GUIDE méthodologique

Gestion du Passif de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie

2018



CNRT NICKEL & son environnement

GUIDE METHODOLOGIQUE 2018

Gestion du passif de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie

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

Janvier 2019

« GESTION DU PASSIF »

Guide méthodologique

Septembre 2018

Ouvrage collectif coordonné par Didier RICHARD (Irstea - UR ETNA) et Manuel GARCIN (BRGM-DRP)

AUTEURS :

Didier RICHARD (Irstea)
Manuel GARCIN (BRGM)
Frédéric LIEBAULT (Irstea)
Alain RECKING (Irstea)
Guillaume PITON (Irstea)
Catherine SABINOT (IRD)
A-Tena PIDJO (IRD)
Elisabeth WORLICZEK (E.W.)
Stéphane LESIMPLE (DIMENC/SGNC)
Mélanie BERTRAND (Irstea)
Yann GASTALDI (BRGM)
Tom BURLAT (Irstea)
Lucie GOSSET (IRD)
Nicolas GOSSELIN (Irstea)

RÉVISION 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**
V2	15/01/2019	D. RICHARD (Irstea) M. GARCIN (BRGM) et coll.	Chercheurs, membres de l'équipe scientifique du projet Gestion du passif	F. BAILLY

CITATION DU DOCUMENT

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

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

Richard D., Garcin M., Liébault F., Recking A., Piton G., Sabinot C., Worliczek E., Lesimple S., Bertrand M., Gastaldi Y., Burlat T., Gosset L., Pidjo A., Gosselin N. (2017) – Gestion du passif minier – Guide méthodologique. CNRT « *Nickel & son environnement* ». 79 pages, 20 fig., 15 Tab.

SOMMAIRE

1. PRÉAMBULE 9

2. SYNTHÈSE 10

3. RAPPEL DU CONTEXTE ET DE LA PROBLÉMATIQUE 11

3.1. L'histoire du Nickel et la problématique de l'engravement 11

3.2. Impacts sur les populations et les enjeux 12

3.3. Définitions 12

3.3.1. Surengravement 13

3.3.2. Creeks, torrents et autres rivières 16

4. DÉMARCHE GLOBALE D'ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE REMÉDIATION 18

4.1. Une remédiation à quoi, pour quoi ? 18

4.2. Elaboration d'une stratégie de remédiation 20

4.2.1. Une démarche globale intégratrice 20

4.2.2. Évaluation de l'efficacité des stratégies de remédiation 22

5. DIAGNOSTIC 24

5.1. Identification et caractérisation des enjeux sociaux et culturels 24

5.1.1. Méthode 24

5.1.2. Les différents indicateurs 29

5.2. Diagnostic de l'état de surengravement du système. 34

5.2.1. La bande active comme indicateur des apports miniers 34

5.2.2. Méthode 34

5.2.3. Résultats 35

5.3. Caractérisation de la dynamique passée du surengravement 38

5.3.1. Objectif 38

5.3.2. Méthode 38

5.3.3. Evolution de la largeur de bande active de chaque segment d'une même rivière 38

5.3.4. Evolution temporelle du volume des décharges minières dans le bassin versant et par sous-bassins 39

5.3.5. Analyse croisée 43

6. ELABORATION DE STRATÉGIES DE REMÉDIATION 45

6.1. Quels ouvrages pour quelles fonctions ? 45

6.1.1. Quels processus hydro-sédimentaires peut-on essayer d'influencer ? 45

6.1.2. Quels sont les techniques qui sont susceptibles d'être mobilisées ? 46

6.1.3. Quelles fonctions remplissent ces différents O/A/I ? 50

6.2. Quelles perceptions en ont les populations, les élus ? 58

6.2.1. Perception de la problématique d'engravement par les élus 59

6.2.2. Une gestion complexe source de malentendus 60

6.3. Elaboration d'un projet de remédiation 63

6.3.1. Démarche 63

6.3.2. Points d'attention 65
7. CONCLUSION 68
8. RÉFÉRENCES 69
8.1. références citées dans le rapport 69
8.2. Autres références utiles 71
8.2.1. Documents techniques 71
8.2.2. Rapports 72
8.2.3. sites Web : 72
ANNEXE 1 73
Défauts et pathologies constatés 73
Mobilité des enrochements 73
Étanchéité et hydraulique souterraine 73
Érosion régressive ou locale 74
Affouillement 74
ANNEXE 2 75
Une methode d'estimation des volumes de sediments transportés 75

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : ***Courbes annuelle (rouge) et cumulée (violet) des stériles miniers produits de 1904 à 2002 pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie*** *(données DIMENC/SMC)* 12
Figure 2 : ***En haut à gauche : « Caillou de la mine » ; à droite : « Caillou de rivière » (au centre de l'image)*** *(Gosset, 2017)* ***; Au milieu à gauche dépôt de boue dans un champ à St-Pierre ; à droite boue associée par la population à la pollution minière dans un champ près de la Thio En bas « caillasse » près de la rivière de Nembrou*** *(Pidjo, 2017)* 14
Figure 3 : ***Transport solide par charriage et suspension*** *(adapté de Naaim-Bouvet, Richard, 2015 ; © Graphies)* 15
Figure 4 : ***Démarche globale d'élaboration d'une stratégie de remédiation au surengravement prenant en compte les contextes et contraintes socio-anthropologiques et physiques*** 21
Figure 5 : ***Graphe de présentation de la démarche d'évaluation de l'efficacité d'une stratégie de remédiation*** *(traduit et adapté de Carladous et al. 2017)* 23
Figure 6 : ***Les différentes étapes d'une étude du contexte socio-environnemental*** 28
Figure 7 : ***Cartographie de groupe permettant de restituer le sens d'écoulement de l'eau durant les inondations de 2016 à Saint-Michel*** *(Rouet)* 30
Figure 8 : ***Largeur de bande active en fonction de la surface drainée*** *(adapté de Bertrand et Liébault, 2018)* 35
Figure 9 : ***Résidus des sites impactés au modèle statistique dit « naturel » (Wa*), expliqués par la proportion des sources sédimentaires minières majeures (SSW)*** *(adapté de Bertrand et Liébault, 2018)* 36
Figure 10 : ***Spatialisation de l'indicateur de surengravement - Résidus au modèle naturel*** *Exemple du bassin versant de la Thio* 37
Figure 11 : ***Évolution de la largeur de bande active de la Tomuru, affluent de rive gauche de la Thio, entre 1943 et 2015*** *(adapté de Drain, 2016)* 39
Figure 12 : ***Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volumes de stérile minier mis en décharge*** 41
Figure 13 : ***Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau*** 42
Figure 14 : ***Représentation des volumes et tonnages de stériles produits (exemple du bassin versant de la Thio)*** 43
Figure 15 : ***Liens entre l'apport de stériles en décharge et l'évolution de la bande active*** *(exemple du Creek Tomuru)* 44
Figure 16 : ***Processus de formation des crues avec transport solide*** *(d'après Brochot)* 45
Figure 17 : ***Proposition de décomposition particulière des bassins versants miniers néocalédoniens*** 46
Figure 18 : ***Fonctions des barrages de correction torrentielle*** *(Piton, 2016)* 55
Figure 19 : ***Schéma d'une plage de dépôt type*** *(source Piton et Recking, 2016a)* 56
Figure 20 : ***Logigramme d'aide à la décision pour l'élaboration de projets de remédiation*** *(d'après Burlat, 2017)* 64

LISTE DES TABLEAUX

*Tableau 1 : **Classification des types de cours d'eau** (d'après Surell, 1841, limites basses reprises de Lefort 1996)* *16*
*Tableau 2 : **Exemple de questionnaire permettant de préciser le contexte et les enjeux spécifiques à chaque tribu*** *25*
*Tableau 3 : **Exemple de questionnaire descriptif permettant de préciser les impacts des engravements et des inondations*** *25*
*Tableau 4 : **Exemple de questionnaire de caractérisation des déplacements des tribus*** *26*
*Tableau 5 : **Types d'impact touchant les activités de pêche et d'horticulture*** *26*
*Tableau 6 : **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*** *36*
*Tableau 7 : **Localisations privilégiées des différents processus de formation des crues*** *48*
*Tableau 8 : **Mesures mobilisables sur mine*** *50*
*Tableau 9 : **Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Pistes-fossés-décanteurs »*** *51*
*Tableau 10: **Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Décharges »*** *52*
*Tableau 11: **Fonctions des mesures mobilisables sur mine – compartiment « Versants »*** *52*
*Tableau 12: **Mesures mobilisables sur les cours d'eau*** *53*
*Tableau 13: **Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Versants »*** *54*
*Tableau 14: **Fonctions des mesures mobilisables sur les cours d'eau – compartiment « Biefs »*** *57*
*Tableau 15: **Les types d'ouvrages, leur perception par la population et leurs caractéristiques*** *62*

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

CNRT	Centre National de Recherche Technologique
BRGM	Bureau de Recherche Géologique et Minière
IRSTEA	Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IRD	Institut de Recherche et Développement
EW	Elisabeth Worliczek Consultant
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 des Infrastructures, de la Topographie et des Transport Terrestres de Nouvelle-Calédonie
SGNC	Service de la Géologie de Nouvelle Calédonie (DIMENC)
SMC	Service Mines et Carrières (DIMENC)

1. PRÉAMBULE

Le guide méthodologique « **Gestion du passif de l'activité minière en Nouvelle-Calédonie** » est produit dans le cadre du programme éponyme financé par le CNRT « Nickel et son environnement » de 2015 à 2018.

Ce programme s'insère dans un ensemble de deux projets sur le 'Transport solide dans les bassins versants miniers' composé de :

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

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

Cet ensemble de projets traite des causes et des mécanismes de mobilisation des matériaux et propose des mesures de remédiation aux engravements anciens ou plus récents des rivières calédoniennes.

Le champ d'application de ce guide méthodologique **« GESTION DU PASSIF DE L'ACTIVITÉ MINIÈRE EN NOUVELLE-CALÉDONIE »** 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.

2. SYNTHÈSE

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 surengravement a pour conséquence, entre autres, un exhaussement 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 les pratiques et activités coutumières.

Le présent guide méthodologique, produit à l'issue du projet « Gestion du Passif minier » financé par le CNRT, vise à aider la mise en place de remédiations au phénomène de surengravement qui soient adaptées 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 mobilisant 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, au moins pour les cours d'eau où cela s'avère possible, un état des cours d'eau pas forcément identique à un état antérieur réputé « initial », mais qui puisse être jugé comme « satisfaisant ». À défaut, il s'agit d'identifier quelles sont les remédiations qui permettent de limiter les conséquences négatives sur les lieux d'importance pour la population (habitat, cultures, lieux à valeur symbolique forte, etc.).

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 induites par la problématique du surengravement : 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. 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. Une démarche globale de remédiation est proposée, qui présente les différentes étapes nécessaires au choix du/ des dispositifs.

Ce guide synthétique s'appuie sur les résultats du projet « Gestion du passif minier » détaillés dans le rapport scientifique du projet. Ce guide s'adresse donc plus spécifiquement aux Maîtres d'Ouvrage de projets de gestion du passif de l'activité minière, à qui il propose une méthode globale et des repères pour la mise en œuvre d'une telle approche. Les Maîtres d'Œuvre et bureaux d'études impliqués dans ces projets devront en compléter la lecture en tant que de besoin par celle du rapport scientifique du projet « Gestion du passif minier », et d'autres documents et guides techniques spécialisés existants et référencés dans ce guide.

3. RAPPEL DU CONTEXTE ET DE LA PROBLÉMATIQUE

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

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.

Initialement, l'exploitation de garniérite puis de minerai de nickel a été réalisée manuellement avec un minerai à forte teneur directement sur site. Elle générait peu de stérile et son impact était localisé et limité aux zones d'exploitation. À partir de 1946, la mécanisation a permis 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[1] d'extraction ne cessera d'augmenter par la réduction des coûts d'exploitation entraînant une augmentation des quantités de stériles produits. En l'absence de règlementation environnementale, le « stérile » minier est alors déversé directement sur les versants en contrebas des mines (Figure 1). 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 verse. 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.

[1] Le ratio correspond au rapport de volume de stérile à extraire pour produire un volume de minerai.

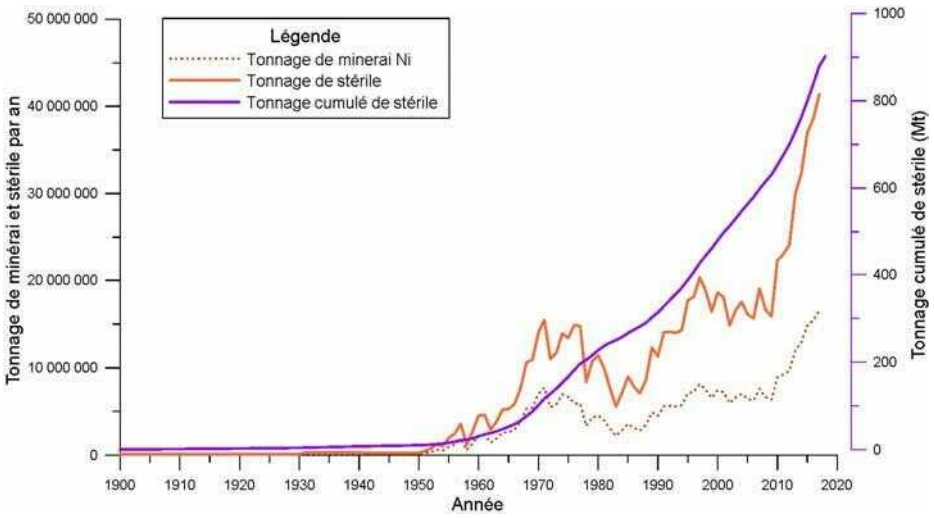


Figure 1 : **Courbes annuelle (rouge) et cumulée (violet) des stériles miniers produits de 1904 à 2017 pour l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie**
(données DIMENC/SMC)

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 et qu'une hypersédimentation en fines est constatée au niveau de certains estuaires (e.g. Bird et al. 1984 ; 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. Dans le détail le surengravement des rivières et des creeks calédoniens est varié et est influencé par un certain nombre de paramètres qui contrôlent son intensité et ses caractéristiques (Garcin 2009, 2010, Garcin & Lesimple 2013, Garcin et al. 2016).

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, les entretiens menés ont permis de comprendre que si ces deux phénomènes sont distingués dans leur processus, l'inquiétude principale formulée par les 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).

3.3. DÉFINITIONS

Il n'est pas inintéressant, et certainement pas inutile, de s'arrêter un instant sur la façon dont les scientifiques et techniciens définissent certains concepts et certaines notions, en regard de la façon dont les habitants désignent ces mêmes notions ou concepts.

3.3.1. SURENGRAVEMENT

Les définitions du surengravement que donnent les spécialistes d'hydromorphologie, et les termes qu'ils utilisent pour en parler, ne sont pas les mêmes que ceux donnés par les habitants. Ces derniers les définissent très logiquement d'abord au travers des désagréments qu'ils lui attribuent. Mais même si les mots sont différents, il est intéressant de noter certaines correspondances évidentes tant au niveau du phénomène lui-même que pour ce qui concerne la nature des matériaux sédimentaires impliqués.

3.3.1.1. Éléments caractérisant le surengravement pour les habitants

Deux termes sont principalement employés par la population de la commune de Thio pour définir le surengravement. Sont distinguées la « *boue* » et la « *caillasse* » (Figure 2), les deux étant associées aux rejets de l'activité minière mécanisée.

- *Caillasse* - Le terme « *caillasse »* correspond *grosso modo* à la définition scientifique de ce que constitue le surengravement. Il s'agit d'accumulation de pierres, de « petits cailloux cassés ». La caillasse peut se déposer près de la rivière, près des habitations et dans les *creek*.
- *Boue* - La boue est constituée de fines particules, « plus fines que la caillasse » : il s'agit pour les habitants de « la terre apportée avec l'eau » qui se dépose dans les champs et dans les maisons et qui est transportée dans la rivière. Le terme de boue est utilisé à la fois pour évoquer le mélange d'eau et de sédiments fins et pour parler de la couche sèche de fines particules qui se dépose lorsque l'eau se retire. La boue est collante lorsqu'elle se dépose dans les champs et les maisons et il est difficile de la retirer « pour retrouver la bonne terre ».

  La couleur de la boue varie en fonction des éléments qu'elle contient. Les habitants distinguent la « boue rouge couleur nickel » de celle « couleur marron ». Selon nos interlocuteurs, la couleur nickel ou rouge-rouille informe qu'elle provient d'activités minières, de terrains miniers et c'est elle qui est particulièrement associée à la « pollution » (Gosset 2016).

Même si ce sont principalement ces deux termes qui sont cités par les habitants pour parler de l'engravement, ceux-ci emploient également celui de *caillou*, qu'il est important de définir :

- *Cailloux* – les cailloux constituent des pierres de taille assez volumineuse (environ 20 centimètres de diamètre). Les habitants distinguent les cailloux de la mine de ceux de la rivière (Gosset 2016).

Le surengravement est donc selon les habitants de Thio une accumulation inhabituelle et conséquente de caillasse et/ou de boue.



