

Identification des rivières sur- engravées de la Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie)

Aptitude à l'exploitation pour granulats

BRGM/RP-62297-FR
Septembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2012

M. GARCIN, S. LESIMPLE

Vérificateur :

Nom : Pierre MAURIZOT

Date : 9 septembre 2013

Signature :



Approbateur :

Nom : Jean Luc Foucher

Date : 16 septembre 2013

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Nouvelle-Calédonie, Granulats, Rivière, Transport solide, Érosion, Décharges minières, Cyclones, sur-engravement, impact mines, cartographie, amiante.

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

Garcin M., Lesimple S. (2013) – Identification des rivières sur-engravées de la Grande-Terre (Nouvelle-Calédonie) - Aptitude à l'exploitation pour granulats. Rapport BRGM/RP-62297-FR, 95 p., 84 fig., 2 tab.

Synthèse

Deux études réalisées en 2009 et 2010 sur les rivières de la Grande-Terre (Rapport BRGM/RP-58531-FR et BRGM/RP-57268) ont consisté, entre autre, à définir et à fournir les premiers éléments d'appréciation et le cahier des charges d'une cartographie d'aptitude / contrainte des cours d'eau à l'exploitation des matériaux en lit vif. Ces études s'inscrivaient dans une démarche plus amont de gestion de la ressource en granulats de rivière du territoire qui pourra être intégrée dans un futur schéma de carrière. Or, ce type d'extraction « au fil de l'eau » pose plusieurs problèmes importants. En effet, l'impact de ce type d'extraction sur l'environnement est non négligeable : perturbation des cours d'eau, influence sur les crues, détérioration de la ressource en eau souvent exploitée par pompage AEP à proximité, remontées du biseau salée dans les zones proches des embouchures, impacts sur les systèmes fragiles tels que les mangroves puis le lagon situés en aval. L'exploitation d'alluvions en lit mineur engendre donc très fréquemment des répercussions plus ou moins néfastes d'une part sur la rivière elle-même, mais aussi sur l'ensemble des enjeux qui y sont liés. C'est ce qui a justifié depuis la réalisation de ces études, l'arrêt du renouvellement des autorisations d'exploitation en lit vif par l'administration calédonienne.

Toutefois, l'une des caractéristiques des systèmes alluvionnaires calédoniens est la présence, dans un certain nombre de cas, d'anciennes décharges minières à l'amont des 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 alors qualifiés de rivières sur-engravées. Dans certains cas, le sur-engravement peut porter préjudice à la société en augmentant de façon significative l'aléa inondation ou en mettant en danger les ouvrages d'art par exemple. Ce sont les seuls cas où des exploitations de granulats en rivière pourraient être justifiées.

L'objectif de la présente étude est de fournir une méthode permettant de certifier le sur-engravement puis de déterminer quelles sont les rivières de la Grande-Terre qui sont concernées et les conditions générales de ce sur-engravement.

Après avoir défini le sur-engravement, nous avons identifié les rivières sur-engravées de la Grande-Terre, qualifié son ampleur puis cartographié son extension rivière par rivière. Une analyse des provenances des matériaux ainsi que des vecteurs du sur-engravement pour chaque segment de rivière a été réalisée. Parallèlement, des observations hydro-géomorphologiques et lithologiques ont été réalisées sur le terrain.

Cette étude a permis de montrer la variabilité du sur-engravement des rivières de la Grande-Terre qui est due à la diversité des contextes géologique et minier de chaque bassin versant. En effet, certains bassins sont entièrement compris dans le massif minier alors que d'autres ne le sont que très partiellement. Pour chaque rivière, l'ampleur du sur-engravement (épaisseur, surface occupée) et sa répartition spatiale sont fortement contraintes par cette organisation. De même, pour chaque secteur du lit alluvial, la granulométrie et la maturité des éléments alluvionnaires sont fortement liées à la proximité et à la diffusion spatiale des zones de production des matériaux.

De surcroît, la couverture latéritique présente sur la bassin versant est un facteur qualitatif important du sur-engravement. En effet, les bassins versants offrant de grandes et épaisses surfaces latéritiques sont généralement moins affectés par un massif engraissement des lits par des blocs, des galets, graviers et sables mais plutôt affectés par l'importante quantité de fines

latéritiques se déposant et transitant par la rivière et responsable d'une dégradation importante des milieux aquatiques (alluviaux et côtiers ; la Coulée par exemple).

Les géométries et configurations entre les zones de productions, les zones de transfert et les zones d'accumulation sont variées. Ainsi certaines zones de sur-engravées sont en lien direct avec les zones de production de matériaux (exemple : Thio plateau, Wa Dibou...) alors que d'autres comportent plusieurs zones d'apports distribuées et distales (la Népoui par exemple).

La distribution des zones de production de matériaux influe sur les modalités de la recharge des lits en sédiments. Il faut par ailleurs noter les aspects temporels de la recharge en matériaux avec par exemple des zones sur-engravées en cours de rechargement (par exemple : Creek Wellington, Poro...) et d'autres zones dont le sur-engravement semble au moins en partie hérité. Dans ce cas, la phase de d'engravement serait plus ancienne (quelques années à décennies). Cette ancienneté serait liée d'une part à un pic production passé des mines qui aurait mis à la disposition des creeks et des rivières une quantité importante de matériaux et d'autre part à l'occurrence de cyclones et/ou de dépressions tropicales qui auraient déclenchés de fortes érosions des mines et des décharges et conjointement d'importants transports solides dans les rivières (exemple de la Ouenghi, de la Nakare...).

L'étude réalisée montre que la quantité de matériaux présente dans les creeks et rivières sur-engravés est importante toutefois se pose le problème de l'exploitabilité de ces sur-engravements.

En premier lieu, les sites sur-engravés ne sont pas toujours localisés dans les mêmes secteurs que les besoins (bassins de la Thio ou de la Kouaoua par exemple). Leur exploitation impliquerait de les transporter ce qui pose la question de la viabilité économique de tels projets (le coût du transport rendrait probablement le prix du granulats non concurrentiel). Par ailleurs, le transport d'importantes quantités de granulats peut potentiellement créer des nuisances environnementales si le transport est envisagé par la route par exemple.

Une exploitation n'est envisageable que si le stock initial présent dans le lit est important et que son renouvellement par des apports de l'amont est régulier ou tout au moins fréquent. Il est donc primordial de s'assurer que le creek potentiellement exploité rempli ces conditions. L'exploitation doit par ailleurs prendre en compte les multiples contraintes et effets induits afin d'éviter, ou au moins de limiter, les effets néfastes sur d'autres compartiments du système (préservation des ressources en eau, dégradation environnementales, dégradation du fonctionnement hydrodynamique de la rivière, incidences sur des aléas, nuisances...). Un suivi régulier des exploitations nous paraît nécessaire afin de veiller à ce que les modes d'exploitation et les pratiques d'exploitation mises en œuvre soient adaptés afin de minimiser les impacts. L'exploitation des rivières sur-engravées doit donc être raisonnée et prendre en compte le volume exploitable, les modalités de l'exploitation, le respect des morphologies des lits et des fonctionnements hydrauliques et les paramètres de renouvellement de l'apport de matériaux.

Certains lits sur-engravés ont fait l'objet d'exploitation entre 2009 (date de la précédente étude) et 2012 (rivières : Hwa No, Oue Tanquéa, Fouachiamboué...). Une analyse de l'évolution des lits, des paramètres environnementaux et des impacts générés par ces exploitations ainsi que l'analyse des retours d'expérience des exploitants serait très informatif.

Lors de cette étude nous avons signalé la présence quasi-systématique de minéraux amiantifères dans les galets et graviers alluvionnaires. Cette présence pose plusieurs questions auxquelles il paraît nécessaire de répondre dans le cadre de la possible exploitation des zones sur-engravées :

- Quel pourcentage représente les minéraux amiantifères dans les alluvions totales ?
- Quelle est l'abondance de minéraux amiantifères dans la fraction fine du sédiment, sous quelle forme et comment se comportent-ils lors de leur transport d'amont en aval ?
- Quelles incidences potentielles ont ces minéraux amiantifères alluvionnaires sur les risques sanitaires pour les exploitants de granulats ? les utilisateurs de ces granulats ? La population présente autour des exploitations ?

La réponse à ces questions permettrait de savoir dans quelle mesure les alluvions issues du sur-engravement des rivières sont exploitables.

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	13
1.1. Problématique.....	13
1.2. Objectifs généraux de l'étude	13
1.3. Déroulement du projet.....	13
2. RAPPEL SUR LE FONCTIONNEMENT GÉNÉRAL DES RIVIÈRES CALÉDONIENNES.....	15
2.1. Fonctionnement du transport solide dans les rivières.....	15
2.2. Remarques sur le fonctionnement des rivières calédoniennes	18
3. MÉTHODE DE DÉTERMINATION DU SUR-ENGRAVEMENT DES RIVIÈRES	19
3.1. Introduction.....	19
3.2. Critère de détermination du sur-engravement.....	19
3.2.1. Analyse des surfaces mises à nue par les exploitations minières	19
3.2.2. Analyses des ortho-photos ou des images satellites	21
3.2.3. Observation de terrain	21
3.2.4. Les analyses rétrospectives de l'évolution des lits de rivières	22
3.3. Classification du sur-engravement des rivières	23
3.4. Cartographie des rivières sur-engravées.....	23
3.4.1. Versant : description de la table attributaire des entités numérisées	24
3.4.2. Creek : description de la table attributaire des entités numérisées.....	24
3.4.3. Sur-engravement : description de la table attributaire des entités numérisées	25
3.4.4. Lithologie du bassin versant.....	26
3.4.5. Utilisation et interprétation de la cartographie	27
4. RIVIÈRES SUR-ENGRAVÉES ÉTUDIÉES EN 2012.....	33
4.1. La Houailou	34
4.2. La Thio.....	35
4.2.1. Creeks Xwe Méa, Xwe Cetore Kwe, Xwe Pexwawi.....	35
4.2.2. La Nakaré	35
4.2.3. La Neburu.....	37
4.2.4. Les creeks du secteur aval en rive gauche de la Thio.....	39
4.2.5. La Thio.....	42
4.3. La Poya.....	42

4.4. La Kouaoua	44
4.4.1. La Kouaoua aval	44
4.4.2. Wayo Wia / Kaviju	46
4.5. La Ouenghi	51
4.6. La Rivière des Pirogues	54
4.7. La Moindah	55
4.8. La Népoui	58
4.9. La Muéo	60
4.10. La Dothio	65
4.11. La Coulée	66
4.12. La Monio	68
4.13. La Wa Dibou	71
4.14. La Oue Tanquéa	73
4.15. La Troulala	75
4.16. La Waneubwayo	76
4.17. La Fouachiamboue	77
4.18. La Poro	81
4.19. Le creek Wellington	82
5. POTENTIEL POUR L'EXPLOITATION DE GRANULATS	85
5.1. CONDITIONS	85
5.1.1. LE PROBLÈME DE L'AMIANTE DANS LES ALLUVIONS.....	86
6. CONCLUSION	89
7. BIBLIOGRAPHIE	91

Liste des illustrations

Illustration 1 : Localisation des points d'observations sur les rivières et creeks calédoniens (2009-2012).	14
Illustration 2 : Schéma de fonctionnement du transport solide dans un hydrosystème calédonien.....	17
Illustration 3 : Carte des pourcentages de sols nus par bassin versant (Garcin 2010, les fortes valeurs en rouge indiquent un pourcentage de sol nu plus fort).	20
Illustration 4 : Données d'entrée et méthode de détermination puis de classification	21
Illustration 5 : Les différentes classes de lithologie simplifiée.	27
Illustration 6 : Exemple d'utilisation et interprétation de la cartographie : caractérisation du fonctionnement 1 – Production de sédiment ; 2 – Transfert, 3 – Accumulation lit étroit, 4 – Fort engrèvement,	28
Illustration 7 : Utilisation et interprétation de la cartographie : lithologie.	28
Illustration 8 : Localisation des bassins versants des rivières étudiées.	33
Illustration 9 : Sur-engrèvement dans le secteur aval du creek Wâkaï lors de sa traversée du haut du village (Pt196).	34
Illustration 10 : Veine de chrysotile dans un galet de péridotite de la Nakaré.	36
Illustration 11 : La Nakaré (bassin de la Thio) : extrait de la carte du sur-engrèvement.	37
Illustration 12 : Cône alluvial au débouché d'un creek (Xwe Kayu) dans le lit de la Neburu (Pt61).	38
Illustration 13 : Vaste zone d'atterrissement dans la Neburu.	38
Illustration 14 : La Neburu (Bassin de la Thio) : extrait de la carte du sur-engrèvement.....	39
Illustration 15 : Le creek Xwe Ngere à Thio : les verses minières (photo de gauche) vue du village,.....	40
Illustration 16 : La Xwe Ngere (Village de Thio, le point jaune pt52 correspond à la localisation	40
Illustration 17 : Rectification, curage et aménagements de la Bwa Néca.	41
Illustration 18 : Creek Tomuru (Thio) : carte des zones de production de matériaux,	41
Illustration 19 : La Poya : extrait de la cartographie du sur-engrèvement.....	43
Illustration 20 : Surengrèvement de la Wa Ke en amont de sa confluence avec la Poya (Pt90).	43
Illustration 21 : Travaux de recalibrage de l'aval du cours de la Wa Pukeme suite à son sur-engrèvement (Pt162).	45
Illustration 22 : Sur-engrèvement dans le segment amont de la Wa Pukeme (Pt164).	45
Illustration 23 : Lit de la Kaviju nettement sur-engravé.	46
Illustration 24 : Wayo Wia et Kaviju (bassin de la Kouaoua) : extrait de la carte du sur-engrèvement.	47
Illustration 25 : Curage, rectification et aménagement de piste dans le lit sur-engravé de la Wayo Wia (Pt171).	48
Illustration 26 : Lit sur-engravé de la Wayo Wia (Pt179).	48

Illustration 27 : Cône formé par les dépôts issus d'un éboulement dans le versant barrant la vallée de la Wayo Wia (vue de l'aval, Pt180).....	49
Illustration 28 : Lac de barrage en amont du cône - Vallée de la Wayo Wia.	49
Illustration 29 : Zone d'effondrement dans le versant au pied de la concession Newco 2.	50
Illustration 30 : Ouenghi : extrait de la carte de sur-engravement.	52
Illustration 31 : Engravement à gros galets, graviers et sables sur la Ouenghi moyenne (Pt66).52	
Illustration 32 : Engravement dans un secteur encaissé de la Ouenghi moyenne (Pt67).	53
Illustration 33 : Sur-engravement à gros galets (Ouenghi moyenne, Pt 72).	53
Illustration 34 : Tuilage des galets sur la Ouenghi moyenne (Pt72).....	54
Illustration 35 : Engravement dans un creek de la rivière des pirogues.....	55
Illustration 36 : Moindah (Yomaa et Nékéwé) : extrait de la carte de sur-engravement.	56
Illustration 37 : Confluence de la Yomaa et de la Nékéwé (Pt82).	57
Illustration 38 : Sédiments apporté par une creek drainant la zone Pinpin 1b (à gauche) et formant un cône à la confluence avec la Nékéwé (Pt86).	57
Illustration 39 : Bras Est de la Népoui : extrait de la carte du sur-engravement.	59
Illustration 40 : Bassin de piégeage de sédiments dans la branche Est de la Népoui (Pt131). ...	59
Illustration 41 : Dispositif de piégeage de la charge solide dans un creek en aval de la concession Surprise 2 Red, bras Est de la Népoui.	60
Illustration 42 : Muéo : extrait de la carte du sur-engravement.	61
Illustration 43 : Sur-engravement de la Muéo aval (Pt118).	62
Illustration 44 : Sur-engravement de la partie aval de la Muéo (Pt120).	62
Illustration 45 : Alluvions de la Muéo (Pt120), à noter la présence de sables et de graviers et..	62
Illustration 46 : Sur-engravement de la Muéo moyenne (Pt128).....	63
Illustration 47 : Lit sur-engravé de la Muéo moyenne (Pt129).....	63
Illustration 48 : Sur-engravement à alluvions grossières de la Muéo moyenne (Pt 129).....	64
Illustration 49 : Très important sur-engravement du bras secondaire de la Muéo (Pt130).	65
Illustration 50 : Douthio aval : extrait de la carte de sur-engravement.	66
Illustration 51 : Lavaka affectant les latérites dans le bassin de la Coulée (Pt45).	67
Illustration 52 : Érosion d'une berge latéritique par la Coulée (Pt45).	67
Illustration 53 : Carte lithologique du bassin versant de la Coulée.	68
Illustration 54 : Lit sur-engravé de la Monio (secteur aval), à noter le nivellement du lit et	69
Illustration 55 : Extrait de la carte de sur-engravement de la Monio.	70
Illustration 56 : Amont de la Wa Dibou : extrait de la carte du sur-engravement.	71
Illustration 57 : Amont du lit du creek ouest de Wa Dibou en aval des zones de production de matériaux (aval Pt95, le personnage donne l'échelle).	72
Illustration 58 : Destabilisation de versant contributive au sur-engravement de la Wa Dibou	72
Illustration 59 : Oue Tanquéa : extrait de la carte de sur-engravement.	73
Illustration 60 : Alluvions sur-engravées ayant été exploitée dans le Oue Tanquéa (Pt102).	74
Illustration 61 : Vue vers l'aval prise du front de l'exploitation de granulats sur la Oue Tanquéa (Pt103).	74

Illustration 62 : Vue vers l'amont du sur-engravement du lit en amont de l'exploitation	75
Illustration 63 : Sur-engravement de la Troulala en aval immédiat du captage d'eau (Pt105). ..	75
Illustration 64 : Barrage et captage sur la Troulala (Pt105).....	76
Illustration 65 : Modification, rectification et aménagement dans le lit de la Waneubwayo.	76
Illustration 66 : Incision du lit actuel dans une zone de lit sur-engravé plus ancienne de la Waneubwayo.	77
Illustration 67 : Fouchiamboue : extrait de la carte des zones sur-engravées.....	78
Illustration 68 : Bras nord-est de la Fouachiamboué en 2009 avant exploitation (2009-Pt120). 79	
Illustration 69 : Bras nord-est de la Fouachiamboué en 2012 en cours d'exploitation (2012 - Pt110).....	79
Illustration 70 : Bras nord-ouest de la Fouachiamboué en 2009 avant l'exploitation (2009 – Pt120).	80
Illustration 71 : Bras nord-ouest de la Fouachiamboué en 2012 en cours d'exploitation (2012 – Pt110).	80
Illustration 72 : Lit sur-engravé de la Fouachiamboué en amont du front d'exploitation (Pt111). 81	
Illustration 73 : Poro : extrait de la carte des zones sur-engravées.....	82
Illustration 74 : Curage de lit et rectification de tracé dans une zone sur-engravée de la Poro (Pt185).	82
Illustration 75 : Carte du sur-engravement du Creek Wellington.	83
Illustration 76 : Creek Wellington : sur-engravement avec travaux de rectification et zone d'apport.....	84
Illustration 77 : Coupe dans les alluvions du creek Wellington montrant les niveaux issus du sur-engravement surmontant les dépôts antérieurs (sous le carnet).	84
Illustration 78 : Galet de trémolite dans les alluvions de la Moindah (Pt81).	87
Illustration 79 : Galet avec veine de chrysotile dans les alluvions de la Muéo (Pt120).	88
Illustration 80 : Minéraux amiantifères dans les galets de la Muéo (Pt125).....	88
Illustration 81 : Plan à Trémolite sur un seuil rocheux dans le lit de la Muéo (Pt127).	88
Illustration 82 : Chrysotile dans galet de la Nakalé (Pt146).	88
Illustration 83 : Chrysotile dans un galet de la Nakalé (Pt149).	88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Pourcentage des surfaces occupées par les classes lithologiques simplifiées par bassin versant. En rouge lithologies dominantes, en orange lithologies fortement présentes, en jaune lithologies significativement présentes, en blanc lithologies peu représentées.	31
Tableau 2 : Surfaces totales de chaque bassin versant et des surfaces occupées par le sur-engravement. Classement par pourcentage de surengravement décroissant. .	32

1. Introduction

1.1. PROBLÉMATIQUE

Une étude générale sur les rivières de la Grande-Terre (Rapport BRGM/RP-58531-FR) a été menée en 2010 suite à celle de la rivière Tontouta en 2009 (Rapport BRGM/RP-57268-FR). Elle a consisté, entre autre à définir et à fournir les premiers éléments d'appréciation et le cahier des charges d'une cartographie d'aptitude / contrainte des cours d'eau à l'exploitation des matériaux en lit vif. Cette étude s'inscrivait dans une démarche plus amont de gestion de la ressource en granulats de rivière du territoire qui pourra être intégrée dans un futur schéma de carrière. Or, ce type d'extraction « au fil de l'eau » pose plusieurs problèmes importants. En effet, l'impact de ce type d'extraction sur l'environnement est non négligeable : perturbation des cours d'eau, influence sur les crues, détérioration de la ressource en eau souvent exploitée par pompage AEP à proximité, remontées du biseau salé dans les zones proches des embouchures, impacts sur les systèmes fragiles tels que les mangroves puis le lagon situés en aval. L'exploitation d'alluvions en lit mineur engendre donc très fréquemment des répercussions plus ou moins néfastes d'une part sur la rivière elle-même, mais aussi sur l'ensemble des enjeux qui y sont liés. C'est ce qui a justifié depuis la réalisation de ces études, l'arrêt du renouvellement des autorisations d'exploitation en lit vif par l'administration calédonienne.

Toutefois, l'une des caractéristiques des systèmes alluvionnaires calédoniens est la présence, dans un certain nombre de cas, d'anciennes décharges minières à l'amont des 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 alors qualifiés de rivières sur-engravées. Dans certains cas, le sur-engravement peut porter préjudice à la société en augmentant de façon significative l'aléa inondation ou en mettant en danger les ouvrages d'art etc. ; c'est le seul cas où des exploitations de granulats en rivière pourraient être justifiées.

1.2. OBJECTIFS GÉNÉRAUX DE L'ÉTUDE

L'objectif de la présente étude est de fournir une méthode permettant de définir le sur-engravement puis de déterminer quelles sont les rivières de la Grande-Terre qui sont concernées et les conditions générales de ce sur-engravement.

Il est donc nécessaire pour cela :

- définir ce qu'est le sur-engravement ;
- d'identifier les rivières sur-engravées ;
- classer dans la mesure du possible le niveau de sur-engravement ;
- cartographier et déterminer l'extension du sur-engravement.

1.3. DÉROULEMENT DU PROJET

Une mission de terrain a été effectuée du 19 novembre au 14 décembre 2012 en collaboration avec Stéphane Lesimple (géologie), Myriam Vende-Leclerc (géomatique) et Julie Jeanpert (hydrogéologie) du Service Géologique de Nouvelle-Calédonie (DIMENC). Lors de cette

mission 200 points d'observation ont été réalisés sur des rivières dans ou à l'aval d'une dizaine de massifs miniers (Illustration 1).

