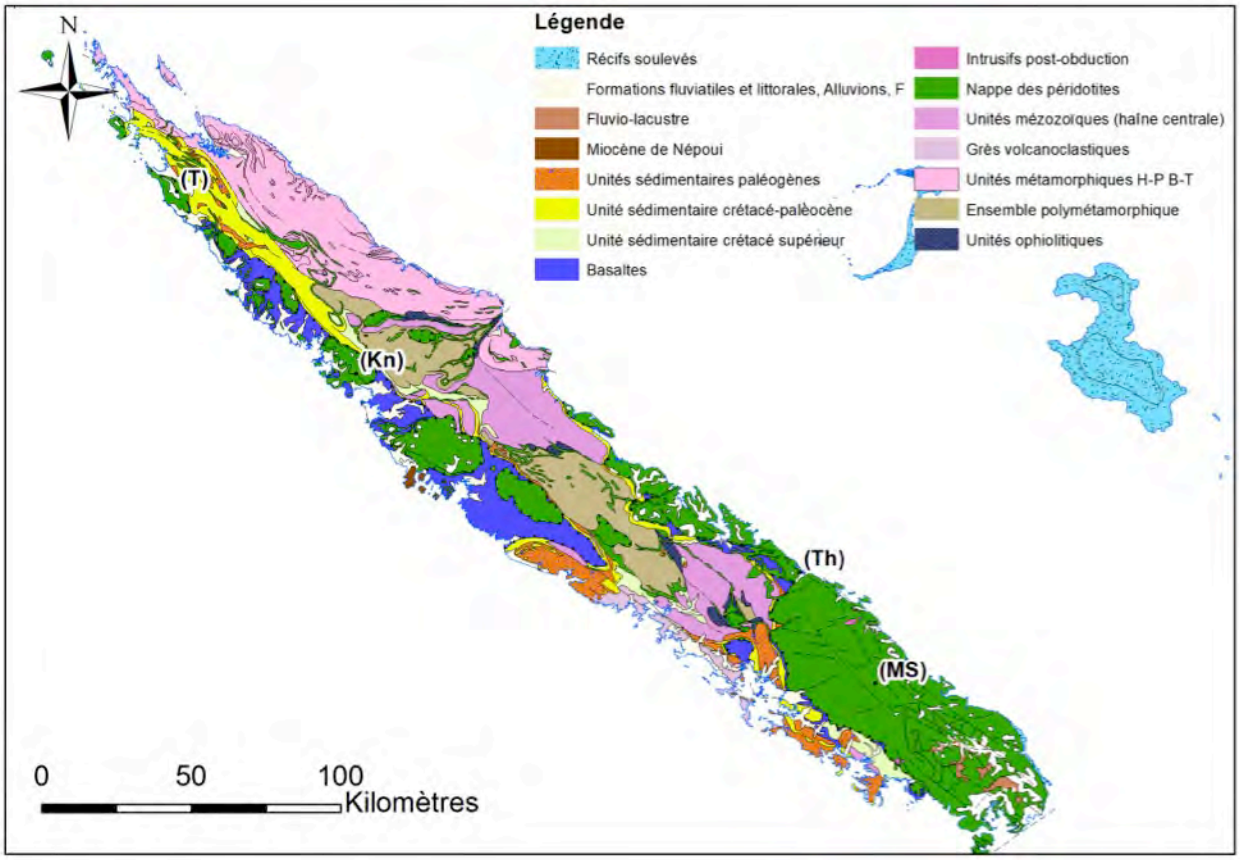


Figure 1 : Carte géologique simplifiée de la Nouvelle-Calédonie (DIMENC/SGNC)

3.1.2. BREF HISTORIQUE MINIER DU NICKEL DE NOUVELLE-CALEDONIE

La production minière historique en Nouvelle-Calédonie a concerné l'or et les métaux de base (plomb, cuivre, zinc) dans les roches métamorphiques et le cobalt et le chrome dans les roches ultrabasiques. Actuellement, l'activité minière est exclusivement liée à l'exploitation du nickel. C'est à partir de la découverte en 1864 du silicate de nickel par l'ingénieur Jules Garnier que l'exploitation des premiers filons de « garniérite » est amorcée en Nouvelle-Calédonie. L'extraction est dans un premier temps manuelle, au pic ou à la pince, avec une production de minerai à forte teneur mais peu importante. Dès 1877, la mise au point d'une métallurgie adaptée à ces minerais va permettre de développer l'exploitation en valorisant le minerai localement grâce à la mise en place de la première fonderie sur Nouméa (pointe Chaleix). L'exploitation encore « manuelle » demande énormément de main-d'œuvre et va être à l'origine d'une importante migration de populations d'origines diverses (Asie, Europe, Polynésie) qui se substitue peu à peu aux travailleurs forcés (jusqu'en 1903). Au lendemain de la seconde guerre mondiale, la suppression des contrats d'engagés va permettre le développement de la mécanisation et ainsi augmenter la production de façon significative. Entre 1963 et 1972, la forte demande mondiale en nickel va avoir pour conséquence une augmentation très forte de la production de nickel néo-calédonien qui va passer de 2,5 à 7,7 millions de tonnes de minerai. C'est cette période que l'on nommera le « Boom du nickel » (Figure 2). Les années suivantes, l'effondrement des cours conduit à une réduction de la production qui atteint alors son plus bas niveau en 1983 avec 2,2 millions de tonnes de minerai. La faible croissance de la production en minerai à

partir de 1984 sera accompagnée par une exploitation du minerai latéritique. Celle-ci sera conditionnée par une évolution des techniques de traitement et le développement d'usine directement sur le territoire.

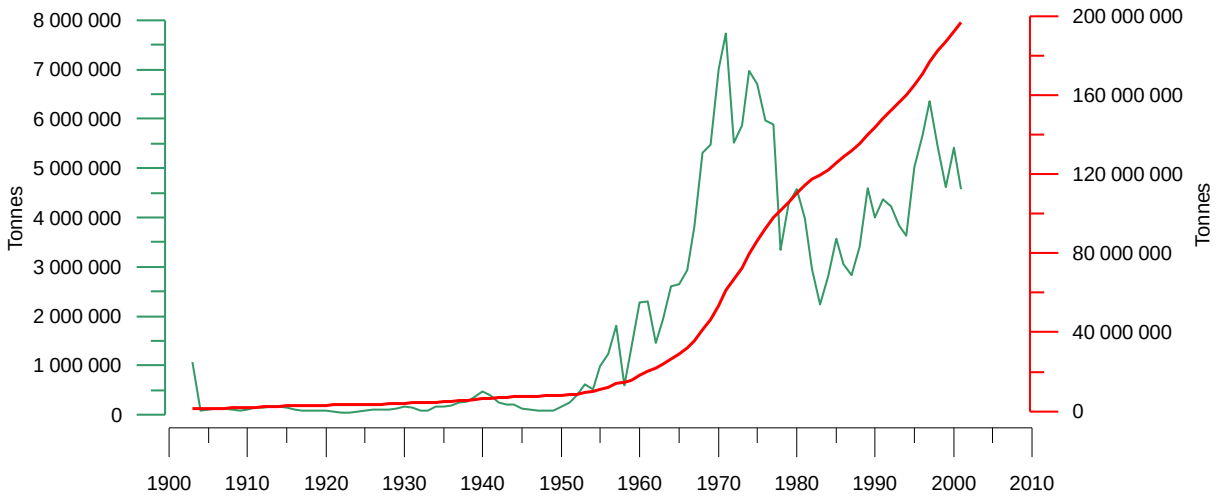


Figure 2 : Courbes annuelle (vert) et cumulée (rouge) de la production de nickel pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie (données DIMENC/SMC)

3.1.3. ÉVOLUTION DES METHODES D'EXTRACTION

Initialement, l'exploitation de garniérite puis de minerai de nickel a été réalisée manuellement avec un tri du minerai directement sur site. Cette méthode d'extraction était réalisée en surface, à partir de minerai à forte teneur et avec une faible production. De fait, elle générait peu de stérile et son impact était localisé et limité aux zones d'exploitation. C'est après la seconde guerre mondiale, à partir de 1946, que la mécanisation permet le développement et l'extension des exploitations conduisant à une augmentation significative de la production. Conditionnée par une forte demande mondiale en nickel, la diminution de la teneur de coupure va permettre d'extraire du minerai plus en profondeur et sur des surfaces beaucoup plus importantes. Le ratio[5] d'extraction ne cessera d'augmenter par la réduction des coûts d'exploitation entraînant une augmentation des quantités de stérile produit. En l'absence de règlementation environnementale, le « stérile » minier est alors déversé directement sur les versants en contrebas des mines (Figure 3). C'est à partir de 1975, suite à la mise en application de la loi du 15 juillet réglementant l'élimination des déchets miniers, que les produits non valorisables ne seront plus déversés dans les décharges minières mais seront stockés sous forme de verses. À partir de cette date, le rejet en versant de massif est considéré comme nul même si les quantités de minerai produit continuent d'augmenter.

[5] *Le ratio correspond au rapport de volume de stérile à extraire pour produire un volume de minerai. Exemple un ratio de 2 correspond à 2 volumes de stérile extrait pour produire 1 volume de minerai*

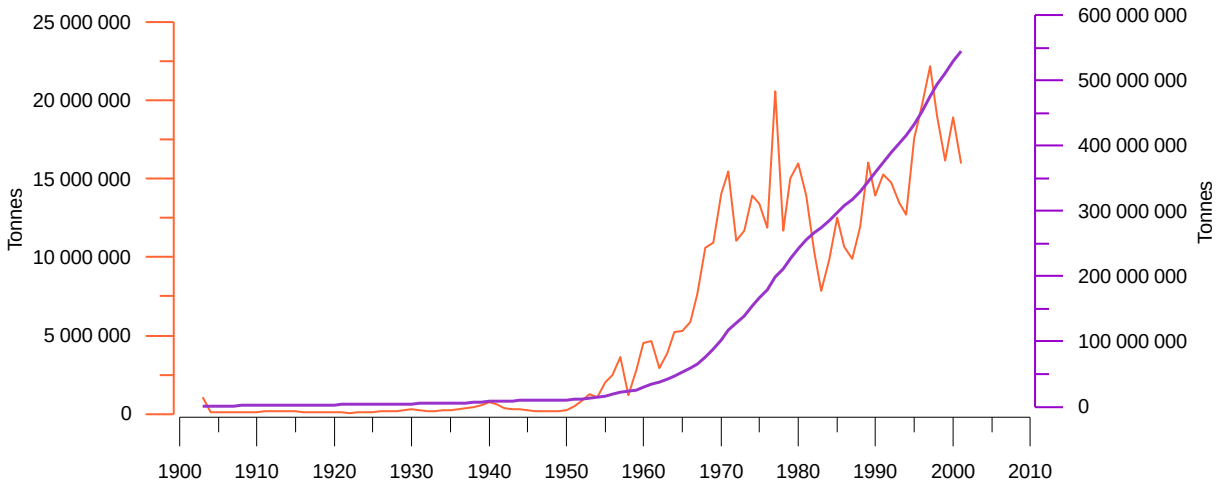


Figure 3 : Courbes annuelle (rouge) et cumulée (violet) des stériles miniers produits de 1904 à 2002 pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie (données DIMENC/SMC)

3.1.4. *L'HYPER-SEDIMENTATION DANS LES RIVIERES CALEDONIENNES : L'ENGRAVEMENT ET LE SUR-ENGRAVEMENT*

Les anciennes décharges minières et les sols mis à nu par les exploitations ont largement contribué, et contribuent encore, à alimenter en charge solide les rivières, au point que certains cours d'eau sont considérablement engravés[6] et qu'une hyper-sédimentation en fines est constatée par exemple au niveau de certains estuaires (e.g. Bird et al. 1984 ; Allenbach & Hoibian 2002 ; Garcin et al. 2013). Ce sont ces décharges minières et les surfaces de sols nus qui fournissent en grande partie les matériaux que nous retrouvons dans les rivières. Nous les qualifierons de « zones sources » dans la suite du document.

Alors que beaucoup d'études ou de recherches se sont focalisées sur les impacts et incidences des exploitations minières de nickel sur le lagon (Ambatsian et al. 1997; Debenay & Fernandez 2009; Fernandez et al. 2006; Hédouin et al. 2008 ; Metian et al. 2008; Migon et al. 2007), assez peu se sont penchées sur l'impact morphologique sur les cours d'eau calédoniens (Bird et al. 1984 ; Iltis & Crozier 1986 ; Garcin 2009, 2010 ; Garcin & Lesimple 2013), quelques-unes sur l'évaluation des sols nus et leur érodabilité (Despinoy et al. 2012 ; Dumas & Cohen 2014) ou l'impact sur le littoral (Garcin et al. 2013) et aucune sur la quantification des apports issus des stériles mis en décharge à l'échelle d'un bassin versant.

Dans le détail le sur-engravement des rivières et des creeks calédoniens est varié et est influencé par un certain nombre de paramètres qui contrôlent son intensité et ses

[6] *On parle dans ce cas de sur-engravement*

caractéristiques (Garcin 2009, 2010, Garcin & Lesimple 2013, Garcin et al. 2016). Ces paramètres sont :

- La géologie du bassin versant et notamment les surfaces respectives de chaque lithologie,
- L'hydrographie, la morphologie du cours d'eau et la topographie des versants, les connectivités (changeantes…) entre versants et lits,
- La position de chaque segment de rivière par rapport aux zones sources (décharges minières),
- L'évolution temporelle des surfaces des zones sources (extension des domaines miniers) mais aussi des volumes déversés dans les anciennes décharges minières,
- La complexité de la distribution de ces zones sources sur le bassin versant, et leurs connectivités hydrauliques,
- La chronique météorologique passée (séquence de cyclones et de dépressions tropicales) contrôlant les débits moyens mais surtout les débits extrêmes qui vont conditionner le déplacement vers l'aval des sédiments (Iltis et Crozier 1986).

3.2. IMPACTS SUR LES POPULATIONS ET LES ENJEUX

Les représentations que les habitants et les membres des collectivités publiques ont de l'engravement (l'accumulation de « *caillasse* » pour reprendre des termes localement utilisés) et de l'hypersédimentation (l'accumulation de sable et de vase), peuvent être mises en exergue à partir d'entretiens. A Thio, par exemple, les entretiens que nous avons menés ont permis de mettre en exergue que si ces deux phénomènes sont distingués dans leur processus, la raison principale qui en fait des processus problématiques du point de vue des habitants repose sur les inondations produites. Les mémoires de Master d'A. Pidjo et L. Gosset ayant travaillé dans les tribus de la chaîne comme dans celles de l'estuaire détaillent ce propos et listent de nombreux témoignages illustrant cette considération (Gosset 2016, Pidjo 2016).

4. LE PROJET « GESTION DU PASSIF MINIER »

4.1. OBJECTIF DU PROJET

L'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet « *Gestion du Passif Minier* » avait pour objectif la production d'un guide méthodologique balayant les différents aspects du sur-engravement des cours d'eau calédoniens lié aux activités minières. Il s'agissait de répondre à plusieurs questionnements ayant trait à la spécificité de l'engravement des rivières et creeks de Nouvelle-Calédonie et de fournir soit des méthodes soit des approches permettant de prendre en compte cette problématique et de fournir des éléments permettant de conduire au mieux à sa remédiation et à sa gestion.

Les dimensions de la problématique du sur-engravement sont nombreuses (sociale, culturelle, environnementale). Ces dimensions ont été l'objet de la recherche dans les sciences humaines et sociales, les sciences physiques et les sciences de la Terre et environnementales.

L'objectif de ce guide n'est pas de fournir des solutions standardisées « clé en main » mais plutôt de fournir des éléments méthodologiques et de réponse à un certain nombre de questions. Ces réponses permettront d'adopter les stratégies de remédiation, ou plus généralement de gestion des flux sédimentaires, les plus adaptées à chaque contexte tout en connaissant leurs limites et contraintes et en tenant compte des attentes et des besoins formulés par la population.

4.1.1. CARACTERISER L'ENGRAVEMENT ET LE SUR-ENGRAVEMENT

La première question est de définir les critères permettant de dire qu'un cours d'eau est sur-engravé et d'en évaluer le degré ou l'intensité. Cette question apparemment simple s'avère complexe à résoudre. En effet, le sur-engravement peut être défini comme une anomalie résultant d'une hyper-sédimentation liée aux activités minières par rapport à un état de « référence » supposé naturel. Dans un fonctionnement naturel, l'état des lits reflète le contexte géologique, géomorphologique et hydrologique du bassin ainsi que les processus naturels actifs qui contribuent à l'apport en matériaux (tel que les glissements de terrains par exemple). Or, dans les systèmes Néo-Calédoniens actuels, très peu peuvent être considérés comme naturels. Ainsi, en dehors des mines, l'impact anthropique est loin d'être négligeable. Il est lié par exemple à l'utilisation des sols (à la déforestation et à la mise en culture et en pâturage), à l'occurrence des incendies, à l'introduction puis au développement d'espèces exogènes ayant conduit au surpâturage (cerf). De ce fait, plusieurs facteurs contribuent plus ou moins à modifier ce que l'on pourrait définir comme un état de référence naturel ; la qualification du degré d'intensité du sur-engravement induit uniquement par les mines apparaît donc comme délicate.

Les rivières les plus importantes possèdent de nombreux affluents dont les bassins versants couvrent aussi bien les massifs montagneux en amont que les plaines en aval. Certains tronçons ou affluents de ces rivières drainent des massifs miniers (exploités ou abandonnés)

alors que d'autres sont en dehors des massifs miniers. De ce fait certains tronçons sont directement concernés alors que d'autres sont préservés. À l'aval, les flux sont la résultante de ces deux composantes en proportion variable selon la configuration du bassin versant.

4.1.2. CARACTERISER LA DYNAMIQUE ACTUELLE DU SUR-ENGRAVEMENT A PARTIR DE L'ANALYSE DE SA DYNAMIQUE PASSEE, COMMENT ENVISAGER ET SURVEILLER SON EVOLUTION FUTURE ?

L'état de l'engravement actuel d'un tronçon de rivière n'est pas nécessairement représentatif de ce qu'il a été et de ce qu'il sera. En effet, au cours du temps, la charge solide issue des décharges minières va transiter de la décharge vers les creeks la drainant, puis le lit dans lequel ils confluent. Ensuite une partie la charge solide présente dans le lit sur-engravé va migrer vers l'aval en fonction notamment des événements météorologiques successifs, une autre partie restera stockée et pourra former des terrasses alluviales. Il y aura donc dans ce cas et pour ce tronçon un déstockage rapide des sédiments, et la formation d'un stock qui délivrera des sédiments selon une temporalité plus longue. À contrario, des tronçons à l'aval (soit d'une zone source soit d'un tronçon sur-engravé) qui n'étaient pas nécessairement affectés auparavant subiront alors un apport en matériaux important (propagation de la « vague sédimentaire ») pouvant les conduire à un état de sur-engravement. Le sur-engravement apparaît donc comme un état (au moins partiellement) transitoire. Pour comprendre la propagation de la « vague sédimentaire », il est nécessaire de réaliser une analyse diachronique de l'évolution passée des lits. Afin de mieux discerner les liens de causes à effets et les facteurs jouant un rôle majeur dans ce transfert de matériaux, il convient de replacer :

- L'évolution du surengravement par rapport à l'historique des apports issus des zones sources (la localisation et le volume de matériaux mis en décharge au cours du temps),
- La séquence des événements hydrométéorologiques (événements cycloniques et dépressions tropicales) ayant entraîné des érosions sur les versants et les décharges et des débits importants dans les creeks et les rivières générateurs d'un transport solide significatif.

Cette analyse diachronique permet de replacer l'état actuel du lit d'un tronçon dans une perspective temporelle. Elle fournit de surcroit des éléments permettant d'expliquer cet état (par exemple impact d'une conjonction entre un grand volume de déchets miniers mis en décharge et la succession de plusieurs événements cycloniques).

L'élaboration d'une stratégie, la mise en place de dispositifs et les actions entreprises visant à diminuer le sur-engravement et/ou les conséquences de celui-ci nécessitent d'avoir une approche et une vision prospectives sur l'évolution future plausible du secteur d'intérêt.

L'évolution future des zones sera liée en grande partie à la séquence hydrométéorologique à venir ; cette dernière nous est inconnue. En revanche, la connaissance des stocks en amont d'un secteur d'étude, leurs localisations par rapport à celui-ci ainsi que les caractéristiques hydro-géomorphologiques, physiques et la dynamique passée sont des éléments fondamentaux qui nous éclairent sur l'évolution future plausible. De surcroît, ces connaissances permettent de définir les secteurs les plus sensibles et les plus caractéristiques qui pourront faire l'objet d'un suivi régulier et rigoureux.

4.1.3. *COMMENT ANALYSER LES INCIDENCES SUR LES POPULATIONS, LES BESOINS ET LES PERCEPTIONS DES POPULATIONS ET DES ELUS ?*

Le sur-engravement des cours d'eau a des effets avérés sur la société, les risques et les populations riveraines mais aussi sur l'environnement et l'évolution des paysages. Afin que les actions de remédiation au sur-engravement soient efficaces et admises par tous, il est nécessaire bien sûr qu'elles soient adaptées mais aussi qu'elles soient comprises et qu'elles aient l'assentiment des populations concernées. Afin que les choix qui seront faits en vue de remédier ou tout au moins d'atténuer les effets du sur-engravement soit acceptables et acceptés par les différentes composantes de la société, il est nécessaire de connaitre et comprendre la perception actuelle de chacune d'entre-elles. Seule cette connaissance éclairera les distorsions éventuelles entre la réalité des processus et leur perception. Elle permettra de présenter et d'expliquer de façon adaptée à la perception de chaque catégorie (populations riveraines, élus, gestionnaires d'enjeux etc.) les solutions envisagées les plus adaptées à chaque problème.

4.1.4. *COMMENT CLASSER CHAQUE SITE EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE ELABOREE DANS LE PROJET A PARTIR DES BESOINS / RESSENTIS SOCIETAUX ET DES CRITERES PHYSIQUES ?*

Notre approche pluridisciplinaire montre que de nombreux critères issus des sciences humaines, physiques et environnementales sont à prendre en compte. Chaque cas est évidemment différent mais un certain nombre de « cas types » ressortent de notre analyse. Il est donc nécessaire de définir comment replacer chaque site dans la typologie élaborée en prenant en compte la diversité des critères.

4.1.5. *QUELLE REMEDIATION EST POSSIBLE/ SOUHAITABLE/ DURABLE POUR UN TYPE DE SITE DONNE (MATRICE TYPE DE PROBLEME / METHODE / AVANTAGES ET INCONVENIENTS)*

Le but final du projet « Gestion du Passif » et de ce guide est de proposer une ou plusieurs méthodes les plus adaptées à chaque cas de sur-engravement. Pour synthétiser et rendre didactique cette analyse, une matrice présentant pour chaque type de site donné les problèmes rencontrés, les méthodes possibles de remédiation (ou tout au moins d'atténuation) avec leurs avantages et leurs inconvénients est réalisée. Elle prend en considération autant que faire se peut l'ensemble des dimensions de la problématique c'est-à-dire la dimension sociale, physique et environnementale.

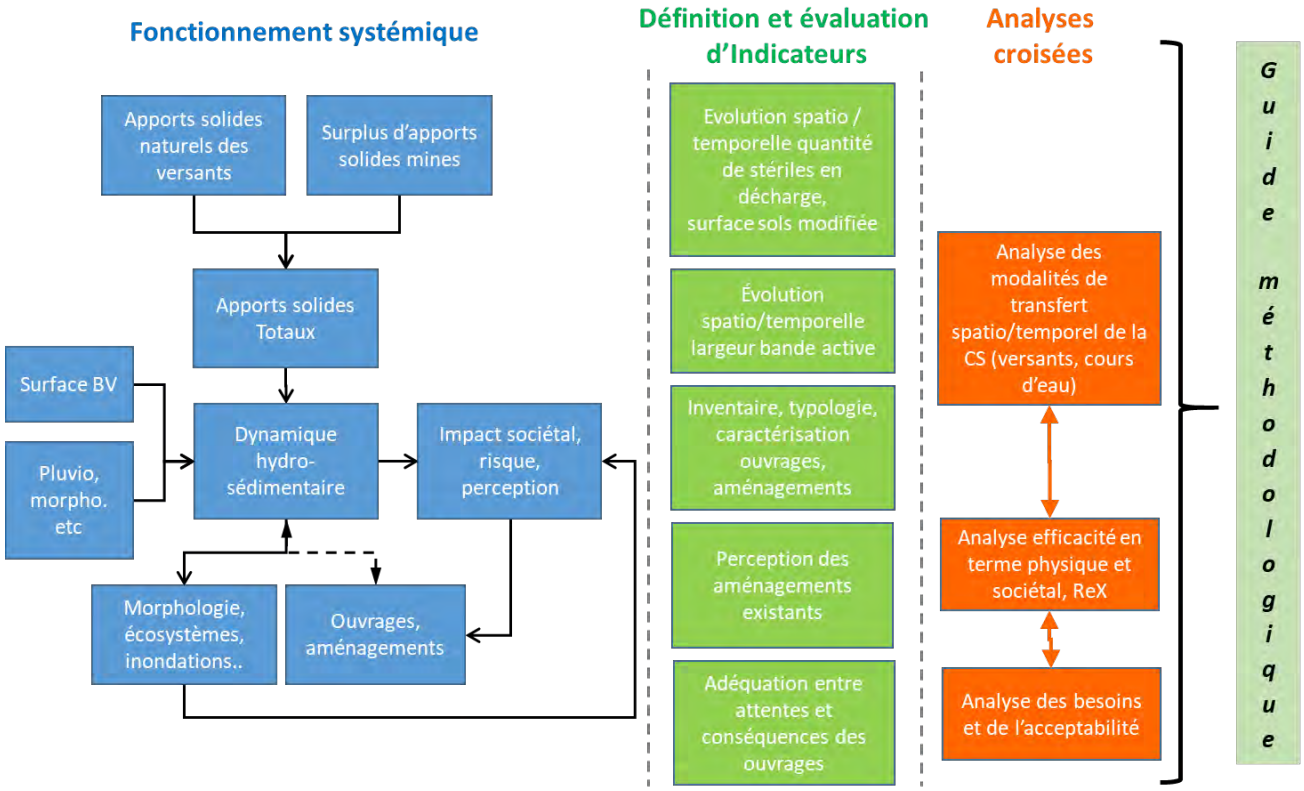
4.2. METHODE SUIVIE

La méthode générale suivie dans le cadre de ce projet pour élaborer le guide méthodologique de remédiation du sur-engravement a comporté quatre phases principales (Figure 4) :

- Analyse du fonctionnement du système mine-versant-rivière-ouvrages & société(s),
- Définition d'indicateurs physiques, anthropologiques et sociologiques, qualification et quantification des indicateurs,
- Analyse croisée des indicateurs,

– Élaboration et rédaction du guide méthodologique.

La première phase a consisté en une analyse du système « bassin versant - rivière » dans toutes ses composantes. Il s'agit tout d'abord d'une analyse des interactions entre la société et le sur-engravement des rivières. Cette analyse vise à répondre à un certain nombre de questions : quelles sont les conséquences du sur-engravement des rivières sur la société (risques, modifications environnementales, dégradation d'éléments culturels…) ? Quelles sont les perceptions de ce phénomène par les différentes composantes de la société ? Quels sont les besoins et les attentes des populations et des décideurs face à cette problématique ? Parallèlement à cette approche socio-anthropologique, une analyse du fonctionnement physique de la rivière et de son bassin versant est réalisée (en synergie étroite avec le projet IMMILA qui se termine fin 2018). Cette analyse intègre les mines (en tant que source des matériaux induisant les engravements), les versants et les processus qui les affectent (ruissellement, érosion, mouvements de terrain, modification de la couverture du sol…), le fonctionnement des rivières et l'évolution des lits dans le temps. Enfin, une analyse de l'incidence des ouvrages, aménagements et actions de lutte contre le sur-engravement en Nouvelle-Calédonie ou dans d'autres régions du monde est réalisée. Celle-ci permet de mesurer l'efficacité, les contraintes et les limites des actions entreprises.



CS : Charge solide ; BV : bassin versant ; REX : retour d'expérience

Figure 4 : Méthode suivie dans le projet

La seconde phase a consisté à rechercher et définir, pour chaque composante du système, des indicateurs simples qui soient représentatifs des processus, phénomènes et paramètres en jeu. Chaque indicateur a dû ensuite être soit quantifié, quand il s'agissait d'un indicateur physique, soit qualifié lorsqu'il s'agissait d'un indicateur social ou complexe.

La troisième phase (qui se poursuit dans le cadre du projet IMMILA) consiste à croiser ces indicateurs et à déterminer comment chacun influe sur l'évolution du système dans le temps. Une attention particulière porte sur la temporalité (l'enchainement des séquences d'événements, les temps de latence éventuels etc.) et leurs interactions.

4.3. LES CAMPAGNES DE TERRAIN

Une campagne de terrain a été réalisée sur le bassin versant de la Thio du 28 au 5 Mars 2016. Cette campagne a été réalisée par l'ensemble de l'équipe IRSTEA impliquée dans ce projet ainsi que le BRGM. Cette mission a concerné le bassin de la Thio et celui de la Todre. Des observations in situ ont été réalisées sur plusieurs segments de la Thio, des creeks en rive gauche à l'aval de la Thio (Tomuru, creek Musée etc.) et des gros affluents de rive droite (Nakalé, Neburu).

Cette campagne a été l'occasion de présenter la problématique du sur-engravement des rivières de Nouvelle-Calédonie aux deux stagiaires (cf.4.5) Tom Burlat et Nicolas Gosselin (ce dernier impliqué plus spécialement dans le projet *IMMILA* – SAP2). Il s'agissait notamment de les former à certaines techniques d'acquisition de données nécessaires à leurs stages, de définir leurs objectifs et les méthodes de travail sur le terrain (granulométrie des alluvions, relevé de profils en long et en travers, etc.). Ces deux stagiaires sont restés, après le retour en métropole de leurs encadrants, jusqu'au 23 Juin afin d'acquérir les données nécessaires (durée sur site de 3 mois).

La première partie du travail (Tom Burlat) a consisté à visiter un échantillon le plus complet et représentatif possible de réalisations locales susceptibles d'avoir une influence sur les flux sédimentaires (Figure 5). Il a pu s'agir :

- D'ouvrages : construction de génie civil ponctuelle, de type barrage, seuil, digue, bassin, piège à sédiment/plage de dépôt, épis, mur de soutènement…,
- D'aménagements : travaux de génie civil visant à modifier le profil ou la section d'un cours d'eau sur son linéaire de type radier, descente d'eau, chenalisation, pralinage, passages d'une voie d'accès (buses, radier, cassis), revêtement de pistes, verse…, ou travaux de revégétalisation de versants,
- Ou d'interventions : travaux sans génie civil visant à modifier le profil ou la section d'un cours d'eau sur son linéaire (curage, reprofilage, gerbage…), réalisés le long des rivières, dans les creeks, ou même sur mine.

En général ce sont des dispositifs combinant à la fois ouvrage(s), aménagement(s) et/ou intervention(s) qui ont été visités.

Figure 5 : Localisation des sites visités

L'objectif était de collecter le maximum d'informations sur l'histoire, les caractéristiques et le fonctionnement des opérations mises en œuvre, pour en évaluer par retour d'expérience le niveau d'adaptation aux différents contextes rencontrés et si possible le niveau d'efficacité.

Des compte-rendus de visite ont été rédigés systématiquement pour rassembler l'ensemble des informations collectées et proposer une description des fonctions assurées en matière de régulation des flux sédimentaires par ces réalisations.

Sur la dizaine de mines ou creeks visités, 22 sites ont retenu notre attention dont 14 ont fait l'objet d'un compte-rendu de visite. Sur les 22 sites sélectionnés, nous comptons 11 ouvrages, 16 aménagements et 5 interventions pour un nombre de 10 dispositifs. Les contacts pour l'organisation et l'accompagnement de ces visites sont présentés dans le Tableau 1.

Parallèlement, une campagne de terrain traitant des aspects socio-anthropologiques a été effectuée. Durant celle-ci, sous l'encadrement de C. Sabinot et de E. Worliczek, les deux stagiaires de l'IRD impliqués dans la tâche C « Perception et besoins », A-Tena Pidjo, Lucie Gosset ont effectué un travail d'enquête auprès de la population de Thio, des Coutumiers et des élus. Ces enquêtes ont été réalisées lors de phases de terrain réparties entre les mois de Mars et de Juillet 2016.

Tableau 1 : Liste des contacts mobilisés pour l'organisation des visites de retour d'expérience

Visites	Personnes présentes
Avec la Province Nord entre Kouaoua et Houaïlou	Richard Ferrand (Province Nord), Olivier Monge (Fonds Nickel), Jean-Sébastien Baille (Fonds Nickel), Marine Espigat (NMC), José Bernanos (sous-traitant SLN), …
La Coulée (site pilote revégétalisation)	Etienne Waneisi (Province Sud)
Creeks à Thio	Jean-Guy M'Bouéri (Collectif Thio), Miguel Auvray (Collectif Thio)
Camps des Sapins et Thio Plateau	Pierre Petit (SLN)
Plaine de la Ouen Femala à Nakéty	Thomas Leplat (NMC), Guillaume Eucher (SMT), Thierry Dervin (GéoImpact)
Mines de Kopéto B1, B2 et Si Reis	Gaël Marlier (SLN)
Creek Buhaïo à Koumac	Paul Breton (Minex, sous-traitant SMT)
Mine de Poum	Laurent Cases (SLN)
Mine de Goro	Matthieu Rouxel (Vale)
Réunions	**Personnes présentes**
DIMENC	Olivier Monge (Fonds Nickel)
Centre minier de Thio	Maurice Jouve (SLN)
Direction environnementale SLN	Henry Hmakone (SLN), Jean-Louis Lawi (SLN), Antoine Guyonneau (ext-SLN)
Province Sud	Etienne Waneisi (Province Sud), Philippe Bonnefois (Province Sud)
Bureau d'étude Soproner	Jean-Baptiste Monnet
Bureau d'étude Bioeko	Yannick Dominique, Emmanuelle Ruet-Garioud

4.4. COMMUNICATION ET DIFFUSION DE L'INFORMATION

A l'occasion de la venue sur le territoire des intervenants métropolitains, un certain nombre d'échanges et de contacts ont eu lieu entre l'équipe et différents organismes et sociétés confrontés à cette problématique. Des contacts et échanges ont eu lieu notamment avec :

- La DAVAR,
- Le Service des Mines et Carrières (DIMENC/ SMC),
- Le Fond Nickel,
- Le Service de la Géologie de Nouvelle-Calédonie (DIMENC/SGNC),
- Le CNRT,
- La SLN.

De plus, à l'occasion de la réalisation de la campagne de terrain de Mars 2016, une réunion publique a été réalisée à la demande du CNRT en Mairie de Thio. Cette réunion a été animée par les équipes (CNRT, IRSTEA, IRD, BRGM et les stagiaires) et a permis la présentation du projet « *Gestion du Passif minier* » et du projet « *IMMILA* » (grâce notamment à la participation de Marc Despinoy et Arthur Leroux - IRD). Cette réunion publique a été réalisée en présence de Mr le Maire de Thio, des représentants des Tribus, d'associations locales et de la SLN et de riverains. Les différents aspects du projet ont été présentés (approche physique, géomorphologique, sociale etc.), les moyens et méthodes qui seront mis en œuvre ainsi que les principaux intervenants. Cette réunion a été l'occasion de nombreux échanges avec les représentants des tribus, les élus et la population sur le sujet de l'engravement et de l'hyper-sédimentation et de ses conséquences.

Lors de la journée de la femme (8 mars 2016) à Thio, Catherine Sabinot a animé une heure dédiée à la présentation générale du métier de chercheure en anthropologie. À cette occasion elle a réalisé une présentation spécifique des projets du CNRT « *Gestion du passif* » et « *IMMILA* ».

Le 14 mars 2016 Catherine Sabinot a présenté les étudiantes A-Tena Pidjo et Lucie Gosset à la mairie et à Jean-Guy Mboueri, président du collectif.

Certains membres de l'équipe (Frédéric Liébault et Mélanie Bertrand - IRSTEA) ont animé une journée de formation dans les locaux de l'IRD à Nouméa (1 Avril 2016) sur les thèmes de l'hydro-géomorphologie fluviale et de la géomatique.

Une réunion de restitution des travaux réalisés par les stagiaires de l'Irstea, Tom Burlat et Nicolas Gosselin et de l'IRD, A-Tena Pidjo et Lucie Gosset, a été organisée le 17 juin 2016 à l'IRD

Enfin, une réunion publique de restitution des travaux en sciences sociales sur les changements de la rivière de la Thio a été réalisée en Mairie de Thio le 28 Juillet 2016. Cette réunion a été animée par C. Sabinot, Lucie Gosset, A-Tena Pidjo et Linn Beate (IRD).

4.5. LES STAGES ET POST-DOC

Trois stages et un post-doc ont été effectués dans le cadre du projet « Gestion du Passif »,

- Yann Gastaldi (ENSG, 2ème année) : « Évaluation de l'impact des décharges minières sur le sur-engravement des cours d'eau de Nouvelle-Calédonie », encadrement BRGM,
- Tom Burlat (Grenoble INP, ENSE3, 3ème année) : « Gestion du passif de l'activité minière et remédiation (engravement et sédimentation) en Nouvelle-Calédonie», encadrement IRSTEA,
- Lucie Gosset (Master d'anthropologie appliquée, Université de Lyon 2) : « Les perceptions des transformations de l'environnement des populations dans un contexte d'engravement des rivières, et les attentes des populations vis-à-vis de ce phénomène », encadrement IRD et EW
- Mélanie Bertrand (post-doc) : évaluation régionale de l'utilisation de la bande active comme indicateur des apports miniers dans les massifs de péridotite de Nouvelle-Calédonie, encadrement IRSTEA

L'ensemble des rapports de stages ont été transmis au CNRT.

Trois stages réalisés dans le cadre d'IMMILA sur des thématiques communes, certains résultats issus de ces travaux ont été utilisés dans le projet Gestion du Passif. Il s'agit des stages de :

- Perrine Drain (ESGT, 3ème année) : « Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré (Nouvelle-Calédonie) », encadrement IRSTEA,
- A-Tena Pidjo (Master EDTS, Muséum national d'histoire naturelle de Paris, *IMMILA*) : « *Étude des transformations dans les savoirs et pratiques des populations sur le littoral de la commune minière de Thio dans un contexte d'hypersédimentation des rivières et de l'interface terre-mer* », encadrement IRD et EW
- Linn Beate Sleire (Université de Bergen, sujet complémentaire hors projet) : « *Étude des transformations des savoirs et des pratiques de bord de mer sur le district de Borendy »,* encadrement IRD et EW.

5. ETAT DE L'ART

5.1. TRANSPORT SEDIMENTAIRE

5.1.1. TYPOLOGIE DES COURS D'EAU

Du point de vue hydraulique[7], on distingue classiquement trois grandes familles de cours d'eau dans les régions de montagne, en fonction de leurs gammes de pente longitudinale. Même si cette classification, due à Surell dès 1841, est forcément réductrice, elle a le double mérite de fixer les ordres de grandeur et de mettre en évidence l'importance du facteur pente dans le comportement hydro-sédimentaire de ces cours d'eau. Ainsi Surell proposait-il la classification présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Classification des types de cours d'eau (d'après Surell, 1841, limites basses reprises de Lefort 1996)

Pente	Type de cours d'eau
< 0.1-0.2 %	Rivière
0.1-0.2 à 6 %	Rivière torrentielle
> 6 %	Torrent

Cette distinction est importante car selon les gammes de pente on ne rencontre pas nécessairement les mêmes modes de transport de sédiments, qui n'ont pas exactement les mêmes conséquences sur les évolutions de la morphologie des cours d'eau, ou sur les enjeux exposés.

On considère généralement qu'un torrent a une pente supérieure ou égale à 6 %, les plus grands torrents pouvant avoir des pentes descendant jusqu'à 2 % dans les parties basses de leurs cônes de déjection (Surell 1841). Ce seuil de 2-6 % correspond sensiblement au minimum de pente où l'on observe encore les phénomènes de laves torrentielles ou de charriage hyper-concentré.

Les rivières torrentielles sont les exutoires naturels des torrents. Elles reçoivent les apports sédimentaires fournis, avec plus ou moins de régularité, par leurs cours d'eau tributaires. Surell (1841) proposait de retenir la limite entre rivières torrentielles et rivières autour d'une

[7] *Ces dénominations hydrauliques ne correspondent pas directement aux désignations de cours d'eau en usage en Nouvelle-Calédonie (rivière, creek).*

pente de 1 % mais convenait que cette limite était plus difficile à caractériser que celle entre torrent et rivière torrentielle. Des crues récentes, comme dans les Pyrénées en juin 2013, ont parfaitement montré que certaines rivières à la pente légèrement inférieure à 1 % engendraient de terribles érosions et présentaient une activité morphogène impressionnante tel que le comblement du Lac des Gaves sur le Gave de Pau en quelques heures. Nous proposons donc d'abaisser ce seuil et, suivant les recommandations de Lefort (1996), de le situer plutôt autour d'une pente de 0,1 % à 0.2 %. C'est sensiblement la limite en-dessous de laquelle deviennent notables les phénomènes de l'écrêtement dynamique des débits hydrauliques de pointe des crues qui se manifeste lors de débordements en lit majeur (voir MEDD et Cemagref 2004, pour plus d'éléments sur l'écrêtement dynamique, phénomène trop souvent surestimé dans le contexte torrentiel). Au-dessus de cette pente, les écoulements d'eau qui débordent dans le lit majeur s'écoulent avec assez de vitesse pour que les débits de pointe de crue n'aient pas de franche tendance à la baisse, malgré l'inondation généralisée du lit majeur. D'autres critères de caractérisation peuvent exister.

5.1.2. TYPOLOGIE DES MODES DE TRANSPORT

On rencontre principalement trois types d'écoulements avec transport solide dans les cours d'eau en zone de montagne : des écoulements avec transport solide par **charriage** et/ou en **suspension**, qui du point de vue des mécanismes de transport solide mis en œuvre, sont assez comparables à ceux observés en rivière mais qui peuvent atteindre des concentrations bien supérieures dans les cours d'eau torrentiels**,** et les **laves torrentielles** qui sont un phénomène tout à fait spécifique des torrents.