Figure 2 : **En haut à gauche : « Caillou de la mine » ; à droite : « Caillou de rivière » (au centre de l'image)**
(Gosset, 2017) **;**
Au milieu à gauche dépôt de boue dans un champ à St-Pierre ; à droite boue associée par la population à la pollution minière dans un champ près de la Thio
En bas « caillasse » près de la rivière de Nembrou
(Pidjo, 2017)

3.3.1.2. Le surengravement et ses caractéristiques hydromorphologiques

Une des caractéristiques des systèmes alluvionnaires calédoniens est donc la présence, dans un certain nombre de cas, d'anciennes décharges minières dans les bassins versants. Ces anciennes décharges ont largement contribué, et contribuent encore, à alimenter en charge solide les rivières, au point que certains cours d'eau, considérablement engravés sont qualifiés de rivières « surengravées ». En s'inspirant de Garcin M. et Lesimple S. (2013), une rivière surengravée peut ainsi être définie comme une rivière subissant ou ayant subi des apports solides grossiers largement supérieurs à sa capacité de transport, induisant des changements morphologiques marqués sur un linéaire significatif du lit, i.e. un exhaussement et un élargissement.

La granulométrie des dépôts de surengravement varie généralement de celle des galets voire de blocs pour les éléments les plus grossiers (correspondant plus ou moins aux *cailloux*) jusqu'aux sables pour les plus fins (correspondant plus ou moins à la *caillasse*), en fonction de la distance à la zone de production de matériaux.

3.3.1.3. Modes de transport sédimentaire

Les désordres inhérents au surengravement dont sont victimes les populations sont les conséquences des deux principaux modes de transport sédimentaire, qui résultent de processus physiques distincts et qui mobilisent différentes tailles de sédiments.

Les particules les plus fines, suffisamment légères, peuvent être transportées en **suspension** sur de longues distances sans contact avec le lit du cours d'eau.

Les matériaux plus grossiers, plus lourds, sont quant à eux transportés par **charriage**, c'est-à-dire en roulant ou en glissant sur le fond du cours d'eau, ou par une succession de petits sauts, appelée saltation, au cours de laquelle les particules se séparent du fond du lit durant de très courtes périodes (Figure 3).

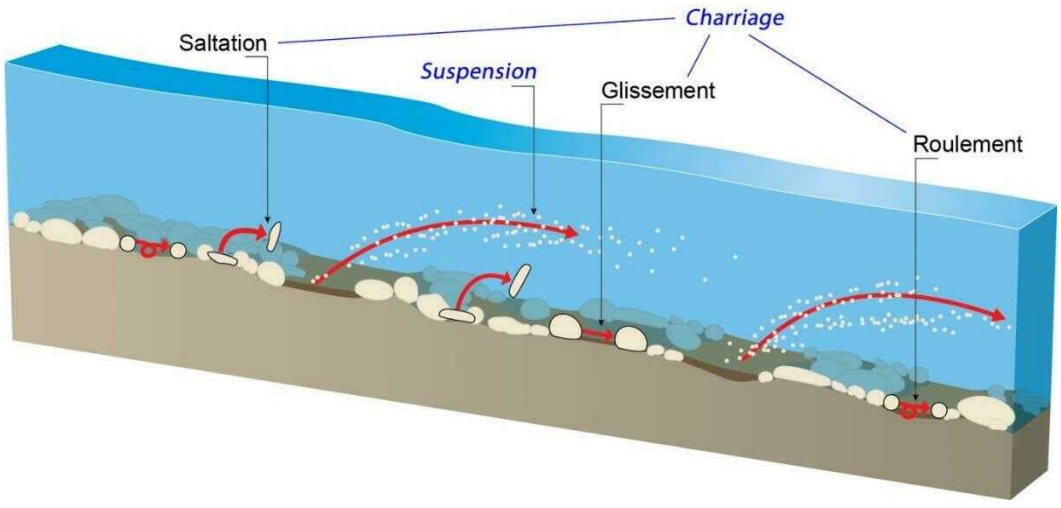


Figure 3 : **Transport solide par charriage et suspension**
(adapté de Naaim-Bouvet, Richard, 2015 ; © Graphies)

Un troisième type d'écoulement, appelé **laves torrentielles**, ne se rencontre que sur des torrents à fortes pentes, et n'est donc pas directement impliqué dans les mécanismes de surengravement, si ce n'est qu'il contribue à la fourniture de sédiments dans les parties amont des cours d'eau.

3.3.2. CREEKS, TORRENTS ET AUTRES RIVIÈRES

Les spécialistes de transport sédimentaire de métropole vont parler de rivières, torrents et rivières torrentielles, pendant que les néo-calédoniens parleront de creeks, de rivières et éventuellement de fleuves. Ici les critères de classification ne font pas appel au même référentiel et il n'est donc pas possible d'établir une correspondance entre ces termes deux à deux.

3.3.2.1. Classification hydraulique des cours d'eau à forte pente

Du point de vue hydraulique, 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.

Tableau 1 : **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 hyperconcentré[2].

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 pente de 1 % mais convenait que cette limite était plus difficile à caractériser que celle entre torrent et rivière torrentielle. Des crues récentes ont parfaitement montré que certaines rivières de pente légèrement inférieure à 1 % engendraient de très fortes érosions et présentaient une activité morphogène impressionnante.

[2] *i.e. à des concentrations telles que les lois de l'hydraulique classique (relations hauteur-débit notamment) sont mises en défaut.*

3.3.2.1. Classification des cours d'eau par les habitants

Les termes utilisés par les habitants, en tout cas dans le bassin de la 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.

- *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 par exemple de nombreux creek dans la commune de Thio et chaque tribu est généralement parcourue par plusieurs d'entre eux. Ce terme traduit l'influence culturelle anglo-saxonne, puisque par exemple en Amérique du Nord, il est employé pour désigner les petits ruisseaux.
- *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. Pour illustration, les rivières évoquées par les habitants de Thio sont celles de la Thio elle-même - appelée communément « la grande rivière »- celles de Nembrou (*Xwâ Nèbürü*) et de Nakalé (*Xwâ Nakaré*).
- *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[3] et d'autres vont distinguer un fleuve d'une rivière par la distance entre les deux berges.

[3] *Le Diahot qui est effectivement un fleuve, le plus long de la Nouvelle-Calédonie et rejoint le lagon au niveau de Pam, au Nord-Est de la Grande Terre*

4. DÉMARCHE GLOBALE D'ÉLABORATION D'UNE STRATÉGIE DE REMÉDIATION

4.1. UNE REMÉDIATION À QUOI, POUR QUOI ?

L'adéquation et l'efficacité d'une stratégie de remédiation ne peuvent s'évaluer qu'en comparant les performances des mesures envisagées par cette stratégie avec les objectifs qui 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 qu'était 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, mais qui puisse être jugé acceptable par l'ensemble des parties-prenantes (politiques, populations, organismes en charge de l'environnement, etc…).

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>Biens et personnes</u>*
>
> *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.*
>
> *<u>Prises d'eau potable</u>*
>
> *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 mais pas nécessairement en zones non impactées par l'activité minière ou plus généralement en zones de versants érodés. L'engravement peut alors être responsable d'un débit d'étiage nul sur certaines périodes rendant le captage inutilisable, de distribution d'eaux « rouges » aux robinets voire du transfert de polluants dans le réseau d'eau potable.*
>
> *<u>Transport de polluants</u>*
>
> *En plus de l'engravement des creeks, l'activité minière entraîne le relargage de polluants, en grande partie des métaux lourds (cobalt, chrome), ou des minéraux amiantifères dans l'air et*

l'eau. Les cours d'eau deviennent ainsi une voie de transfert efficace et les sédiments transportés un vecteur potentiel.

<u>Cultures et coutumes</u>

Les pratiques et activités coutumières des tribus riveraines des creeks et rivières, et les lieux, sites et terres qui leur sont associés sont également parmi les enjeux à prendre en considération. Certains lieux ont déjà disparu et d'autres ont été tellement transformés qu'ils ne permettent plus le déroulement des pratiques habituelles.

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

L'engravement des creeks et des rivières se traduit par une présence excessive de sédiments dans leur lit. Cela est responsable de la disparition d'habitats aquatiques 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 ce délai.

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 sur les berges.

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

Sur la base de l'identification des enjeux et de l'analyse des perturbations qui touchent ou menacent le secteur d'étude, des objectifs devront être définis et formulés en termes 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 leur efficacité puisse être analysée.

4.2. ELABORATION D'UNE STRATÉGIE DE REMÉDIATION

4.2.1. UNE DÉMARCHE GLOBALE INTÉGRATRICE

Les démarches et méthodes de remédiation généralement mises en œuvre dans le contexte minier se focalisent souvent sur les solutions techniques d'intervention sur le milieu physique. En cela elles ne sont pas adaptées à la problématique de l'engravement des cours d'eau néocalédoniens car elles ne prennent en compte ni les attentes et demandes sociétales ni le contexte coutumier. Les travaux réalisés dans le projet Gestion du Passif ont montré que la non prise en compte des contraintes socio-anthropologiques lors des actions de remédiation pouvait conduire à une inadaptation des dites remédiations aux attentes des populations, à des tensions entre les différentes parties intéressées et voire à une impossibilité de leur mise en œuvre.

La démarche que nous proposons (Figure 4) implique, à tous les niveaux de l'avancement et de la réflexion, les acteurs et parties intéressés, afin de garantir une meilleure adéquation entre les mesures techniques envisagées et les attentes et contraintes d'ordre sociétal, en 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.

Les techniciens en charge de la mise en œuvre de la remédiation (BE, etc.) doivent impliquer deux groupes d'acteurs qui interviendront dans les différentes phases de l'application. Le premier groupe comprend les habitants, les collectifs, les coutumiers et les élus, 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 4) :

- Étape 1 : Étude et caractérisation des contextes d'un point de vue social et physique,
- Étape 2 : Présentation du diagnostic et des mesures techniques avec consultation du premier groupe d'acteurs,
- Étape 3 : Tableaux synthétiques des mesures techniques envisagées prenant en compte les contraintes sociales et physiques, et les améliorations attendues,
- Étape 4 : Concertation et discussions avec le second groupe d'acteurs,
- Étape 5 : Atelier de négociation entre acteurs pour choisir le(s) dispositif(s) final(aux), incluant éventuellement des mesures alternatives ou complémentaires aux mesures techniques (réglementaires, organisationnelles, etc…).

À chaque étape, 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 nécessaire de revenir aux étapes précédentes qui n'auront probablement pas été correctement ou complètement traitées.

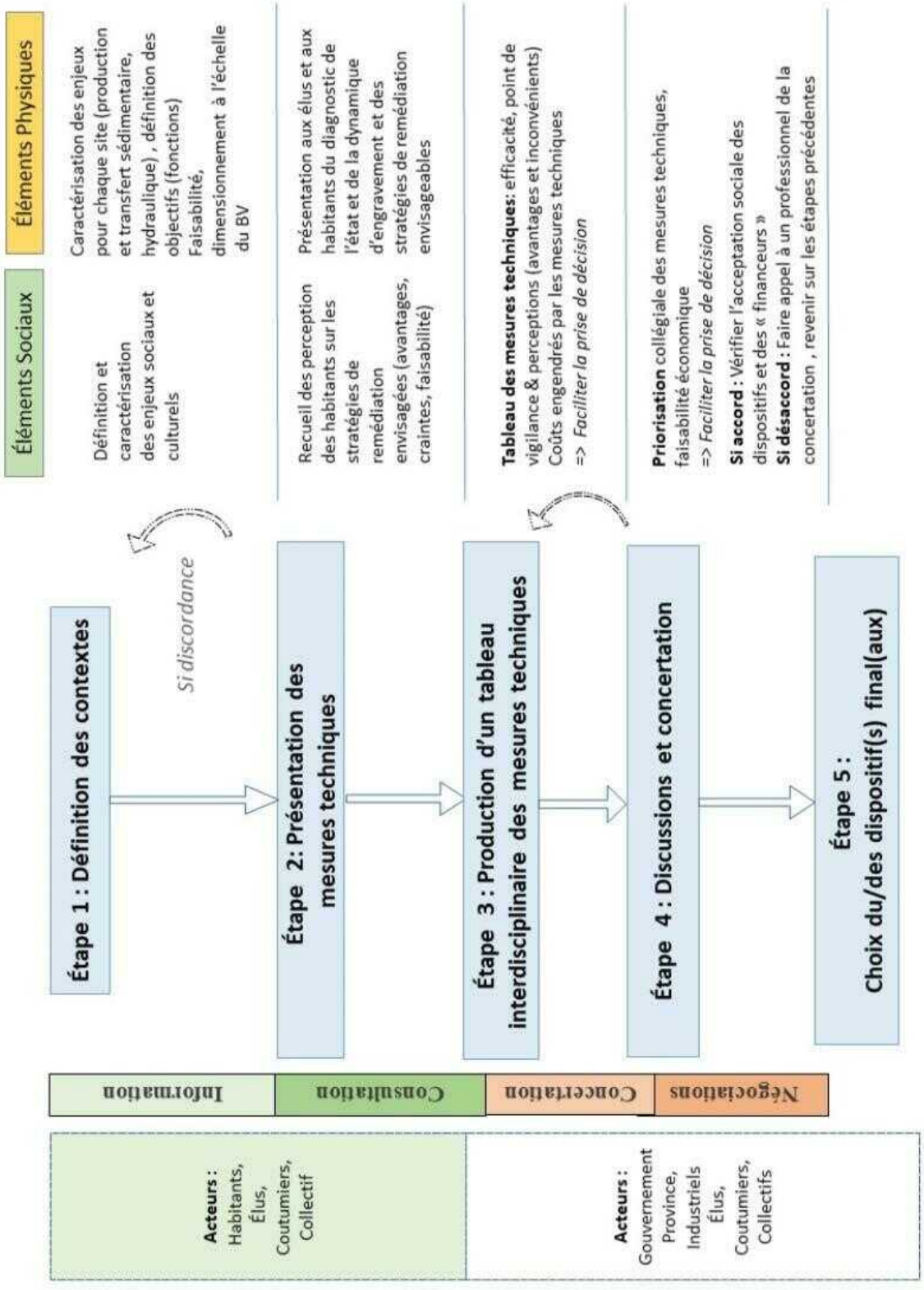


Figure 4 : **Démarche globale d'élaboration d'une stratégie de remédiation au surengravement prenant en compte les contextes et contraintes socio-anthropologiques et physiques**

4.2.2. ÉVALUATION DE L'EFFICACITÉ DES STRATÉGIES DE REMÉDIATION

Différents travaux ont abordé la question de l'évaluation de l'efficacité de diverses stratégies de remédiation ou de correction. À titre d'exemple, la Figure 5 issue des travaux de Carladous (2016) traite de l'évaluation de l'efficacité des dispositifs de correction torrentielle.

On retrouve, conformément à la démarche globale proposée plus haut, la nécessité dans un premier temps de bien décrire le contexte et identifier les enjeux, en fonction desquels des besoins d'interventions s'expriment. Ceux-ci doivent ensuite être traduits en termes d'objectifs. Le dispositif doit s'appuyer sur un ensemble de mesures (des ouvrages, des aménagements, des interventions) qui soient adaptées pour que les fonctions qu'elles assurent répondent bien à ces objectifs. Cette adaptation dépendra à la fois de la conception du dispositif et ses composants, qui devront a minima « qualitativement », remplir les fonctions nécessaires pour répondre aux objectifs. On retrouve cette logique de la démarche sur la partie gauche de la Figure 5 (entourée en bleu foncé). C'est sur le traitement de ces étapes que se focalise le présent guide.

Le dimensionnement des dispositifs devra aussi être capable d'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. Pour ces étapes relatives à l'évaluation des capacités, de la sûreté de fonctionnement, de l'efficience et de l'efficacité des dispositifs, on pourra se référer à divers documents techniques ou guides méthodologiques existants.

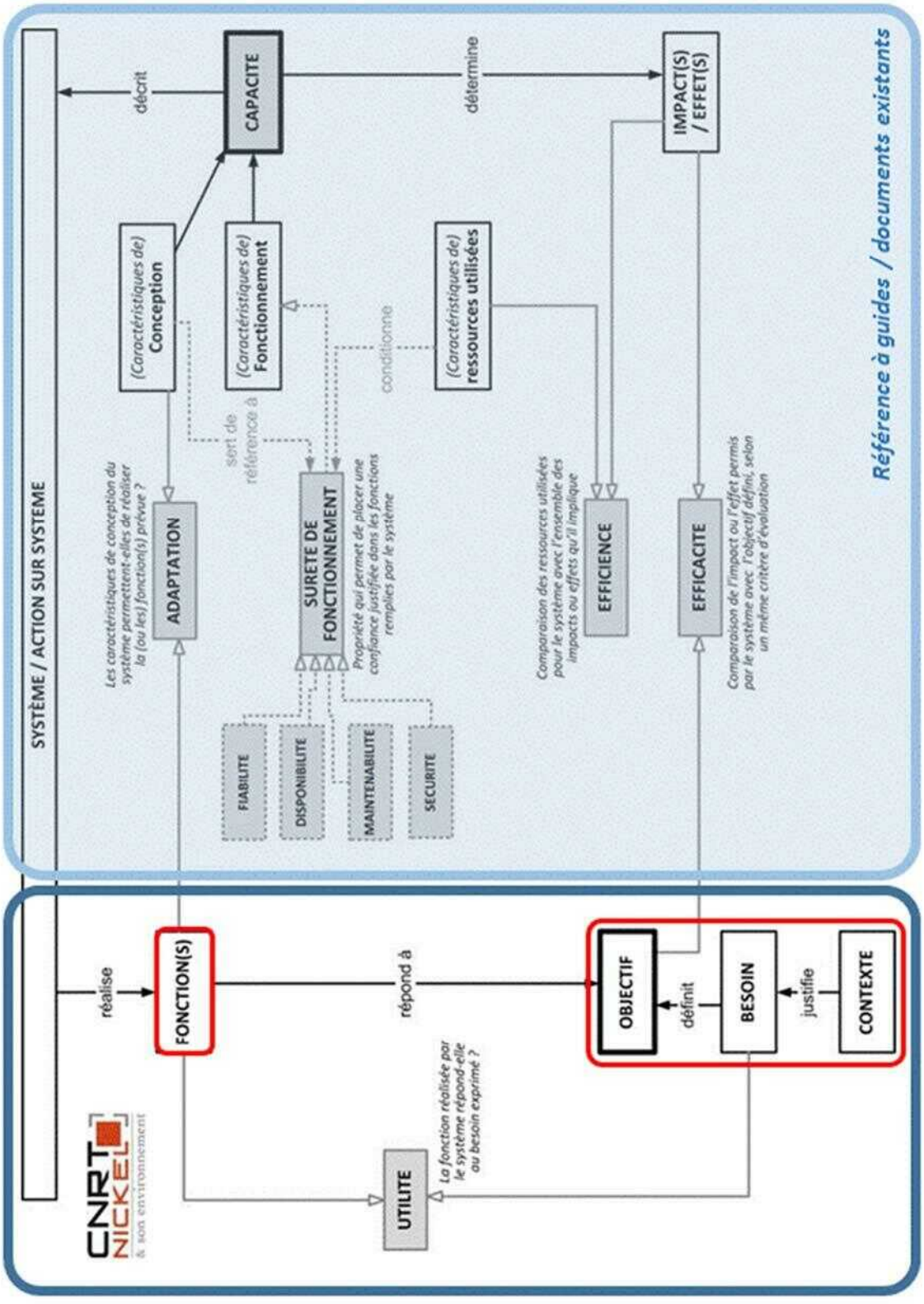


Figure 5 : **Graphe de présentation de la démarche d'évaluation de l'efficacité d'une stratégie de remédiation**
(traduit et adapté de Carladous et al. 2017)

5. DIAGNOSTIC

Les résultats des phases de diagnostic décrites ci-dessous seront bien évidemment spécifiques à chaque bassin versant, en fonction des caractéristiques éventuellement singulières des différents systèmes qui le composent :

- le système hydrographique et ses caractéristiques morphologiques,
- le système industriel de l'exploitation minière
- le système institutionnel, coutumier et socio-culturel.

Plusieurs illustrations ont été empruntées pour les développements ci-dessous au contexte de la vallée de la Thio, qu'il conviendra de ne pas généraliser trop hâtivement.

5.1. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES ENJEUX SOCIAUX ET CULTURELS

5.1.1. MÉTHODE

Les savoirs des habitants, leurs vécus ainsi que les représentations qu'ils ont de l'engravement et de ses conséquences peuvent être appréhendés par des études anthropologiques s'appuyant sur des entretiens 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 à Thio nous permet aujourd'hui de donner quelques directions et processus à mettre en place pour appréhender les éléments clefs à recenser dans une localité de Nouvelle-Calédonie pour :

- Faciliter une discussion,
- Faciliter une négociation entre les acteurs
- Aboutir à des décisions éclairées pour mettre en place des actions visant à limiter les impacts du surengravement.

Divers éléments permettent « d'objectiver » les perceptions recensées quant aux phénomènes d'engravement et d'inondation vécus par les habitants. Les tableaux présentés ci-après (Tableau 2, Tableau 3 & Tableau 4) peuvent être utilisés pour :

- Apporter des précisions sur les contextes spécifiques à chaque tribu de la zone étudiée,
- Mieux comprendre les impacts vécus par elles en lien avec la problématique d'engravement des cours d'eau
- Mieux cerner les enjeux et étapes à suivre pour conduire à un outil d'aide/appui aux « décisions éclairées ».

Les effets de l'engravement sont spécifiques à chaque tribu parce qu'ils dépendent largement de critères tels que : la morphologie du territoire, la présence de cours d'eau, l'organisation spatiale, etc.

Tableau 2 : **Exemple de questionnaire permettant de préciser le contexte et les enjeux spécifiques à chaque tribu**

Tribu :	
Contexte général Problématique d'engravement : - Influence directe de la mine *(oui/non)* - Foncier disponible *(oui/non)* - Foncier disponible inondable *(oui/non)* - Foncier disponible non inondable *(situer)*	Apport de sédiments par : *(préciser)* Décharge Rivière *Creek* Type de sédiments : - Cailloux - « Caillasse » - Boue
Le phénomène d'inondation Exposition aux risques d'inondations : *(échelle 0-1-2-3 ; 0 = aucune ; 3 = forte)* Surface inondée dans la tribu selon les habitants *(en proportion)* Origine inondation *(spécifier)* - Par la rivière *(à nommer)* - Les *creeks* - Influence de la marée Habitations inondées (oui/ non)	
Déplacements : - Distance de déplacements *(km, m)*	- Type : isolé ou collectif *(préciser)* - Lié à l'engravement *(oui/non)* - Vague de déplacement ? *(une ou plusieurs)*
Changements sur la rivière : *(préciser)* - Profondeur *(+ ou -)* - Modification du lit *(comment)*	- Débordement de l'eau *(où)*
Aménagements à proximité ou dans : - Présence *(oui/non)* - Type *(préciser)*	- Satisfaction *(oui/non)* - Crainte de l'aménagement *(oui/non)* - Attentes *(préciser quels aménagements)*

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 3 : **Exemple de questionnaire descriptif permettant de préciser les impacts des engravements et des inondations**

Quels sont les impacts majeurs liés à l'engravement du point de vue des habitants ?
Quel est l'impact de l'engravement sur le foncier habitable et cultivable disponible ? (fort / moyen / faible)
Qu'est-ce qui est le plus problématique pour les habitants avec l'engravement et le phénomène d'inondations : l'impact sur les habitations ou sur les cultures ?
Quelle est la distance de la tribu / des habitations par rapport à la rivière en temps normal ?
Les habitants sont-ils isolés et immobilisés pendant les inondations ?

La disponibilité du foncier (habitable et cultivable) est variable selon les tribus. Cependant, malgré la disponibilité du foncier pour certaines tribus, d'autres facteurs sont à prendre en compte. Par exemple, le foncier disponible cultivable non inondable peut se situer sur des

GDPL[4] relativement loin par rapport aux habitations des personnes habitant toujours près de l'emplacement traditionnel de la tribu. De plus, si ces personnes sont majoritairement des personnes âgées de plus de 60 ans, le déplacement vers ces zones de culture devient complexe. De plus, même si le foncier non inondable est accessible pour une tribu, son utilisation pour les habitations amène une reconfiguration importante de l'organisation spatiale au sein de la tribu.

Tableau 4 : **Exemple de questionnaire de caractérisation des déplacements des tribus**

En cas de déplacement nécessaire :
Les déplacements sont-ils possibles sur la zone de la tribu (habitat / cultures) ? Où ?
Les déplacements seraient-ils possibles par d'autres liens de famille extérieurs à la tribu ?
Comment les nouveaux espaces sont-ils occupés (cultures / habitations) ?

La possibilité de déplacer son habitation au sein de la tribu voire dans une tribu limitrophe ou avec laquelle la famille est liée (Tableau 4), dépend 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.

Tableau 5 : **Types d'impact touchant les activités de pêche et d'horticulture**

Impact sur les activités	
Impacts sur la pêche	**Impacts sur les cultures**
o Zones de pêche	o Fertilité des sols
o Quantité et espèces pêchées	o Qualité des produits cultivés
	o Variétés les plus impactées

Les impacts constatés (Tableau 5) peuvent être une réduction du nombre de poissons dans la rivière et dans les creeks, due à différents facteurs : engravement des creeks 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. La diminution des trous d'eau induit aussi une diminution des zones de pêche, et des habitants évoquent également de la difficulté de pêcher en plongeant.

Concernant le travail agricole, beaucoup évoquent la dureté de la couche de boue présente dans les champs et/ou de la « caillasse » et la difficulté à retravailler la terre par la suite, les habitants ayant à attendre que la boue sèche et soit plus légère pour retravailler leurs champs. Des 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.

[4] *Les Groupements de Droit Particulier Local (GDPL), créés en 1982, sont des structures juridiquement reconnues dotées de la personnalité morale, qui ont pour principal objet la rétrocession foncière en conciliant les exigences du droit civil européen et l'organisation coutumière traditionnelle.*

De moins bons rendements sont aussi constatés sur les cultures ; ils sont souvent associés à plusieurs facteurs qui se combinent (inondations, terre moins fertile, changement climatique, etc...).

Pendant les inondations, l'élément le plus contraignant et le plus craint des habitants de certaines tribus est le courant qui entraîne en particulier la descente de « caillasse » depuis les décharges 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 ces dégâts sont aussi causés par la boue qui fréquemment accompagne les écoulements d'eau. Enfin, les dégâts dans les champs sont clairement craints.

La Figure 6 permet de mieux cerner les enjeux et synthétiser les étapes à suivre pour conduire à un outil d'aide/appui à des « décisions éclairées ».

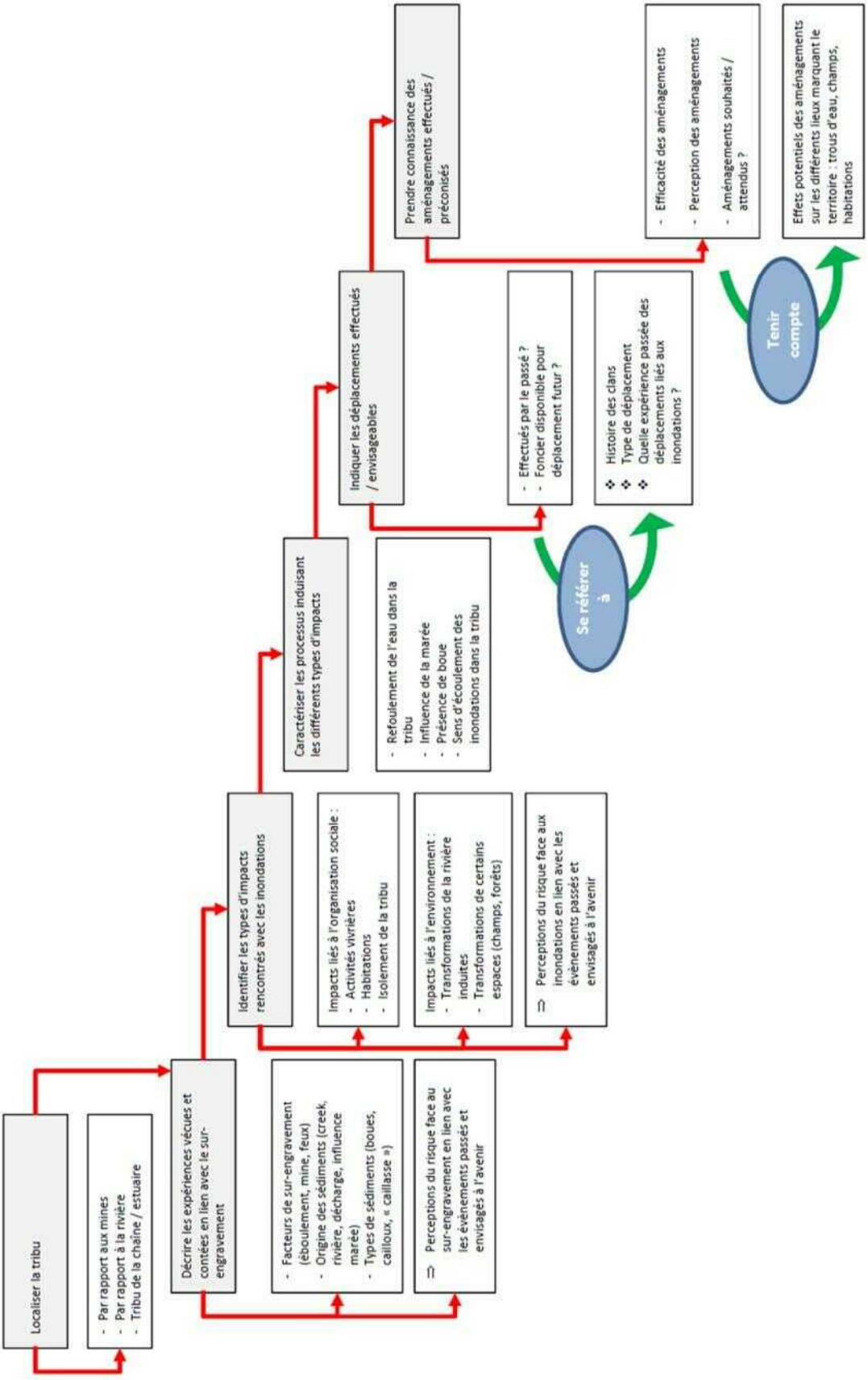


Figure 6 : **Les différentes étapes d'une étude du contexte socio-environnemental**

5.1.2. LES DIFFÉRENTS INDICATEURS

5.1.2.1. 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.

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. Ceci a fortement influencé 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 au regard des mesures d'adaptation (par des aménagements ou des transformations socio-spatiales).

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

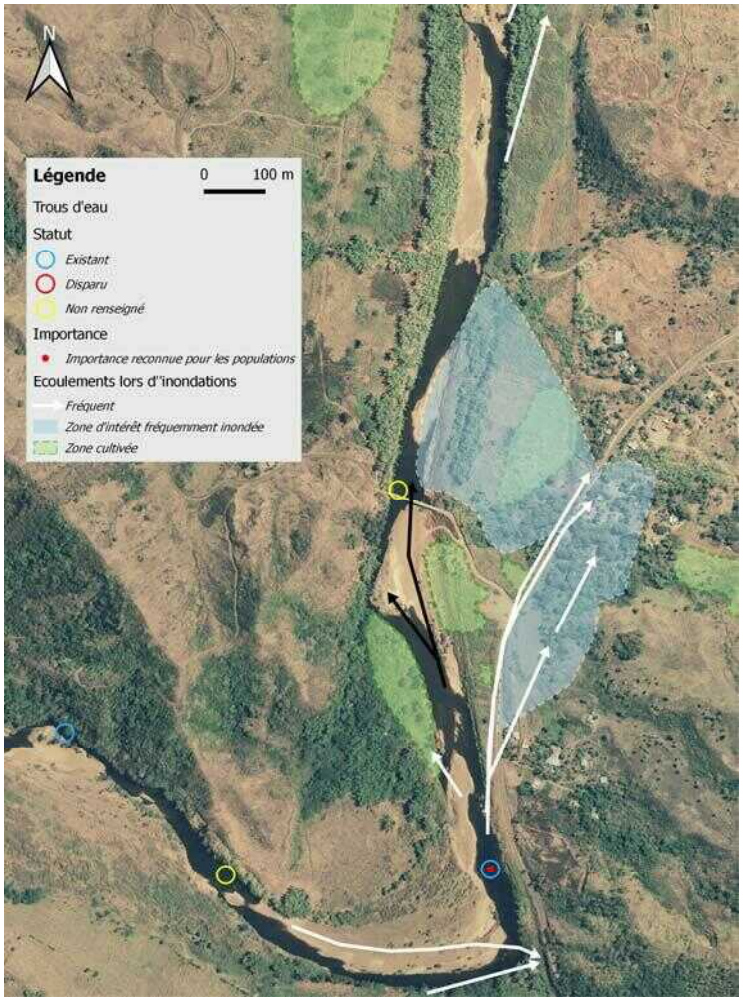


Figure 7 : **Cartographie de groupe permettant de restituer le sens d'écoulement de l'eau durant les inondations de 2016 à Saint-Michel**
(Rouet)

5.1.2.2. 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 impact sur les liens et les relations complexes entre habitants de la zone, 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)

5.1.2.3. 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. De surcroit, 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 cultivés
  - Emport des produits cultivés (ignames, taros, manioc, etc.) par les courants
- Destruction ou dégradation des cultures par le dépôt des boues
  - Étouffement des produits cultivés 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

5.1.2.4. Indicateurs de justifications et d'incidences des relocalisations[5]

> *Argument socio-culturel*
>
> *Dans l'histoire de la Nouvelle-Calédonie, les habitants ont été confrontés à de nombreuses relocalisations qui étaient rarement volontaires. Certaines étaient en lien avec les inondations. 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 de la gestion des terres, constitue un élément essentiel en cas de nécessité de déplacement. 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, en particulier dans un contexte d'inondations récurrentes, le recours à la relocalisation (de certaines maisons / champs / voire des tribus entières) est à envisager. Un certain nombre de variables peut alors permettre d'évaluer l'indicateur de justification et d'incidence des relocalisations.

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

- Fréquence des inondations :
  - Très fréquentes : plusieurs fois dans une saison,
  - Fréquentes : (Presque) tous les ans,
  - Peu fréquentes : plusieurs années entre chaque.
- Niveau d'endommagement (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)

5.1.2.5. Indicateurs d'incidences sur les autres activités vivrières

> *Argument socio-culturel*
>
> *A Thio par exemple, parmi les activités vivrières, la pêche constitue une activité importante dans les tribus de la chaine mais encore plus pour celles de l'estuaire.*

Les transformations du lit de la rivière par l'engravement modifient la distribution des habitats aquatiques et entraînent une raréfaction de la ressource en poissons (mulet, anguille, loche).

---

[5] *Les habitants utilisent spontanément le terme « déplacement » pour désigner les relocalisations auxquelles les inondations les ont parfois contraints. Pour éviter toute confusion avec les déplacements quotidiens liés à leurs activités, nous avons préféré conservé le terme de « relocalisation » dans ce guide.*

Par ailleurs, les curages impactent fortement l'écosystème des rivières qui met longtemps (plusieurs années) 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 par celles-ci.

Dans l'estuaire les habitants ont constaté un dépôt de sédiments fins important qui rend le sol très vaseux, ce qui impacte également l'habitat des espèces le crabe par exemple. 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

5.1.2.6. Indicateurs de suivi du lit de la rivière

> *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. Les habitants expriment souvent leurs inquiétudes par rapport à ces changements.

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,
  - Érosion des berges pouvant conduire à des effondrements.
- Comblement des trous d'eau

5.2. DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DE SURENGRAVEMENT DU SYSTÈME

L'érosion des surfaces d'activités minières contribue à une production importante de sédiments qui viennent alimenter la charge solide des rivières situées en aval.

Ces apports sédimentaires surabondants se propagent à travers le réseau hydrographique de manière discontinue par des « vagues sédimentaires ». 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.

5.2.1. LA BANDE ACTIVE COMME INDICATEUR DES APPORTS MINIERS

La démarche proposée 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 surengravement lié à l'activité minière (Bertrand et Liébault, 2018). Ainsi, pour une même surface drainée, la bande active devrait être d'autant plus large, à forçages hydroclimatiques identiques, que les apports sédimentaires en provenance des mines sont importants. Cette méthode présente les intérêts / limites suivants :

- 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 (*a priori* peu sensibles en Nouvelle-Calédonie).
- Incertitudes liées à la qualité de l'ajustement de la loi de fonctionnement naturel mais pas directement d'incertitudes liées à la mesure de la bande active.

5.2.2. MÉTHODE

Pour constituer une loi régionale robuste reflétant l'ajustement naturel des bandes actives, 63 sites ont été identifiés 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 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), un tronçon de longueur égale à 10 fois la largeur de la bande active a été délimité, le long duquel la bande active a été digitalisée manuellement, de façon à extraire la largeur moyenne de cette bande active. Pour chaque point a également été délimité le bassin versant par une procédure d'analyse hydrologique du MNT (Modèle Numérique de Terrain) à 10 m. Ces délimitations ont été vérifiées et corrigées manuellement.

5.2.3. RÉSULTATS

Un modèle largeur active *versus* surface drainée a ensuite été construit à partir de l'ensemble des sites non impactés, et servira de loi de référence (Figure 8). La relation est 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 termes 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.

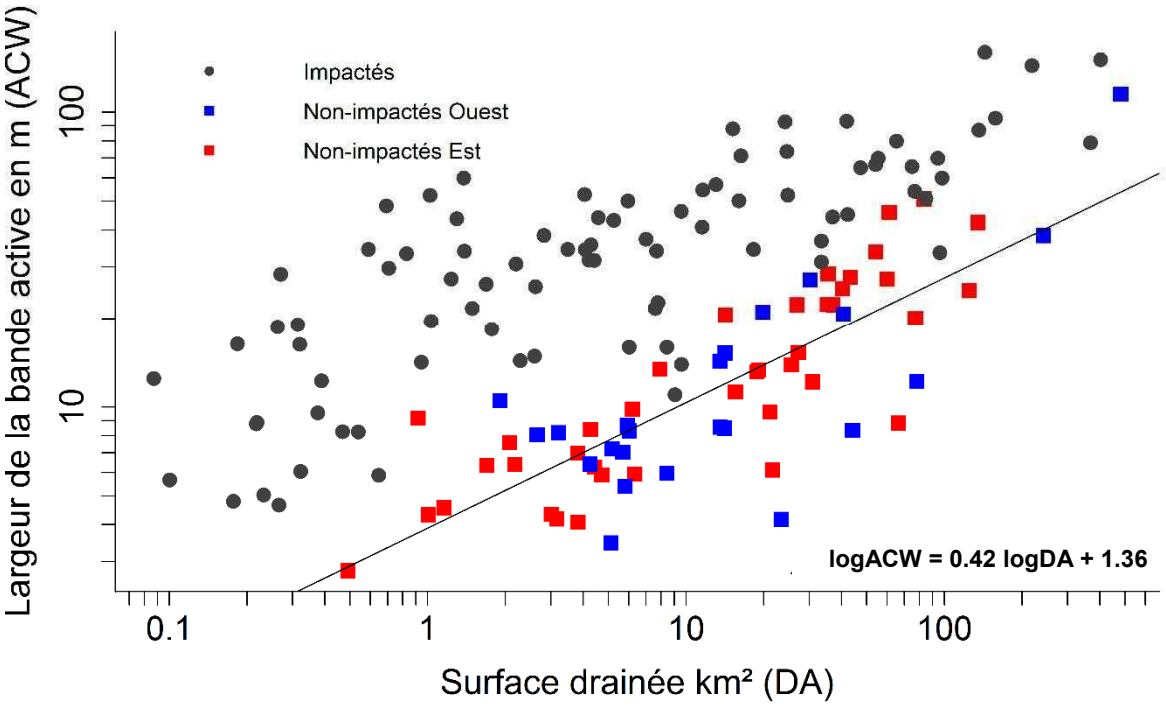


Figure 8 : **Largeur de bande active en fonction de la surface drainée**
(adapté de Bertrand et Liébault, 2018)

Les coordonnées de l'échantillon constitué de 86 sites impactés ont été projetées sur le nuage de points représentant des sites au fonctionnement dit "naturel" (Figure 8). Les largeurs prédites pour ces sites impactés sont toutes inférieures aux valeurs observées, ce qui confirme bien la pertinence d'utiliser l'écart au modèle de référence comme proxy du surengravement minier. Pour chaque bassin a ensuite été calculée la proportion relative de surfaces en érosion classées en fonction d'une typologie fonctionnelle qui croise d'une part l'origine de l'érosion, 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 (Tableau 6).

Tableau 6 : **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

La relation statistique significative entre résidus pour les sites impactés et la proportion des sources actives majeures dans le bassin versant (Figure 9) confirme que l'écart au modèle naturel de référence est bien contrôlé par la fourniture sédimentaire depuis les mines.

Cette équation permet de prédire de manière robuste la surlargeur 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).

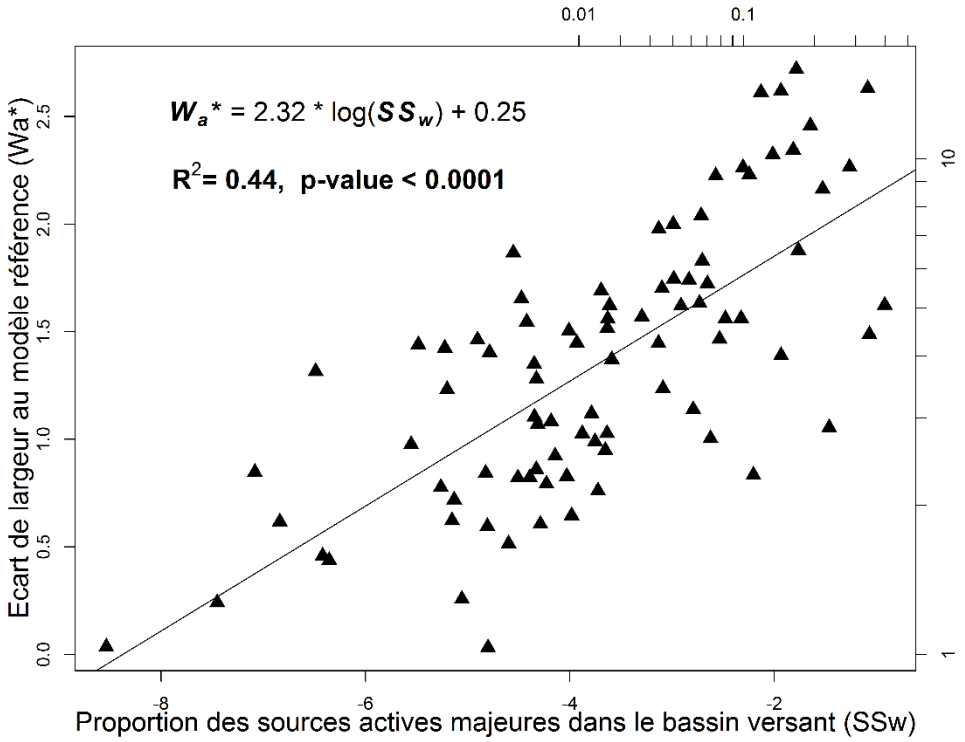


Figure 9 : **Résidus des sites impactés au modèle statistique dit « naturel » (Wa*), expliqués par la proportion des sources sédimentaires minières majeures (SSW)**
(adapté de Bertrand et Liébault, 2018)

La spatialisation de l'indicateur de surengravement, que représente le résidu au modèle de fonctionnement naturel, offre la possibilité de détecter les tronçons les plus affectés par l'engravement d'origine minière. Par exemple sur le bassin versant de la Thio (Figure 10), 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 surlargeur 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.

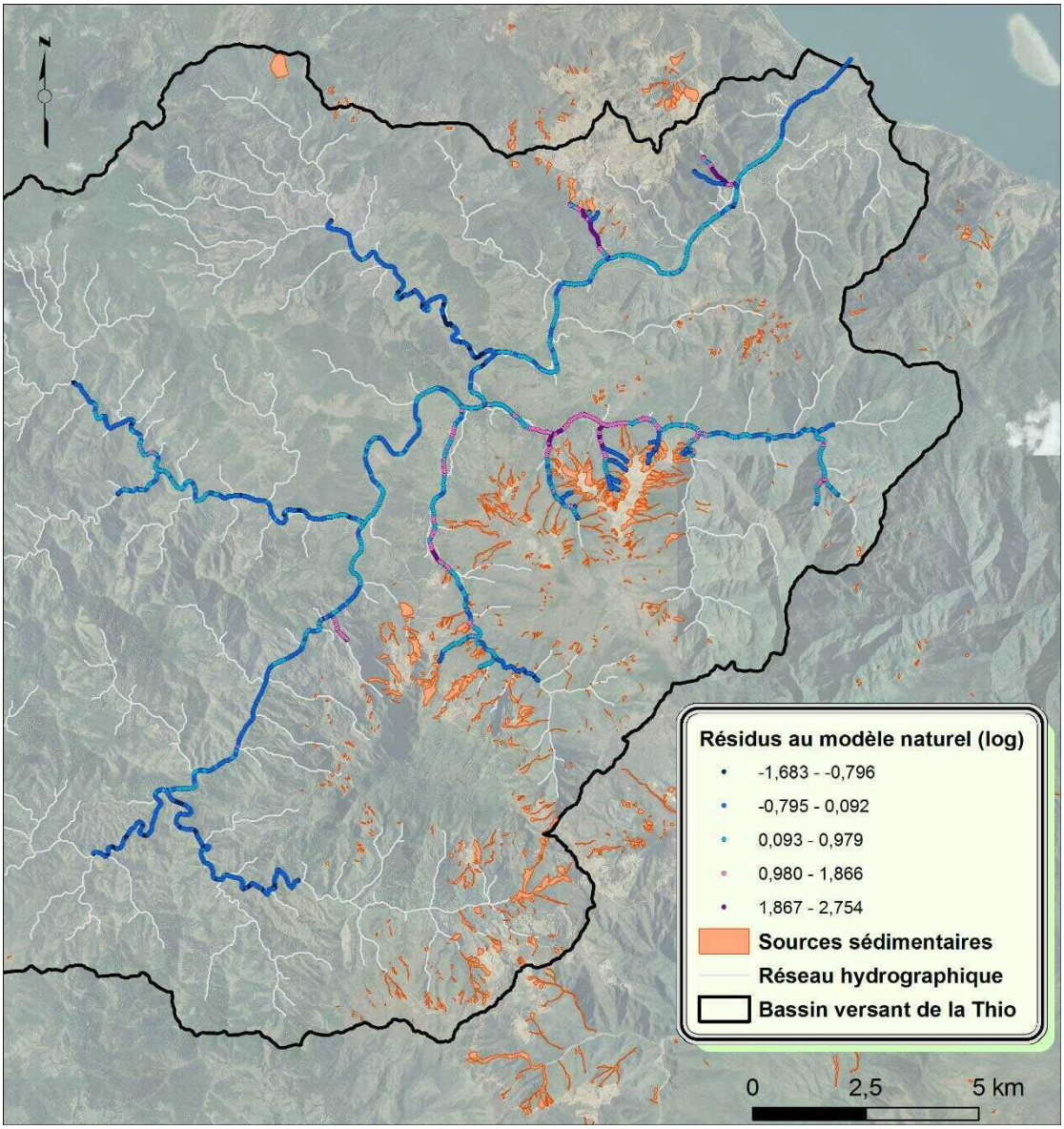


Figure 10 : **Spatialisation de l'indicateur de surengravement - Résidus au modèle naturel**

Exemple du bassin versant de la Thio

5.3. CARACTÉRISATION DE LA DYNAMIQUE PASSÉE DU SURENGRAVEMENT

5.3.1. OBJECTIF

L'analyse de l'évolution passée du surengravement 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 permet en partie de répondre aux questions suivantes :

- Est-on en phase paroxysmale de surengravement 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 surengravement sur un secteur donné.

5.3.2. MÉTHODE

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 ci-dessous (exemple du creek Tomuru dans la vallée de la Thio)[6].

5.3.3. EVOLUTION DE LA LARGEUR DE BANDE ACTIVE DE CHAQUE SEGMENT D'UNE MÊME RIVIÈRE

L'objectif est de quantifier le surengravement des cours d'eau, à partir de l'évolution de la largeur de la bande active au cours du temps induite par la migration des sédiments vers l'aval.

Ce travail s'appuie sur l'exploitation du maximum possible de jeux de photographies aériennes (téléchargeables par exemple à partir du site www.georep.nc), orthorectifiés. Pour chacune de

[6] *Une présentation plus approfondie des résultats obtenus sur l'ensemble des secteurs étudiés dans le bassin versant de la Thio est prévue dans le rapport scientifique du projet IMMILA, qui intègrera également les forçages hydrométéorologiques majeurs qui ont impacté le bassin au cours des dernières décennies.*

ces époques, les bandes actives sont digitalisées puis leurs largeurs extraites avec un pas de 50 m.

Un exemple de résultat sur le creek Tomuru est présenté dans la Figure 11. 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 11). 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.

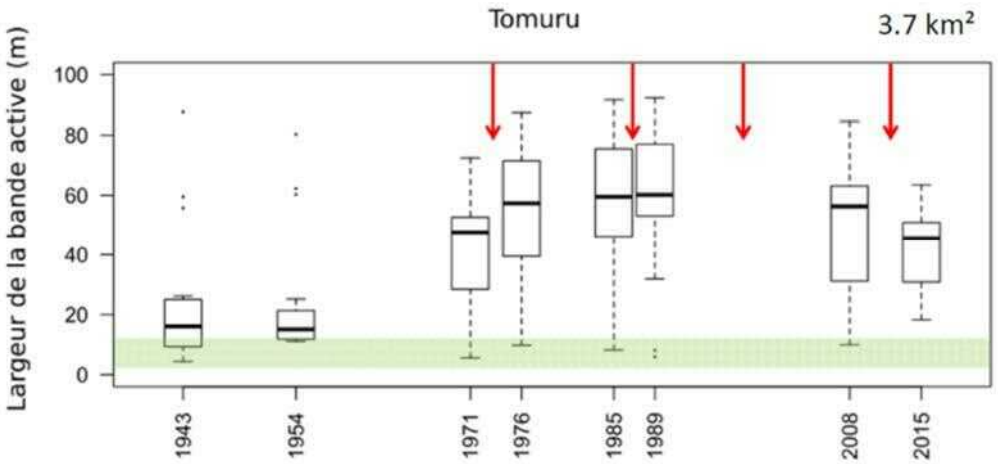


Figure 11 : **Évolution de la largeur de bande active de la Tomuru, affluent de rive gauche de la Thio, entre 1943 et 2015**
(adapté de Drain, 2016)

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

5.3.4. EVOLUTION TEMPORELLE DU VOLUME DES DÉCHARGES MINIÈRES DANS LE BASSIN VERSANT ET PAR SOUS-BASSINS

5.3.4.1. 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 surengravement des rivières. 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 sols mis à nu qui en résultent, qui ne se végétalisent que très difficilement et sont très sensibles au

ruissellement et à l'érosion lors des événements pluvieux, sont en effet autant de sources potentielles de matériaux.

Toutefois, cette évolution de la surface des sols nus n'est pas la seule source des apports miniers. En effet, en Nouvelle-Calédonie, les stériles ont été versés directement dans des décharges localisées dans les versants jusqu'à l'établissement de la loi de 1975. Ce sont ces apports de stériles qui constituent l'alimentation principale en matériaux d'origine minière, notamment grossiers, 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 est nécessaire. La méthode utilisée et quelques exemples de résultats sont présentés ci-dessous[7].

5.3.4.2. Méthode

L'approche suivie a consisté à quantifier les volumes de stériles extraits à partir des données de production de minerai extrait. Cette approche peut être appliquée à l'ensemble d'un bassin versant mais aussi à l'échelle de ses sous-bassins afin de permettre une analyse spatiale fine des impacts de ces apports sur l'évolution des lits des cours d'eau situés en aval. Les tonnages produits par an et par concession minière sont enregistrés dans la base de données de production historique du SMC, qui contient l'ensemble des tonnages produits pour toute la Nouvelle-Calédonie depuis 1904. Les limites des bassins versants peuvent être issues d'une extraction automatique à partir du MNT de la DITTT. Ces limites doivent être ensuite contrôlées et corrigées manuellement (pour certaines d'entre elles) puis fusionnées.

La méthode se décompose en trois phases (Figure 12) :

Phase 1 : Dans un premier temps il convient de sélectionner toutes les concessions minières présentes dans le bassin versant à l'aide du cadastre minier. Ensuite pour chaque concession, les données sont traitées afin de fournir une courbe de production annuelle et cumulée de minerai. À partir du ratio[8] production de stérile par rapport à la production de minerai, une courbe de production annuelle et cumulée de stérile peut être réalisée.

Phase 2 : Une fois les concessions minières sélectionnées, les anciennes décharges associées à chaque concession sont recherchées (sur les photographies aériennes), puis chaque décharge est 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.

[7] Une description plus exhaustive de la méthode et des résultats sont fournis dans Garcin et al. (2017)
[8] Le ratio minerai/stériles est celui utilisé par le SMC (Garcin et al. 2017), il est variable dans le temps.

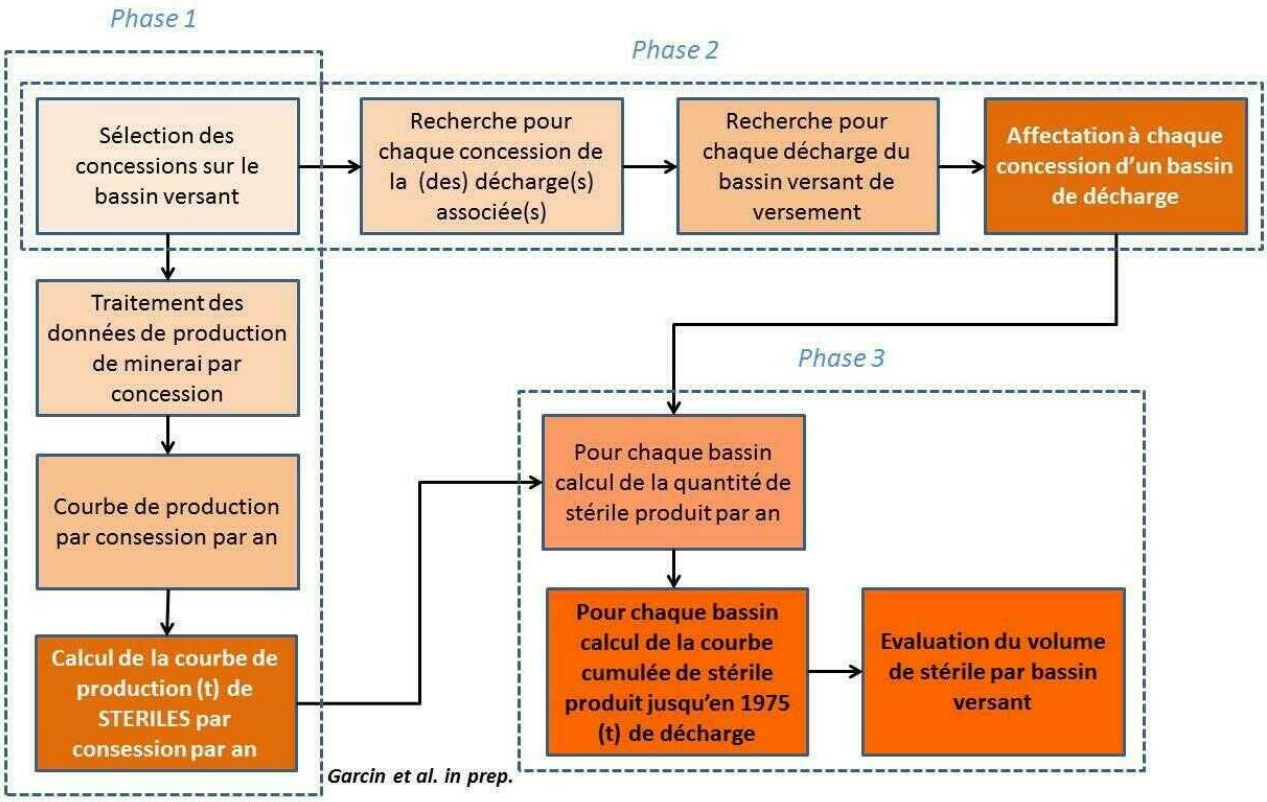


Figure 12 : **Méthode suivie pour l'évaluation des tonnages et volumes de stérile minier mis en décharge**

5.3.4.3. Résultats

Il est possible sur la base de cette analyse de représenter les productions de stériles par bassin versant ou à l'échelle du bassin versant global, au cours du temps ou en valeur cumulée, ou enfin sous forme cartographique (voir quelques illustrations sur la Figure 14). Ces données permettent d'étayer la caractérisation des dynamiques passée et actuelle du surengravement, aux diverses échelles pertinentes pour la dynamique morpho-sédimentaire du système étudié.

Une représentation des volumes / tonnages de stériles superposée aux profils en long des différentes branches du réseau hydrographique peut s'avérer utile. Elle permet d'identifier les contributions susceptibles d'être les plus problématiques, en raison de leur distance à l'exutoire (ou au tronçon de la rivière où les désordres sont les plus marqués) ou de la structure des pentes en long du réseau hydrographique (voir illustration dans le cas de la Thio sur la Figure 13).

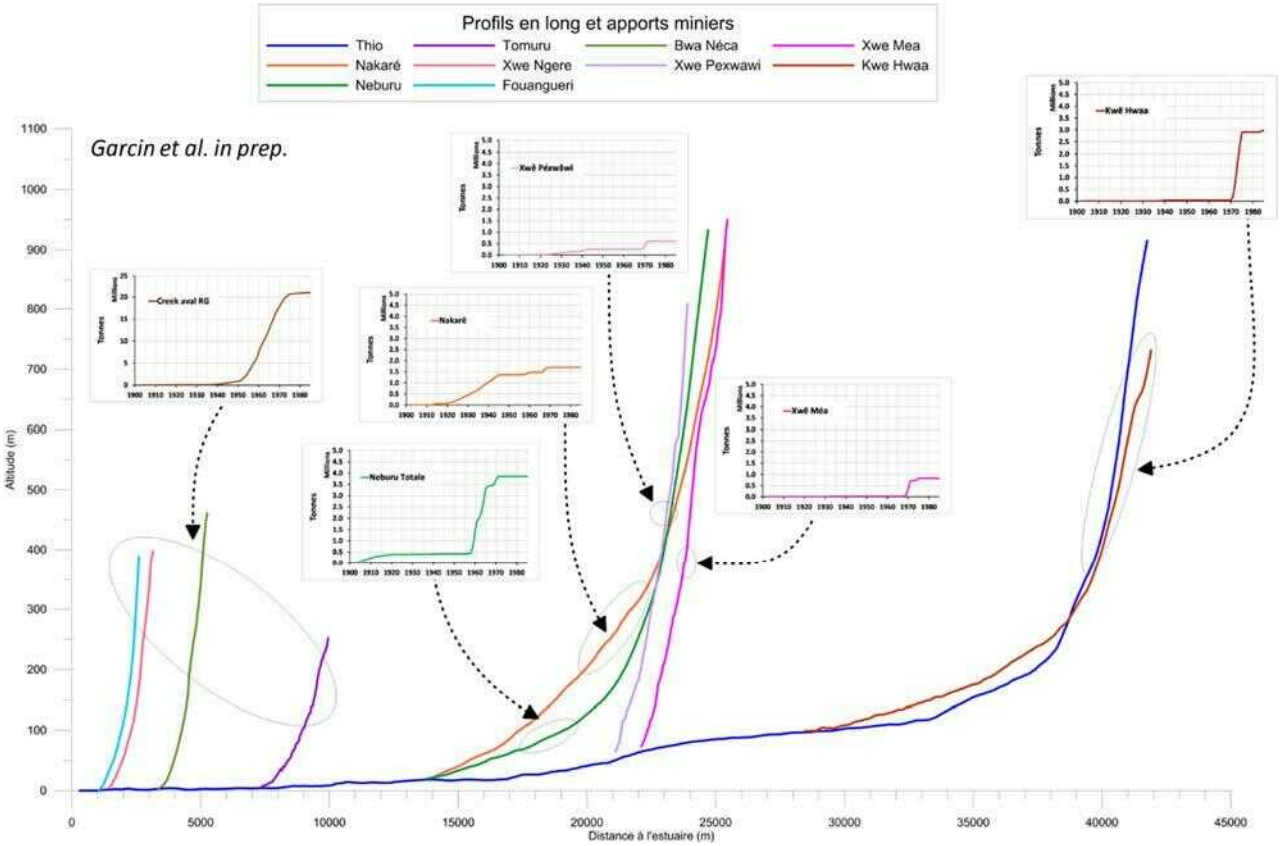


Figure 13 : **Localisation des apports en stériles miniers sur les profils en long des cours d'eau**

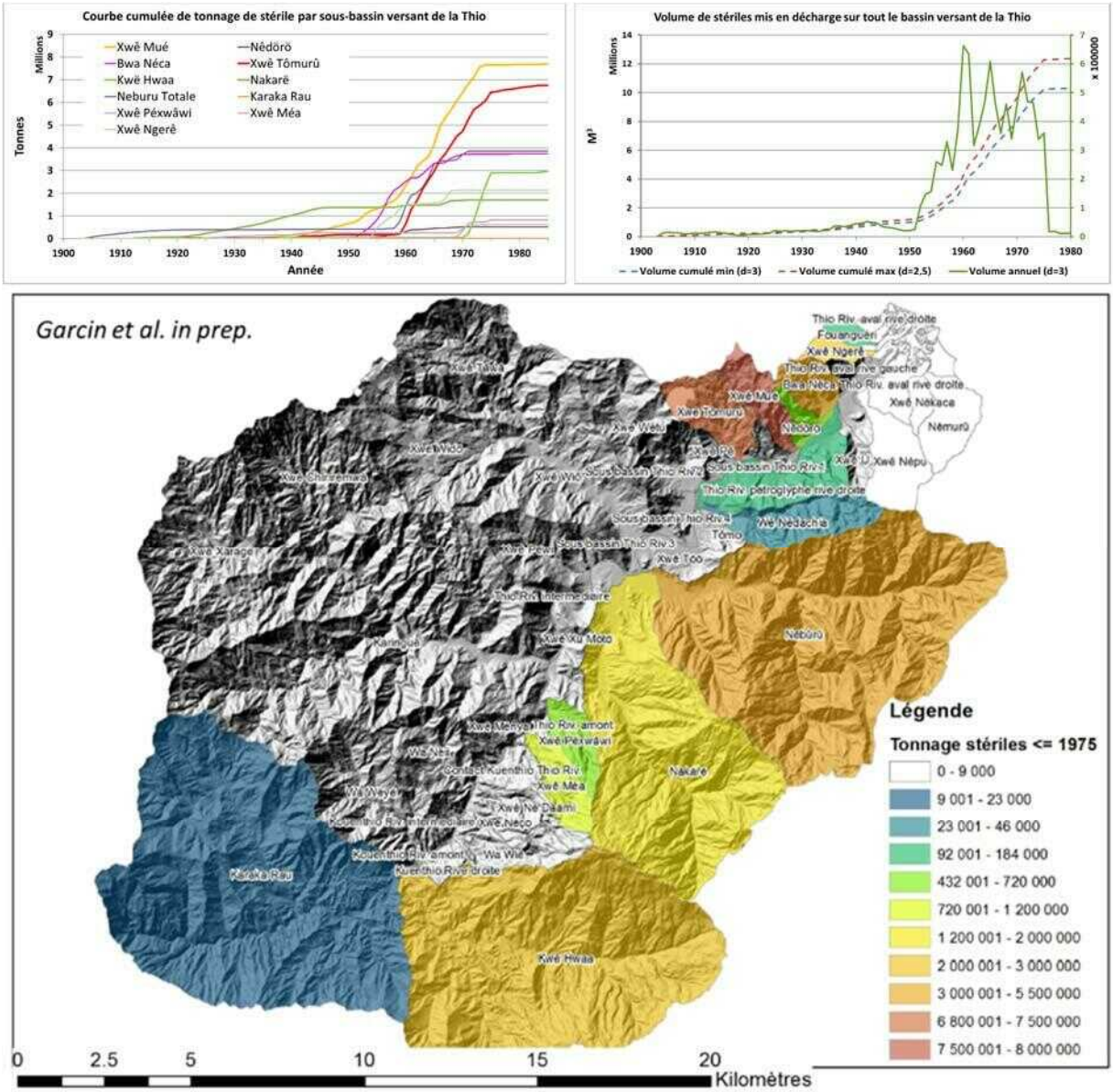


Figure 14 : **Représentation des volumes et tonnages de stériles produits (exemple du bassin versant de la Thio)**
(en haut à gauche : tonnages cumulés par sous-bassin, à droite : volume cumulé sur l'ensemble du bassin versant ; en bas : cartographie de la contribution aux apports par sous-bassin)

5.3.5. ANALYSE CROISÉE

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. 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. 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 15) 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 pluviométriques) déclenchant le transport des matériaux et les modalités de celui-ci.

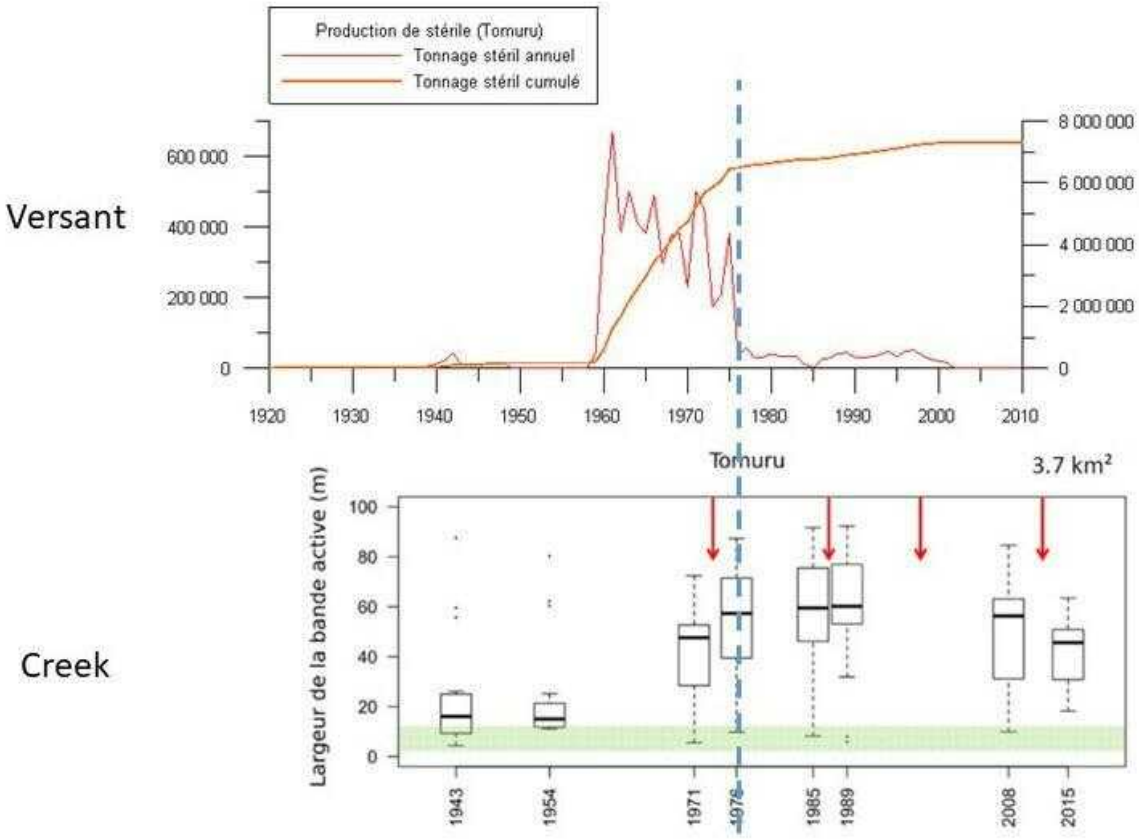


Figure 15 : **Liens entre l'apport de stériles en décharge et l'évolution de la bande active** (exemple du Creek Tomuru)

6. ELABORATION DE STRATÉGIES DE REMÉDIATION

Les éléments de diagnostic de la dynamique hydro-sédimentaire passée et actuelle étant posés et partagés, la réflexion sur l'élaboration de stratégies de remédiation peut s'engager. A partir de l'identification des enjeux potentiellement impactés par les conséquences du surengravement, sont dans un premier temps définis les objectifs attendus de ces stratégies de remédiation, auxquels pourront être confrontées les fonctions que peuvent remplir les différentes solutions envisageables.

6.1. QUELS OUVRAGES POUR QUELLES FONCTIONS ?

6.1.1. QUELS PROCESSUS HYDRO-SÉDIMENTAIRES PEUT-ON ESSAYER D'INFLUENCER ?

La formation des crues chargées en sédiments résulte de l'action de divers processus hydro-sédimentaires que l'on peut schématiquement décomposer en processus de « production » et en processus de « transfert » (Figure 16).

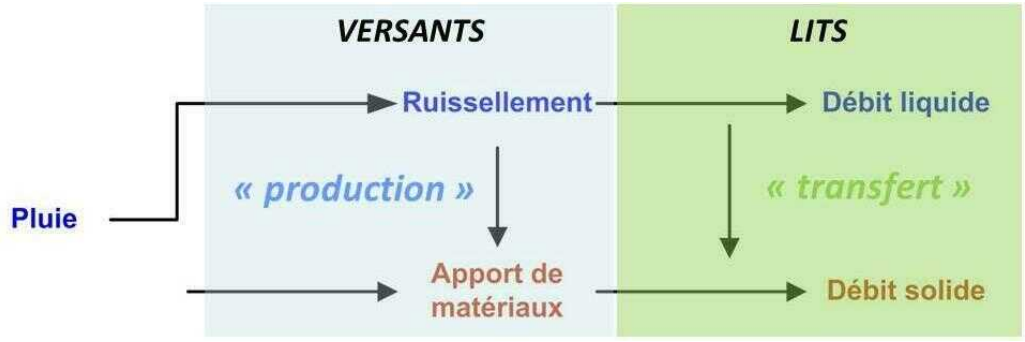


Figure 16 : **Processus de formation des crues avec transport solide**
(d'après Brochot)

Les processus de production sont ceux qui mettent à disposition des crues les deux constituants principaux de 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, traduits par divers modèles hydrologiques. Les processus de production de la composante sédimentaire sont variés, responsables soit de l'altération des matériaux sur place, soit du transport des débris jusqu'au réseau hydrographique. Ils se développent majoritairement sur les versants.*

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. Il convient alors d'adopter des formulations du transport solide adaptées à cet état de fait.*

- *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, qui leur permettront d'assurer plus ou moins bien les fonctions à remplir pour répondre aux objectifs définis en regard des besoins identifiés.

6.1.2. QUELS SONT LES TECHNIQUES QUI SONT SUSCEPTIBLES D'ÊTRE MOBILISÉES ?

6.1.2.1. 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 leurs parties hautes (Figure 17).

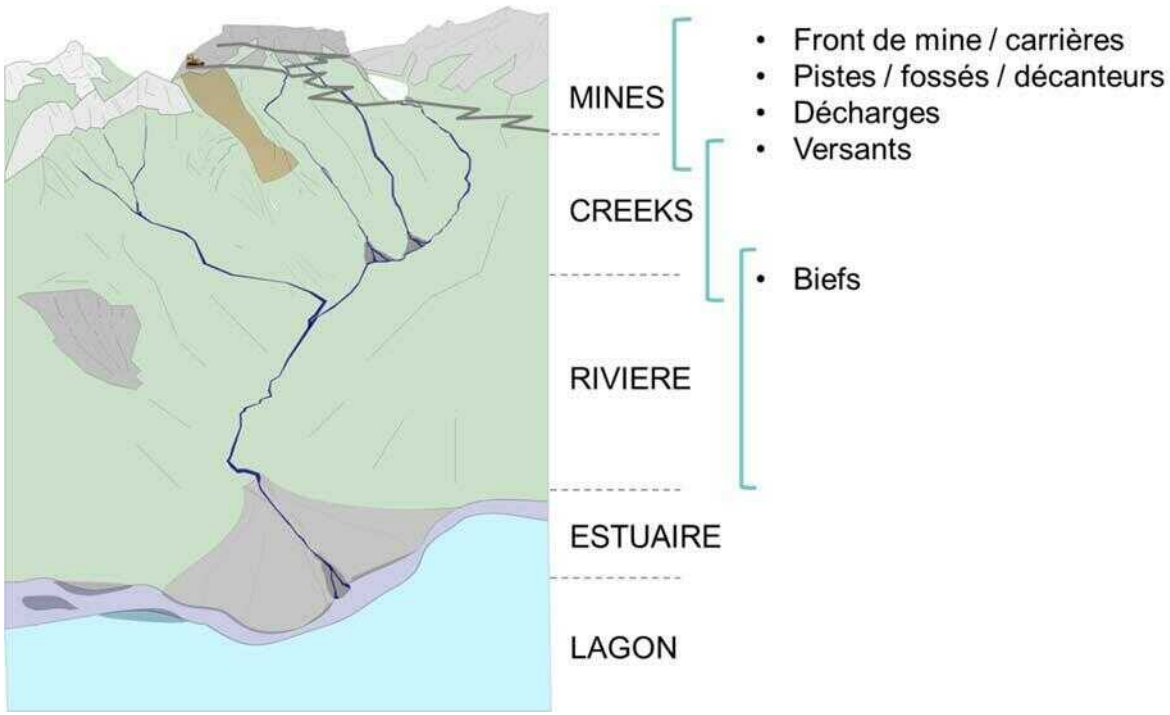


Figure 17 : **Proposition de décomposition particulière des bassins versants miniers néocalédoniens**

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 envisageables, qui peuvent varier d'un étage à l'autre.

Le Tableau 7 récapitule les principaux processus (de production, de transfert) susceptibles d'être les plus actifs selon les « étages » décrits ci-dessus.

Tableau 7 : **Localisations privilégiées des différents processus de formation des crues**

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

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.

6.1.2.2. Types de mesures techniques envisageables

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[9]), 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)[10] 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.

Sur la base de la visite d'un certain nombre de ces expériences néocalédoniennes a été établie une liste d'ouvrages / aménagements / interventions dont les effets sur les processus en jeu sont précisés dans les paragraphes qui suivent.

Ces mesures correspondent plus ou moins directement à la palette de celles mises en œuvre depuis près de 150 ans en métropole dans le contexte de la « restauration des terrains en montagne » (RTM), pour la protection contre les crues torrentielles[11].

On répartit classiquement ces mesures en deux grandes familles de stratégies, qui gagnent souvent à être mises en œuvre de façon complémentaire. L'objectif des techniques de correction dite « active » 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. Elles font appel à du génie biologique (reverdissement, reboisement), des petites corrections (banquettes, seuils dans les ravines) et des barrages de correction torrentielle dans le chenal d'écoulement.

Plus récemment ont été développées des techniques de défense dite « passive », dont l'objectif est de limiter rapidement les effets dévastateurs de l'érosion et du transport solide sur les enjeux socio-économiques, en stockant les apports sédimentaires ou en contenant les écoulements afin d'éviter l'exposition des biens ou des personnes.

Pour être complet il faut également distinguer des mesures que l'on peut qualifier de "structurales", car ayant recours à la construction d'ouvrages de protection (barrages, pièges à sédiment, canalisations…), de mesures inversement "non-structurales", ne faisant pas appel à des constructions. Il s'agit par exemple des outils de zonage du risque permettant de

---

[9] Ce qui rend la distinction stricte entre ouvrages et aménagements quelquefois un peu artificielle
[10] Par commodité on utilisera parfois l'abréviation O/A/I dans la suite de ce guide
[11] On en trouvera une description plus détaillée dans le rapport scientifique du projet « Gestion du passif minier »

réglementer l'usage du sol (typiquement les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles, PPR, en France), ou des mesures d'alerte et d'évacuation par exemple.

6.1.3. QUELLES FONCTIONS REMPLISSENT CES DIFFÉRENTS 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 ces derniers peuvent 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.

6.1.3.1. 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 8 : **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.

6.1.3.1.1. 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. 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.

Tableau 9 : **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.

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 pour 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.

6.1.3.1.2. 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 10 : **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 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.

6.1.3.1.3. 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 au traitement des ravines sur verses, notamment en cas de présence de matériaux latéritiques.

Tableau 11 : **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 de restitution des écoulements aux 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[12] devraient souvent être la base de bonnes stratégies de gestion du passif à l'échelle des versants. Cette solution est de surcroît la plus durable et résiliente grâce à la capacité de reprise de la végétation.

6.1.3.2. 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 12.

Tableau 12 : **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

6.1.3.2.1. 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

[12] *Cf projet CNRT RECOSYNTH « Restauration écologique sur sites miniers Analyse – Recommandations Indicateurs de réussite »*

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 13 : **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 décrites à la Figure 18 ci-dessous. Ils ont un effet sur les processus de production sédimentaire et plus particulièrement sur la production de sédiments grossiers.

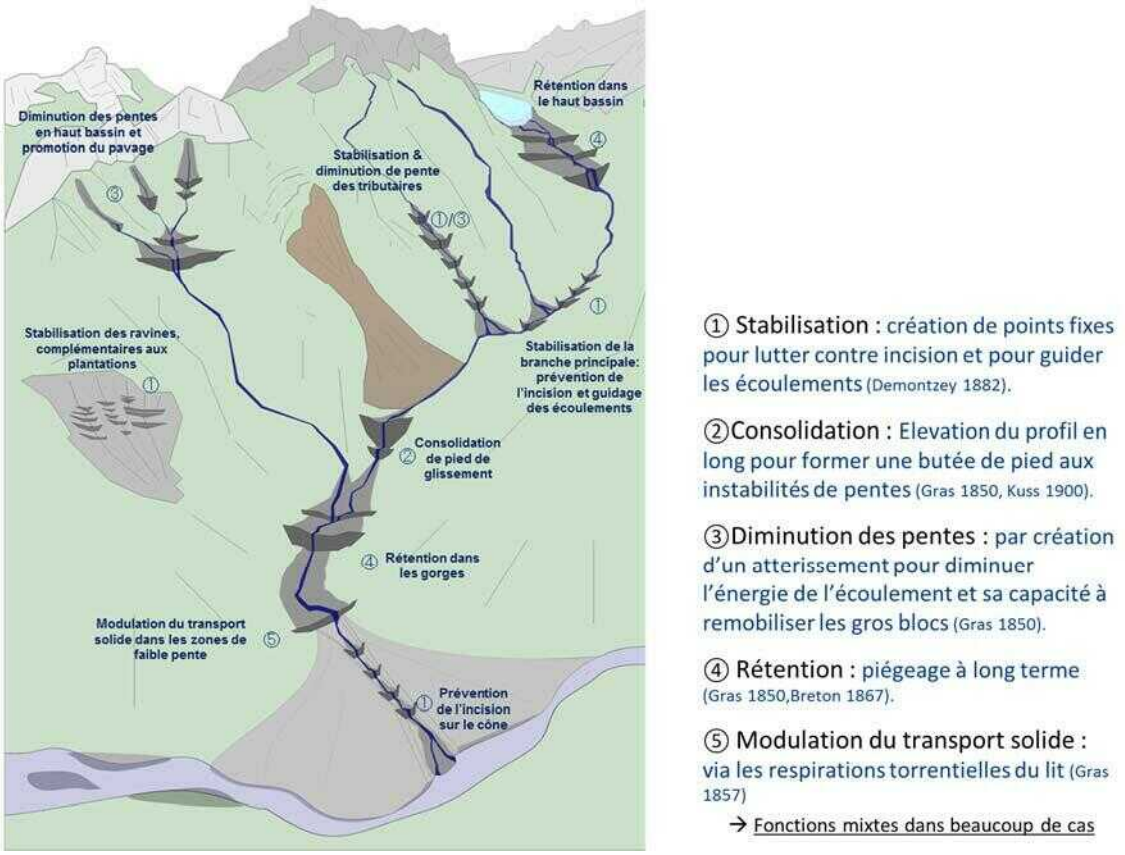


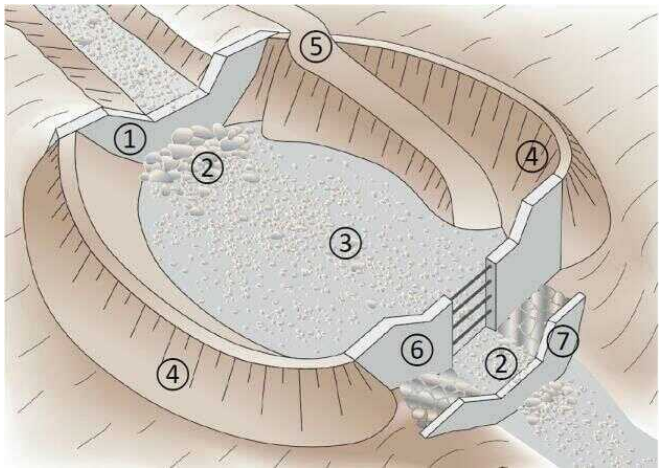
Figure 18 : **Fonctions des barrages de correction torrentielle**
(Piton, 2016)

6.1.3.2.2. Biefs

Les barrages 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 donc la production de 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 dispositifs appelés « plages de dépôt » (Tableau 14) ont pour fonction première de piéger les sédiments dans la limite de leur volume maximal de stockage (Figure 19). 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 14) 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.



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

Figure 19 : **Schéma d'une plage de dépôt type**
(source Piton et Recking, 2016a)

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.

Tableau 14 : **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	- Empêcher l'érosion de la berge		+++		
Radiers	- 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

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.

Deux types principaux d'interventions sont à distinguer : les curages[13] et les reprofilages. Ces interventions sont mises en œuvre le long d'un tronçon ouvert des cours d'eau. On ne 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 et ainsi de favoriser la régulation des flux sédimentaires dans ce secteur. Sur un autre plan, cela joue également en faveur des habitats aquatiques.

6.2. QUELLES PERCEPTIONS EN ONT LES POPULATIONS, LES ÉLUS ?

Les points de vue de la population, des élus et plus globalement des différents acteurs concernés par ces problématiques de surengravement et de remédiation, sont importants à recueillir et à considérer pour éviter les écueils qui feraient d'une stratégie très pertinente sur le plan technique une solution inacceptable pour les autres acteurs. Il est important d'en avoir également en tête les grands éléments de contexte déterminants de ces points de vue et perceptions.

Les éléments de réflexion développés ci-dessous sont issus d'un travail réalisé à Thio, et devront donc être adaptés aux autres contextes locaux.

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

6.2.1. PERCEPTION DE LA PROBLÉMATIQUE D'ENGRAVEMENT PAR LES ÉLUS

Les élus rencontrés se sont souvent exprimés d'abord en évoquant leurs inquiétudes en référence à leur vécu des inondations en tant qu'habitants d'une chefferie, d'une tribu, avant de le faire en référence à leur positionnement d'élus.

6.2.1.1. Dimension culturelle et sociale

L'impact des transformations environnementales issues de l'engravement sur la dimension culturelle et sociale est évoqué. Ces transformations sur les zones de pêche et de cultures peuvent affecter la répartition des rôles entre chaque clan.

6.2.1.2. Problématique du relogement induit par le déplacement

Dans un autre registre, les préoccupations liées à la question du relogement des habitants inondés et de l'installation des jeunes voulant construire leur maison apparaissent 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 se pose, limitant les possibilités de déplacements des habitants et de construction de logements pour ces derniers. Des réflexions autour de lotissements communaux ou de lotissements tribaux peuvent se heurter à d'éventuelles réticences des habitants à se déplacer, a fortiori quand des déplacements ont déjà été opérés.

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.

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

De nombreux éléments peuvent être 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. On peut s'interroger 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 médias à l'échelle du pays et dans les discours locaux des secteurs concernés. L'impact des inondations dans les projets de développement de la commune peuvent aussi être mis en avant par les élus. Les projets agricoles qu'ils souhaiteraient élaborer peuvent se trouver contraints par le problème d'inondation de grandes surfaces et de la fertilité de la terre réduite du fait de l'apport de « terre rouge » des mines.

6.2.1.4. 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 de nombreuses années. Elles ont été considérées et intégrées dans le cadre d'un certain nombre d'accords éventuellement renouvelés ou nouvellement élaborés pour certains. Connus sous le nom de « pieds mouillés », ces accords sont tout d'abord bipartites et ont été établis directement entre les tribus et l'exploitant. Ils encadrent toute une série de revendications relatives à l'indemnisation des cultures endommagées par les crues depuis les années 75, au dragage des cours d'eau, à des aides et dédommagements concernant la construction de terrassements et de logements en zones non inondables. Ces revendications ont pu s'étendre également à d'autres domaines faisant plutôt appel au rôle d'instance publique joué historiquement par la SLN. Face à ces revendications, l'entreprise prend effectivement en charge une assurance agricole (la Caisse d'Assurances Mutuelles Agricoles - CAMA[14]) 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 districts coutumiers, les communes, le représentant de l'État, la Province, l'exploitant et le gouvernement. Localement, des Collectifs fondés après des crues particulières ont une place importante dans la gestion de cette problématique et sont également des membres actifs des débats et des négociations.

6.2.2. UNE GESTION COMPLEXE SOURCE DE MALENTENDUS

6.2.2.1. 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 bureaux d'études pour ne prendre que quelques exemples, participent plus ou moins régulièrement aux réunions pouvant se dérouler sur la commune concernée. 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 communaux de savoir vers quel acteur se tourner pour résoudre les problématiques sur les cours d'eau 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

[14] 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

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.

6.2.2.2. Ambigüité des rapports à l'industrie minière

Le fait que les élus communaux soient parfois salariés du principal exploitant accentue la complexité de gestion de la problématique d'engravement. Une partie de la population peut voir comme problématique les mandatures pendant lesquelles des élus sont à la fois élus et salariés du principal exploitant. Ce conflit d'intérêt potentiel ne peut pas selon eux permettre à la mairie d'adopter des choix politiques suffisamment engagés dans les négociations avec l'exploitant.

En outre, le rôle historique joué par certains exploitants dans certaines communes, intervenant comme instance publique par le passé, peut avoir des répercussions aujourd'hui dans la relation des habitants à l'exploitant. Il en résulte alors une ambiguïté dans les attentes de la population par rapport aux dédommagements et au rôle que l'entreprise peut effectivement remplir. Ces doutes peuvent même s'étendre aux explications données par l'exploitant concernant les inondations et le fait qu'elles aient toujours été présentes sur le territoire.

6.2.2.3. 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. Des divergences notoires peuvent apparaître entre l'industriel et la population à propos des aménagements.

Il est important qu'il y ait, de manière concertée, une vision globale de la rivière (de l'amont à l'aval) et un schéma d'aménagements indiquant ce qui doit être priorisé et protégé. Or les logiques suivies selon les acteurs ne sont pas les mêmes et ne sont pas fondées sur les mêmes registres (logique économique vs sociale par exemple).

Le Tableau 15 par exemple présente pour différents types d'ouvrage[15], leurs avantages, inconvénients, et attentes associées du point de vue des habitants interviewés à Thio, confrontés aux fonctions/ intérêts hydro-sédimentaires et défauts/points de vigilance du point de vue des experts.

[15] *Au sens « ouvrages / aménagements / interventions ». On ne retrouve pas dans ce tableau tous les O/A/I listés au Tableau 14, mais seulement ceux que les habitants connaissent et dont ils ont parlé spontanément.*

Tableau 15 : **Les types d'ouvrages, leur perception par la population et leurs 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 • favoriser 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 / nettoyage des *creeks*	• réduit l'ampleur des inondations	• limiter les risques d'embâcles	/		*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*

** Ouvrage particulier de fermeture de plage de dépôts. C'est donc ce qui se voit le plus facilement des plages de dépôts ainsi équipées et il est logique que ce soit ainsi que les habitants interrogés aient désigné ce type d'aménagement.*

6.2.2.4. Un manque d'écoute ressenti par les habitants

Les habitants ont souvent le 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 la prise en compte des conséquences de l'engravement n'était effective que suite à une réaction virulente de leur part et que les travaux et les aménagements réalisés sont avant tout mis en œuvre dans le but de conserver la « paix sociale ».

6.3. ELABORATION D'UN PROJET DE REMÉDIATION

6.3.1. DÉMARCHE

La Figure 20 ci-après propose une représentation schématique des phases principales d'étude nécessaires à l'élaboration d'un projet de remédiation. Elle se focalise plus particulièrement sur les aspects techniques et on n'y retrouve donc pas explicitement les étapes d'information, de consultation, de concertation et de négociation positionnées sur la Figure 5 présentant la démarche globale d'élaboration d'une stratégie de remédiation au surengravement proposée dans ce guide. Ces étapes restent évidemment indispensables pour prendre en compte et concilier les contextes et contraintes socio-anthropologiques et physiques. Cet enchaînement de phases d'étude est mis en correspondance, sur la partie gauche de la Figure 20, avec les grandes étapes classiques d'un projet d'ingénierie (esquisse, avant-projets sommaires et détaillés et études de projets).

Sur sa partie droite ont été situées les quatre grandes étapes d'un processus proposé par Piton et al., 2016, pour l'élaboration de projets de correction torrentielle dans les bassins versant de montagne. La décomposition proposée distingue quatre registres d'évaluation et d'étude, qui doivent être pris en compte pour assurer l'efficacité et l'efficience des projets et dispositifs proposés.

Le premier registre renvoie à une analyse des fonctions que doivent assurer les ouvrages, aménagements ou interventions, considérés individuellement ou par petits ensembles cohérents, pour remplir les objectifs attendus d'eux. Ces objectifs auront évidemment été arrêtés pour être adaptés aux enjeux à préserver, protéger ou restaurer. Cette analyse fonctionnelle devra tenir compte du contexte géomorphologique, hydraulique, sédimentaire et morphodynamique du système considéré, et des éléments de diagnostic partagés, sur la base desquelles on aura construit et choisi des scénarios de crues de projet cohérents avec les enjeux et les objectifs. Au terme de cette première étape, des pré-stratégies auront commencé à émerger.

La seconde étape relève encore du registre fonctionnel, mais conduite cette fois à l'échelle de l'ensemble du bassin versant considéré, qui est celle à laquelle la stratégie globale de remédiation doit être adaptée. Elle nécessite de rentrer plus avant dans l'étude du dimensionnement des solutions envisagées pour en évaluer les capacités et leur adéquation aux scénarios hydro-sédimentaires à prendre en compte. La cohérence d'ensemble et la faisabilité des dispositifs imaginés doit aussi être vérifiée.

Le volet suivant ajoute une analyse structurale des ouvrages envisagés, afin d'évaluer leur probabilité de défaillance, compte-tenu de leurs caractéristiques de génie civil, du contexte géotechnique de leur environnement et des sollicitations hydrauliques auxquels ils peuvent être soumis, sans oublier bien sûr les sollicitations spécifiques aux écoulements torrentiels fortement chargés en sédiments. C'est le registre de la sûreté de fonctionnement des dispositifs qui est en jeu ici. À ce titre un certain nombre de défauts entrainant diverses pathologies ont pu être observés sur les stratégies expérimentées en Nouvelle-Calédonie, mais comme ils le sont aussi ailleurs. Ces défauts et pathologies, sur lesquels il conviendra d'être particulièrement vigilant, sont décrits plus en détail en Annexe 1.

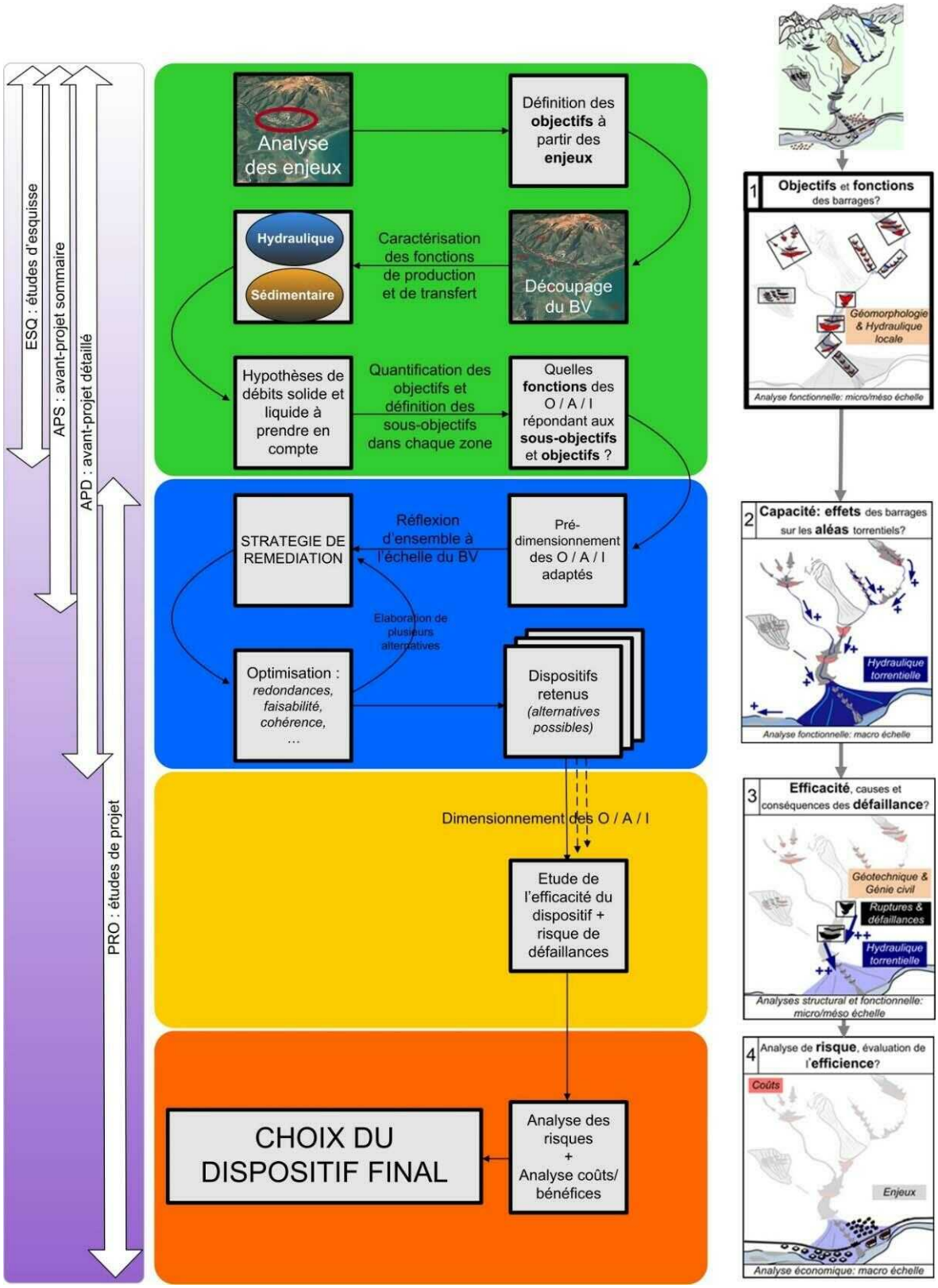


Figure 20 : **Logigramme d'aide à la décision pour l'élaboration de projets de remédiation** (d'après Burlat, 2017)

A droite, les quatre grandes phases de définition d'une stratégie de correction proposées par Piton et al, 2018

Enfin, l'efficience des stratégies envisagées ne peut être assurée qu'après une évaluation globale de risque, confrontant les pertes évitées par la stratégie de remédiation projetée aux coûts de sa mise en œuvre, en investissement et en fonctionnement. Cette analyse pourra s'appuyer sur des analyses de type coûts-bénéfices ou multicritères, dont l'adaptation au contexte particulier des crues torrentielles reste toutefois à poursuivre (Carladous, 2016), et qui devront être adaptées au contexte néo-calédonien.

Ce guide ne rentre pas dans le détail des méthodes mobilisables pour chaque étape. Une liste de références à des documents existant est proposée en bibliographie. Un exemple d'approche pour l'évaluation des volumes sédimentaires transportée, inspiré du travail réalisé dans le cadre du projet IMMILA, est toutefois illustré en annexe 2.

6.3.2. POINTS D'ATTENTION

6.3.2.1. Ordre des travaux

Lors de la mise en place d'une stratégie de remédiation, une attention particulière doit être portée à l'ordre de réalisation des travaux de construction des ouvrages, d'aménagements et/ou interventions. 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, la construction d'un barrage trop en amont est susceptible de générer un déficit de sédiment pour l'aval, entraînant une incision progressive se propageant vers l'aval et qui peut finir par entraîner la déstabilisation par affouillement de diverses infrastructures, y compris le barrage en question.

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 de matériaux et au contexte afin d'optimiser l'ordre des constructions, dont les possibilités seront aussi nombreuses qu'il y a de sites / de cas / d'environnements différents.

6.3.2.2. Entretien des ouvrages et des aménagements

Il est fondamental de ne pas oublier que pour être efficaces, les ouvrages et les aménagements doivent être et rester en capacité de remplir la fonction attendue. Dans des contextes aussi complexes et exigeants que celui des bassins versants miniers, d'innombrables facteurs peuvent être à l'origine de dysfonctionnements de ces ouvrages ou aménagements. Outre les défauts et pathologies évoqués en annexe 1, on peut évoquer l'obstruction de passages busés, la déstabilisation des versants sur lesquels sont implantés les ouvrages, ou pour les plages de dépôt le fait tout simplement qu'elles soient trop remplies des dépôts des crues précédentes pour pouvoir retenir les apports d'une nouvelle crue. Une surveillance régulière de l'état des ouvrages et aménagements sur l'efficacité desquels on compte est donc indispensable, comme l'est la réalisation des opérations d'entretien requises pour qu'ils remplissent en permanence leur fonction.

6.3.2.3. 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 rapidement 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 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 Nakalé). Tout est alors à recommencer, impliquant de réserver des budgets souvent annuels aux travaux de curage. Une stratégie de remédiation davantage pérenne, sur le long terme, sera donc bien sûr toujours préférable à un curage qui ne reste efficace qu'en cas de crue moyenne.

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 de ce dernier résultant du curage. Il est donc primordial d'évaluer les conséquences que peut entraîner 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).

6.3.2.4. Protection contre les inondations et surengravement

Surengravement ou pas, la Nouvelle-Calédonie a toujours été et reste un territoire largement exposée à des précipitations violentes, notamment cycloniques ou générées par des

dépressions tropicales. C'est également un territoire montagneux, dont le relief entraîne la formation de crues soudaines et d'écoulements rapides dans les bassins versants. En conséquence de quoi, même dans la situation idéalisée d'une remédiation au surengravement parfaite, le risque d'inondation n'en sera pas supprimé pour autant.

La prévention du risque d'inondation ne peut donc en aucun cas se réduire à l'adoption de mesures de remédiation au surengravement. 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 surengravement sur l'intensité de ces crues et des dommages qu'elles provoquent est discutable, d'autres leviers[16] de la prévention des risques devront être mobilisés. En particulier des mesures à caractère réglementaire relative à l'usage et l'occupation des sols, telles que le Plans de Prévention des Risques d'Inondation métropolitains (PPRI), devrait être relativement incontournables.

6.3.2.5. Observation, suivi, modélisation

Sur le plan technique, les stratégies de remédiation les plus efficaces seront celles qui pourront s'appuyer sur une bonne connaissance des phénomènes hydro-sédimentaires et une compréhension du fonctionnement du bassin versant. A la base cela repose sur l'existence de données d'observations ou de mesures in situ, disponibles sur des durées suffisamment longues, qui restent malheureusement bien rares en Nouvelle-Calédonie. Combler ce déficit lorsque cela s'avèrera nécessaire doit rester une préoccupation prioritaire dans tout projet de remédiation. Ce ne sont aussi que de telles données qui permettront la validation des outils de modélisation existants, nécessaire pour développer ces outils de modélisation dans une optique opérationnelle, en intégrant les composantes spécifiques aux zones minières en exploitation.

[16] *Rappelons qu'en métropole, la politique de prévention des risques naturels repose sur 7 piliers complémentaires :*
La connaissance des aléas et des enjeux / La surveillance, la prévision, la vigilance et l'alerte / L'éducation et l'information préventive des citoyens / La maîtrise de l'urbanisation et du bâti par la réglementation et les plans de prévention des risques / La réduction de la vulnérabilité / La protection / La préparation aux situations d'urgence

7. CONCLUSION

Sans aucun doute, les stratégies de remédiation les plus efficaces seront celles qui seront les plus adaptées aux attentes des populations, qui pourront s'appuyer sur une bonne connaissance des enjeux et une bonne compréhension des perceptions des populations concernées. Une bonne stratégie de remédiation, susceptible d'être portée par un bon projet technique, ne saurait se contenter d'une instruction strictement technique.

Les études techniques sont nécessaires pour l'établissement du diagnostic de surengravement du cours d'eau étudié, la construction de scénarios de crues à prendre en compte, la conception des dispositifs et leur dimensionnement sur le plan fonctionnel et structural. À chaque étape, ces études doivent s'appuyer sur les enjeux auxquels les acteurs, notamment les populations, sont confrontés. De plus, leurs résultats doivent être partagés, confrontés aux perceptions et enrichis par l'expérience des populations et des acteurs locaux.

C'est l'objectif et l'ambition des démarches et approches méthodologiques proposées dans ce guide.

8. RÉFÉRENCES

8.1. RÉFÉRENCES CITÉES DANS LE RAPPORT

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

Bertrand, M., Liébault, F. (2018). - Active channel width as a proxy of sediment supply from mining sites in New Caledonia. *Earth Surface Processes and Landforms*.

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.

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-Âge et à l'époque Moderne. Bulletin de la Société Géographique de Liège, 25: 145-157.

Burlat, T. (2016) - « Gestion du passif de l'activité minière et remédiation (engravement et sédimentation) en Nouvelle-Calédonie », rapport de fin d'études Grenoble INP, ENSE3, 3ème année.

Carladous, S. (2013) - Analyse critique des méthodes d'évaluation de l'efficacité économique des mesures de protection contre les risques naturels en montagne. Mémoire de Master 2 Recherche de Géographie, Université Paul Valéry Montpellier III

Carladous, S., Tacnet, J.-M., Batton-Hubert, M., Dezert, J., Marco, O. (2017) – Managing torrential mountain watersheds: A new conceptual integrated decision-aiding framework. Land Use Policy, Elsevier, 2017

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

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.

Drain, P. (2016) - Analyse historique des changements fluviaux de la Thio et de la Tôdré (Nouvelle-Calédonie), mémoire de fin d'études, Conservatoire National Des Arts Et Métiers, École Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, 56p.

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.

Fauchard C., Mériaux P. (2004) - Méthodes géophysiques et géotechniques pour le diagnostic des digues de protection contre les crues - Guide pour la mise en œuvre 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

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 surengravées de la Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) - Aptitude à l'exploitation pour granulats. Rapport BRGM/ RP- 62297-FR, p., fig

Garcin M., Richard D., Liébault F., Recking A., Piton G., Sabinot C., Worliczek E., Lesimple S., Bertrand M., Gastaldi Y., Burlat T., Gosset L., A. Pidjo A. (2017) – Gestion du passif minier – Rapport scientifique. CNRT « Nickel & son environnement ». 131 pages, 42 fig., 18 Tab.1 ann.

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

Gilbert, G.K. (1914) - The transportation of debris 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.

Gosset, L. (2016) - « 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 », rapport de Master d'anthropologie appliquée, Université de Lyon 2

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.

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.

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.

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. CEMAGREF 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.

Pidjo, A.-T. (2016) - « 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 », Rapport de Master EDTS, Muséum national d'histoire naturelle de Paris

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., Carladous, S., Marco, O., Richard, D., Liébault, F., Recking, A., Quefféléan, Y., Tacnet, J.-M. (2018) - Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives. La Houille Blanche, 2018 (en relecture)

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.

8.2. AUTRES RÉFÉRENCES UTILES

8.2.1. DOCUMENTS TECHNIQUES

8.2.1.1. Généralistes

N. Mathys, N. Caze, D. Richard (2015) - Suivi Hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers, guide méthodologique. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel & son environnement. 66 pages

Malavoi J.R., Garnier C.C., Landon N., Recking A., Baran P., (2011) -Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. Onema. 216 pages

Recking, A., Richard, D., Degoutte, G., coord. (2013) – Torrents et rivières de montagne – dynamique et aménagement. Editions Quae, 333 p.

8.2.1.2. Correction des ravines et stabilisation du lit des rivières

Lòpez Cadenas de Llano, F. (1988) - Correction des torrents et stabilisation des lits. Page 182. FAO (Food Agriculture Org.).

Chatwin, S. C., Howes, D.E., Schwab, J.W. and Swanston, D.N. (1994) - A Guide for Management of Landslide-Prone Terrain in the Pacific Northwest. Ministry of Forests, 31 Bastion Square, Victoria, British Columbia, V8W 3E7.

Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J. and Rudolf-Miklau, F. (2009) - Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Pages 1–211. Ernst Sohn.

Conesa-Garcia, C., and Lenzi, M.A. (2013) - Check dams, morphological adjustments and erosion control in torrential streams. Pages 1–339 . Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY.

Piton, G., Carladous, S., Recking, A., Liébault, F., Tacnet, J.M., Kuss, D., Quefféléan, Y., and Marco, O. (2017) - Why do we build check dams in Alpine streams? An historical perspective from the French experience. Earth Surface Processes and Landforms 42:91–108.

8.2.1.3. Endiguements et chenalisations

CIRIA, Ministry of Ecology, USACE (2013) - The International Levee Handbook. CIRIA, 1348 p. ISBN 978-0-86017-734-0 (version française en cours) (https://www.ciria.org//ciria/Resources/Free_publications/I_L_H/ILH_resources.aspx)

CIRIA, CUR, CETMEF (2009) - Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual, P09-01, CETMEF, Compiègne

CIPC (2013) - La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers - Recommandations de la Commission pour la protection contre les crues (CIPC). Wasser Energie Luft 105:122–132.

Bonin, L., Evette, A., Frossard, P.A., Prunier, P., Roman, D., and Valé, N. (2012) - Genialp : Génie végétal en rivière de montagne - connaissance et retour d'expériences sur l'utilisation d'espèces et de techniques végétales : végétalisation de berges et ouvrages bois. European Union and Swiss Confederation.

Vennetier, M., Mériaux, P., Zanetti, C. (2015) - Gestion de la végétation des ouvrages hydrauliques en remblai. Cardère éditeur, Irstea Aix-en-Pce, 232 p.

8.2.1.4. Pièges à sédiments et flottants

Gachet, J. N. (1982) - Correction torrentielle : conception des ouvrages de défense passive. CEMAGREF GRENOBLE PEGR.

VanDine, D. F. (1996) - Debris Flow Control Structures for Forest Engineering. Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, BC.

NILIM. (2007) - Manual of Technical Standards for Establishing Sabo Master Plans for Debris Flows and Driftwood. .National Institute for Land and Infrastructure Management.

Moase, E. (2017) - Guidance for debris-flow and debris-flood mitigation design in Canada. Ms Thesis. Simon Fraser university.

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

Piton, G., and Recking, A. (2016) - Design of sediment traps with open check dams. II: woody debris. Journal of Hydraulic Engineering 142:1–17.

Piton, G., Fontaine, F., Bellot, H., Liébault, F., Bel, C., Recking, A., and Hugerot, T. (2018) - Direct field observations of massive bedload and debris flow depositions in open check dams. Pages 1–8 in A. Paquier and N. Rivière, editors. E3S Web of Conferences. EDP Sciences.

8.2.1.5. Génie biologique

Crosaz Y., Rey F., Huyghe G., Cassotti F., De Matos M., Dehaye J.M., Cadière F., Bert V. (2014) - Règles professionnelles. Travaux de génie végétal. UNEP-AGéBio, 32 p.

Adam P., Debiais N., Gerber F., Lachat B. (2008) - Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques. La documentation française, 290 p.

Zeh H. (2007) - Génie biologique. Manuel de construction. EFIB, 441 p.

8.2.2. RAPPORTS

M. Allenbach et coll. (2015) – Volume I - Rapport de Synthèse. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers». CNRT « Nickel & son environnement. 55 pages.

M. Allenbach et coll. (2015) – Volume II : ANNEXES – Rapports thématiques. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers». CNRT « Nickel & son environnement.

UNC (2012) - Convention HYDROMINE. Rapport de Synthèse 2009-2012. Convention DAVAR, UNC, CFTMC. Rapport 99p et 15 annexes

(ftp://ftp.gouv.nc/DAVAR/Etudes_GP/Hydraulique/Hydromine/Rapport_Hydromine_synthese_2009_2012.pdf)

8.2.3. SITES WEB :

D'autres références utiles pourront être trouvées à partir de différents sites Web :

- https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/ouvrages-hydrauliques-barrages-et-digues

ANNEXE 1

DÉFAUTS ET PATHOLOGIES CONSTATÉS

La fiabilité, l'efficacité fonctionnelle comme structurelle et la durée de vie d'un ouvrage, d'un aménagement ou même d'une 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 surdimensionner 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 chaque crue. Dans de nombreux cas des travaux réalisés en urgence doivent aujourd'hui être repris pour des raisons de sous-dimensionnement ou de mauvaise fonctionnalité, engendrant évidemment de nouveaux coûts.

MOBILITÉ DES ENROCHEMENTS

Une majeure partie des pathologies observées à l'occasion de visites de sites 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 a été observé 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 allant parfois 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.

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 risques 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 d'une bêche en béton ou en palplanches 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).

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 n'a été prise (ou de trop légères si le dimensionnement est insuffisant), 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 adaptée aux contraintes hydrauliques, sans quoi c'est tout ou partie de la piste qui pourrait être endommagée.

AFFOUILLEMENT

Le phénomène d'affouillement rejoint le type de pathologie engendrée par l'érosion régressive. Il consiste en 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 parafouilles existent et viennent en complément d'un ancrage solide (et profond) de chaque ouvrage ou aménagement concerné. Ainsi, il est fortement conseillé de prévoir *a 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 est 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 continu de l'écoulement et des débits minimum aux extrémités des ailes, ainsi qu'un enracinement profond et solide de l'ouvrage dans les berges.

ANNEXE 2

UNE METHODE D'ESTIMATION DES VOLUMES DE SEDIMENTS TRANSPORTÉS[17]

Nous présentons dans cette annexe une méthode d'estimation des flux de sédiments transportés par **charriage**, c'est-à-dire de la charge grossière (depuis les sables jusqu'aux blocs) se déplaçant près du fond, et responsable des changements de la morphologie du lit des cours d'eau.

La méthode proposée est classique, et relie la force hydraulique de l'écoulement à un flux de sédiments en mouvement, ce qui se fait via deux lois :

- **une loi de frottement** : elle transforme le débit (Q) s'écoulant sur la surface rugueuse du lit en force F ; on parle plus couramment de contrainte τ, qui n'est autre que la force divisée par la surface du lit (la force exercée par m²). La rugosité du lit dépend de la granulométrie des sédiments.
- **une loi de transport** : elle donne une estimation du flux de matériaux que cette force de l'écoulement est capable de mobiliser

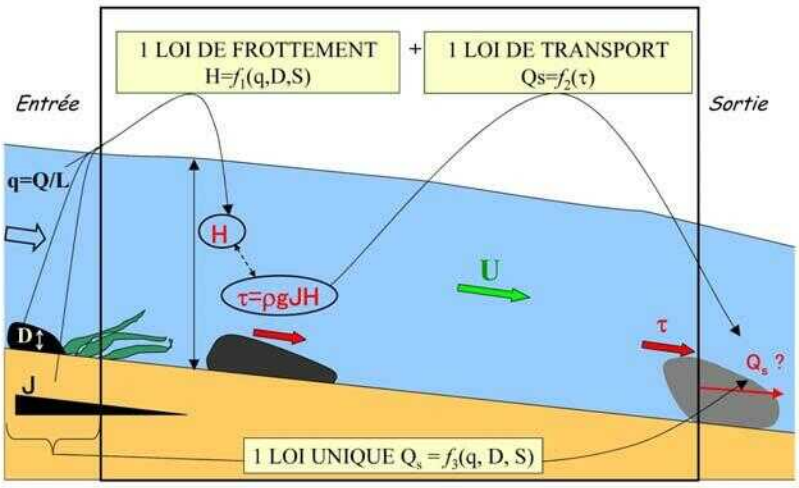


Figure 1 : **Principe de modélisation de l'hydraulique et du transport solide en rivière**
(Extrait du guide Onema : Éléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière)

La Figure 1 schématise cette approche : ce qui est présenté à l'intérieur du cadre est calculatoire, mais le but ici n'étant pas de faire du lecteur un spécialiste du calcul hydraulique, cette partie pourra être prise en charge par le programme *BedloadWeb* disponible en ligne sur internet (http://www.bedloadweb.com/) et spécialement conçu pour assister les non spécialistes ; des guides d'approfondissement sont par ailleurs disponibles (Malavoi, Garnier

[17] *Une présentation plus détaillée de l'application de cette approche à un cas concret, en l'occurrence celui de la Thio, pourra être trouvée dans le rapport scientifique du projet IMMILA*

et al. 2011, Recking, Richard et al. 2013). Nous allons dans la suite plutôt insister sur ce qui est représenté hors du cadre : la collecte des données et l'interprétation des résultats. Toute étude doit impérativement commencer par une **reconnaissance complète** du cours d'eau. Cela consiste en général à parcourir le cours d'eau à pied et à recueillir un maximum d'informations (avec prise de notes et photos) : zones de forte érosion (reconnaissables par leurs berges abruptes voire verticales) ou de dépôt, état de la végétation, repérage de laisses de crues (marques laissées dans les arbres par exemple). En particulier il sera important d'apprécier l'état de connexion du cours d'eau avec des zones de fourniture sédimentaire (pour schématiser, on peut aisément comprendre que la présence d'un « robinet à sédiment » en amont expliquera la présence de dépôts en aval).



Figure 2 : **Exemple de connexion sédimentaire sur la Néburu, alimentée en sédiments depuis un de ses affluents en rive gauche**

L'idéal, pour tirer au mieux parti d'une telle expertise de terrain, est d'avoir en tête le **principe d'équilibre** et sa représentation par la balance dite de Lane (Lane, 1955), qui nous dit qu'un cours d'eau cherchera toujours à tendre vers un équilibre entre sa puissance disponible (la pente x le débit) et le transport solide : une déstabilisation de l'un ou l'autre de ces termes (de façon naturelle ou anthropique) conduira inexorablement le cours d'eau à rechercher un nouvel équilibre en modifiant à nouveau l'un ou l'autre des termes. Avec ce principe en tête, on peut par exemple aisément comprendre, sans aucun calcul, que sur un tronçon situé en aval d'un ouvrage de rétention des sédiments, le transport solide sera réduit, et que, par conséquent, la rivière cherchera à diminuer sa puissance pour rétablir l'équilibre (ce qui en général se fait via la pente par incision du lit, car le débit, lui, est imposé par l'hydrologie).

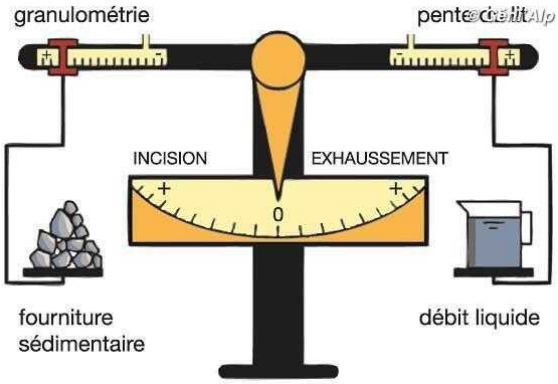


Figure 3 : **La balance de Lane**

Une bonne reconnaissance de terrain permet en général de se faire une représentation assez précise du fonctionnement du cours d'eau et, à ce stade, on peut considérer que la moitié du

travail a été réalisée. Vient ensuite, et cela de façon assez logique avec la connaissance déjà acquise, **le choix du ou des tronçons** où seront faits les calculs. Par construction, les lois de transport relient le flux de matériaux transporté à un débit dans une **section auto-formée dans ses alluvions**. Concrètement cela revient donc à choisir des portions du lit où la morphodynamique est active, ce qui se traduit par la présence de sédiments meubles, visible sur des zones privilégiées de dépôts (bancs sédimentaires dans les méandres…). Faire un calcul sédimentaire à partir de données collectées sur une zone rocheuse, ou pavée (lit tapissé de gros blocs qui ne bougent plus), serait un non-sens. Il faudra bien entendu éviter les sections dont la géométrie a été remaniée par l'homme.



Figure 4 : **Exemple de section auto-formée dans ses alluvions (La Thio)**

Une fois que les tronçons d'étude sont localisés, il faut procéder à la collecte des données nécessaires aux calculs. La Figure 1 indique qu'au moins 3 données sont indispensables : le débit, la géométrie du lit et la granulométrie des sédiments.

La mesure de la géométrie du lit consiste à mesurer la **pente en long locale** (sur une longueur égale à au moins 10 fois la largeur du lit) ainsi que la topographie de la **section en travers**. Cette collecte ne présente pas a priori de difficulté majeure. Les données peuvent être rapatriées sur *BedloadWeb* au format texte.

La mesure de la **granulométrie du lit** est par contre un exercice plus délicat, qui peut être très impactant sur les résultats. La difficulté ne réside pas dans la mesure en soi, car un protocole simple a été proposé et standardisé au niveau international : le comptage de Wolman (Wolman, 1954). Le principe consiste à collecter au hasard 100 cailloux, sur lesquels on mesure l'axe médian grâce une grille calibrée (Figure 5 ; le plan de cette grille que l'on peut découper dans une plaque aluminium est disponible sur *BedloadWeb*). La difficulté réside plus dans le choix des transects où réaliser les mesures ; autant que possible il faut multiplier les mesures sur un même site (compter 30 mn en moyenne pour une mesure de 100 cailloux). Il faut qu'au final, la courbe granulométrique soit représentative de toutes les tailles présentes sur le tronçon d'étude (y compris les sables). Le site *BedloadWeb* propose un onglet pour gérer le traitement de ces données granulométriques.



Figure 5 : **Mesure de la taille d'un caillou**

La connaissance de l'**hydrologie** n'est pas simple, et le type de données à récolter dépend des objectifs de l'étude. Pour une étude évènementielle (reconstitution d'une crue passée par exemple), il faudra recueillir les débits relatifs à l'évènement en question ou reconstruire un hydrogramme à partir des modèles régionaux (se rapprocher de la Davar pour les pratiques propres à la Nouvelle-Calédonie) et des laisses de cette crue ; il en sera de même pour l'étude des effets d'une crue théorique centennale. Par contre, et c'est ce qui nous intéresse plus ici, l'estimation du volume moyen annuel transporté nécessitera de collecter des données pluriannuelles mesurées sur le bassin d'étude ou sur un bassin versant voisin. Ces données seront adaptées aux sous-bassins d'étude grâce à une loi de proportionnalité prenant en compte le rapport des surfaces des bassins versant (formule de Myer, expliquée dans *BedloadWeb*).

Lorsque l'hydrologie, la granulométrie, et la géométrie du lit ont été saisies sur *BedloadWeb*, le programme découpe l'hydrogramme selon un pas temporel régulier, puis calcule l'hydraulique et le volume transporté pour chaque pas de temps. Finalement la somme des volumes élémentaires donne un volume global transporté. Selon la durée de la chronique disponible, on peut envisager deux approches. Des chroniques courtes (inférieures à 30 ans), ne se prêtent pas à une analyse statistique. Dans ce cas le volume calculé sera un cumul de volumes calculés sur l'intégralité de la chronique, et la moyenne annuelle correspondante sera propre aux N dernières années concernées, sans pour autant avoir de valeur statistique. Par contre lorsque la longueur de la série de données se prête à un ajustement statistique, la chronique des débits peut être étendue aux fréquences rares grâce à des lois statistiques adaptées. Le calcul de transport solide sera alors réalisé pour chaque débit de l'analyse en fréquence, et le volume annuel cumulé aura valeur statistique. Cette approche présente aussi l'avantage de permettre d'identifier les évènements qui transportent le plus : une crue rare aura un débit fort mais qui s'exprimera sur une durée relativement courte en moyenne (une crue centennale sera dépassée en moyenne 1 fois tous les 100 ans). Le volume de sédiments transporté correspondant (débit solide x la durée) sera en général faible en comparaison au volume transporté par des crues courantes qui génèrent des débits solides moindres mais sur des durées bien plus longues en moyenne. Différentes études portant sur des zones tempérées ont ainsi conclu que les crues morphogènes (responsables du maximum de transport et de la morphologie des cours d'eau) étaient les crues de période de retour de l'ordre de 2 à 5 ans (les crues rares ont bien sûr des effets morphogènes impressionnants, avec des ruptures de berges ou d'ouvrages, mais ce sont des épiphénomènes vites effacés dans le temps). Les choses pourraient être différentes en climat tropical humide.

Une dernière difficulté consistera à apprécier la qualité de ces calculs. En effet, le programme *BedloadWeb* renvoie les résultats calculés avec la plupart des formules standard, qui peuvent hélas donner des résultats très différents. Il appartiendra à l'utilisateur de retenir le volume qui lui semble plus réaliste. Cela pourra se faire en considérant la cohérence du comportement des formules avec la réalité du terrain, acquise lors des études de reconnaissance préalables. Dans l'idéal, on pourra également valider les calculs avec des mesures de transport solide mais l'exercice est très coûteux et difficile (sauf si on dispose de volumes cumulés dans une zone de dépôt, derrière un barrage par exemple). Des méthodes nouvelles comme l'acoustique ou la sismique pourraient devenir opérationnelles dans un avenir proche. Une alternative consiste à comparer le site d'étude avec d'autres sites dans le monde pour lesquels la validité des formules de transport peut être appréciée par comparaison avec des valeurs de débit solide mesuré (base de données accessible dans *BedloadWeb*). Dans tous les cas, ce type de calcul ne pourra donner que des ordres de grandeur.

Références :

Lane, E. W. (1955). "The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering." Procedings of ASCE **81**: 1-17.

Malavoi, J.-R., et al. (2011). Elements de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, ONEMA, ISBN: 978-2-9516393-5-5.

Recking, A., et al. (2013). Dynamique et aménagement des torrents et rivières de montagne, QUAE.

Wolman, M. G. (1954). "Method of sampling coarse river bed material." Transactions of the American Geophysical Union, **35**(6): 951-956.

CNRT NICKEL & son environnement