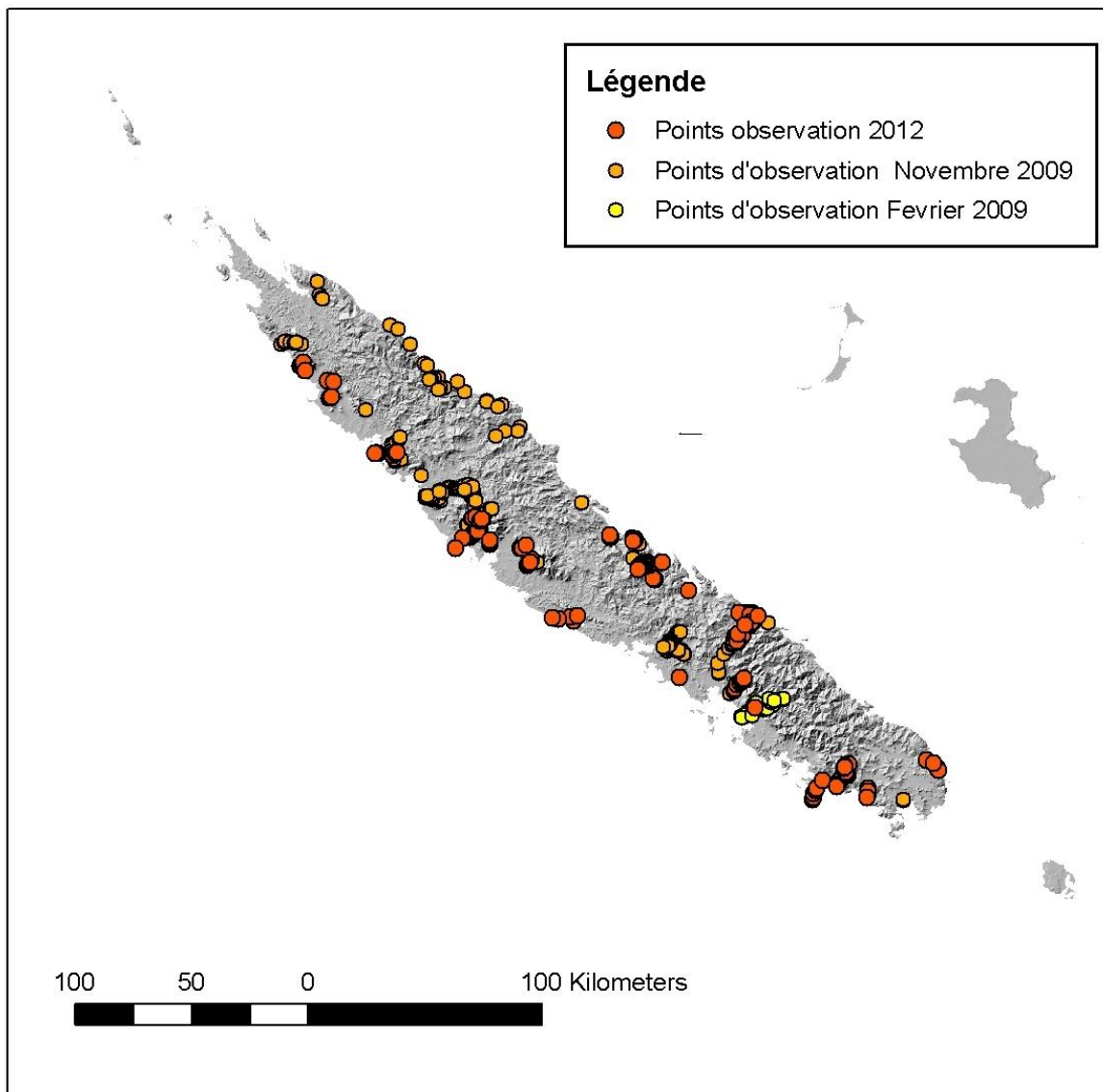


Illustration 1 : Localisation des points d'observations sur les rivières et creeks calédoniens (2009-2012).

Ces observations ont permis de recueillir des informations sur les morphologies des lits, les processus affectant les rivières (zone d'engravement, érosion..), les processus actifs sur les versants, une vision qualitative de la granulométrie des alluvions, la recherche systématique de la présence de minéraux amiantifères dans les galets alluvionnaires et toutes autres informations susceptibles d'être utiles à cette problématique

La seconde phase de l'étude a consisté, à l'aide des ortho-photographies et d'images satellites, à cartographier les extensions des sur-engravements, les segments de rivière participant au transfert des matériaux des zones de production vers les zones d'accumulation.

Ces cartographies associées aux observations de terrain ont permis de dégager les informations présentées dans ce rapport.

2. Rappel sur le fonctionnement général des rivières calédoniennes

Ce chapitre présente les grandes lois qui régissent le fonctionnement général des rivières calédoniennes et qui peuvent conduire, dans certains cas, au sur-engravement d'une partie ou de la totalité de ces rivières. Ce chapitre est issu en partie du rapport BRGM 2010.

2.1. FONCTIONNEMENT DU TRANSPORT SOLIDE DANS LES RIVIÈRES

Les déclencheurs de l'évolution morphologique dans les bassins versants et les transports solides associés dans les rivières sont les événements pluviométriques et plus particulièrement ceux se produisant durant les cyclones et dépressions tropicales (DT, Illustration 2).

L'occurrence d'événements pluvieux intenses va déclencher l'érosion des surfaces aussi bien naturelles que celles dégradées par l'activité extractive, les décharges minières et autres (pistes, etc.). Cette érosion va produire des matériaux qui seront transportés vers le bas des versants. La nature lithologique des formations présentées sur le bassin versant est donc un paramètre important car il conditionne en partie l'érodabilité et donc la capacité du bassin versant à fournir des matériaux aux rivières. De même, la surface occupée par les mines, les voies d'accès et les anciennes décharges minières vont conditionner fortement cette même capacité du bassin versant à fournir des matériaux aux rivières.

Ces événements météorologiques tels que les cyclones et les dépressions tropicales vont conditionner les débits dans les creeks et torrents. Ces débits vont générer un transport solide et la reprise des processus d'incision dans les zones qui y sont soumises. Ce transport solide permettra le transfert des sédiments des zones de production vers l'aval des creeks, puis dans les rivières principales.

Au niveau des principales rivières, ces épisodes pluvieux engendreront des crues que l'on pourra caractériser par leurs débits liquides. Ceux-ci détermineront la capacité de transport de la rivière dans ce segment (en fonction de sa pente) et pour ces mêmes conditions hydroclimatiques.

Le bilan de la charge solide disponible à un instant particulier et sur un segment particulier de la rivière s'établira à partir des apports latéraux issus des versants et des creeks, de la charge solide provenant des segments amont de la rivière et du stock alluvial présent en fond de lit. Le rapport entre la capacité de transport sur ce segment de rivière et entre la charge solide disponible conduira à un comportement différent de la rivière :

- Si la charge solide apportée par l'amont ou latéralement est déficiente, la rivière aura tendance à remobiliser les alluvions de son lit (la granulométrie concernée sera aussi fonction des paramètres de la crue) et à les transporter plus en aval. Dans ce cas, la rivière aura tendance à s'inciser dans son lit.
- Si la charge solide totale disponible est équilibrée par rapport à la capacité de transport, le transport solide s'effectuera sans prélèvement d'alluvions, les conditions sont alors équilibrées, le fond et les formes alluviales seront globalement stables.

- Si la charge solide apportée à la rivière est supérieure à sa capacité de transport ou que certaines granulométries sont trop élevées pour être mobilisées, le lit de la rivière aura tendance à s'engraver.

Le stock alluvial présent dans le lit des rivières est hérité des événements antérieurs qui se sont produits dans le bassin versant et dans la rivière elle-même (fortes crues, apports solides importants, etc.). De même, l'existence d'exploitations de granulats dans le lit mineur influe directement sur ce stock sédimentaire et peut donc, de fait, modifier le comportement de la rivière. Ces modifications pourront aussi induire des modifications du comportement des segments de rivières amont et aval (érosion régressive, progressive, etc.).

Les principales composantes de ce système peuvent donc être regroupées en :

- déclenchement des processus (pluviométrie liée aux cyclones et DT) ;
- production de matériaux (érosion des zones naturelles et surfaces dégradées) ;
- transfert de matériaux (dans les pentes et dans l'hydrosystème), puis éventuellement sédimentation.

Deux actions anthropiques exercées sur les bassins versants influent sur les quantités de matériaux dans ce système : en amont, les mines et les anciennes décharges qui participent à la production des matériaux et, en aval, les exploitations de granulats.

Les aménagements présents dans les rivières qu'ils soient hydrauliques (barrages, épis, digues...) ou de franchissement (radiers, ponts...) influent quant à eux sur les modalités du transport des matériaux. Ils peuvent localement modifier le transfert amont-aval des matériaux (piégeage) ou modifier la dynamique de la rivière.

La connaissance des cyclones passés revêt un grand intérêt car ce sont eux qui ont déclenché les événements morphogénétiques responsables de l'état actuel des rivières. Une compilation des données disponibles de Météo-France complétée par les données issues de la DAVAR (ORE) et publiées par Terry *et al.* (2008) a permis la réalisation du tableau des figures 4 et 5 du rapport 2010 (Garcin 2010). Nous y avons inclus l'ensemble des cyclones, des dépressions tropicales et les événements pluviométriques importants depuis 1880. Les informations descriptives sur les dégâts occasionnés y ont été conservées et les informations pluviométriques existantes des stations y ont été ajoutées.

L'analyse de ce tableau montre que la Nouvelle-Calédonie a subi environ une cinquantaine de cyclone depuis 1880 soit en moyenne 2,7 années d'écart entre chaque cyclone ou dépression tropicale majeure. L'ampleur de ces événements est variable, leur répartition temporelle irrégulière.

Les événements majeurs sont répertoriés pour les années 1932 avec, par exemple, une remontée de l'eau dans la Tontouta de 7,4 m. En 1951 un cyclone majeur (non nommé à l'époque) est à noter. Il a duré plusieurs jours et a été responsable d'une remontée de 9 m du niveau d'eau dans la Tontouta aval. Pour les autres cyclones de cette période, nous n'avons pas d'informations spécifiques concernant les rivières, ce qui ne veut pas dire qu'ils n'ont pas eu de répercussions importantes. Au cours des années 1960, Colleen a été un cyclone marquant, avec notamment une élévation de + 8 m du niveau d'eau de la Dumbea. En 1988, le cyclone Anne a généré un débit de 4 583 m³/s sur la Tontouta, la période de retour de la crue serait cinquantennale. Les cyclones marquants qui ont suivi sont Beti en 1996 et Erica en 2003.

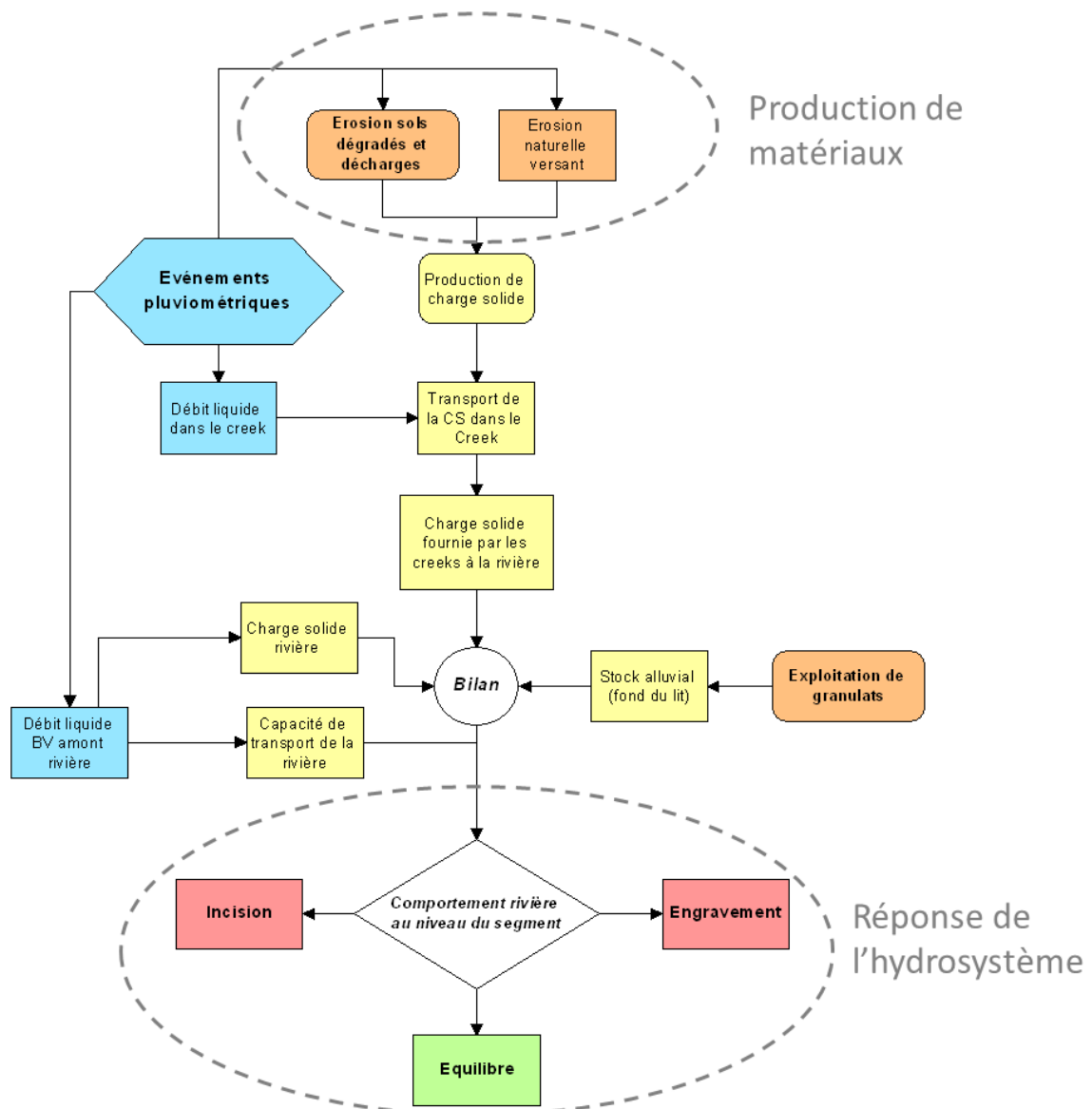


Illustration 2 : Schéma de fonctionnement du transport solide dans un hydrosystème calédonien.

Nous observons que la répartition temporelle des cyclones ou événements significatifs n'est pas régulière avec notamment une assez forte concentration des événements dans les années 1970 à 1980 qui culmineront avec Anne en 1988. Ensuite, les événements semblent moins intenses et le rythme plus relâché, mis à part les cyclones Beti en 1996 et Erica en 2003.

Seul le cyclone de 1951, et cela en l'absence de données quantifiées sur les vents, pluies et débits associés, présente un caractère vraiment exceptionnel par la durée des pluies qui se sont étalées sur neuf jours. Le rôle de la durée de la pluie dans la morphogénèse, l'érosion et le transport solide sont des composantes primordiales à prendre en compte. Les volumes

déplacés au cours de l'événement sont logiquement bien plus importants que lors d'un événement intense mais de courte durée.

2.2. REMARQUES SUR LE FONCTIONNEMENT DES RIVIÈRES CALÉDONIENNES

Le comportement des différents segments d'une même rivière peut varier à la même date. En effet, l'état du lit, la morphologie en plan, la pente du lit local, hérités des périodes précédentes, vont conditionner la réponse morphologique du segment de rivière concerné à l'événement considéré (crue liée à un cyclone par exemple). Il y a donc nécessité d'avoir un certain recul temporel pour analyser l'état actuel (héritage) qui s'inscrit dans l'évolution à plus long terme de la rivière. Ceci justifie de replacer l'état actuel du lit dans son histoire récente d'où les analyses diachroniques réalisées (Garcin 2009, 2010). Il faut rappeler que des ruptures peuvent se produire dans l'évolution de la rivière suite à un événement ayant affecté :

- le segment concerné ;
- le bassin versant (en partie ou totalement tel qu'une modification de l'occupation du sol).

Il ne faut pas négliger l'impact des aménagements dans le cours d'eau sur son comportement dans le court terme. Ces effets à court terme sont généralement ceux qui sont justement recherchés. Il faut toutefois signaler que ces aménagements ont aussi des effets sur le long terme mais que ces effets ne sont fréquemment ni recherchés ni même anticipés (exemple de l'impact des digues sur l'incision par exemple). Les ouvrages et aménagements qui peuvent avoir une incidence sur le fonctionnement des cours d'eau sont variés. Il peut s'agir d'ouvrages hydrauliques tels que :

- les digues et les levées ;
- les seuils ou les barrages ;
- les épis et enrochements de rive ;
- il peut aussi s'agir d'ouvrages de franchissement : radiers, ponts (qui diminuent parfois significativement la section d'écoulement, perturbe l'écoulement à leur droit ou piègent une partie des sédiments).

3. Méthode de détermination du sur-engravement des rivières

3.1. INTRODUCTION

Définition : une rivière sur-engravée est une rivière subissant des apports solides largement supérieurs à sa capacité de transport actuelle induisant de forts engraissements du lit sur un linéaire significatif. Ces engravements conduisent à une modification de la morphologie de la rivière marquée par une remontée et à un élargissement du lit.

Les causes du sur-engravement des rivières calédoniennes sont le plus souvent anthropiques. Il s'agit dans ce cas d'apports solides provenant de l'érosion d'anciens stériles miniers déversés dans les versants et/ou de l'érosion de versant déstabilisés suite à la réalisation d'une mine ou de pistes minières. Toutefois, plus rarement, le sur-engravement peut avoir une origine naturelle. C'est le cas, par exemple, lors de l'occurrence d'un mouvement de terrain de grande ampleur (relativement à la taille de la rivière) se produisant dans le bassin versant et contribuant directement à un apport important de matériaux.

La granulométrie des dépôts de sur-engravement varie généralement de celle des sables jusqu'aux galets voir aux blocs en fonction de la distance à la zone de production de matériaux. Les zones de production de matériaux contiennent souvent une forte proportion de latérites qui fournissent exclusivement des particules fines. Ces dernières ne participent pas au sur-engravement au sens strict mais sont responsable d'une dégradation majeure des lits de rivières. En effet, ces particules fines transitent généralement rapidement depuis leur zone de production jusqu'à la mer dès que le débit de la rivière augmente ; elles se sédimentent souvent de façon temporaire dans le lit mineur des rivières durant l'étiage et sont facilement remise en suspension dès que le débit augmente. Elles participent ainsi à l'évolution de la zone côtière et à la dégradation de l'environnement lagunaire.

3.2. CRITÈRE DE DÉTERMINATION DU SUR-ENGRAVEMENT

Afin de déterminer si une rivière ou un creek est sur-engravé, un certain nombre de critères peuvent être utilisés. Leur utilisation conjointe permet de certifier de leur caractère sur-engravé mais dans les cas les plus intenses/manifestes quelques critères sont largement suffisants.

3.2.1. Analyse des surfaces mises à nue par les exploitations minières

Comme il l'a été rappelé précédemment, le sur-engravement des rivières calédoniennes est lié dans la très grande majorité des cas à des apports solides issus de l'érosion des zones minières. La première approche permettant de rechercher des rivières sur-engravées consiste à rechercher la présence de mines (anciennes et actuelles) sur le bassin versant. Toutes les rivières ayant des zones minières dans leur bassin versant ne sont pas toutes sur-engravées. En effet, les travaux antérieurs réalisés en 2009 et 2010 (Garcin 2009, 2010) ont permis de démontrer que le sur-engravement d'une rivière est en partie dépendant de la surface relative de sols nus par rapport à celle de la surface du bassin versant de la rivière considéré. La carte de l'illustration 3 (Garcin 2010) est une représentation du pourcentage de la surface des sols nus minières dans chaque bassin versant. Les bassins versants les plus densément exploités y apparaissent nettement. Toutefois, une analyse plus fine de chaque bassin versant peut

montrer, comme sur la Tontouta, que certains sous-bassins versants sont beaucoup plus densément exploités que d'autres ce qui explique que certains creek peuvent présenter de très forts sur-engravements (cas de la Hwa No ou du creek Liliane sur la bassin de la Tontouta, Fouachiamboué, Oue Tanquéa etc.) alors que la rivière principale ou d'autres creeks ne sont que peu ou pas touchés. La carte de pourcentage des sols nus par surface de bassin versant est donc un indice de sur-engravement potentiel des rivières dans chaque bassin. Il est ensuite nécessaire d'analyser ce même pourcentage par sous-bassins.

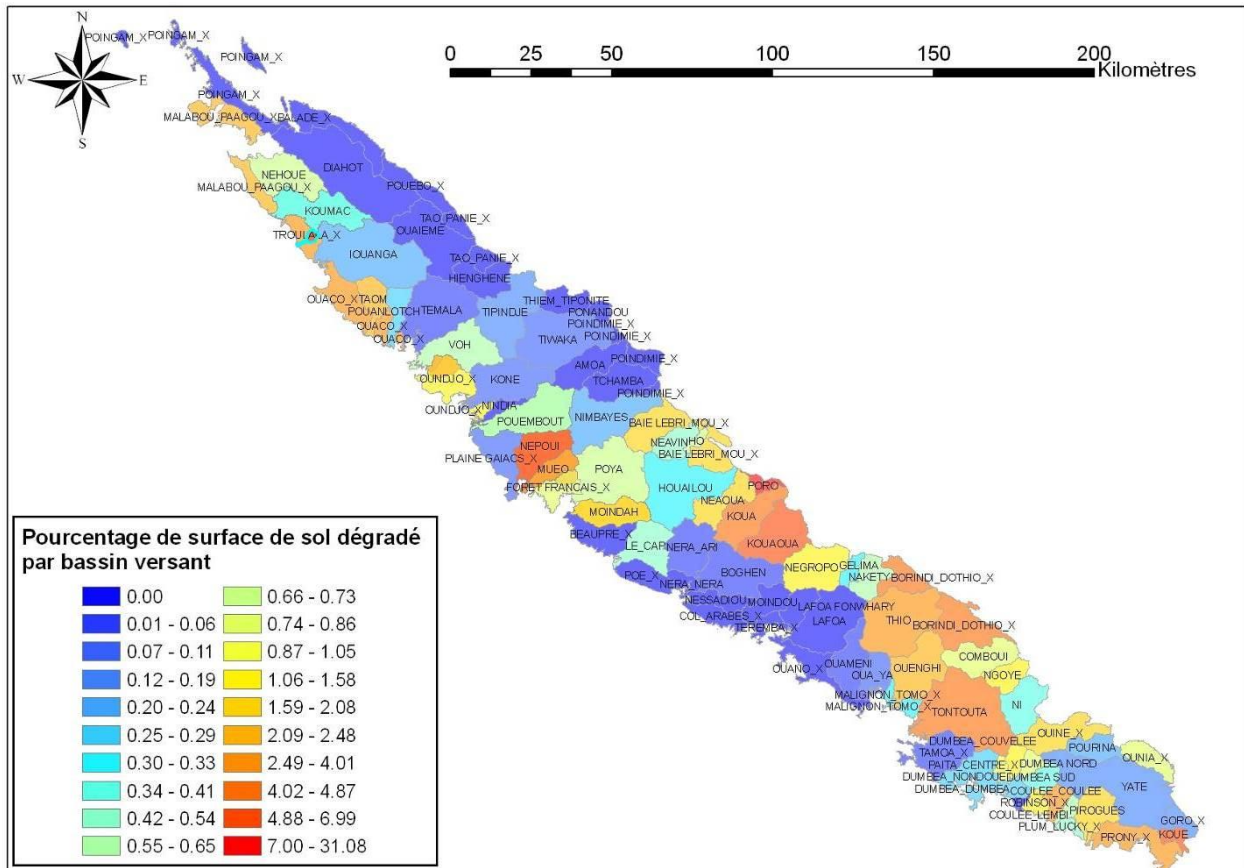


Illustration 3 : Carte des pourcentages de sols nus par bassin versant (Garcin 2010, les fortes valeurs en rouge indiquent un pourcentage de sol nu plus fort).

Dans le détail et pour les mines antérieures à 1976 pour lesquelles les stériles miniers étaient directement déversés dans les creeks, le potentiel réel de sur-engravement est plus finement approché par l'analyse des tonnages cumulés de minerai produit sur le bassin versant (ou sous bassin versant si nécessaire). Ce tonnage permet une évaluation du volume de stérile produit avant 1976 et susceptible d'avoir été directement déversé dans les versants et donc de contribuer très rapidement aux apports solides et donc au sur-engravement. Cette approche par quantification des tonnages et volumes n'a pas été réalisée dans le cadre de la présente étude car l'identification par densité de sols nus semble suffisante pour réaliser la cartographie des zones sur-engravées. Elle pourrait être conduite si des projets d'exploitation de zones sur-engravées étaient envisagés.