5.1.2.1. Charriage et suspension

On désigne par **charriage** le mode de transport de sédiment où l'effet des forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement d'eau se traduit sur les particules sédimentaires par un mouvement de roulement, ou de glissement sur le fond du cours d'eau, ou encore de saltation, c'est-à-dire de succession de petits sauts au cours desquels les particules se séparent du fond du lit durant de très courtes périodes (Figure 6). Les matériaux fins, légers, sont transportés en **suspension** et les matériaux plus grossiers, plus lourds, par charriage. La distinction entre ces deux phénomènes repose donc directement sur la taille des particules.

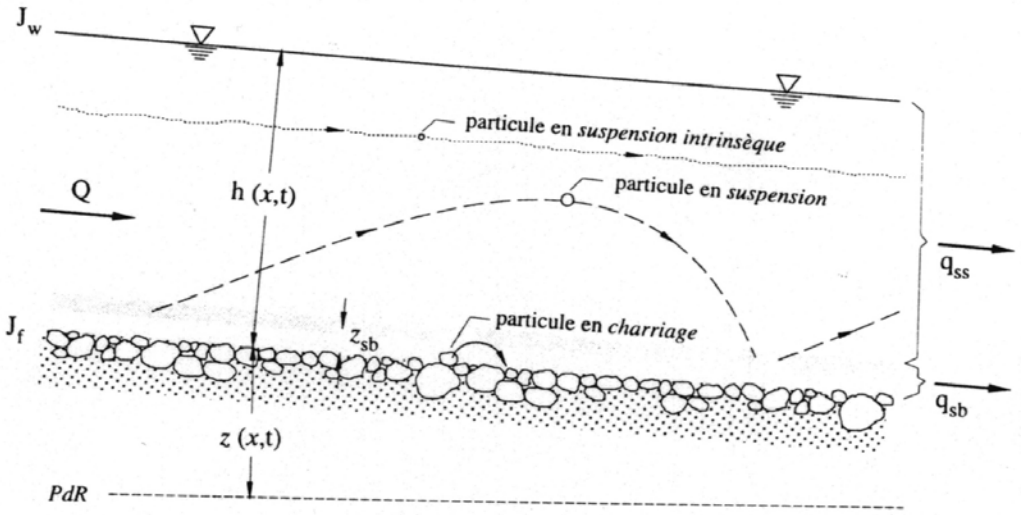


Figure 6 : Schéma des modes de transport (d'après Graf et Altinakar)

Des transports sédimentaires par charriage et suspension se rencontrent dans tous les types de cours d'eau, y compris les rivières. Néanmoins, la charge solide étant très corrélée à la pente, elle peut atteindre des valeurs très élevées en torrent. Pour les débits liquides les plus faibles, on pourra n'avoir pas de transport solide du tout (eau claire), ou un transport solide qui ne concernera que les particules les plus fines (suspension uniquement). Pour les débits liquides de crue au contraire, les écoulements mobiliseront des quantités considérables de sédiments (suspension et charriage), ce qui peut donner lieu à des formes d'écoulements spécifiques des cours d'eau torrentiels parfois qualifiés d'écoulements hyperconcentrés.

Les désordres susceptibles d'être produits par les écoulements de charriage hyperconcentré sont de deux types. D'une part bien sûr, compte tenu de l'importance des volumes sédimentaires susceptibles d'être transportés jusque dans les zones aménagées à l'aval des bassins versants torrentiels, toute une série de désordres et de dommages peuvent résulter des engravements provoqués par le dépôt de ces sédiments. Les conséquences peuvent en être des débordements (par réduction de la section disponible à l'écoulement), des divagations du cours d'eau vers des zones inhabituelles, des coupures de voies de communication, l'obstruction de ponts, l'envahissement massif du cône de déjection par des sédiments de toutes tailles. Ces processus sédimentaires sont souvent fortement aggravés (et compliqués) par la présence de débris végétaux (« flottants ») dans ces écoulements chargés.

A l'inverse, les forts débits liquides de ces crues de charriage et leur dynamique sédimentaire engendrent souvent également toutes sortes de désordres résultant d'affouillements. Ces affouillements, résultant de la capacité érosive que retrouvent ces écoulements torrentiels dès lors qu'ils ne sont plus chargés à leur capacité maximale de transport, peuvent rester localisés ou concerner des tronçons relativement longs, et entraîner des déstabilisations de berges ou de versants, et des dommages pouvant provoquer la ruine d'ouvrages ou d'habitations.

Des incisions très prononcées peuvent également être dues à des accélérations locales de l'écoulement entrainant une augmentation des forces tractrices. De telles accélérations sont souvent observées au niveau de rétrécissements, de coudes, ou même simplement au

contact d'obstacles et d'autant plus que leur rugosité sera faible en comparaison de celle du lit.

Les conséquences du transport en suspension se manifestent loin en aval des zones sources, lorsque les pentes et les vitesses d'écoulement atteignent des valeurs suffisamment faibles pour que leur dépôt soit possible.

5.1.2.2. Laves torrentielles

Les **laves torrentielles** sont un phénomène spécifique des torrents. Elles se forment généralement à la faveur des fortes pluies, sur des pentes fortes et lorsque le site permet la formation d'un mélange concentré d'eau et de matériaux solides de granulométrie étendue allant des argiles à des blocs de dimensions métriques.

Contrairement au charriage dont le débit moyen varie de façon graduelle, leur écoulement est très transitoire, constitué de bouffées successives indépendantes, qui se présentent essentiellement sous la forme de vagues de l'ordre de quelques mètres de hauteur se propageant à une vitesse de quelques m/s.

Leur concentration en matériau solide est très élevée. Généralement supérieure à 50 % en volume, elle peut atteindre 80 % et plus (tandis que cette dernière ne dépasse pas 20 à 40 % pour les écoulements hyperconcentrés). Leur comportement est relativement homogène, d'apparence monophasique, contrairement aux écoulements chargés qui sont clairement biphasiques. Elles présentent un comportement intermédiaire entre fluide et solide qui sur beaucoup d'aspects, ressemble plus à l'écoulement d'une pâte que d'un liquide à proprement parler.

Une lave torrentielle, au moins lorsqu'elle s'écoule dans un chenal suffisamment marqué, est généralement constituée de trois parties (Figure 7) :

- Un front granulaire généralement raide, constitué des plus gros blocs (ainsi que parfois des « corps étrangers » tels qu'arbres, morceaux d'ouvrages, véhicules, etc.), qui semblent poussés par le corps de la coulée.
- Un corps, qui suit le front et présente généralement un aspect plus boueux, car constitué essentiellement de blocs plus ou moins noyés dans un fluide interstitiel et dans lequel ils semblent parfois flotter. Ce corps, surtout lorsqu'il est suffisamment boueux, présente un aspect « pâteux » assez homogène.
- Une queue de coulée, qui correspond au passage progressif vers un écoulement moins concentré et de ce fait, progressivement plus turbulent et biphasique. Il s'agit alors d'un écoulement hyperconcentré tel qu'il a été abordé précédemment.

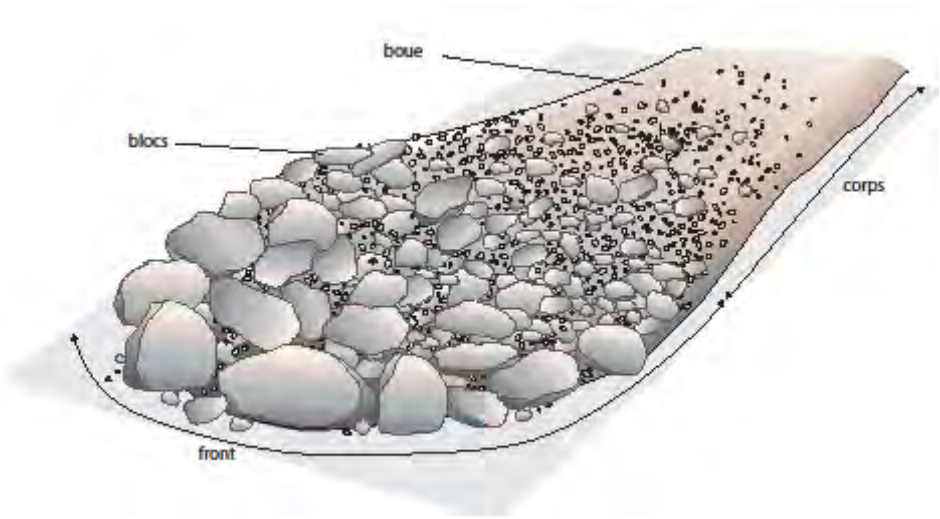


Figure 7 : Composition d'une lave torrentielle

Le schéma présenté est surtout valable lorsque les écoulements restent contraints latéralement, donc lorsqu'ils sont suffisamment chenalisés. Lors de la phase d'étalement sur un cône de déjection, pouvant résulter d'un débordement par exemple, l'absence de confinement latéral de l'écoulement semble propice à la dislocation du front granulaire et donc au dépôt des plus gros blocs. Néanmoins, compte tenu de la nature particulière du matériau, plus encore que les écoulements chargés, les laves torrentielles peuvent conserver des caractéristiques dynamiques très marquées même après avoir parcouru des distances longitudinales importantes.

Les désordres dus aux laves torrentielles apparaissent généralement lors d'un débordement hors du chenal dans une zone d'occupation humaine. Un tel débordement peut avoir plusieurs origines principales :

- Capacité hydraulique insuffisante du chenal d'écoulement au niveau d'un point de faiblesse entraînant un débordement latéral ponctuel,
- Obstruction d'un ouvrage ponctuel (ouvrage de franchissement de type pont notamment) par des blocs ou des corps flottants, entraînant un débordement latéral ponctuel et une bifurcation des directions d'écoulements partielle ou totale,
- Dépôt au niveau d'une réduction de pente, entraînant un engravement du lit et un débordement latéral plus ou moins généralisé, notamment s'il y a occurrence de plusieurs bouffées successives.

Les laves torrentielles présentent un front d'écoulement qui peut avoir plusieurs mètres de hauteur et se déplacer à plusieurs mètres par seconde. La densité de l'écoulement est forte, de l'ordre de 2 fois celle de l'eau et le front est le plus souvent chargé en gros blocs. L'ensemble est donc susceptible de générer des pressions dynamiques extrêmement importantes lors de chocs sur les ouvrages ou les bâtiments. Compte tenu de ces caractéristiques dynamiques du phénomène, dans toute zone atteinte par l'écoulement, il peut y avoir mise en danger de la vie humaine, y compris très fréquemment à l'intérieur des bâtiments touchés.

5.1.3. SYNTHESE

La Figure 8 synthétise les typologies évoquées ci-dessus, de cours d'eau, de modes de transport sédimentaire, et plus globalement de crues, en fonction de la pente et des concentrations solides correspondantes.

La Figure 9 schématise quant à elle les types de sollicitations que différentes natures de phénomènes, dont particulièrement les crues torrentielles, sont susceptibles d'exercer sur les structures impactées.

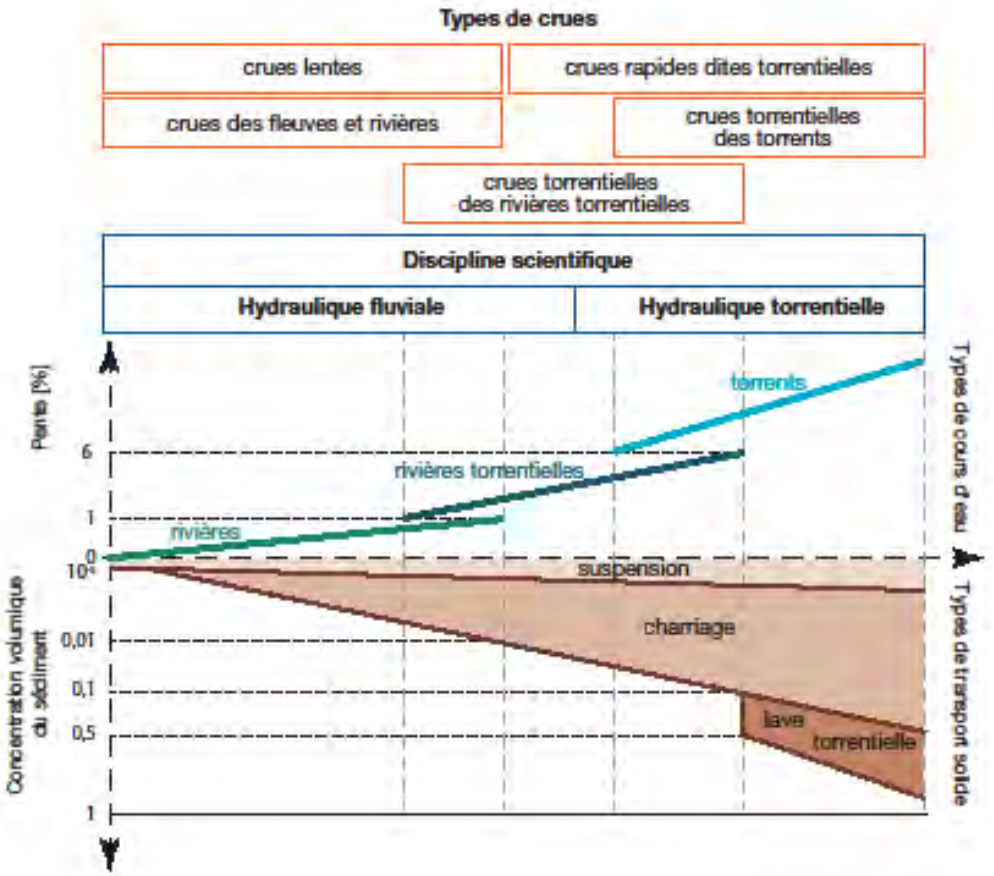


Figure 8 : Les types de crues en fonction des types de cours d'eau et les types de transports solides en fonction de la pente et de la concentration en sédiments (d'après Besson et Meunier, 1995)

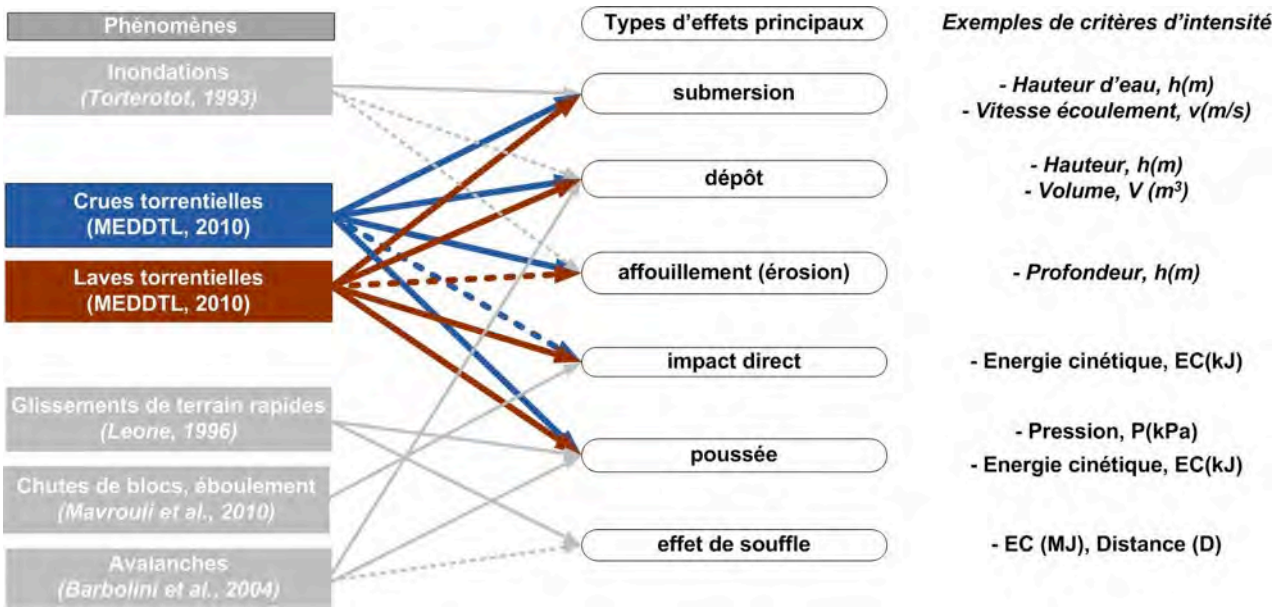


Figure 9 : Typologie des sollicitations exercées par les écoulements torrentiels (d'après Carladous)

5.1.4. PRODUCTION SEDIMENTAIRE A L'ECHELLE D'UN BASSIN VERSANT

Les processus de transport sédimentaire décrits ci-dessus s'observent à l'échelle des biefs du réseau hydrographique. À l'échelle du bassin versant, il faut également considérer les processus de production et de fourniture de ces sédiments au réseau hydrographique.

Un bassin versant type est constitué en amont du *bassin de réception*, zone de production de l'essentiel du ruissellement et de l'érosion des versants, du *chenal d'écoulement*, partie du réseau hydrographique souvent encaissée où transitent des écoulements déjà formés, et du *cône de déjection* à l'arrivée dans la vallée, où le torrent se déleste d'une part significative de sa charge en sédiments, à la faveur de l'élargissement de son lit et de la réduction de pente, avant de rejoindre une rivière torrentielle par exemple.

Comme illustré sur la Figure 10 ci-dessous, les processus de production et de fourniture de sédiments à l'écoulement peuvent prendre place pour certains dans les biefs hydrauliques le long du réseau hydrographique, et pour d'autres sur les versants.

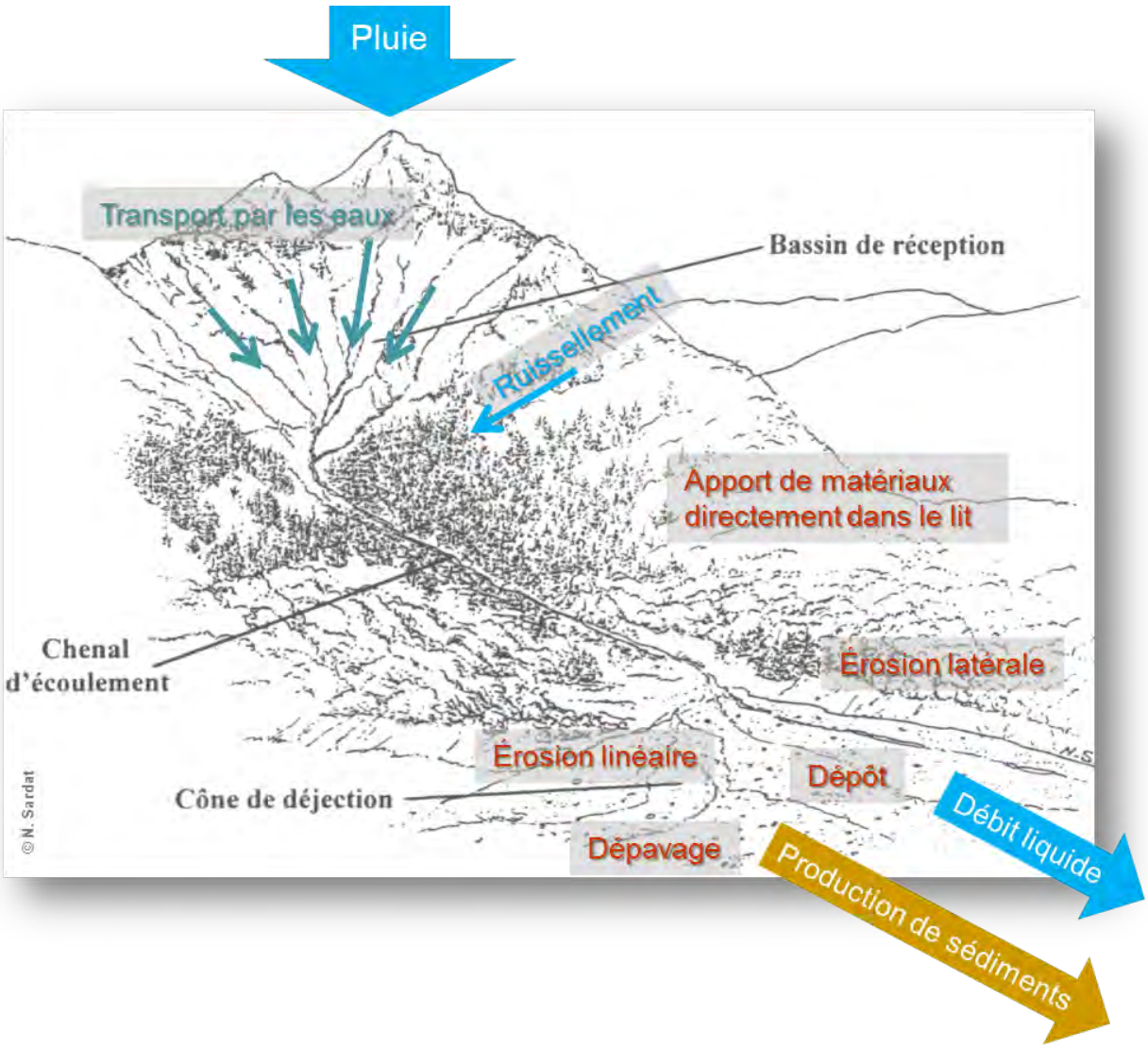


Figure 10 : Les processus de production sédimentaire à l'échelle du bassin versant (d'après Brochot)

Au niveau des versants, une assez grande variété de processus peut se rencontrer, en fonction des caractéristiques morphologiques, géologiques, lithologiques, ainsi que des forçages qu'ils soient d'origine météorologiques ou anthropiques (dont bien évidemment l'activité minière dans le cas de la Nouvelle-Calédonie).

La Figure 11 propose une typologie des processus naturels les plus courants, en distinguant les processus essentiellement à l'origine de l'altération des matériaux sur place, de ceux qui mettent les débris ainsi formés en mouvement, pour les transporter jusqu'au réseau hydrographique.

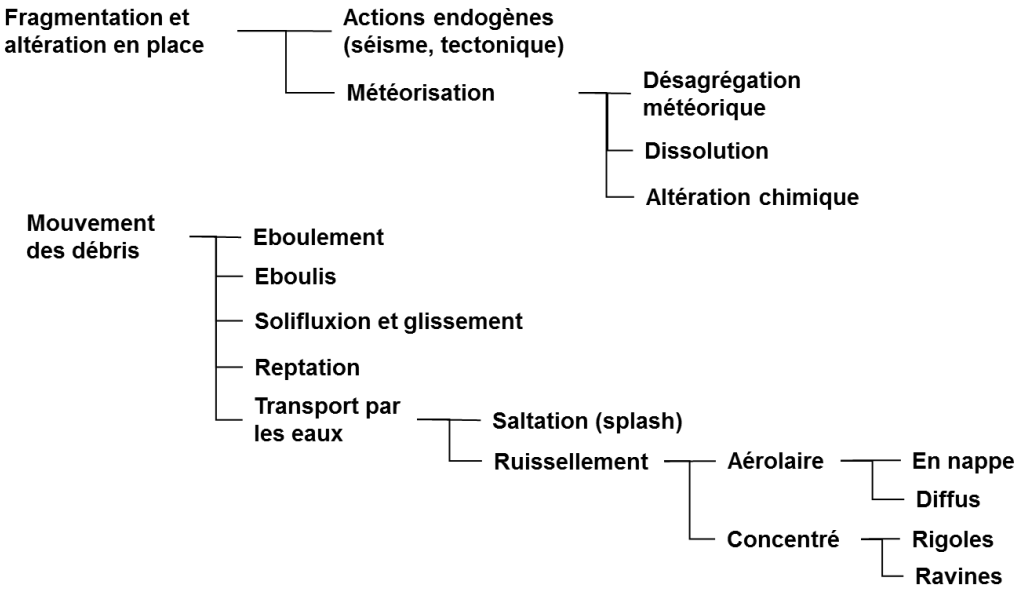


Figure 11 : Processus de production sédimentaire sur les versants (d'après Brochot)

5.2. MORPHODYNAMIQUE DES COURS D'EAU

5.2.1. L'EQUILIBRE MORPHOLOGIQUE DYNAMIQUE

Une des fonctions principales de la rivière est d'assurer le transfert des sédiments vers l'aval. Pour effectuer ce travail, elle dispose de deux principales sources d'énergie : la gravité liée à la pente du fond de vallée et les volumes d'eau qui s'écoulent pendant les périodes de crue. Plus la pente est forte et les débits sont élevés, plus la rivière est capable de déplacer de grandes quantités de matériaux.

La fourniture sédimentaire et les débits ne sont pas constants dans le temps. Ils varient selon différents pas de temps, en fonction des fluctuations météorologiques et climatiques, de l'irrégularité des apports de versant, et des actions et impacts anthropiques (modification de l'occupation du sol, travaux hydrauliques, et activité minière par exemple). La rivière doit donc ajuster continuellement son lit pour maintenir une capacité de transport qui accommode sa charge sédimentaire. C'est la raison principale qui explique la grande mobilité des lits fluviaux, se manifestant par des berges qui reculent, des chenaux qui changent de position, des bancs qui se forment et qui disparaissent. Sans cette « respiration » des formes fluviales, la rivière ne peut trouver son état d'équilibre qui lui permet de transporter les sédiments. Cet état d'équilibre est atteint lorsque ces paramètres qui conditionnent la morphologie du lit (pente, largeur et profondeur à pleins bords, sinuosité en plan, parmi d'autres) restent relativement stables dans le temps.

Il arrive parfois que l'équilibre soit rompu et que la géométrie se transforme durablement sous l'effet d'une dérive des variables de contrôle (forçages hydrologiques et détritiques). Les mécanismes qui gouvernent ces ajustements ont été conceptualisés dans la première moitié du 20^{e} siècle (Gilbert, 1914 ; Mackin, 1948), puis ces idées ont été améliorées par la

suite (Lane, 1955) et représentées schématiquement sous forme d'une balance (Borland, 1960 ; Figure 12). Cette illustration offre la possibilité de prédire qualitativement les réponses morphologiques susceptibles de se produire lorsque les débits liquides et/ou la charge sédimentaire changent. Elle permet aussi de prévoir quels seront les mécanismes du retour (éventuel) à l'équilibre. Ainsi, lorsque la capacité de transport devient excédentaire par rapport à la charge à transporter, le lit s'incise, ce qui a pour effet de réduire la pente et donc de réduire la capacité de transport du cours d'eau. D'autre part, la granulométrie de surface augmente, ce qui a pour effet d'accroître la dissipation d'énergie et de diminuer ainsi la capacité de transport. L'enfoncement du lit va se faire principalement par évacuation des petits diamètres, ce qui conduit à la formation d'une couche grossière de surface, appelée pavage. La rugosité de surface s'en trouve augmentée, ainsi que la résistance du lit à l'érosion. Inversement, lorsque la capacité de transport devient déficitaire par rapport à la charge sédimentaire, le lit s'exhausse, la pente augmente et le tri granulométrique contribue à diminuer la taille des grains en surface.

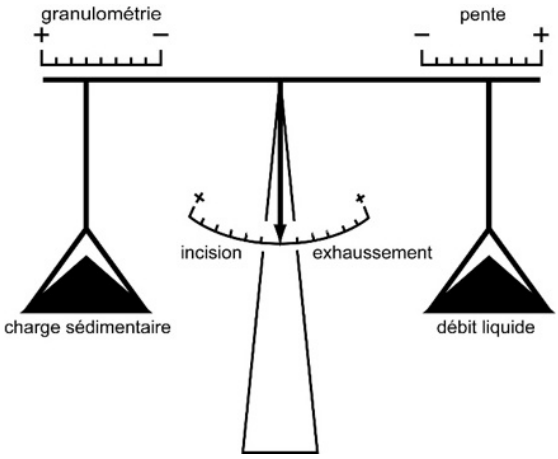


Figure 12 : La balance morphologique illustrant le concept d'équilibre morphologique (modifié d'après Lane 1955 et Borland 1960)

Le concept d'équilibre morphologique ne s'intéresse qu'à la pente d'équilibre (*s*) et à la granulométrie du lit (D_{50}, le diamètre médian des grains). Or la morphologie d'une rivière possède bien d'autres variables d'ajustement. Les principales sont la largeur et la profondeur à pleins bords (notées respectivement w_b et d_b), la sinuosité du tracé en plan (λ), ainsi que la rugosité du lit (n). Ces variables s'ajustent également aux modifications des variables de contrôle hydrologiques et détritiques et la synthèse des observations empiriques a conduit à proposer d'autres modèles conceptuels qui intègrent toutes les dimensions de la morphologie fluviale (Schumm, 1971). Ce modèle peut s'écrire ainsi :

$$Q \propto \frac{w_b d_b \lambda D_{50} n}{s} \quad (1)$$

$$Q_s \propto \frac{w_b s}{d_b \lambda D_{50} n} \quad (2)$$

avec Q le débit liquide et Q_s le débit solide.

Ces relations expriment les tendances d'évolution des variables d'ajustement en réponse à une augmentation ou diminution du débit liquide et solide. Par exemple, dans le cas d'une

diminution du débit solide, les variables placées au numérateur (largeur à pleins bords et pente) vont décroître, tandis que celles placées au dénominateur vont augmenter (profondeur à pleins bords, sinuosité, granulométrie, rugosité de surface).

Toutes ces relations ne donnent qu'une image partielle de la complexité des interactions qui gouvernent la morphodynamique fluviale. Elles ne prennent pas en compte l'influence de la végétation sur la morphologie fluviale. Or celle-ci joue un rôle primordial par le renforcement de la résistance des berges à l'érosion, par l'augmentation de la résistance à l'écoulement et par la fourniture de débris végétaux qui peuvent jouer un rôle morphologique majeur, notamment en matière de stockage sédimentaire. Certains auteurs proposent d'intégrer la végétation comme une variable de contrôle de la morphologie, au même titre que les contrôles hydrologiques et détritiques (Montgomery et Buffington, 1998).

5.2.2. LES TYPES MORPHOLOGIQUES

La diversité morphologique des rivières de montagne est grande. Elle traduit la variabilité spatiale des conditions qui gouvernent les régimes hydrologique et sédimentaire des chenaux. Malgré cette complexité, il est possible de distinguer quelques règles dans l'organisation spatiale des paysages torrentiels. La plus évidente est celle qui consiste à ordonner les formes de l'amont vers l'aval, en fonction du différentiel entre la capacité de transport et la charge sédimentaire (Montgomery et Buffington, 1997). Le schéma conceptuel général est celui d'un continuum de formes qui passe progressivement d'un excès de capacité de transport à l'amont vers un excès de charge sédimentaire à l'aval (Figure 13). Les transformations morphologiques induites par ces déséquilibres sont interprétées de manière fonctionnelle par le contrôle de la déperdition d'énergie qui résulte de ces ajustements. La morphologie et la granulométrie des chenaux doivent en effet dissiper la totalité de l'énergie de l'écoulement (par le biais des forces de résistance à l'écoulement), tout en assurant la continuité du transport solide. À cela s'ajoute l'influence des processus de versant, et notamment des laves torrentielles qui induisent une morphodynamique spécifique dans certains des lits à forte pente (> 5-6 %).

En contexte de rivières torrentielles, tel que défini plus haut, trois grandes familles de styles morphologiques se rencontrent : (1) les lits rocheux, constitués majoritairement d'affleurements du substratum géologique ; (2) les lits à blocs, qui se reconnaissent facilement par l'omniprésence de gros éléments rocheux (généralement de taille supérieure à 25 cm) ; (3) les lits à graviers, composés principalement d'alluvions de taille modeste (taille comprise entre 0.2 et 25 cm). Il existe bien entendu dans la nature un continuum des styles morphologiques, avec des morphologies intermédiaires entre ces grandes familles. Quoi qu'il en soit, ce continuum exprime bien un gradient entre les conditions limitées en fourniture sédimentaire et celles limitées en capacité de transport. Parmi les lits à graviers, on passe ainsi progressivement des lits plans aux lits en tresses, en passant par les styles à méandres et styles divaguant, lorsqu'on se rapproche des conditions limitées en capacité de transport. La multiplicité des chenaux, typique du style en tresses, est ainsi interprétée comme une réponse morphologique à un excès de charge sédimentaire grossière. On voit également que la largeur de la bande active (ou largeur à pleins bords) tend à augmenter de façon concomitante avec l'excès de charge sédimentaire.

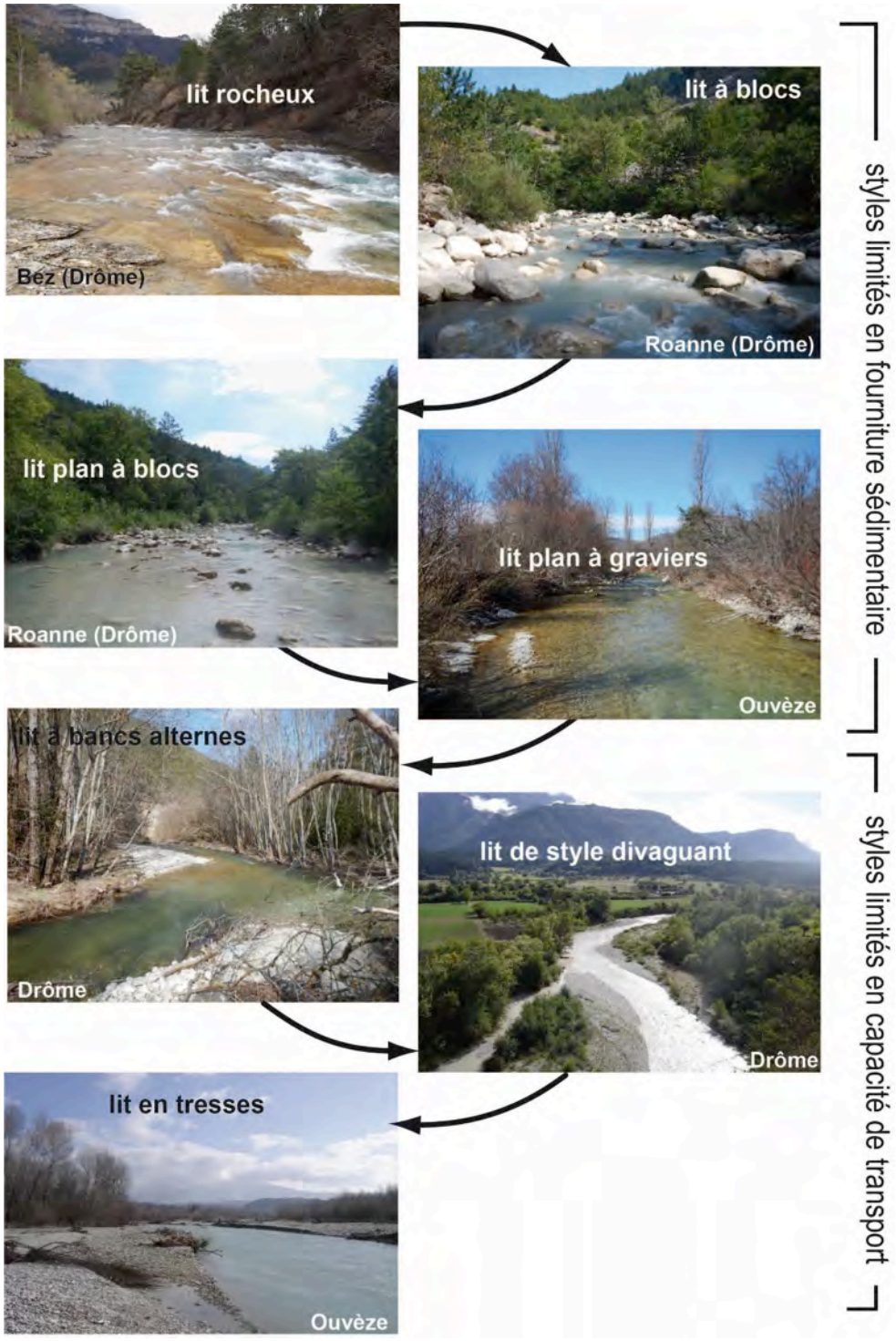


Figure 13 : Continuum des styles morphologiques de montagne sur le gradient amont-aval

5.2.3. *REPONSES MORPHOLOGIQUES*

Les flux liquides et solides du bassin versant connaissent des fluctuations durables en valeurs moyennes sous l'effet des changements climatiques et des modifications de l'occupation du sol. La morphologie des chenaux s'ajuste à ces fluctuations en suivant les principes de l'équilibre morphologique. On parle d'exhaussement ou d'aggradation lorsque l'altitude du chenal augmente de manière durable dans le temps sous l'effet d'un régime sédimentaire excédentaire. Lorsque celui-ci est déficitaire, le lit se creuse et on parle d'incision ou de dégradation. Ces ajustements morphologiques durables ne doivent pas être confondus avec les cycles de dépôt et de reprise du lit qui se produisent à l'échelle d'une crue ou d'une série de crues et qui traduisent un déséquilibre morphodynamique provisoire analogue à une *respiration*. La période de temps caractéristique des cycles d'exhaussement ou d'incision est pluri-décennale et elle est imposée par la cadence des forçages externes. On parle de temps de réponse pour désigner l'intervalle de temps qui sépare le forçage externe de la réaction morphologique. Le temps nécessaire au retour à l'équilibre (celui-ci pouvant être différent de celui qui existait avant la perturbation) est désigné comme le temps de récupération du chenal.

Il ne faut donc jamais perdre de vue que les cours d'eau sont des systèmes physiques qui disposent d'une mémoire. Leur fonctionnement actuel est souvent influencé par des héritages historiques qu'il convient de bien prendre en compte dans l'analyse et l'interprétation morphodynamique. Faire l'impasse sur la dimension historique des systèmes fluviaux peut conduire à un diagnostic incorrect et à des propositions d'intervention inadaptées en matière de gestion du lit et des sédiments. C'est souvent l'analyse historique qui permet d'identifier l'origine des déséquilibres sédimentaires susceptibles d'expliquer les trajectoires morphologiques des chenaux. Cela est d'autant plus important que les réponses fluviales sont différées dans le temps. Elles se propagent dans l'espace au même rythme que la dispersion des vagues sédimentaires, qui est relativement lente : quelques centaines de mètres par an à quelques kilomètres par an pour les plus rapides (Hoey, 1992). Ces réponses sont aussi caractérisées par une forte variabilité spatiale, qui traduit l'hétérogénéité des conditions locales mais aussi la dynamique propre des vagues sédimentaires et l'origine des perturbations.

Les rivières de Nouvelle-Zélande offrent un cas exemplaire de réponse morphologique au changement d'occupation du sol (déboisement). Les principaux défrichements datent de la colonisation européenne et ils ont été intensifs au début du 20^{e} siècle. En quelques décennies, les forêts natives ont été remplacées par des pâturages, ce qui a provoqué des reprises d'érosion d'ampleur parfois exceptionnelle. L'exemple emblématique est celui du Tarndale, dans le bassin de la Waipaoa, sur l'île du Nord. Il s'agit d'un vaste amphithéâtre d'érosion, probablement initié par un glissement de terrain qui s'est rapidement transformé en un complexe de ravines très actives. Celui-ci alimente une rivière torrentielle (Te Weraroa) qui draine un bassin versant de 29 km². À partir des années 1960, un programme de reboisement a été entrepris pour tenter de stabiliser le ravinement. La réponse du lit aux défrichements s'est traduite par un exhaussement spectaculaire, pouvant atteindre localement une dizaine de mètres.

La production sédimentaire par le ravinement a été estimée à près de 30 Mt en 38 ans (1950-1988), 48 % de cette production était toujours stockée dans le lit du torrent en 1996 (Figure 14). Même si le reboisement a joué un effet significatif d'atténuation de l'érosion, le transport solide du torrent va être influencé pendant de nombreuses décennies par la remobilisation des stocks sédimentaires, qui se produit à un rythme modéré comparativement à celui de l'exhaussement (Gomez et al., 2003 ; Liébault et al., 2005).

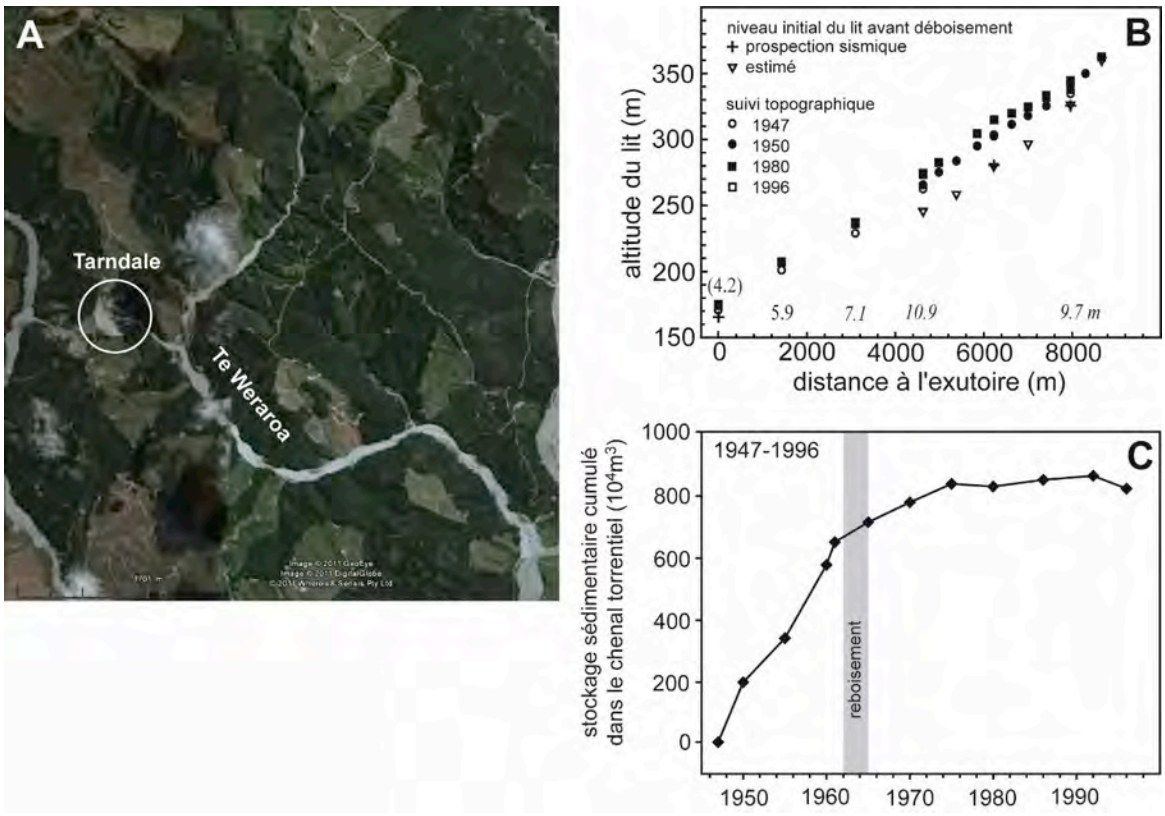


Figure 14 : Réponse morphologique au déboisement des versants en Nouvelle-Zélande.