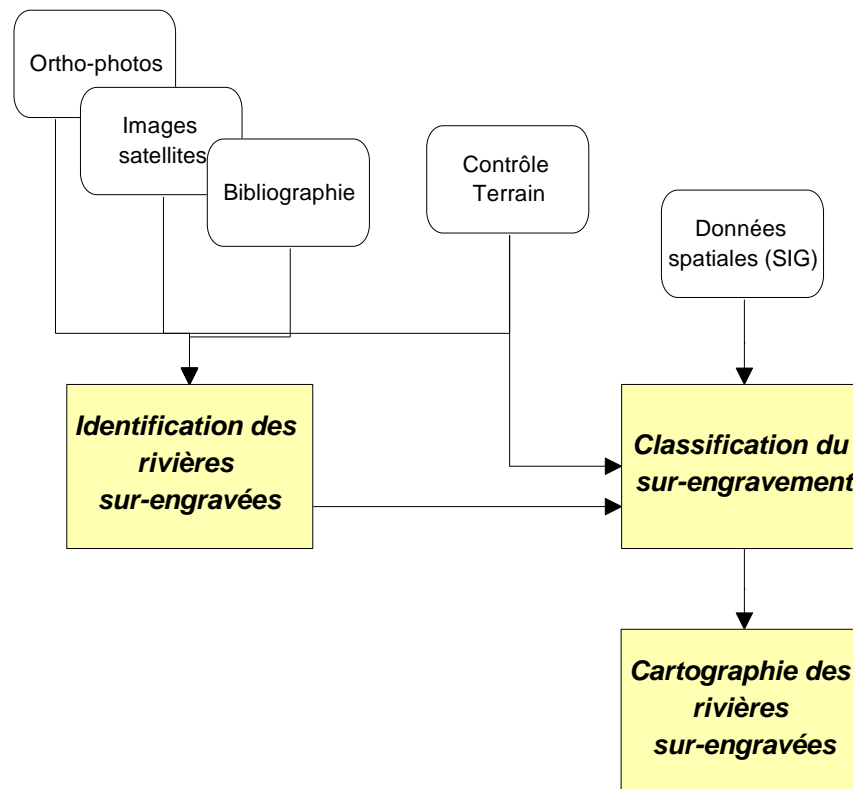


Illustration 4 : Données d'entrée et méthode de détermination puis de classification des rivières sur-engravées.

3.2.2. Analyses des ortho-photos ou des images satellites

Une fois les rivières potentiellement sur-engravées identifiées à partir du critère d'intensité d'exploitation minière, il a été nécessaire de confirmer cette indication par une observation indirecte. Celle-ci est réalisée par l'interprétation visuelle d'ortho-photographies récentes ou d'images satellites à très haute résolution (THRO). Cette observation visuelle permet de détecter des zones alluviales à remplissage alluvionnaire non végétalisées occupant de vastes étendues du lit qui correspondent généralement à des zones sur-engravées. L'analyse de la position des zones sur-engravées par rapport aux zones potentielles de production de matériaux (anciennes décharges minières, mines, érosion de versant, glissement de terrain, etc.) permet de définir les liens génétiques entre le sur-engravement et les zones de production. Il est ainsi possible de déterminer, à partir des zones subissant une forte érosion et produisant donc beaucoup de matériaux, quels sont les creeks où les segments de rivière qui participent soit au transfert de matériaux soit à leur stockage temporaire.

3.2.3. Observation de terrain

L'observation directe sur le terrain permet de recueillir des informations sur la morphologie des rivières actuelles qu'il s'agisse de zones sur-engravées, de terrasses alluviales, de zones en incision ou de la granulométrie des alluvions etc. Ces informations sont primordiales pour interpréter la dynamique de fonctionnement actuelle mais aussi du passé récent de la rivière.

Les observations sur le degré d'évolution des matériaux (galets plus ou moins roulés), la patine des galets, les morphologies du lit etc. donnent des informations sur la proximité des sources de matériaux, leur chronologie relative etc.

À titre d'exemple, un lit alluvionnaire large, non végétalisé, avec un à quelques chenaux incisant des alluvions épaisses et souvent assez grossières peut indiquer :

- une phase de dépôt et d'atterrissement importante conduisant à la remontée et à l'élargissement du lit (phase d'aggradation) ;
- le chenal incisant ces dépôts indique que la rivière n'est actuellement pas en phase de sur-engravement mais qu'elle a tendance à reprendre son profil de pente antérieur à son engravement ;
- que la rivière a tendance à éroder ces dépôts antérieurs et à les faire transiter vers l'aval assurant ainsi la redistribution et l'étalement des alluvions sur un plus grand linéaire de son lit.

L'observation directe permet aussi d'avoir des informations sur la lithologie des sédiments présent en fond de lit. Elle a aussi permis de rechercher systématiquement dans les alluvions les indicateurs de présence de minéraux amiantifères.

3.2.4. Les analyses rétrospectives de l'évolution des lits de rivières

Les analyses rétrospectives de l'évolution des lits de rivière peuvent être rendues nécessaires dans le cas d'une évolution polyphasée et complexe du sur-engravement comme dans l'exemple évoqué ci-dessus. Elles permettent aussi de mieux appréhender les modalités et les temporalités du transfert des matériaux dès la phase de création de zones potentiellement érodables (création de mines, réalisation de verses de stériles dans les versants, création de pistes etc.).

Par l'analyse des formes alluviales (accroissement ou décroissance des plages de dépôt, modifications des écoulements, etc.), les analyses rétrospectives permettent de restituer la migration des matériaux dans le temps vers l'aval des rivières. Cette migration ne s'effectue pas de façon linéaire mais le plus souvent par à-coups. Ceux-ci sont dépendants d'une part de la chronologie des mises à disposition de matériaux par les activités minières (extension des prospections, phases de production de déchets, mise en verse, ultérieurement travaux de stabilisation ou de remédiation...) et d'autre part des phénomènes météorologiques (dépressions tropicales et cyclones) qui déclenchent les phases d'érosion et le transport solide dans les rivières. Cette évolution est aussi conditionnée par la morphologie des cours d'eau et par leurs profils en long. En effet, certains segments, dont la pente du profil est plus faible que les autres ont par exemple tendance à être des zones favorables aux atterrissements, ce sont donc dans ces secteurs que l'on retrouve le plus souvent les zones sur-engravées. À l'opposé, les segments de rivière où la pente du profil en long augmente et / ou la largeur potentiellement occupée par le lit mineur diminue ont tendance à ne pas être les zones sur-engravées mais plutôt des zones où les matériaux transitent (augmentation des vitesses d'écoulement ne favorisant pas la sédimentation mais le transport solide vers des zones de plus basses vitesses d'écoulement).

Enfin, l'analyse de l'évolution passée des lits permet aussi de donner des clés de compréhension des processus qui peuvent s'avérer utiles pour prévoir les évolutions futures des lits que ce soit à l'aval des zones actuellement sur-engravées ou à l'amont (analyse de la recharge potentielle).

L'analyse de l'évolution passée des lits met en œuvre plusieurs approches :

- analyse de séries diachrones de photographies aériennes ;
- analyse de la séquence météorologique passée au cours de la durée totale couverte par les photographies aériennes (date et intensité des pluies cycloniques et des dépressions tropicales) ;
- analyse quantitative et spatiale de l'évolution des mines et des volumes de stériles rejetés dans les versants.

Aucune analyse rétrospective n'a été conduite au cours de la présente étude ; ce type d'analyse (assez couteuse en temps) mériterait d'être réalisé dans le cas où l'exploitation d'une zone sur-engravée serait envisagée.

3.3. CLASSIFICATION DU SUR-ENGRAVEMENT DES RIVIÈRES

Cette classification des rivières sur-engravées a pour objectif de déterminer :

- un indice de fiabilité du sur-engravement (suspecté, confirmé) ;
- l'ampleur relative du sur-engravement : faible, moyen, fort ;
- les matériaux présents dans le lit et liés au sur-engravement, il s'agira aussi de déterminer l'éventuelle présence d'amiante dans les sédiments.

Les éléments permettant cette classification sont renseignés d'une part par les observations de terrain recueillies et d'autre part par l'analyse des données spatiales concernant les bassins versants. Ces données spatiales sont :

- les surfaces occupées par les mines, anciennes décharges et autres sols nus d'origine minière. L'analyse des surfaces minières et plus particulièrement du % de surfaces minières par rapport à la surface des bassins versants donnent en effet une idée de la perturbation engendrée en terme de charge solide apportée à la rivière ;
- les lithologies du bassin versant et l'encaissant géologique dans lequel ont été implantées les mines.

3.4. CARTOGRAPHIE DES RIVIÈRES SUR-ENGRAVÉES

Les données recueillies dans les tâches précédentes ont permis de cartographier les sur-engravement des rivières et creeks. Cette cartographie est réalisée sous SIG (ArcGIS). Les polygones et polylignes représentant les objets cartographiques sont au format de fichiers *shapefile*. À chaque objet cartographique sont associés des attributs qui définissent ses caractéristiques. L'analyse de la table attributaire associée aux polygones et aux polylignes permet alors de réaliser des cartes thématiques comme celle du degré de certitude de l'engravement, de l'intensité qualitative de l'engravement, de la présence ou non d'amiante, etc..

Les sur-engravements dont les surfaces sont importantes sont stockés dans un *shapefile* (*sur-engravement*) contenant des polygones. Dans le cas de rivières ou creeks trop étroits pour que les sur-engravements (ou autres informations) soient stockées sous forme de polygones, le *shapefile* est constitué de polylignes.

Les phénomènes surfaciques de versants observables sont stockés dans un *shapefile* (*versant*) contenant des polygones.

Les creeks ou rivières étroites ont été extraits de la base de données hydrographique (source DITTT) et copiés dans un fichier spécifique (*creek*) contenant des polylignes. Des champs ont

été ajoutés dans la table attributaire. La précision cartographique de ces objets est donc celles du fichier hydrographie de la DITTT.

Les polygones (décrivant les sur-engravements ou les processus affectant les versants) ont été digitalisés le plus souvent à une échelle comprise entre le 1/1 500 et le 1/2 000 ; leur restitutions cartographiques est possible jusqu'à l'échelle 1/6 000.

3.4.1. Versant : description de la table attributaire des entités numérisées

Dans ce shapefile sont cartographiés les processus affectant les versants et ayant un rôle dans le sur-engravement des rivières.

Champ Nature

Champ spécifiant la nature de l'objet ou du processus cartographié

- Type : Texte
- valeurs possibles :
 - *Érosion* lorsque la surface est affectée de façon significative par des processus d'érosion (ravinelements, surface de *bad lands* etc.). Il peut s'agir de processus d'érosion affectant des dépôts anthropiques (verses minières, décharges), des sols mis à nu par l'activité minière, des sols déstabilisés par la création de piste, des sols latéritiques naturels dont l'érosion prend la forme de *lavaka*. Ces surfaces d'érosion constituent les principales sources de matériaux qui seront transportés et re-sédimentés dans les lits de rivières. Ces surfaces ne représentent qu'une fraction de celles occupées par les sols nus mais fournissent une partie importante de la charge sédimentaire mis à disposition des rivières,
 - *Cône* lorsque la surface est occupée par une accumulation de matériaux significative sous la forme d'un cône alluvial en aval d'un creek drainant une zone en érosion,
 - *Bassin* (anthropique) lorsque la surface est occupée par un bassin de rétention, aménagement visant à piéger des sédiments généralement localisés en aval d'une zone minière,
 - *Stockage* (anthropique) lorsque la surface est occupée par une zone de stockage de matériaux.

3.4.2. Creek : description de la table attributaire des entités numérisées

Seuls les champs Ampleur et Remarques sont renseignés, les autres champs ne sont pas utilisés.

Champ Ampleur

Ce champ est un indicateur qualitatif du mode de fonctionnement ou de l'état d'un creek ou d'un segment de rivière étroit. Il permet de définir si le creek permet le transfert de la charge solide vers l'aval sans sédimentation significative, ou s'il est engravé ou sur-engravé :

- type : entier ;
- valeur possible : -1/0/1 correspondant respectivement à transfert de matériaux, engravement, sur-engravement.

Champ remarque

Ce champ est un champ en texte libre permettant de spécifier des informations qui ne rentreraient pas dans les champs précédents :

- type : texte de 50 caractères ;
- valeurs possibles : libre.

3.4.3. Sur-engravement : description de la table attributaire des entités numérisées

Champ « Confirmé »

Ce champ indique le degré d'incertitude concernant le caractère sur-engravé des alluvions :

- type : entier court ;
- valeurs possibles : 0/1 correspondant respectivement à suspecté et confirmé.

Champ « Ampleur »

Ce champ est un indicateur qualitatif de l'ampleur du sur-engravement. Il est évalué à partir de la morphologie du lit, la largeur occupée par les alluvions non végétalisées, les autres indices de remontée de lit (iles boisées en voie de submersion ou submergées par les alluvions par exemple) :

- type : entier court ;
- valeurs possibles : 0/1/2 correspondant respectivement à faible engravement, engravement modéré, fort engravement.

Champ « Amiante »

Ce champ indique la présence d'amiante dans les sédiments alluviaux. Les formes minérales d'amiante observées dans les alluvions sont essentiellement du chrysotile dans les galets de péridotite, plus rarement de la trémolite sous forme de galets ou graviers relativement peu roulés. Un chapitre spécifique traite de l'amiante :

- type : entier court ;
- valeurs possibles : 0/1/2 correspondant respectivement à non observé / suspecté / observé.

Champ « Exploité »

Ce champ indique si les alluvions sur-engravées ont fait ou font l'objet d'une exploitation de granulat :

- type : entier court ;
- valeurs possibles : 0/1/2 correspondant respectivement à non exploité, exploitation ponctuelle et exploitation significative.

Champ « Année »

Champ spécifiant l'année ou l'observation a été réalisée (par défaut 2012) :

- type : entier court.

Champ « Nom »

Champ spécifiant le nom de la rivière ou du creek (peu renseigné).

Champ « Remarques »

Ce champ est un champ en texte libre permettant de spécifier des informations qui ne rentreraient pas dans les champs précédents :

- type : texte de 50 caractères ;
- valeurs possibles : libre.

L'association de ces trois *shapfiles* permet de cartographier les zones productrices de matériaux quelques soit leur origine, les creeks et segments de rivière assurant le transfert des sédiments vers l'aval et les segments de rivière subissant un sur-engravement. La cartographie renseigne sur la géométrie et l'emprise de chaque zone sur-engravée mais aussi sur les modalités de l'apport de charge solide, la distance aux zones sources qui fournissent des matériaux. En superposant cette cartographie avec la carte lithologique dérivée de la carte géologique (3.4.4), les massifs fournissant les matériaux peuvent être identifiés. De même, la superposition avec le cadastre minier permet de connaître les mines à l'origine du sur-engravement. Dans certains cas, la part des érosions ou des glissements de terrain naturels impliqués dans le sur-engravement peut être déterminée.

3.4.4. Lithologie du bassin versant

Afin de déterminer la lithologie potentielle des alluvions dans chaque rivière, nous avons retraité la cartographie numérique à 1/50 000 du SGNC/DIMENC afin de regrouper les différentes unités géologiques par entité lithologique. Pour cela un champ *lithologie simplifiée* a été créé dans la table attributaire puis renseigné. Ceci nous a permis de créer une carte lithologique comportant 28 classes lithologiques (à noter que certaines classes ne correspondent pas réellement à une lithologie mais plutôt à un environnement de dépôt : marais & mangroves, décharges minières, exploitations minières & déblais, etc.). Pour tous les bassins versants des rivières étudiées, nous avons ensuite déterminé par analyse spatiale les surfaces occupées pour chaque classe lithologique puis calculé le pourcentage de surface qu'elle occupe par rapport à celle du bassin versant. Ceci nous permet d'avoir une idée plus précise de la variété lithologique que l'on devrait trouver dans les alluvions les plus à l'aval de chaque rivière. Il est clair que dans les zones engravées, quel que soit la nature lithologique du bassin versant en amont, on retrouve en très grande majorité des galets de péridotites (hazburgite ou dunite).



Illustration 5 : Les différentes classes de lithologie simplifiée.

3.4.5. Utilisation et interprétation de la cartographie

L'illustration 6 présente un exemple de cartographie réalisable en utilisant les entités précédemment présentées. Cet exemple illustrant une zone sur-engravée de la Poya permet d'identifier les principales zones de production de matériaux (1) résultant de l'érosion des concessions minières de Philofèle, Philomène, Riri et Pinpin 5.

La couleur pourpre de certains creeks indique qu'ils participent au transfert des sédiments (2) mais qu'ils ne présentent pas de sédimentation significative.

La couleur orange de certains segments des creeks indique qu'ils sont affectés par une sédimentation importante (sur-engravement, 3).

Les polygones rouges correspondent aux limites des alluvions dans les rivières à lit large dans un contexte de sur-engravement fort sans exploitation de granulats (4), les rayures obliques surimposées attestent de la présence vérifiée de minéraux amiantifères dans certains galets.

Les polygones oranges correspondent aux limites des alluvions dans les rivières à lit large dans un contexte de sur-engravement modéré sans exploitation des granulats.

Enfin, les rayures obliques surimposées attestent de la présence vérifiée de minéraux amiantifères dans certains galets.

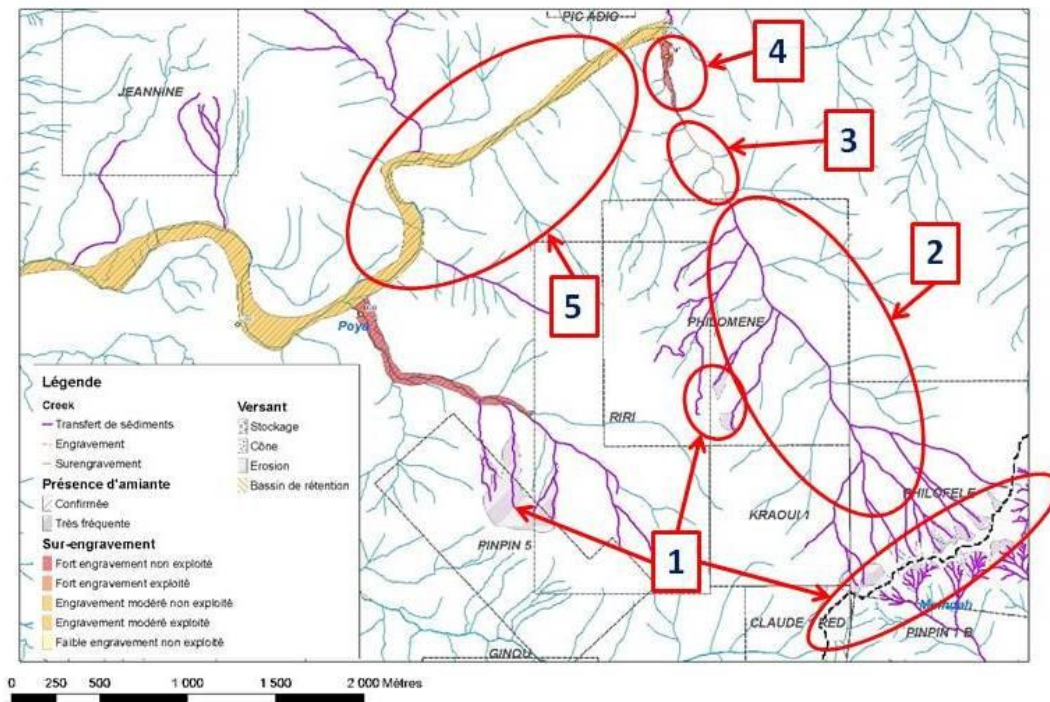


Illustration 6 : Exemple d'utilisation et interprétation de la cartographie : caractérisation du fonctionnement
 1 – Production de sédiment ; 2 – Transfert, 3 – Accumulation lit étroit, 4 – Fort engravement, 5 – Engravement modéré.

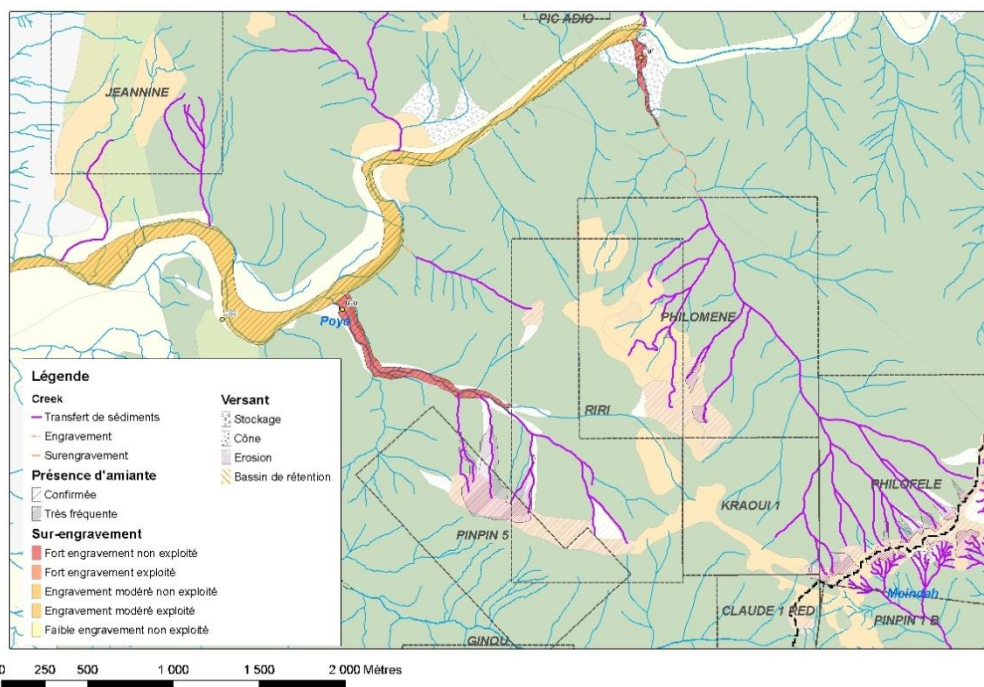


Illustration 7 : Utilisation et interprétation de la cartographie : lithologie.

À noter sur cet exemple que le sur-engravement de la Poya ne commence qu'à partir de la confluence avec le creek drainant les mines Philomène, Philofèle et Riri et que la majorité des apports sont issus des mines de la rive gauche de la Poya.

L'illustration 7 permet en superposant les mêmes données cartographiques que précédemment sur la carte lithologique issue du traitement de la carte géologique à 1/50 000, de déterminer l'encaissant géologique. Il est ainsi possible de déterminer que les zones de production de matériaux sont dans cet exemple essentiellement issus de l'érosion de concessions minières installées sur des formations d'altération (latérites minces sur péridotites et formations anthropiques zones d'exploitations et de déblais). Le reste du massif dans lequel s'effectuent les transferts de sédiments et leur accumulation est globalement constitué par des péridotites. La comparaison du pourcentage de surface occupée par chaque lithologie à l'échelle du bassin de la Poya et celle de la zone affectée par les sur-engravements permet de mettre en évidence que les alluvions des zones sur-engravées n'ont pas du tout la même signature lithologique.

Le tableau 1 présente sous forme de tableau les pourcentages de surfaces occupées par chaque lithologie pour chaque bassin versant des rivières étudiées.

	Basaltes, dolérites et gabbros	Gabbros	Schistes	Conglomérats	Calcaires	Grès	Cherts	Siltites	Flyshs	Métabasales, cherts, argillites	Polymétamorphiques	Colluvions, formations de versants	Alluvions	Eboulis	Brèches	Haburgites	Péridotites	Dunites	Listvénites	Serpentinites	Latérites	Argillites	Cuirasses	Gravillons ferrugineux	Exploitations minières et déblais	Décharges minières	Marais et mangroves	Autres	
Tontouta	0.12	0.01																											
Houailou	1.93	1.62	10.84																										
Thio	5.99																												
Poya	22.43	0.03	1.34	0.20	0.93	5.43	0.65	6.99	2.64	3.61	10.31	0.76	10.39	0.21		7.63	11.17	0.42	0.02	7.80	2.27	3.35	0.57	0.20	0.19	0.12	0.32		
Kouaoua	6.62	0.63		0.06	0.05	0.24	0.14			0.00	27.13	0.00	5.56		4.24	22.92				6.28	15.30	7.56	2.92		0.12	0.24	0.00		
Ouenghi	1.18	0.00			0.13	0.00	1.22		2.00	0.00	4.08	6.54	0.02		9.45	48.33				0.53	20.78	4.06	0.80				0.00	0.39	
Negrépo	6.61	8.32			0.07	21.46	14.54	4.20			11.66	1.19	1.02		0.12	1.68	2.01		0.20	8.42	4.60	10.68	1.18				1.81	0.23	
Piragues	0.00	15.54			0.00						0.01	14.12				7.92	0.00	12.54		3.59	41.92	0.00	4.24				0.16		
Moindah	35.63				0.01						1.10	11.65				0.00	43.39			0.55	4.94	0.00	0.77	0.58	1.09	0.25	0.05		
Népoui	0.39			0.06	0.02	1.20		2.24	0.01	1.08	0.01	2.28	11.27	1.39		53.45	2.27	0.38		3.91	12.23	2.21	1.41	1.53	1.70	0.31	0.52	0.10	
Coulée	0.00											10.75	4.35	0.12		38.98	1.96	7.83	0.12	4.58	29.99	0.00	1.05	0.00			0.25		
Muéo	3.22											5.87	0.84			70.94	0.00	0.32	0.00	5.04	4.66	0.00	8.01	0.70	0.17	0.22	0.03		
Dothio	23.28					1.35	0.59				0.68	1.44	3.95	0.93		10.48	14.20		1.33	26.56	7.24	5.43	1.16	0.36	0.44	0.45	0.11		
Monio	1.52											0.58	5.37	0.29		65.91	0.00	2.04		2.94	0.55		20.80	0.00	0.00	0.00			
Wa Dibou	11.82											0.16	0.99			22.40	0.00	0.64		6.50	5.64		5.96						
Troulata	1.27											21.34	7.70			61.27				2.82	5.60								
Oue Tanquea	0.78											10.94	6.50			64.43				1.91	15.45								
Waneubwayo	0.00											2.47				57.53				0.00	7.15		30.70		0.51	0.90	0.74		
Fouachiamboue	0.00											6.12	4.96			59.12		0.14		16.73	9.75		2.52	0.64			0.03		
Poro	0.00											4.16				34.69					1.22		44.88	0.00	9.44	3.43	2.18		
Wellington	0.00																												

Tableau 1 : Pourcentage des surfaces occupées par les classes lithologiques simplifiées par bassin versant. En rouge lithologies dominantes, en orange lithologies fortement présentes, en jaune lithologies significativement présentes, en blanc lithologies peu représentées.

La cartographie a permis de surcroît d'évaluer les surfaces qu'occupent les zones alluvionnaires sur-engravées pour chaque bassin versant. Rappelons ici que les surfaces calculées ne prennent pas en compte les secteurs étroits des creeks et des rivières qui ont été représentés cartographiquement par des polygones (pas de calcul de surface possible). Les résultats sont fournis en kilomètres carrés et en hectares. Afin de tenter d'évaluer l'intensité du sur-engravement pour chaque rivière, nous avons calculé le pourcentage de surface occupée par le sur-engravement par rapport à celle du bassin versant. Ce pourcentage peut représenter en quelque sorte le degré de perturbation de chaque rivière sur ses processus sédimentaires.

Le Tableau 2 présente ces résultats classés par pourcentage décroissant de sur-engravement par rapport à la surface. De ce tableau, il ressort que certaines rivières modestes en surface sont beaucoup plus fortement impactées que d'autres plus étendues, qui par ailleurs ont une activité minière intense sur leur bassin. Il faut toutefois garder à l'esprit que même si un bassin versant est étendu, certains affluents de taille modestes et localisés à proximité des massifs miniers peuvent être très fortement impactés alors qu'à l'échelle de l'ensemble du bassin versant l'impact demeure très modéré.

	Surface (km ²)	Surfaces sur-engravées km ²	Surfaces sur-engravées en ha	% de sur-engravement / surface BV
Wellington	4.6	0.11	11	2.391
Fouachiamboue	9.0	0.17	17	1.883
Poro	7.6	0.14	14	1.848
Oue Tanquea	12.2	0.21	21	1.721
Muéo	78.0	1.2	120	1.538
Népoui	124.2	1.3	130	1.047
Ouenghi	247.2	2.16	216	0.874
Wa Dibou	25.7	0.2	20	0.779
Monio	26.4	0.2	20	0.759
Thio	381.9	2.6	260	0.681
Moindah	124.3	0.62	62	0.499
Waneubwayo	10.8	0.04	4	0.369
Kouaoua	249.5	0.73	73	0.293
Poya	363.5	0.8	80	0.220
Dothio	68.6	0.1	10	0.146
Troulala	13.2	0.014	1.4	0.106
Pirogues	146.3	0.01	1	0.007
Houailou	396.3	0.02	2	0.005
Negropo	200.4	0	0	0.000
Coulée	84.5	0	0	0.000

Tableau 2 : Surfaces totales de chaque bassin versant et des surfaces occupées par le sur-engravement. Classement par pourcentage de surengravement décroissant.

4. Rivières sur-engravées étudiées en 2012

La carte du pourcentage de sols nus (Illustration 3, Garcin 2010) par bassin versant a été utilisée pour identifier les rivières potentiellement sur-engravées. Les sols nus incluent les sols nus liés à l'activité minière et les sols nus « naturels ». Cette carte, bien que basée sur des données parfois imprécises, a permis malgré cette restriction de cibler les principales rivières que nous avons étudiées en 2012. La localisation des bassins versants de ces rivières est présentée dans l'illustration 8.

Les rivières étudiées en 2012 sont la Moindah, la Kouaoua, la Negropo, la Dothio, la Thio, la Ouenghi, la Coulée, la Rivière des Pirogues, la Oue Tanquea, la Troulala, la Wa Dibu, la Fouachiamboue, la Népoui, la Muéo, la Monio, la Waneubwayo, la Poya, la Houilou, la Poro et la cascade Wellington. La rivière Tontouta, bien que localement sur-engravée (Hwa No, Creek Lilianne, etc.) n'a pas fait l'objet d'une étude spécifique en 2012 car elle a déjà été étudiée en 2009. Les résultats concernant la Tontouta sont présentés dans un rapport spécifique (Garcin 2010a).

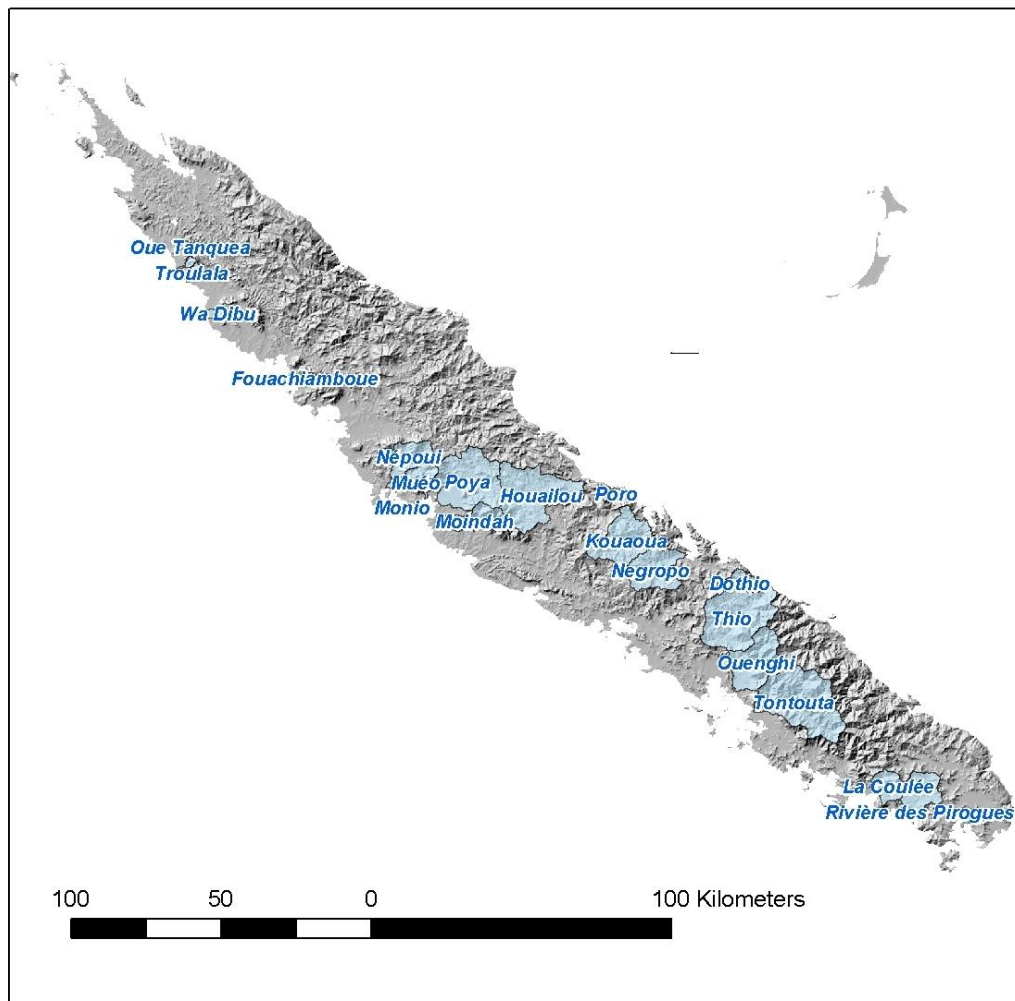


Illustration 8 : Localisation des bassins versants des rivières étudiées.

Dans les paragraphes suivants, sont présentées les principales informations à retenir pour chaque rivière et zone sur-engravée.

Des extraits de la carte des zones sur-engravées, des zones de production de matériaux, des segments de creeks et rivières assurant le transfert des sédiments ainsi que les données sur les lithologies de chaque bassin versant sont présentées.

4.1. LA HOUAÏLOU

Le bassin versant est étendu et couvre 396 km². Les lithologies qui affleurent sur le bassin sont très variées avec une dominance de roches poly-métamorphiques (58,2 %), les schistes représentent 10,8 % tandis que les péridotites et les serpentinites ne représentent respectivement que 6,5 % et 6,1 %.

La surface du massif minier est donc très faible et la seule zone manifestement sur-engravée est très réduite (surface de l'ordre de 0,02 km²) et se situe à proximité du littoral sur la commune de Houailou (creek Wâkaï). Cette zone sur-engravée fait l'objet de curage préventif par la commune du fait de l'augmentation du risque inondation induite par la remontée du lit notamment lors de sa traversée du village à proximité de l'école (Illustration 9).

La source du sur-engravement est la concession Bel Air Red et est très proche de la zone de sur-engravement (de 400 m à 1,8 km). La présence de galets à minéraux amiantifères y est confirmée.



Illustration 9 : Sur-engravement dans le secteur aval du creek Wâkaï lors de sa traversée du haut du village (Pt196).

4.2. LA THIO

La Thio a un vaste bassin versant de 381 km². Les lithologies y sont assez variées et sans dominance bien marquée. Les cherts représentent 21,6 % de la surface tandis que les latérites 17,6 %, les péridotites 16,5 % et les serpentinites 9,7 %. Les zones de production de matériaux responsables de sur-engravement proviennent des massifs miniers exploités et sont localisés dans la partie orientale (rive droite) et aval du bassin (rive gauche). Les rivières engravées sont la partie médiane et aval de la Thio et les rivières des sous bassins de la Nakaré de la Néburu et les creeks de rive gauche du secteur aval de la Thio. La surface couverte par les zones cartographiées en sur-engravement est d'environ 2,6 km². Les zones de production de matériaux sont multiples (4 principales zones), le sur-engravement de la Thio est donc la résultante de toutes ces contributions, son expression reflète cette complexité des apports.

4.2.1. Creeks Xwe Méa, Xwe Cetore Kwe, Xwe Pexwawi

Ces petits creeks confluent en rive droite de la Thio. Ce sont les premiers creeks qui participent de façon significative à l'engravement de la Thio dont la limite amont correspond à leur confluence. Ces creeks ne font, à l'heure actuelle, que transférer les matériaux, leurs lits n'étant pas significativement sur-engravés, par contre des événements récents permettent de certifier leur rôle dans le sur-engravement de ce secteur de la Thio. Les zones de productions de matériaux sont les concessions minières de Capucine 4, Arc-en-ciel, Charente inférieure, André, Jeanne & Marie, Jeanne & Marie Ext. Les distances entre zones source et le lit de la Thio sont comprise entre 1 km et 2,4 km ; il s'agit donc d'un trajet très court permettant un transit rapide voire quasi-immédiat des matériaux issus de l'érosion des zones minières.

4.2.2. La Nakaré

Affluent de rive droite de la partie médiane de la Thio, la Nakaré a une longueur de plus de 10 km. La zone sur-engravée s'étend de la confluence avec la Thio vers l'amont sur 4,5 km environ. Les principales zones sources sont d'origine minière et sont les concessions Zizette Red, Solferino, Petit Bel Air, Emma, Voralberg en amont et en rive gauche, L'Espérance et AM12 en rive droite (Illustration 11).

Ce sous bassin est entièrement constitué des péridotites surmontées localement par des latérites. Le sur-engravement est fort et aucune exploitation n'y a été observée. La confluence permet d'observer que l'altitude du lit de la Nakaré est plus élevée que celui de la Thio indiquant que la Nakaré est une source d'apport de sédiments importante. La présence de galets à minéraux amiantifères y est confirmée.



Illustration 10 : Veine de chrysotile dans un galet de péridotite de la Nakaré.

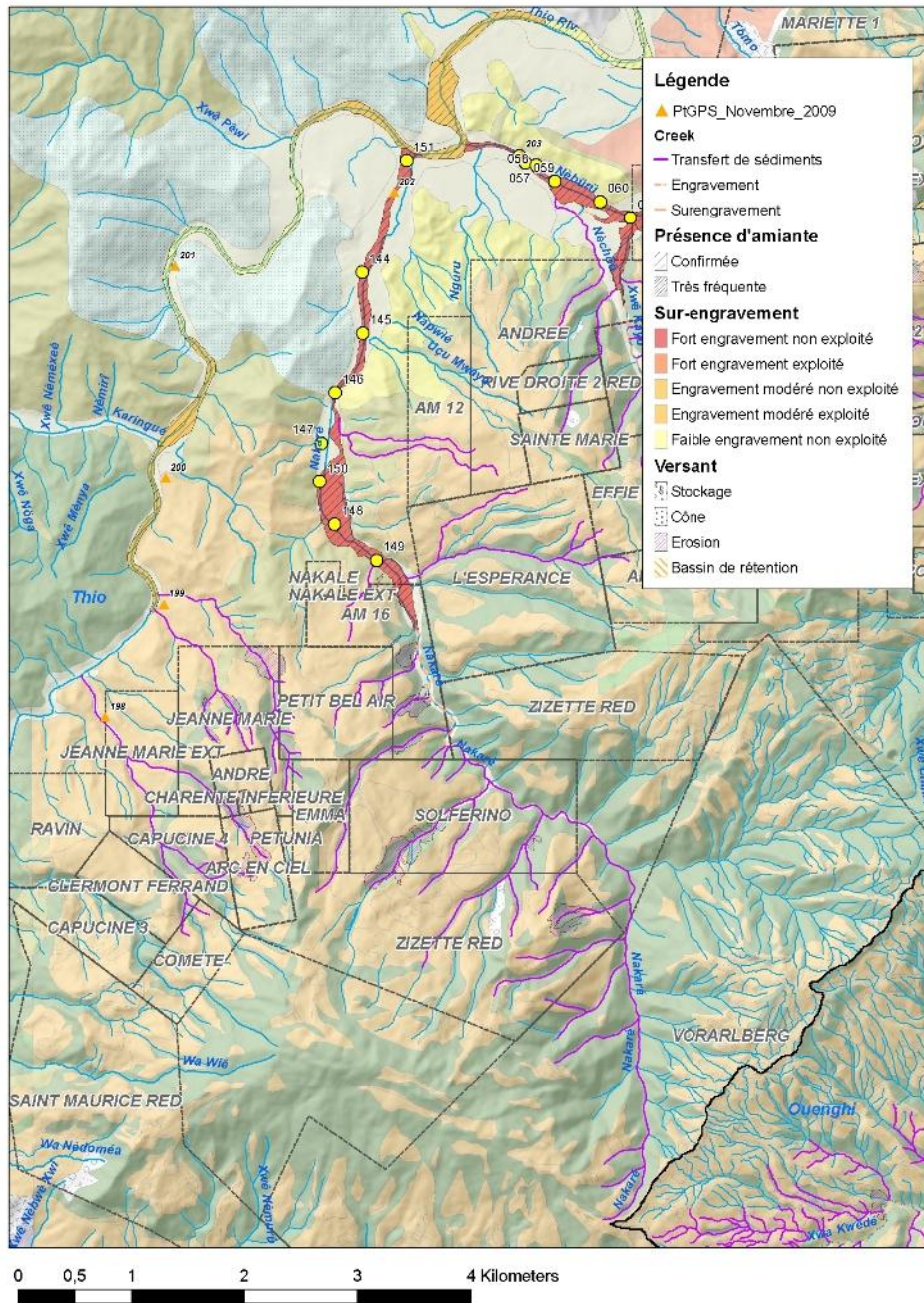


Illustration 11 : La Nakaré (bassin de la Thio) : extrait de la carte du sur-engravement.

4.2.3. La Neburu

La Neburu est un affluent de rive-droite de la Thio dont la confluence n'est qu'à environ 400 m en aval de celle de la Nakaré. La longueur totale du bassin versant la Neburu est de 11 km ; le sur-engravement concerne les 5,4 km de l'aval de cette rivière. Les lithologies affleurantes dominantes sont les péridotites et les latérites. Les sources de matériaux sont d'origine minière, et sont toutes situées en rive gauche (au sud). La plupart des creeks du versant sud de ce secteur participent au transfert de matériaux des zones sources jusqu'à la zone d'engravement. La partie aval des creeks les plus importants sont eux aussi fortement sur-engravés et peuvent

présenter des morphologies de cône à leur confluence avec la Néburu (Illustration 12). Le sur-engravement semble résulter en partie d'une phase « ancienne » comme l'indique la végétalisation (faible) que l'on peut y observer ainsi que la pâtime de certaines surfaces du lit. Le sur-engravement de la Néburu occupe une surface importante et doit constituer un volume important d'alluvion qui en fait un réservoir de matériaux majeur pour la Thio (Illustration 13).

La distance entre les zones sources et la rivière varient de 3,4 km à 0,7 km. Les sources de matériaux sont les concessions Andree Ext, Effie Meikle, Sainte-Marie, Rive Droite Red, Raoul, Bon Espoir, Bornet 1, AM8, Nekandi, Douetampo, Douetampo 2, Nimbrou, Bornet 2 (Illustration 14).

Le sur-engravement de la Néburu est très marqué, des travaux de curage, d'aménagements hydrauliques pour faciliter les écoulements et la création d'une piste y ont été observés.



*Illustration 12 : Cône alluvial au débouché d'un creek (Xwe Kayu) dans le lit de la Néburu (Pt61).
Les parties du cône les moins actives sont en voie de végétalisation.*



Illustration 13 : Vaste zone d'atterrissement dans la Néburu.

L'incision du lit mineur actuel dans ces dépôts tout comme la végétalisation (herbacée) et la présence d'une patine sur certaines zones semblent indiquer une phase de sur-engravement « ancienne » (amont Pt91).

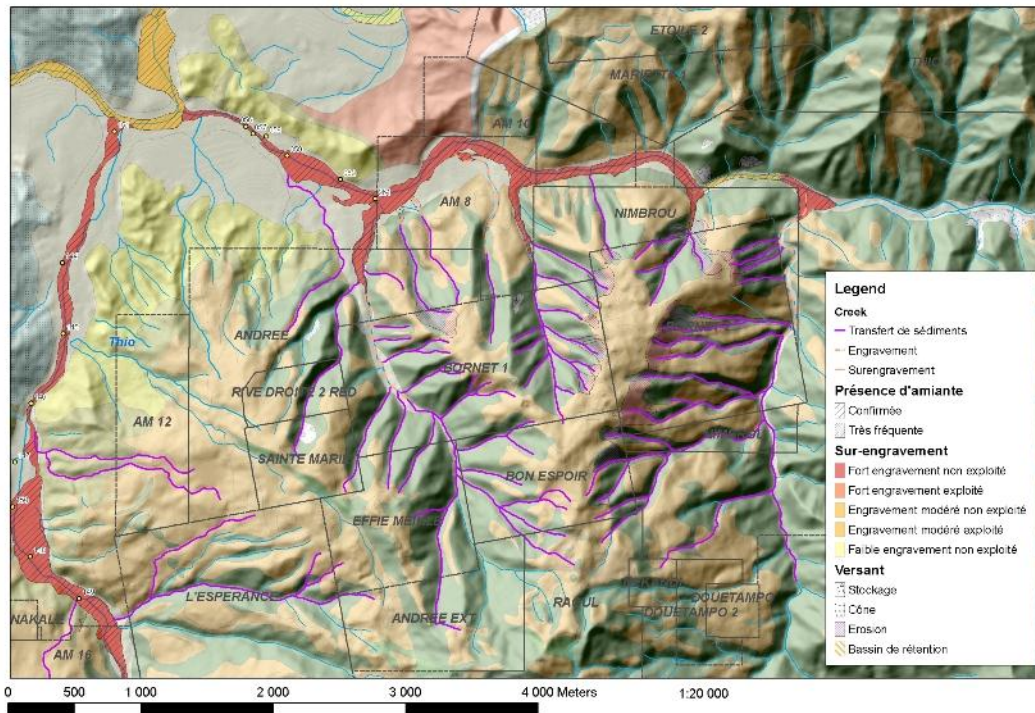


Illustration 14 : La Neburu (Bassin de la Thio) : extrait de la carte du sur-engravement.

4.2.4. Les creeks du secteur aval en rive gauche de la Thio

Ces creeks, sur un linéaire de 4 km environ de la partie aval de la Thio, drainent le massif minier de Thio Plateau constitué uniquement de péridotites et de latérites minces. Ces creeks, dont les plus importants présentent un sur-engravement très important, ont nécessité la réalisation de travaux et d'ouvrages en vue de réduire les apports solides à la Thio. Ces creeks dont les pentes sont élevées drainent des zones en forte érosion et fortement instables. Leurs fortes pentes ainsi que la faible distance entre les zones de production de matériaux et la Thio sont la cause d'un transfert très rapide vers la rivière. Les creeks les plus emblématiques de la Thio aval sont le creek Tomuru, et la Bwa Neca qui ont fait l'objet de rectification de lit, de purge, d'édification de piège à cailloux, de réhabilitation avec terrassement et végétalisation etc. Malgré l'ensemble des travaux réalisés, la zone reste fortement impactée. Les zones d'érosion qui produisent les matériaux sont les concessions :

- pour le creek Tomuru : Saint-Paul, la Saint-Martin (2B, 2C), Toumourou, les Basses Alpes, la Cézair, Gironde ;
- pour le creek Xwe Mue : les Basses Alpes, Saint-Martin 2E, Josephine 2, Romazy Red ;
- pour le creek Nedoro : Thio 1 ;
- pour la Bwa Néca : Beaucourt Red, La Moulinet, Plourivo 2 & 3, Suzette ;
- Xwe Ngere : Belvédère, Beaucourt Red ; Thio 2 dans une moindre mesure.

Par ailleurs signalons que certains creeks modestes d'apparence (Xwe Ngere notamment) traversent le village de Thio et sont localisés en aval de verses minières importantes (Belvédère, Beaucourt Red). L'occurrence d'événements pluvieux intenses (type événement du 26 décembre à Houailou 500 mm/24 h) pourrait provoquer de fortes érosions des verses minières voire des glissements de terrains et des déstabilisations de versants entiers qui seraient susceptibles de générer des coulées de boues et autres laves torrentielles de grande

ampleur **mettant en danger les habitants et les bâtiments** situés à l'aval. En effet, les très importants volumes de matériaux potentiellement mobilisables pourraient au cours de l'événement remplir en très peu de temps le lit de la Xwe Ngere et s'épandre latéralement au niveau des habitations qui sont installées sur le cône alluvial. Compte tenu de la pente du creek en amont, la vitesse d'écoulement serait très élevée ce qui rajouté au volume de la charge solide mobilisable lui donnerait une capacité de destruction significative.