(A) Vue aérienne Google Earth du Te Weraroa et du complexe de ravinement Tarndale. (B) Évolution de l'altitude du lit depuis la période pré-déboisement ; les valeurs indiquent l'intensité de l'exhaussement sur la période 1947-1996 (d'après Liébault et al., 2005). (C) Évolution du stock sédimentaire cumulé dans le chenal principal du Te Weraroa entre 1947 et 1996 (d'après Liébault et al., 2005).

L'activité minière peut également altérer durablement le régime sédimentaire du bassin versant en délivrant des volumes considérables de débris rocheux au réseau hydrographique. La progradation vers l'aval des débris miniers et les effets morphologiques associés ont été désignés par le terme de vague sédimentaire dès le début du 20^{e} siècle (Gilbert, 1917). Depuis, ce concept a été revisité et redéfini afin de mieux différencier les effets de l'activité minière sur les flux solides et les formes fluviales. Le concept de « vague morphologique » (*bed wave*) a été ainsi introduit pour désigner les fluctuations altimétriques des lits impactés par les apports miniers (Hoey, 1992 ; James, 2006). Au-delà des clarifications terminologiques, ces travaux mettent en lumière que les apports miniers contribuent à construire des stocks sédimentaires massifs dans les fonds de vallée qui vont impacter les flux sédimentaires de manière durable, longtemps après l'arrêt de l'activité minière (James, 2010). Les exemples parmi les mieux documentés concernent le bassin de la Sacramento en Californie (Sierra Nevada), où l'extraction de l'or a produit 2.1 Gt de débris sur une période de 31 ans (James, 2006). On peut citer aussi la Ringarooma en Tasmanie, où l'extraction d'étain dans des gisements alluviaux a introduit 40 Mm^3 de débris dans le réseau hydrographique (Knighton, 1989). Que ce soit l'un ou l'autre, ces deux exemples montrent une phase d'aggradation rapide qui se propage vers l'aval, suivie d'une phase d'incision plus lente, qui ne remobilise que très partiellement les stocks d'origine minière (Figure 15).

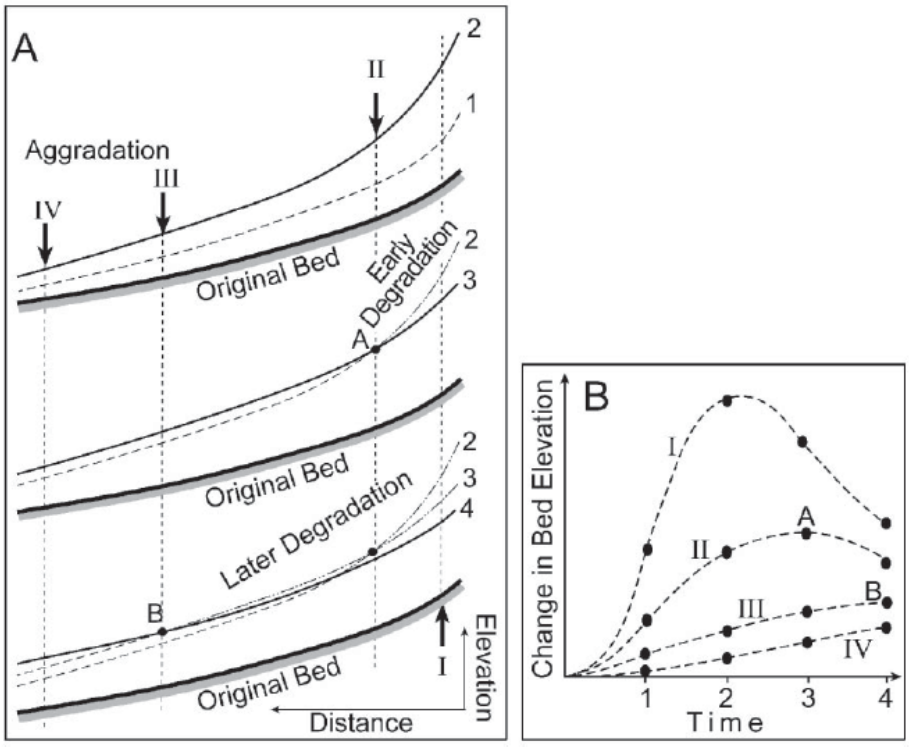


Figure 15 : Modèle d'ajustement du lit sous l'effet de la propagation d'une vague sédimentaire, inspiré des observations réalisées dans le bassin versant de la Sacramento impacté par l'activité minière (James, 2006).

(A) phase d'aggradation du profil en long (1 et 2) suivie d'une phase d'incision se propageant vers l'aval (3 et 4) ; l'altitude maximum du lit en un point du profil est atteinte avant que le point d'inflexion (A et B) ne passe au droit du site en question, traduisant le basculement de l'aggradation vers l'incision. (B) Évolutions altimétriques stationnelles du lit lors des phases d'aggradation/incision, en différents points du profil en long.

Le scénario inverse se produit dans la plupart des torrents alpins du fait de la reconquête forestière des versants, principalement liée à la déprise rurale et secondairement à la politique de restauration des terrains en montagne (Liébault et Piégay, 2002 ; Piégay et al., 2004). L'analyse systématique des photographies aériennes de la seconde moitié du 20e siècle dans les montagnes drômoises (Diois et Baronnies) a révélé une tendance très nette à la rétraction des bandes actives torrentielles dans les années 1950 et 1960 (Figure 16).

Sur certains torrents, il a été possible de remonter plus loin dans le temps grâce à l'existence de cartes détaillées réalisées au 19e siècle. Ces documents montrent également une rétraction au cours de la première moitié du 20e siècle, à mettre en relation avec les travaux de correction torrentielle, mais cette phase d'ajustement est sans commune mesure avec celle observée à partir des années 1950. La phase récente est à l'origine de la métamorphose fluviale qui se traduit par la disparition des tressages torrentiels et leur remplacement par des lits confinés à pavage grossier dont les bandes actives ne sont plus visibles sur les photographies aériennes.

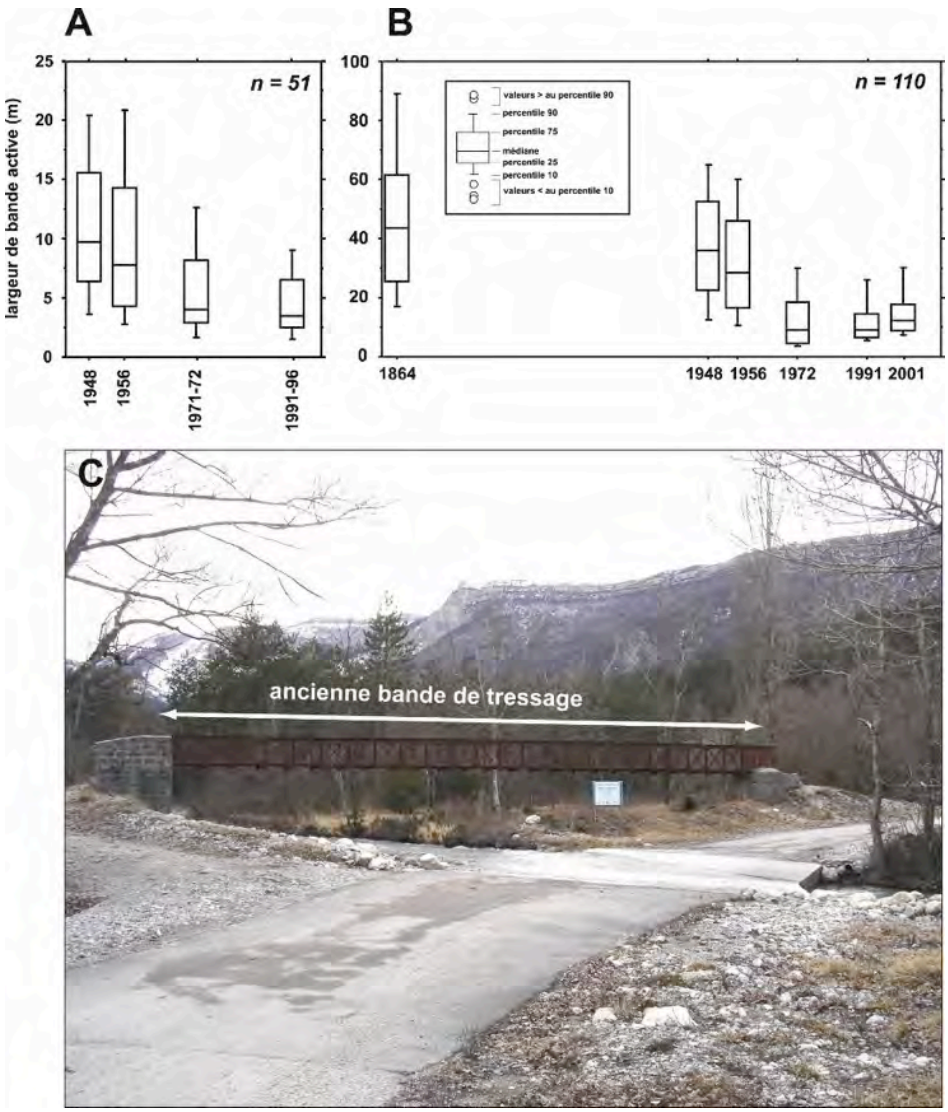


Figure 16 : Évolution des bandes actives

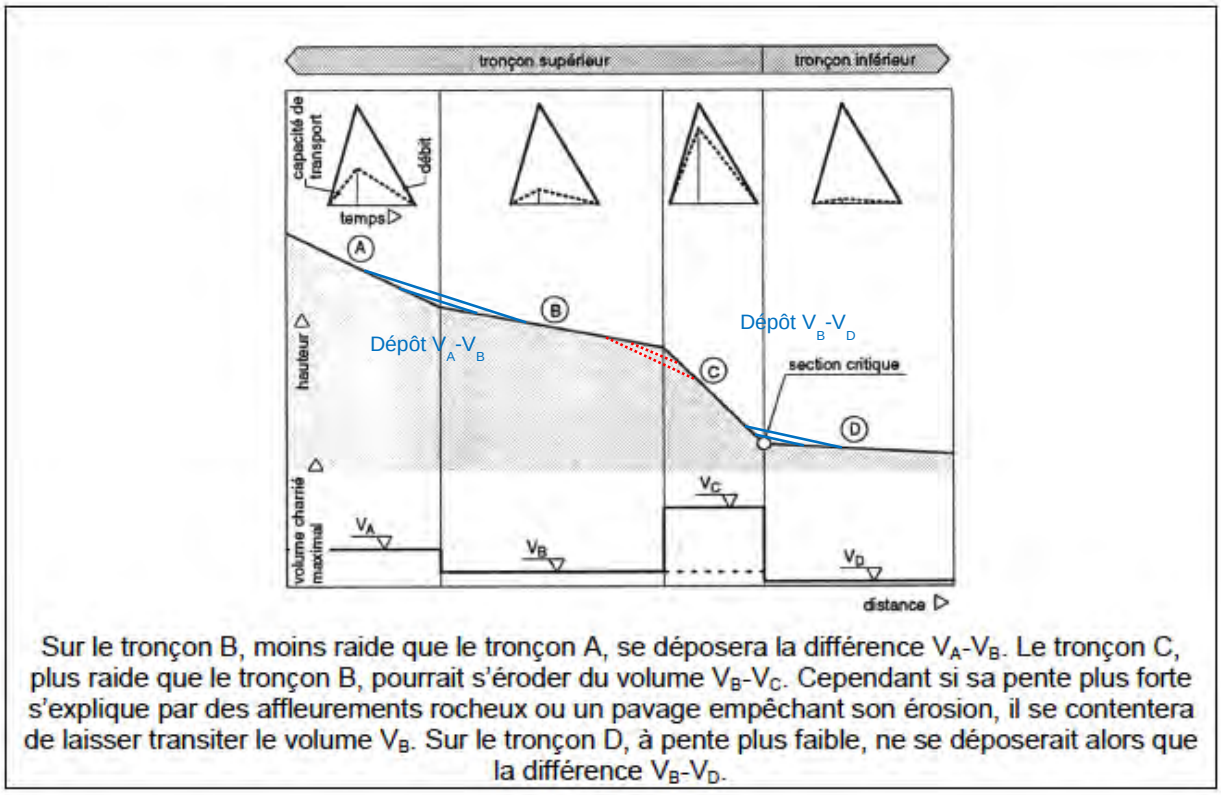
(A) Évolution moyenne des bandes actives de 51 torrents drômois d'après les photographies aériennes de 1948, 1956, 1971-72 et 1991-96 (Liébault et al., 2005) ; (B) Évolution de la bande active de la Sure, affluent de la Drôme, entre 1864 et 2001 (Liébault et al., 2005); (C) exemple de torrent rétracté dans la Drôme (la Béoux) ; l'ouvrage de franchissement construit au 19e siècle paraît aujourd'hui surdimensionné et il témoigne de l'abandon de l'ancienne bande de tressage, aujourd'hui remplacée par un chenal unique incisé dans des terrasses boisées. (Photos F. Liébault)

Les tresses se sont maintenues préférentiellement à l'aval, sous l'effet d'apports sédimentaires soutenus par l'incision progressive des têtes de bassin liée au tarissement de la recharge sédimentaire. Certaines tresses doivent donc être considérées comme des formes résiduelles qui ne sont plus en équilibre avec les conditions d'érosion actuelles des hauts bassins. Elles sont pour la plupart d'entre elles un héritage des pulsations détritiques du petit âge glaciaire qui se sont propagées dans les vallées alpines sous forme de vagues sédimentaires (Bravard, 1989). Une étude récente réalisée sur 20 % du linéaire tressé des Alpes françaises à partir des profils en long historiques a montré que 56 % du linéaire étudié est en incision au cours du 20e siècle, principalement sous l'effet des extractions de graviers (Liébault et al., 2013). Là où ces extractions ont été peu importantes, les tresses se sont exhaussées, probablement du fait du déstockage des têtes de bassin.

5.2.4. ÉVOLUTION DU PROFIL EN LONG

Sur le temps long, les processus fluviatiles d'érosion et de dépôt ont tendance à lisser les irrégularités du profil en long du cours d'eau. Les seuils ont donc tendance à s'estomper, et les creux à se combler, pour aboutir à un profil d'équilibre où la pente est ajustée en tout point au débit liquide et à la charge sédimentaire à transporter. Les prédictions des modèles numériques 1D d'évolution du profil en long sont fondées sur ce principe d'équilibre (Figure 17). La capacité de transport solide par charriage étant principalement fonction de la pente du lit, ce sont les différences de pente sur le gradient amont-aval qui vont déterminer les tendances d'évolution altimétrique sur le temps long. Ainsi, le bilan sédimentaire de chaque tronçon de pente uniforme peut être évalué sur la base du différentiel de pente entre le tronçon en question et celui qui le précède en amont, en prenant garde de ne considérer ici que les tronçons de nature alluviale. Il faut en effet considérer que les tronçons de nature rocheuse ne font que transiter la charge sédimentaire qui arrive de l'amont, et ce transfert se fait sans interaction majeure avec le lit.

Bien entendu, ce type d'approche fondée sur le principe de pente d'équilibre ne peut que difficilement reproduire la réalité des trajectoires morphologiques, dans la mesure où elle n'intègre pas un des moteurs essentiels de la morphodynamique des rivières de montagne, à savoir les fluctuations aléatoires et saisonnières des apports de versant, qui peuvent générer une situation de déséquilibre permanent et engendrer des trajectoires morphologiques complexes, difficilement prévisibles.



Sur le tronçon B, moins raide que le tronçon A, se déposera la différence V_A-V_B. Le tronçon C, plus raide que le tronçon B, pourrait s'éroder du volume V_B-V_C. Cependant si sa pente plus forte s'explique par des affleurements rocheux ou un pavage empêchant son érosion, il se contentera de laisser transiter le volume V_B. Sur le tronçon D, à pente plus faible, ne se déposerait alors que la différence V_B-V_D.

Figure 17 : Principe de la dépendance amont/aval (Richard, d'après Bezzola, Schilling, Oplatka ; 1996)

5.3. TECHNIQUES ET MOYENS DE CONTROLE DES FLUX SEDIMENTAIRES

5.3.1. LA CORRECTION DES TORRENTS

En matière de contrôle des productions et des flux sédimentaires en zones de montagne, la France est riche de plus de 150 ans d'expérience, au travers des techniques mises en œuvre dans le cadre de la « Restauration des Terrains en Montagne » (RTM). La politique de restauration des terrains en montagne s'est élaborée à partir du milieu du XIX^{e} siècle suite à la pression anthropique (surpâturage, surexploitation forestière) dans les hauts bassins de montagne.

L'objectif était la protection contre les risques de crues torrentielles dans les hautes vallées, et plus globalement contre les risques d'inondations y compris plus en aval, par une meilleure régulation du régime des eaux dans les hauts bassins. Compte-tenu des spécificités des crues torrentielles rappelées plus haut, les techniques mobilisées avaient bien ainsi vocation, entre autres, à réguler les flux sédimentaires, au moins dans les hauts bassins versants.

D'importants travaux de reforestation ont d'abord été entrepris, puis en 1882 la loi de restauration des terrains de montagne a créé les périmètres RTM, où un "danger actuel et

constaté" justifiait une intervention (Piton, 2016a) et dont l'État a fait l'acquisition, au besoin par expropriation. De fait, environ 300 000 ha ont été acquis pour constituer les séries domaniales RTM, traitées à la fois par des travaux de reboisement et des ouvrages de génie civil. Jusqu'à la première guerre mondiale, des travaux considérables ont été réalisés.

L'évolution des usages et de la fréquentation des espaces de montagne, particulièrement intense depuis les années 70, avec le développement du tourisme et des voies de communication notamment, a conduit à recourir de plus en plus à d'autres techniques plus directement dédiées à la protection des personnes et des biens.

5.3.2. STRATEGIES DE PROTECTION CONTRE LES RISQUES TORRENTIELS

On distingue ainsi aujourd'hui deux grandes familles de stratégies de protection contre les crues torrentielles, qui gagnent souvent à être mises en œuvre de façon complémentaire. Pour être complet il faut également distinguer des mesures que l'on peut qualifier de "structurelles", car ayant recours à la construction d'ouvrages de protection (barrages, pièges à sédiment, canalisations…), de mesures inversement "non-structurelles", ne faisant pas appel à des constructions. Il s'agit par exemple des outils de zonage du risque permettant de réglementer l'usage du sol, ou des mesures d'alerte et d'évacuation par exemple.

5.3.2.1. Techniques de correction active

Les techniques de correction dite « active » ont été largement utilisées à l'origine des actions de la Restauration des Terrains en Montagne à partir de la fin du XIXe siècle (Piton, 2016a). Leur objectif est d'agir sur les causes de l'érosion, du ruissellement et du transport solide et plus généralement des crues en stabilisant et protégeant les sols. Ces techniques sont implantées plus ou moins dans l'amont du bassin versant, soit au niveau du bassin de réception et du chenal d'écoulement (Tacnet et Richard, 2010). On retrouve parmi les moyens de correction torrentielle active mis en œuvre du génie biologique (reverdissement, reboisement), des petites corrections (banquettes, seuils dans les ravines) et des barrages de correction torrentielle (chenal d'écoulement).

Sur les versants à forte pente soumis à l'érosion, le reboisement (et de façon plus générale la revégétalisation) est une des protections actives les plus efficaces. Il peut aller de pair avec d'autres petits travaux comme des banquettes linéaires et de petits seuils dans les ravines.

Une autre technique de correction active consiste à consolider le chenal d'écoulement à la sortie du bassin de réception à l'aide d'une succession de seuils. L'objectif principal est de stabiliser le profil en long, empêchant ainsi la mobilisation de sédiments du lit et facilitant la reprise de la végétation sur les berges plus stables. De façon secondaire, ces seuils sont utilisés pour centrer l'écoulement grâce à l'orientation de leurs cuvettes déversoirs pour éviter qu'il affouille les pieds de versants.

Sur les versants soumis à l'érosion		
	Type	Objectif(s)
Revégétalisation	- Reboisements, engazonnements, embroussaillements, …	- Défense contre l'érosion - Restauration des sols - Régulation du régime des eaux

Sur les versants soumis à l'érosion		
	Type	Objectif(s)
Petite correction torrentielle	- Correction de versants à l'aide de petits ouvrages de génie civil : banquettes grillagées ou en métal déployé, murettes,… - Correction de ravines ou de versants à l'aide d'ouvrages de génie biologique : palissades, clayonnage, fascinage, garnissage,… - Correction de ravines à l'aide de petits ouvrages de génie civil : seuils en bois, en pierres séches, banquettes grillagées ou en métal déployé, murettes,…	- Défense contre l'érosion intervenant sur les versants et dans les ravins drainant de faibles impluviums

Dans le lit des torrents		
	Type	Objectif(s)
Barrages	- Poids, enrochements, auto-stables, à contreforts, plaques, câbles,…	- Fixation des lits torrentiels dans les zones d'affouillement potentiel par stabilisation du profil en long et redressement - Stabilisation des glissements de berges - Laminage des laves torrentielles (pour les ouvrages de grande hauteur surtout)

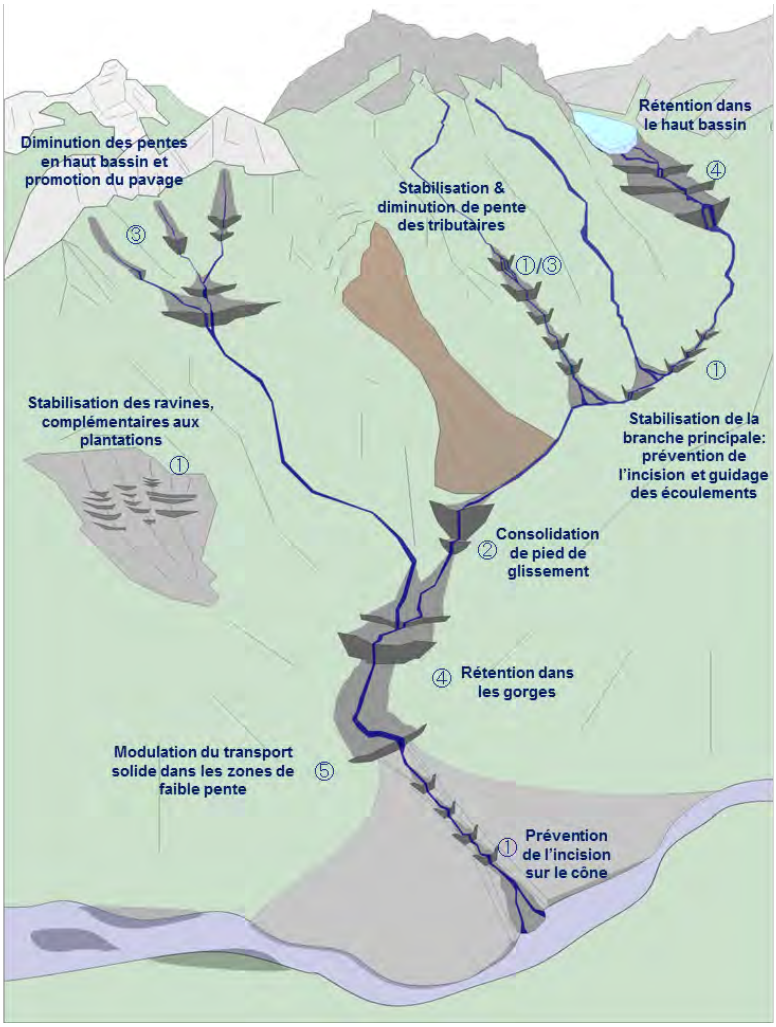
Travaux associés : Travaux de revégétalisation ou de traitement des versants
Travaux de lutte contre les glissements de terrain : dévisation, galerie, drainage…
Protections contre l'affouillement : radier, fosse de dissipation, contre barrage…
Protestion amont des barrages : entonnements latéraux, protection contre les chocs…

Figure 18 : Principales techniques de correction active (source RTM 05)

5.3.2.2. Les barrages de correction torrentielle

Historiquement, les techniques de revégétalisation, notamment par reboisement, ont été largement mobilisées, pour ne pas dire même privilégiées, au démarrage de la politique de restauration des terrains en montagne déployée en France à partir de la seconde moitié du XIX° siècle. Il est certain que de telles mesures, reposant sur le recours à du matériel végétal et aux services écosystémiques associés en matière de stabilisation des sols et de régulation du régime des eaux, sont a priori et dès lors qu'elles font la preuve de leur efficacité, les plus respectueuses des principes du développement durable, même si ces notions de développement durable et de services écosystémiques n'étaient bien sûr à l'époque pas explicitées en ces termes à l'époque.

Assez rapidement cependant s'est imposée la nécessité de faire appel également à des techniques de génie civil. Cela a été le cas notamment pour améliorer l'efficacité des travaux de revégétalisation, à l'aide de différents ouvrages de petit génie civil assurant la stabilité des versants, au moins le temps que la végétation s'installe et puisse prendre le relais.



① Stabilisation : création de points fixes pour lutter contre incision et pour guider les écoulements (Demontzey 1882).

②Consolidation : Elevation du profil en long pour former une butée de pied aux instabilités de pentes (Gras 1850, Kuss 1900).

③Diminution des pentes : par création d'un atterissement pour diminuer l'énergie de l'écoulement et sa capacité à remobiliser les gros blocs (Gras 1850).

④ Rétention : piégeage à long terme (Gras 1850,Breton 1867).

⑤ Modulation du transport solide : via les respirations torrentielles du lit (Gras 1857)

→ Fonctions mixtes dans beaucoup de cas

Figure 19 : Fonctions des barrages de correction torrentielle (Piton, 2016)

De nombreux barrages ont également été construits le long des biefs du réseau hydrographique, pour y remplir un certain nombre de fonctions visant à réduire, ou au moins réguler, les flux sédimentaires, un même ouvrage pouvant remplir plusieurs fonctions, selon sa forme, son positionnement et les phénomènes en jeu dans le bassin versant.

La Figure 19 ci-dessus synthétise les différentes fonctions qui peuvent être assurés par des barrages de correction torrentielle, selon leurs caractéristiques, leur forme, leur localisation dans le bassin versant et leur position par rapport aux autres ouvrages, détaillées dans le Tableau 3. Pour plus de détails, on se réfèrera à la publication Piton, 2016 dont ces éléments sont issus.

Tableau 3 : Fonctions des barrages de correction torrentielle selon leurs caractéristiques et leur localisation (d'après Piton, 2016) :

Fonction	Caractéristiques et forme du barrage	Position du barrage par rapport aux autres barrages	Localisation dans le bassin versant
Stabilisation	Largeur de déversoir de la crête de barrage ≈ largeur du chenal naturel	Assez près pour permettre une continuité dans le contrôle longitudinal du lit et dans le centrage de l'écoulement	Partout où l'incision et le déplacement latéral du chenal doivent être évités
Consolidation	Barrage ou série de barrages significativement plus hauts que le niveau initial du lit		Directement en aval des instabilités de pente importantes : glissements de terrain, ravines ou falaises
Diminution des pentes			Où les pentes sont plus raides que l'équilibre alluvial et partout où l'aggradation n'est pas un problème, afin que la structure crée une pente plus douce qui réduira l'énergie de l'écoulement et la capacité de transport des rochers
Rétention	Barrage ou série de barrages élevés pour maximiser le volume de sédiments piégés	Un ou quelques barrages proches les uns des autres en aval d'une zone de dépôt étendue	Où le stockage à long terme des sédiments est possible : dans les têtes de bassins ou dans les gorges (et où, compte tenu de la situation actuelle, un déficit de sédiments en aval n'est pas un problème)
Modulation du transport solide	Déversoir à crête large pour favoriser l'étalement des écoulements	Structures distantes pour maximiser les surfaces de dépôt en amont	Où la pente est assez faible et la superficie disponible suffisamment grande pour stocker temporairement les sédiments

5.3.2.3. Méthodes de défense passive

L'expérience a montré que la correction active ne pouvait être complètement adaptée en toutes circonstances. Son efficacité obtenue seulement au bout de plusieurs années dans un contexte d'exigences de sécurité toujours plus contraignantes depuis la seconde moitié du XXème siècle a mis à jour certaines limites de cette stratégie de protection, et des techniques de défense dite « passive » ont été développées pour dépasser ces limites (Figure 20). Celles-ci ne visent plus à étouffer les phénomènes érosifs, mais à mettre les enjeux socio-économiques à l'abri de leurs effets dévastateurs (Richard, 2004). L'objectif de la protection passive est donc de limiter les effets de l'érosion et du transport solide en stockant les apports sédimentaires, en contenant les écoulements et en évitant l'exposition des biens ou des personnes.

TRANSIT		
	Type	Objectif(s)
Chenal d'écoulement / endiguement	- Digues, murs de soutènement - Levées de terre, murs / murets, ouvrages composites	- Contenir l'écoulement pour protéger des enjeux - Empêcher le débordement - Favoriser le transit des écoulements déchargés ou non de leur transport solide, au travers des zones exposées
Protection de berges	- Murs de soutènement - Enrochements - Epis - Génie végétal	- Empêcher l'érosion en berges et la reprise sédimentaire - Empêcher les divagations
Protection du fond du lit	- Pavages de fond (radier, enrochements…) - Barrages et seuils - Dispositifs parafouilles	- Prévenir l'incision du lit (stabilisation du profil en long) - Prévenir l'affouillement des ouvrages

STOCKAGE		
	Type	Objectif(s)
Plage de dépôts		- Arrêter et stocker tout ou partie des matériaux transportés par les crues torrentielles à l'amont des zones à protéger - Réduire l'impact des blocs et des flottants
Piège à flottants	- Filets, grilles - Barres en acier ou pieux	- Laisser passer l'eau mais retenir les flottants
Ouvrage freineur	- Dents freineuses, tas freineurs en remblai	- Dissiper l'énergie - Etaler l'écoulement pour favoriser son dépôts
Fermeture de plage de dépôts	- Poids, auto-stables, seuils ou rampes en enrochements,…	- Déterminer la sélectivité de rétention de la plage de dépôts (blocs / flottants / graviers, avec ou sans autocurage)

TRANSIT / STOCKAGE		
	Type	Objectif(s)
Curages / recalibrages	- Curages - Recalibrages - Elargissements	- Augmenter la section d'écoulements - Restaurer une capacité de dépôt - Régulation du transport solide
	-	-
	-	-

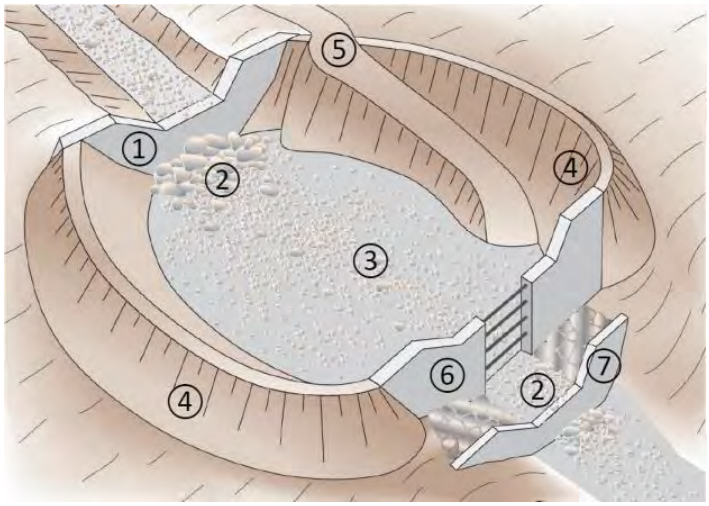
Figure 20 : Principales techniques de défense passive (source RTM 05)

Ces techniques sont implantées à proximité des enjeux à protéger, donc plutôt dans les parties aval du bassin versant et sur les cônes de déjection. On retrouve parmi les moyens de défense passive des ouvrages tels que des plages de dépôt (également appelés « barrages perméables de sédimentation »), des canaux de dérivation et des endiguements, mais aussi des mesures non structurelles comme le contrôle de l'urbanisme pour limiter et adapter le bâti en zone exposée.

Dans le registre des mesures non structurelles, l'outil central de la prévention des risques naturels en France est aujourd'hui le Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) qui réglemente les zones constructibles en y imposant certaines mesures constructives pour protéger le bâti (et ses occupants). Des cartographies de l'aléa, de la vulnérabilité, et in fine du risque sont dressées pour délimiter les zones où la construction est interdite si le risque est trop fort (zones rouges), ou réglementée là où le risque est considéré comme étant suffisamment modéré pour l'autoriser (zones bleues).

5.3.2.4. Les plages de dépôt

L'ouvrage de protection passive par excellence est la plage de dépôt. Ce dispositif est relativement simple sur son fonctionnement mais présente des questions des plus complexes quant à son dimensionnement (Piton, 2016). Il consiste à créer une zone d'arrêt des matériaux charriés (ou des laves torrentielles) tout en laissant circuler les eaux. Une plage de dépôt est donc constituée d'un ouvrage en entrée de type seuil (pas systématique), d'une zone de dépôt, limitée quand nécessaire par des digues ou remblais, puis d'un ouvrage terminal filtrant suivi parfois d'une protection contre l'affouillement. Afin d'assurer son efficacité fonctionnelle, une plage de dépôt doit être curée régulièrement. L'accès et la disponibilité d'une zone de stockage proche sont donc très importants vis-à-vis des coûts de curages. Certains ouvrages fonctionnant correctement ont ainsi dû être abandonnés parce que les zones proches d'évacuation des matériaux de curages étaient saturées.



1. Seuil amont
2. Protection contre l'affouillement
3. Bassin
4. Digues latérales
5. Piste d'accès
6. Barrage filtrant
7. Contre barrage

Figure 21 : Schéma d'une plage de dépôt type (source Piton et Recking, 2016a)

Une plage de dépôt peut permettre de :

- Retenir un volume excessif de sédiments qui risquerait de s'accumuler dans le chenal d'écoulement,
- Écrêter un débit solide instantané excessif qui risquerait de dépasser la capacité hydraulique du chenal d'écoulement à l'aval, avec les mêmes conséquences,
- Piéger des blocs qui risqueraient d'obstruer le chenal d'écoulement en aval,
- Piéger des flottants qui risqueraient d'obstruer des ouvrages en aval, et d'entraîner un débordement sur le cône de déjection qui pourrait menacer des enjeux exposés.

Il faut avoir conscience cependant que les plages de dépôts viennent généralement fortement perturber le transit sédimentaire, générant des effets secondaires indésirables :

- L'arrêt excessif de la charge solide de l'écoulement entraîne en général une reprise d'incision par érosion dans le cône de déjection, ce qui nécessite de renforcer le chenal d'écoulement en aval, au moyen de nouveaux ouvrages (seuils, radiers, …) susceptibles de générer de nouveaux problèmes. Sur un plan plus global, ce piégeage massif du transport solide rompt la continuité sédimentaire, avec les conséquences néfastes potentielles sur la qualité des cours d'eau et de leurs habitats que l'on connait. Si l'objectif recherché est bien la rétention totale des sédiments grossiers, l'aménagement doit immédiatement anticiper cette incision et mettre en œuvre des aménagements stabilisant le profil en long aval. Alternativement, certaines conceptions permettent une transparence sédimentaire partielle, limitant les risques d'incision mais maintenant un certain transport solide dans le cours d'eau.
- Un autre aspect qui mérite attention est la prise en compte du risque éventuel de relargage brutal par surverse de flottants temporairement piégés par l'ouvrage de fermeture de la plage de dépôt, susceptible d'aggraver le risque de formation d'embâcles à l'aval. Des adaptations de l'ouvrage de fermeture sont possibles pour prévenir ce type de problème (Piton et Recking, 2016b).

La conception d'une plage de dépôts doit donc faire l'objet d'une réflexion globale, des hauts bassins jusqu'à la confluence, et intégrer la prise en compte des coûts d'investissement et de maintenance sur le long terme, l'efficacité d'une plage de dépôt étant conditionnée par la réalisation de curages réguliers assurant qu'elle conserve toute sa capacité de stockage.

Les processus de contrôle du dépôt dépendent pour certains de la forme du bassin de rétention :

- Pente : la réduction de la pente diminue la capacité de transport
- Largeur : la dispersion des écoulements dans un bassin diminue le débit spécifique (Débit/Largeur) et donc la capacité de transport

et pour d'autres de l'ouvrage de fermeture :

- La formation d'un delta par un "contrôle hydraulique" correspondant à l'entrée des sédiments dans une zone de moindre vitesse, permet le dépôt à la manière d'un cours d'eau entrant dans un lac.
- Le blocage d'éléments grossiers (troncs, blocs) dans une section étroite par "contrôle mécanique".

5.4. APPORTS DES SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES POUR APPREHENDER LA QUESTION DES PERCEPTIONS DES TRANSFORMATIONS ENVIRONNEMENTALES

Les premières recherches bibliographiques ont consisté à connaître et comprendre le contexte historique et actuel de la commune de Thio au travers de différents supports : reportages, articles de presse, travaux universitaires (Dégremont 2008 ; [NC TV] « Sur les traces du Passé - L'Histoire du village de Thio » 2015 ; Les Nouvelles calédoniennes ; Archives de l'ADRAF). La lecture d'articles et de mémoires universitaires anthropologiques dont les études avaient été menées en Nouvelle-Calédonie et dans la commune sur la question minière, a été ensuite privilégiée. Il s'avère que les études abordant cette thématique à propos de la commune de Thio relèvent plutôt de l'anthropologie politique, mettant en évidence les enjeux soulevés par l'exploitation vis-à-vis des populations, et plus particulièrement des habitants des tribus au niveau foncier, environnemental, économique et social (Le Meur et al. 2012; Le Meur 2012; Kowasch 2012).

La question du vécu associé à l'engravement et à l'hyper-sédimentation n'a pas été abordée. Ainsi, l'apport d'autres disciplines, notamment celui de la géographie sur les questions d'érosion et de processus d'engravement a été précieux (Iltis 1990; Danloux et Laganier 1991; Allenbach et Hoibian, s. d.,2002). Par ailleurs, le manque de littérature en la matière en anthropologie a induit la nécessité d'appréhender les questions environnementales au travers de recherches portant sur d'autres objets d'étude et à l'échelle de Pacifique : perceptions du changement climatique, transformation dans les pratiques locales et adaptation des populations en contextes de changements environnementaux (Ruddle, Johannes, et Unesco 1985; Hyndman 2005; Worliczek 2013; Nanau 2014; Edwards 2014).

6. COMMENT CARACTERISER LE SUR-ENGRAVEMENT

L'érosion des surfaces d'activités minières (zones d'exploitation, zones de prospection ayant entrainé la création de routes et le décapage de la végétation, zones de décharge) contribue à une production importante de sédiments qui viennent alimenter la charge solide des rivières situées en aval. L'importance de ces apports conduit à qualifier certains cours d'eau de sur-engravés.

Ces apports sédimentaires surabondants se propagent à travers le réseau hydrographique de manière discontinue par des vagues sédimentaires, où des phases de transport initiées lors d'événements de forte intensité alternent avec des phases de dépôt. La morphologie des cours d'eau s'ajuste à ces modifications d'apports sédimentaires par un élargissement de leur bande active, telle que définie plus bas, accompagné d'une aggradation des bancs de galets.

L'ajustement en largeur des bandes actives des cours d'eau, en réponse à des modifications des conditions et des capacités de transport solide, est particulièrement notable dans les systèmes Néo-Calédoniens très impactés par les activités minières passées. En partant de l'hypothèse que cet ajustement à des conditions hydro-sédimentaires suit une loi de comportement que l'on retrouve partout à l'échelle régionale dans des contextes géologiques identiques (massifs de péridotites), il est donc possible d'identifier à partir des largeurs de bande active et de cette loi les systèmes qui ne sont pas à l'équilibre. On suppose donc pouvoir identifier à partir des écarts à cette loi, les systèmes qui ne présentent pas un fonctionnement dit « naturel » et qui sont donc impactés par les apports sédimentaires provenant d'activités minières.

6.1. LA BANDE ACTIVE COMME INDICATEUR DES APPORTS MINIERS

La démarche proposée ici repose sur l'idée d'utiliser la largeur de la bande active fluviale (espace constitué par les bancs de graviers non végétalisés et les chenaux en eau) comme indicateur du sur-engravement lié à l'activité minière. La morphologie des cours d'eau non confinés enregistre le passage des vagues sédimentaires (apport épisodique massif de sédiment dans un système fluvial qui se traduit par un cycle d'aggradation/incision qui se propage vers l'aval) liées à un apport massif de sédiments grossiers par un élargissement de la bande active, qui traduit souvent un exhaussement du lit (Jacobson et al., 1999 ; Kondolf et al., 2002). Ainsi, pour une même surface drainée, la bande active devrait être d'autant plus large que les apports sédimentaires en provenance des mines sont importants.

- Pertinence : une augmentation des apports sédimentaires se traduit par un exhaussement et un élargissement de la bande active, donc la mesure de la largeur de la bande active renseigne bien sur les conditions hydro-sédimentaires.
- Facilité d'acquisition : utilisation de données numériques et de géotraitements, donc très facile, rapide par rapport à une prospection sur le terrain, et peu chère.
- Validité : incertitude de la mesure de largeur moins importante car moyennée sur 10 valeurs. Validation de la délimitation de la bande active par 2 experts.
- Limite : limites de la télédétection sous canopée.

- Incertitudes liées à la RMSE de la loi de fonctionnement naturel mais pas directement d'incertitudes liées à la mesure de la bande active.

6.2. METHODE

Pour constituer une loi régionale robuste reflétant le comportement naturel des bandes actives nous avons identifié 63 sites en milieu non impacté par l'activité minière, dispersés à travers toute la Grande Terre, dans des massifs de péridotites, et avec des tailles de bassins versants variées. Cet échantillon a été constitué à partir de l'analyse experte des orthophotographies en appliquant les règles suivantes : si aucune activité minière n'était présente dans le bassin versant, ou si aucune vague sédimentaire en relation directe avec l'activité minière n'avait pu être détectée, ou enfin si le site était situé en aval de la propagation d'une telle vague sédimentaire, alors le site était classé comme non-impacté.

Cet échantillon de sites de référence (non impactés) a été complété par un échantillon de 86 sites impactés (présence conjointe de mines dans le bassin et de vagues sédimentaires qui se propagent depuis les sites miniers), qui a permis d'évaluer si la bande active peut être utilisée comme un indicateur fiable de l'engravement d'origine minière.

Pour chacun des 149 sites d'étude (63 sites de référence et 86 sites impactés), nous avons délimité un tronçon de longueur égale à 10 fois la largeur de la bande active. La bande active a été digitalisée manuellement pour chaque tronçon, de façon à extraire la largeur moyenne de cette bande active (dates variables en fonction des territoires car il existe plusieurs campagnes d'orthophotographies sur l'ensemble de la Grande Terre). La largeur de la bande active a été calculée comme une valeur moyennée sur 10 sections en travers. Nous avons pour cela adapté dans ArcGIS la procédure décrite dans Roux et al. (2015) pour que le pas entre les sections ne soit plus fixe pour tous les tronçons mais qu'il dépende de la longueur des tronçons caractéristiques (Pas = Longueur tronçon / 10). Pour chaque point nous avons également délimité le bassin versant par une procédure (disponible dans le logiciel TAUDEM) d'analyse hydrologique du MNT à 10 m (étapes classiques de correction du MNT, calculs de direction des écoulements, des accumulations de flux). Ces délimitations ont été vérifiées et corrigées manuellement.

Nous avons extrait d'autres indicateurs morphométriques à l'échelle du tronçon et du bassin versant. La délimitation du fond de vallée a été réalisée à partir de l'analyse du MNT à 10 m grâce à l'algorithme Multiresolution Index of Valley Bottom Flatness (MRVBF) disponible dans le logiciel SAGA (Gallant et Dowling, 2003). La largeur moyenne du fond de vallée a ensuite été calculée de la même manière que la largeur moyenne de la bande active. La dernière métrique extraite à l'échelle du tronçon est la pente du chenal : celle-ci a été calculée comme la différence d'altitude entre les deux extrémités du tronçon divisée par la longueur du tronçon (distance planimétrique le long de l'axe médian de la bande active entre les deux extrémités du tronçon). La pente moyenne du bassin versant a été obtenue en faisant la moyenne des valeurs de pente des pixels situés dans le bassin versant. Nous avons également calculé pour chaque bassin la proportion relative de végétation arborée, sur la base d'une cartographie qui avait été effectuée en 2008 à partir d'images SPOT.

Enfin, nous avons calculé pour chaque bassin la proportion relative de surfaces en érosion classées en fonction d'une typologie fonctionnelle qui croise d'une part l'origine de l'érosion (minière vs. non minière), et d'autre part l'intensité de l'apport sédimentaire évaluée visuellement à partir de la présence ou de l'absence de vagues sédimentaires en aval de la zone d'érosion. Ceci nous conduit à distinguer 4 types de surfaces en érosion (Tableau 4). Ces zones d'érosion ont été identifiées, classées et cartographiées de manière experte (un

seul opérateur pour garantir une cartographie spatialement homogène) à partir des orthophotographies les plus récentes disponibles à l'échelle de la Grande Terre.

Tableau 4 : Typologie des sources sédimentaires adoptée pour la cartographie des zones de production sédimentaire des 149 bassins versants utilisés dans l'analyse régionale de la bande active

		Source sédimentaire qui se propage depuis une mine ou une route d'exploitation/prospection	
		oui	non
Source sédimentaire qui alimente une vague sédimentaire	oui	Source sédimentaire minière majeure	Source sédimentaire naturelle majeure
	non	Source sédimentaire minière mineure	Source sédimentaire naturelle mineure

Les valeurs des indicateurs morphométriques ont été transformées en log pour normaliser leur distribution et pour produire une loi qui serait comparable à celles que l'on trouve dans la littérature.

Un modèle largeur active *versus* surface drainée a ensuite été constitué sur l'ensemble des sites non impactés pour constituer une loi de référence. Il s'agit d'un modèle de régression linéaire simple montrant un R^2 de 0.65 ($p<0.001$) (Figure 22). La relation est donc très significative. Une analyse statistique multivariée (ACP) a été testée afin de prendre en compte l'effet d'autres variables de contrôle de la largeur active, comme la pente du lit, la largeur du fond de vallée, la pente moyenne et l'occupation du sol du bassin versant. Les résultats obtenus ne montrent pas d'amélioration sensible par rapport à un modèle simple fondé uniquement sur la surface drainée. D'autre part, aucune différence significative n'est démontrée statistiquement entre les sites non impactés classés en fonction de leur situation géographique générale (façade ouest vs. façade est), même si les régressions montrent une largeur sensiblement supérieure sur les sites de la façade est, plus arrosée. Les différences en terme de régime pluviométrique entre les façades est et ouest ont donc probablement un effet modéré sur les signatures morphologiques, sans doute beaucoup moins important que les effets des conditions de recharge sédimentaire propres à chaque bassin versant.

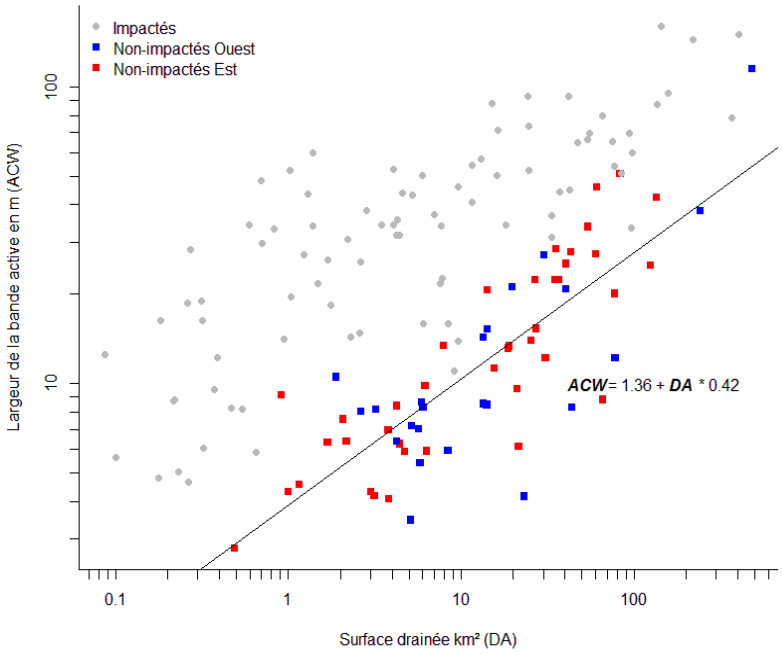


Figure 22 : Largeur de bande active en fonction de la surface drainée

L'écart au modèle de référence est ensuite testé comme proxy du sur-engravement minier en étudiant la relation pouvant exister avec un indicateur de fourniture sédimentaire depuis les sites miniers.

Pour l'échantillon constitué de 86 sites impactés, nous avons projeté les coordonnées sur le nuage de points représentant des sites au fonctionnement dit "naturel" (Figure 22). Ces sites impactés sont tous situés au-dessus de la droite de régression dite de fonctionnement naturel, c'est à dire que ces sites impactés montrent tous des largeurs plus importantes que celles auxquelles on s'attend dans un contexte non-impacté par des activités minières. Leurs résidus sont donc strictement positifs : les largeurs prédites pour ces sites sont toutes inférieures aux valeurs observées.

La cartographie des sources sédimentaires minières majeures (Tableau 4) a permis d'extraire la proportion en surface de ces sources à l'échelle du bassin versant. L'objectif est ici de confirmer que l'écart au modèle naturel de référence est bien contrôlé par la fourniture sédimentaire depuis les mines. La relation statistique entre résidus pour les sites impactés et la proportion des sources actives dans le bassin versant est significative (Figure 23) : R^2 ajusté de 0.44, critère AIC de 102.02 et RMSE de 0.43.

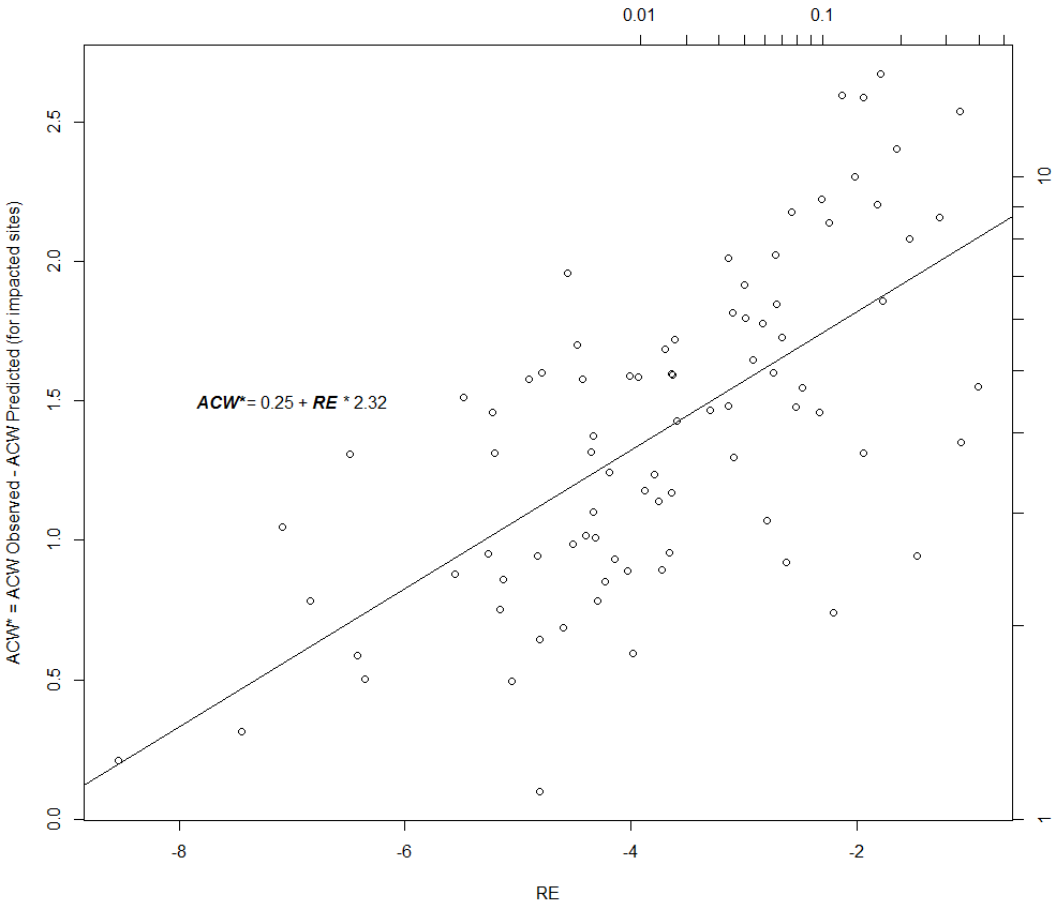


Figure 23 : Résidus des sites impactés au modèle statistique dit « naturel », expliqués par la proportion des sources sédimentaires minières majeures (RE)

$$residus = 2.32 \cdot RE + 0.25$$

Cette équation permet de prédire de manière robuste la sur-largeur que l'on est amené à observer pour un site qui serait impacté par une activité minière en fonction uniquement de la proportion des sources sédimentaires majeures dans son bassin versant (celles qui alimentent une vague sédimentaire).

Nous avons vérifié que la significativité de l'équation ci-dessus n'était pas uniquement liée à la présence de la variable surface drainée entre les deux termes de l'équation. Pour cela nous avons calculé les corrélations partielles, c'est-à-dire en éliminant les corrélations entre la largeur observée et la surface de bassin versant, et entre les surfaces relatives en érosion connectées et la surface de bassin versant. Le coefficient de corrélation entre les résidus des sites impactés et RE est de 0.67, et la corrélation partielle est de 0.55. Cette différence mineure montre que la relation entre RE et les résidus est significative, malgré l'effet taille.

Nous avons également testé l'importance de l'effet de la surface drainée en tirant de manière aléatoire et indépendante 1000 valeurs de largeurs, de surfaces relative en érosion connectées au réseau hydrographique et de surfaces drainées, suivant les distributions

normales des individus de notre échantillon original. Les R^2 entre les résidus, pour les sites impactés, au modèle naturel et les surfaces relatives en érosion sont toujours faible pour ces 1000 combinaisons de métriques. Le quantile 0.95 de ces R^2 est de 0.42, ce qui est presque équivalent à la valeur du R^2 ajusté dans l'échantillon original (0.44). Cela confirme que l'occurrence du terme surface drainée dans ces deux métriques ne génère pas trop de fausses corrélations et que le R^2 assez élevé dans l'échantillon original ne reflète pas un effet taille.

La spatialisation de l'indicateur de surengravement (autrement dit le résidu au modèle de fonctionnement naturel qui permet de décrire la sur-largeur d'un site ; Figure 24) permet de rendre compte de la variabilité de la distribution spatiale de ces sites impactés par des apports sédimentaires d'origine minière.

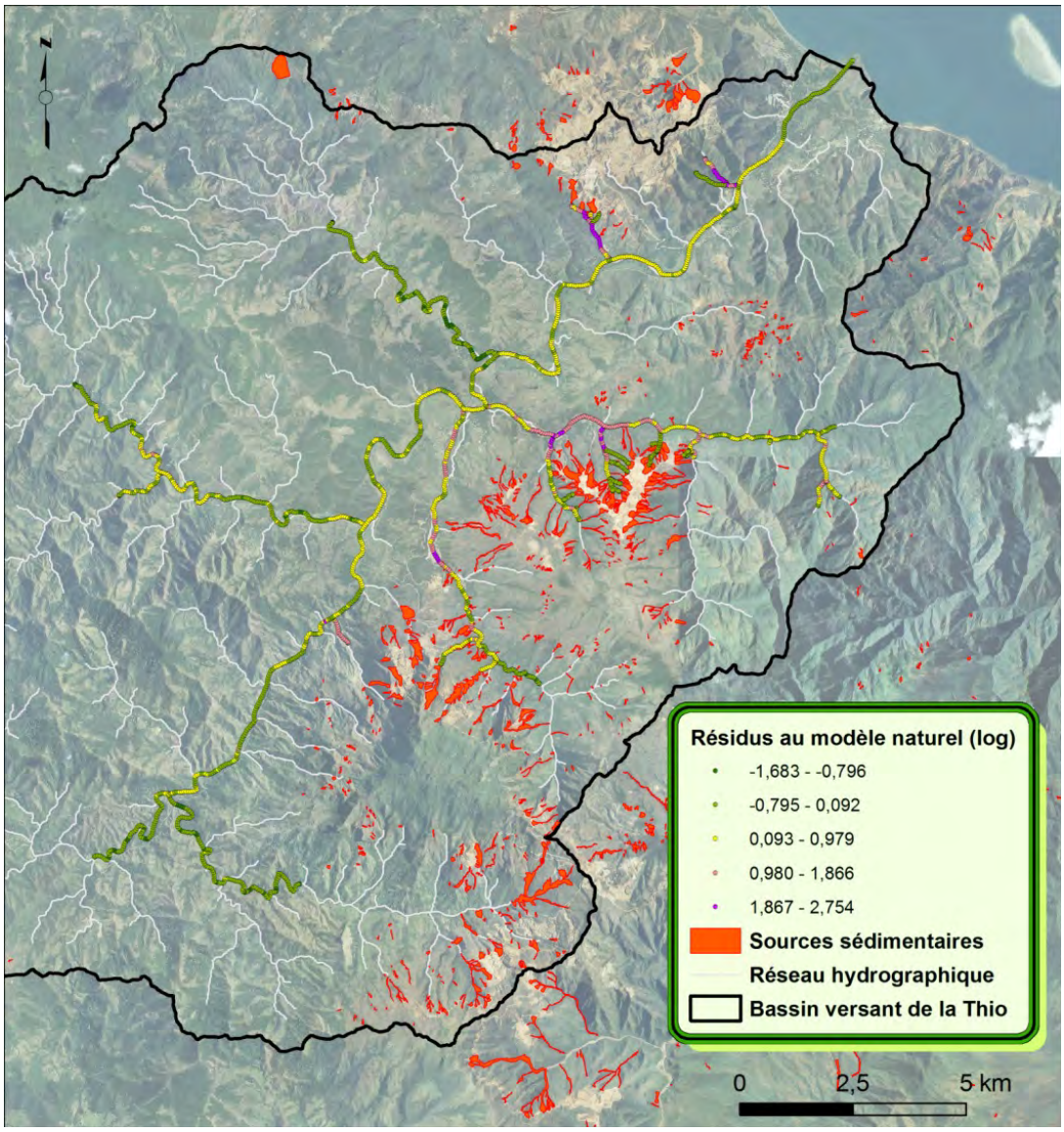


Figure 24 : Spatialisation de l'indicateur de surengravement - Résidus au modèle naturel

Une évaluation de la valeur de résidus à pas régulier de 50 m le long du réseau hydrographique permet de mettre en évidence les secteurs où l'ajustement de la largeur de

bande active ne correspond pas à un fonctionnement dit naturel. Par exemple sur le bassin versant de la Thio, ces secteurs sont localisés directement en aval des zones d'activités minières actuelles, le long des affluents de la Thio. Plus en amont, ou le long de la Thio, l'indicateur de sur-largeur est faible ce qui indique que les largeurs en 2008 pour ces secteurs étaient conformes aux largeurs attendues pour ces tailles de bassin versant. Certains secteurs montrent même un résidu négatif, mais leur largeur reste globalement dans l'intervalle de confiance du modèle de référence

6.3. ELEMENTS MARQUANT LES ETAPES DU SURENGRAVEMENT ET DE L'HYPERSEDIMENATION DANS LES MEMOIRES

6.3.1. TRANSFORMATIONS OBSERVEES PAR LES POPULATIONS DANS LES RIVIERES ET CREEKS

Avant d'aborder les diverses transformations observées par les habitants depuis la fin des années soixante, il est nécessaire de revenir sur la manière dont les différents types de cours d'eau sont définis et identifiés par la population.

Les termes utilisés par les habitants de Thio pour évoquer les types de cours d'eau dans la commune sont uniquement ceux de rivière et de *creek*. Pour autant, la notion de fleuve peut être employée dans des documents techniques ou des documents rédigés par des experts, ce qui nécessite aussi d'en préciser la compréhension qui peut en être faite localement.

- *Fleuve* - Ce terme semble ne jamais être utilisé par les habitants lorsqu'ils font référence aux espaces aquatiques. Certains vont dire que le seul fleuve est celui situé dans la commune de Ouegoa et d'autres vont distinguer un fleuve d'une rivière par la distance entre les deux berges.
- *Creek* - Le creek est défini par les habitants comme un cours d'eau assez étroit, pouvant s'assécher durablement ou de manière épisodique. Il existe de nombreux creek dans la commune de Thio et chaque tribu est généralement parcourue par plusieurs d'entre eux.
- *Rivière* - La rivière quant à elle est décrite avant tout par sa largeur (plusieurs mètres), la présence continue de l'eau et sa plus grande profondeur. Les rivières évoquées par les habitants sont celles de Thio - appelée communément « la grande rivière » - celles de Nembrou (*Xwâ Nèbürü*) et de Nakalé (*Xwâ Nakaré*)[8].

Notons que les transformations liées à l'engravement et à l'hyper-sédimentation ne se cantonnent pas aux cours d'eau et sont observées plus largement dans les espaces alentours (champs, habitations) du fait des inondations récurrentes dans la commune. Celles-ci sont d'ailleurs identifiées comme l'une des premières conséquences de l'engravement.

[8] *Ces deux dernières ne correspondant de fait plus à la définition donnée ci-dessus dans leurs cours amont*

De manière générale, les transformations des cours d'eau décrites reviennent à parler de la présence de cailloux, de « caillasse » et de boue ou vase. Les creeks descendant des versants sont donc particulièrement sujets au phénomène d'engravement. Celui-ci peut aller jusqu'à recouvrir le lit des creeks et les assécher entièrement ou partiellement (certaines zones et petits bassins peuvent perdurer), ayant alors des impacts sur les espèces (faune et flore) présentes dans ces endroits. Au moment des cyclones ou fortes pluies, certains en viennent à déborder et à inonder en partie les tribus avec le refoulement induit à la confluence de la Thio. C'est le cas de la Poudeux à St Philippo 1. En se gorgeant d'eau, les creeks renforcent également le courant de la « grande rivière ».

À l'inverse certains creeks en temps normal engravés et asséchés ne débordent pas pendant les événements météorologiques extrêmes. C'est le cas du *creek* de *xwâ perüpéé* à St Paul par exemple. Il est donc nécessaire d'interroger à la fois la source supposée d'engravement du *creek* (feu de brousse, décharge minière, etc.) et d'identifier avec les habitants des différentes tribus et du village s'il est susceptible de contribuer aux inondations.

Les transformations des rivières sont observées à partir de différents constats :

- La diminution généralisée de leur profondeur ;
- La transformation des berges : dépôt de « caillasse » et de fines ;
- Le déplacement de leurs lits ;
- L'arrivée ou la disparition de végétaux : roseaux, bambous, jameloniers qui sont transportés et implantés dans différents endroits ; disparition des petites algues ;
- La diminution de la quantité de poissons présents ;
- Le remplissage des « trous d'eau ».

Les transformations des rivières sont souvent associées à des histoires transmises entre les générations. D'autres, portant sur des expériences vécues par les habitants rencontrés, permettent d'estimer la variation de la profondeur de la rivière, le déplacement de son lit et l'effondrement de ses berges ; mais aussi indiquent la diminution de la ressource en poissons. Ces récits apparaissent alors comme des supports de mémoire pour dire l'état des rivières. Quelques illustrations de ces transformations sont reprises dans les récits suivants

6.3.1.1. Diminution de la profondeur

- Récit partagé par les habitants rencontrés

> *Les habitants ont fréquemment raconté l'histoire de la montée d'embarcations dans la rivière jusqu'au col de St Pierre. Certains habitants ont parlé de pirogues, d'autres de chaloupes ; toujours est-il que ce récit est devenu une référence pour évoquer l'état de la rivière par le passé et ainsi montrer la différence avec son état actuel. Il s'agit d'une histoire transmise de générations en générations et qui retrace des faits situés autour du début du 20e siècle. Aucune des personnes rencontrées n'a donc été en mesure d'avoir vu ces embarcations œuvrer sur la rivière, mais cette mise en récit était partagée.*

- Récit de Saint-Phillipo 1

> *Une habitante indique que dans les années 1970 -80, son mari allait à la pêche en mer avec son bateau à propulseur. Il sortait de la tribu pour rejoindre la mer avec son bateau à moteur. Actuellement le niveau d'eau est trop bas pour qu'une barque à moteur puisse passer. De plus la présence de caillasse sur le lit de la rivière n'était pas visible dans ces années-là.*

6.3.1.2. Diminution de la ressource en poisson

- Récit de St Michel

> *Un homme racontait une anecdote de son enfance, dans les années 70, sur l'importance des prises à la pêche. Il était parti pêcher avec sa famille dans le trou d'eau avant l'embouchure de la Fanama. Ils avaient posé la senne à la tombée de la nuit et avaient prévu de rester camper sur place. Or peu de temps après, ils avaient dû rentrer chez eux car le filet était plein de poissons.*

Les discours des habitants relatifs à l'évolution de l'état de la rivière, portent sur deux types de transformations qui s'entremêlent. Elles reposent sur deux temporalités spécifiques : celle de l'événement (un temps court) et celle de la durée (temps long). Elles font échos respectivement à des phénomènes différents : les cyclones et les fortes pluies générant des inondations et le changement climatique.

6.3.2. FACTEURS IMPLIQUES DANS L'IDENTIFICATION DES TRANSFORMATIONS

Comme évoqué précédemment, les deux types de transformations mises en avant par les habitants reposent sur des temporalités distinctes (temps de l'événement et temps long) ce qui les amène à être perçues et appréhendées différemment. Celles-ci ont été décrites précisément dans un des mémoires anthropologiques (Gosset 2016) et nous en faisons une courte synthèse dans les paragraphes qui suivent. Il est important de noter que ce sont souvent les mêmes constats qui sont faits pour parler des transformations sur les deux échelles temporelles et il est donc parfois difficile de les distinguer.

6.3.2.1. Les phénomènes cycloniques et les fortes pluies

Les cyclones et fortes pluies sont rattachés au temps de l'événement et sont perçus comme le déclencheur de changements brutaux et importants sur la rivière. Ils provoquent une descente massive des décharges accrochées sur les flancs des montagnes et jouent un rôle d'accélérateur d'un processus d'érosion en cours. Ces phénomènes contribuent donc à charrier de nouvelles quantités de sédiments (le type de sédiments transportés et déposés dépend de la localisation des tribus)[9], à attaquer les berges et à changer le lit de la rivière

[9] *À noter que les habitants évoquent une quantité de fines (« boue ») transportée aujourd'hui inférieure à la quantité transportée dans les années 70 et 80. Aujourd'hui, c'est le transport de cailloux et de « caillasse » qui est plus particulièrement cité.*

(déplacement, rétrécissement), à transporter des végétaux (tronc d'arbres, pousses de jameloniers, bambous, roseaux), à détruire partiellement ou entièrement certaines zones (le creek de la *Tômurû* et l'ancienne forêt située dans la rivière de la Nembrou en sont deux exemples).

Ils sont perçus comme contribuant à créer une dynamique de changements dans la rivière. Cela est particulièrement décrit pour les zones qui se situent entre deux « trous d'eau ». La zone située entre celui de *Witin* et celui de *Néfé*, situé après l'embouchure de la Fanama, est un exemple qui a été cité pour caractériser cette dynamique.

Les changements induits par ces phénomènes météorologiques viennent marquer la population de manière évidente pour plusieurs raisons. Cela peut être expliqué par rapport à la temporalité dans laquelle s'inscrivent ces changements : le temps de l'événement marque en effet une rupture aussi bien dans le déroulement de la vie des individus (un « temps hors temps ») et une rupture de sens pour ces derniers comme l'ont décrit Bensa & Fassin (2002) ou (Bastide 2016) à propos d'autres situations et comme cela a aussi été décrit dans le rapport NERVAL financé par le CNRT (NERVAL, 2016) à propos des changements de valeurs des lieux. A Thio, l'ampleur des phénomènes (inondations, force du courant et dégâts causés notamment) sont autant d'éléments qui génèrent des inquiétudes pour la population, qui les amènent à être attentifs à la montée potentielle de la rivière pendant les événements météorologiques extrêmes et à se mobiliser pour manifester leurs revendications en lien avec ce qu'ils nomment la *pollution* des cours d'eau.

6.3.2.2. Les processus d'accumulation de sédiments et le changement climatique

D'autres transformations sont identifiées par les habitants et sont plutôt liées au processus d'accumulation des sédiments (grossiers et fins) sur une échelle temporelle plus étendue (plusieurs années). Les constats restent les mêmes que ceux évoqués précédemment, mais la complexité liée aux transformations associées à cette temporalité, réside dans la difficulté à déterminer les causes des transformations : est-ce le fait de l'engravement et du dépôt de sédiments ou bien le résultat du changement climatique ?

Ces questions ont notamment été posées par les habitants pour l'assèchement de certains *creeks*, pour la diminution du nombre de poissons parfois, mais aussi de manière plus large pour la question des rendements dans les champs.

7. COMMENT CARACTERISER LA DYNAMIQUE PASSEE DU-SURENGRAVEMENT

7.1. OBJECTIF

L'analyse de l'évolution passée du sur-engravement et de ses facteurs déclenchant (volume mis en décharge, événement hydrométéorologique etc.) donne des clés nécessaires à la compréhension de l'état actuel de l'engravement des creeks et des rivières. Il permet par exemple de replacer la situation actuelle dans une trajectoire évolutive. Cette analyse permettra en partie de répondre aux questions suivantes :

- Est-on en phase paroxysmale ou celle-ci est-elle dépassée ?
- Constate-t-on une progradation des vagues sédimentaires vers l'aval ? avec quelle vitesse ?
- Quels sont les secteurs qui montrent une dynamique de retour à l'équilibre ? Cette dynamique est-elle lente ou rapide ?

Cette caractérisation permettant d'éclairer la situation actuelle est aussi un élément primordial pour évaluer ce que pourra être l'évolution future du sur-engravement sur un secteur donné.

Deux indicateurs sont particulièrement utiles à cette caractérisation :

- L'évolution de la largeur de la bande active sur un secteur d'intérêt,
- L'évolution temporelle des volumes de déchets mis en décharge (source) et leur localisation dans le bassin versant par rapport à la zone d'investigation.

Un exemple d'analyse couplée des bandes actives et de la production minière est présenté de manière succincte dans ce rapport (le creek Tomuru). Une présentation plus approfondie des résultats obtenus sur l'ensemble des secteurs étudiés dans le bassin versant de la Thio (mais également dans celui de la Tôdré) est prévue dans le rapport scientifique du projet IMMILA. Il s'agira également de présenter dans le rapport IMMILA une synthèse sur la dynamique du sur-engravement de la Thio et de ses affluents (action B4), qui intègre non seulement la production minière, mais également les forçages hydrométéorologiques majeurs qui ont impacté le bassin au cours des dernières décennies (crues cycloniques extrêmes).

7.2. EVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE DE CHAQUE SEGMENT D'UNE MEME RIVIERE

L'objectif de cette sous-tâche est de quantifier le sur-engravement des cours d'eau. Cette quantification est fondée sur l'évolution de la largeur de la bande active au cours du temps induite par la migration des sédiments vers l'aval. Cet indicateur, issu de l'analyse cartographique diachronique du sur-engravement de la Thio nous semble être le plus pertinent. L'analyse a été également réalisée sur le bassin versant de la Todré (très peu affecté par l'exploitation minière) à titre de comparaison (cf. projet IMMILA).

Pour réaliser ce travail, plusieurs jeux de photographies aériennes ont été téléchargés à partir du site www.georep.nc puis orthorectifiés. L'orthorectification a été réalisée avec le logiciel Photoscan en utilisant d'une part le LIDAR de 2012 (qui ne couvre que partiellement le bassin versant) et d'autre part, des points de calage repérés sur les orthophotographies de 2008.

Un contrôle de la précision planimétrique de ces recalages a été effectué dans l'emprise du LIDAR (Drain 2016). Les dates de campagnes pour le bassin versant de la Thio et de la Todré sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Campagnes de photographies aériennes utilisées sur la Thio et la Todré pour l'analyse diachronique des bandes actives (source : Drain 2016)

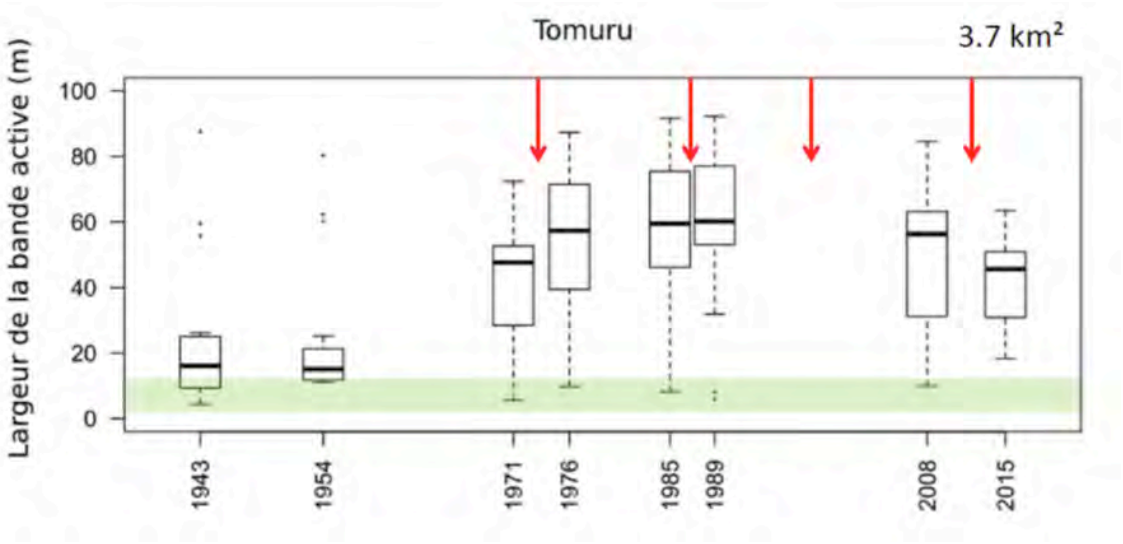
Années	Zone couverte	Couleur (C) ou panchromatique (P)	Taille du pixel au sol (m)	Recouvrement au sol pour une photo (km²)	Organisme ayant réalisé les levés	Type de levé photo-grammétrique	Focale (mm)	Altitude de vol (m)	Type de caméra	Jour de la campagne
1998	Tôdré (partiel)	P	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	152,5			
1995	Tôdré	C	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	151,9			
1989	Thio	C	≈ 1,5	≈ 25	SPP	stéréo	151,9			
1985	Thio et Tôdré	P	≈ 3	≈ 95	IGN	stéréo	151.8	6120	15.UAG.1041	25/10 2/12
1976	Thio et Tôdré	P	≈ 1,5	≈ 25	IGN	stéréo	153,2	3040	15.UAG.6023	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	≈ 1	≈ 50	US Navy	Tri-stéréo				

Pour chacune de ces époques, et pour la date la plus récente (2015), les bandes actives ont été digitalisées sous QGis. L'utilisation de l'outil *FluvialCorridor* (Roux et al. 2015) a ensuite permis d'extraire les largeurs à pas de 50 m.

Un exemple de résultat sur le creek Tomuru est présenté dans la Figure 25. On y observe nettement l'élargissement de la bande active entre 1954 et les années 1970 puis la stabilisation dans les années 1980 et enfin l'amorce d'une rétraction entre 1989 et 2015. Cette dernière traduit vraisemblablement une phase de déstockage liée à la réduction des apports depuis l'interdiction des décharges.

On remarque également que le creek Tomuru présente encore aujourd'hui une largeur de bande active excédentaire par rapport à la situation de référence (en vert sur la figure), obtenue à partir de la loi régionale fondée sur la surface drainée (Figure 22). Les crues cycloniques récentes (Béti 1996 et Fréda 2013) n'ont pas inversé la tendance au retour vers un état « naturel », mais elles ont probablement contribué à la ralentir, sous l'effet de la remobilisation de stocks de sédiments meubles d'origine minière. Cet exemple illustre le fait

que la phase de récupération morphologique est beaucoup plus étalée dans le temps que celle de la réponse des lits à la perturbation induite par les décharges minières.



Les flèches rouges correspondent aux dates des crues cycloniques majeures (Alison 1975, Anne 1988, Béti 1996 et Freda 2013) ; la gamme de largeur de bande active de référence, établie à partir des sites non impactés dans les massifs de péridotite, est représentée en vert

Figure 25 : Évolution de la largeur de bande active de la Tomuru, affluent de rive gauche de la Thio, entre 1943 et 2015

7.3. EVOLUTION TEMPORELLE DU VOLUME DES DECHARGES MINIERES DANS LE BASSIN VERSANT ET PAR SOUS-BASSINS

7.3.1. OBJECTIF

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

Les évolutions de ces surfaces sont évidemment liées à l'expansion dans le temps de la prospection et des mines. Les sols mis à nu qui en résultent sont autant de sources potentielles de matériaux. En effet, ces sols une fois dénudés ne se végétalisent que très difficilement et sont très sensibles au ruissellement et à l'érosion lors des événements pluvieux. Ils sont la source d'une grande partie des fines latéritiques qui transitent ensuite dans les cours d'eau pour finir par se sédimenter en partie au niveau des estuaires et dans le lagon (Garcin et al. 2013).

Toutefois, cette évolution de la surface des sols nus n'est pas la seule source des apports miniers. En effet, en Nouvelle-Calédonie, les stériles ont été versés directement dans des décharges localisés dans les versants jusqu'à l'établissement de la loi 1975[10]. En aval immédiat de ces décharges, il est fréquent d'observer, par exemple, de grands cônes alluviaux constitués uniquement de déchets miniers de granulométrie variée. Ces cônes, dont la base atteint les lits des creeks, sont entaillés par les rivières. Les matériaux sont alors transportés par la rivière à la faveur des crues et redistribués en aval. Ce sont ces apports de stériles qui constituent l'alimentation principale en matériaux d'origine minière, notamment grossière, des creeks et des rivières des massifs miniers de Nouvelle-Calédonie.

C'est à ce titre qu'une évaluation plus approfondie du terme « *source* » et une quantification des apports miniers par les décharges a été proposée et réalisée. La méthode utilisée et quelques exemples de résultats sont fournis ci-dessous ; une description plus exhaustive de la méthode et des résultats sont fournis dans Garcin et al. (2017).

7.3.2. METHODE

L'approche suivie a consisté à quantifier les volumes de stériles extraits à partir des données de production de minerai extrait. Cette approche a été appliquée à l'ensemble du bassin versant de la Thio mais aussi à l'échelle de ses sous bassins afin de permettre une analyse spatiale fine des impacts de ces apports sur l'évolution des lits des cours d'eau situés en aval (tâche A du projet « *Gestion du Passif* »). Les tonnages produits par an et par concessions minières sont issus de la base de données de production historique du SMC[11]. Cette base de données contient l'ensemble des tonnages produits pour toute la Nouvelle-Calédonie depuis 1904. Les limites des bassins versants sont issues d'une extraction automatique sous SIG à partir du MNT à 10 m de résolution de la DITTT[12]. Ces limites ont ensuite été contrôlées et corrigées manuellement (pour certaines d'entre elles) puis fusionnées.

La méthode se décompose en trois phases (Figure 26) :

Phase 1 : Elle a consisté dans un premier temps à sélectionner toutes les concessions minières présentes dans le bassin versant de la Thio à l'aide du cadastre minier. Ensuite pour chaque concession, les données ont été traitées afin de fournir une courbe de production annuelle et cumulée de minerai. À partir du ratio production de stérile par rapport à la production de minerai, une courbe de production annuelle et cumulée de stérile a été réalisée. Le ratio minerai/stériles est celui utilisé par le SMC (Garcin et al. 2017), il est variable dans le temps. Ce ratio qui peut paraître relativement simpliste est, pour chaque période, une moyenne représentative de l'ensemble des mines de Nouvelle-Calédonie et ne tient pas compte des spécificités propres à chaque concession. Son évolution dans le temps est le reflet de l'évolution des teneurs en minerai des roches exploitées et des technologies

[10] *loi N°75-663 du 15 juillet 1975 relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux*

[11] *Service Mines et Carrières (DIMENC)*

[12] *Direction Des Infrastructures de la Topographie et des Transport Terrestres de Nouvelle-Calédonie*

mises en œuvre. Nous avons considéré que jusqu'à la mise en œuvre du code minier de 1975 la totalité des stériles étaient mis en décharge. Ce postulat est une simplification dans le sens ou une partie des stériles a probablement été utilisée par les compagnies minières pour réaliser des plateformes, des remblais etc. autour des mines et des prospections. Il n'en reste pas moins vrai que cette part de stérile qui n'a pas été versée directement en décharge a quand même, du fait de l'absence de gestion des eaux et des flux sédimentaires, contribuée directement aux apports dans les creeks.

Phase 2 : Une fois les concessions minières sélectionnées, les anciennes décharges associées à chaque concession ont été recherchées (sur les photographies aériennes), puis chaque décharge a été assignée au sous bassin versant dans lequel elle se jette. Il est alors possible de directement associer à toutes les concessions un bassin-versant de décharge.

Phase 3 : Une fois les deux phases précédentes réalisées, on peut associer à chaque bassin versant le tonnage de stérile minier qu'il a reçu. Il est alors possible de fournir une courbe annuelle d'apport en stérile et une courbe cumulée. L'évaluation des volumes de stériles peut alors être effectuée. La somme des apports reçus par tous les sous bassins constitue l'apport en stériles à l'échelle du bassin versant.