Illustration 15 : Le creek Xwe Ngere à Thio : les verses minières (photo de gauche) vue du village, le Xwe Ngere au niveau du village de Thio (photo de droite).

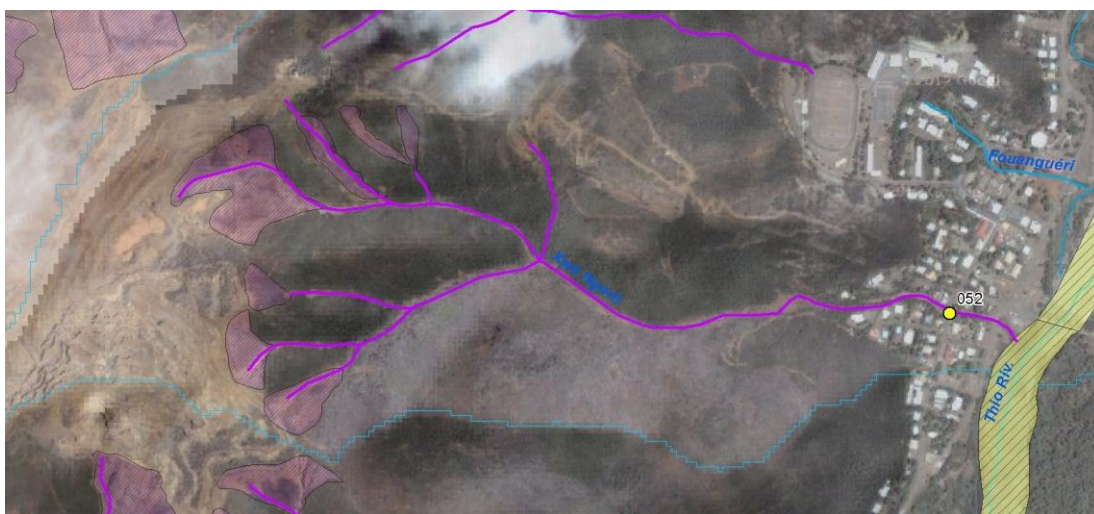


Illustration 16 : La Xwe Ngere (Village de Thio, le point jaune pt52 correspond à la localisation des photos de l' Illustration 15).



Illustration 17 : Rectification, curage et aménagements de la Bwa Néca.

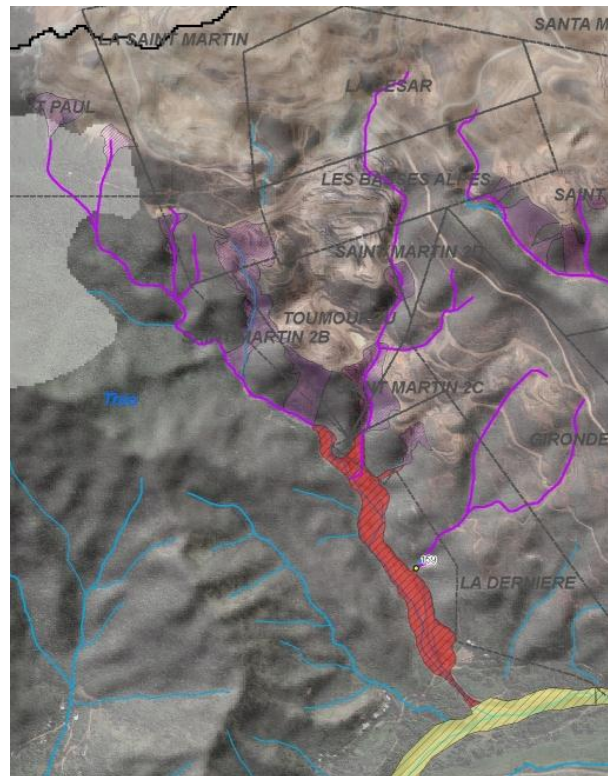


Illustration 18 : Creek Tomuru (Thio) : carte des zones de production de matériaux, de transfert et le sur-engravement.

4.2.5. La Thio

Le lit de la Thio est affecté d'un sur-engravement sur ses 20 derniers kilomètres. L'ampleur de sur-engravement y est variable et apparaît, par rapport à certains de ses affluents, comme relativement modéré. Le sur-engravement est conditionné en partie par la localisation des apports de ses affluents et creeks. Ainsi, à l'aval immédiat des confluences avec la Neburu et la Nakaré par exemple, le niveau de sur-engravement apparaît plus élevé qu'à l'amont. Par ailleurs, les segments de la Thio plus étroits et à pentes probablement un peu plus fortes montrent généralement un niveau d'engravement moins fort que les zones larges à pentes plus faibles. Ces derniers sont en effet, pendant les phases actives de transport solide, affectés par des vitesses d'écoulement plus faible que ceux des segments étroits ce qui diminue localement la capacité de transport de la rivière et engendre un dépôt de sédiments. Rappelons toutefois qu'en plus du sur-engravement essentiellement lié au dépôts de sables, graviers, galets et blocs, l'érosion des latérites des anciennes zones minières génère un volume conséquent de particules fines latéritiques qui contribuent à la dégradation des eaux de surface et des lits de rivières. Ces fines latéritiques transitent rapidement jusqu'aux zones aval des rivières où elles se sédimentent, contribuant à leur envasement. La Thio n'y échappe pas ce qui a suscité la réalisation d'ouvrages et de dragage de son cours inférieur. Par ailleurs, ces fines ont contribué et contribuent encore à l'évolution des zones littorales (Garcin et al. 2013).

4.3. LA POYA

La rivière Poya possède un vaste bassin versant de 363 km². Les lithologies y sont variées avec une dominance des « basaltes, dolérites et gabbros » qui représentent environ 22,4 %, puis les péridotites (11,2 %), 10,4 % pour les alluvions, les roches poly-métamorphiques (10,3 %) ; les autres lithologies se partageant le pourcentage restant.

Les massifs miniers sont présents au nord-ouest et au sud-ouest du bassin, la seule zone significativement engravée se localise à une dizaine de kilomètres de l'embouchure sur une distance de 8 km environ au cours et en aval de sa traversée du massif minier du sud-est. La surface couverte par le sur-engravement est de l'ordre de 0,8 km².

Le sur-engravement est essentiellement alimenté par deux creeks de rive gauche (Illustration 19), dont le lit du premier (Wa Ke) présente lui aussi un sur-engravement significatif (Illustration 20). Ces deux creeks ont nécessité des remodelages et aménagements de lit notamment au niveau du passage de la route et en aval afin de faciliter les écoulements. Les sources de matériaux qui alimentent ces deux creeks sont les concessions Pinpin5, Riri, Philofèle, Philomène et Kroui1. Deux creeks en rive droite participent aussi aux apports solides dans le même secteur mais dans une bien moindre mesure.

La présence de minéraux amiantifères dans les galets y est confirmée.

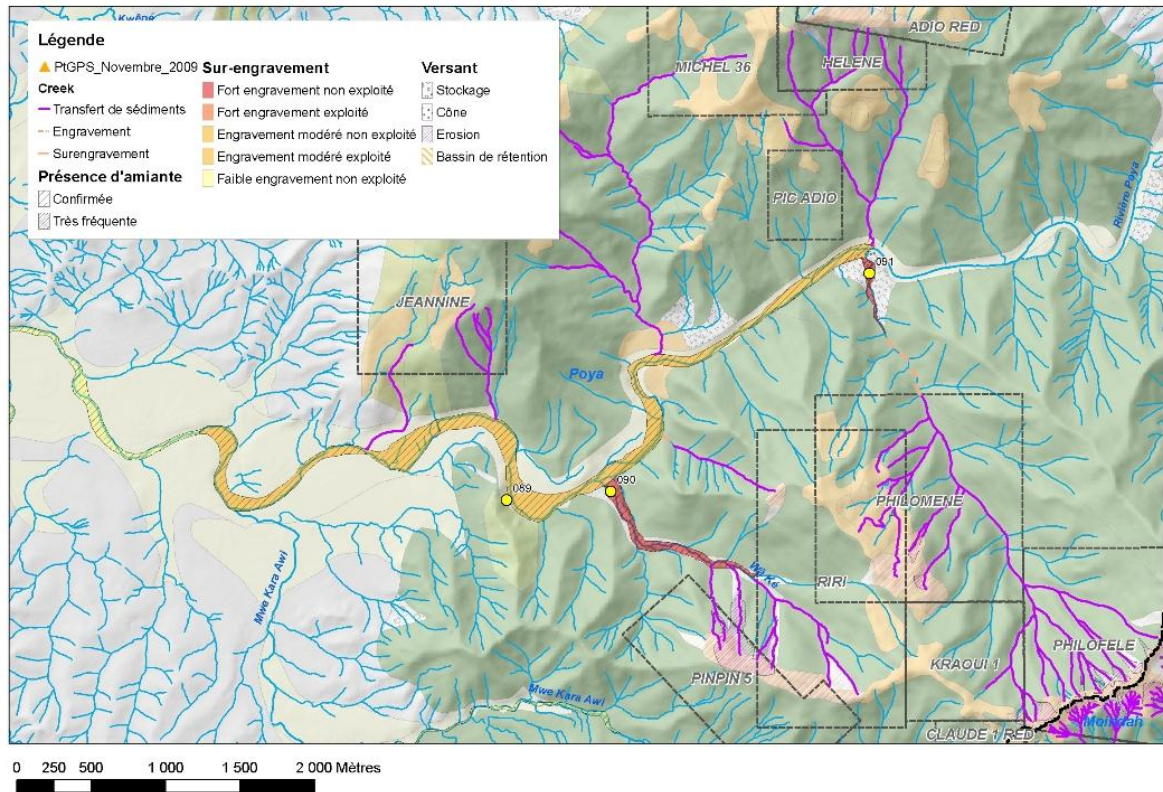


Illustration 19 : La Poya : extrait de la cartographie du sur-engravement.



Illustration 20 : Surengravement de la Wa Ke en amont de sa confluence avec la Poya (Pt90).

4.4. LA KOUAOUA

La Kouaoua occupe un vaste bassin versant de 249.5 km². Les lithologies dominantes sont les roches poly-métamorphiques qui représentent 27,1 % de la surface et sont localisées dans la partie amont (occidentale) du bassin, les péridotites qui couvrent 22,9 % de la surface avec les latérites associées sur environ 15,3 % du bassin et qui se situent plutôt dans la partie aval du bassin. L'association péridotites et latérites représente à elle seule 38,2 % de la surface du bassin. C'est sur ces zones du massif minier que deux zones indépendantes de sur-engravement sont observables. Elles correspondent d'une part à la Kouaoua aval qui est alimentée par des creeks de rive gauche et d'autre part à la Wayo Wia / Kaviju dans le secteur Nord du bassin. La surface sur-engravée totale sur le bassin de la kouaoua est d'environ 0,73 km² dont 0,7 km² pour la Wayo Wia / Kaviju.

4.4.1. La Kouaoua aval

L'engravement de la Kouaoua aval paraît relativement modéré et nourri essentiellement par des apports des creeks de sa rive gauche principalement le Wa Pukeme, Wé Rhexà et d'autres creeks sans noms.

La Wa Pukeme montre un sur-engravement significatif notamment dans son secteur aval avant sa confluence avec la Kouaoua. Son sur-engravement a nécessité des travaux de recalibrage de lit afin de faciliter les écoulements et prévenir les inondations. C'est aussi dans le lit de la Wa Pukémé que la plus grande densité de galets à minéraux amiantifères a été observée. La question qui se pose est de savoir s'il s'agit effectivement d'une plus forte densité représentative de celle des alluvions de cette rivière dans son ensemble où s'agit-il d'une concentration secondaire issue des processus de transport/sédimentation dans la rivière et qui dans ce cas n'est pas représentative ?

Les principales sources d'apport sont les concessions Providence, Providence2, SMMO31 & Ext, Pionnier, le Caludius Red, la Dorre Red, Loiret Red, le Béarn Red, Ann Page Red.



Illustration 21 : Travaux de recalibrage de l'aval du cours de la Wa Pukeme suite à son sur-engravement (Pt162).



Illustration 22 : Sur-engravement dans le segment amont de la Wa Pukeme (Pt164).

4.4.2. Wayo Wia / Kaviju

La Kaviju et à l'amont la Wayo Wia drainent la partie du nord du bassin versant de la Kouaoua correspondent au secteur le plus largement engravé qui couvre environ 0,7 km². Ce sous bassin est entièrement constitué d'affleurements de péridotites, de latérites et de cuirasses.



*Illustration 23 : Lit de la Kaviju nettement sur-engravé.
À noter la présence de dépôts de fines latéritiques dans le lit.*

La Wayo Wia est engravée sur plus de 6 km de long à l'amont de sa confluence avec la Pwejau qui donnera naissance à la Kaviju. La Wayo Wia est alimentée sur les deux rives et de façon très régulière par des creeks drainant des concessions minières (Illustration 24).

Les apports en matériaux sont importants et conditionnent un important sur-engravement de la rivière (Illustration 25, Illustration 26). Des aménagements et travaux hydrauliques sont réalisés sur certains affluents afin de contenir les apports solides. Les zones d'apport de matériaux sont nombreuses et issues de l'érosion des concessions suivantes en rive droite : Newco 1 & 2, Victorian Red, Renaissance, Moustache Red, Victorian red, Alice 25, Thibault, Claire red, Germaine et en rive gauche : Stamboul Red, Victoria Red, Eureka Red, Lydia, EVT, Alice 20 ext., Alice 28, Philippe, Alice 18. On observe fréquemment des cônes au niveau des confluences entre creeks et rivière. Les sédiments dont la source est proximale sont généralement hétérométriques et peu roulés, les fines latéritiques sont très présentes dans le lit.

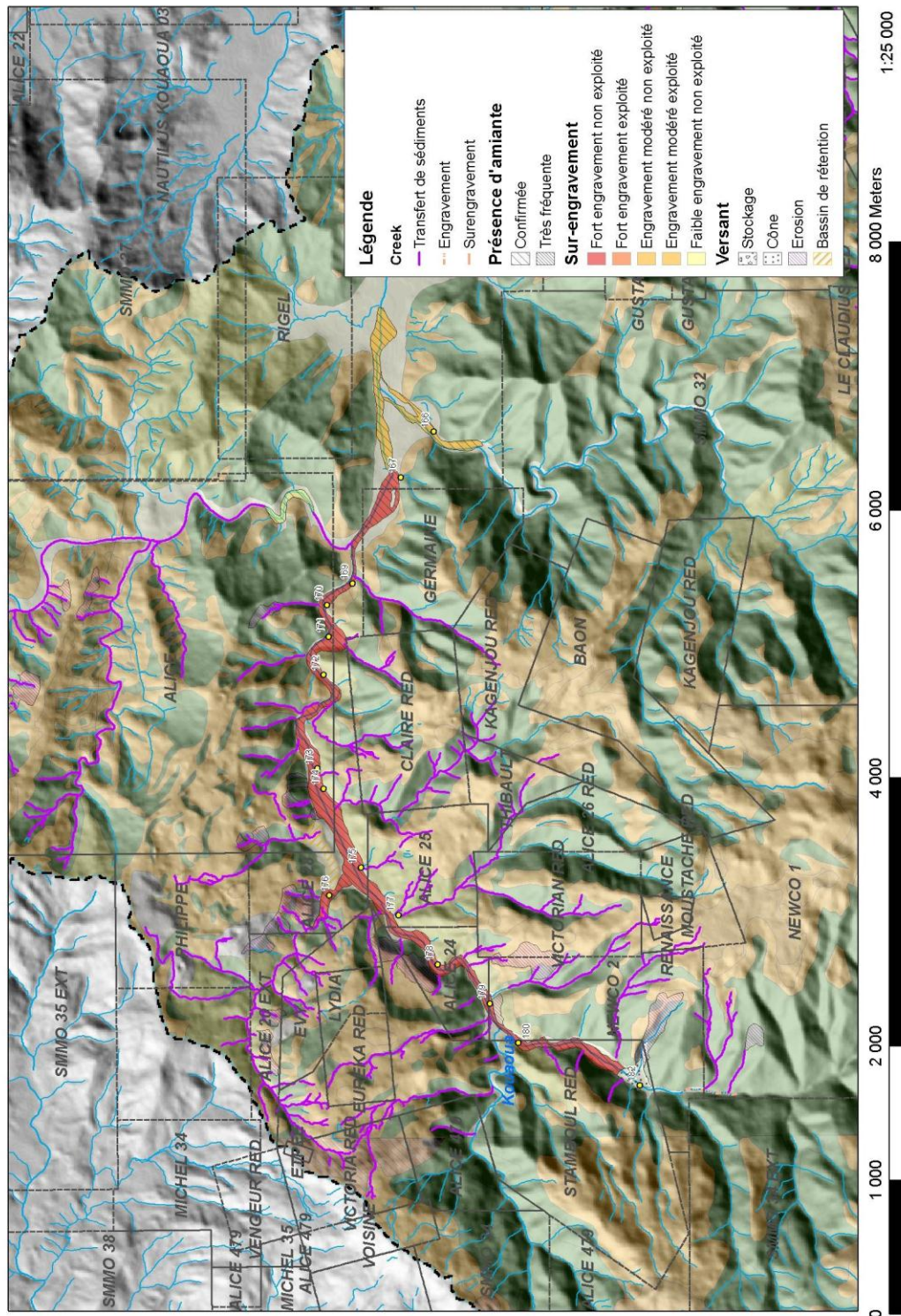


Illustration 24 : Wayo Wia et Kaviju (bassin de la Kouaoua) : extrait de la carte du sur-engravement.



Illustration 25 : Curage, rectification et aménagement de piste dans le lit sur-engravé de la Wayo Wia (Pt171).



Illustration 26 : Lit sur-engravé de la Wayo Wia (Pt179).

La zone sur-engravée de la Wayo Wia est nourrie dès l'amont par un effondrement important en bord de la concession Newco 2 qui a formé un cône alluvial de gros volume (Illustration 27) ayant bloqué la rivière et crée en amont un lac de barrage (Illustration 28). Cet événement

assure à lui seul une grande part du sur-engravement de l'amont de la rivière. Le volume de sédiments et la géométrie du cône ajouté à l'activité de la zone d'arrachement permettent d'affirmer que l'apport de matériaux à la rivière se poursuivra pendant les années à venir. En aval, l'existence de creeks fournissant des matériaux et des apports directs de versant aval implique que le sur-engravement de la Wayo Wia sera pérenne et conséquent dans le futur.



Illustration 27 : Cône formé par les dépôts issus d'un éboulement dans le versant barrant la vallée de la Wayo Wia (vue de l'aval, Pt180). À noter la granulométrie et le caractère peu roulé des matériaux dus à la proximité de la source des matériaux (le personnage donne l'échelle).



Illustration 28 : Lac de barrage en amont du cône - Vallée de la Wayo Wia.



Illustration 29 : Zone d'effondrement dans le versant au pied de la concession Newco 2. Cet effondrement est responsable d'une partie du sur-engravement de l'amont de la rivière Wayo Wia.

4.5. LA OUENGI

Le bassin versant de la Ouengi est étendu et couvre 247 km². Les lithologies affleurantes sur le bassin versant sont largement dominées par les péridotites qui représentent 48,3 % tandis que les latérites sur péridotites couvrent 20,8 %. La surface totale occupée par ces formations est donc de 69 % et sont drainées par les secteurs médian et amont du bassin versant

Le sur-engravement dans les rivières est observable dans les segments aval et médian de la Ouengi et dans le secteur aval de son affluent la Xwa Kwédé. Il s'étend environ sur 15 km sur la Ouengi et sur environ 8,5 km en amont de la confluence avec la Ouengi pour la Xwa Kwédé. La surface occupée par le sur-engravement est de l'ordre de 2,16 km². L'intensité du sur-engravement des lits de ces rivières est variable selon les secteurs. Les zones de production de matériaux sont nombreuses, avec une dispersion de leur répartition spatiale à l'échelle du bassin. Cette dispersion et la distance parfois importante entre certaines zones de production de matériaux et les zones préférentielles d'accumulation explique les variations d'intensité de sur-engravement identifiées. Les zones sur-engravées qui ont pu être observées sur le terrain sont distales par rapport aux zones de production, les zones de sur-engravement localisées à l'amont du bassin n'ont pas fait l'objet d'observations directes à cause de leur faible accessibilité.

La présence de veines de chrysotile dans les galets a été vérifiée en plusieurs points d'observation.

Dans le secteur aval du sur-engravement, on remarque une incision du lit actuel de la Ouengi qui peut atteindre 2,5 m à 3 m, cette incision indique que la phase d'engraissement du lit est antérieure et relativement ancienne. La rivière tente actuellement de reprendre son profil d'équilibre et contribue au transport vers l'aval de ces alluvions préalablement déposées. Ces niveaux forment des plages constitués de galets parfois de grande taille, bien roulés (allongement parfois supérieur à 60 cm) qui peuvent être patinés confirmant que leur mise en place n'est pas très récente. La granulométrie générale des dépôts ainsi que leur organisation (tuilage) indique des dépôts dans des conditions d'énergie élevée correspondant à des crues importantes qui pourraient être associées à des événements cycloniques. Par place, des apports plus proximaux (versants) s'observent et sont caractérisés par des galets moins roulés et plus anguleux se mélangeant au stock de provenance plus distale.

L'analyse de séries de photographies aériennes diachrones sur la Ouengi permettrait sans doute de préciser les dates de ces atterrissements ayant conduit au sur-engravement de la partie aval et médiane de la Ouengi.

Les zones de productions de matériaux sont situées sur la Ouengi amont (partie Est du bassin) et impliquent les concessions minières Nokobwei, sur la Ouengi médiane ce sont les concessions SMM0 67 Red & SMM0 67 Ext. Le creek affluent en rive droite de la Ouengi médiane, contribue à l'apport de matériaux issus des concessions Saint-Lazare 2 & 3. La Xwa Kwédé (affluent de rive droite) est alimentée par deux principaux secteurs. A l'amont il s'agit des concessions Vorarlberg, Aphrodite Red et Aphrodite ext2. Le second secteur de production comprend Marcel 1, Byzance Red, Kongouhaou 3 Red, Lackme B, Amphibole Red, Actinote Red et secteur sud de Vorarlberg.

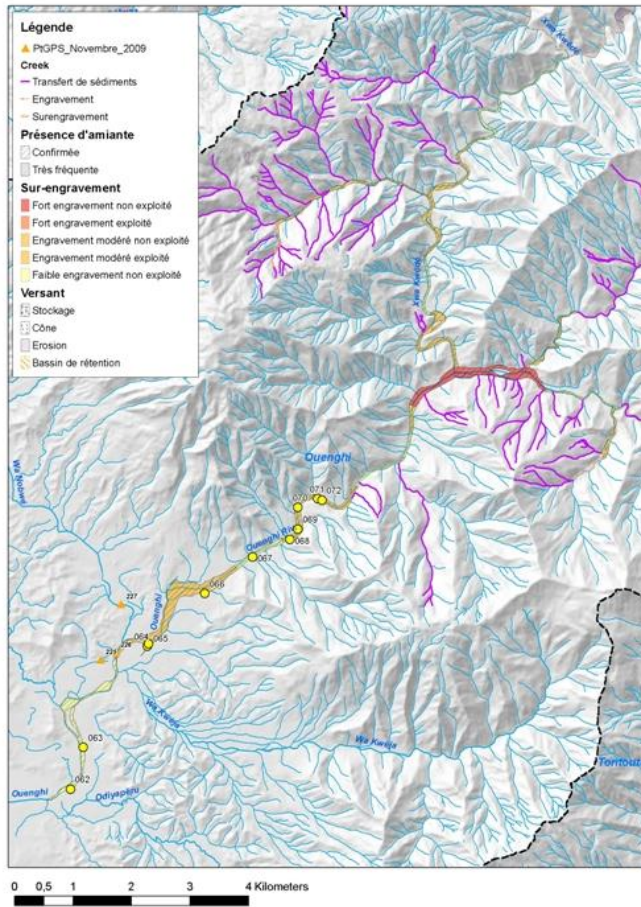


Illustration 30 : Ouenghi : extrait de la carte de sur-engrèvement.



Illustration 31 : Engrèvement à gros galets, graviers et sables sur la Ouenghi moyenne (Pt66).



Illustration 32 : Engravement dans un secteur encaissé de la Ouenghi moyenne (Pt67).



Illustration 33 : Sur-engravement à gros galets (Ouenghi moyenne, Pt 72).



Illustration 34 : Tuilage des galets sur la Ouenghi moyenne (Pt72).

4.6. LA RIVIÈRE DES PIROGUES

La rivière des Pirogues a un bassin versant de 146 km². La carte des pourcentages des sols nus (miniers et naturels) indique qu'ils occupent une partie significative de la surface du bassin versant. De fait, le traitement de la carte lithologique montre que 42 % de la surface est occupée par des latérites épaisses, 15 % par des gabbros, 14 % par des alluvions et 12 % par des dunites.

L'observation de l'orthophotographie montre en effet que les surfaces de sols nus y sont importantes mais que bien que des prospections minières y aient été réalisées sur ce bassin, bon nombre des sols nus sont des sols latéritiques naturels. On y remarque de nombreuses figures d'érosion (lavaka) dont certaines sont naturelles et d'autres déclenchées par les activités humaines (pistes, mines etc.). L'observation des lits de rivière ne montre pas, à quelques exceptions près, de sur-engravement significatif des lits.

Il apparaît que dans le contexte du massif du sud à latérites épaisses, bien que l'érosion soit active, aussi bien sur sols nus naturels qu'anthropiques, il n'y a pas de sur-engravement généralisé. Cet état s'explique par la granulométrie et la nature des produits de l'érosion qui sont par nature fins, sont transportés en suspension et ne peuvent de ce fait constituer des engraisements de lit visibles. Par contre, ces produits de l'érosion latéritique affectent les substrats aquatiques, la qualité de l'eau et les écosystèmes et peuvent contribuer à des modifications des zones d'embouchure par dépôts successifs de fines engendrant des progradations significatives (Garcin et *al.* 2013).

La surface occupée par le sur-engravement est d'environ 0,01 km² et concerne un petit creek de rive droite dans le secteur plutôt aval de la rivière des pirogues. Ce sur-engravement est nourri d'une part par l'érosion de la concession Graziella mais aussi par des érosions

régressives dans certains creeks, des érosions de berges et des lavaka d'origine naturelle. Ce sur-engravement reste très modeste en regard à ceux observé dans les rivières précédentes.



Illustration 35 : Engravement dans un creek de la rivière des pirogues.

4.7. LA MOINDAH

Le bassin versant de la Moindah couvre 124 km² avec deux lithologies dominantes : les péridotites qui couvrent 43,4 % et les basaltes et dolérites qui couvrent 35,6 %. Les basaltes et dolérites de l'unité de Poya sont cantonnés à la partie aval du bassin tandis que les péridotites constituent les reliefs de la partie amont du bassin versant. Les zones d'alluvions sur-engravées sont assez logiquement situées dans le secteur amont de la Moindah et de ses affluents.

La surface de lit sur-engravée est d'environ 0,62 km² et se décompose en deux ensembles :

- un sur-engravement de La Yomaa qui est le principal affluent de rive gauche de la Moindah. Le sur-engravement est important et s'étale sur un linéaire de 3,6 km de long en amont de la confluence avec la Moindah. Il est nourri des apports de matériaux issus de l'érosion des versants et surfaces des concessions Pinpin 3, Emma 1 & 2 ; matériaux transitant par des creeks pentus et courts (dénivelés maximum de l'ordre de 800 à 850 m, longueur entre 1 et 2 km) ;
- le second sur-engravement concerne la Moindah (bras Nékéwé) sur une longueur de lit d'environ 7,2 km. Cet engraissement du lit est lié aux apports solides induits par la Yomaa et par trois zones d'apport supplémentaires dont une autour de la zone de confluence (concessions Pinpin 1 et Michel 18) et les deux autres dans l'amont du bassin (en rive droite : Pinpin 1B, Philofèle, Guiguite, Bruno 2 et en rive gauche Pinpin 3, Emma 1, 2, 3, 4).

Des curages et travaux dans le lit ont été réalisés dans certains secteurs sur-engravés comme à la confluence Nékéwé / Yomaa (Illustration 37) ainsi que dans le bras Nékéwé afin de faciliter les écoulements et de diminuer les inondations des terres situées en rive gauche. Certains creeks provenant des zones Pipin 1b donnent naissance à des cônes alluviaux au niveau de leurs confluences avec la Nékéwé (Illustration 38) ; les sédiments y sont hétérométriques, polygéniques et peu roulés (Illustration 38). Certaines zones sur-engravées forment localement des terrasses peu élevées, faiblement végétalisées où les galets sont patinés. L'ensemble de ces paramètres indiquent que leur mise en place date de quelques années et résultent de phases d'engravement antérieures à l'actuelle. Dans certains secteurs, des érosions des

berges latéritiques ont été constatées et participent à l'apport en fines. La présence de trémolite dans les galets a été constatée.

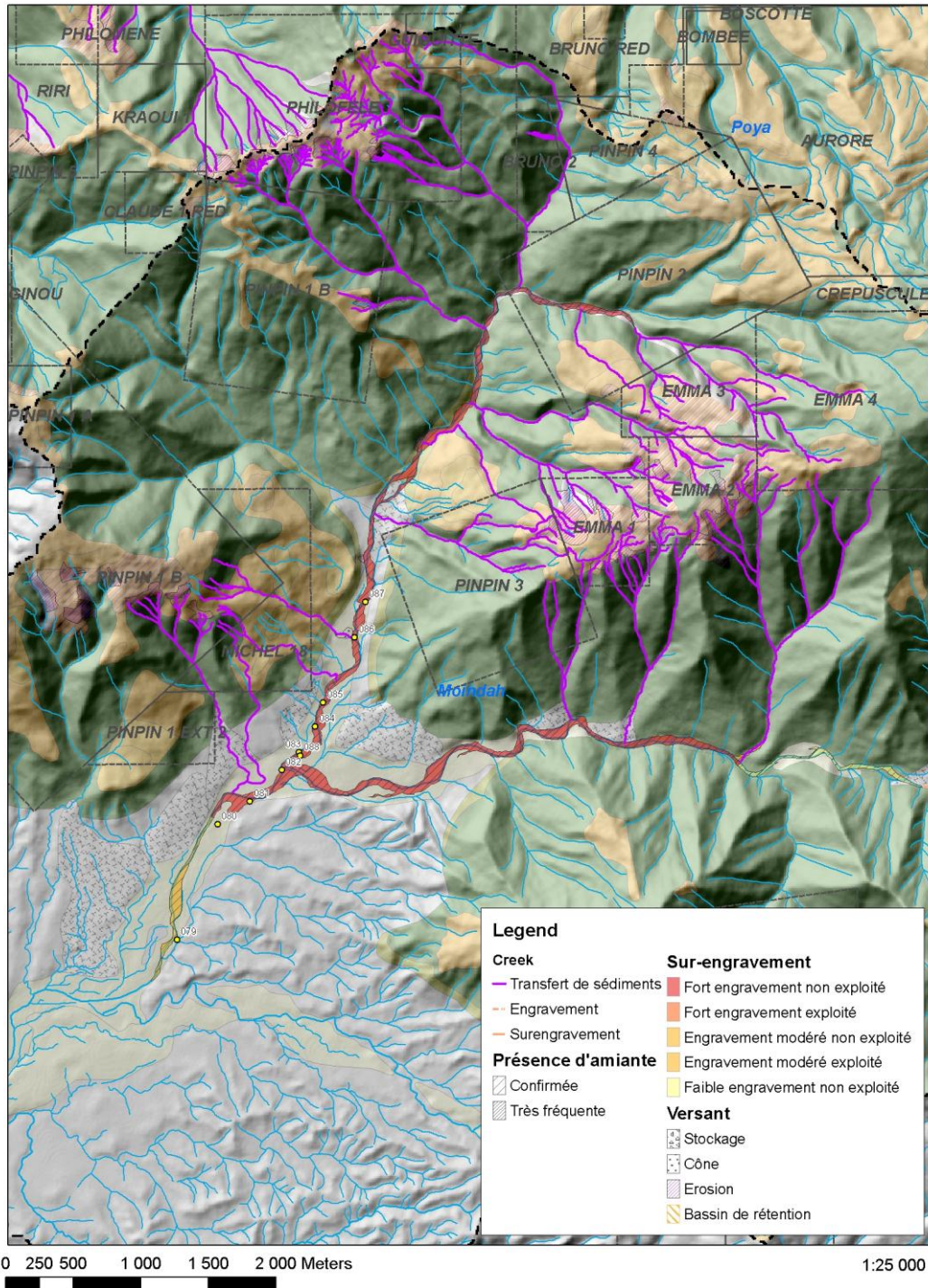


Illustration 36 : Moindah (Yomaa et Nékéwé) : extrait de la carte de sur-engravement.



*Illustration 37 : Confluence de la Yomaa et de la Nékéwé (Pt82).
À noter la réalisation de curage et de rectification du lit de la Nékéwé (à gauche) qui apparaît plus engravée que la Yomaa.*



Illustration 38 : Sédiments apporté par une creek drainant la zone Pinpin 1b (à gauche) et formant un cône à la confluence avec la Nékéwé (Pt86).

4.8. LA NÉPOUI

Le bassin versant de la Népoui couvre une surface de 124 km² ; les lithologies dominantes sont les hazburgites (53,45 %) puis les latérites à 12,23 % les alluvions représentant environ 11,3 %.

Les zones sur-engravées sont nombreuses et couvrent une surface de l'ordre de 1,3 km² ce qui représente environ 1 % de la surface totale du bassin.

L'ensemble du lit de la Népoui est affecté par le sur-engravement. Le sur-engravement est modéré sur son cours aval et moyen tandis qu'il est très important dans certains secteurs de son cours supérieur ainsi que sur son bras Est. Les zones de production de matériaux sont nombreuses et sont localisés dans les parties amont des sous-bassins. Sur certains sous-bassins, le sur-engravement et la quantité de fines transportées par les rivières et les creeks est telle que de nombreux aménagements ont été réalisés afin de contenir la charge solide. C'est le cas notamment sur les Bras Est de la Népoui (Illustration 40, Illustration 41).

Les principales zones en érosion fournissant les matériaux sont nombreuses et concernent les concessions suivantes :

- Sur le Bras Est branche sud en rive gauche : Surprise 2 Red, Namie Ext 1 & Namie Ext 2 ;
- sur le Bras Est branche Sud en rive droite : Amélie 3, Trafalgar 4, Si Reis, SMMO 47 B ;
- sur le Bras Est branche NE en rive gauche : Amélie 3 ;
- sur le Bras Est branche NE en rive droite : SMMO 48 & Si Reis 2 ;
- sur la Népoui (bras nord) les contributions proviennent de SMMO 48, Sireis 2 Ext, Si Resi 2, Si Reis 1, SMMO 50, Nice 6 ;

Les sur-engravements observés peuvent avoir des caractéristiques variées en fonction de la distance à la source de production des matériaux. On observe des cônes actifs formés par des sédiments peu évolués, peu classés et peu roulés lorsque les apports sont proximaux comme dans certains creeks du bras Est. Au contraire, les éléments constituant les alluvions sont beaucoup plus matures et plus évolués lorsque la source des matériaux est distale comme par exemple dans le lit médian ou aval de la Népoui. Le nombre important de sources de production de matériaux, la présence de stocks importants dans les réseaux amonts dont le transfert est progressif nous indique que le processus de sur-engravement des rivières se poursuivra dans le futur et qu'il participera activement à l'évolution des lits des creeks et rivières et du littoral dans les années à venir.

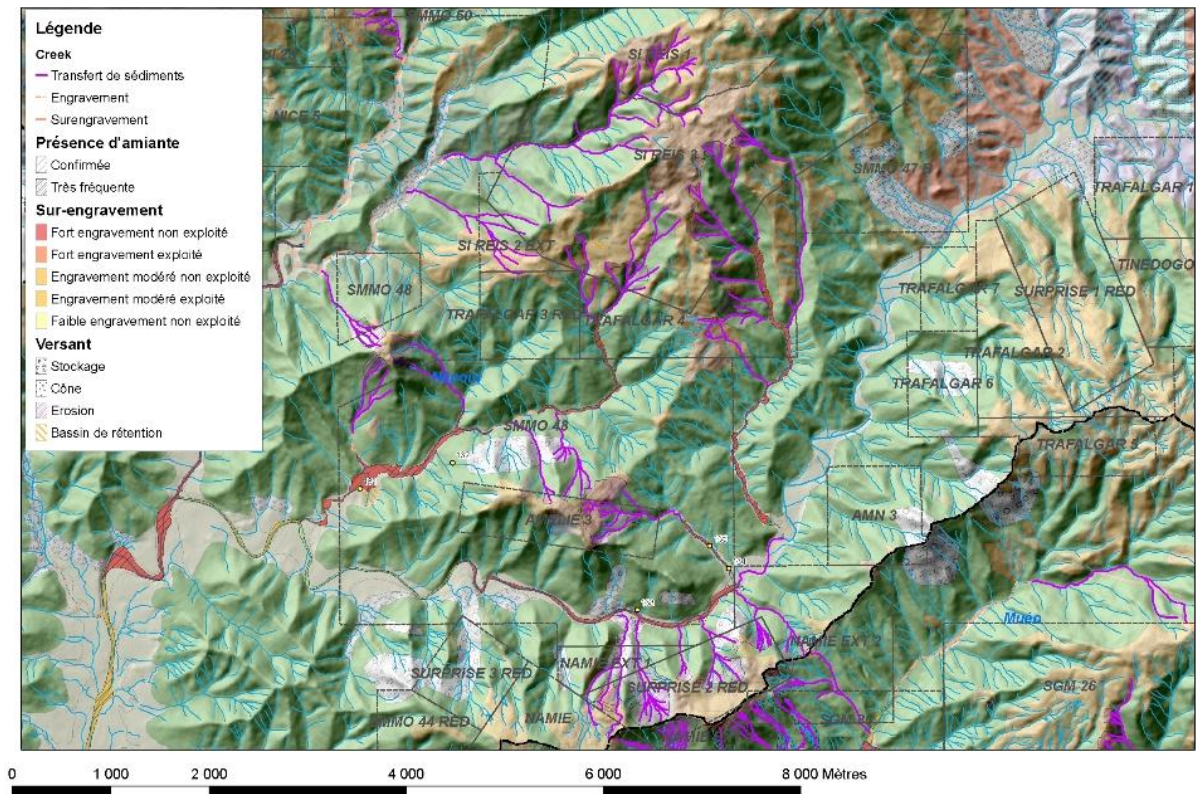


Illustration 39 : Bras Est de la Népoui : extrait de la carte du sur-engravement.



Illustration 40 : Bassin de piégeage de sédiments dans la branche Est de la Népoui (Pt131).



Illustration 41 : Dispositif de piégeage de la charge solide dans un creek en aval de la concession Surprise 2 Red, bras Est de la Népoui.

4.9. LA MUÉO

Le bassin versant de la Muéo a une forme longiligne (environ 16 km de long pour 5 à 6 km de large) couvrant 78 km². Les lithologies affleurantes sur le bassin sont largement dominées par les Hazburgites qui représentent près de 71 % de la surface. Les autres lithologies les plus représentées sont les cuirrasses (8 %), les serpentinites (5 %) tandis que les latérites couvrent 4,7% du bassin. La très faible diversité lithologique se retrouve logiquement dans celle des alluvions par ailleurs fortement affectées par le sur-engravement.

La présence de minéraux amiantifères dans les galets des alluvions y a été confirmée (présence de veine de chrysotiles et de trémolites).

La surface du lit sur-engravé est importante et couvre 1,2 km² ce qui représente 1,5 % environ de la surface du bassin versant. Une très grande partie du linéaire de la rivière et de son principal bras est sur-engravée. L'intensité du sur-engravement va logiquement en décroissant de l'amont vers l'aval tandis que l'évolution des matériaux va en augmentant de l'amont vers l'aval (plus roulés à l'aval qu'à l'amont ; les sables et graviers voient leurs fréquences augmenter vers l'aval).



Illustration 42 : Muéo : extrait de la carte du sur-engravement.



Illustration 43 : Sur-engravement de la Muéo aval (Pt118).



Illustration 44 : Sur-engravement de la partie aval de la Muéo (Pt120).



Illustration 45 : Alluvions de la Muéo (Pt120), à noter la présence de sables et de graviers et de galets à veine de chrysotile.



Illustration 46 : Sur-engravement de la Muéo moyenne (Pt128).



Illustration 47 : Lit sur-engravée de la Muéo moyenne (Pt129).



Illustration 48 : Sur-engravement à alluvions grossières de la Muéo moyenne (Pt 129) à comparer avec Illustration 45 (taille du carnet 21 cm).

Trois zones principales participent à l'apport en matériaux. La première correspond au bras secondaire de la Muéo situé en rive gauche qui est nourri par l'érosion des concessions minières Corsico, Oublié 35 & 34, SGM 27. Le lit de ce bras est très fortement sur-engravé (Illustration 49) et contribue pour une grande part à la fourniture d'alluvions de la partie aval de la Muéo.

La seconde zone d'apport se situe à 10 km de l'embouchure de la Muéo (distance directe) et correspond aux concessions SGM 30, Surprise 2 Red, Namie et Namie Ext 1. Les érosions sur les versants y sont marquées, l'aval des creeks y sont fréquemment occupés par des cônes épais et larges.

La troisième zone se situe dans la partie amont du bassin versant et fournit moins que les précédentes. Elle implique aussi bien des concessions en rive droite qu'en rive gauche : SGM 26, Monique 20, Oubliée 34.



Illustration 49 : Très important sur-engravement du bras secondaire de la Muéo (Pt130).

4.10. LA DOTHIO

Le bassin de la Dothio couvre 68 km², les lithologies dominantes sont respectivement les serpeninites (26,56 %), les basaltes, dolérites et gabbros de l'unité de Poya (23,28 %), les péridotites (14,2 %) et les hazburgites (10,48 %). Le massif minier exploité est localisé dans la partie aval du bassin versant. La surface sur-engravée est relativement faible et occupe environ 0,1 km² ce qui représente 0,15 % de la surface du bassin. Certains sur-engravements actuels sont surimposés à des dépôts de cônes plus anciens dont l'origine minière n'a pas été contrôlée et qui n'ont de ce fait pas été intégrés à la couche sur-engravement. Notons par ailleurs que le Creek Wellington (traité à part) se jette dans la Dothio et qu'il contribue largement aux apports solides dans son secteur le plus à l'aval. Les matériaux sont issus principalement des concessions minières situées en rive gauche de la Dothio : Pauline Red, Pauline Ext, SMMO 7, Petrel, Balansa et Balansa 2 (Illustration 50).

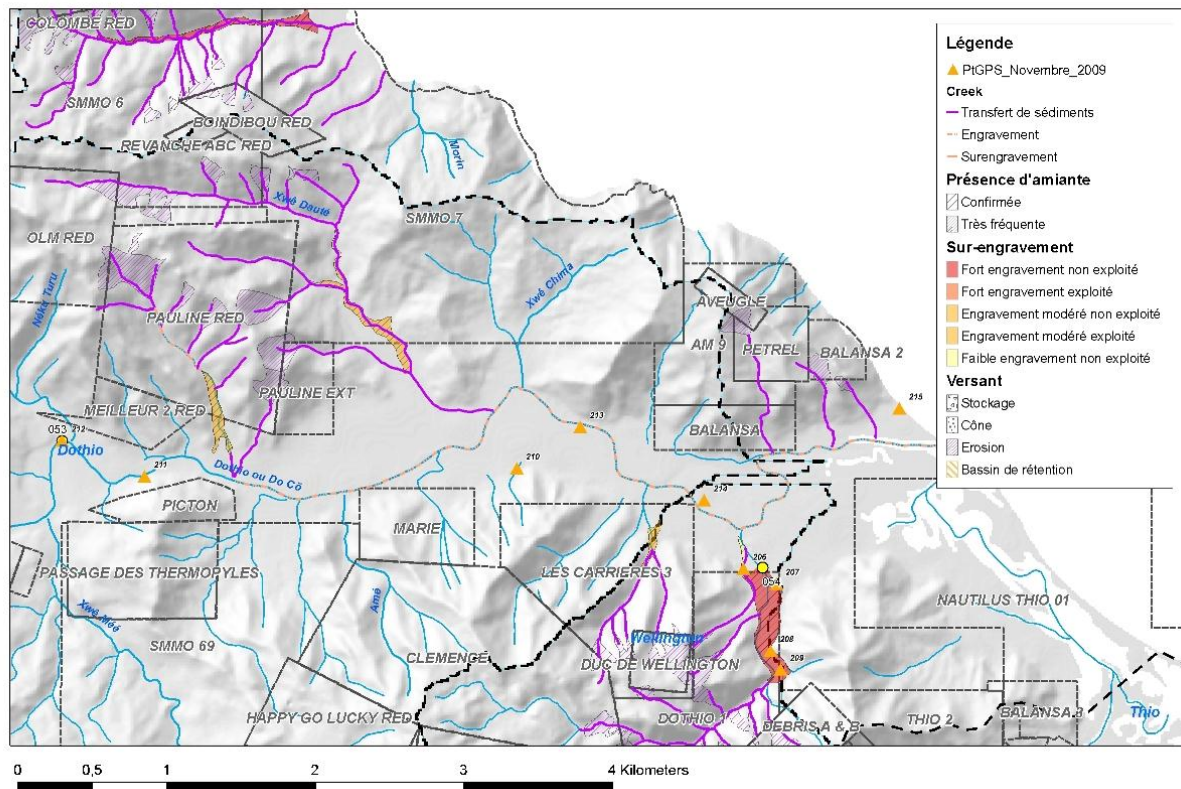


Illustration 50 : Dothio aval : extrait de la carte de sur-engrèvement.

4.11. LA COULÉE

Le bassin de la Coulée occupe 84,5 km², les surfaces de sols nus naturels y sont très importantes et fréquemment affectés par des érosions de type Lavaka. Certains Lavakas sont sans aucun doute d'origine naturelle alors que d'autres semblent avoir été initiés par des actions anthropiques : réalisation de piste, prospections minières, etc. Ces grandes surfaces d'érosion sont donc directement liées aux très grandes surfaces occupées par les latérites au sein du bassin versant¹ (Illustration 53). En effet, bien que les hazburgites et les dunites représentent 46 % de la surface, les latérites couvrent 30 % de la surface tandis que les formations de versants occupent 7 %. Ce fort pourcentage de surfaces occupées par les latérites permet d'expliquer, malgré la forte érosion qui affecte le bassin versant, que les creeks et la Coulée ne soient pas particulièrement engravées. En effet, le sur-engrèvement des rivières résulte des apports largement excédentaires de sédiments dont la granulométrie s'échelonne de celle des galets à celle des sables or l'érosion des latérites ne produit que des particules fines. En contrepartie, les importants apports de particules fines sont responsables du nappage du fond de lit par les fines ainsi que de l'avancée du front sédimentaire en avant de l'estuaire de la Coulée au cours des dernières décennies (Garcin et al. 2013).

¹ La carte géologique à 1/50 000 dont est tirée la carte lithologique montre localement des interprétations différentes concernant les surfaces occupées par les latérites par rapport aux péridotides. Ces différences d'interprétations initiales peuvent conduire à une variation des % occupés par chaque classe lithologique qui n'est pas nécessairement significative.



Illustration 51 : Lavaka affectant les latérites dans le bassin de la Coulée (Pt45).



Illustration 52 : Érosion d'une berge latéritique par la Coulée (Pt45).