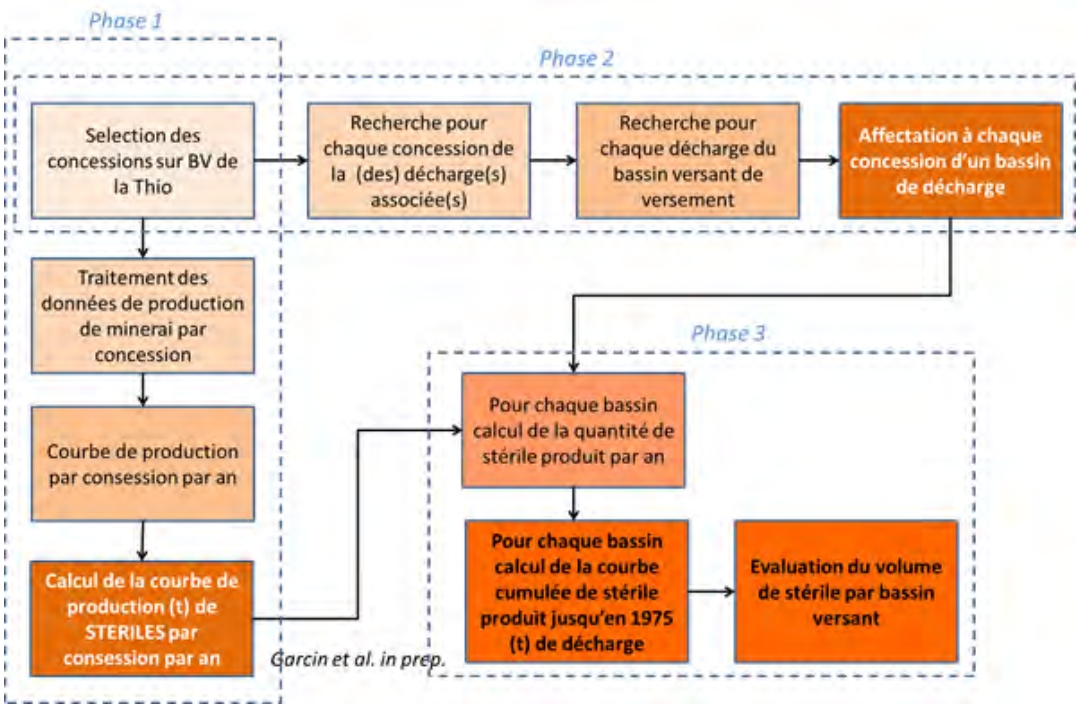


Figure 26 : Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volumes de stérile minier mis en décharge

7.3.3. RESULTATS

L'évaluation des tonnages de stériles produits par an et par sous bassin est présentée dans la Figure 27. On y remarque :

- Les pics de production de stériles qui se situent entre les années 50 et le milieu des années 70 correspondant au boom du nickel postérieur à la seconde guerre mondiale,

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

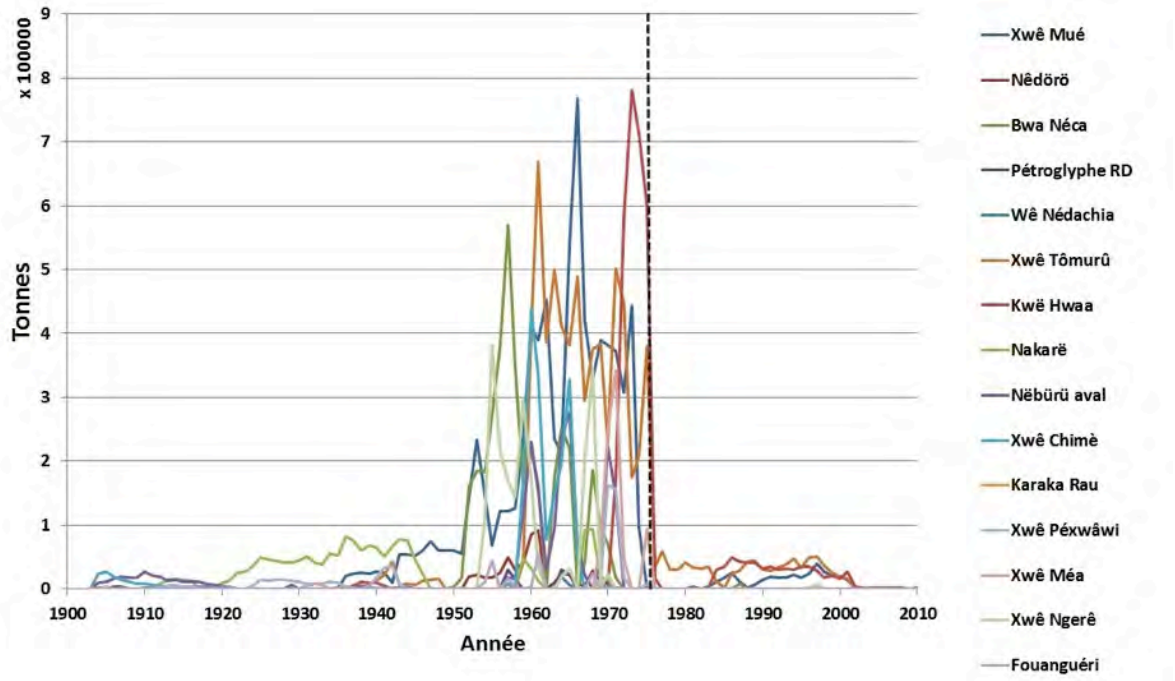


Figure 27 : Tonnage de stériles produit dans les sous bassin versant de la Thio (la ligne verticale en tiret noir correspond à l'année 1975, date de la mise en œuvre du code minier interdisant la mise en décharge des stériles).

La Figure 28 présente la courbe cumulée du tonnage de stérile par grand sous bassins. La droite en tirets correspond à l'année 1975, année de l'arrêt de la mise en décharge. La valeur totale du tonnage de stérile mis en décharge par sous bassin est fourni par l'intersection entre la courbe cumulée et le tiret représentant l'année 1975. Cette figure montre la variabilité de la quantité de stériles mis en décharge selon le bassin versant, les valeurs s'échelonnant **entre 500 000 tonnes et près de 8 millions de tonnes**. On y remarque comme dans la Figure 27 que l'activité sur les bassins de la Neburu et de la Nakaré est beaucoup plus précoce que celle des bassins plus à l'aval tel que ceux des creeks Tomuru, Bwa Néca etc.

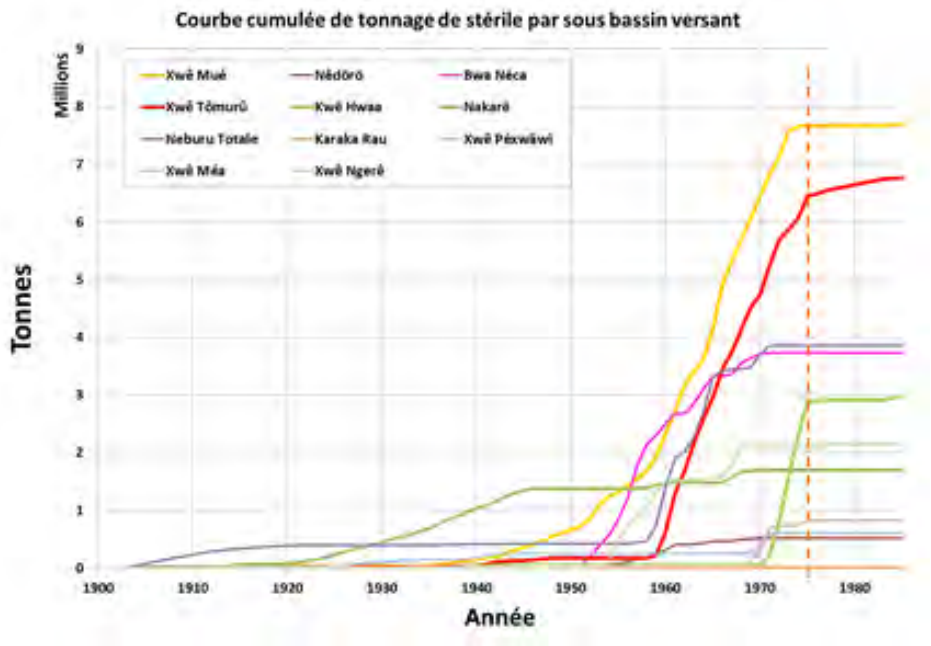


Figure 28 : Courbe cumulée de tonnage de stérile (en millions de tonnes) par sous bassin versant de la Thio

Pour l'ensemble du bassin de la Thio (Figure 29), **la quantité de stérile mis en décharge dépasse les 30 millions de tonnes** en considérant l'application immédiate du code minier de 1975 soit un **volume de stérile supérieur à 10 millions de m^3**.

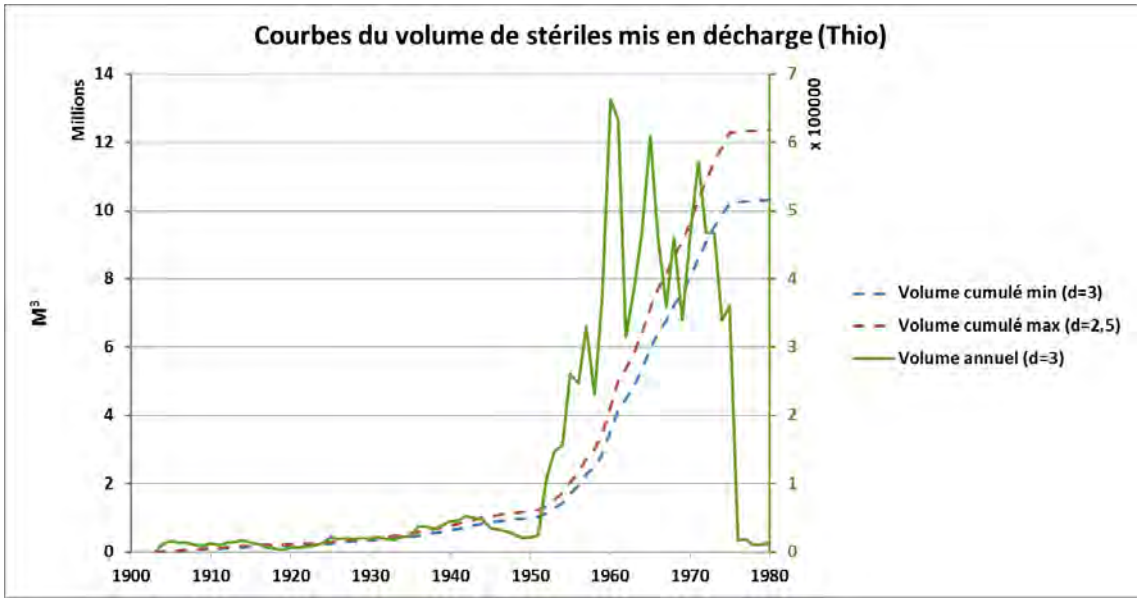


Figure 29 : Évaluation du volume de stériles mis en décharge sur l'ensemble du bassin versant de la Thio

La Figure 30 présente une carte des tonnages de stérile mis en décharge par sous bassin. On y note la forte disparité spatiale des apports en stériles avec des bassins fortement affectés comme ceux du Creek Tomuru, de la Xwe Mue, de la Nakaré et de la Kwe Whaa. La Figure 31 présente une carte des apports spécifiques c'est-à-dire le tonnage de stérile rapporté à la surface du bassin versant (tonnes/hectares). L'apport spécifique permet d'avoir une représentation de l'intensité de la perturbation en apport solide subi par le bassin versant : plus l'apport spécifique est élevé plus la perturbation pour le bassin considéré est forte. Par rapport à la carte de la Figure 30, la hiérarchie est bousculée, en effet, les grands bassins qui ont pourtant subi des apports importants (Néburu, Kwe Hwaa par exemple) sont beaucoup moins impactés proportionnellement que les bassins versants de petite taille. Les petits bassins de rive gauche de la Thio aval apparaissent comme les plus affectés (Tomuru, Bwa Néca, Xwe Mué) ce qui concorde avec les observations de terrain. De petits bassins versants plus à l'amont, où l'apport de stériles en décharge paraissait relativement modéré tels que ceux de Xwe Méa et Xwe Pexwawi sont eux aussi, selon ce critère, fortement perturbés ce qui est là aussi confirmé par les observations de terrain.

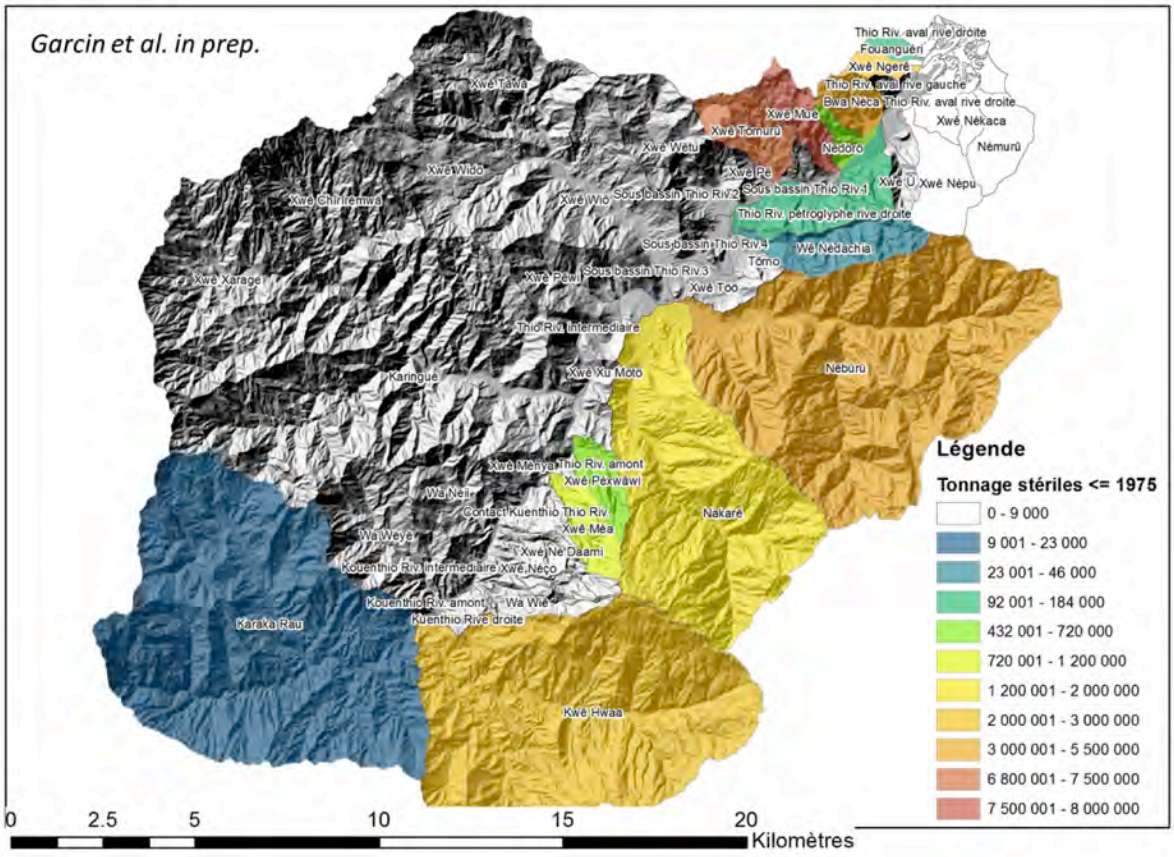


Figure 30 : Tonnage de stérile total mis en décharge par bassin versant (t)

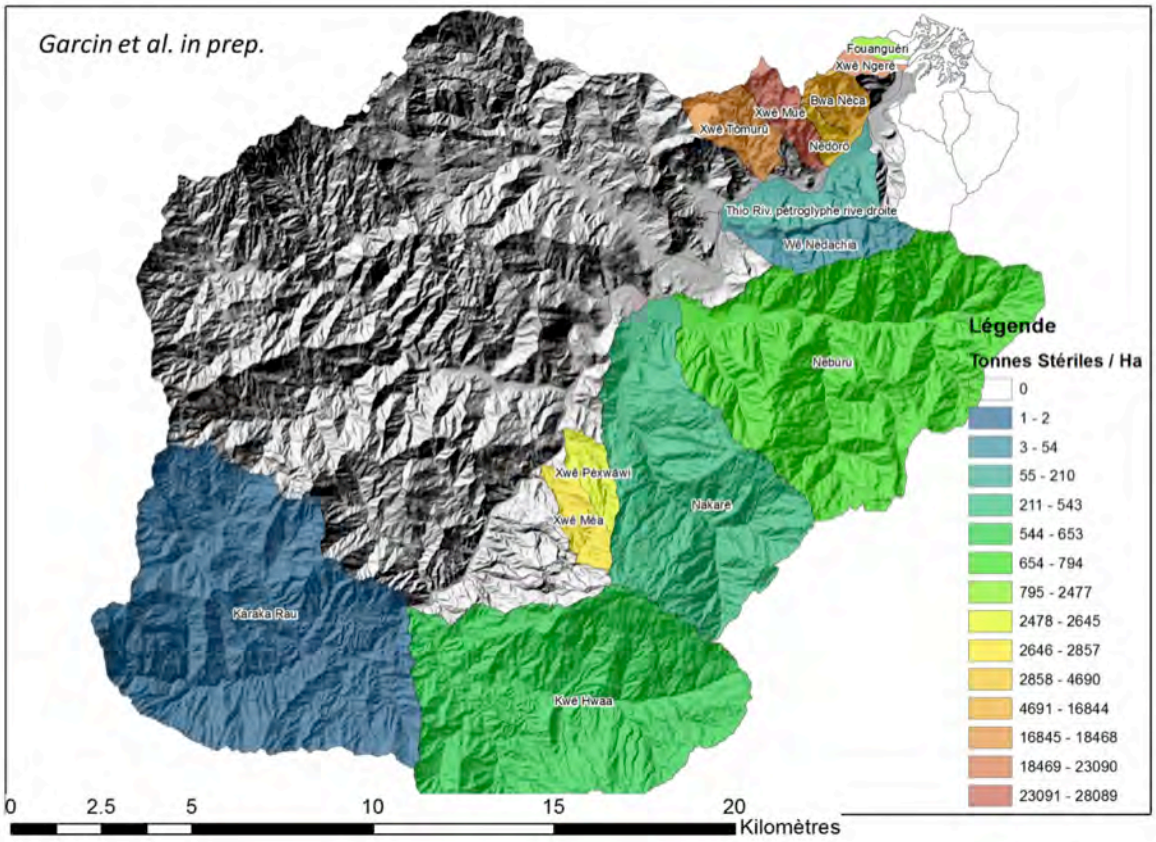


Figure 31 : Apport spécifique total de stérile mis en décharge en tonnes/hectare par bassin versant

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

Ces profils présentés dans la figure 31 sont très variés. Le profil de la Thio est très pentu entre 40 km et 38,5 km puis diminue rapidement pour avoir entre 33 km et 25 km une pente faible. Ensuite une rupture de pente y est observable et correspond au segment où la Thio limite en rive droite la nappe des péridotites et en rive gauche l'unité de Thio (cherts, argilites, silts et grès volcanoclastiques). C'est dans cette partie plus pentue que viennent confluer les creeks Pexwawi et Méa dont l'amont est à plus de 900 m d'altitude et les pentes très fortes largement supérieures à celle de la Thio à ce niveau. C'est en aval de la rupture de pente vers le 14 km, que la Thio reçoit la Nakaré et la Néburu. Ces deux cours d'eau, bien qu'en apparence similaires, montrent des profils en long très différents. Le profil de la Nakaré dans sa moitié aval ne montre pas de rupture de pente contrairement à celui de la Néburu. Ces deux cours d'eau ont toutefois des profils en long plus matures que ceux des creek Pexwawi et Méa et offrent une pente quasi-constante de l'amont jusqu'à leur confluence avec la Thio.

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

Le positionnement et la courbe du tonnage des apports cumulés en stériles portés sur les profils en long (Figure 32) montrent :

- Que les apports par les décharges minières sont très diversement répartis par rapport à la structure du réseau hydrographique. Certains apports sont très distaux comme ceux de la Kwe Hwaa à plus de 40 km de l'embouchure de la Thio, d'autres notamment dans le bassin médian sont à une distance comprise entre 17 et 24 km de l'embouchure alors qu'enfin certains sont très proches de 1 km à 7 km seulement. Il en résulte que le temps de transfert des sédiments pour rejoindre un site particulier sera plus ou moins long en fonction de la position des rejets dans l'hydrosystème. Même si la mise en décharge sur deux sites est synchrone, compte tenu de cette répartition spatiale hétérogène, il n'y aura pas synchronisme des arrivées de matériaux à un endroit donné mais au contraire un déphasage temporel.
- Que la localisation des apports issus des décharges par rapport au profil en long de chaque cours d'eau est elle aussi diversement placée. Ainsi, certains apports se font dans le haut des profils (creeks aval RG, Kwe Whaa), d'autres en partie médiane (e.g. Xwé Méa, Pexwawi, Nakaré) alors que certains sont plutôt dans le bas des profils (Néburu). Ainsi, certains cours d'eau sont ou seront affectés sur l'ensemble de leur lit alors que certains autres ne le seront qu'en partie médiane ou même aval. Le sur-engravement qui en découle affectera donc diversement l'ensemble des lits.
- Qu'en fonction du paramètre précédent et de la pente générale du profil, les transferts de matériaux et la réaction des lits (sur-engravement puis déstockage) seront plus ou moins rapides. Dans le cas où le profil du cours d'eau est très raide (comme pour les creeks aval en rive gauche de la Thio), le sur-engravement tout comme son déstockage ultérieur se produira rapidement après l'apport en matériaux. La forte pente des lits favorisera donc un transit rapide. Par contre, la rupture de pente très forte qui existe entre les pentes aval de ce type de creek et la pente du lit de la Thio favorisera le dépôt en bas de profil, la reprise et le transport vers l'aval de ces sédiments par la Thio seront beaucoup plus lents compte tenu de la capacité de transport de matériaux grossiers plus faible de la Thio.
- Que les apports en parties médianes des profils dans les secteurs où les pentes des cours d'eau sont modérées (Xwé Méa, Pexwawi, Nakaré *pro parte*) conduiront dans certains cas à un stockage au moins temporaire de la fraction plus grossière des apports dans les segments à plus faibles pentes du lit. Les dépôts auront tendance à s'étaler en aval des cônes issus des décharges et à sur-engraver les secteurs immédiatement en aval. Les apports en matériaux auront tendance à sur-engraver la rivière dont le lit et la bande active s'élargiront lors de la phase paroxysmale des apports. Ultérieurement, une partie du stock sédimentaire pourra être transportée en aval lors des crues les plus importantes sans toutefois que l'ensemble des sédiments soient remobilisés. Il en résultera des nouvelles terrasses dont le toit correspond à la phase paroxysmale de l'engravement. Ces terrasses dont les galets sont patinés, ne sont que très partiellement végétalisées. Elles sont en voie de fixation et ne participent plus au bilan sédimentaire ; seule l'occurrence de très fort débits induits par de fortes pluies lors de cyclones majeurs ou de très fortes dépressions tropicales seront en mesure de les remobiliser.

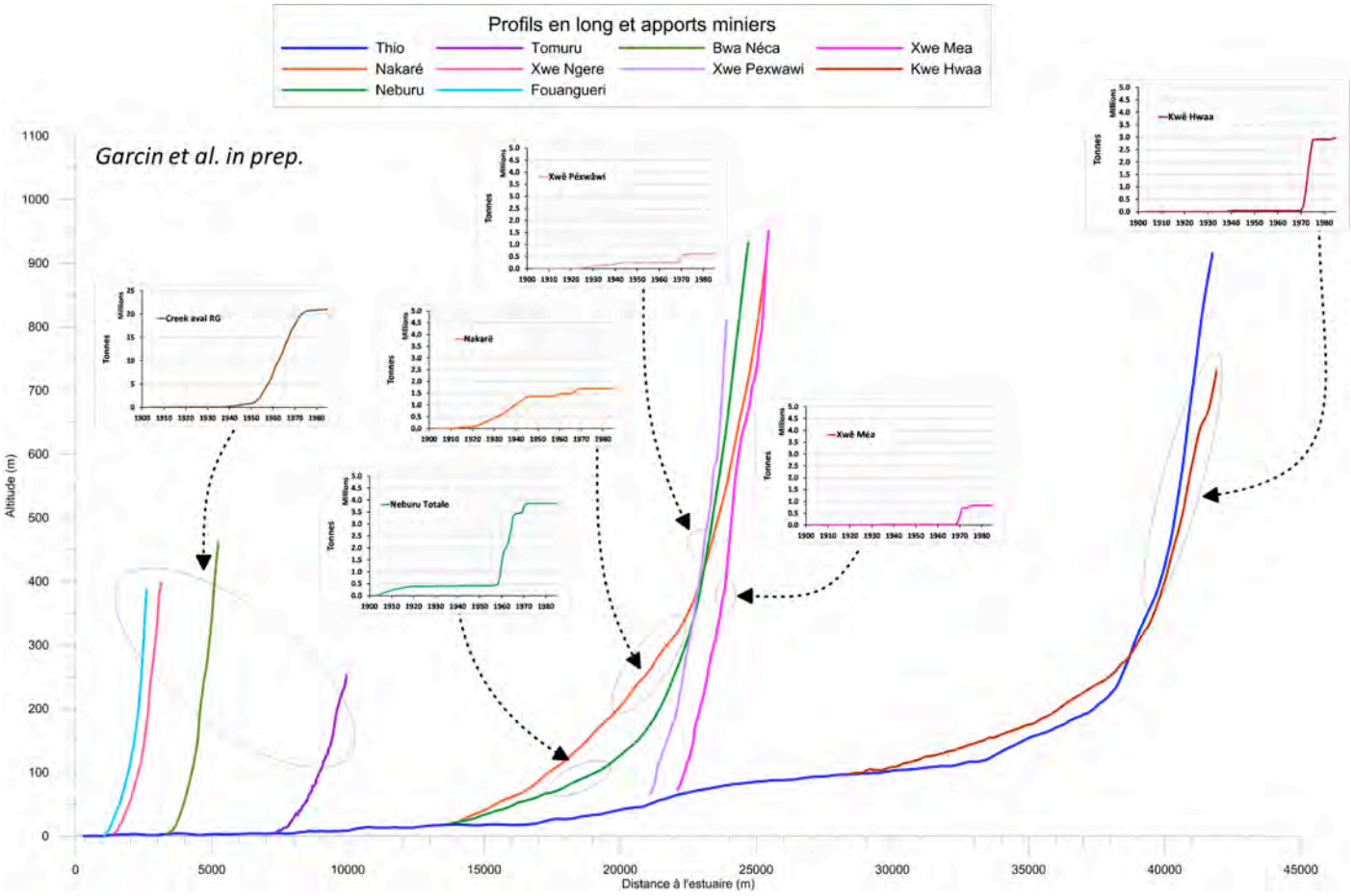


Figure 32 : Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau

7.4. METHODE D'ANALYSE CROISEE

La mise en parallèle de l'évolution du volume de stériles mis en décharge sur un bassin versant et l'évolution de la largeur de la bande active du lit localisé en aval permet d'illustrer et de caractériser la réponse de la rivière à cet apport supplémentaire de matériaux (Figure 33). Elle permet notamment d'identifier les temps de latence entre la « mise à disposition » de charge solide par les décharges en amont et la répercussion sur l'évolution morphologique du lit. Ce temps de latence explique l'élargissement et l'exhaussement du lit qui peut intervenir postérieurement au pic d'apport dans les décharges et assez souvent postérieurement à l'arrêt de ceux-ci (Figure 33). Il est aussi possible à travers ce graphe de caractériser la phase de rééquilibrage et de déstockage de sédiment dans le lit qui intervient après la phase paroxysmale du surengravement. Dans l'exemple du Creek Tomuru (Figure 33) on note l'augmentation significative de la largeur de la bande active en 1971 par rapport à 1954, que le paroxysme du surengravement intervient à la fin des années 80 (entre 10 et 15 ans après l'arrêt des apports dans les décharges) puis une diminution de la largeur de la bande active dans les années 2000 à 2015 indiquant un déstockage de sédiment dans le lit du creek (phase de rééquilibrage). Les caractéristiques de la réponse de chaque segment du lit aux apports sont liées à la chronologie et à la configuration de chaque site en fonction des

caractéristiques de la rivière (pente), du bassin versant, de la répartition spatiale dans ce même bassin des zones de décharges et des séquences météorologiques (événements pluviométrique) déclenchant le transport des matériaux et les modalités de celui-ci.

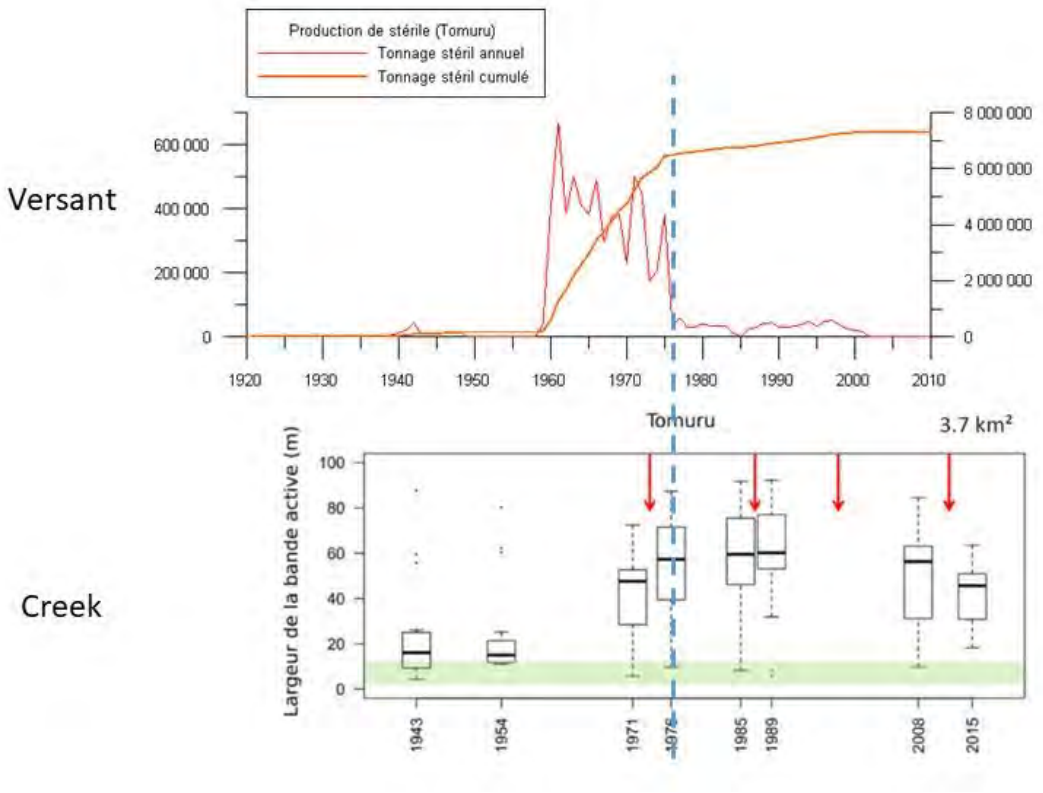


Figure 33 : Liens entre l'apport de stériles en décharge et l'évolution de la bande active (exemple du Creek Tomuru)

8. COMMENT ENVISAGER ET SURVEILLER L'EVOLUTION FUTURE DU SUR-ENGRAVEMENT ?

8.1. OBJECTIF

Il convient de noter que les indicateurs, une fois construits, doivent être suivis afin d'assurer la surveillance de l'évolution du sur-engravement. Cette surveillance concerne le site où les enjeux sont présents mais aussi les zones en amont qui constituent des sources secondaires d'apport qui plus tard, lors de leur remobilisation pourront être responsables d'une nouvelle phase de sur-engravement.

Le suivi des indicateurs peut être renseignés par des techniciens ou des chercheurs et par des habitants référents (démarche participative). Dans ce cas, deux types de méthodes peuvent être mobilisés : (1) proposer aux référents d'utiliser une méthode de suivi élaborée par les scientifiques sur la base des éléments habituellement suivis par les hydrologues, géologues, etc. ; (2) proposer aux référents d'utiliser leurs savoirs basés sur l'observation régulière de l'environnement, et en particulier des changements de cet environnement (par exemple les « trous d'eaux » : les habitants nous ont eux-mêmes parlé des contraintes rencontrées au niveau des trous d'eau lorsqu'on les questionnait sur les changements, ce sont donc des indicateurs « connus », « régulièrement observés » durant leurs pratiques quotidiennes).

8.2. LES INDICATEURS

8.2.1. INDICATEURS PHYSIQUES

Stock mobilisable présent en amont :

- Sur les versants
  1. Volume de déchets qui sont encore présents en décharge
  2. Surface en érosion et évaluation des volumes produits (d'origine naturelle ou anthropique),
  3. Nombre et volume de matériaux produits parles mouvements de terrain.
- Dans les lits de rivière
  1. Position, dimensions des trous d'eau, des zones d'accumulation de sédiment dans les segments amont des lits de rivières,
  2. Forme et emprise des cônes,
  3. Localisation des attaques et déstabilisations de berges ; volumes érodés.

La mobilisation des stocks sera variable en fonction des événements hydrométéorologiques futurs (intensité, durée). Les granulométries qui seront mobilisées seront elles aussi fonction de l'intensité des ruissellements et des débits dans les creeks et rivières, mais également de la granulométrie des stocks qui viendront alimenter le transport solide (terrasses alluviales, cônes de déjection, colluvions).

Pour un secteur donné, les temps de transfert des matériaux de l'amont jusqu'à la zone d'intérêt seront variables car dépendant de la distance, de la pente et de l'hydrologie du réseau hydrographique au sein duquel se fait le transfert et aussi des tris granulométriques liés au transport solide par charriage. Pour un secteur donné, Il peut exister plusieurs sources d'apport alimentant le surengravement dont les caractéristiques sont variables conditionnant le volume arrivant sur un site et le polyphasage des apports.

Il est donc nécessaire de :

- Déterminer si l'engravement d'un secteur est fossile (la crise est passée et il n'y aura plus de recharges mais peut-être a contrario un déstockage) ou si à plus ou moins longue échéance des apports importants pourront se produire (avec ré-engravement du secteur).
- Surveiller l'évolution du lit en réalisant un monitoring de son évolution ainsi que des stocks de matériaux mobilisables en amont de la zone. Il est souhaitable de mobiliser ici les techniques de surveillance topographique, qui peuvent être de nature terrestre (dGPS, laser scan, station totale, nivellement par transects) ou de nature aéroportée (LiDAR, photogrammétrie par drones), et qui vont permettre non seulement de détecter et de quantifier les changements morphologiques, mais également d'établir des bilans sédimentaires (e.g. Theule et al., 2012 ; Lallias-Tacon et al., 2014 ; Vazquez-Tarrio et al., 2017). La surveillance topographique reste une opération onéreuse, qui nécessite des moyens humains et financiers importants, que ce soit pour l'acquisition ou pour le traitement et l'interprétation des données. S'il s'avère que cette solution ne peut être mise en œuvre, une surveillance qualitative peut être envisagée, à partir de dispositifs de prises de vue de type time-lapse (Bodin et al., 2017 ; Fontaine et al., 2017 ; Moreau, 2017 ; Piton et al., 2017), qui permettront de réaliser un diagnostic visuel des dynamiques sédimentaires et morphologiques de sites préalablement identifiés comme stratégiques en matière de connaissance des dynamiques sédimentaires. Ces suivis devront être réalisés conjointement avec un suivi / enregistrement hydrologique. Deux périodicités et fréquences de suivis sont à envisager : des suivis réguliers (suivi annuel après chaque saison des pluies) et des suivis événementiels qui seront réalisés si un événement hydrométéorologique intense (cyclone, grosses pluies) se produit. Il sera nécessaire de replacer l'évolution de la situation en fonction des conditions hydrologiques ayant déclenché cette évolution. Cette analyse permettra d'acquérir une connaissance plus fine du fonctionnement du secteur d'étude et d'acquérir des données utiles qui seront nécessaires pour réaliser ultérieurement des modélisations (cf. 11.3)

9. COMMENT EVALUER LES INCIDENCES SUR LES POPULATIONS ET COMMENT ANALYSER LES BESOINS ET LES PERCEPTIONS DES POPULATIONS ET DES ELUS ?

9.1. LES DIFFERENTS INDICATEURS

9.1.1. INDICATEURS SOCIO-CULTURELS ET SOCIO-PARTICIPATIFS

Les indicateurs permettent de suivre l'évolution des cours d'eau ainsi que les impacts des transformations de ces cours d'eau sur les habitations, les plantations, et plus généralement les activités vivrières et socio-culturelles. Au préalable du choix et du renseignement de ces indicateurs, il est essentiel de définir clairement et de spatialiser les cours d'eaux concernés : creeks, rivières et fleuves.

Les indicateurs sont développés pour récolter des données systématiques renseignant les impacts vécus et perçus par les populations du surengravement et des inondations. Les renseigner nécessite de s'appuyer sur une diversité de personnes de chaque lieu de vie (chef de tribu, chefs de clans, femmes, jeunes, vieux, etc.) car les informations collectées peuvent varier entre les tribus comme à l'intérieur d'une même tribu. Tous les lieux/zones/quartiers ne sont en effet bien souvent pas touchés de la même manière. Les renseignements ainsi collectés, basés sur les observations et expériences sur place, peuvent (1) aider à analyser la situation *in situ* et (2) permettre des négociations et des prises de décisions plus ajustées aux situations locales et aux connaissances et aux vécus de chaque groupe d'acteurs à propos de la gestion de l'engravement.

Chaque « indicateur d'incidence sur » sera présenté de la même manière dans les pages qui suivent. « L'argument socio-culturel » définit l'intérêt d'évaluer le domaine dont il est question : habitations, horticulture et agriculture, déplacements humains, écologie des cours d'eau et leurs usages, etc. Cet « argument » tel que rédigé permet de savoir de quelle manière chaque « domaine » est impacté et les raisons pour lesquelles cela peut poser problème aux yeux des habitants. Plusieurs indicateurs sont ensuite proposés pour renseigner les incidences vécues et perçues de l'engravement sur le domaine concerné : indicateur d'incidence sur l'habitat, indicateur d'incidence sur les cultures.

Cette liste d'indicateurs n'est pas exhaustive et il est possible qu'elle soit réduite ou augmentée selon les contextes socio-environnementaux et le type d'engravement en présence. Il est nécessaire de rappeler qu'à Thio, l'engravement (l'accumulation de « caillasse » pour reprendre les termes localement utilisés) comme l'hypersédimentation (l'accumulation de sable et de vase) est problématique du point de vue des habitants du fait des inondations produites, ce qui a fortement influencé sur les choix d'indicateurs d'incidences susceptibles d'apporter des éléments compréhensibles par tous les acteurs et donc d'éclairer les négociations et les décisions à prendre aux regard des mesures d'adaptation (par des aménagements ou des transformations socio-spatiales).

Des tableaux de synthèse facilitant le renseignement de ces indicateurs sont dans le chapitre « méthodes ». Pour chaque indicateur d'incidence, des exemples spatialisés

illustreront le guide méthodologique. Ils sont en cours de finalisation (en lien avec le projet *IMMILA*).

Pour travailler avec les habitants sur le renseignement de ces indicateurs, un travail de cartographie en groupe peut être utile afin de spatialiser les sens d'écoulement, et lorsque cela est possible leur ampleur. L'extraction du SIG suivante montre ce qu'il est possible de faire à dire d'acteurs.

Figure 34 : Sens d'écoulement de l'eau durant les inondations de 2016 à Saint-Michel
(I. Rouet)

9.1.2. INDICATEURS D'INCIDENCES SUR L'HABITAT

> *<u>Argument socio-culturel</u>*
>
> *Le choix de l'endroit de la construction d'une maison est, la plupart du temps, lié à l'histoire d'une famille / d'un clan / d'une tribu. Ce choix du lieu d'installation n'est donc pas aléatoire et le déplacement d'une famille à un endroit moins exposé au surengravement et à ses conséquences peut avoir un potentiel impact sur les liens et les relations complexes qui n'est a priori pas immédiatement visible. Par conséquent, le déplacement de l'habitat est une solution à envisager avec précautions et est le plus souvent la solution la moins souhaitée par la population.*

L'habitat peut être touché de manières variées. Le vécu des occupants des maisons peut informer sur le comportement des eaux en cas d'inondation ainsi que sur les dégâts causés, ce qui est primordial pour les mesures à prendre. En général, la remise en état des maisons est la première priorité identifiée par les habitants après un épisode d'inondation.

Indicateurs – Variables (oui/non ou variables qualitatives plus précises)

- Passage d'eau dans les maisons
  - Courants d'eau emportant des objets hors du lieu d'habitation ou dégâts aux objets présents dans les habitations,
  - Dégâts causés à la maison par la « simple » montée des eaux.
- Dépôt de boue et autres matériaux (caillasses, etc.) dans les maisons
- État / destruction après les inondations
  - Le temps, le travail et les finances investis pour le rétablissement de l'habitat (nettoyage, réparations, remplacements)

9.1.3. INDICATEURS D'INCIDENCES SUR LES CULTURES

Argument socio-culturel

En plus de la dimension utilitaire rattachée à la culture des champs (cultiver pour s'alimenter), il convient de préciser que ces lieux de plantations sont empreints de valeurs culturelles importantes. Les champs ont à la fois une valeur nourricière – on parle de « garde-manger » –, et une valeur socio-symbolique – il s'agit aussi du lieu où sont plantés les produits attendus pour les échanges coutumiers, en particulier les ignames. La destruction ou la dégradation des champs n'est donc pas uniquement associée à une perte financière : elle impacte d'une part le mode de vie des habitants ancré autour de cette activité vivrière et elle crée d'autre part un espace vide dans la chaîne des échanges coutumiers qui doit ensuite être comblé avec d'autres moyens.

Selon l'endroit, la culture des champs est plus ou moins intensive. Par ailleurs, elle s'étend sur plusieurs années successives ou intègre des intervalles de quelques mois à quelques années sans aucune culture. Comme pour les habitations, le choix du lieu de culture n'est pas aléatoire et dépend des relations inter-claniques et intra-claniques. Il convient de noter qu'une seule inondation peut détruire le travail et la récolte d'une année entière. Une haute fréquence d'inondations peut par ailleurs mener à un découragement et donc à un abandon du travail dans les champs malgré son importance culturelle.

Indicateurs – Variables (oui/non ou variables qualitatives plus précises)

- Destruction ou dégradation des cultures par l'eau
  - Stagnation de l'eau dans les champs qui mène à la décomposition des produits plantés
  - Emport des produits par les courants
- Destruction ou dégradation des cultures par le dépôt des boues
  - Étouffement des produits plantés par une couche de boue
  - Dépôt des boues dans les champs qui, après séchage, constitue une couche dure qui est à décaper
  - Diminution / changement de la fertilité associée à la présence de boue

9.1.4. INDICATEURS D'INCIDENCES SUR LES DEPLACEMENTS

> *Argument socio-culturel*
>
> *Dans l'histoire de la Nouvelle-Calédonie, les habitants ont été confrontés à de nombreux déplacements qui étaient rarement volontaires. Des déplacements en lien avec le phénomène d'inondation ont déjà partiellement eu lieu. Parfois ces déplacements se sont déroulés en adéquation avec la « coutume » kanak, à savoir les normes et règles qui font sens en milieu kanak, en particulier celles relatives à l'accueil des clans entre eux. Autrement dit, il est d'usage que les liens entre certaines familles ou clans permettent l'accès à d'autres terres au sein de la tribu ou dans une autre tribu. Ce système, soutenu par une approche coutumière à la gestion des terres, peut en effet constituer un élément utile en cas de déplacement nécessaire. Pourtant, il n'est pas applicable d'une manière universelle et il faut étudier chaque cas de manière spécifique.*

Si on arrive à la conclusion que des aménagements ne peuvent pas rétablir une qualité de vie souhaitable, le recours au déplacement (de certaines maisons / champs / voire des tribus entières) est à envisager. Dans le contexte des inondations, ceci peut devenir nécessaire dans certaines circonstances qui constituent alors des items à renseigner pour évaluer l'indicateur d'incidence sur les déplacements envisageables.

Indicateurs – Variables (oui/non ou variables qualitatives plus précises)

- Haute fréquence des inondations
  - Plusieurs fois dans une saison
  - (Presque) tous les ans
- Niveau de destruction (maisons, champs) qui ne permet pas un retour rapide (quelques jours) à la vie normale
- Prévisibilité ou non des inondations (fortes pluies pendant plusieurs jours à des endroits spécifiques)

9.1.5. INDICATEURS D'INCIDENCES SUR LES AUTRES ACTIVITES VIVRIERES

> *Argument socio-culturel*
>
> *A Thio, parmi les activités vivrières, la pêche constitue une activité importante dans les tribus, surtout pour les tribus de l'estuaire. Dans les échanges coutumiers, les tribus de la mer contribuent avec les prises de la mer (poissons, crabes, moules, langoustes, …). Toutefois, les activités de pêche pour les tribus de la chaîne, concentrées dans les rivières, sont également importantes.*

Les transformations du lit de la rivière par l'engravement diminuent et modifient la distribution des habitats dans l'eau. Ceci entraîne une raréfaction de la ressource en poisson (mulet, anguille, loches). Par ailleurs, les curages impactent fortement l'écosystème des rivières qui met longtemps pour retrouver un équilibre, voire ne le retrouve jamais si les curages sont trop rapprochés. Ainsi, des endroits connus pour la pêche de certaines espèces peuvent être désertés.

Dans l'estuaire les habitants ont constaté un dépôt de sédiments fins important qui rend le sol très vaseux, ceci impacte également l'habitat des espèces comme le crabe notamment. Parfois ces dépôts dégagent une très mauvaise odeur ; ils ne sont pas perçus comme du sable « normal ».

Indicateurs – Variables (oui/non ou variables qualitatives plus précises)

- Pêche
  - Rivière
    - Modification de l'écosystème due à l'engravement ou à des curages
    - Diminution de la quantité de poissons présente
    - Disparation de certaines espèces des endroits habituels
  - Mangrove
    - Dépôt de sédiments
    - Disparation de certaines espèces des endroits habituels
  - Lagon

Indicateurs de concordances/discordances ou d'acceptabilité des changements sur la base des vécus et des perçus. Les perçus se construisant sur les expériences vécues par d'autres ou sur les médias, ou sur les discours des collectivités, des entreprises, etc.

9.1.6. INDICATEURS DE SUIVI DU LIT DE LA RIVIERE

> *Argument socio-culturel*
>
> *Les rivières jouent un rôle primordial en tribu pour diverses raisons : lieux de pêche, lieux d'activités récréatives, lieux à forte valeur socio-symbolique – « L'eau c'est le lien » témoignent les habitants des lieux.*
>
> *Les « trous d'eau », lieux particulièrement importants aux yeux des habitants peuvent constituer des indicateurs de suivi de l'évolution d'un cours d'eau. Il convient de remarquer que leur modification ou disparation peuvent avoir une influence sur le caractère identitaire d'un lieu, et du cours d'eau plus généralement.*

Naturellement, le lit de la rivière est soumis à des modifications. Néanmoins, les modifications observées ont pris une ampleur qui impacte fortement la qualité de vie sur place et les habitants expriment souvent leurs inquiétudes par rapport à ces changements car ils peuvent impacter fortement le comportement de la rivière même en temps de fortes pluies.

Indicateurs – Variables (oui/non ou variables qualitatives plus précises)

- Diminution de profondeur de la rivière
- Évolution des berges

- Dépôt de sédiments au bord de la rivière,
- Attaques des berges,
- Effondrement des berges (des premières étapes jusqu'à l'effondrement complet).

• Comblement des trous d'eau

Certains indicateurs seront spatialisés d'autres ne le seront pas. La plupart de nos données ont été spatialisées et nourriront cette partie du guide méthodologique.

En particulier, une analyse détaillée du suivi des trous d'eau, à titre d'indicateurs « déjà connus » et « observés » par les habitants, a été élaborée en annexe 1.

9.2. METHODES

Les savoirs des habitants, leurs vécus ainsi que les représentations qu'ils ont de l'engravement et de ces conséquences peuvent être appréhendés par des études anthropologiques s'appuyant sur des entretiens longs semi-directifs auprès de la population concernée ainsi que d'un travail ethnographique comportant de l'observation participante. Ces études nécessitent du temps mais sont les seules qui permettent de traduire fidèlement les transformations vécues par les habitants faisant face à des changements majeurs de leur environnement. L'étude réalisée nous permet aujourd'hui de donner quelques directions et processus à mettre en place pour appréhender les éléments clefs à recenser pour faciliter une discussion, voire une négociation entre les acteurs de l'endroit afin d'aboutir à des décisions éclairées pour mettre en place des aménagements ou d'autres choix permettant de limiter les impacts du surengravement.

Se trouvent présentés ici divers éléments permettant « d'objectiver » les perceptions recensées quant aux phénomènes d'engravement et d'inondation vécus par les habitants. Plusieurs tableaux apportent des précisions sur les contextes et impacts spécifiques liés aux phénomènes suscités, à chaque tribu de la chaîne étudiée. D'autres figures permettent de mieux cerner les enjeux et étapes à suivre pour conduire à un outil d'aide/appui aux « décisions éclairées ».

Les tableaux présentés ci-après (Tableau 6, Tableau 7 & Tableau 8) permettent de mieux comprendre les impacts vécus par les tribus de la chaîne et de l'estuaire en lien avec la problématique d'engravement des cours d'eau. De plus, ils montrent que face à une problématique commune, les effets de l'engravement et de l'hypersédimentation sont spécifiques à chaque tribu et qu'ils dépendent largement de critères tels que : la morphologie du territoire, la présence de cours d'eau, l'organisation spatiale, etc.

Tenir compte de ces contextes spécifiques est indispensable dans la prise de décisions concernant la mise en place d'ouvrages ou d'aménagements sur la rivière. Tout comme les effets de l'engravement sont à appréhender de manière localisée entre les tribus, il est important de souligner qu'ils sont également différents au sein des tribus elles-mêmes.

Tableau 6 : Contexte et enjeux spécifiques des tribus de St Pierre, St Paul et St Michel

Tribus	**St Pierre**	**St Michel**	**St Paul**
Contexte général			
Problématique d'engravement :			
- Influence directe de la mine *(oui/non)*	Oui	Non	Oui
- Foncier disponible *(oui/non)*	Oui	Oui	Oui
- Foncier disponible inondable *(oui/non)*	Non	Non	Non
- Foncier disponible non inondable *(situer)*	A l'arrière de « la tribu », Nebürü (hauteurs), Nekaré.	Xwê Töö, GDPL face à « l'acienne tribu », au dessus de Xwê Töö	St Paul 2, Shan-poro, « hauteur ancienne tribu »
Apport de sédiments par : *(préciser)*			
Décharge Rivière *Creek*	Décharge, *creeks*, rivière	*Creeks*, rivière	Décharge, *creeks*, rivière
Type de sédiments :			
- Cailloux - « Caillasse » - Boue	Cailloux, « caillasse », boue	« Caillasse », boue	Cailloux, « caillasse », boue
Le phénomène d'inondation			
Exposition aux risques d'inondations : *(échelle 0-1-2-3 ; 0 = aucune ; 3 = forte)*	2	2	1,5
Surface inondée dans la tribu selon les habitants *(en proportion)*	30 %	50 %	30 %
Origine inondation *(spécifier)*			
- Par la rivière *(à nommer)* - Les *creeks* - Influence de la marée	Nebürü, Nakalé, La Thio, *creeks*	La Thio, *creek* Tomwa	La Thio
Habitations inondées (oui/ non)	Oui	Oui	Oui
Déplacements :			
- Distance de déplacements *(km, m)*	Variable selon les habitants (max 1 km)	Variable selon les habitants (max 600 m)	Variable selon les habitants (max 2 km)
- Type : isolé ou collectif *(préciser)*	Isolés (habitations)	Isolés (habitations)	Isolés (habitations)
- Lié à l'engravement *(oui/non)*	Oui (après 1975 et +)	Oui (après 1975 et +)	Oui (après 1975 et +)
- Vague de déplacement ? *(une ou plusieurs)*	Plusieurs	Plusieurs	Plusieurs
Changements sur la rivière : *(préciser)*			
- Profondeur *(+ ou -)*	Moins	Moins	Moins
- Modification du lit *(comment)*	aménagé : curé	encaissé,	encaissé,

- Débordement de l'eau *(où)*	(Nebürü, Nakalé) ; => plus large, droit vers « l'ancienne tribu », matché, nakalé (terrain foot), habitations Nebürü, refoulement avec affluents de la Thio	ensablé vers « l'ancienne tribu », refoulement avec le *creek.*	ensablé, passe vers la rive droite devant « l'ancienne tribu » vers « l'ancienne tribu »
<u>Aménagements à proximité ou dans :</u> - Présence *(oui/non)* - Type *(préciser)* - Satisfaction *(oui/non)* - Crainte de l'aménagement *(oui/non)* - Attentes *(préciser quels aménagements)*	 Oui curage 2015 majorité = non oui curer + profond, enrochements	 Non (nettoyage des *creeks* par le passé) curage	 Non (curage à certains endroits par le passé) curage

Tableau 7 : Tableau thématique descriptif précisant les impacts des engravements, de l'hypersédimentation et des inondations

	St. Pierre	St. Paul	St. Michel
Quels sont les impacts majeurs liés à l'engravement (l'E) et à l'hyper-sédimentation (l'HS) du point de vue des habitants ?	La descente des sédiments des décharges (cailloux, caillasse, boue) dans la Nembrou, la Nakalé et les creek ; le refoulement de l'eau dans la tribu avec la confluence des creek et rivière.	Les inondations à l'ancienne tribu, le risque d'isolement de la tribu pendant les inondations	La sortie du lit de la Thio en amont de la tribu (xwê töö) et inondations à l'« ancienne tribu »
Quel est l'impact de l'E et de l'HS sur le foncier habitable et cultivable disponible ? (fort/ moyen/ faible)	Impact moyen Menace sur la disponibilité du foncier mais moindre que pour l'estuaire. Possibilité d'habiter sur l'arrière de l'espace de la tribu (entre nembou et nakalé). Les cultures sont également inondées. certaines personnes cultivent près de leurs zones d'habitations également.	Impact moyen à faible. Après agrandissement de la réserve par le passé et déplacement des populations : le foncier habitable et cultivable non inondable est disponible sur le GDPL de Shan Poro.	Impact moyen Menace sur la disponibilité du foncier mais moindre par rapport aux tribus de l'estuaire. Possibilité d'habiter au dessus de Xwê Töö et en aval de la tribu (avant le pont des lépreux). Les zones de cultures sont inondées, certaines personnes cultivent près de leurs zones d'habitations également.
Qu'est-ce qui est le plus problématique pour les habitants avec l'E et l'HS et le phénomène d'inondations : l'impact sur les habitations ou sur les cultures ?	L'impact sur les champs, et celui sur les habitations menacées par les forts courants (notamment près de la Nembrou)	L'impact sur les habitations. Principalement celles situées sur l'espace de l'ancienne tribu en bas	L'impact sur les zones de culture près de la thio, mais aussi certaines habitations (ancienne tribu)
Quelle est la distance de la tribu /des habitations par rapport à la rivière en temps normal ?	Variable selon les habitations, de 100 à 400 mètres	100 à 300 mètres	100 à 500 mètres
Les habitants sont-ils isolés et immobilisés pendant les inondations ?	oui, le pont de la Nakalé s'est déjà cassé pendant les crues ; difficulté de sortir du chemin de nembrou pour rejoindre RP4	oui, le pont entre St Michel et St Paul s'est déjà cassé ; passage à gué de la tomuru impraticable	Oui, pour les habitants de manière générale qui doivent attendre que le niveau de l'eau redescende

De manière générale la disponibilité du foncier (habitable et cultivable) est plus fortement impactée pour les tribus de l'estuaire que pour celles de la chaîne. Cependant, malgré la disponibilité du foncier pour les tribus de la chaîne, d'autres facteurs sont à prendre en compte : Pour la tribu de St Paul par exemple, le foncier disponible cultivable non inondable se situe sur le GDPL de Shan Poro, c'est-à-dire relativement loin par rapport aux habitations des personnes habitant toujours près de la maison commune (les champs les plus proches se situent à plus de 2,5 km en passant par la route). De plus, ces personnes étant majoritairement des personnes âgées (+ de 60 ans), le déplacement vers ces zones de culture devient complexe. Elles cultivent d'ailleurs autour de chez elles. De plus, même si le foncier non inondable est accessible pour cette tribu, son utilisation pour les habitations amène une reconfiguration importante de l'organisation spatiale au sein de la tribu.

Tableau 8 : Caractérisation des déplacements des tribus de St. Pierre, St. Paul et St. Michel

En cas de déplacement nécessaire	St. Pierre	St. Paul	St. Michel
o Les déplacements sont possibles sur la zone de la tribu (habitat / cultures)	Oui, il y a des espaces libres vers la nembrou et sur l'arrière de « la tribu », endroits où des constructions sont déjà présentes. Mais nécessité de se référer à l'histoire des clans.	Oui, sur le GDPL de Shan Poro	Oui, au dessus de Xwê Töö et du côté du pont des lépreux, endroits où des constructions sont déjà présentes. Mais nécessité de se référer à l'histoire des clans.
o Les déplacements seraient possibles par d'autres liens de familles extérieurs à la tribu ?	non renseigné	Oui, en lien avec l'histoire des clans et de la chefferie	non renseigné
o Comment les nouveaux espaces sont-ils occupés (cultures/ habitations) ?	Par des habitations	Par des habitations et des champs (Shan Poro)	Par des habitations

La possibilité de se déplacer à l'intérieur de la tribu, comme potentiellement à l'extérieur dépend bien sûr de la disponibilité du foncier non inondable, mais aussi et surtout de l'organisation clanique et des relations entre les clans au sein de la tribu (répartition spatiale des clans, position de chaque clan et légitimité). Il convient de noter que les lieux d'habitations sont toujours « habités de la présence des ancêtres ». Ils portent l'histoire des clans et cet élément ne doit jamais être négligé dans la réflexion sur les déplacements.

Pour les tribus de la chaîne, plusieurs espaces sur les GDPL semblent « libres ». S'interroger sur la possibilité de les investir comme lieux d'habitations est une question à poser.

Les transformations de la rivière induites par l'engravement sont très mouvantes. En effet, chaque forte pluie et événement météorologique extrême (cyclones, crues) en viennent à modifier : les zones d'accumulation de sédiments (fins ou grossiers), le passage de l'eau, la profondeur de la rivière et la largeur du lit, la formation des trous d'eau.

Impact sur les activités	St. Pierre	St. Paul	St. Michel
Impact sur la pêche			
o Zones de pêche	trous d'eau existant encaissés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek	trous d'eau existant encaissés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek	trous d'eau existant encaissés et certaines zones très affectées par la transformation du lit de la rivière ou du creek
o Quantité et espèces pêchées	oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale.	oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale.	oui, diminution de la quantité de poissons de manière générale .
Impact sur les cultures			
o La fertilité des sols	fertilité diminuée	non renseigné	Fertilité diminuée avec le passage des inondations.
o La qualité des produits	Moins bonne qualité de manière générale	non renseigné	Moins bonne qualité de manière générale
o Variétés les plus impactées	non renseigné	non renseigné	non renseigné

De manière générale, les habitants constatent qu'il y a moins de poissons dans la rivière et dans les creeks. Cela est dû à différents facteurs : engravement des creek et absence d'eau en surface ; rétrécissement voire disparition des trous d'eau favorisant l'habitat des poissons et leur maintien ; présence de boue et de sédiments fins empêchant la bonne oxygénation de l'eau.

Les espèces les plus citées sont le mulet noir, l'anguille, les loches de rivières et les crevettes.

La diminution des trous d'eau induit une diminution des zones de pêches, et les habitants parlent également de la difficulté de pêcher en plongeant.

Concernant le travail agricole, tous évoquent la dureté de la couche de boue présente dans les champs et/ou de la « caillasse » et de la difficulté à retravailler la terre par la suite. Le travail dans les champs devient plus difficile avec la présence de boue. Les habitants attendent que la boue sèche et soit plus légère pour retravailler leurs champs.

Les habitants ont évoqué le fait qu'il fallait vite récupérer les produits plantés après le passage des inondations pour ne pas qu'ils pourrissent avec la présence de l'eau et de boue.

Certaines « mamans » nous ont évoqué le fait qu'elles plantaient chez elles pour maximiser les chances de garder leurs produits. Dans les tribus de la montagne cela est également lié à la présence d'animaux sauvages (chevaux, poules sultanes) qui viennent ravager les cultures.

Les femmes évoquent de moins bons rendements dans leurs champs, qu'elles associent à plusieurs facteurs qui se combinent (inondations, terre moins fertile, changement climatique…).

Tableau 9 : Type et terminologie des boues selon les habitants

Dépôt des boues et autres matériaux			
o Couleur de la boue	Marron et rouge	Rouge	Rouge
o Epaisseur de la boue	Une dizaine de centimètres dans les cultures	Quelques centimètres déposés dans les habitations de "l'ancienne tribu"	De quelques centimètres à une vingtaine de centimètres.
o Types de matériaux	terre et minerai (appellation boue nickel)	. terre et minerai (appellation boue nickel) . "caillasse" et cailloux retrouvés dans certains champs	terre et minerai (appellation boue nickel)
o Dans quelles circonstances attend-t-on un dépôt de boue ?	Avec le refoulement d'eau dans la zone de culture située près de la rivière	Lors des fortes crues qui entraînent des sorties d'eau de la Thio.	Lors de fortes crues qui entraînent des sorties d'eau de la Thio

Les dépôts de boues décrits par les habitants sont plus importants vers l'estuaire que pour les tribus de la chaîne.

Pendant les inondations, l'élément le plus contraignant et le plus craint pour les habitants est le courant qui entraîne en particulier la descente de « caillasse » depuis les décharges pour Saint-Paul et Saint-Pierre et conduit à un risque important de décès. Le second élément le plus craint, qui est vécu comme très difficile par les habitants est le risque de dégâts portant sur les habitations, et ce d'autant plus que la boue est fréquemment associée au flux d'eau. Enfin, les dégâts dans les champs sont aussi clairement craints.

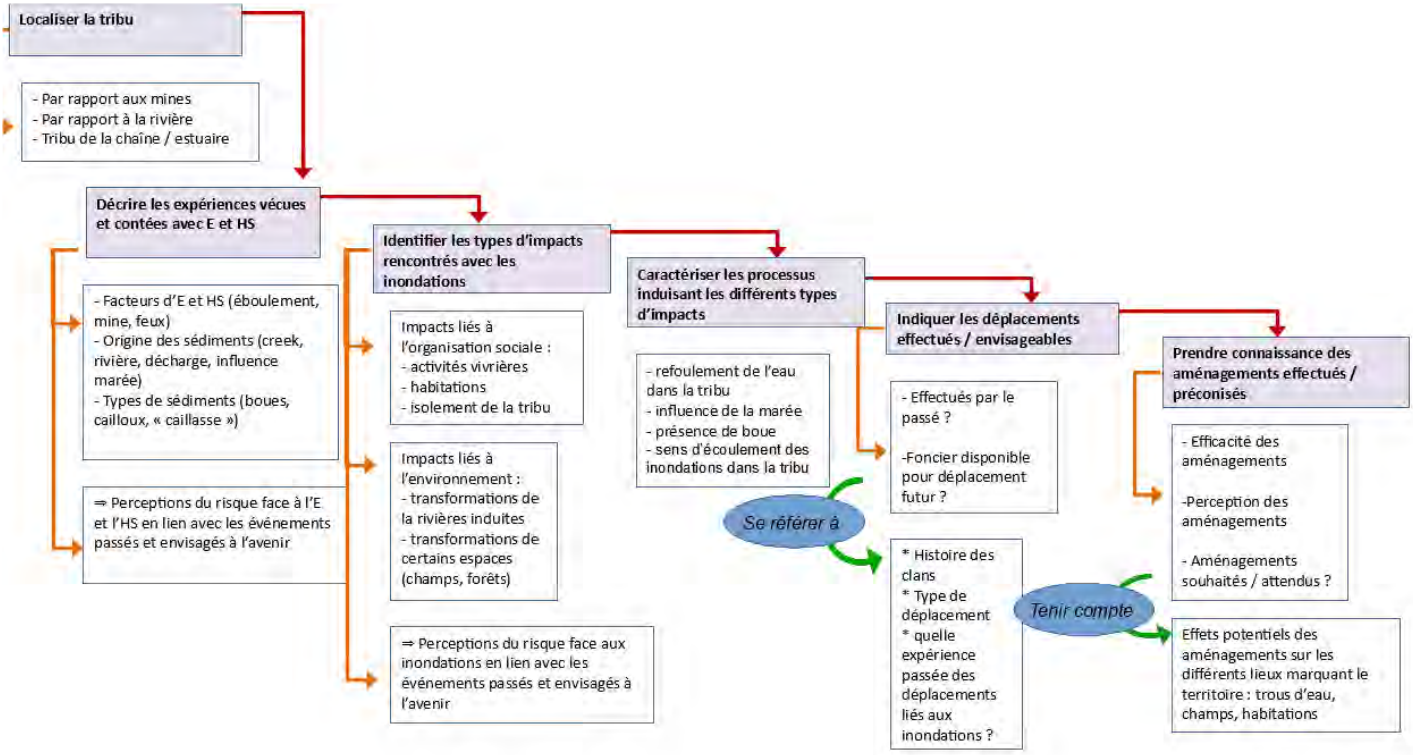


Figure 35 : Schéma relatif aux différentes étapes d'une étude pour comprendre le contexte socio-environnemental

9.3. TYPOLOGIE DES AMENAGEMENTS

Le Tableau 10 présente pour chaque type d'ouvrage, leurs avantages, inconvénients, et attentes associées du point de vue des habitants, confrontés aux fonctions/ intérêts hydro-sédimentaires et défauts/points de vigilance du point de vue des experts.

Tableau 10 : Les types d'ouvrages, leurs perception par la population et leur caractéristiques

	Avantages perçus par la population	Fonctions / Intérêts hydro-sédimentaires	Inconvénients / inquiétudes	Défauts / Points de vigilance	*Attentes*
Digues	• canalisent l'eau de la rivière • permettent un meilleur écoulement	• contenir l'écoulement en crue • empêcher le débordement • favorise le transit des écoulements	• ont stocké des sédiments dans la baie du Bota-Méré, dans le chenal de l'îlot • sont cassées	• efficace jusqu'à un certain niveau de crue • et à condition de résister • stabilité à évaluer	*Réparer les digues*
Épis	• protègent localement des enjeux (ex. de la tribu de St Philippo 1)	• empêcher l'érosion de berges (naturelles ou parements de digues) • limiter par conséquent la reprise sédimentaire • s'ils sont bien conçus, ils peuvent suivre l'enfoncement du lit et rester efficaces	• ont stocké les sédiments sur leur rive • ont disparu	• impact possible sur la berge opposée • deviennent inefficaces s'ils se retrouvent enterrés	*À refaire*
Peignes	• retiennent les sédiments grossiers	• arrêter et stocker les sédiments les plus grossiers, en fonction de l'espacement des « dents » du peigne	• laissent passer les sédiments fins	• efficacité très limitée sur les matériaux en suspension	*Entretenir l'aménagement*
Entretien des *creeks*	• réduit l'ampleur des inondations		/		*À refaire*
Curage	• évacue une grande quantité de sédiments • sécurise les habitations	• augmenter la section d'écoulement • restaurer une capacité de stockage • réguler le transport solide	• n'est pas assez profond • n'est pas associé à une sécurisation des berges • peut entrainer un lit rectiligne • disparition des trous d'eau	• demande des interventions régulières pour garder son efficacité • volume par unité de longueur proportionnel à la largeur (lit étroit → peu de volume stockable → risque de débordement accru) • destruction des habitats aquatiques	*Curer l'embouchure, près des tribus ; plus profond* *Sécuriser berges*

10. UNE REMEDIATION A QUOI, POUR QUOI ?

10.1. QUELS OBJECTIFS, POUR QUELS ENJEUX ?

L'adaptation et l'efficacité d'une stratégie de gestion du passif ne peuvent s'évaluer qu'en comparant les performances des mesures envisagées par cette stratégie avec les objectifs qui en sont attendus.

Il est probablement illusoire d'imaginer ramener les cours d'eau engravés de Nouvelle-Calédonie à l'état dans lequel ils étaient avant le début de l'activité minière. Sans parler de la difficulté à caractériser ce que devrait être cet « état initial », un retour à cet hypothétique état est a priori hors de portée des capacités technico-économiques mobilisables. L'objectif de « remédiation » doit donc plutôt s'entendre comme permettant d'atteindre ou de retrouver un état des cours d'eau, pas forcément identique à un état antérieur réputé « initial », mais qui puisse être jugé comme « satisfaisant ».

Dans une première étape il est donc nécessaire de bien identifier les enjeux qui sont potentiellement impactés par les conséquences du surengravement des creeks et des rivières de la zone géographique considérée, et auxquels sont attachées les diverses parties prenantes.

Un inventaire assez général des types d'enjeux à considérer et à analyser en fonction des contextes locaux est esquissé ci-dessous.

<u>Écosystèmes aquatiques marins</u>

Après les épisodes de crues, le lagon subit un phénomène connu d'envahissement par des « eaux rouges ». Les eaux fluviales chargées en particules fines atteignent le milieu marin : la turbidité augmente considérablement donc la luminosité dans l'eau baisse et une sédimentation s'opère. Le manque de lumière et le recouvrement des coraux par des particules fines menace grandement la vie corallienne. Les récifs constituent un abri incontestable pour de très nombreuses espèces animales qui se retrouvent à leur tour menacées par la mort de leur habitat.

Ces perturbations des habitats aquatiques marins et ces fortes mortalités sont responsables à terme d'une baisse de la diversité de faune et de flore aquatique sur le récif, qui finit par entrainer la baisse des rendements de l'activité de pêche.

<u>Écosystèmes aquatiques d'eau douce</u>

L'engravement des creeks et des rivières se traduit par une présence excessive de cailloux dans leur lit. Cela est responsable de la formation d'un habitat unique, avec la disparition des singularités fluviales telles que les vasques, les seuils naturels, le méandrage, lieux inconditionnels de vie pour la faune. L'absence d'invertébrés et de nombreuses espèces de poissons peut être constatée en comparant creeks impactés et non impactés.

La présence de barrages ou pièges à sédiments le long des cours d'eau ainsi que l'envasement des estuaires participent au ralentissement général des vitesses d'écoulement. Or certaines larves qui naissent dans les cours d'eau doivent arriver en

moins de 48 h dans l'eau salée pour poursuivre leur développement et rencontrent de fait des difficultés à respecter cette échéance.

Enfin, pour l'ensemble des écosystèmes, les opérations de curage peuvent avoir des impacts écologiques majeurs en détruisant les habitats naturels des espèces présentes dans les cours d'eau et dont la régénération est difficile.

Biens et personnes

Un des enjeux est évidemment l'exposition des populations aux inondations. Lors des crues, les eaux montent et progressent jusque dans les villages, menaçant les personnes, leurs habitations et leurs biens. Les champs agricoles sont également submergés, ce qui peut entraîner la destruction des récoltes et le dépôt d'une couche de limons ou de boues qui contraint l'exploitation de ces terres et affecte leurs rendements.

Transport de polluants

En plus de l'engravement des creeks, l'activité minière entraîne le relargage de polluants, en grande partie des métaux lourds (cobalt, amiante, chrome), dans l'air et l'eau. Les cours d'eau deviennent ainsi une voie de transfert efficace et les sédiments transportés un vecteur potentiel. Des études sont en cours pour caractériser et quantifier l'impact de ces polluants sur les écosystèmes et sur l'homme.

Prises d'eau potable

Pour l'alimentation en eau douce des secteurs habités, de nombreuses prises d'eau sont installées dans les hautes vallées. Ces aménagements sont donc implantés relativement à l'amont des creeks et parfois en zone impactée par l'activité minière ou sur des versants en érosion. L'engravement peut alors être responsable d'un débit d'étiage nul sur certaines périodes, de distribution d'eaux « rouges » aux robinets voire du transfert de polluants dans le réseau d'eau potable rendant le captage inutilisable

Cultures et coutumes

Les pratiques et activités coutumières des tribus riveraines des creeks et rivières, et les lieux, sites et terres qui leur sont associés sont également un des enjeux à prendre en considération.

Cette analyse doit conduire à définir les objectifs que devraient remplir des stratégies de remédiation ou de gestion du passif pour être efficaces.

Sur la base de l'identification des enjeux et de l'analyse des perturbations qui les affectent et les menacent sur le secteur d'étude, des objectifs devront être définis et formulés en termes de contrôle ou de régulation des flux sédimentaires. Ces objectifs seront bien entendu propres au contexte local de la zone concernée. Dans la mesure du possible, ils seront quantifiés (en volumes, en débits, en hauteurs, en emprises, en concentrations, etc…) afin que puisse leur être confrontée l'évaluation des capacités des mesures envisagées.

10.2. QUELS OUVRAGES POUR QUELLES FONCTIONS ?

10.2.1. QUELS PROCESSUS HYDRO-SEDIMENTAIRES (PRODUCTION / TRANSFERT ; EAU / SEDIMENTS ; SEDIMENTS GROSSIERS / SEDIMENTS FINS) PEUT-ON ESSAYER D'INFLUENCER ?

La formation des crues chargées en sédiments résulte de l'action de divers processus que l'on peut schématiquement décomposer en processus de « production » et en processus de « transfert » (Figure 360).

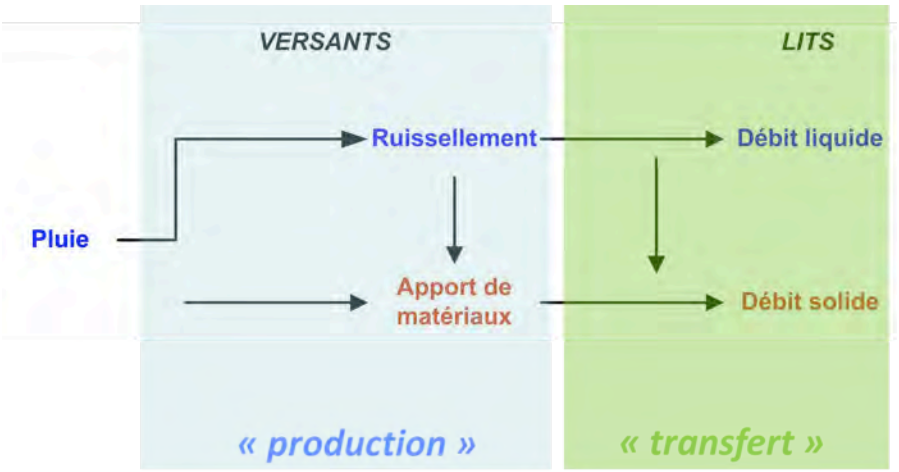
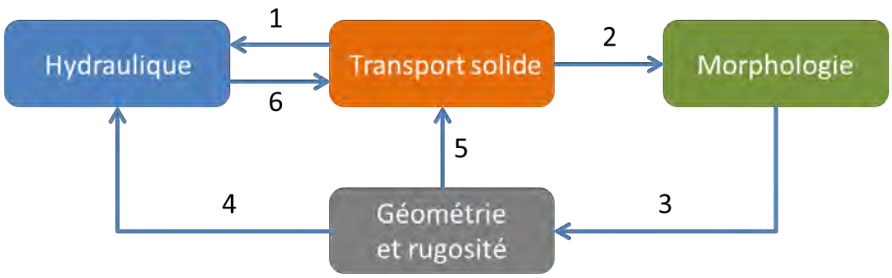


Figure 36 : Processus de formation des crues avec transport solide (d'après Brochot)

Les processus de production sont ceux qui vont mettre à disposition de ces crues les deux composantes principales caractérisant ces écoulements chargés, l'eau et les sédiments. Les processus de production de la composante liquide sont ceux qui assurent la transformation de la pluie en ruissellement, que divers modèles hydrologiques proposent de traduire. Les processus de production de la composante sédimentaire sont fondamentalement ceux synthétisés à la Figure 11. Ces processus de production se développent majoritairement sur les versants. On peut noter qu'à cette échelle déjà les processus relatifs à la composante liquide et ceux concernant la composante sédimentaire interagissent. En effet, le ruissellement, résultant de processus de production de la composante liquide, est l'un des facteurs à son tour du processus de production de la fraction sédimentaire.

Les processus de transfert quant à eux vont se développer majoritairement dans les biefs hydrauliques du réseau hydrographique. Ils sont traduits par des modèles hydrauliques pour la composante liquide, et par des lois de transport solide pour la partie sédimentaire. Une grande difficulté provient du fait qu'à forte pente, donc avec des transports solides importants, de très forts couplages ont lieu entre l'hydraulique de l'eau et la dynamique du transport solide (Figure 37). Il convient alors d'adopter des formulations du transport solide adaptées à cet état de fait.



1 Action de l'eau sur le matériau, provoquant un transport de sédiments
2 Effet du transport de sédiments sur la morphologie par dépôt ou érosion, entraînant enfoncement ou rehaussement, élargissement ou rétrécissement, voire changement radical de lit d'écoulement
3 Ces modifications morphologiques s'accompagnent de modifications de la rugosité, de la pente, de la géométrie de la section en travers,
4 lesquelles entraînent une modification du régime d'écoulement,
5 et une modification de la quantité de matériaux transportés
6 Perturbation plus ou moins forte de l'écoulement liquide par la présence de la phase solide en transport.

Figure 37 : Interactions entre phase liquide et phase solide

Dans le cas extrême des laves torrentielles, dont l'écoulement en masse traduit parfaitement l'importance de ces couplages, les formulations traduisant les processus de transfert impliqués relèvent d'une hydraulique particulière. Celle-ci ne distingue évidemment pas la composante liquide et la composante sédimentaire : le comportement de l'écoulement est monophasique.

Il convient également, concernant la production et le transfert de la composante sédimentaire, de distinguer les processus relatifs aux particules fines susceptibles d'être transportées en suspension de ceux relatifs aux sédiments grossiers.

Les différentes mesures de gestion du passif envisageables sont susceptibles d'avoir des effets plus ou moins importants sur ces divers processus, en fonction desquels elles assureront plus ou moins bien les fonctions à remplir pour répondre aux objectifs définis en regard des besoins identifiés.

10.2.2. QUELS SONT LES OUVRAGES, AMENAGEMENTS ET INTERVENTIONS QUI SONT SUSCEPTIBLES D'ETRE MOBILISES ?

10.2.2.1. Synthèse des retours d'expérience

Depuis une vingtaine d'années, les acteurs environnementaux de Nouvelle-Calédonie, comprenant les sociétés minières comme les décideurs publics, mettent en œuvre diverses mesures susceptibles d'avoir une influence sur les flux sédimentaires et la régulation du transport solide. On peut distinguer parmi les mesures qui ont été expérimentées jusqu'à aujourd'hui, les grandes catégories suivantes :

- Des **ouvrages (O)** : on considérera sous cette appellation toute construction de génie civil ponctuelle, de type barrage, seuil, digue, bassin, piège à sédiment/plage de dépôt, épis, mur de soutènement, etc… ;

- Des **aménagements (A)**, faisant souvent également appel à des travaux de génie civil (et donc quelquefois à des ouvrages[13]), et qui visent à :
  - Modifier le profil ou la section d'un cours d'eau sur son linéaire, (radier, descente d'eau, chenalisation, pralinage, …),
  - Assurer le passage d'une voie d'accès (buses, radier, cassis),
  - Stocker les sédiments à la source (revêtement de pistes, verses ou travaux de revégétalisation de versants) ;
- Des **interventions (I)**, consistant en des travaux sans génie civil réalisés le long des rivières, dans les creeks, ou même sur mine, visant à modifier le profil ou la section d'un cours d'eau sur son linéaire (curage, reprofilage, gerbage…).

En général ce sont des travaux combinant à la fois ouvrage(s), aménagement(s) et/ou intervention(s)[14] qui peuvent constituer des stratégies de remédiation adaptées aux objectifs poursuivis, relativement aux enjeux identifiés. Une analyse de la bonne adaptation des fonctions assurées par ces ouvrages, aménagements et interventions avec les objectifs poursuivis doit être conduite.

10.2.2.2. Particularités néo-calédoniennes

10.2.2.2.1. Par rapport aux techniques RTM

Comme évoqué dans les chapitres précédents, les actions RTM visent essentiellement un objectif de protection des personnes et des biens vis-à-vis des risques naturels en montagne. Dans le contexte du surengravement des cours d'eau néo-calédoniens, les enjeux sont plus larges.

Dans le contexte de l'engravement des cours d'eau en Nouvelle-Calédonie, les enjeux ne sont en effet plus seulement la protection des personnes et des biens et la prévention du risque naturel mais également la préservation de l'environnement terrestre, dulçaquicole et marin, l'activité économique, minière en particulier, les terres agricoles ou le patrimoine culturel et coutumier. Il convient de garder à l'esprit ces différences avec la métropole pour adapter ce savoir-faire à ces particularités.

> *Quelques particularités du contexte néo-calédonien.*
>
> *Sociales*
>
> *Les nombreuses communautés et populations qui peuplent la Nouvelle-Calédonie lui confèrent un caractère social à la fois riche et complexe. Selon leurs appartenances diverses (communautés, métiers, générations, etc.), les individus qui composent la population de Nouvelle-Calédonie portent des attachements particuliers à des objets, lieux, sites et activités. Il convient donc de bien appréhender et reconnaître cette*

[13] *Ce qui rend la distinction stricte entre ouvrages et aménagements quelquefois un peu artificielle*

[14] *Par commodité on utilisera parfois l'abréviation O/A/I dans la suite de ce guide*

diversité pour pouvoir évaluer l'impact des projets envisagés sur la population et de faciliter la mise en œuvre d'une concertation à propos de leur réalisation. Les normes de gestion des cours d'eaux relevant de la loi organique de la Nouvelle-Calédonie ainsi que le statut des terres traversées par les cours d'eau doivent particulièrement être considérées pour envisager des travaux dans les creeks

Économiques

L'économie de la Nouvelle-Calédonie est très dépendante du marché du nickel qui a provoqué depuis 150 ans une succession de crises dans l'archipel. Dans ce contexte, le Fonds Nickel a notamment pour mission de soutenir la filière minière et métallurgique en Nouvelle-Calédonie en cas de crise du secteur. La programmation et la réalisation des travaux est susceptible d'être fortement influencée à la fois par la situation économique de la filière, et par les priorités retenues par le Fonds Nickel dans la réalisation des travaux.

Environnementales

Le fort endémisme néo-calédonien est une contrainte particulière qui complexifie un certain nombre de situations. L'enjeu de préservation de ces espèces et de ces milieux exclusifs contraint énormément la réalisation des travaux de revégétalisation. Ceux-ci en effet se heurtent à la croissance extrêmement lente des espèces endémiques sur ces sols pauvres en nutriments et de surcroît exposées à la surpopulation de cerfs. Les moyens à mobiliser sont ainsi beaucoup plus importants que ceux à mettre en œuvre en métropole, pour une efficacité qui reste relativement aléatoire.

La géologie particulière ainsi que les conditions climatiques néo-calédoniennes font également partie des contraintes. Le dimensionnement hydraulique des ouvrages peut rapidement paraitre démesuré par rapport à la taille des cours d'eau (et des budgets disponibles…) pour être adapté au passage d'une crue cyclonique.

Techniques

Le contexte néo-calédonien apporte enfin des spécificités sur le plan technique. Ainsi l'emploi de béton dans la construction d'ouvrages de correction torrentielle est très rare en raison notamment de l'absence de centrales à béton sur une grande partie du territoire. Les exploitants miniers privilégient ainsi la mise en place d'enrochements en raison :

- *De leur savoir-faire dans la manipulation et la pose des blocs,*
- *De l'abondance de ces matériaux produite par l'activité minière,*
- *Et de la disponibilité des engins nécessaire.*

Plus globalement, l'essentiel des compétences mobilisables localement gravite autour des métiers de la mine (géologie, hydraulique souterraine, gestion des eaux sur mine…).

10.2.2.2.2. Une structure de bassins versants particulière

Par rapport à la représentation « classique » des bassins versants de montagne, les bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie ont une structure spécifique, en raison des empreintes dont l'activité minière affecte essentiellement les parties hautes des bassins versants (Figure 38).

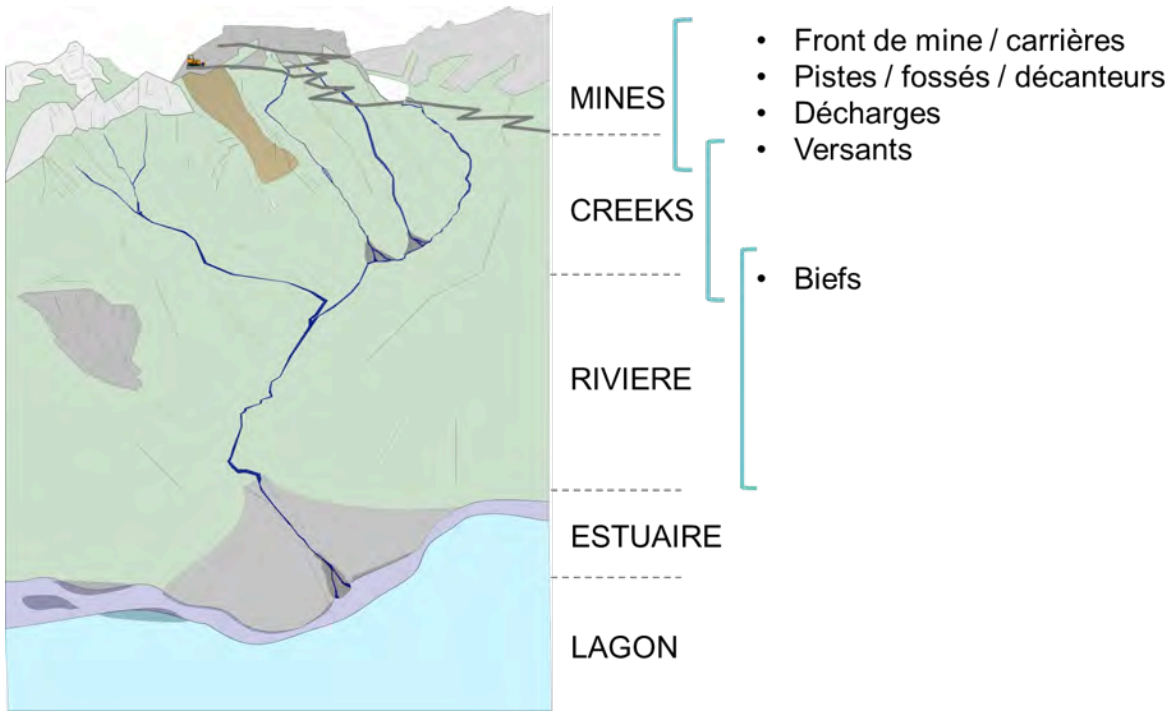


Figure 38 : Proposition de décomposition particulière des bassins versants miniers néocalédoniens

Schématiquement, on propose de distinguer 5 grands « étages » dans la structuration d'un bassin versant minier type.

En partant de l'amont, on trouvera successivement les étages suivants :

- Un premier étage occupé par, et fortement sous l'influence de l'activité minière. On le baptisera donc « *Mines* », et on y trouvera les différentes composantes autour desquelles s'organise l'exploitation minière :
  - Les fronts de mines, ou carrières, où a lieu l'extraction,
  - Les réseaux de pistes, de fossés et de décanteurs associés, par lesquelles sont acheminés les produits d'extraction,
  - Les décharges, héritées de l'exploitation antérieure à 1976,
  - Des versants qui n'ont pas fait l'objet d'interventions particulières liées à l'exploitation minière et sont donc restés dans un état proche de l'état naturel.
- Un étage « *Creeks* » qui s'apparentera plus à l'image traditionnelle d'un bassin versant torrentiel, composé de versants qui rejoignent les biefs constituant le réseau hydrographique. La séparation avec l'étage supérieur « *Mines* » n'est pas toujours tranchée, certains de ces versants pouvant y prendre naissance, et d'autres pouvant être partiellement occupés par des décharges dont les apports sédimentaires viendront alimenter directement les biefs s'écoulant au pied du versant.
- Un étage « *Rivière* » désignant le cours d'eau émissaire des creeks, essentiellement décrit par la succession de biefs collectant les différents creeks. On supposera que les

« *versants* » au sens strict directement drainés par les rivières contribuent très marginalement à la production, que ce soit d'eau ou de sédiments.

- Les deux étages suivants, « *Estuaire* » et « *Lagon* », ne font pas l'objet du présent guide.

Cette décomposition schématique nous servira surtout ici de grille de lecture des mesures envisageables et de leurs effets en fonction de leur localisation dans ces différents étages.

Les processus de production et de transfert évoqués plus haut sont en effet susceptibles, à des degrés divers, de se développer à tous ces étages. Il est donc important d'analyser chacun d'eux de ce point de vue, et en référence aux différentes techniques (O/A/I) envisageables, qui peuvent varier d'un étage à l'autre.

Le Tableau 11 récapitule les principaux processus (de production, de transfert) susceptibles d'être les plus actifs selon les « étages » décrits ci-dessus.

Tableau 11 : Localisations privilégiées des différents processus de formation des crues

	Type	EAU		SEDIMENTS			
Processus		Production	Transfert	Production fines	Production grossiers	Transfert fines	Transfert grossiers
Localisation	Front de mine / « carrières »	✓	(✓)	✓	(✓) (verses > 1970)	✓	(✓) (verses > 1970)
	Pistes, fossés et décanteurs		✓			✓	
	Décharges	✓		✓	✓		
	Versants	✓		✓	✓		
Localisation	Biefs		✓	✓	✓	✓	✓

Les processus de production d'eau (transformation pluie-débit) se développent dans tous les compartiments. Leur contribution sera cependant d'autant plus forte que les surfaces collectrices des précipitations seront importantes. Aussi la contribution à la production du ruissellement le long des réseaux de pistes ou de biefs sera négligée en regard de la contribution des surfaces potentiellement arrosées sur les carrières, les décharges ou les versants.

Les réseaux de pistes (y compris les fossés et décanteurs associés) et le réseau hydrographique seront à l'inverse des lieux privilégiés de développement des processus de transfert hydraulique des écoulements. Les zones en exploitation pouvant avoir tellement de configurations différentes, on ne peut pas écarter qu'elles puissent avoir aussi une contribution significative dans le transfert des écoulements. Un certain nombre de Plans de Gestion des Eaux le confirment certainement.

Concernant la production de sédiments, les décharges et les versants constituent des réservoirs potentiellement mobilisables tant de matériaux grossiers que de sédiments fins. Depuis la mise en verse systématique des refus de criblage, les zones en exploitation

fournissent essentiellement des matériaux fins. Enfin, l'érosion du lit ou des berges des biefs est susceptible de produire des sédiments de toute nature.

Selon leur configuration, les réseaux de pistes, fossés, décanteurs, ainsi que les carrières, auront naturellement une grande influence sur le transfert des sédiments fins. Le transport des sédiments grossiers sera principalement actif dans les réseaux hydrographiques.

10.2.3. QUELLES FONCTIONS REMPLISSENT CES DIFFERENTS O/A/I ?

Les tableaux qui suivent synthétisent les fonctions principales qu'assurent les ouvrages, aménagements et interventions selon leur lieu d'implantation. Ils précisent également si l'ouvrage, l'aménagement ou l'intervention peut avoir un effet sur les processus de production et de transfert qui sont susceptibles de se développer dans le secteur concerné.

L'utilisation de ces tableaux doit être adaptée à chaque contexte, dont il convient d'analyser avec un regard critique les écarts éventuels avec le cas général. Ces informations sont donc à utiliser comme une grille d'analyse pour l'aide à la réflexion.

10.2.3.1. Sur mine

On n'a considéré ni ouvrages, ni aménagements, ni interventions dans la zone en exploitation, qui en compte pourtant de très nombreux, mais qui n'ont sauf exception aucune vocation à durablement jouer un rôle sur la production sédimentaire.

Tableau 12 : Mesures mobilisables sur mine

Compartiments		Ouvrages	Aménagements	Interventions
MINE	Front de mine / « carrières »			Pour mémoire : Plans de Gestion des Eaux (PGE)
	Pistes + fossés + décanteurs	- Bassins de décantation	- Passages busés - Cassis - Descentes d'eau en escaliers	
	Décharges		- Réductions de pente - Reprofilages - Pistes d'accès	- Curages et remodelages - Mises hors d'eau
	Versants		- Verses - Revégétalisation	

Les Plans de Gestion des Eaux (PGE) sont un outil fondamental au niveau de la mine, et notamment en lien avec les réseaux de voiries, les fossés et les décanteurs associés. Leur vocation première n'est pas explicitement un objectif de régulation des flux sédimentaires ou de gestion du passif. Toutefois leur impact évident sur les processus de transfert d'eau permet dans certains cas d'éviter de concentrer les rejets d'eau dans des zones particulièrement sensibles à l'érosion ou au transport sédimentaire. Ils sont donc susceptibles d'avoir un impact majeur sur la dynamique sédimentaire. C'est particulièrement le cas pour ce qui concerne les sédiments fins, dont la gestion la plus efficace restera toujours de faire en sorte qu'ils ne sortent pas de la mine.

Par conséquent, même s'ils ne sont pas davantage décrits ci-après (ils font l'objet d'une réglementation dédiée), ils doivent impérativement être considérés comme une composante majeure de toute stratégie de gestion du passif.

10.2.3.1.1. Pistes / décanteurs

Les bassins de décantation ont en général vocation à collecter les écoulements concentrés par les fossés (ou directement par les voies elles-mêmes) et d'en retenir au maximum la charge en suspension. La question de leur efficacité en fonction de leur dimensionnement reste posée. Sur le plan réglementaire l'objectif est de les dimensionner afin qu'ils soient efficaces pour une crue de 2 h de période de retour 2 ans.

Tableau 13 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Pistes-fossés-décanteurs »

Ouvrages / Aménagements / Interventions	Fonctions			
Bassins de décantation	- Retenir les fines par décantation	+	++(+)	+++
Passages busés / Cassis	- Passage de l'écoulement sous / sur une voie	++	++	+
Descentes d'eau en escaliers	- Canaliser l'écoulement - Briser la charge hydraulique (limiter les vitesses) - Stabiliser le profil / éviter l'incision	++	++	+
Ont un effet sur les processus de :		transfert d'eau	transfert de sédiments fins	transfert de sédiments grossiers

Bien que retenant temporairement des volumes d'eau, compte-tenu de leurs dimensions ils n'ont en général qu'un effet marginal sur les processus de transfert d'eau. Leur fonction essentielle est cependant d'avoir une influence significative sur le transfert des sédiments fins en suspension (sous réserve de leur efficacité, et dans la limite « 2 heures – 2 ans » si on s'en tient aux obligations réglementaires). Ils vont évidemment arrêter aussi, et même plus facilement, les matériaux grossiers transportés par charriage, qui ne représenteront pas toutefois l'essentiel des transports solides sur les pistes et dans les fossés.

Les passages busés et cassis ont pour vocation première d'assurer le franchissement d'un écoulement par une piste, ou inversement, à un endroit précis. Ils ont donc un effet sur la localisation du transfert des masses d'eau et de la charge solide associée.

De même, les descentes d'eau qui ont vocation d'imposer aux écoulements un cheminement précis, ont un effet sur la localisation, et éventuellement le regroupement, des transferts d'eau et des charges solides associées.

Dans certaines configurations, ces deux types d'aménagements peuvent stocker involontairement une partie de la charge grossière.

10.2.3.1.2. Décharges

Les opérations de reprofilage conduisant à des réductions de pente des dépôts accumulés en décharge contribuent à en augmenter la stabilité. Ainsi elles ont un effet positif en diminuant la production de ces décharges en sédiments grossiers. Dans certains cas toutefois, ces décharges sont constituées de matériaux de « découverture » qui peuvent être majoritairement des matériaux fins. Dans ce cas leur effet positif concerne surtout la réduction de la production de fines.

Tableau 14 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Décharges »

Ouvrages / Aménagements / Interventions	Fonctions			
Réductions de pente et reprofilages	- Réduire le risque de déstabilisation en masse		++(+)	+++
Pistes d'accès	- Accéder au bas de la décharge - (Travailler à tout niveau de la décharge)	++(- -)		
Ont un effet sur les processus de :		transfert d'eau	production de sédiments fins	production de sédiments grossiers

Ces opérations de reprofilage et de réduction de pente sont à plus particulièrement à considérer pour l'aménagement des mines en fin d'exploitation. En effet, elles pourraient utilement constituer la base d'une restauration durable de ces versants en les accompagnant idéalement d'opérations de revégétalisation.

L'aménagement d'accès au bas de la décharge, ou à des niveaux intermédiaires le long du versant sont notamment nécessaires pour mener à bien des travaux de reprofilage évoqués ci-dessus. A l'instar des réseaux de pistes sur mine, leur effet sur les processus de transfert d'eau, et des charges sédimentaires associées, a priori essentiellement en matériaux fins après reprofilage de la décharge, ne devra pas être négligé.

10.2.3.1.3. Versants

L'aménagement de verses concerne les versants au sens strict mais aussi les anciennes mines dont l'exploitation est achevée. Leur réalisation a un effet sur les processus de production d'eau, en modifiant les conditions de formation des ruissellements, et de sédiments, fins ou grossiers. Concernant les sédiments fins, une attention particulière mérite d'être portée sur le traitement des ravines sur verses, notamment en cas de présence de matériaux latéritiques.

Tableau 15 : Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Versants »

Ouvrages / Aménagements / Interventions	Fonctions			
Verses	- Stocker les stériles - Drainer les eaux	++++	+++	+++
Revégétalisation	- Stabiliser le versant sur le long terme	++(+)	+++	+++
Ont un effet sur les processus de :		production d'eau	production de sédiments fins	production de sédiments grossiers

Compte-tenu de la configuration particulière des aménagements de verses, et notamment des dispositifs de drainage mis en place, il faut aussi tenir compte, dans les processus de production d'eau, de modifications souvent importantes de localisation des points d'entrée dans les biefs du réseau hydrographique.

La mise en œuvre de travaux de revégétalisation de versants dégradés aura un effet favorable sur :

- Les processus de production d'eau et de formation du ruissellement (au moins jusqu'à un certain seuil de forçage pluviométrique qui peut être dépassé lors des évènements extrêmes),
- La diminution de la production de sédiments induite par celle du ruissellement.

Les contraintes sont nombreuses en Nouvelle-Calédonie (pauvres qualités des sols, faibles vitesses de croissance des espèces végétales indigènes, surpopulation de cerfs, pression des incendies,…) mais des opérations de revégétalisation réussies devraient souvent être la base de bonnes stratégies de gestion du passif à l'échelle des versants. Cette solution est, de plus, la plus durable et résiliente grâce à la capacité de reprise de la végétation.

10.2.3.2. Sur les cours d'eau

Les deux étages « Creeks » et « Rivières » sont traités conjointement dans ce paragraphe, dans la mesure où les ouvrages, aménagements ou interventions envisageables sont très voisins. On ne considèrera un compartiment « Versants » que pour l'étage « Creeks », aux motifs précisés dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Mesures mobilisables sur les cours d'eau

Compartiments		Ouvrages	Aménagements	Interventions
CREEKS	Versants	- Seuils de consolidation de versants	- Revégétalisation	
	Biefs	- Digues - Plages de dépôt - Barrages / Seuils - Barrages de retenue des eaux - Épis	- Protections de berges - Radiers - Passages busés - Cassis	- Curages - Reprofilages - Réouvertures de bras morts
RIVIERES	Versants	*La composante « versants » au niveau des rivières n'a que peu d'importance dans l'apport de sédiments au système hydro-sédimentaire. Nous considèrerons en général que les versants au droit des rivières sont seulement responsables d'une légère production d'eau, hormis quelques exceptions de zones d'érosion (naturelle) avérées.*		
	Biefs	- Digues - Épis - Plages de dépôt - Bassins de décantation	- Protections de berges - Gués	- Curages - Reprofilages - Réouverture de bras morts

10.2.3.2.1. Versants

La revégétalisation fait partie des opérations les plus efficaces sur le long terme, notamment pour la production de sédiments fins. Sous ce terme de « revégétalisation » nous englobons également l'ensemble des petits travaux sur versants (banquettes, seuils dans les ravines, hydro-seeding, etc.) qui sont associés à la végétalisation et qui sont nécessaires pour la rendre efficace. On ne rentrera pas plus en détail dans ce guide sur les espèces à replanter ou les techniques de mise en œuvre particulières qui constituent un sujet à part entière.

Tableau 17 : Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Versants »

Ouvrages / Aménagements / Interventions	Fonctions			
Seuils anti-érosion	- Stopper l'érosion d'une ravine		++	+++
Travaux de revégétalisation	- Stabiliser le versant sur le long terme	++(+)	+++	++
Ont un effet sur les processus de :		production d'eau	production de sédiments fins	production de sédiments grossiers

Les travaux de revégétalisation de versants gagnent souvent à être accompagnés de travaux de petite correction torrentielle. Ceux-ci sont à réaliser dans les amorces de réseau hydrographique (rigoles, ravines…) qui drainent ces versants. Les fonctions de ces ouvrages de petite correction torrentielle sont décrit dans le 5.3.1. Ils ont un effet sur les processus de production sédimentaire et plus particulièrement sur la production de sédiments grossiers.

10.2.3.2.2. Biefs

Les barrages, détaillés au 5.3.2.2, limitent l'incision du lit du cours d'eau, l'érosion de ses berges et dans certains cas la déstabilisation des versants. Les effets les plus sensibles des

ouvrages de ce type affectent la fraction la plus grossière du sédiment. Les barrages auront un effet secondaire sur le transfert des sédiments grossiers par charriage car ils induisent des modifications de la morphologie des lits (réduction de la pente, élargissement du lit).

Les plages de dépôt ont pour fonction première de piéger les sédiments à concurrence de leurs volumes maximal de stockage. L'essentiel du piégeage concerne les transports par charriage même si des sédiments fins s'y trouvent également piégés. Leur incidence sur le transfert d'eau reste minime avec une faible incidence sur le laminage des débits (à moins d'être de volume considérable !).

Les ouvrages baptisés « barrages de retenue sédimentaire » (Tableau 18) sont des ouvrages qui sont conçus pour stopper l'ensemble des fractions granulométriques transportées. Ils devront donc être fermés par un barrage imperméable à l'eau, contrairement aux « barrages perméables de sédimentation » qui ferment classiquement les plages de dépôt. Leur efficacité sur le transfert des sédiments fins et plus encore de l'eau dépend complètement de leur dimensionnement en regard des flux en présence.

Les barrages de retenue des eaux, qui ont vocation à laminer les crues, ont un effet sensible sur le transfert de l'eau et sur la propagation de l'onde de crue. L'amplitude de cet effet sera fonction du dimensionnement de l'ouvrage en regard des flux liquides considérés. Indirectement, les effets induits par l'ouvrage sur les flux liquides ont des conséquences sur le transfert amont-aval des sédiments.

Les épis et les protections de berges ont pour objectif de protéger et de limiter les affouillements et l'érosion des berges. Ils ont donc pour effet de limiter la production de sédiments au niveau des biefs qui résulterait de ces processus.

Les radiers continus ont pour objectif de protéger le fond du lit des cours d'eau de l'incision. Cela engendre un effet positif de réduction de la production de sédiments grossiers issus du lit mais génère en retour un effet négatif en perturbant le transfert des sédiments de l'amont vers l'aval et en empêchant les « respirations » naturelles du lit. Ces dernières sont des fluctuations du niveau du lit au cours des cycles de dépôt puis d'érosion qui permettent une certaine régulation des flux sédimentaires par charriage. Une protection contre l'érosion grâce à des seuils ou barrages délimitant des « biefs affouillables » serait de ce point de vue-là souvent préférable.

Les digues modifient les conditions de transfert de l'écoulement liquide et des transports sédimentaires associés. Leurs effets dépendent de la nature de ces digues et de leur rugosité. À titre d'exemple, les digues à parement lisse entrainent une accélération de l'écoulement ce qui a pour conséquence d'augmenter l'incision du lit si celui-ci n'est pas protégé. Dans les cas extrêmes, cette incision peut conduire à la ruine de la digue. Les digues à plus forte rugosité telles que celles constituées d'enrochement sont moins sensibles à ce phénomène.

Les passages busés, les cassis et les gués n'ont théoriquement que des effets marginaux et locaux sur les processus de transfert. Toutefois, il est fréquent d'observer un sous-dimensionnement des buses conduisant à des modifications des transferts liquides et sédimentaires. Par ailleurs ce type d'ouvrage est très facilement obstrué lors des crues par des débris transportés (troncs d'arbres, branchages etc.) qui conduisent à l'obstruction du dispositif et à son disfonctionnement. Dans ce cas, les effets sur les flux liquides et le transfert sédimentaire peuvent devenir significatifs.

Tableau 18 : Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Biefs »

ouvrages / Aménagements / Interventions	Fonctions				
Barrages / seuils	- Maintenir le niveau du lit (empêcher l'incision) - Diriger l'écoulement - Consolider les versants en servant d'appui (glissements)		+++		+
Plages de dépôts	- Stopper le transport des sédiments grossiers	(+)		+	+++
Barrages de retenue sédimentaire	- Stopper le transport des sédiments fins et grossiers	+		++	+++
Barrages de retenue d'eau	- Écrêter les crues	++		++(+)	+++
Épis	- Recentrer / diriger l'écoulement - Protéger une berge		++(+)		
Protections de berges en enrochements	- Empêcher l'érosion de la berge		+++		
Radiers en enrochements	- Empêcher l'incision du lit		+++		
Digues	- Contenir l'écoulement	+(++)		+(+)	+(++)
Passages busés	- Franchissement de l'écoulement par une voie	+			
Cassis / gués	- Franchissement d'une voie par l'écoulement	+			
Curages	- Augmenter la section d'écoulement - (Abaisser le niveau du lit) - Créer une zone de stockage potentiel - Diminuer les apports potentiels	+		+	+++
Reprofilages	- Augmenter la section d'écoulement - Améliorer la qualité des berges (géométrie, rugosité, etc…) - Créer une zone de régulation pour le cours d'eau	++	(+)		++
Réouverture de bras morts	- Augmenter l'espace de liberté	(+)	+	+	+
Ont un effet sur les processus de :		transfert d'eau	production de sédiments grossiers	transfert de sédiments fins	transfert de sédiments grossiers

Deux types principaux d'interventions sont à distinguer : les curages[15] et les reprofilages. Ces interventions sont mises en œuvre le long d'un tronçon ouvert des cours d'eau. On ne

[15] *Il ne s'agit pas ici des curages nécessaires dans les décanteurs, plages de dépôts ou autres pièges à sédiments*

devrait parler de curage que lorsqu'il y a extraction de sédiments du lit majeur du cours d'eau, au même titre que lorsqu'on cure une plage de dépôt. Une intervention où les sédiments sont « simplement » déplacés à l'intérieur du lit du cours d'eau afin d'en modeler différemment la section en travers, relève d'un calibrage.

Ainsi un curage vise en priorité à dégager une zone de stockage disponible pour les futurs apports sédimentaires (en venant « prendre la place » des sédiments curés). Ce stockage est favorisé par l'augmentation de la section d'écoulement, l'abaissement du niveau du lit, voire la réduction locale de la pente en long, que permet cette extraction de sédiments. En général de tels curages sont envisagés dans des zones naturellement propices au dépôt. L'effet attendu de ce type d'opération est donc principalement de modifier les conditions de transfert des sédiments grossiers, à l'instar de ce qui est attendu d'une plage de dépôt. La modification des sections d'écoulement et profils en long aura également inévitablement un effet sur les conditions d'écoulement hydraulique, donc le transfert de l'eau, même si ça n'est pas l'effet principal attendu.

Les reprofilages quant à eux visent d'abord à modifier les sections hydrauliques et le profil en long d'un tronçon en supprimant les singularités hydrauliques pour en améliorer les conditions d'écoulement. Cette amélioration permet au tronçon de mieux remplir sa fonction de régulation des flux sédimentaires. Il s'agit donc d'améliorer les conditions hydrauliques qui en retour ont un effet positif sur la production et le transfert de sédiments.

La réouverture d'anciens bras mort peut être une intervention permettant de donner (ou redonner) plus d'espace de liberté à l'écoulement. Cela permet de modifier les modalités d'écoulement lors des crues en amortissant l'onde de crue mais aussi de favoriser la régulation des flux sédimentaires dans ce secteur.

10.2.4. QUELLES PERCEPTIONS EN ONT LES POPULATIONS, LES ELUS ?

Le point de vue des élus et de l'ancien chef de centre de la SLN à Thio ont été recueillis lors d'entretiens semi-directifs et de réunions (COTECH, Réunion entre le Collectif Chavaa Xûâ et la SLN). La restitution intermédiaire réalisée en juillet 2016 à la mairie a également constitué un temps d'échange important avec les acteurs de la commune impliqués dans la gestion de la problématique d'engravement (élus, membres du Collectif Chavaa Xûâ).

10.2.4.1. Perception de la problématique d'engravement par les élus

Les élus rencontrés, et en particulier le secrétaire général et le maire se sont exprimés à propos de leurs implications multiples dans les différentes sphères de la vie communale, ainsi que d'un point de vue plus personnel. Leurs inquiétudes en tant qu'habitants de la grande chefferie de Thio (St Philippo 1) sont souvent ressorties avant leur positionnement d'élus, nous expliquant leur crainte et leur vécu des inondations à la tribu.

Dimension culturelle et sociale

L'impact des transformations environnementales issues de l'engravement et l'hyper-sédimentation sur la dimension culturelle et sociale a été souligné. Ces transformations affectent selon eux les zones de pêches et de cultures et la répartition des rôles entre chaque clan. Même si ces discours se fondent sur le contexte spécifique de la tribu de St Philippo 1, ils entrent largement en adéquation et en résonance avec les témoignages portés par les habitants des autres tribus.

Problématique du relogement induit par le déplacement

Dans un autre registre, les préoccupations liées aux actions et plans communaux sont ressorties. La question du relogement des habitants inondés et de l'installation des jeunes voulant construire leur maison est apparue comme un point central de la réflexion des élus.

En plus du coût financier que cela impliquerait, la problématique de disponibilité du foncier non inondable pour les tribus de l'estuaire est ressortie, limitant les possibilités de déplacements des habitants et de construction de logements pour ces derniers. Les réflexions autour de lotissements communaux (vers la zone du Bota-Méré et des Pétroglyphes) ainsi que de lotissements tribaux pour la tribu de St Phillipo 1 sont en cours. Au delà de l'idée de construction de ces logements, le maire a souligné son appréhension face aux éventuelles réticences des habitants à se déplacer.

Ces craintes sont compréhensibles si l'on tient compte du passif de certaines tribus en la matière comme Urué et St Philippo 1. D'autres déplacements seront-ils envisageables pour la population ? De plus, l'attachement et la valeur associés aux terres d'origines porteuses d'identité individuelle et collective rendent la question du relogement relativement complexe car elle induit des implications profondes pour les habitants, qui sont ancrés dans leur manière de voir le monde, leurs liens à la terre et leurs relations inter-claniques.

Questionnement élargi au développement et au bien-être social de la commune

De nombreux éléments sont mis en lien avec le phénomène d'engravement par les élus et les habitants, et en particulier les difficultés sociales et de développement de la commune. Le maire s'interroge par exemple sur le lien entre les conséquences de l'engravement et des inondations, la perte des repères culturels qu'elles induisent et la question de l'incivilité des jeunes, dont il est souvent question aujourd'hui dans les discours localement et dans les médias à l'échelle du pays. Les élus mettent en avant l'impact des inondations dans les projets de développement de la commune. Les projets agricoles qu'ils souhaitaient élaborer se sont vus contraints par le problème d'inondation d'une grande partie de la plaine[16] et de la fertilité de la terre réduite du fait de l'apport de « terre rouge » des mines.

Évolution de la gestion de la problématique d'engravement

La problématique d'engravement et ses conséquences font l'objet de préoccupations et de revendications depuis les années 80. Elles ont été considérées et intégrées dans le cadre d'un certain nombre d'accords qui ont été renouvelés et/ou nouvellement élaborés jusqu'en 2013. Connus sous le nom de « pieds mouillés », ces accords sont tout d'abord bipartites et ont été établis directement entre les tribus et le principal exploitant : la SLN. Ils encadrent toute une série de revendications relatives à l'indemnisation des cultures endommagées par les crues depuis les années 75, au dragage de la rivière de la Thio, à des aides et dédommagements concernant la construction de terrassements et de logements en zones non inondables. Ces revendications s'étendent également à d'autres domaines faisant plutôt appel au rôle d'instance publique joué historiquement par la SLN. Face à ces revendications,

[16] *La vallée de la Thio a toujours été inondable, l'engravement et l'hyper-sédimentation des cours d'eau ont accentué cette indondabilité*

l'entreprise prend effectivement en charge une assurance agricole (la Caisse d'Assurances Mutuelles Agricoles - CAMA[17]) et participe aux dépenses concernant les problèmes d'inondation des logements. D'autres revendications sont venues s'ajouter ou ont été reformulées au cours du temps et les accords ont fait intervenir un plus grand nombre d'acteurs depuis 1996. Cela a donc conduit aujourd'hui à une médiation de la problématique d'engravement des rivières entre les deux districts coutumiers, la commune, le représentant de l'État, la Province Sud, la SLN et le gouvernement. Le Collectif Chavaa Xûâ fondé en 2013 possède une place importante dans la gestion de cette problématique et est également un membre actif des débats et des négociations.

10.2.4.2. Une gestion complexe et source de malentendus

Des compétences spécifiques segmentées au sein de divers organismes

La problématique d'engravement fait intervenir aujourd'hui une multitude d'individus relevant de directions et services des collectivités gouvernementales et provinciales (divers secteurs sont concernés), de consortiums, de bureaux d'étude, etc. Ces acteurs, qu'ils soient de la DIMENC, de la DAVAR, ou encore du Fonds Nickel et de SOPRONER pour ne prendre que quelques exemples, participent plus ou moins régulièrement aux réunions se déroulant sur la commune (l'équipe du projet a entre autres participé à l'un des comités de pilotage « cours d'eau »[18]) . Ces réunions rassemblant parfois jusqu'à une vingtaine de personnes peuvent être longues et ne sont pas toujours conclues par des décisions, les négociations à 20 étant difficiles. De plus, chaque organisme a des compétences bien spécifiques se chevauchant parfois. Il est donc complexe pour les élus et les techniciens de la commune de savoir vers quel acteur se tourner pour résoudre les problématiques sur la rivière et d'articuler les différentes compétences de chacun. À cela s'ajoute la question de la responsabilité de gérer les impacts causés. L'année 1975 est une référence clef puisqu'elle démarque la responsabilité attribuée aux dommages causés à l'environnement. Avant cette date, il s'agissait plutôt de responsabilités partagées entre les opérateurs miniers et le gouvernement. Toute dégradation pouvant être rattachée aux années après 1975 suit le schéma de type « pollueur-payeur ». Or, du fait de l'ampleur des dégradations sur l'environnement et les rivières et du coût des réparations, il est fréquent de voir les différents acteurs en charge de la gestion de cette question discuter leur responsabilité.

Ambigüité des rapports à l'industrie minière

Le fait que les élus de la commune soient parfois salariés du principal exploitant accentue la complexité de gestion de la problématique d'engravement et d'hyper-sédimentation. Une partie de la population de Thio voit comme problématique les mandatures pendant lesquelles des élus sont à la fois élus et salariés du principal exploitant. Ce conflit d'intérêt potentiel ne

---

[17] *L'adhésion à cette assurance permet de bénéficier d'un système d'indemnisations relatif aux « calamités agricoles » http://www.davar.gouv.nc/portal/page/portal/davar/secteur_rural/interventions/calamites_agricoles*

[18] *Mis en place par la Province Sud du fait des inondations de 2013 pour faire aboutir les travaux prévus par le Protocole d'accords de cette même année. Il réunit les services derrière le Gouvernement, la Province, la mairie, la SLN et le Collectif*

peut pas selon eux permettre à la mairie d'adopter des choix politiques suffisamment engagés dans les négociations avec la SLN. Bien que l'histoire de l'activité minière sur la commune n'implique pas qu'un seul exploitant, il s'avère que c'est aujourd'hui avec la SLN que se joue la majorité des négociations. Lors des COPIL et des COTECH comme lors des réunions rassemblant des représentants de la SLN et de la population ou du collectif, il est rare aujourd'hui que les élus prennent la parole. La situation évolue donc actuellement très lentement.

En outre, le rôle historique joué par la SLN dans la commune de Thio, intervenant comme instance publique par le passé, a des répercussions aujourd'hui dans la relation des habitants à l'exploitant. Il en résulte une ambiguïté dans les attentes de la population par rapport aux dédommagements et au rôle que l'entreprise peut effectivement remplir. L'ancien chef de centre de la SLN rencontré en 2016, a clairement expliqué d'une part sa volonté de sortir des négociations en « face à face » avec la population comme cela a pu être le cas historiquement ; et d'autre part, de conserver avant toute chose son rôle d'industriel : « c'est de s'assurer dans tout ça qu'aujourd'hui chacun assume ses responsabilités et reste dans son domaine de compétences ». Les habitants se questionnent sur le positionnement adopté par l'entreprise : les arguments avancés ne sont-ils pas un moyen de se désengager des actions à mener ? Ces doutes portent aussi sur les explications données concernant les inondations et le fait qu'elles aient toujours été présentes dans la commune.

Les points de vue divergents de la population et de l'industriel à propos des aménagements

Le nombre d'acteurs à participer aux décisions (autour de la table des négociations) ayant des points de vue différents sur ce qu'il serait bon de faire, rend difficile les prises de décision des élus. La divergence entre l'industriel et la population est notoire à propos des aménagements.

L'ancien chef de centre a mentionné que la multitude d'acteurs présents dans les négociations ne permettait pas une gestion efficace de la problématique d'engravement. Il souligne également l'importance qu'il y ait de « manière concertée, une vision globale de la rivière, du haut jusqu'en bas » et un schéma d'aménagements réfléchissant à ce qui doit être priorisé et protégé. Il est selon lui important de stabiliser certaines zones en amont qui alimentent en charge solide la rivière et dans certains contextes d'effectuer également des travaux sur le lit de la rivière comme ceux qui ont été faits sur la Nakalé et la Nebürü afin de sécuriser les habitations. L'idée d'un curage de l'embouchure n'était pas une solution viable selon lui, dans la mesure où il ne serait pas durable et impliquerait une enveloppe budgétaire importante pour le financer et le maintenir en l'état. A l'inverse, les habitants ont maintenu leurs attentes en matière de curage de l'embouchure de la Thio et d'autres embouchures (comme celle de la Kouaré par exemple). La notion de « bouchon » bloquant le bon écoulement est souvent reprise par la population.

Par ailleurs, les logiques suivies selon les acteurs ne sont pas les mêmes et ne sont pas fondées sur les mêmes registres. Les habitants ont reproché la logique économique suivie par les instances ayant réalisé les curages des rivières de Nebürü et de Nakalé en 2015. La mise en œuvre des travaux et les quantités de matériaux enlevés auraient été évaluées selon une enveloppe budgétaire disponible. Or pour eux, la manière dont les travaux ont été effectués n'est pas durable et ne permettra pas d'éviter de futures inondations. Même s'ils sont bien conscients de la quantité faramineuse de matériaux présents et du coût que leur retrait implique, ils mettent en avant l'importance d'assurer la sécurité de la population et de leurs habitations. La logique qu'ils suivent est donc éminemment sociale et entre en contradiction avec celle suivie lors des curages.

Un manque d'écoute ressenti par les habitants

« Ça fait des années qu'on est là, mais on voit pas le travail fait. Il fallait un gros blocage, un gros cri de guerre pour que les autorités se disent « peut-être qu'il faut qu'on voit l'argent qu'on doit déverser pour les gens qui habitent au pied de la mine » »[19].

Les habitants ont confié leur sentiment de délaissement vis-à-vis des instances responsables de la gestion de l'engravement. Ils ne se sentent pas entendus et ont souvent la sensation que les travaux et les aménagements réalisés sont avant tout mis en œuvre dans le but de conserver la « paix sociale ». En effet, beaucoup ont évoqué que la prise en compte des conséquences de l'engravement n'était effective que suite à une réaction virulente de leur part. Elle serait donc ponctuelle mais pas durable. Dans la commune plusieurs ouvrages ont été réalisés au cours des années 80. La plupart se trouvent près de l'estuaire et à proximité des décharges. Parmi ceux-ci on retrouve : les digues situées à l'embouchure de la Thio, les « épis » qui se trouvaient dans la rivière en face de la tribu de St Philippo 1, les « peignes » et les bassins de décantation situés au pied des décharges. Les travaux d'entretien des creeks et des rivières à cette période (curage) par l'entreprise Sodder ont également été cités par les habitants avec le regret qu'ils ne soient plus effectués. Les perceptions des aménagements effectués sont reprises dans la partie sur la typologie des aménagements (9.3).

[19] *Extrait d'un entretien avec un homme de la tribu de St Pierre ayant participé aux travaux de curage de 2015*

11. DEMARCHE GLOBALE D'ELABORATION D'UNE STRATEGIE DE REMEDIATION

11.1. LES DEMARCHES DE REMEDIATION

11.1.1. DEMARCHE DE REMEDIATION GENERIQUE

De nombreux travaux traitent de la démarche de remédiation. A titre d'exemple, la Figure 39 issue des travaux de Carladous (2016) est une démarche générique de remédiation c'est-à-dire non spécifique aux problématiques des cours d'eau et de leurs bassins versants. Elle se présente sous la forme d'un graphe visant à définir l'efficacité des dispositifs de correction et de la remédiation engagée. En fonction du contexte et des enjeux, des besoins d'interventions s'expriment qui doivent être traduits en termes d'objectifs. Le dispositif à imaginer doit s'appuyer sur un ensemble d'ouvrages, d'aménagements ou d'interventions (AOI) qui soient adaptés pour que les fonctions qu'ils assurent répondent bien à ces objectifs. Cette adaptation dépendra à la fois de la conception du dispositif et des ouvrages, aménagements, interventions qui le composeront, qui devront a minima « qualitativement » remplir les fonctions nécessaires à répondre aux objectifs. Leur dimensionnement devra lui aussi être adapté à atteindre les objectifs attendus sur un plan quantitatif. La conception et le dimensionnement devront enfin assurer une sûreté de fonctionnement permettant de garantir durablement l'efficacité du système. Le niveau de ressources à mobiliser en regard des objectifs et des enjeux demeure une contrainte très forte.

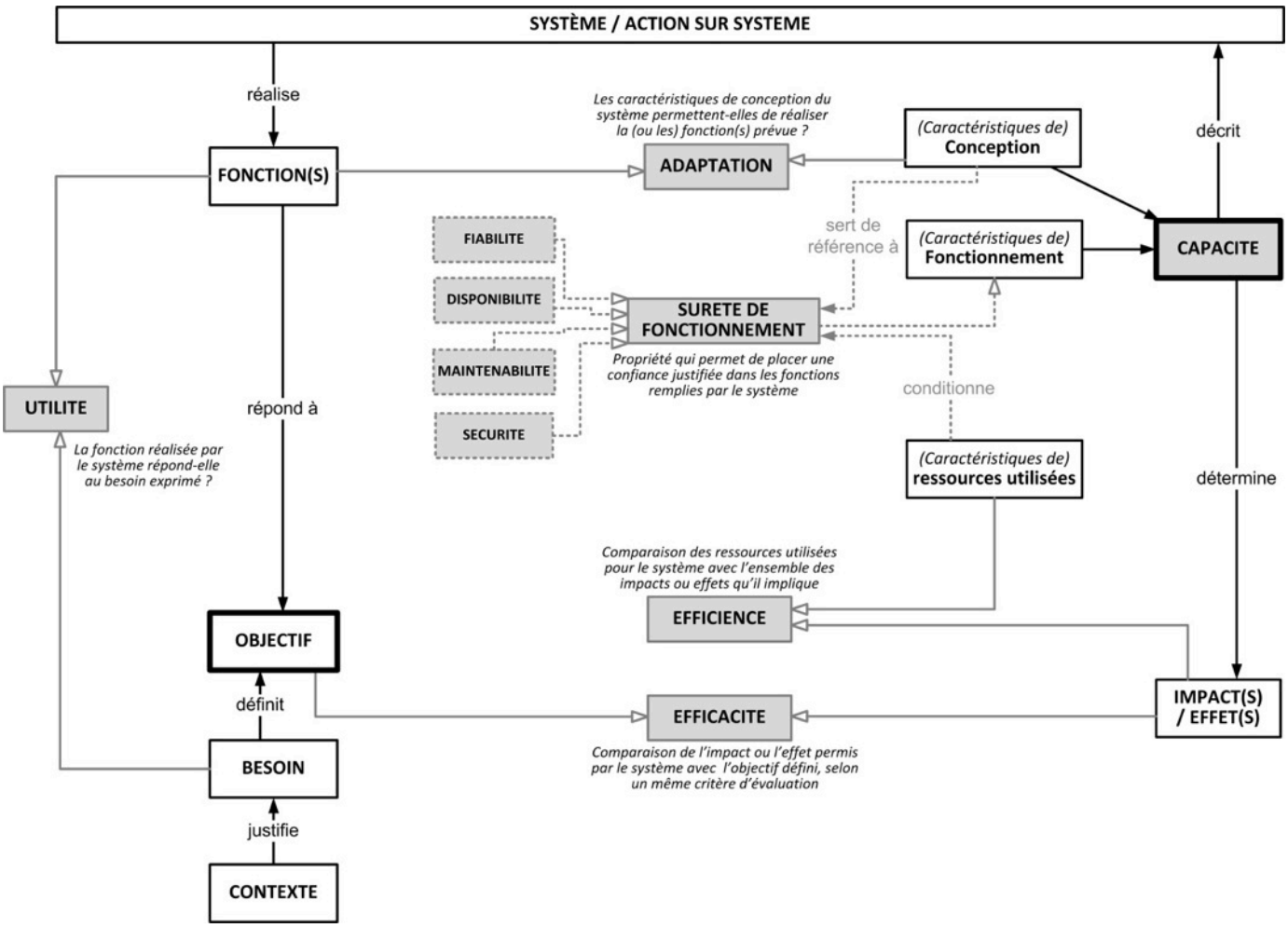


Figure 39 : Graphe de présentation de la démarche globale d'élaboration d'une stratégie de remédiation (Carladous, 2016)

11.1.2. DEMARCHE DE REMEDIATION DES BASSINS VERSANTS

En ce qui concerne les bassins versant torrentiels, Piton et al. 2016 proposent un processus complet de définition d'une stratégie de remédiation qui est plus adaptée à la problématique de l'engravement des rivières calédoniennes (Figure 40). L'approche proposée traite aussi bien des aspects fonctionnels (effets sur la géomorphologie locale puis dimensionnement hydraulique) que des aspects structurels et économiques. Elle est réalisée à partir d'une analyse quantitative du risque qui tient compte de la présence des ouvrages. Les travaux menés dans le cadre du projet Gestion du Passif Minier se situent à mi-chemin entre les étapes une et deux, s'étant surtout attachés à décrire et détailler les aspects qualitatifs des fonctions assurées par les différents ouvrages, aménagements et interventions envisageables.

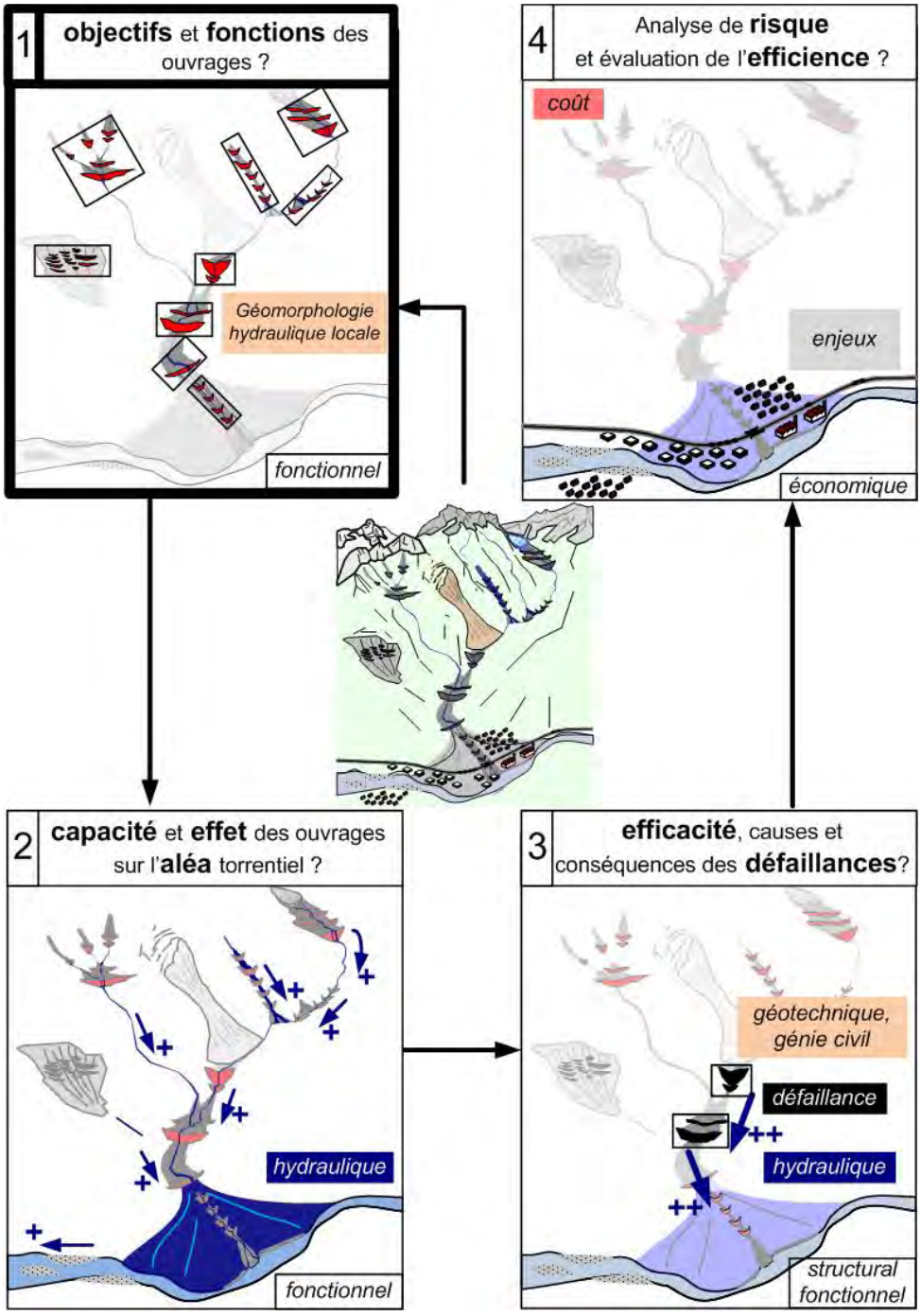
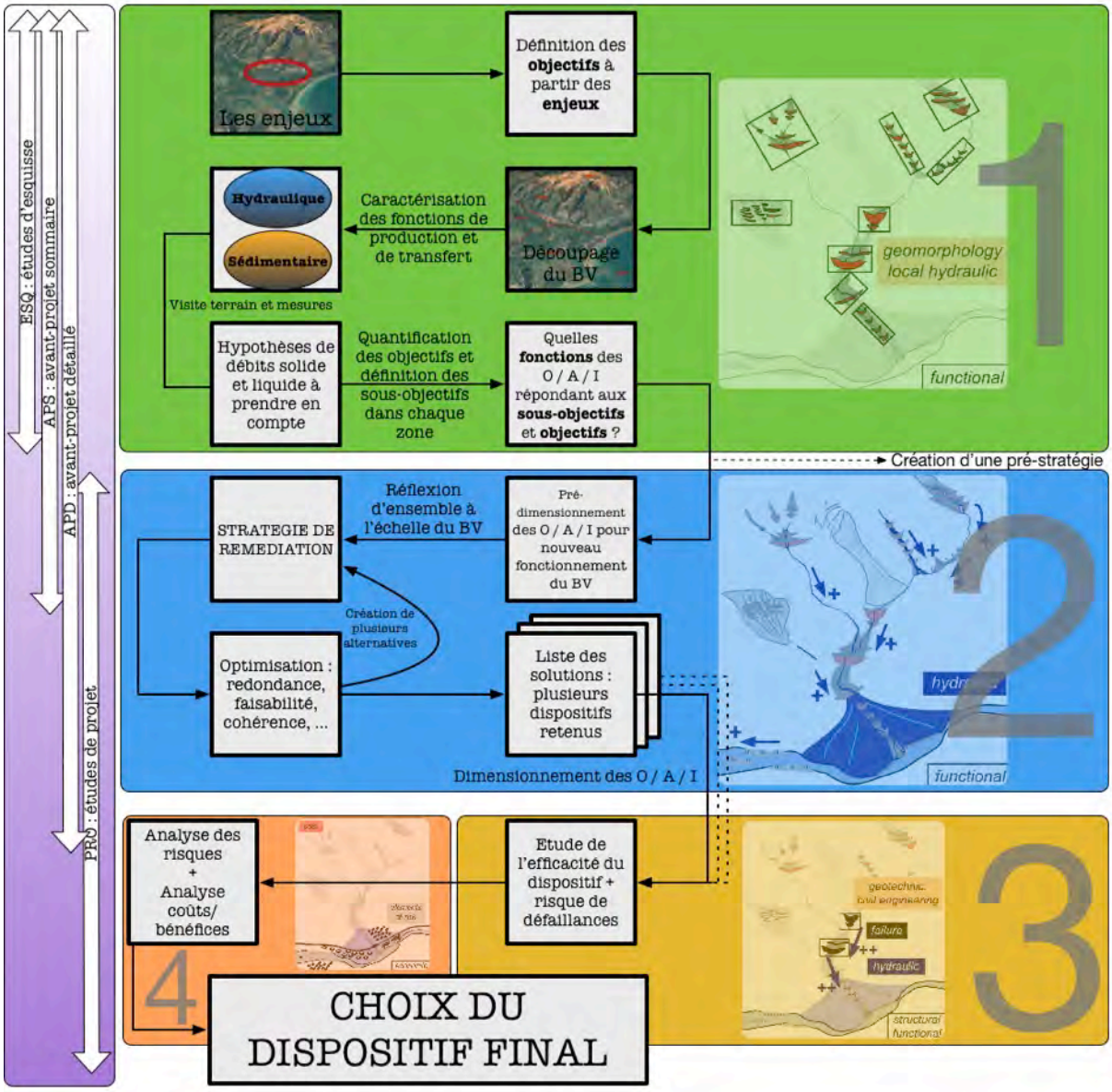


Figure 40 : Les quatre grandes phases de la définition d'une stratégie de remédiation (Piton et al, 2016)

Les quatre phases de l'approche proposée par Piton et al. 2016 sont présentées dans la Figure 41. Dans cette figure, les différentes tâches constituant les quatre étapes sont détaillées.

Figure 41 : Logigramme d'aide à la décision pour l'élaboration de stratégies de remédiation



Les données qualitatives et surtout quantitative de retour d'expérience ont manqué pour véritablement approfondir l'analyse du point 4. Une telle analyse restera quoi qu'il en soit relativement spécifique à chaque contexte. Et un certain nombre de documents et guides de référence existent pour les différents types de mesures passés en revue.

11.1.3. DEMARCHE DE REMEDIATION PRENANT EN COMPTE LES CONTRAINTES SOCIO-ANTHROPOLOGIQUES ET PHYSIQUES

Les démarches et méthodes de remédiation présentées précédemment sont celles classiquement mises en œuvre. Bien qu'apportant des solutions techniques sur la remédiation du milieu physique, elles ne sont pas complètement adaptées à la problématique de l'engravement des cours d'eau calédoniens. En effet, ces démarches ne prennent pas en compte les attentes et demandes sociétales ni le contexte coutumier. Or les travaux réalisés dans le projet Gestion du Passif ont montré que la non prise en compte des contraintes socio-anthropologiques conduisait potentiellement à un échec des actions de remédiation, à leur rejet par certains acteurs et à des tensions entre les différentes parties prenantes.

Notre proposition de stratégie de remédiation est présentée dans la Figure 42 et implique, à tous les niveaux de l'avancement et de la réflexion, les acteurs et parties prenantes afin de garantir une bonne adéquation entre les mesures techniques envisagées et les attentes et contraintes d'ordre sociétal. Deux groupes d'acteurs ont été identifiés et interviennent dans différentes phases de l'application. Le premier groupe comprend les habitants, les élus, les coutumiers et les collectifs tandis que le second groupe comprend le gouvernement, la province, les industriels, les élus, les coutumiers et les collectifs.

Cinq étapes principales constituent la démarche (Figure 42) :

- Étape 1 : Définition des contextes d'un point de vue social et physique,
- Étape 2 : Présentation des mesures techniques avec consultation du premier groupe d'acteurs,
- Étape 3 : Tableaux synthétiques des mesures techniques retenues prenant en compte les contraintes sociales et physiques,
- Étape 4 : Concertation et discussions avec le second groupe d'acteurs,
- Étape 5 : Prise de décision et choix du ou des dispositif(s) final(aux), incluant éventuellement des mesures alternatives ou complémentaires aux mesures techniques (réglementaires, organisationnelles, etc…).

Cette mise en œuvre en parallèle des aspects sociaux et environnementaux a pour objectif d'élaborer à partir d'un tableau des mesures de remédiation, une stratégie prenant en compte l'ensemble des composantes et contraintes du problème (physiques, humaines, financières etc.). Une place importante est réservée à l'information, à la consultation, à la concertation et aux négociations.

A chaque étape visant à élaborer ce tableau, il est possible de revenir en arrière en cas de désaccord. Une fois le tableau produit et validé par tous, l'étape suivante consistera à prioriser collégialement les différentes mesures sélectionnées et puis d'en vérifier la faisabilité économique. Dans le cas où les différents acteurs n'arrivent pas à un accord sur les mesures, il sera vraisemblablement nécessaire de revenir aux étapes précédentes qui n'ont probablement pas été correctement traitées.

Cette approche « globale » socio-environnementale enrichie encapsule la démarche de remédiation des bassins versant présentée dans le chapitre précédent.

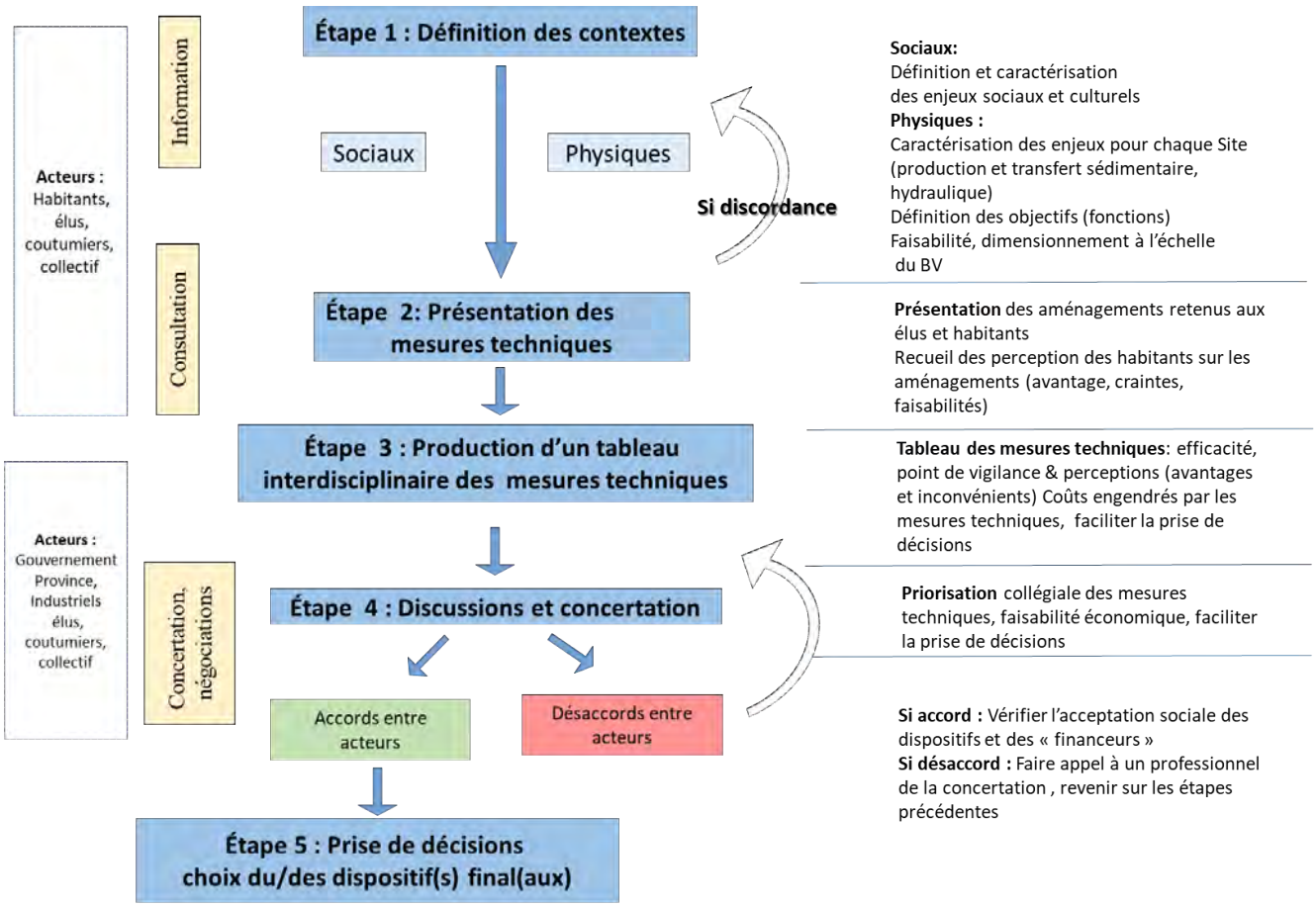


Figure 42 : Démarche globale de la stratégie de remédiation du surengravement prenant en compte les contraintes socio-anthropologiques et physiques

11.2. POINTS DE VIGILANCE

11.2.1. DIMENSIONNEMENT

La fiabilité, l'efficacité fonctionnelle comme structurelle et la durée de vie d'un ouvrage, aménagement ou même intervention, reposent en majeure partie sur la qualité de son dimensionnement. En premier lieu les hypothèses de dimensionnement doivent pouvoir fournir les débits de crues et leur temps de retour, ainsi que les débits solides associés. Sans ces données, une construction sûre et optimisée est difficilement imaginable : l'ingénieur aura naturellement tendance à fortement sur-dimensionner l'ouvrage s'il manque des données de bases de conception. La rapidité d'intervention parfois nécessaire pour des travaux hydrauliques rend l'empirisme légitime, notamment grâce à la grande expérience des techniciens de terrain, toutefois de simples calculs de dimensionnement et des

précautions telles que les protections contre l'affouillement et le contournement permettent bien souvent d'apporter une solution davantage pérenne qui n'aura pas besoin d'être reprise après la prochaine crue. De nombreux cas nous ont été présentés lors de nos visites où des travaux ont été réalisés en urgence et doivent aujourd'hui être repris pour des raisons de sous-dimensionnement ou de mauvaise fonctionnalité, engendrant évidemment de nouveaux coûts.

11.2.2. ORDRE DES TRAVAUX

Lors de la mise en place d'une stratégie de remédiation, un ordre particulier est à respecter dans la construction des ouvrages, aménagements et/ou interventions. D'abord, il convient de consulter la population. Ensuite, il est inutile, par exemple, de commencer à replanter des espèces végétales sur un versant soumis à des glissements si ce problème n'est pas réglé en premier. De la même manière, pour remédier à une tendance à l'incision d'un lit de cours d'eau, l'installation d'un premier seuil en amont ne serait pas très judicieuse : l'incision se poursuivrait à l'aval et finirait par régression par déchausser le seuil.

Les travaux des ouvrages, aménagements et/ou interventions commencent donc en général de l'aval du bassin versant, sauf s'il existe des points durs sur lesquels il est possible de prendre appui, pour remonter progressivement vers son amont (série de seuils, revégétalisation, etc.). Toutefois, il convient de raisonner par rapport aux fonctions de production et de transfert et au contexte afin de juger des possibilités de l'ordre des constructions qui seront aussi nombreuses qu'il y a d'environnements différents.

11.2.3. LE CURAGE DE BIEFS : UNE INTERVENTION QUI POSE QUESTION

Les travaux de curage de biefs ont été et sont encore largement utilisés dans les creeks néo-calédoniens. Cependant, l'efficacité et la pertinence de ce type d'intervention sont remises en cause de plus en plus souvent et dans de nombreuses situations.

Sur les plans physique et sédimentaire, le curage permet une augmentation de la section ainsi que le maintien du niveau du lit à un niveau défini : les écoulements sont ainsi moins aptes à déborder du lit du cours d'eau. Un bief curé joue également un rôle de zone de régulation du transport solide. Le curage permet de retrouver de l'espace facilitant le dépôt de sédiments grossiers. Ainsi, il permet de maîtriser une zone où le dépôt s'effectue de manière « naturelle »

D'un point de vue écologique, le curage est en revanche très impactant car il détruit la plupart des écosystèmes pour créer un environnement unique et uniforme qui est défavorable à la vie animale et végétale dans les creeks. Les questions soulevées par le stockage des matériaux curés sont également problématiques. Les quantités de sédiments retirés du lit sont souvent impressionnantes et il est souvent difficile de trouver un espace où les stocker à proximité. Les remonter sur mine pour les mettre en verse, conformément à la façon dont sont aujourd'hui gérés les résidus miniers, est une solution quelquefois adoptée, qui ne paraît pas complètement absurde, mais génère bien entendu des coûts supplémentaires.

L'efficacité des curages est aussi toute relative car les crues impressionnantes néo-calédoniennes sont capables, parfois en un seul événement, de transporter et déposer les mêmes volumes de matériaux que les volumes curés (cf. impact du cyclone Cook d'avril

2017 sur la Nakale). Tout est alors à recommencer, impliquant de réserver des budgets souvent annuels aux travaux de curage. Il serait donc préférable d'imaginer une stratégie de remédiation davantage pérenne, sur le long terme, plutôt qu'un curage qui ne reste efficace qu'en cas de crue modeste.

Dans les années 70 en métropole, le curage non contrôlé de grands fleuves ou de plus petites rivières a mis en évidence l'impact que celui-ci pouvait avoir notamment à l'amont, parfois à plusieurs dizaines de kilomètres, avec des déchaussements de piles de ponts, des effondrements de berges, dus à une érosion/incision régressive du lit entraînée par l'abaissement local du niveau du lit causé résultant du curage. Il est donc primordial d'évaluer les conséquences que peut apporter une intervention de curage sur un cours d'eau, pour éviter de juste déplacer le problème.

Cependant, dans une dimension politique et sociale, les curages sont des travaux relativement simples dans le contexte néo-calédonien, et qui peuvent présenter un intérêt sur de tout autres registres. Régulièrement réclamée par les habitants, la réalisation de ces travaux a le mérite d'être immédiatement visible et donc plutôt perçue comme rassurante par les populations. Ce sont donc des travaux qui globalement contentent l'ensemble des parties et soutiennent également parfois de petites entreprises locales.

Cette intervention, connue par la population pour son efficacité immédiate et sa logique inhérente, semble primer en termes d'acceptation sur les autres types d'intervention pourtant plus efficaces sur le long terme (cette même contradiction peut se retrouve lorsqu'il s'agit de construire des murs de protection en bord de mer pour lutter contre l'érosion - Worliczek 2013).

11.2.4. DEFAUTS ET PATHOLOGIES CONSTATES

À partir du retour d'expérience réalisé en Nouvelle-Calédonie, nous disposons de trop peu d'informations quantitatives à ce jour. Ainsi, l'ensemble des hypothèses de dimensionnement ne nous étant pas connu, notre analyse est limitée à un plan fonctionnel pour le moment.

11.2.4.1. Mobilité des enrochements

Une majeure partie des pathologies observées lors des visites concerne les mouvements non désirés de blocs, que ce soit sur des digues, des seuils, des épis ou encore des chenalisations. Le déplacement d'un enrochement peut entraîner par mobilisations successives des blocs la ruine totale de ce genre d'ouvrages. Ainsi, il est primordial d'observer la plus grande attention lors des calculs de dimensionnement (Recking et Pitlick, 2013) et lors de la pose des enrochements (Vinai, 2009).

Le problème de mobilité des enrochements est apparu à plusieurs reprises sur les crêtes de digues. Ces ouvrages paraissaient ne présenter aucun défaut visible et pourtant sur leur crête des traces de déplacements de blocs sont observables. Le dimensionnement de ces blocs pouvait éventuellement en être la cause, lors d'une crue responsable d'un haut niveau des eaux parfois allant jusqu'à la submersion de la digue. De la même manière, la pente aval des digues était en général libre de tout enrochement, ce qui ne protège absolument pas l'ouvrage en cas de submersion et peut entrainer sa rupture brutale.

11.2.4.2. Étanchéité et hydraulique souterraine

L'étanchéité des bassins de décantation est essentielle afin de maîtriser les zones où s'effectuent les écoulements et la stabilité des levées qui les délimitent ou de prévenir les risque d'érosion interne (« renard hydraulique »). La plus grande rigueur lors des travaux doit être apportée à la construction des digues latérales (Mériaux et al, 2001 ; Fauchard et Mériaux, 2004) et principalement à l'élaboration de leur étanchéité. La présence d'une faille géologique sous le radier d'un bassin peut également être la cause d'un défaut d'étanchéité.

Pour les seuils ou barrages retenant l'eau en partie, dans des plages de dépôt par exemple, l'installation d'un voile d'étanchéité peut permettre d'éviter certains problèmes de type renardage. Des phénomènes de sous-tirage et d'affaissement au niveau d'un radier une dizaine de mètres après la digue frontale d'une plage de dépôt ont été observés. Le paramètre défavorisant ici était la présence de matériaux fins en fondation dans lesquels des cheminements hydrauliques se sont créés, allant faire bouger des enrochements par-dessous. Il est primordial de respecter les règles bien connues de mise en œuvre de couche de filtration (quelques sous couches de granulométrie progressivement plus fine – Manuel Enrochement, 2009), ainsi que la mise en œuvre d'un géotextile tissé qui permet le passage de l'eau (suppression des surpressions) mais interdit le passage des fines (prévient les érosions internes). Alternativement, la mise en œuvre de bêche en béton ou en palplanche est possible. Il s'agit alors de rallonger ces chemins et de les mener davantage en profondeur pour réduire ces risques (Woumeni, 2014). Dans le cas où les fondations ne peuvent pas atteindre le fond rocheux, l'utilisation de palplanches peut être une solution si le sol le permet (matériaux fins).

11.2.4.3. Érosion régressive ou locale

Cette pathologie concerne en premier lieu les sorties de chenalisations en enrochements. L'arrêt brutal de l'aménagement, si aucune précaution n'est prise, peut leur être fatal. Ceci peut être la double conséquence des survitesses locales et d'une incision aval. En effet, les vitesses d'écoulement sont en général assez élevées lorsque les chenalisations sont rectilignes : le passage de l'écoulement dans le bief naturel aval nécessite la dissipation de cette énergie cinétique, dissipation qui a souvent lieu au débouché de la zone chenalisée au sein d''une fosse d'affouillement. Par ailleurs, le passage des eaux dans le creek naturel peut être responsable d'une incision entrainant une érosion conséquente qui se propage vers l'aval mais aussi vers l'amont (érosion régressive), menaçant ainsi les enrochements du chenal. Celle-ci peut alors entraîner la mobilisation des blocs les plus à l'aval si leur ancrage n'est pas bien réalisé ou est insuffisant, puis ainsi remonter petit à petit et endommager l'ensemble des enrochements. Il est donc nécessaire de prévoir un calage de la partie terminale des chenalisations au travers d'une réserve de blocs enterrés qui constituent une sorte de seuil ou au travers d'une bêche en béton armé ou en palplanches.

De la même manière, au niveau d'autres aménagements, où l'eau s'écoule sur un terrain préparé (radier ou sol compacté) puis parvient à une zone où aucune précaution (ou de trop légères si le dimensionnement est insuffisant) n'a été prise, le risque d'érosion est important. Les vitesses d'écoulement sont en général un peu plus élevées que dans un creek naturel (surface plus lisse) et l'érosion qui en résulte à l'arrivée dans la zone naturelle se propage de manière régressive sur la zone aménagée. Ainsi, dans le cas d'un cassis avec franchissement de la piste par l'écoulement, le talus aval doit être équipé d'une descente d'eau, préparé aux contraintes hydrauliques, sans quoi c'est tout ou partie de la piste qui pourrait être endommagée.

11.2.4.4. Affouillement

Le phénomène d'affouillement rejoint le type de pathologie engendrée par l'érosion régressive. Il consiste à une désolidarisation des blocs par défaut d'ancrage, soit en général une érosion conséquente en leur pied. Cette pathologie survient en général lorsqu'il y a une chute d'eau, même de taille modeste. La dissipation de l'énergie hydraulique par turbulence résulte à terme en une érosion conséquente si aucune précaution n'est prise. Des blocs, quelle que soit leur taille, peuvent ainsi se retrouver « suspendus » avant d'être mobilisés et de tomber à l'aval de l'ouvrage (seuil en général).

Des dispositifs para-fouille existent et viennent en complément d'un ancrage solide (et profond) de chaque ouvrage ou aménagement concerné. Ainsi, il est fortement conseillé de prévoir à minima un radier en enrochements à l'aval d'un seuil pour que l'eau n'érode pas directement le sol.

L'ancrage des ouvrages et aménagements est un élément clé quant à leur stabilité. Il nécessaire en pied mais également en berge. L'ancrage latéral, pour les seuils par exemple, est tout aussi important car il permet d'éviter le contournement de l'ouvrage par les eaux : origine principale de la ruine de ces ouvrages, avec l'affouillement de pied. Si ce contournement latéral a lieu, en plus d'un risque de destruction de l'ouvrage, ce dernier ne remplit plus ses fonctions. Un ancrage latéral sérieux se caractérise par une forme de cuvette adaptée, c'est-à-dire plus élevée sur les côtés permettant un centrage continue de l'écoulement et des débits minimum aux extrémités des ailes, ainsi qu'un enracinement profond et solide de l'ouvrage dans les berges.

11.3. PERSPECTIVES

La gestion des flux sédimentaires en Nouvelle-Calédonie est aujourd'hui moins développée qu'en métropole, la principale raison étant le manque d'expérience dû à l'apparition tardive des préoccupations et des solutions pour cette problématique.

La clé des stratégies de remédiation réside a priori dans la priorisation des enjeux : d'inévitables conflits d'intérêt opposent régulièrement les exploitants miniers et les populations sur le sujet de la gestion du sur-engravement des cours d'eau néo-calédoniens. Les solutions proposées par les uns ne conviennent pas aux autres et inversement. La mise en oeuvre de solutions « idéales » demanderait en général des efforts financiers que les maîtres d'ouvrage ne sont en général ni prêts, ni sans-doute en capacité de faire.

N'a pas été abordée dans le cadre de ce projet la question du recours à des dispositifs réglementaires similaires aux Plans de Prévention des Risques d'Inondation métropolitains. Au-delà des stratégies de remédiation telles qu'elles ont été approfondies dans le cadre de ce projet, reposant sur un ensemble d'ouvrages, d'intervention et d'aménagements, la réglementation de l'occupation du sol reste bien souvent une des meilleures options pour assurer la sécurité des populations et la protection des biens. C'est particulièrement vrai dans des lieux où des inondations importantes se succèdent régulièrement et où même techniquement il serait très délicat de construire une protection efficace par rapport aux crues de très forte intensité, a fortiori quand l'influence du sur-engravement sur l'intensité de ces crues et des dommages qu'elles provoquent est discutable.

D'un point de vue opérationnel, l'élaboration des stratégies de remédiation les plus efficaces devrait être accompagnée d'une meilleure compréhension générale de chaque bassin versant. Ainsi le développement d'outils de modélisation de leur fonctionnement hydro-

sédimentaire est une perspective intéressante. Divers modèles numériques de simulations hydro-sédimentaires pourrait servir de base à la compréhension des réactions des bassins versants néo-calédoniens face à de forts épisodes pluviométriques. Irstea dispose par exemple d'un modèle numérique d'érosion des torrents en crue (ETC) fondé sur des fonctions de production associées à des fonctions de transfert (Brochot et Meunier, 1996). Il distingue les productions sédimentaires (érosion) et hydrauliques (pluies) et les transferts sédimentaires (charriage) et hydrauliques (torrents). À partir de caractéristiques physiques directement mesurables ou de grandeurs conceptuelles estimables indirectement, le modèle calcule la réponse d'un système torrentiel face à un événement pluviométrique, en distinguant l'ensemble des biefs et sous-bassins définis au préalable. Une adaptation de ce modèle pour intégrer les composantes spécifiques aux zones minières en exploitation serait néanmoins nécessaire. Au-delà, une des difficultés classiques pour l'utilisation opérationnelle de ce genre de modélisation provient de la nécessité de pouvoir les valider à partir d'observations et de mesures *in situ*, qui restent malheureusement bien rares en Nouvelle-Calédonie.

Enfin, la connaissance des éléments qualitatifs et quantitatifs mènera ensuite à l'analyse coûts-bénéfices, que les travaux du présent rapport n'évoquent pas pour les raisons déjà évoquées de manque d'informations récoltées à ce sujet lors du retour d'expérience. Dans n'importe quel projet, la confrontation du prix des travaux et des avantages qui en sont retirés est primordiale. Les propositions de stratégies de remédiation devront également tenir compte de ces contraintes. De récents travaux sur l'analyse coûts-bénéfices dans le domaine des risques naturels et plus particulièrement du risque torrentiel ont été menés (Carladous, 2016) et sont encore en développement. Il subsiste en effet de nombreuses limites à l'application de ces méthodes d'un point de vue général et d'un point de vue plus spécifique aux phénomènes torrentiels, en lien notamment avec les problèmes de quantification identifiés précédemment. Un travail d'adaptation au contexte néo-calédonien sera en outre nécessaire, pour intégrer les bonnes estimations des coûts des mesures prises et de valeurs des pertes évitées sur les enjeux exposés / protégés.

12. REFERENCES

« Sur les traces du Passé - L'Histoire du village de Thio ». 2015. Sur les traces du passé. https://www.youtube.com/watch?v=A1eIokFD_Js.

Allenbach M., Hoibian. s. (2002) - « L'évolution géomorphologique récente du littoral à l'embouchure des rivières Thio et Dothio (Nouvelle-Calédonie) : Un exemple d'interactions anthropiques et naturelles». Actes des VIIèmes Journées nationales Génie civil-génie côtier, Anglet (France), 15-16-17 mai 2002

Ambatsian, P., Fernex, F.; Bernat, M.; Parron, C.; Lecolle, J.. (1997) - High metal inputs to closed seas: the New Caledonian Lagoon. *Journal of Geochemical Exploration*. 59, 59-74

Bastide, R. 2016. « ÉVÉNEMENT, sociologie ». Encyclopaedia Universalis.

Bensa A., Fassin E. (2002) - « Les sciences sociales face à l'événement ». *Revue d'ethnologie de l'Europe*, 38 , p.5‑20. doi:10.4000/terrain.1888.

Bird, E.C.F., Dubois, J.P., Itis, J.A.(1984) - The impacts of Opencast mining on the Rivers and Coasts of New Caledonia, 64 pp.. The United Nations University, Tokyo.

Bodin, X., Malet, E., Vernier, F., Marsy, G., Hadhri, H., Trombotto, D. (2017) - L'apport d'appareils photo reflex autonomes pour le suivi quasi-continu de la dynamique des glaciers rocheux, exemples dans les Alpes et dans les Andes. Collection EDYTEM 19, 47-53.

Borland, W.M., (1960) - Stream channel stability, United States Bureau of Reclamation, Denver.

Bravard, J.P.(1989) - La métamorphose des rivières des Alpes françaises à la fin du Moyen-Age et à l'époque Moderne. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25: 145-157.

Brocho et S., Meunier M. 1996. Un modele d'erosion destorrents en crue (ETC). Cemagref Editions, Ingenieries- EAT, 9-18

Chouraqui, M. « Thio entre colère et résignation », *Les Nouvelles calédoniennes*, 28 février 2015

CIRIA, C. CETMEF, 2009 Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manuel, P09-01, CETMEF, Compiègne

Debenay, J-P.; Fernandez, J-M. (2009) - Benthic foraminifera records of complex anthropogenic environmental changes combined with geochemical data in a tropical bay of New Caledonia (SW Pacific) *Mar. Poll. Bull.*, 59, 311-322

Dégremont M. (2008) - « Opérateur minier et gouvernance locale à Thio. Entre développement, aménagement et environnement ». Provence Aix- Marseille 1

Despinoy, M., De Boissieu, Mangeas, M., Sevin B., Chevrel, S., Maurizot P., (2012) - Etude sur CArtographie du Régolithe par Télédétection Hyperspectrale Aéroportée (CARTHA), 118 p.

Dubedout F. (2015) - « D'un conflit à l'autre », Les Nouvelles calédoniennes, 6 février 2015

Dumas P., 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. Actes du colloque « Connaissance et Compréhension des Risques Côtiers : Aléas, Enjeux, Représentations », Gestion, Brest, 2-4 juillet 2014, 269-278.

Edwards J. B. (2014) - « Phosphate mining and the relocation of the Banabans to northern Fiji in 1945: Lessons for climate change-forced displacement ». *Journal de la Société des Océanistes*, 138-139 , p.121‑36. doi:10.4000/jso.7100.

Fauchard C., Mériaux P. (2004) - Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues - Guide pour la mise en oeuvre et l'interprétation, CEMAGREF Ed. 124 pp.

Fernandez, J.M., Ouillon, S.,Chevillon, C., Douillet, P.,Fichez, R., Le Gendre, R. (2006) - A combined modelling and geochemical study of the fate of terrigeneous inputs from mixed natural and mining sources in a coral reef lagoon (New Caledonia).*Mar. Poll. Bull.*, 52, 320-331

Fontaine, F., Bel, C., Bellot, H., Piton, G., Liébault, F., Juppet, M., Royer, K., 2017. Suivi automatisé des crues à fort transport solide dans les torrents, stratégie de mesure et potentiel des données collectées. Collection EDYTEM 19, 213-219.

Garcin M. (2009) - Exploitation des granulats en lit vif en Nouvelle-Calédonie : le cas de la rivière Tontouta. Rapport BRGM/RP-57268-FR. 78 p., 56 fig

Garcin M. (2010) - Exploitation des granulats en lit vif des cours d'eau de la Grande Terre, Nouvelle-Calédonie. Rapport BRGM/RP-58531-FR. 114 p., 90 fig., 3 tabl.

Garcin M., Baills A., Le Cozannet G., Bulteau T., Auboin A-L., Sauter J.(2013) - Pluri-decadal impact of mining activities on coastline mobility of estuaries of New Caledonia (South Pacific), *Journal of Coastal Research*, 65, p. 494-499, 2013

Garcin M., Gastaldi Y., Lesimple S. (2017) – Quantification et évolution temporelle des apports miniers dans les rivières calédoniennes. BRGM/RP-66840-FR, 41 p., 23 fig., 5 tabl.

Garcin M., Lesimple S., (2013) – Identification des rivières sur-engravées de la Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) - Aptitude à l'exploitation pour granulats. Rapport BRGM/ RP- 62297-FR, p., fig

Gastaldi Y. (2016) Evaluation de l'impact des décharges minières sur le sur-engravement des cours d'eau de Nouvelle-Calédonie – Exemple du bassin de la Thio. Rapport de stage ENSG.

Gilbert, G.K. (1914) - The transportation of débris by running water. US Geological Survey Professionnal Paper, 86: 221.

Gomez, B., Banbury, K., Marden, M., Trustrum, N.A., Peacock, D.H. and Hoskin, P.J. (2003) - Gully erosion and sediment production: Te Weraroa Stream, New Zealand. *Water Resources Research*, 39(7): 1187-1194.

Hédouin, L., Bustamante, P.,Fichez, R.,Warnau, M. (2008) - The tropical brown alga Lobophoravariegata as a bioindicator of mining contamination in the New Caledonia lagoon: a field transplantation study*. Mar. Env. Res*., 66, 438-444.

Hoey, T.B. (1992) - Temporal variations in bedload transport rates and sediment storage in gravel-bed rivers. *Progress in Physical Geography*, 16(3): 319-338.

Hyndman D. (2005) - « Shifting Ecological Imaginaries in the Ok Tedi Mining Crisis in Papua New Guinea ». *Journal de la Société des Océanistes*, 120-121, p. 76‑93. doi:10.4000/jso.396.

Iltis J., Crozier M.J. (1986) - Conséquences géomorphologiques des crues cycloniques en Nouvelle-Calédonie : le cas de la rivière Népoui. Journée d'hydrologie de Strasbourg : crues et inondations, Octobre 1986.

James, L.A. (2006) - Bed waves at the basin scale: Implications for river management and restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(13): 1692-1706.

James, L.A. (2010) - Secular sediment waves, channel bed waves, and legacy sediment. *Geography Compass*, 4(6): 576-598.

Knighton, A.D. (1989) - River adjustment to changes in sediment load: the effects of tin mining on the Ringarooma River, Tasmania, 1875-1984. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 333-359.

Kowasch, M. 2012. « Le développement de l'industrie du nickel et la transformation de la valeur environnementale en Nouvelle-Calédonie ». *Journal of Political Ecology,* 19.

Lallias-Tacon, S., Liébault, F., Piégay, H. (2014) - Step by step error assessment in braided river sediment budget using airborne LiDAR data. *Geomorphology* 214, 307-323.

Lane, E.W. (1955) - The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers*, 81(745): 1-17.

Le Meur, 2012. « Conflit et arrangement. La politique du nickel à Thio ». n°07/12.

Lefort, P. (1996) - Transports solides dans le lit des cours d'eau Ecole Nationale Superieure d'Hydraulique et de Mecanique de Grenoble - Institut National Polytechnique De Grenoble, 1996, 225 p

Liébault, F. and Piégay, H. (2002) - Causes of 20th century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of Southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(4): 425-444.

Liébault, F., Gomez, B., Page, M., Marden, M., Peacock, D., Richard, D. and Trotter, C.M., (2005) - Land-use change, sediment production and channel response in upland regions. *River Research and Applications*, 21: 739-756.

Liébault, F., Lallias-Tacon, S., Cassel, M. and Talaska, N. (2013) - Long profile responses of alpine braided rivers in SE France. *River Research and Applications*, 29(10): 1253-1266.

Mackin, J.H. (1948) - Concept of the graded river. *Geological Society of America Bulletin*, 59: 463-512.

Mériaux P., Royet P., Folton C. (2001) – Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations. CEMGREF Ed., pp. 199

Metian, M., Bustamante, P., Hédouin, L., Warnau, M. (2008) - Accumulation of nine metals and one metalloid in the tropical scallop Comptopallium radula from coral reefs in New Caledonia. *Environmental Pollution*, 152, 543-552

Migon, C., Ouillon, S., Mari, X., Nicolas, E. (2007) - Geochemical and hydrodynamic constraints on the distribution of trace metal concentrations in the lagoon of Noumea, New Caledonia. *Estuarine, coastal and Shelf Science*, 74, 756-765

Montgomery, D.R. and Buffington, J.M. (1997) - Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109: 596-611.

Montgomery, D.R. and Buffington, J.M. (1998) -. Channel processes, classification, and response. In: R. Naiman and R. Bilby (Editors), *River Ecology and Management*. Springer-Verlag, New-York, pp. 13-42.

Moreau, L. (2017) - Time lapse: rendre visible l'invisible, premiers développements et applications au suivi des glaciers. Collection EDYTEM 19, 87-94.

Nanau GL. (2014) - « Local experiences with mining royalties, company and the state in the Solomon Islands ». *Journal de la Société des Océanistes*, 138-139, p. 77‑92. doi:10.4000/jso.7089.

Piégay, H., Walling, D.E., Landon, N., He, Q., Liébault, F. and Petiot, R. (2004) - Contemporary changes in sediment yield in an alpine montane basin due to afforestation (the Upper-Drôme in France). *Catena*, 55(2): 183-212.) –

Piton, G., Recking A. (2016) - Design of sediment traps with open check dams. I: hydraulic and deposition processes *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142, 1-23

Piton, G., Berthet, J., Bel, C., Fontaine, F., Bellot, H., Malet, E., Astrade, L., Liébault, F., Recking, A., Juppet, M., Royer, K. (2017) - Dynamique géomorphologique des torrents: intérêt de l'emploi des appareils photographiques automatiques. Collection EDYTEM 19, 205-212.

Roux C, Alber A, Bertrand M, Vaudor L, Piégay H. (2015) “FluvialCorridor”: A new ArcGIS toolbox package for multiscale riverscape exploration. *Geomorphology*, 242, p. 29-37, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.018.

Ruddle K., Johannes R. E. (1985) - The Traditional knowledge and management of coastal systems in Asia and the Pacific. Unesco-ROSTSEA regional seminar 5-9 December, 1983. Jakarta, Indonesia. UNESCO Ed.

Schumm, S.A. (1971) - Fluvial Geomorphology: Channel adjustment and river metamorphosis. In: H.W. Shen (Editor), River Mechanics, Fort Collins, Colorado, pp. 5.1-5.22.

Surell, A. (1841). Etude sur les Torrents des Hautes-Alpes. Dunod, Paris, 280 pp.

Theule, J.I., Liébault, F., Loye, A., Laigle, D., Jaboyedoff, M. (2012) - Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Science* 12, 731-749

Vázquez-Tarrío, D., Borgniet, L., Liébault, F., Recking, A. (2017) - Using UAS optical imagery and SfM photogrammetry to characterize the surface grain size of gravel bars in a braided river (Vénéon River, French Alps). *Geomorphology* 285, 94-105.

Worliczek, E. 2013. « La vision de l’espace littoral sur l’île Wallis et l’atoll Rangiroa dans le contexte du changement climatique. Une analyse anthropologique de la perception des populations locales. » http://www.academia.edu/3805087/

Woumeni, 2014

CNRT "Nickel et son environnement"