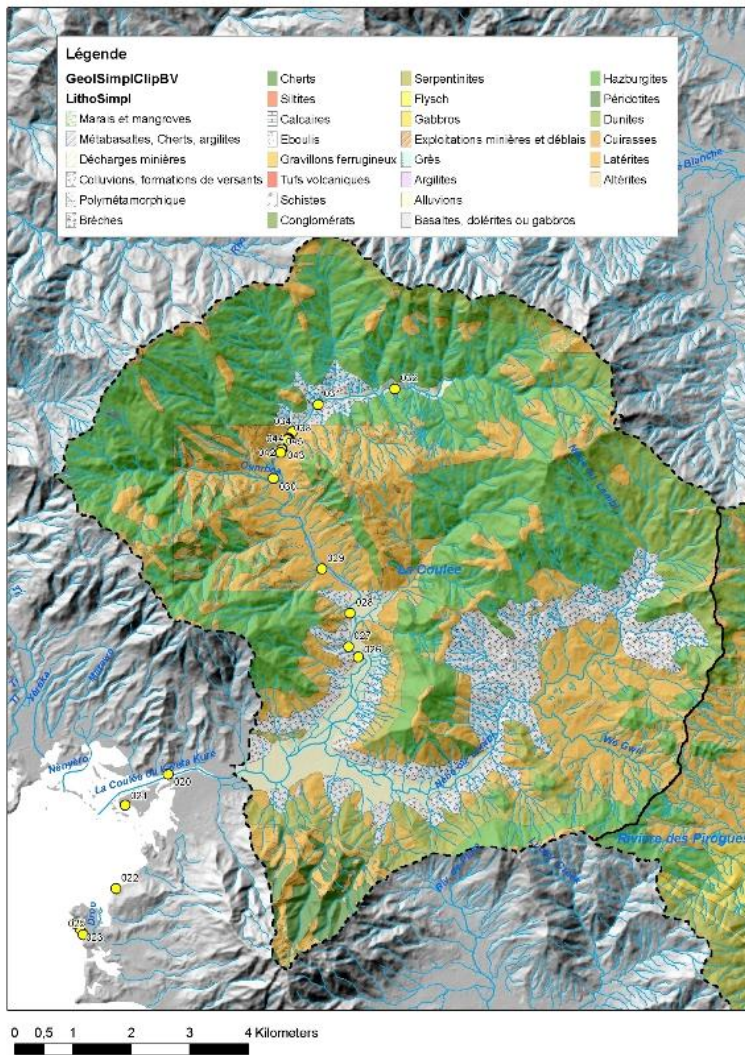


Illustration 53 : Carte lithologique du bassin versant de la Coulée.

4.12. LA MONIO

La Monio possède un bassin versant assez trapu de 26,4 km² essentiellement composé par des hazburgites (66 %), des cuirasses (20,8 %) ; la surface occupée par les alluvions y est importante et atteint 5,37 %.

Les surfaces sur-engravées couvrent 0,2 km² soit un pourcentage de 0,76 % du bassin versant et sont localisées dans la partie aval et médiane de la rivière. Les zones de production de matériaux sont assez distales (de l'ordre de 3 km) par rapport à la zone sur-engravée et se répartissent sur plusieurs sous-bassins. Les principales zones de production de sédiments sont les concessions Aurelia Red, Ahmed 15, Monique 3 pour le bras rive gauche, Oubliée 33, 36 & 37, Monique 9 & 10 pour le bras central et Ahmed 6 & Saint-Louis pour le bras de rive droite.

La zone de sur-engravement aval a fait l'objet de travaux sur son lit avec nivellements des morphologies du lit, création de levées à partir d'alluvions prélevées dans le lit et probablement exploitation au moins partielle de granulats.

La présence de veines de chrysotile dans certains galets alluvionnaires a été constatée.



Illustration 54 : Lit sur-engravé de la Monio (secteur aval), à noter le nivellement du lit et la création de levées en arrière-plan.

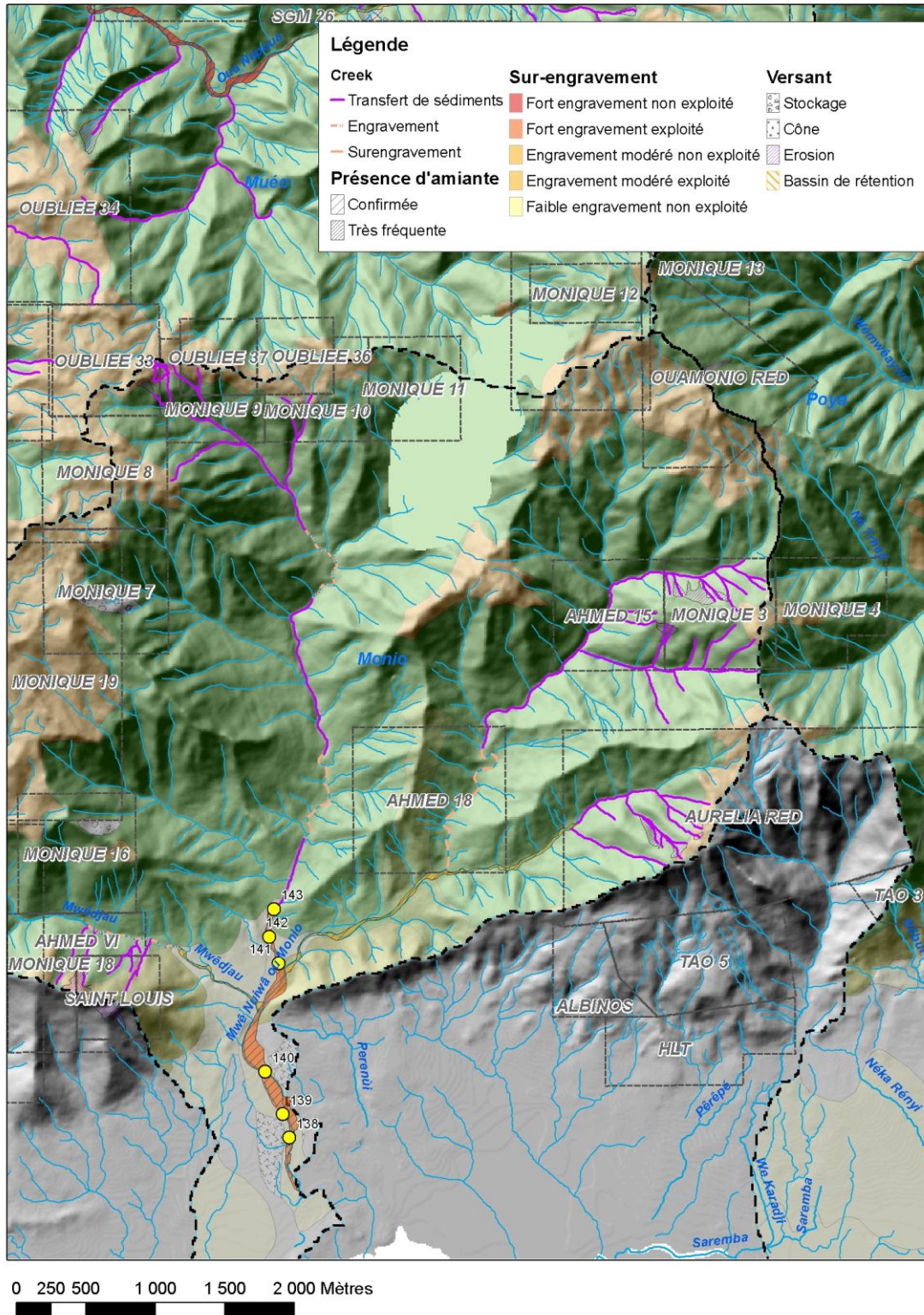


Illustration 55 : Extrait de la carte de sur-engravement de la Monio.

4.13. LA WA DIBU

Nous avons regroupé sous la dénomination de Wa Dibu quatre creeks drainant le massif du Ouazangou (Illustration 56). La surface sur-engravée est de 0,2 km² au total ce qui représente 0.78 % de la surface du bassin versant de ces creeks (surface d'environ 25,7 km²). Ce dernier est essentiellement occupé par des formations de marais et de mangroves actuels à l'aval qui représentent 45,51 % de la surface tandis que les hazburgites occupent 22,4 % à l'amont du bassin et les basaltes, dolérites et gabbros de l'unité de Poya en occupent 11,9 % en partie médiane.

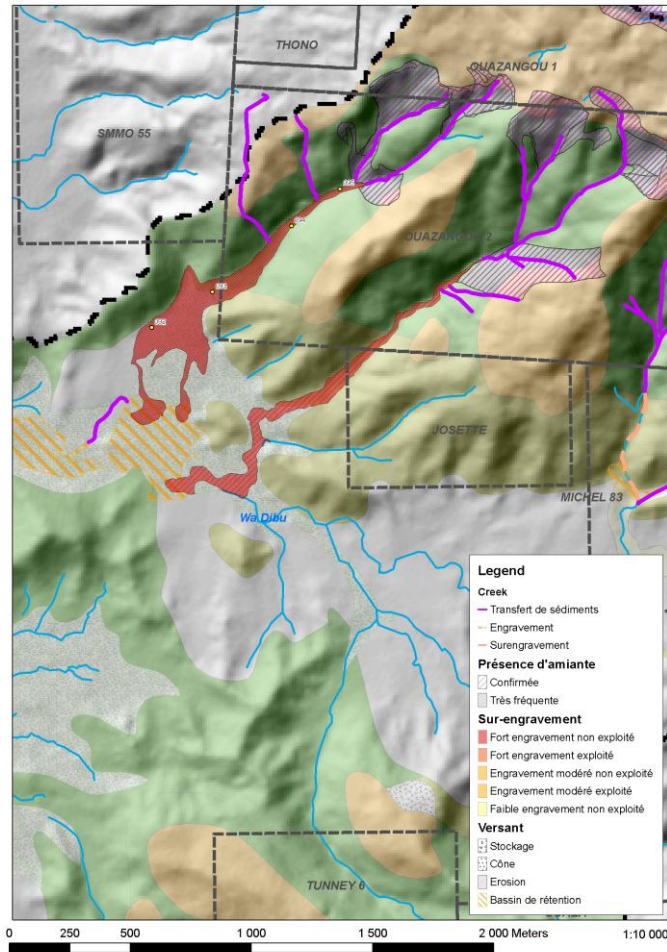


Illustration 56 : Amont de la Wa Dibu : extrait de la carte du sur-engravement.

Les zones sur-engravées sont localisées dans les creeks drainant le massif minier (hazburgites) du secteur amont du bassin versant et affectent surtout les deux creeks les plus à l'ouest. Leur proximité par rapport aux sources des matériaux et la forte pente du lit des creeks donnent aux alluvions sur-engravées d'une part un caractère torrentiel et d'autre part une faible évolution des matériaux (mauvais classement, galets peu évolués et anguleux etc., Illustration 57). Les très forts sur-engravement ainsi que l'importance des apports de fines latéritiques ont justifié la création de bassins de rétention ainsi que de recalibrage et d'aménagements hydrauliques visant à bloquer une partie de la charge solide.



Illustration 57 : Amont du lit du creek ouest de Wa Dibu en aval des zones de production de matériaux (aval Pt95, le personnage donne l'échelle).

Les zones qui fournissent les matériaux sont essentiellement les concessions Ouzangou 1 & 2 où des érosions de versants spectaculaires se produisent (Illustration 58).



Illustration 58 : Destabilisation de versant contributive au sur-engravement de la Wa Dibu dans le versant du Ouazangou (Ouzangou 1 : amont du Pt95).

4.14. LA OUE TANQUÉA

Le bassin versant de la Oue Tanquéa couvre une superficie de 12,2 km² occupée à 64,43 % par les péridotites et à 15,5 % par les latérites. Le sur-engravement affecte un grand linéaire du lit aussi bien dans la partie encaissée de la rivière dans le massif du Kaala que dans la plaine côtière (Illustration 59).

Les surfaces affectées par le sur-engravement couvrent environ 0,21 ce qui représente une surface importante à l'échelle du bassin versant (1,72 % de la surface totale). Les alluvions sur-engravées de la Oue Tanquéa font l'objet d'une exploitation de granulats qui remonte dans l'amont de la rivière (Pt103). La zone sur-engravée s'étend sur environ 1,5 km en amont du front d'exploitation actuelle.

Le lit a fait l'objet d'un recalibrage avec création d'une piste jusqu'à la zone amont de l'exploitation même dans les secteurs de lit très étroit de la zone médiane (Pt100), cet aménagement semble poser des problèmes de conflit d'usage (captage d'eau perturbé lors des phases d'exploitation) avec certains riverains (témoignage oral). L'exploitation qui s'est fortement développée depuis les observations 2009 a été conduite en respectant visiblement la morphologie initiale du lit, seules les zones à lit étroit sont fortement perturbées par la création de la piste. Le Oue Injob (bras secondaire de rive droite) est relativement peu sur-engravé mais participe à l'apport de matériaux dans la Oue Tanquéa à partir essentiellement des concessions Boualoudjelima, Boualoudjelima Ext2, Tunney 4 en rive gauche et à partir de la concession Palpa 2 en amont. En ce qui concerne la Oue Tanquéa sens strict deux zones fournissent les matériaux : la zone Kaala Red Bis en rive droite et Michel 37 en rive gauche à l'amont.

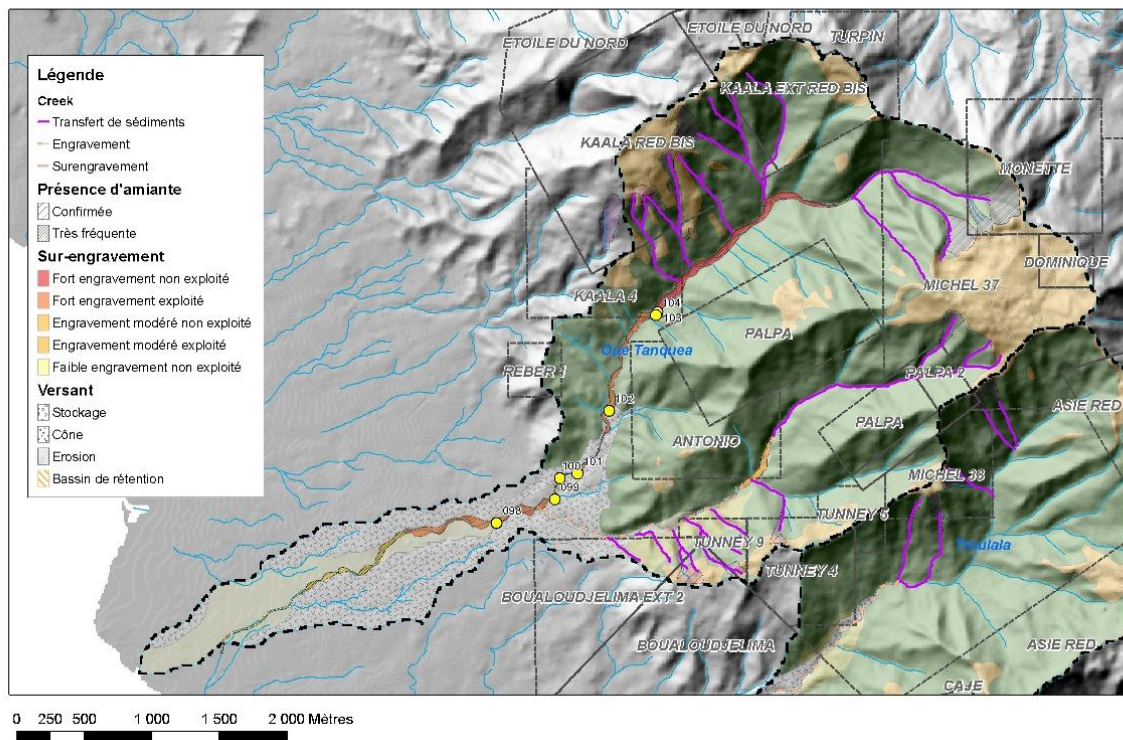


Illustration 59 : Oue Tanquéa : extrait de la carte de sur-engravement.



*Illustration 60 : Alluvions sur-engravées ayant été exploitée dans le Oue Tanquéa (Pt102).
À noter que la morphologie d'ensemble du lit a été préservée.*



*Illustration 61 : Vue vers l'aval prise du front de l'exploitation de granulats sur la Oue Tanquéa (Pt103).
À noter les sorties d'eau dans les alluvions exploitées.*



Illustration 62 : Vue vers l'amont du sur-engravement du lit en amont de l'exploitation de la Oue Tanquéa (Pt103).

4.15. LA TROULALA

Le bassin de la Troulala est d'une superficie de 13,2 km², les alluvions sur-engravées sont présentes dans le lit qui reste étroit, sont peu développées et couvrent une surface d'environ 0,014 km² soit 0,1 % de la surface du BV. Les lithologies présentes sur le bassin versant sont dominées par les péridotites (61,27 %) et les formations de versants (21,34 %). Le sur-engravement affecte un captage d'eau (Illustration 63, Illustration 64) obligeant visiblement à des curages de lit. La présence du captage interdit toute exploitation des granulats en amont qui occasionnerait une remise en suspension des particules fines qui perturberait le captage. La source des matériaux provient en grande majorité des érosions de la concession Michel 28.



Illustration 63 : Sur-engravement de la Troulala en aval immédiat du captage d'eau (Pt105).



Illustration 64 : Barrage et captage sur la Troulala (Pt105).

4.16. LA WANEUBWAYO

Le bassin de la Waneubwayo est de faible étendue (10,8 km²) et essentiellement constitué par des péridotites (57,53 %) et par des cuirasses latéritiques (30,7 %). Les surfaces alluvionnaires affectées par le sur-engravement couvrent 0,044 km² soit environ 0,3 % de la surface du bassin versant. Les zones sur-engravées sont localisées uniquement sur environ 1 km dans le secteur aval de la rivière, elles ont fait l'objet d'aménagement et de rectification des lits et probablement d'exploitations ponctuelles de granulats. Il semblerait toutefois que le lit principal de la rivière ait maintenant tendance à s'enfoncer (soit suite à une surexploitation des granulats soit à un arrêt des apports) comme l'indique la présence d'un seuil en aval du pont-Radier. Les apports de matériaux sont assez proximaux (entre 600 m et 2 000 m) et proviennent des concessions Constantine Red et Française Red situés en rive gauche.



Illustration 65 : Modification, rectification et aménagement dans le lit de la Waneubwayo.



Illustration 66 : Incision du lit actuel dans une zone de lit sur-engravé plus ancienne de la Waneubwayo.

4.17. LA FOUACHIAMBOUE

La surface du bassin versant de la Fouachiamboué est faible et est de l'ordre de 9 Km². La lithologie y est largement dominée par les péridotites (59 %), les serpentinites représentent 16,7 % tandis que les latérites couvrent 9,7 % de la surface du bassin versant (Tableau 1).

La zone de lit sur-engravée s'étend sur 4 km de long environ essentiellement dans sa partie intra-massif. La surface occupée par le sur-engravement est de 0,17km² (17 hectares) ce qui représente environ 1,9 % de la surface du bassin versant (Tableau 2, Illustration 67). Les zones produisant les matériaux sont les bassins versants des deux bras principaux, le bras rive gauche (bras NE) étant le plus productif (Illustration 67). Les distances maximum entre la confluence des deux bras et les zones les plus amont de chaque creeks sont comprises entre 1 600 m et 2 600 m. Les zones de productions de matériaux sont donc assez proximales mais suffisamment éloignées pour que les matériaux commencent à être bien roulés au niveau de la confluence. Les matériaux sont issus des érosions des concessions CF, Hortensia et Revelation 1 Red. La présence d'amiante y est confirmée.

Les alluvions de cette rivière font actuellement l'objet d'une autorisation d'exploitation par la société des Sablières de Népoui. Le lit de l'aval de la rivière a été déjà exploité et recalibrée avec aménagement d'une piste dans le lit ; le front amont de l'exploitation actuelle se localise en amont de la confluence des deux bras (amont du pt 110). Les photographies des illustrations 68 à 71 montrent les deux bras de la Fouachiamboué vue de leur zone de confluence en 2009 et 2012. Elles permettent d'observer les modifications morphologiques relativement faible dans le bras NE et les perturbations dans le bras NW occasionnées par l'exploitation des granulats. La baisse du toit des alluvions consécutive à leur exploitation est bien visible sur ces photographies.

Les fronts d'exploitation au moment de l'observation (04/12/ 2013) se situent juste en amont de la confluence pour le bras NW et à 450 m environ en amont de la confluence pour le bras NE. Dans ce dernier, la limite du sur-engravement est localisée à 650 m en amont du front d'exploitation actuel. Le sur-engravement toujours en amont de l'exploitation y est clair toutefois nous avons noté que les galets étaient patinés, qu'il y avait un début de végétalisation et que le lit vif de la rivière avait tendance à s'inciser dans les alluvions. Il semblerait que ces indices

nous indiquent que les alluvions issus du sur-engravement soient relativement stabilisées et que les apports récents de matériaux dans cette zone n'est pas été fréquents au cours des années précédentes. La proximité des zones d'apport en matériaux confèrent aux alluvions un caractère plus anguleux et moins matures (Illustration 72).

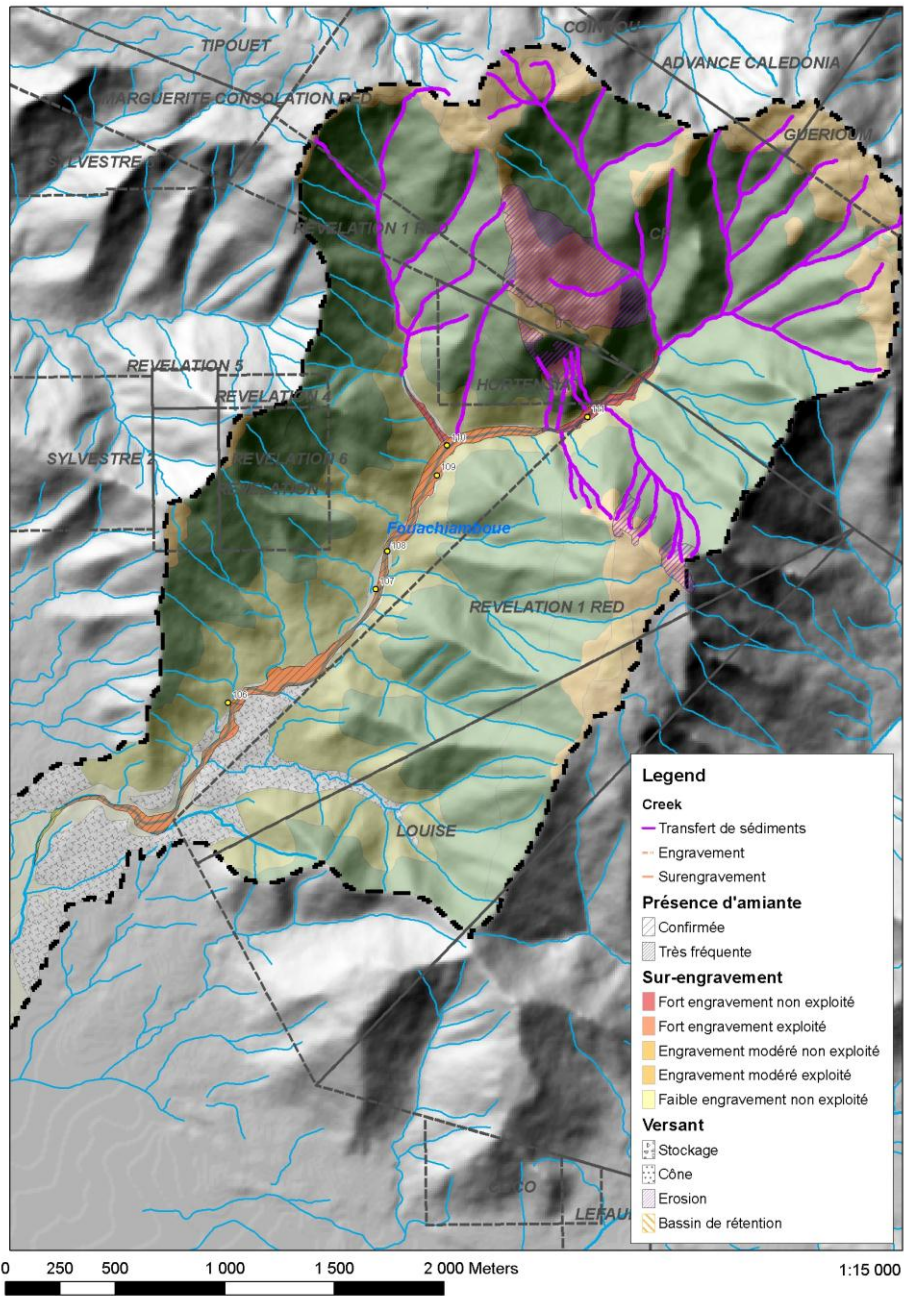


Illustration 67 : Fouchiamboue : extrait de la carte des zones sur-engravées.



Illustration 68 : Bras nord-est de la Fouachiamboué en 2009 avant exploitation (2009-Pt120).



Illustration 69 : Bras nord-est de la Fouachiamboué en 2012 en cours d'exploitation (2012 - Pt110).



Illustration 70 : Bras nord-ouest de la Fouchiamboué en 2009 avant l'exploitation (2009 – Pt120).



Illustration 71 : Bras nord-ouest de la Fouchiamboué en 2012 en cours d'exploitation (2012 – Pt110).



Illustration 72 : Lit sur-engravé de la Fouachiamboué en amont du front d'exploitation (Pt111).

4.18. LA PORO

Le bassin versant de la Poro (7,6 km²) a été intensément exploité pour le nickel. Les lithologies dominantes sur ce bassin sont les cuirasses qui représentent 44,8 % de sa surface, les péridotites (34,7 %) et les exploitations minières recouvrant presque 10 % d'après la carte lithologique. Ce bassin est donc fortement affecté par les activités minières, les lits sur-engravés sont donc assez logiquement très importants et couvrent environ 0,14 km², ce qui représente 1,84 % de la surface du bassin. Il s'agit après la Fouachimaboué du bassin le plus affecté par le sur-engravement en pourcentage de surface occupée.

Les zones de production des matériaux participant au sur-engravement sont présentes sur quasiment tout le bassin versant. Il s'agit des concessions Fahtma, Melbourne, CVG 2, Georges, MELE, Gustave Red, ISAAC, Cadurcienne Red, Benibouftout 2, ISAAC.

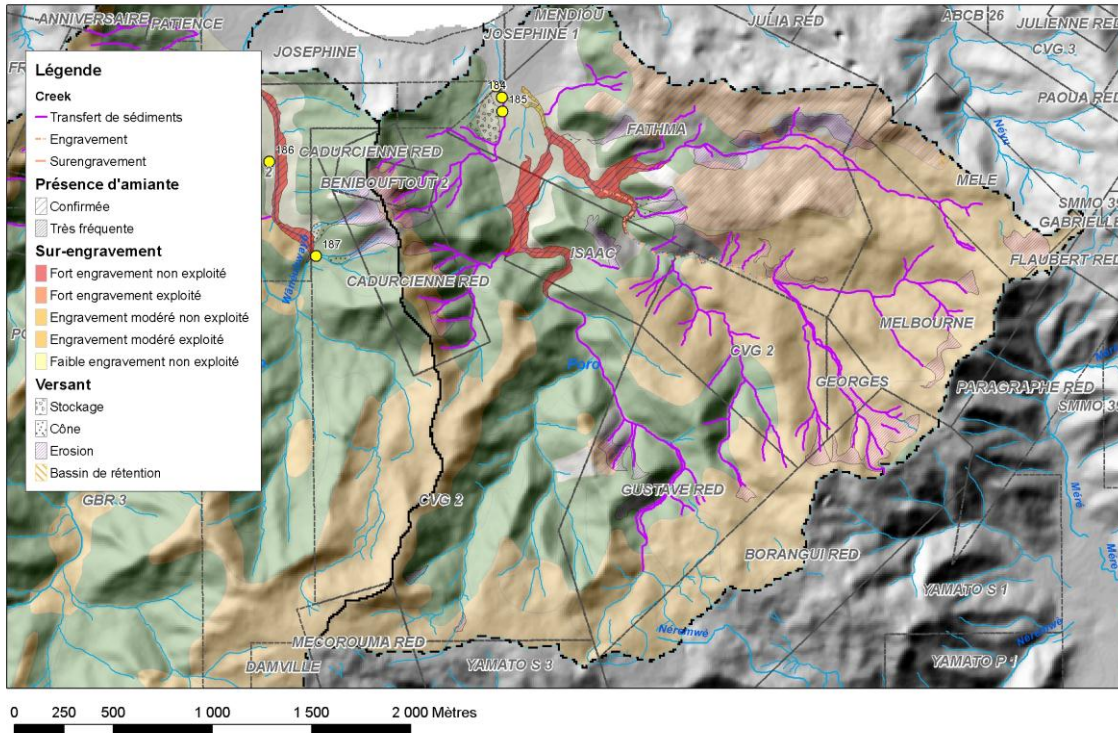


Illustration 73 : Poro : extrait de la carte des zones sur-engravées.



Illustration 74 : Curage de lit et rectification de tracé dans une zone sur-engravée de la Poro (Pt185).

4.19. LE CREEK WELLINGTON

Le creek Wellington possède un bassin versant très réduit de l'ordre de 4,6 km² et est constitué pour l'essentiel par des péridotites, des latérites et des cuirasses. La surface occupée par le sur-engravement y occupe environ 0,11 km² soit environ 2,39 % du bassin versant. Le sur-engravement y est tel que des ouvrages (pièges à fines, barrages) et des réaménagements

nombreux y ont été réalisés afin de prévenir le transfert des matériaux vers l'aval et de contrôler les écoulements. Ceci est rendu nécessaire car les caractéristiques de ce creek (fortes pentes, connexions directes avec les zones d'apport) sont favorables au transfert rapide et très énergétique des matériaux vers l'aval lors d'événements pluvieux intense. Tout le bassin versant contribue à la fourniture de matériaux du creek Wellington ; les concessions concernées sont les suivantes : Calédonienne, Lyonnaise 3, Débris A & B, Duc de Wellington, Santa Maria, Clémence. La présence de veines à minéraux amiantifères (chrysotile) a été confirmée plusieurs fois.

Une coupe dans le remplissage alluvial du creek (Illustration 77) a permis semble-t-il de différencier les sédiments issus des apports miniers (apports grossiers, mal classés, peu roulés, etc.) des dépôts antérieurs du creek (dépôts fins latéritiques à cailloutis).

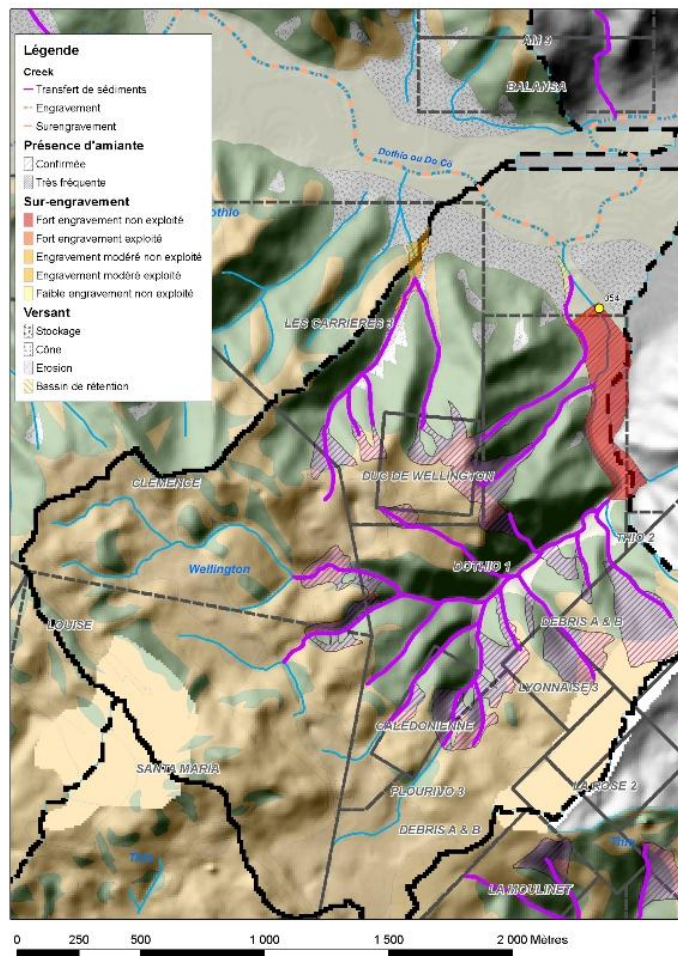


Illustration 75 : Carte du sur-engravement du Creek Wellington.



Illustration 76 : Creek Wellington : sur-engravement avec travaux de rectification et zone d'apport de la mine Débris A & B en arrière-plan.



Illustration 77 : Coupe dans les alluvions du creek Wellington montrant les niveaux issus du sur-engravement surmontant les dépôts antérieurs (sous le carnet).

5. Potentiel pour l'exploitation de granulats

5.1. CONDITIONS

Les principales conditions qui permettraient d'autoriser l'exploitation pérenne des alluvions dans un lit sur-engravé sont les suivantes :

- existence d'un sur-engravement caractérisé ;
- existence d'apports solides suffisants et réguliers permettant une recharge du lit ;
- viabilité économique de l'exploitation ;
- absence de risque humain et contrôle et limitation des risques environnementaux.

Cette étude a permis de montrer la variabilité du sur-engravement des rivières de la Grande-Terre due à la diversité des contextes géologiques et miniers des bassins versants. En effet, certains bassins sont entièrement compris dans le massif minier alors que pour d'autres, seuls certains sous-bassins sont dans le massif. L'ampleur du sur-engravement (épaisseur, surface occupée) et la répartition spatiale du sur-engravement est fortement contrainte par cette organisation. De même, la granulométrie et la maturité des éléments alluvionnaires sont fortement liées à la proximité et à la diffusion spatiale des zones de production des matériaux.

De surcroît, le contexte géologique est aussi un facteur de contrôle qualitatif sur le sur-engravement. Les bassins versants offrant de grandes et épaisses surfaces latéritiques sont généralement moins affectés par le sur-engravement sens strict (engraissement important des lits par des blocs, galets, graviers et sables) mais plus affecté par l'importante quantité de fines latéritiques se déposant et/ou transitant par l'hydrosystème et responsable d'une dégradation importante des milieux (par exemple la Coulée).

Les géométries et configurations variables entre les zones de productions, les zones de transfert et les zones d'accumulation sont variées. Ces contextes vont de zones de sur-engravement en lien direct avec les zones de production (ex. : Thio plateau, Wa Dibu...) aux grands systèmes avec plusieurs zones d'apports distribuées sur le bassin versant et distales par rapport aux zones d'accumulation (ex. : Népoui).

La distribution des zones de production de matériaux influe sur les modalités de la recharge des lits en sédiments. Il faut par ailleurs noter les aspects spatio-temporels de la recharge en matériaux avec par exemple des zones de sur-engravement en recharges récentes & actuelles (par exemple : Wellington, Poro, ...) et d'autres zones dont le sur-engravement semble au moins en partie hérité. Dans ce cas, la phase de sur-engravement serait plus ancienne (quelques années à décennies). Cette ancienneté serait liée d'une part à un pic d'exploitation des mines qui aurait mis à la disposition des creeks et des rivières une quantité importante de matériaux et d'autre part à l'occurrence de cyclones et/ou de dépressions tropicales qui auraient déclenché de fortes érosions des mines et des décharges associées à d'importants transports solides dans les hydrosystèmes (exemple de la Ouenghi, de la Nakare...).

L'étude réalisée montre que la quantité de matériaux présente dans les creeks et rivières sur-engravés est importante toutefois se pose le problème de l'exploitabilité de ces sur-engravements.

En premier lieu, les sites sur-engravés ne sont pas toujours dans les mêmes secteurs que les zones de besoins (bassins de la Thio ou de la Kouaoua par exemple), ce qui impliquerait pour les exploiter de les transporter avec en corollaire la viabilité économique de tel projet (le coût du transport rendrait probablement le prix du granulat non concurrentiel). Par ailleurs, le transport d'importantes quantités de granulats peut potentiellement créer des nuisances environnementales (transport par la route par exemple)

Une exploitation n'est envisageable que si le stock initial présent dans le lit est important et que son renouvellement est régulier. Il est donc primordial de s'assurer que le creek potentiellement exploité remplisse ces conditions. L'exploitation doit par ailleurs prendre en compte les multiples contraintes et effets induits afin d'éviter ou au moins de limiter les effets néfastes sur d'autres compartiments du système (ressources en eau, nuisances, dégradation environnementale, modification des aléas, etc.). Un suivi régulier des exploitations nous paraît nécessaire afin de veiller à ce que les modes d'exploitation et des pratiques d'exploitation mises en œuvre pour minimiser les impacts et les effets négatifs. L'exploitation du sur-engravement doit donc être raisonnée et prendre en compte le volume exploitable, les modalités de l'exploitation, le respect des morphologies des lits et des fonctionnements hydrauliques et les paramètres de renouvellement de l'apport de matériaux.

5.1.1. LE PROBLÈME DE L'AMIANTE DANS LES ALLUVIONS

Les observations de terrain effectuées lors de notre étude sur les rivières engravées de la Grande-Terre montrent clairement qu'il s'agit dans la majorité des cas, de cours d'eau ou de bassin versant largement occupées par des roches ultrabasiques de type péridotites indifférenciées, harzburgites, dunites ou serpentinites. Ceci est confirmé dans cette étude par l'analyse des lithologies présentes dans les bassins versants traités (cf. 3.4.4 et tableau 1) et par les visites de terrain. En effet la majorité des alluvions observées (galets, sables, fines) sont issues du démantèlement de ces roches, rassemblées sous le terme de péridotites.

Les péridotites de Nouvelle-Calédonie sont connues pour être des roches potentiellement amiantifères. En effet, plusieurs phases minérales asbestiformes se retrouvent fréquemment dans ce contexte géologique : le chrysotile, l'antigorite, la trémolite (+/- anthophyllite). Il paraît donc tout à fait cohérent d'imaginer que ces phases minérales (dont la bonne résistance mécanique est connue) puissent également se retrouver dans les produits issus de l'érosion de ces roches, à savoir les alluvions. C'est pourquoi, en plus des objectifs premiers de cette étude, une attention particulière a été portée sur la présence de minéraux amiantifères dans les alluvions.

Lors de la mission de terrain, nous avons systématiquement constaté la présence de minéraux amiantifères dans les alluvions des rivières et des creeks sur-engravés. Les formes minérales d'amiante observées sont essentiellement :

- du chrysotile dans les galets de péridotite et dans les roches peu serpentinisées. Il se présente soit sous forme de petites veines noires serpentineuses centimétriques à infra-centimétriques, présentant en leur centre de fines veines de chrysotile, soit pour les galets de serpentinites, en zébrures de chrysotile en veines parfois très fines ;
- plus rarement de la trémolite sous forme de galets ou graviers relativement peu roulés (Illustration 78, Illustration 83).

La découverte de minéraux amiantifères n'a nécessité, en général, que quelques minutes de recherche par un observateur entraîné pour être certifiée. Cela indique que les éléments (galets

et graviers) contenant ces minéraux sont très fréquents dans les alluvions. Il semble important de noter que ces occurrences ont pu être observées sur des galets de toutes tailles, jusqu'à des gravillons de 1 ou 2 cm à peine. Il n'a pas été noté de variation significative de la fréquence de galets à minéraux amiantifères dans les alluvions des rivières sauf sur la Kouaoua où sur une petite plage de dépôt, la densité de ces minéraux s'est révélée largement plus élevée qu'ailleurs. S'agit-il d'une concentration représentative de la fréquence de minéraux amiantifères dans les alluvions de cette rivière ou d'une concentration secondaire liée à la présence à proximité d'un accident serpentineux important, probable source de ce matériel ?

La présence généralisée de galets et graviers contenant des minéraux amiantifères dans ces alluvions implique que ces mêmes minéraux sont susceptibles de se retrouver également dans les fractions plus fines des alluvions (sables, silts).

Se posent alors plusieurs questions, auxquelles il sera parfois difficile de répondre :

- Quel pourcentage représente ces minéraux amiantifères dans les alluvions totales ?
- Quelle est l'abondance de minéraux amiantifères dans la fraction fine du sédiment, sous quelle forme et comment se comportent-ils lors de leur transport d'amont en aval ?
- Quelles incidences potentielles ont ces minéraux amiantifères sur les risques sanitaires pour les exploitants de granulats ? les utilisateurs de ces granulats ? La population ?
- Dans quelle mesure les alluvions issues du sur-engravement sont-elles exploitables ?



Illustration 78 : Galet de trémolite dans les alluvions de la Moindah (Pt81).



(Pt125).



Illustration 81 : Plan à Trémolite sur un seuil rocheux dans le lit de la Muéo (Pt127).



Illustration 79 : Galet avec veine de chrysotile dans les alluvions de la Muéo (Pt120).
Vue d'ensemble et détail .



Illustration 82 : Chrysotile dans galet de la Nakalé (Pt146).



Illustration 80 : Minéraux amiantifères dans les galets de la Muéo



Illustration 83 : Chrysotile dans un galet de la Nakalé (Pt149).

6. Conclusion

Cette étude a permis de montrer la variabilité du sur-engravement des rivières de la Grande-Terre due à la diversité des contextes géologiques et miniers des bassins versants. En effet, certains bassins sont entièrement compris dans le massif minier alors que pour d'autres, seuls certains sous-bassins sont dans le massif. L'ampleur du sur-engravement (épaisseur, surface occupée) et la répartition spatiale du sur-engravement est fortement contrainte par cette organisation. De même, la granulométrie et la maturité des éléments alluvionnaires sont fortement liées à la proximité et à la diffusion spatiale des zones de production des matériaux.

De surcroît, la couverture latéritique est un facteur qualitatif important du sur-engravement. En effet, les bassins versants offrant de grandes et épaisses surfaces latéritiques sont généralement moins affectés par le sur-engravement sens strict (engraissement important des lits par des blocs, galets, graviers et sables) mais plus affecté par l'importante quantité de fines latéritiques se déposant et/ou transitant par l'hydrosystème et responsable d'une dégradation importante des milieux (la Coulée par exemple).

Les géométries et configurations entre les zones de productions, les zones de transfert et les zones d'accumulation sont variées. Ces contextes sont très variables, ainsi certaines zones de sur-engravement sont en lien direct avec les zones de production (exemple : Thio plateau, Wa Dibou...) alors que d'autres comportent plusieurs zones d'apports distribuées et distales sur le bassin versant (la Népoui par exemple).

La distribution des zones de production de matériaux influe sur les modalités de la recharge des lits en sédiments. Il faut par ailleurs noter les aspects temporels de la recharge en matériaux avec par exemple des zones de sur-engravement en cours de rechargement (par exemple : Creek Wellington, Poro...) et d'autres zones dont le sur-engravement semble au moins en partie hérité. Dans ce cas, la phase de sur-engravement serait plus ancienne (quelques années à décennies). Cette ancienneté serait liée d'une part à un pic d'exploitation des mines qui aurait mis à la disposition des creeks et des rivières une quantité importante de matériaux et d'autre part à l'occurrence de cyclones et/ou de dépressions tropicales qui auraient déclenchés de fortes érosions des mines et des décharges ainsi que d'importants transports solides dans les rivières (exemple de la Ouenghi, de la Nakare...).

L'étude réalisée montre que la quantité de matériaux présente dans les creeks et rivières sur-engravés est importante toutefois se pose le problème de l'exploitabilité de ces sur-engravements.

En premier lieu, les sites sur-engravés ne sont pas toujours dans les mêmes secteurs que les zones de besoins (bassins de la Thio ou de la Kouaoua par exemple), ce qui impliquerait pour les exploiter de les transporter avec en corollaire la question de la viabilité économique de tels projets (le coût du transport rendrait probablement le prix du granulats non concurrentiel). Par ailleurs, le transport d'importantes quantités de granulats peut potentiellement créer des nuisances environnementales si le transport est envisagé par la route par exemple.

Une exploitation n'est envisageable que si le stock initial présent dans le lit est important et que son renouvellement est régulier. Il est donc primordial de s'assurer que le creek potentiellement exploité remplit ces conditions. L'exploitation doit par ailleurs prendre en compte les multiples contraintes et effets induits afin d'éviter ou au moins de limiter les effets néfastes sur d'autres compartiments du système (préservation des ressources en eau, dégradation

environnementales, dégradation du fonctionnement hydrodynamique de la rivière, incidences sur des aléas, nuisances...). Un suivi régulier des exploitations nous paraît nécessaire afin de veiller à ce que les modes d'exploitation et les pratiques d'exploitation mises en œuvre soient adaptés afin de minimiser les impacts. L'exploitation du sur-engravement doit donc être raisonnée et prendre en compte le volume exploitable, les modalités de l'exploitation, le respect des morphologies des lits et des fonctionnements hydrauliques et les paramètres de renouvellement de l'apport de matériaux.

Certains lits sur-engravés ont fait l'objet d'exploitation entre 2009 et 2012 (Hwa No, Oue Tanquéa, Fouachiamboué...). Une analyse de l'évolution des lits, des paramètres environnementaux et des impacts générés ainsi que l'analyse des retours d'expérience qui pourraient être demandés aux exploitants serait très informatif.

Lors de cette étude nous avons signalé la présence quasi-systématique de minéraux amiantifères dans les galets et graviers alluvionnaires.

Cette présence pose plusieurs questions auxquelles il paraît nécessaire de répondre dans le cadre de la possible exploitation des zones sur-engravées :

- Quel pourcentage représente les minéraux amiantifères dans les alluvions totales ?
- Quelle est l'abondance de minéraux amiantifères dans la fraction fine du sédiment, sous quelle forme et comment se comportent-ils lors de leur transport d'amont en aval ?
- Quelles incidences potentielles ont ces minéraux amiantifères sur les risques sanitaires pour les exploitants de granulats ? Les utilisateurs de ces granulats ? La population présente autour des exploitations ?

La réponse à ces questions permettrait de savoir dans quelle mesure les alluvions issues du sur-engravement sont exploitables.

7. Bibliographie

A2EP (1992) - Vallée de la Tontouta (Province Sud) - Prospection hydrogéologique par méthodes géophysiques dans la plaine de la Tontouta. Rapport A2EP NCH 920401.

A2EP (1998) - Étude d'impact projet de prélèvement d'eau de la nappe alluviale de la Tontouta. Rapport A2EP NCE 98/09 02.

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.

DAVAR (2007) - Caractérisation hydrométrique de la Tontouta (2007). Rapport DAVAR-SESER-ORE.

DAVAR (2008) - Inventaire des points d'accès à la nappe alluviale de la Tontouta, Pellequer 2008. Rapport 2008-01-01 DAVAR.

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., Bails 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.

Ittis 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.

Lebret P., Maurizot P. (2007) - Aide à la mise en place d'un programme matériaux et carrières à la DIMENC, Nouvelle-Calédonie. Rapport Final. Rapport BRGM/RP-55924-FR, 212 p., 14 fig., 24 tabl., 20 photos, 8 ann.

Maurizot P., Lafoy Y. (1998) - Cartographie des aléas naturels dans le territoire de Nouvelle-Calédonie - Zone de Pouembout. Rapport BRGM 40404, Décembre 1998.

ORSTOM (1966) - Carte des précipitations moyennes annuelles de Nouvelle-Calédonie – ORSTOM 1966.

Peiry J.L. (1989) - Les sédiments dans les torrents de l'Arve : discontinuité fonctionnelle et impact de l'aménagement des bassins versants. *La Houille Blanche*, p. 3-4, 1989.

Peiry J.L., Bravard J.P. (1989) - Évolution naturelle d'un remplissage sédimentaire intramontagnard et impact des aménagements contemporains : l'exemple de la vallée de l'Arve. *La Houille Blanche*, p. 3-4, 1989.

Savin C. (2007) - Tomographie électrique 2D à Tontouta (Lotissement Beurivage) : identification de l'intrusion du biseau salé. Rapport Géophysical.

SBTP (2007) - Transport solide de la Tontouta et piézométrie - Partie 1 : ré-engraissement de la Tontouta. Étude approfondie du transport solide - Partie 2 Programme de surveillance des nappes (2007). Rapport SBTP FR - Part 1: 21 p., Part 2 : 17 p.

Terry J.P., Kostaschuk R.A & Wotling G. (2008) - Features of tropical cyclone-induced flood peaks on Grande-Terre, New Caledonia. *Water and Environment Journal*.



Centre scientifique et technique
Direction des Risques et de la Prévention / Risques Côtiers et Changement Climatique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr