



Rapport final

Surveillance de la pression érosion dans les milieux naturels situés dans la zone d'influence du site industriel et minier du Sud de la Nouvelle-Calédonie

P. Podwojewski⁽¹⁾, N. Bargier⁽²⁾, J.P. Bricquet⁽³⁾, Y. Dominique⁽⁴⁾, S. Job⁽⁵⁾, D. Salomon⁽²⁾, A. Sofianos⁽²⁾.
Editeur : OEIL.

Juin 2016

iEES Paris



- (1) iEES Paris
- (2) ASCONIT Consultants
- (3) IRD
- (4) BioEko
- (5) S. Job Consultance



Observatoire de l'environnement
en Nouvelle-Calédonie

11 rue Guynemer
98800 Nouméa
Tel.: (+ 687) 23 69 69
www.oeil.nc

Résumé exécutif

Titre de l'étude	Surveillance de la pression érosion dans les milieux naturels situés dans la zone d'influence du site industriel et minier de Vale NC		
Auteurs	P. Podwojewski, N. Bargier		
Collaborateurs	J.P. Bricquet, Y. Dominique, S. Job, D. Salomon, A. Sofianos		
Editeurs	Observatoire de l'Environnement en Nouvelle-Calédonie (OEIL)		
Année d'édition du rapport	2016	Année des données	2004-2015

Objectifs	➤ Evaluer les suivis actuels mis en œuvre pour mesurer l'effet de la pression érosion sur les différents milieux naturels dans la zone d'influence de Vale NC ; ➤ Analyser les tendances issues de ces suivis ; ➤ Identifier les améliorations possibles pour optimiser ces suivis ; ➤ Donner des pistes de développement pour l'élaboration de nouveaux indicateurs de suivi des pressions associées à l'érosion d'origine anthropique.
Contexte	L'érosion des sols constitue une pression majeure s'exerçant sur l'environnement néocalédonien, notamment dans le Grand Sud du territoire où l'activité minière à ciel ouvert l'accroît. Ce phénomène participe à la dégradation de la qualité des cours d'eau et des eaux lagunaires. Les matières solides transportées, potentiellement polluantes, parviennent aux eaux superficielles et dégradent la qualité des eaux. Outre le rôle de transport de polluants, l'érosion entraîne un apport de matières en suspension dans les cours d'eau entraînant le colmatage des milieux, première cause de la dégradation des habitats aquatiques. L'érosion est donc associée de nombreuses pressions : dégradation des sols, destruction mécanique, apport en sédiments, apport en métaux. Dans le cadre de leurs missions de suivi environnemental et d'optimisation, les membres de l'OEIL ont décidé de mener une étude visant à expertiser les suivis mis en œuvre pour évaluer l'effet de ces pressions autour du complexe industriel et minier de Vale NC.
Méthodologie	Le périmètre d'étude correspond à la zone placée sous l'influence directe du complexe industriel et minier de Vale NC, couvrant les bassins versants du creek baie Nord, de la Kwé. Cette étude a été réalisée grâce à l'exploitation de la documentation existante et disponible depuis Début 2000. Au total, 170 rapports (études d'impacts, rapports et données de suivis environnementaux, inventaires) en provenance de Vale NC et de ses opérateurs techniques ainsi que des instituts de recherche (IRD, IRSTEA, etc.).

Résultats et conclusions	<u><i>Suivis actuels mis en œuvre pour mesurer l'effet de l'érosion sur les différents milieux naturels dans la zone d'influence de Vale NC</i></u> • Le sol a été étudié lors de l'étude d'impact, mais depuis, aucun suivi n'a été réalisé directement sur ce compartiment (ex : suivi des volumes de sol érodé). • Sur le milieu dulcicole, si les suivis environnementaux sont nombreux, ils ne sont
---------------------------------	--

	pas organisés de manière à établir un diagnostic complet du phénomène d'érosion (ex : fraction charriée des flux sédimentaire non estimée). Aucune tendance ne peut être dégagée au regard des éléments actuellement collectés. - Le milieu marin est suivi de manière plus cohérente mais le dispositif de suivi n'est pas ciblé uniquement sur l'érosion et reste à optimiser en termes de stratégie d'échantillonnage. Dégager des tendances est là encore difficile, même si certains indicateurs ne présentent pas d'évolution marquée depuis 2006. <u>Améliorations possibles pour optimiser ces suivis</u> Des outils de suivi sont proposés afin de mieux quantifier les flux, mais la complexité de la zone d'étude plaide en faveur de la construction d'un modèle. En effet, un modèle permet de qualifier et quantifier précisément l'ampleur, l'évolution mais aussi l'origine du phénomène à différentes échelles. Ainsi, le modèle permet de prédire l'érosion dans un bassin versant en fonction de différentes caractéristiques pédologiques, géologiques, topographiques, d'occupation du sol, etc. Les grandeurs caractéristiques définies servent donc de valeurs de référence qui seront ensuite confrontées aux données de suivi. De surcroît, la modélisation permet d'optimiser la gestion environnementale sur site (ex : identification des zones d'érosion actives) et également de réduire la surveillance une fois le modèle jugé suffisamment fiable. <u>Pistes de développement pour l'élaboration de nouveaux indicateurs</u> Des pistes permettant de parfaire la connaissance de la pression érosion ont été définies : - La pédosignature (sortes d'empreinte digitale des sols arrachés) est très prometteuse. - La définition de bioindicateurs (utilisant les macro-invertébrés benthiques notamment) peut représenter un bon indicateur général d'état. - Le suivi des panaches en milieu marin et zones de sédimentation sont désormais des méthodes accessibles. - Les nouvelles approches de recrutement corallien ou de dynamique des herbiers peuvent également représenter un bon indicateur d'état.			
Limites de l'étude	Cette étude n'a pas permis de dégager des tendances de la pression érosion, du fait de la forte variabilité dans le temps des suivis en place, notamment en milieu dulcicole, et de la difficulté d'usage des outils de bancarisation.			
Evolutions	Version	finale	Date de la version	25/04/16

Table des matières

Chapitre I - Contexte et objectifs de la mission	10
I.1. Contexte général.....	10
I.2. Objectifs de la mission.....	11
I.3. But du suivi de l'érosion	12
Chapitre II - Généralités et méthodologie de travail	13
II.1. Contexte pédologique : particularités des sols sur roche ultrabasique	13
II.2. Causes de la dégradation.....	13
II.2.1. Altération du couvert végétal	13
II.2.2. Présence de matériaux potentiellement exposés à l'érosion hydrique	14
II.2.3. Sédimentation ou siltation de matériaux érodés.....	14
II.2.4. Altération des écoulements hydriques.....	14
II.2.5. Biodisponibilité des métaux lourds dans les bassins	15
II.3. Mécanismes de l'érosion en milieu hydrique	15
II.3.1. Erosion hydrique et transport solide	15
II.3.2. Effets de l'érosion : sédimentation en milieu marin	16
II.4. Méthodologie de travail	17
II.4.1. Etude des sources bibliographiques.....	17
II.4.2. Visite de terrain.....	17
II.4.3. Expertises croisées	17
Chapitre III - Evaluation des suivis actuels et pistes d'amélioration	20
III.1. Historique du site et des suivis environnementaux	20
III.2. Surveillance du milieu terrestre (sol et milieu dulçaquicole)	22
III.2.1. Préambule.....	22
III.2.2. Le suivi à l'échelle des sols	23
III.2.3. Suivi des conditions météorologiques.....	26
III.2.4. Suivi des conditions hydrologiques	29
III.2.5. Suivi des paramètres physico-chimiques.....	34
III.2.6. Suivi quantitatif du transport solide	39
III.2.7. Suivi des indicateurs biologiques	40
III.2.8. Conclusions pour le milieu terrestre	45
III.3. Surveillance du milieu marin	46

III.3.1. Préambule.....	46
III.3.2. Qualité physico-chimique de l'eau de mer	47
III.3.3. Qualité physico-chimique des sédiments marins.....	54
III.3.4. Suivi de la sédimentation et flux sédimentaires	56
III.3.5. Qualité biologique du milieu marin.....	60
III.3.6. Conclusions pour le milieu marin	64
III.4. Bilan de l'évaluation des suivis environnementaux actuels liés à l'érosion	65
Chapitre IV - Proposition de révision des modes de surveillance de la pression érosion	67
IV.1. Stratégie générale de surveillance des milieux	67
IV.1.1. Avant / après (référence temporelle)	67
IV.1.2. Comparaison à un milieu de référence (référence géographique).....	67
IV.1.3. Comparaison avec un état théorique.....	68
IV.1.4. Comparaison avec un modèle.....	68
IV.2. Cadre logique de la mise en place de la surveillance érosion	69
IV.2.1. Cadre logique en milieu terrestre	69
IV.2.2. Cadre logique général.....	71
IV.2.3. Niveau de priorité	74
IV.3. Evaluer l'étendue des différentes aires vulnérables.....	76
IV.3.1. Formations végétales	76
IV.3.2. Sols	78
IV.4. Mesurer l'évolution spatiale de la dégradation.....	81
IV.4.1. Suivi diachronique des sols nus.....	81
IV.4.2. Suivi du couvert végétal	82
IV.5. Mesurer les flux hydriques	86
IV.5.1. Stations de mesure des pluies	86
IV.5.2. Les stations de mesure des débits	87
IV.6. Mesurer les flux de sédiments.....	91
IV.6.1. Les mesures volumiques à l'échelle d'une structure (terril, déblais, ravine) – approche géomorphologique.....	91
IV.6.2. Evaluation de l'érodibilité de différents substrats (horizons) en fonction de situations topographiques.....	93
IV.6.3. Les mesures volumiques d'érosion dans les cours d'eau	95
IV.6.4. Les suivis hydrobiologiques	108
IV.7. Sur le milieu marin	109
IV.7.1. Suivi du phénomène d'érosion dans le milieu marin	110

IV.7.2. Suivi de l'impact à moyen long terme de l'érosion sur les composantes biologiques.....	119
IV.8. Bilan sur l'amélioration des suivis.....	126
Chapitre V - Analyse de tendance des pressions associées à l'érosion	129
Chapitre VI - Pistes pour le développement de nouveaux indicateurs d'évaluation des pressions associées à l'érosion	132
VI.1. Opportunités et faisabilité sur les sols	132
VI.1.1. Approche dite de pédosignature	132
VI.1.2. Modèle prédictif.....	135
VI.2. Opportunités et faisabilité sur le milieu dulçaquicole	135
VI.2.1. Evolution de l'indice bio-sédimentaire (IBS).....	135
VI.2.2. Intérêt du suivi du biofilm	137
VI.3. Evaluation de la pression érosion sur les milieux marins.....	138
VI.3.1. Suivis physique de l'érosion dans le milieu marin	138
VI.3.2. Synthèse bibliographique des méthodologies actuellement mises en œuvre pour mesurer les impacts de la sédimentation sur la composante biologique	139
VI.3.3. Valeurs seuils de sédimentation et de turbidité	142
VI.3.4. Variabilité dans la réponse de l'écosystème corallien	143
VI.3.5. Qualité du sédiment.....	144
VI.3.6. Tolérance et vulnérabilité des espèces coralliennes à la sédimentation et turbidité	145
VI.3.7. Effets de la sédimentation et turbidité sur les colonies coralliennes	147
VI.3.8. Sédimentation, turbidité et recrutement corallien.....	148
VI.3.9. Conséquences à l'échelle de la communauté corallienne.....	148
VI.3.10. Mécanismes de rejet des sédiments par les polypes coralliens	150
VI.3.11. Sédimentation et communautés de poissons.....	150
VI.3.12. Sédimentation et herbiers de phanérogames marines.....	151
Chapitre VII - Conclusion	152
Chapitre VIII - Bibliographie	156

Table de tableaux

Tableau 1. Tableau chronologique de construction et de suivis environnementaux des ouvrages miniers sur le site de Vale NC.	21
Tableau 2. Stations de mesures hydrologiques actuelles sur le bassin de la Kwé/Rivière des lacs et Rivière Bleue	29
Tableau 3. Intégralité des stations de mesures hydrologiques volontaires en milieu lotique actuellement gérées par Vale NC.....	32
Tableau 4. Localisation et description des points de suivi qualitatif des eaux de surface (Vale NC, 2012) 34	
Tableau 5. Données disponibles pour le suivi des eaux de surface en 2011. (Vale NC, 2012) M : mensuel, S : semestriel, H : hebdomadaire, T : trimestriel, A : annuel.....	36
Tableau 6. Valeurs moyennes rencontrées sur les réseaux de 2003 à 2012 (A2EP 2014a).....	36
Tableau 7. Localisation et description des points de suivi de la nature et de la quantité des sédiments (DAEM 2014, Vale NC)	38
Tableau 8. Données disponibles pour le suivi des eaux de surface en 2011. (Vale NC, 2012) M : mensuel, S : semestriel, , T : trimestriel, A : annuel.	40
Tableau 9. Evolution de la note IBS au droit du réseau de suivi du bassin versant de la Kwé (source : Vale NC, Davar et OEIL).....	43
Tableau 10: Localisation géographique des 14 stations de prélèvement d'eau, référentiel WGS-84.	47
Tableau 11: Paramètres analysés dans le cadre du suivi physicochimique de la qualité de l'eau de mer .48	
Tableau 12: Localisation géographique des lieux de position des cages, référentiel WGS-84.	52
Tableau 13: Paramètres mesurés pour la bioaccumulation (Melanopus & Dexen 2015)	53
Tableau 14: Localisation géographique des stations de prélèvements d'analyse, référentiel WGS-84.....	54
Tableau 15: Paramètres mesurés sur les sédiments (Melanopus & Dexen 2015)	55
Tableau 16: Localisation géographique des stations de prélèvements d'analyse, référentiel WGS-84.....	57
Tableau 17: Paramètres mesurés pour le flux sédimentaire (Melanopus & Dexen 2015)	58
Tableau 18: Paramètres mesurés dans les carottes de sédiments (Melanopus & Dexen 2015)	59
Tableau 19: Localisation géographique des stations, référentiel WGS-84.	60
Tableau 20: Paramètres biologiques mesurés (Melanopus & Dexen 2015)	61
Tableau 21. Résumé des méthodes de suivi mises en œuvre par Vale NC (Vale, 2010).	62
Tableau 22. Suivis/Etat utilisés pour la construction du modèle d'érosion terrestre	70
Tableau 23. Récapitulatif des causes et moyens de suivis des dégradations de l'environnement à intégrer à la modélisation	71
Tableau 24. Niveau de priorité et adaptations des suivis proposés dans la surveillance de l'érosion.....	75
Tableau 25. Comportement et contraintes à l'érosion et au reboisement des différents horizons apparaissant à la surface (Asconit, 2014)	78
Tableau 26. Disposition des nouveaux limnigraphes.....	88
Tableau 27. Suivi chimiques des MES et interprétation des résultats.....	100
Tableau 28. Suivi chimiques des éléments solubles et interprétation des résultats.....	101
Tableau 29 : Suivis proposés sur la composante biologique (Melanopus & Dexen 2015)	119
Tableau 30. Suivi des communautés coralliennes sur la zone d'emprise de Vale NC.	122
Tableau 31. Résumé des méthodes de suivi utilisées dans le cadre du RRMMP (Thompson et al., 2013).	139
Tableau 32. Valeurs seuils pour l'évaluation de la condition du récif et sa résilience, utilisées dans le cadre du RRMMP (Thompson et al., 2013).....	141

Tableau 33. Valeurs de sédimentation et de turbidité pour le maintien de récifs sains (Erftemeije et <i>al.</i> , 2012)	143
Tableau 34. Concentration en métaux dans les sédiments de surface, habituellement mesurées dans des zones sous influence marine (IRD, 2011)	145
Tableau 35. Concentration en métaux dans les sédiments de surface, habituellement mesurées dans des zones sous influence terrigène modérée (IRD, 2011).....	145

Table des figures

Figure 1. Classification du transport solide	16
Figure 2. Chronologie de construction et de suivis environnementaux des ouvrages miniers sur le site de Vale NC et Prony Energie (EMR 2013).	21
Figure 3. Carte des stations météorologiques (Vale NC, 2014).....	28
Figure 4. Carte du suivi débit métrique réglementaire (Vale NC, 2014).....	30
Figure 5. Carte du réseau de suivi quantitatif des eaux volontaire (Vale NC, 2014)	31
Figure 6. Stations de suivi hydrologique aux plus longues chroniques sur les bassins versant du site de Goro et ses alentours (DAEM 2014, Vale NC)	33
Figure 7. Carte du réseau de suivi réglementaire de la qualité physico-chimique des eaux de surface (Vale NC, 2015).....	35
Figure 8. Carte du suivi de la nature et de la quantité de sédiment - Réseau réglementaire (Vale NC, 2015)	37
Figure 9. Carte des stations de suivis hydrobiologiques (Vale NC, 2015)	42
Figure 10. Carte des suivis marins actuels sur la zone d'influence de Vale NC (Melanopus et Dexen, 2015)	46
Figure 11. Localisation géographique des stations de prélèvement et mesure de l'eau (Vale NC, 2013).	48
Figure 12. Localisation géographique des cages de transplantation (Vale NC, 2013).....	52
Figure 13. Localisation géographique des stations (Vale NC, 2013).	55
Figure 14. Localisation géographique des stations (Vale NC, 2013).....	57
Figure 15. Localisation des stations d'étude du taux d'accumulation sédimentaire (Vale NC, 2013).....	59
Figure 16. Localisation géographique des stations (Melanopus et Dexen, 2015).....	61
Figure 17. Cartographie des différents types végétaux sur la zone d'influence de Vale NC (interprétation à partir d'image satellites GEO-EYE de juin 2011)	77
Figure 18. Typologie des sols nus sur la zone d'influence de Vale NC.....	80
Figure 19. Exemple de carré permanent et sens de lecture	85
Figure 20. Cartographie d'implantation des stations de référence (source : OEIL, google earth)	89
Figure 21. Principe de la méthode par cheminement et visée à la mire (CEMAGREF/PRAM 2009)	93
Figure 22. Diagrammes de crue lus de manière synchronique sur trois paramètres : Niveau d'eau, Conductivité, Turbidité (IRD Martinique programme OPA-C, 2013).	98
Figure 23. Position des carrelots de bois sur un radier (Protocole CARHYCE – IRSTEA 2012)	107
Figure 24. Zonages retenus pour le suivi du milieu marin (Melanopus & Dexen 2015).	109

Figure 25. Stations de suivi en continu de la turbidité/salinité/température (Melanopus & Dexen 2015).	111
Figure 26. Stations de suivi des flux sédimentaires (Melanopus & Dexen 2015).	113
Figure 27. Carte de localisation des stations DGT (rond jaune) (Melanopus & Dexen 2015).	116
Figure 28. Carte de localisation des stations sédiment superficiel (Melanopus & Dexen 2015).	118
Figure 29. Carte de localisation des stations de suivi biologique (Melanopus & Dexen 2015)	120
Figure 30. Carte représentant les stations pour le suivi des herbiers + périmètre d'étude par photographie aérienne (trapèze rouge) (Melanopus & Dexen 2015).	124
Figure 31. Relation conceptuelle entre l'intensité et la durée d'un stress et le risque d'effets sub-létaux à létaux sur les communautés coralliennes (McArthur <i>et al.</i> , 2002).	144
Figure 32. Capacité de résistance à la turbidité et à la sédimentation en fonction de la forme de croissance.	146

Chapitre I - Contexte et objectifs de la mission

I.1. Contexte général

Cent cinquante et une espèces répertoriées par la convention CITES se trouvent en Nouvelle-Calédonie. Plus d'une vingtaine d'espèces végétales listées par l'UICN se trouvent dans la zone d'emprise du projet Goro Nickel. La présence de trois réserves botaniques spéciales est vérifiée au voisinage du projet (Forêt Nord, Monts Oungoné (Pic du Grand Kaori) et Cap N'Dua), ainsi que la présence de formations végétales variées (La forêt à chêne gomme; La forêt à *Agathis lanceolata*, les maquis hydromorphes, la forêt rivulaire).

Les écosystèmes dolinaires sur roches siliceuses non carbonatées sont très peu abondants à la surface du globe. Le sud de la grande terre, en particulier la zone située à l'est du grand lac, est parsemé de dolines dont certaines sont ennoyées. Cet écosystème singulier associe une couverture pédologique spécifique, une végétation très diversifiée à endémisme extrême, une micro- et macro-faune fragiles.

Les sols jouent non seulement un rôle de support à la croissance de plantes et à la production primaire, mais aussi constituent une accumulation de biomasse et un pool de gènes, d'un pouvoir de stockage et de régulateur des flux d'eau et d'un pouvoir régulateur des déchets. Par conséquent, les sols doivent impérativement être protégés pour conserver la biodiversité et les services écosystémiques s'y rattachant.

L'érosion des sols a été identifiée par l'OEIL comme un enjeu majeur pour le Sud de la Nouvelle-Calédonie. Ce phénomène participe à la dégradation de la qualité des cours d'eau et des eaux lagunaires. Les matières solides, potentiellement polluantes, ainsi transportées parviennent aux eaux superficielles et dégradent la qualité des eaux. Outre le rôle de transport de polluants, l'érosion entraîne un apport de matières en suspension dans les cours d'eau entraînant le colmatage des milieux, première cause de la dégradation des habitats aquatiques.

Le ruissellement lié aux fortes précipitations entraîne le départ des horizons superficiels par érosion, emportant les éléments fertiles du sol et pouvant aller jusqu'à creuser de profondes ravines. Or le sol est une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle de temps historique. La prise en compte de l'érosion des sols dans une politique environnementale représente donc une priorité car elle revêt un caractère d'irréversibilité.

L'érosion provoque des dégâts aux terres valorisables mais a aussi des conséquences au-delà du sol lui-même, puisqu'elle entraîne une dégradation de la qualité des eaux et le déplacement de sédiments qu'il faut ensuite gérer.

Face à cet enjeu, l'OEIL et ses partenaires ont décidé de mener une étude visant à expertiser les suivis mis en œuvre pour évaluer cet aléa sur l'ensemble du territoire placé sous influence du complexe industriel et minier de Vale Nouvelle-Calédonie (Vale NC).

Les indicateurs de suivis sont des outils qui permettent de mesurer la dégradation des milieux. Ce sont des outils de pilotage simples au service des gestionnaires d'espaces qui permettent de suivre la bonne mise en œuvre des mesures d'atténuation de l'impact et de proposer/planifier des ajustements si nécessaire pour atteindre les objectifs fixés. Le suivi est une composante indispensable de l'amélioration continue qui est au cœur de la mise en œuvre de tous projets de développement durable.

On cherche alors à relier les causes de changements environnementaux (pressions) à leurs effets (états), et finalement aux actions (réponses) mises en place pour faire face à ces changements :

- Les indicateurs d'état ont une fonction essentiellement descriptive rendant compte de l'état de l'environnement. Ils peuvent être comparés à des normes de référence ou un état zéro ou état de référence. Ces indicateurs, comparés à un état de référence, permettent d'apprécier les conséquences d'une action.
- Les indicateurs de pression peuvent permettre une évaluation indirecte de l'efficacité des mesures mises en œuvre.
- Les indicateurs de réponse évaluent, quant à eux, les efforts de l'autorité compétente pour améliorer l'état de l'environnement ou réduire les sources de dégradation face aux pressions sur l'environnement.

I.2. Objectifs de la mission

A la lumière des différents points évoqués ci-dessus, des questions émergent. Ainsi, les suivis des pressions associées à l'érosion réalisés par Vale Nouvelle-Calédonie permettent-ils de répondre à ces questions:

- de l'évolution de l'ensemble des pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels situés dans la zone d'influence de Vale Nouvelle-Calédonie (Vale NC) ? et si oui, quelles sont ces évolutions.
- de la part due aux activités humaines dans ces évolutions ? et si oui, quelle est cette part.
- Si la surveillance en place semble inadaptée pour répondre à l'une ou aux deux questions ci-dessus, quelles sont les améliorations possibles ?

La mission porte sur l'évaluation des suivis des pressions liées à l'érosion réalisée par Vale NC dans les milieux naturels situés dans la zone d'influence du projet industriel et minier. Sont entendus par « suivis », les suivis dans leur globalité, à savoir:

- Les paramètres suivis et leurs finalités ;
- Les stratégies d'échantillonnage ;
- Les méthodes d'échantillonnage et de mesure ;
- La mise en œuvre des méthodes d'échantillonnage et de mesure.

Est entendu par « pressions associées à l'érosion », l'ensemble des pressions énoncées en préambule, à savoir :

- Pression « dégradation des sols » ;
- Pression « destruction mécanique » ;
- Pression « apport en sédiments » ;
- Pression « apport en métaux ».

Sont entendus par « milieux naturels », les trois milieux cités en préambule, à savoir :

- Terrestre ;
- Dulçaquicole ;
- Marin.

L'étude se basera principalement sur les informations contenues dans une base documentaire fournie par l'OEIL et Vale NC comprenant plus d'une centaine de références (rapport d'étude, rapports de suivis, expérimentations scientifiques...). Elle doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- Analyser la pertinence des suivis des pressions associées à l'érosion réalisés par Vale Nouvelle-Calédonie dans les milieux naturels situés dans sa zone d'influence ;
- Formuler des recommandations pour l'amélioration des suivis en place ou le développement de nouveaux suivis ;
- Réaliser un travail de synthèse en analysant l'évolution (les tendances) des pressions associées à l'érosion dans l'ensemble des milieux naturels de la zone d'influence de Vale Nouvelle-Calédonie à partir des données bibliographiques mises à disposition ;
- Réaliser une étude de faisabilité pour la production d'un (ou plusieurs) indicateur(s) de suivi des « pression(s) associée(s) à l'érosion d'origine anthropique ».

I.3. But du suivi de l'érosion

Le suivi est nécessaire pour connaître l'évolution de l'érosion au cours du temps en fonction des paramètres dans des zones suffisamment différenciées pour pouvoir en tirer des lois générales et initier une modélisation qui s'affinera avec le temps et les données accumulées pour peu qu'elles soient complètes.

Les paramètres principaux à surveiller sont :

- l'intensité du ruissellement: compaction/imperméabilisation des surfaces ;
- l'importance du détachement ;
- couvert du sol naturel (géologie-géomorphologie, topographie, associations végétales) ou avec des altérations anthropiques (feux, chemins de l'eau, zones excavées).

Le but de ce suivi est d'évaluer l'évolution du ruissellement et de l'érosion en fonction :

- 1) du type (durée, intensité de l'évènement pluvieux);
- 2) de l'altération ou de l'aggradation du couvert végétal;
- 3) du suivi des zones anthropisées (remblais, excavations, routes, constructions, etc.)

Afin de :

- i) identifier les zones à risque potentiel ;
- ii) hiérarchiser ces zones en fonction de leur vulnérabilité ;
- iii) prévenir cette érosion en renforçant les mesures de prévention adaptées à chaque situation dans l'écosystème en se focalisant sur les zones les plus sensibles ;
- iv) et éventuellement de générer des mesures de réhabilitation des zones érodées en commençant par les plus pertinentes en termes d'impact.

Chapitre II - Généralités et méthodologie de travail

II.1. Contexte pédologique : particularités des sols sur roche ultrabasique

La nature minéralogique spécifique des sols sur roches ultrabasiques est la quasi absence d'aluminium dans la roche mère laquelle a pour conséquence l'absence de néogenèse de minéraux argileux et donc l'absence d'un complexe argilo-humique stable. Il s'en suit un drainage interne potentiellement rapide avec un lessivage rapide des « bases » et de la silice, aboutissant à des concentrations relatives en fer >70% (sous forme de goethite) contribuant au caractère *gérique* des horizons supérieurs de ces ferralsols (Latham et *al.*, 1978 ; Becquer et *al.*, 2001 ; WRB 2014). Ce caractère gérique est propre aux horizons possédant une très faible Capacité d'Echange Cationique (CEC), mais avec une capacité d'échange anionique synonyme d'une rétention rapide et durable d'anions (phosphates et sulfates) (L'Huillier et *al.*, 1998).

La fraction de la zone altérée (horizon C) proche de la roche mère (saprolite) possède une balance cationique déséquilibrée (le rapport Mg/Ca est extrêmement élevé), et est enrichie en métaux lourds (Mn, Ni, Co, Cr) renforçant la spécificité géochimique de ce milieu lors des interactions sol/plante/activité microbienne.

Les sols formés sur gabbros sont sensiblement différents. Les gabbros contiennent davantage d'aluminium que les péridotites ; les sols néoformés sont donc plus argileux et donc potentiellement moins perméables. Ils ont également une balance ionique apparemment moins déséquilibrée avec une CEC¹ plus élevée. Ces propriétés confèrent aux sols, à la végétation et à l'activité biologique associées un caractère tout à fait remarquable, d'où l'extrême endémicité à la fois en espèces voire en familles de la végétation sur ces surfaces, avec l'absence remarquée de poacées (graminées). Il convient également de bien distinguer à la fois les types de roche dont les sols sont issus ainsi que les différents horizons exposés à l'altération. Chacun d'entre eux développe des propriétés particulières (§II – 1.2).

II.2. Causes de la dégradation

II.2.1. Altération du couvert végétal

La couverture végétale protège la surface du sol de l'énergie cinétique des gouttes de pluie (lesquelles ont tendance à former des croûtes imperméables sur les surfaces mises à nu). Elle contribue par l'apport de la litière à créer une activité biologique dans le sol et à maintenir leur potentiel de fertilité. Les tiges et racines protègent le sol de l'érosion par ruissellement. La végétation spécifique des maquis miniers ne se régénère que très lentement.

- **Les Feux** (volontaires ou non), se propagent souvent à partir des routes. Ils modifient les surfaces des ensembles écologiques et les associations écologiques des espèces. Ils laissent le sol à nu avec formation de croûtes qui limitent la germination.

Le feu est sans doute à l'origine des surfaces à nu sombres et gravillonnaires souvent légèrement encroûtées après le passage des feux (possibilité de dépôts lipidiques hydrophobes résultant de la combustion incomplète des plantes ligneuses). De par l'absence de poacées et l'abondance de plantes ligneuses, les feux atteignent des températures élevées. Ces gravillons sont sans doute pyrogénés puisqu'ils contiennent de l'hématite à la différence des horizons cuirassés exclusivement goethitiques, et ont la propriété d'être attirés par un aimant (pas la cuirasse). Ils sont souvent associés à des charbons de bois qui accentuent le caractère sombre

¹ Capacité d'Echange Cationique

de la couleur du sol. Cette couleur sombre des horizons gravillonnaires absorbe les rayons du soleil et les températures élevées sont également un frein à la bonne germination des graines tout comme la très faible réserve en eau utile de ces horizons.

- **Les Constructions et mines à ciel ouvert**, routes et aménagements divers nécessitant la destruction de la végétation.
- **La prolifération d'espèces introduites envahissantes herbivores**, le cerf (*Rusa timorensis*) en particulier est connu en Nouvelle-Calédonie pour dégrader la végétation.
- **Les Intrants intempestifs** d'éléments chimiques apportés par le béton, le ciment et liés aux matériaux de construction favorisent l'invasion de plantes non endémiques opportunistes par l'apport d'éléments chimiques accroissant leur compétitivité vis à vis de plantes indigènes (Ca, K, P, Si).
- **Les zones de sédimentation massives** enterrent la végétation en place sous des couches épaisses de matériaux peu propices au développement des plantes.

II.2.2. Présence de matériaux potentiellement exposés à l'érosion hydrique

Outre la mise à nu des sols par décapage de la végétation, l'accumulation de remblais et décharges de toute sorte non végétalisés offrent des volumes importants de matériaux souvent issus des horizons profonds (saprolite) à géochimie déséquilibrée. Ces matériaux meubles n'ont pas de macro-structure pédologique et ont une sensibilité extrême à l'érosion hydrique. Du fait de l'absence de minéraux argileux, seule l'activité racinaire peut créer un semblant de structure et de lien entre les éléments du sol.

II.2.3. Sédimentation ou siltation de matériaux érodés

Les sédimentations de matériaux pédologiques issus de l'érosion hydrique provenant de différentes origines, aussi bien d'horizons de sols en place aux propriétés physico-chimiques bien différentes, que de remblais et déblais de toutes sortes conduit à des mélanges hétérogènes potentiellement dotés de propriétés physiques et chimiques d'une grande variabilité spatiale, d'où l'importance du traçage géochimique des sédiments.

II.2.4. Altération des écoulements hydriques

La limitation de l'infiltration des eaux de pluies a pour conséquence l'afflux massif d'eaux de ruissellement participant à l'érosion hydrique. Les ferralsols formés sur matériau péridotitique sont en général très perméables mais les freins à l'infiltration existent et ont plusieurs origines :

- l'encroûtement de surface des sols à nu (associés ou non à des feux) limite l'infiltration et contribue à l'érosion en nappe qui inclut les particules de sol et les graines nécessaires à la régénération in situ des plantes. Ce phénomène reste mal connu sur des sols oxydiques et demeure jusqu'alors très peu étudié.
- la compaction des sols et/ou des sédiments lors de la formation de routes et de chemins, ou suite aux passages d'engins
- l'imperméabilisation des surfaces par mise à nu de la roche mère dans les zones où le sol a été excavé, par bétonnage ou constructions diverses qui conduisent à la canalisation de l'eau.

- Les canalisations des flux d'eau en dehors des axes de drainage majeurs, comme les anciennes routes, les chemins contribuent à la création de zones potentiellement érodibles en ravines, en particulier lorsque ces axes ne sont pas goudronnés.

II.2.5. Biodisponibilité des métaux lourds dans les bassins

Les eaux de surfaces sont généralement oxygénées et les métaux lourds (Mn, Ni, Co, Cr) sont à un état oxydé très peu biodisponible. Cependant dans les mares et/ou bassins de décantation peu oxygénés il peut se développer un caractère réducteur dans la couche d'eau la plus profonde qui peut modifier la spéciation de ces métaux et les rendre biodisponibles et donc toxiques pour les plantes et les animaux.

II.3. Mécanismes de l'érosion en milieu hydrique

II.3.1. Erosion hydrique et transport solide

Si nous donnons à l'érosion le sens très général du déplacement de particules d'origine terrigène ou rocheuse vers le milieu marin, alors leur transport par le réseau hydrographique de surface est un aspect particulier des phénomènes érosifs.

Toutefois, trois origines des matériaux transportés sont en général distinguées :

1. Les particules détachées à partir des versants,
2. Les particules arrachées aux berges du cours d'eau et
3. Les éléments soulevés à partir du lit, nous parlons alors de reprise de matériaux antérieurement déposés.

L'analyse granulométrique des particules déplacées par le cours d'eau vise à identifier l'origine des matériaux. Nous appelons transport solide d'un cours d'eau, l'ensemble des particules déplacées dont le diamètre est supérieur à 0,45 microns (μm) en deçà il s'agit de la fraction dissoute.

Le transport solide se fait à la fois par charriage des éléments les plus grossiers (glissement, roulement sur le fond et saltation) et en suspension pour les éléments les plus fins. Le transport est caractérisé par les propriétés des particules déplacées (taille, forme, concentration, vitesse de chutes et densité des particules).

Ces notions permettent de distinguer les deux composantes du transport solide :

- la charge en suspension (suspended load) est constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sur de longues distances sans toucher le fond du lit. Il s'agit essentiellement des argiles granulométriques (fraction $<2\mu\text{m}$) et des colloïdes.
- la charge de fond (bed load) est formée de matériaux trop lourds pour être mis en suspension relativement à la vitesse du courant. Certains auteurs distinguent un transport par saltation qui correspond approximativement à un déplacement par petits bonds successifs.

La mesure des événements du cours d'eau est donc un moyen indirect de quantifier les phénomènes érosifs survenant à la surface du bassin versant associé, assimilé à un impluvium.

Il a été observé que l'essentiel du transport en suspension survient en événement de crue. (Jean-Paul Bravard et François Petit – « Les cours d'eau, dynamique du système fluvial », Armand Colin éditions,

1997, pages 66 et suiv.). En dehors de ces événements, les cours d'eau permanents répondent à un régime hydraulique assimilable au régime hydraulique d'eau claire.

Les particules sont détachées les unes des autres puis transportées par saltation suivant le rythme des événements pluvieux. Ainsi, au moment où une crue est observée, le transport solide ne reflète qu'en partie l'érosion du versant et des berges. La désynchronisation des deux phénomènes est relative à l'échelle de temps retenue pour l'observation : si le transport solide en crue n'est pas synchrone avec l'érosion, les chroniques annuelles des deux phénomènes offrent un ajustement satisfaisant.

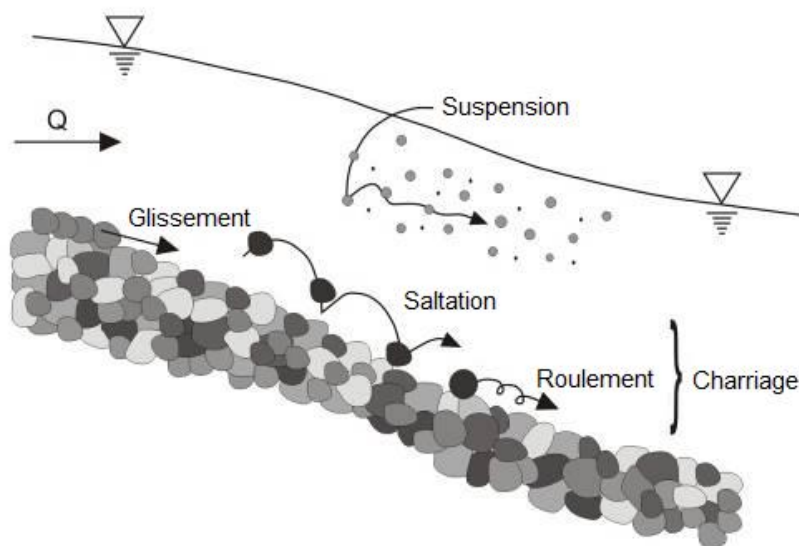


Figure 1. Classification du transport solide

(http://theses.univ-lyon2.fr/documents/getpart.php?id=lyon2.2008.pintomartins_d&part=154405)

II.3.2. Effets de l'érosion : sédimentation en milieu marin

La sédimentation des produits de l'érosion a été considérée comme une des causes majeures de dégradation des récifs de par le monde. Les experts ont estimé que 60 à 70% des récifs frangeants au monde sont affectés par la sédimentation (FAO, 2012).

La Nouvelle-Calédonie n'échappe pas à cette pression, l'érosion des sols ayant été classée comme une pression majeure à l'échelle du territoire, qui s'exercerait sur 70% du littoral de la Grande Terre (Juncker, 2006). L'exploitation minière est en cause dans l'érosion des sols, par la destruction de la végétation et le décapage des sols. Présente sur le territoire depuis 1874, l'exploitation minière a marqué le paysage au fil du temps, en laissant à nu de larges surfaces de sols (anciennes mines ou sites de prospection), dont la revégétalisation après exploitation n'a été rendue obligatoire que depuis peu par le code minier. L'érosion des sols lors des pluies conduit à l'apport de sédiments dans le lagon.

La turbidité se définit par la présence de particules solides et sédiments en suspension dans la colonne d'eau. La turbidité est en lien direct avec la lumière disponible pour les organismes marins photosynthétiques (dont les coraux). Elle est généralement exprimée en mg/l, NFU (Nephelometric Turbidity Unit) ou NTU (Formazine Nephelometric Unit). La sédimentation (ou taux d'accumulation) se définit par l'accumulation de sédiments sur les fonds. Elle est généralement exprimée en $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{jour}$ ou $\text{g}/\text{cm}^2/\text{an}$ (taux) ou mm (épaisseur).

La turbidité et la sédimentation ne sont pas toujours corrélées : une augmentation de turbidité ne conduit pas nécessairement à une augmentation du taux d'accumulation de sédiments. Dans le cas qui

nous intéresse les 2 seront considérées, l'érosion des sols pouvant conduire à l'augmentation des 2 paramètres dans le milieu récepteur.

II.4. Méthodologie de travail

II.4.1. Etude des sources bibliographiques

Ce travail est principalement issu d'une revue documentaire comme demandé au cahier des charges. Il a consisté à la collecte, la prise de connaissance et l'exploitation d'une base bibliographique particulièrement riche (170 rapports et documents) et bien fournie.

Les données les plus pertinentes ont été retenues et analysées, à savoir les rapports présentant des données ou informations en relation directe ou indirecte avec le sol : type de sol, données surfaciques d'habitats potentiellement impactés, évolution des surfaces érodées, informations des taux / quantités de composants de sol érodés / transférés dans les bassins versants, des quantités de matières perdues sur les versants, etc.

Nous avons en particulier porté notre attention sur la recherche des méthodologies de suivi des forçages et des pressions sur les sols, directement (dégradation des sols, recul du couvert végétal) ou indirectement (sédimentations dans les rivières, engravements, taux de matières en suspension).

La bibliographie collectée par nos soins ou mise à disposition par le maître d'ouvrage (OEIL) ou l'exploitant (Vale NC) portait principalement sur :

- Des rapports à différentes fréquences (annuel, semestriel, etc.) de suivis environnementaux de Vale NC ;
- Des rapports ponctuels liés à l'étude d'impact du complexe industriel et minier (état initial, état de référence) ;
- Des constats ponctuels d'évènements accidentels ou météorologiques d'ampleur ;
- Des comptes rendus de missions et rencontres d'experts dédiées aux réseaux de suivis environnementaux ;
- De la bibliographie scientifique associée aux thématiques.

II.4.2. Visite de terrain

Le diagnostic et les propositions présentés dans ce rapport ont été nourris par une phase de terrain permettant de s'approprier la complexité du contexte géopédologique et hydrographique du Grand Sud de la Nouvelle-Calédonie. Celle-ci a également permis d'entrer en contact avec les équipes des suivis environnementaux et les ingénieurs en charge de ces suivis. Enfin, différents partenaires scientifiques (IRD notamment) ont été rencontrés.

Cette phase a été menée du 10 au 17 mars 2014 sur le site de l'usine et de la mine puis dans les bureaux de Vale NC Avenue du Maréchal Foch Nouméa. L'équipe en charge de cette phase était constituée de Nicolas BARGIER (Asconit Consultants) et Yannick DOMINIQUE (BioEko).

II.4.3. Expertises croisées

L'approche défendue pour effectuer ce travail d'expertise des réseaux de surveillance environnementale sous l'angle de l'érosion a demandé un regard croisé des réseaux actuels par un groupe d'experts thématiques d'horizons divers. La difficulté d'appropriation de ce thème est toutefois importante et la capacité à croiser les différentes analyses compartimentées ne s'est pas faite sans difficultés.

Ont donc été sollicités pour participer à ce travail collégial :

Pascal PODWOJEWSKI (IRD) :

Directeur de Recherches 2eme classe, membre de l'UMR 242 iEES-Paris. 36 années d'expérience à l'IRD en pédogenèse, chimie, minéralogie et physique des sols. Il participe à l'équipe Biophys de l'UMR iEES-Paris sur le site de Bondy. Il travaille avec des hydrologues, hydrochimistes, biologistes du sol, écologistes, agronomes et géophysiciens.

Son principal sujet de recherche est l'étude des effets des composés du sol et de leur comportement physique dans les processus de dégradation et d'érosion des sols. Un intérêt particulier est porté sur les effets des changements dans la biologie du sol sur les composés minéraux du sol et leur assemblage dans les processus de dégradation des sols. Il a effectué 20 années d'affectation au sud : 9 ans Nouvelle Calédonie, 4 ans Equateur, 3 ans Vietnam, 4 ans Afrique du Sud. Il a participé à l'élaboration des cartes de synthèse au 1/200 000 de pédologie, d'agronomie et de certaines cartes de pédologie de la Nouvelle-Calédonie au 1/50 000 de 1980 à 1989 au sein de l'ORSTOM.

Jean-Pierre BRICQUET (IRD)

Hydrologue avec une expertise en télémétrie spécialisé dans les grands bassins fluviaux et érosion. Il travaille actuellement à l'Unité Mixte de Recherche Hydro Science de Montpellier comme chargé des projets en hydrologie opérationnelle interne et externe. Il est intervenu dans la réalisation de nombreux travaux d'aménagements et la mise en place des réseaux d'observation (projet Caraïbes-HYCOS, réhabilitation du réseau hydrométrique de la région de Tarapaca au Chili). Il a participé en tant qu'ingénieur hydrologue, dans le cadre du plan d'action contre la pollution par le chlordécone en Guadeloupe et Martinique, à la conception et la mise en place d'un observatoire à l'échelle des bassins versants sur l'avenir de ce polluant, ainsi que la réhabilitation d'un réseau de mesures eau/érosion sur le bassin versant de Cavaillon en Haïti. Avant d'arriver à l'UMR HydroSciences Montpellier, il a travaillé en tant que consultant en télémétrie et appui au chef de projet auprès de la Commission du Fleuve de Mékong dans le cadre du projet Mékong – HYCOS.

Il a également travaillé sur les petits bassins versants agricoles du programme MSEC de l'IWMI en Asie du SE (Laos, Vietnam, Thaïlande), par la création d'un réseau de 43 petits bassins versants pour la quantification de l'érosion (design, réalisation, suivi).

Nicolas BARGIER (ASCONIT CONSULTANTS) :

Spécialiste des écosystèmes aquatiques, notamment tropicaux et insulaires. Il est Chef de projet sur de nombreuses études relatives à la qualité de l'eau et des milieux aquatiques en outre-mer et à l'international.

Il est en charge de l'expertise hydrosystème sur tous les dossiers d'évaluation environnementale et d'étude d'impact menés à l'international (Gabon, RDC, Inde, Chine) ainsi que sur de nombreux

DROM/PTOM. Il bénéficie ainsi d'une bonne connaissance de la Nouvelle-Calédonie au travers de nombreux réseaux de suivis hydrobiologiques miniers (KNS, SLN, VALE).

Il participe actuellement à la mise en place du RHUM Référentiel Hydromorphologique Ultra Marin et réalise plusieurs expertises de type CarHyCE (Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau) dans différents DOM. A travers ces deux projets, la problématique érosion des sols est majeure et ces outils d'analyses ou de suivis font l'objet d'adaptation en cours. Il a également mené la prestation d'Assistance à la définition et à la mise en place du réseau de suivi du contrat de la Baie de Fort-de-France pour les aspects dulçaquicoles. Cette étude portait principalement sur la détermination de l'origine des flux de matières terrigènes, leur quantification (matériel autonome ou semi-autonome) et leur caractère polluant. Cette étude nécessitait le choix des indicateurs de suivi mais également la faisabilité de ces suivis.

Tony AGION (ASCONIT CONSULTANTS)

Il possède une expérience et des compétences élargies en écologie marine et littorale acquises à travers plusieurs projets nationaux et internationaux. Il a réalisé et rédigé de nombreux états des lieux et diagnostics environnementaux notamment à travers l'utilisation de bio-intégrateurs. Il a participé à de nombreuses études relatives aux activités de dragage/immersion (recherche de site, étude de faisabilité...), des suivis environnementaux des rejets de centrale thermique (EDF CPT Martigues), des rejets de station d'épuration d'industriels. De par ses expériences antérieures (iXSurvey), il a participé à de nombreuses missions de suivi pour le compte d'EDF.

Yannick DOMINIQUE (BIOEKO)

Il est en charge du développement du département « suivi et expertise des milieux ». Il possède une très bonne connaissance du contexte environnemental, urbain et industriel du territoire et de son évolution sur ces dernières années. Il a notamment mené de nombreux suivis hydrobiologiques sur la zone de projet.

Sandrine JOB (Consultante indépendante)

Ingénieur en environnement marin, spécialisée dans l'étude des récifs coralliens. Ex-ingénieur en bureau d'études au sein du groupe GINGER, elle travaille depuis 6 ans en tant que consultante en Nouvelle-Calédonie et dans le Pacifique.

Son domaine d'intervention couvre :

La conception et la mise en place de projets innovants, notamment la restauration de récifs dégradés, impliquant des opérations de transplantation corallienne ou l'installation de fermes coralliennes.

La participation ou le pilotage de missions d'inventaires de la faune et flore marine sur des projets miniers : suivis du milieu marin de KNS SAS et état de référence des communautés récifales pour Vale NC.

L'évaluation des ressources marines, en particulier concernant les ressources en invertébrés.

L'évaluation de l'état de santé des récifs coralliens : en particulier S. Job est en charge du Réseau d'Observation des Récifs Coralliens de Nouvelle-Calédonie depuis 2009.

La réalisation d'études réglementaires en milieu marin : notices et études d'impact relatives à des aménagements littoraux ou sur le domaine public maritime.

La contribution à des ouvrages (guides pratiques, manuels) et réunions régionales ou internationales (ICRS, ITMEMS, conférence régionale sur les AMP) intéressants ses compétences.

Chapitre III - Evaluation des suivis actuels et pistes d'amélioration

Les suivis environnementaux actuels ont un potentiel informatif plus ou moins important de surveillance de l'érosion. Ils ne sont toutefois pas totalement organisés de manière à répondre à cette question. Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à lister ces suivis, définir leur capacité informative et proposer des premières pistes simples d'adaptation. Il s'agit des suivis portant sur :

Compartiment	Intérêt
SOL	
Surface de sol dénudé *	Indicateur de pression
Couverture végétale*	Indicateur de pression/état

EAUX CONTINENTALES	
Météorologie	Indicateur de pression
Limnimétrie	Indicateur de pression
Physico-chimie de l'eau	Indicateur pression/état
Physico-chimie des sédiments	Indicateur pression/état
Transport solide	Indicateur de pression/état
Indicateurs biologiques	Indicateur d'état

EAUX COTIERES ET MARINES	
Flux de particules dans la colonne d'eau	Indicateur pression/état
Physico-chimie de la colonne d'eau	Indicateur pression/état
Physico-chimie des sédiments	Indicateur pression/état
Accumulation sédimentaire (carottage)	Indicateur pression/état
Habitats coralliens	Indicateur d'état
Peuplements biologiques (ichtyofaune et macrobenthos)	Indicateur d'état

** Données collectées ponctuellement par Vale NC qui ne font pas l'objet d'un suivi défini à ce jour.*

De nombreux autres suivis environnementaux existent à l'échelle du site (suivi des piézomètres par exemple), mais nous avons jugé qu'ils n'étaient pas pertinents dans le cadre du suivi érosion.

III.1. Historique du site et des suivis environnementaux

Afin de caler les logiques d'intervention du programme de suivi actuel mais également pour mieux comprendre la stratégie à venir, il est rappelé ci-dessous brièvement les grandes étapes de construction de l'outil industriel et des suivis environnementaux liés à ce projet. D'une manière générale, il est

important de noter que les premières activités perturbatrices ont commencé en 1998 lors de la construction de l'usine pilote. Cela ne prend pas en compte les phases de prospection préalables et l'historique minier de la zone d'étude.

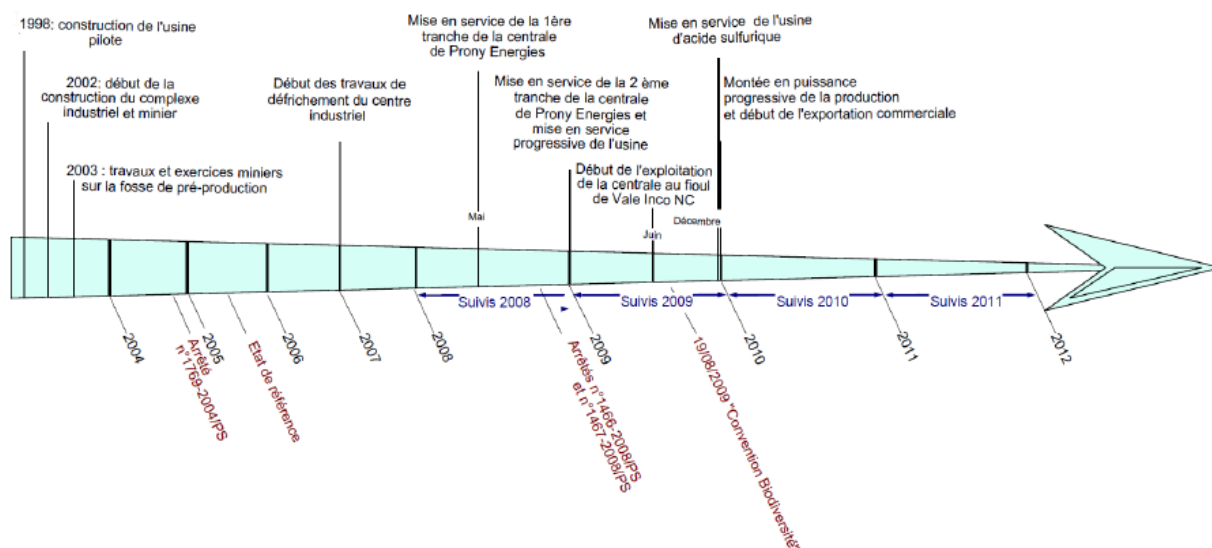


Tableau 1. Tableau chronologique de construction et de suivis environnementaux des ouvrages miniers sur le site de Vale NC.

Aménagement	Premier chantier	Mise en fonction principale	Réseau de suivi associé
Aire de Stockage des Résidus (ASR)	2006	Après l'obtention de l'arrêté autorisant l'exploitation de l'aire de stockage du 9 octobre 2008	ICPE ² et CCB ³
Carrières de Limonite Sud et Carrière de péridotite du Mamelon de la Kué Ouest	2006	La carrière limonite sud : 2008 Carrière du Mamelon	
Usine de Préparation du Minéral (UPM)	2007	Après l'obtention de l'arrêté d'autorisation du 9 octobre 2008	ICPE et CCB
Centre Industriel de la Mine (CIM)	2007	Après l'obtention de l'arrêté autorisant l'exploitation du 9 octobre 2008	ICPE et CCB
Fosse d'extraction de la mine	2005	Exercices miniers en 2006 Exploitation après l'obtention de l'arrêté autorisant l'exploitation du 9 octobre 2008	
Bassin de Sédimentation de la Kué Nord (BSKN)	2006	Novembre 2008 et montée en eaux en 2009	
Verse à stériles de la Kué Est (VSKE)		Début des travaux en sept 2006 fermeture en 2010	
Carrière de péridotites de la Kué Est (CPKE)		Février 2006 et fermeture en décembre 2010	ICPE et CCB

² ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement. Ces installations et usines susceptibles de générer des risques ou des dangers sont soumises à une législation et une réglementation particulières introduisant notamment une obligation de suivis de divers paramètres dans diverses matrices.

³ CCB : Convention pour la Conservation de la Biodiversité. Cette convention soumet Vale NC à un suivi complémentaire au suivi réglementaire dans le cadre de l'ICPE.

Base vie	2005	2006	ICPE et CCB
Usine de traitement	2005	Après l'obtention de l'arrêté autorisant l'exploitation du 9 octobre 2008	ICPE et CCB
Centrale thermique de Prony Énergies	2004	2007	ICPE
Port	2005	Après l'obtention de l'arrêté autorisant l'exploitation du port du 13 juillet 2007	ICPE et CCB

Les suivis mis en place par l'industriel se divisent donc en deux parties :

A. le suivi Réglementaire :

Imposé par les différents arrêtés d'exploitation dispensés par les autorités. Leur respect est donc strict (hors évènement majeur du type climatique) et assorti d'une obligation de rapportage aux autorités environnementales.

Il faut toutefois noter que :

- Le milieu terrestre (sol) ne fait l'objet d'aucun suivi réglementaire ;
- Pour le milieu « eau douce de surface » **aucune valeur réglementaire n'est imposée par les arrêtés d'autorisation d'exploitation exceptée dans l'arrêté autorisant l'exploitation d'une aire de stockage à résidus sur le site de la Kwe Ouest où une valeur limite de 50µg/L a été fixée pour le manganèse dans les eaux de surface.** Ceci implique que les suivis ne se rapportent ni à une valeur seuil pour chaque paramètre ou indicateur, ni à un écart à une situation de référence. Les rapports annuels font donc état de la conformité ou la non-conformité pour le seul paramètre (Manganèse) et de l'évolution des différents paramètres en notant toutefois les situations potentiellement critiques.
- Pour le suivi du milieu marin il n'y a pas de dépassement de seuils réglementaires proprement dit, il ne s'agit pas d'émissions sujettes à des seuils mais de la santé des écosystèmes (milieux récepteurs) et de la qualité du milieu par rapport à l'état de référence (Etats initiaux, guide pour le suivi des milieux marins en Nouvelle-Calédonie et bases de données issues des missions de suivis antérieures – Annexe 1).

B. le suivi Volontaire

Défini par l'industriel dans une démarche d'auto-évaluation ou plus généralement dans une démarche de gestion de l'environnement, des risques, de l'hygiène, de la sécurité. Il peut également servir directement dans le procédé industriel (notamment pour la connaissance des ressources en eau disponible ou pour le suivi des fuites de matières tout au long du procédé industriel. Il n'est pas forcément assorti de rythme strict d'interprétation et rapportage en interne et peut entièrement rester à la discrétion de l'industriel. Il obéit aux mêmes logiques d'évaluation que précédemment pour les différents compartiments.

III.2. Surveillance du milieu terrestre (sol et milieu dulçaquicole)

III.2.1. Préambule

Ce paragraphe vise à faire l'inventaire de la surveillance actuellement en place sur le site de Vale NC. Cet inventaire concerne la surveillance des sols et du bassin hydrographique à travers les paramètres suivants :

- Etat des sols (niveau d'altération)
- Conditions hydrologiques (débit, pluie)
- Qualité physico-chimique de l'eau et des sédiments
- Flux de matières en suspension et turbidité

Le suivi du bassin hydrographique repose sur des réseaux réglementaires, imposés par Arrêtés, et des suivis dits « volontaires » mis en place afin de compléter/renforcer les précédents. L'ensemble de ces réseaux est représenté sur les cartes 1 à 7.

III.2.2. Le suivi à l'échelle des sols

Compartiment	Type de suivi	Surfaces de sols dénudés et couverture végétale
Sol	Réglementaire	Néant
	Volontaire	Couverture végétale, surfaces érodées : ponctuel par photo-interprétation sans fréquence arrêtée
	Volontaire	Perte de matière : Néant
	Volontaire	Quantification du transfert de matériaux érodés : néant

Selon les éléments portés à notre connaissance **aucun suivi réglementaire ou volontaire n'est actuellement mis en œuvre pour suivre la pression érosion à l'échelle des sols** : dégradation ou extension du couvert végétal, perte de matière, évolution des surfaces érodées, transfert des matériaux érodés vers les cours d'eaux (quantités, types, toxicités,...).

La littérature existante (URS, 2007) met en avant des indicateurs pertinents pour un suivi des pressions sur les sols, notamment à partir de la flore terrestre calédonienne caractérisée par sa diversité, la présence d'espèces végétales rares, endémiques et menacées d'extinction. Il ressort également l'intérêt de mesurer les paramètres tels que la superficie et la localisation de chacune des formations végétales, le type de sol, les zones érodées naturellement, les secteurs qui seront soumis à l'activité de la mine, etc. (Rouetis, 2012 ; Vale NC, 2012).

L'accès à de telles informations repose sur la photo-interprétation de figures d'érosion (photographies aériennes, d'images satellites) ou des observations visuelles par vol hélicoptère et/ou une visite sur site. Il s'agit de mesurer l'évolution d'une zone d'érosion à partir de l'étalement surfacique (augmentation/réduction) de la zone érodée et/ou dégradée correspondant soit à une dégradation du couvert végétal, soit au décapage de l'horizon de surface (rouge foncé) qui passe à l'ocre-jaune (couleur de la goethite) soit à l'élargissement d'une ravine. Elle peut être accompagnée de relevés de terrain au GPS ou par des lignes permanentes (en cas de reconquête du couvert végétal). Cette analyse a pour avantage de spatialiser rapidement les différentes unités et permet un suivi temporel de l'état de surface des sols. En revanche elle ne permet pas de mesurer l'épaisseur de la zone érodée lorsqu'il s'agit d'un horizon homogène, ni l'épaisseur des accumulations de sédiments potentiels en aval de structures.

L'érosion anthropique minière est bien prise en compte, par contre l'érosion anthropique forestière ou agricole et l'érosion naturelle sont peu ou mal prises en compte dans les études existantes. Un état initial des milieux est alors nécessaire afin de réaliser un suivi pertinent de ces pressions aux sols. De plus, il n'existe pas d'inventaire écologique réel en fonction des distributions de sols, c'est-à-dire la répartition des types d'habitat et d'espèces en fonction des facteurs pédologiques. Ce travail permettrait de rendre plus pertinente l'analyse spatiale relative aux indicateurs biologiques. Toutefois l'indisponibilité de nombreuses données SIG existantes, voire la difficulté d'harmoniser les études parcellaires, freine considérablement le potentiel de valorisation des travaux de cartographie déjà menés. Néanmoins, la zone d'étude étant couverte par une cartographie spatiale de l'érosion des sols

(Landloch, 2004), il semble pertinent de mettre en œuvre une surveillance des sols à partir de cette méthodologie.

En outre, une étude réalisée pour le compte de Vale NC par le bureau d'étude BlueCham de Nouméa s'est intéressée au suivi par images satellitaires des surfaces couvertes/décapées depuis 2011 (point zéro) sur un territoire de 400 km². Cette étude distingue les surfaces boisées (typologie développée), les surfaces en terres nues (anthropisées ou non), les surfaces en eaux et rivières. Ce travail peut servir de base pour l'évaluation à long terme de l'évolution du couvert végétal et des surfaces décapées.

Dans le cadre de la réalisation du point zéro de la végétation et de l'estimation des surfaces décapées par la société Blue Cham, le prestataire a mis en place une méthodologie semi-automatique basée sur l'imagerie GeoEye-1 de 2011. Il est difficile d'évaluer l'efficacité et la robustesse de la méthode car nous manquons d'éléments techniques et de validation sur l'approche automatique. Ainsi nous ne savons pas quelle est la part de reprise manuelle par photo-interprétation sur les différentes classes de la nomenclature.

Toutefois, la littérature montre que cette approche utilisant des données de télédétection à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) est particulièrement bien adaptée et efficace pour extraire et identifier les grandes classes d'occupation du sol. L'identification des différentes densités de maquis est peu détaillée dans le rapport d'étude, il est difficile de savoir si la méthode utilisée est statistiquement robuste ou soumise à la subjectivité du technicien photo-interprète. La déclinaison des classes de maquis et forêts nécessite en effet l'apport de données complémentaires. Le prestataire utilise une analyse géospatiale uniquement basée sur les formations lithologiques de la zone d'étude. Cette analyse pourrait être affinée par des informations de pentes, d'expositions ou de précipitations. De plus il serait possible de réfléchir aux espaces de transition entre deux types de formations végétales.

Concernant la méthodologie des surfaces décapées, le prestataire isole les sols nus précédemment identifiés pour effectuer une nouvelle classification automatique uniquement sur ce milieu pour identifier différents types de surfaces décapées. Cette classification est basée sur un échantillonnage sur image et d'un seuillage paramétré pour chacune des classes voulues. Cette méthode est extrêmement dépendante de la qualité de l'échantillonnage et du seuillage et donc difficilement reproductible. Malgré tout, la méthode semble la plus appropriée mais des relevés de terrain sont indispensables afin d'être validée correctement.

Implication pour le suivi :

Pour les unités, il convient de bien isoler les zones de gabbro des zones de péridotite, puis pour les sols sur péridotite mis à nu, il convient de distinguer :

- *les horizons sombres de surface (hématite + charbon de bois)*
- *la cuirasse en place (difficile de la différencier des horizons sombres de la surface). Il semblerait que le distinguo entre cuirasse, carapace et horizons gravillonnaires meubles ne soit pas correct. Il est assez rare de voir des cuirasses sur les sommets des structures dans cette région. Rappelons que le cuirassement (cuirasses massives et continues) des sols de N.C. est goethitique, qu'il correspond à des dépôts de fonds de dolines qui ont été exondés rapidement et leur présence au sommet des structures constitue une inversion de relief*
- *les horizons ocre-jaune de profondeur (goethite)*
- *la roche en place*

D'autres unités pourraient être intégrées telles que (d'après A2EP, 2013) :

- *Eau douce*
- *Forêt sur substrat ultramafique (%)*
- *Maquis dense paraforestier (%)*

- *Maquis ligno-herbacé (%)*
- *Sol nu sur substrat ultramafique (%)*
- *Sol nu sur substrat volcano-sédimentaire (%)*
- *Végétation arbustive sur substrat volcano-sédimentaire (%)*
- *Activité minière future*

Par ailleurs, une étude a conduit à modéliser l'érosion des sols et le transport sédimentaire après décapage des sols dans le cadre de la mine de Goro Nickel (Landloch Pty Ltd, 2004). Ce modèle WEPP (Water Erosion Prediction Program) combine des mesures de pluies et de ruissellement prises sur divers faciès et des mesures de vitesse de sédimentation.

Etude Landloch Pty Ltd, 2004 – Fondement scientifique et applicabilité dans le contexte du Grand Sud

Erosion and sediment study, Goro project area.

La technique utilisée (simulation de pluie) est une technique éprouvée et fiable pour mesurer la détachabilité et l'évolution des vitesses d'infiltration. Cette technique est tout à fait conforme aux simulations de pluie faites à travers le monde par l'équipe de l'IRD (Amérique Latine, Afrique, Asie du SE).

Les valeurs comparatives obtenues entre les différents substrats testés concernant les vitesses d'infiltration et la détachabilité sont excellentes. En revanche l'interprétation qui en est faite du point de vue de la dynamique des particules est erronée. En effet les sols sur massifs miniers sont oxydiques et gériques. Ils ne comportent pas d'argiles minéralogiques ni de grains de quartz. Par conséquent les références faites par rapport aux tailles des particules sont fausses. A la page 14, les vitesses de sédimentation sont normalisées par les chutes des grains de quartz ronds qui ont une densité de 2,6. Or d'une part les particules de goethite des horizons jaunes profonds sont aciculaires et ont une densité oscillant entre 3,3 à 4,3 en fonction de leur état de microagrégation – qui n'a jamais été étudié en Nouvelle Calédonie- tandis que les sédiments provenant de la surface qui sont pyrogénés sont enrichis en hématite (colorant rouge) avec des densités pouvant atteindre 4,9. Il est donc certain que les tailles de particules fines érodées sont largement sur-dimensionnées. Cela explique aussi pourquoi les bacs de rétention retiennent préférentiellement les particules « foncées ».

L'absence d'agrégation est également très importante à souligner. Elle est probablement due à l'absence de charges électriques négatives – présence de charges variables (pH eau < pH KCl) - sur les particules des oxydes et les problèmes de floculation qui en découlent. Comme il est mentionné dans l'étude complémentaire, les charges ioniques positives comme Al^{+++} sont absentes dans ce milieu (mais potentiellement présentes sur gabbro) ne peuvent pas entraîner de floculation. La floculation serait plutôt favorisée par des anions (surtout S présent dans les embruns et P). C'est pour cela que la dispersion des particules ne peut se faire à l'aide de pyrophosphate comme dans tous les standards internationaux mais au contraire avec des résines échangeuse d'ions cationiques (Bartoli et al., 1991).

Il serait intéressant au niveau fonctionnel de connaître les charges en sels de l'eau de pluie sachant que d'une part les vents constants et la houle se brisant sur le récif jamais éloigné de plus de 20-30km des zones prospectées apportent des quantités non négligeables d'embruns et d'autre part que cette concentration en sels peut être diluée en cas de gros événements pluvieux.

Le terme érodibilité est à traduire par détachement. La simulation de pluie mesure un détachement par effet splash (énergie cinétique des gouttes de pluie) et peu par la dynamique du ruissellement. Elle ne prend pas en compte la re-sédimentation potentielle des particules avant leur évacuation du bassin versant (érosion). En outre la simulation de pluie est réalisée sur pente faible. Plus la pente augmente plus l'énergie cinétique des gouttes de pluie diminue ainsi que l'effet d'encroûtement ce qui favorise donc l'infiltration. A delà de 30 à 40% l'infiltration est telle que le ruissellement potentiel cause

d'érosion diminue tellement que l'érodibilité décroît. Les modèles WEPP ne prennent pas en compte l'effet pente au-delà d'un certain seuil du fait de l'absence de pentes fortes cultivées prises en compte dans le modèle plutôt adapté aux sols cultivés et développé à partir du modèle USLE adapté au middle West américain. Au-delà de 30% de valeur de pente, les valeurs estimées calculées sont complètement erronées (Janeau et *al.*, 2003 ; Ribolzi et *al.*, 2011).

La partie la plus intéressante concerne l'érodibilité des chemins de l'eau. En effet les anciennes routes sont très peu perméables, et même si ces zones sont à nu, elles sont également peu érodibles (quantité de matériau potentiellement détachable est faible – Cf : carte risque érosif) ; cependant l'énergie cinétique accumulée sur de longues pentes peut créer très rapidement des ravines au contact latéral entre les anciennes routes et le sol en place moins compacté et beaucoup plus sensible au détachement potentiel, en particulier si la partie supérieure du sol (carapace) a été décapée.

Ce qui est très dommage c'est l'absence de coordination pour cette étude très lourde qui nécessite un gros matériel, beaucoup de main d'œuvre, entre le personnel spécialisé en ingénierie (Landloch) et des pédologues qui connaissent les processus de pédogenèse de ces sols atypiques et les mécanismes d'érosion, alors que l'IRD est un acteur de la recherche extrêmement présent en Nouvelle-Calédonie. Le territoire aurait pu exiger la présence d'un expert d'un institut présent en Nouvelle-Calédonie, d'autant plus qu'ils existent. En effet une simulation de pluie apporte toute une série d'informations qui ne sont malheureusement pas consignées dans le rapport comme le "pre-pounding rain" ou quantité de pluie que peut emmagasiner le sol avant le ruissellement, et l'évolution de la courbe d'infiltration avec le temps (jusqu'à obtenir une valeur constante qui seule est présentée dans le document - mais à partir de quelle quantité de pluie obtient-on une valeur d'infiltration constante ?). En effet ce travail considérable aurait pu donner bien davantage de renseignements sur les processus contrôlant les vitesses d'infiltration (porosité de surface, vitesse d'encroûtement) et mesurer l'importance de la longueur d'une pluie sur le ruissellement. Or ces valeurs sont très représentatives des ravines préexistantes. Leur présence est sans doute liée à la persistance de feux (les fougères sont très inflammables) limitant la protection au sol de l'impact des gouttes de pluie, de la possibilité de favoriser une croûte peu perméable à partir d'éléments pyrogénés. La présence de ravines est souvent associée à ces surfaces à nu rouge foncé et à une végétation dégradée.

Janeau, J.L., Bricquet, J.P., Planchon, O., Valentin, C., 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science* 54, 543–554.

Ribolzi O., Patin J., Bresson L.M., Latsachack K.O., Mouche E., Sengtaheuanghoung O., Silvera N., Thiébaux J.P., Valentin C., 2011. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. *Geomorphology*, 127, 53-63.

Implication pour le suivi :

La simulation de pluie offre le moyen de déterminer la hiérarchie des facteurs clés de l'érodibilité. Elle permet i) de mesurer des valeurs d'infiltrabilité/ruissellement variables au cours d'une pluie et ii) de donner des valeurs relatives de détachabilité sur des substrats naturels et anthropisés très différents. Après identification des réponses aux différents substrats, le choix des sites comparatifs pour effectuer un suivi sera facilité. Si ces chiffreages peuvent être couplés avec les analyses de surface (Etude BlueCham) et les Etudes HydroMine/ CNRT, il sera possible de créer une base SIG des zones + ou - érodées en fonction de la pente, de la surface décapée, du nombre de pistes, de la fréquentation en véhicules lourds, etc. et d'évaluer les pertes totales en sol.

III.2.3. Suivi des conditions météorologiques

Compartiment	Type de suivi	Météorologie
Eau/Hydrologie	Réglementaire	3 stations de suivi météo en continu (fréquence d'acquisition : 15 minutes)
	Volontaire	2 stations de suivi météo en continu (fréquence d'acquisition : 15 minutes)

Ce sont 5 stations qui sont implantées directement sur le site de Vale NC : Goro Pépinière, Goro Usine, Goro Mine totalement équipées et Goro Résidus et Gisement uniquement équipées de pluviographes.

La principale information collectée est la pluviométrie (deux stations n'ont que cet équipement) à un pas de temps d'acquisition de 15 minutes. Les chroniques ne montrent pas de lacunes majeures. Deux autres stations proches de la zone (sous gestion DAVAR : Port Boisé et Goulet) permettent d'avoir une bonne couverture générale du site. L'intégralité des données sont transférées à Météo France pour validation pour bancarisation ultérieure chez Vale NC.

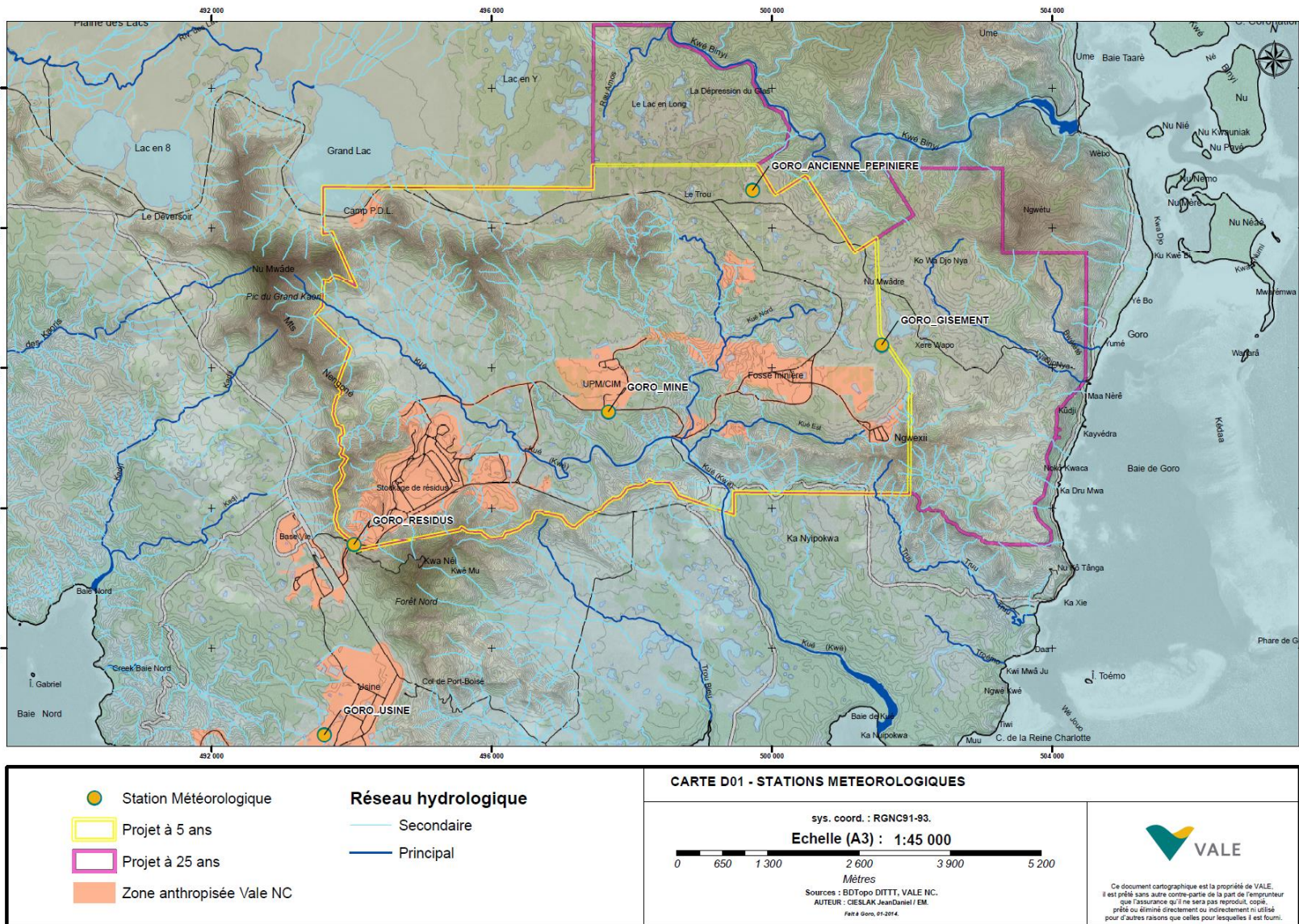


Figure 3. Carte des stations météorologiques (Vale NC, 2014)

Implication pour le suivi :

L'information pluviométrique est insuffisante pour être exploitable en l'état pour le suivi de l'érosion. Si l'on veut d'une part comprendre les effets de la pluie (durée et intensité) pour les études de suivi et ruissellement d'érosion et ensuite de faire tourner des modèles strictement liés à l'érosion, il faut disposer d'une meilleure information que celle disponible actuellement, et à des pas de temps d'acquisition plus serrés que les 15 minutes. D'autre part des pluviomètres doivent être répartis dans tout le bassin versant pour apprécier la variabilité des pluies dans l'espace et améliorer la représentativité de la relation pluie-débit-érosion.

De manière générale, une meilleure connaissance de la pluviométrie (pas de temps de 5 ou 6 minutes) améliore considérablement les résultats des modèles d'érosion. Si les modèles arrivent à représenter de manière fidèle ce qui sera mesuré par ailleurs avec les méthodes « traditionnelles » de suivi, cela permettra à terme d'alléger le suivi régulier et de ne laisser en place qu'un nombre plus réduit de points de mesures.

III.2.4. Suivi des conditions hydrologiques

Compartiment	Type de suivi	Limnimétrie
Eau/Hydrologie	Réglementaire	Suivi limnimétrique : 6 stations de suivi en continu (fréquence d'acquisition : horaire)
	Volontaire	Suivi limnimétrique : 15 stations de suivi en continu (fréquence d'acquisition : horaire)
	Volontaire	Suivi de l'érosion : 3 stations équipées pour le suivi des MES et de la turbidité

Le régime hydrologique des rivières de Goro est suivi grâce aux observations de **nombreuses stations hydrométriques de suivi en milieu lotique** :

- **13 stations (6 réglementaires + 7 volontaires) directement sur le site en continu (dont les 3 stations de suivi MeS/Turbidité) ;**
- **8 stations en continu dans la zone d'influence (= hors de la zone d'exploitation) ;**
- **plusieurs dizaines à des fréquences plus basses (mensuelles, trimestrielles) ou de manière ponctuelle ou événementielle dont une part de jaugeage différentiels.**

Le calage des stations de jaugeage en continu s'effectue de manière mensuelle. Il consiste en une mesure de vérification ponctuelle au moulinet. Un tel procédé permettrait selon Vale NC d'obtenir des mesures d'une fiabilité importante du fait de la vérification à haute fréquence (mensuelle plutôt que trimestrielle ou semestrielle sur d'autres réseaux. Sur les 15 stations limnimétriques, seules 5 sont installées sur des sections fixes permettant un calage de l'ensemble du système (Tableau 2).

Tableau 2. Stations de mesures hydrologiques actuelles sur le bassin de la Kwé/Rivière des lacs et Rivière Bleue

Station	Rivière	Superficie (km ²)	Taille de l'échantillon
KAL (Valé volontaire)	Kué	32,97	1996 – 2012 (16 ans)
KNL (Valé volontaire)	Kué Nord	10,37	1995-2002 et 2005-2008 (12 ans)
KOL (Valé volontaire)	Kué Ouest	11,93	2005 -2012 (7 ans)
Goulet (DAVAR)	Rivière des lacs	77	1958 – 2010 (53 ans)
Embouchure (DAVAR)	Rivière Bleue	33,3	1974 – 2010 (37 ans)

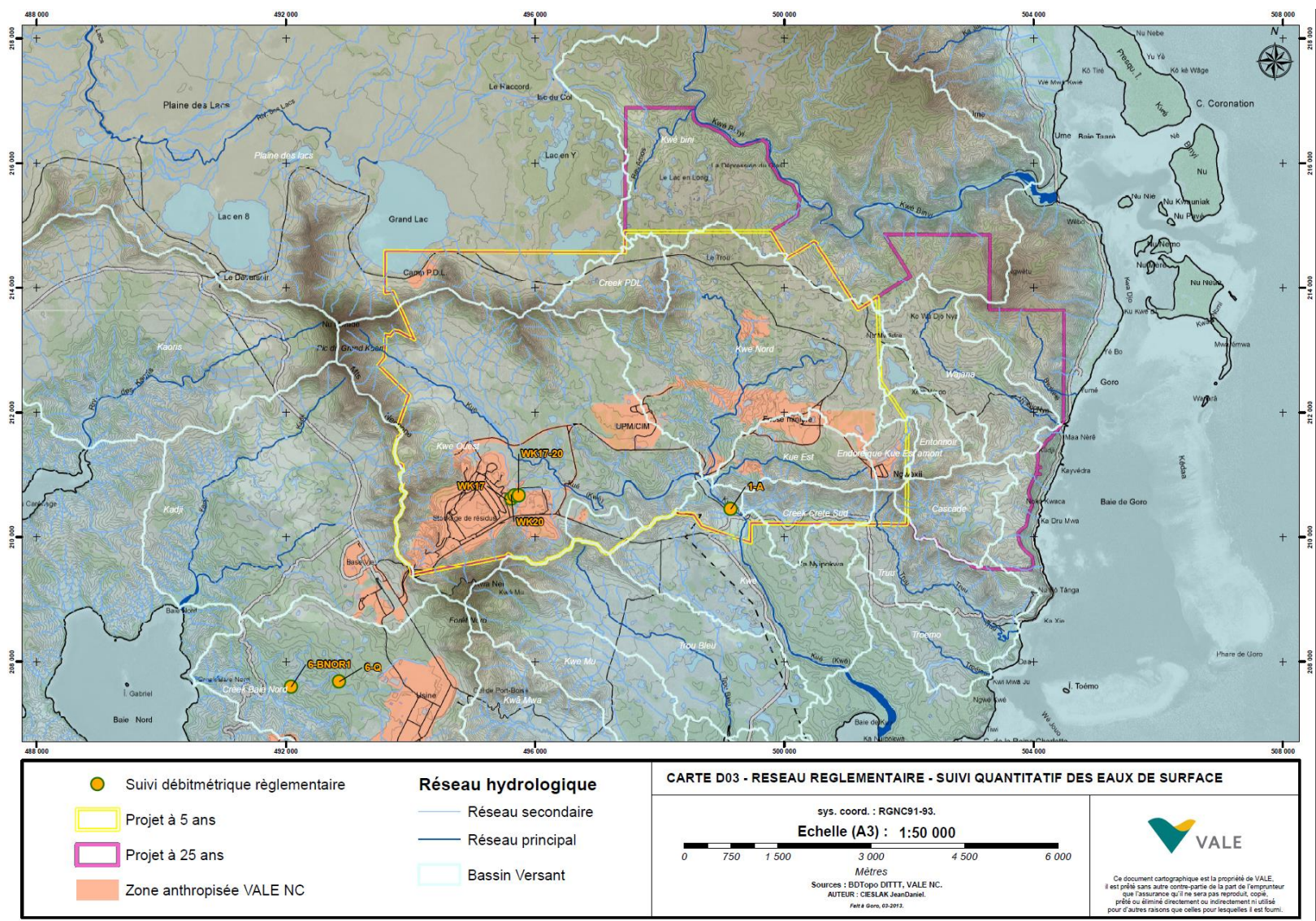


Figure 4. Carte du suivi débit métrique réglementaire (Vale NC, 2014)

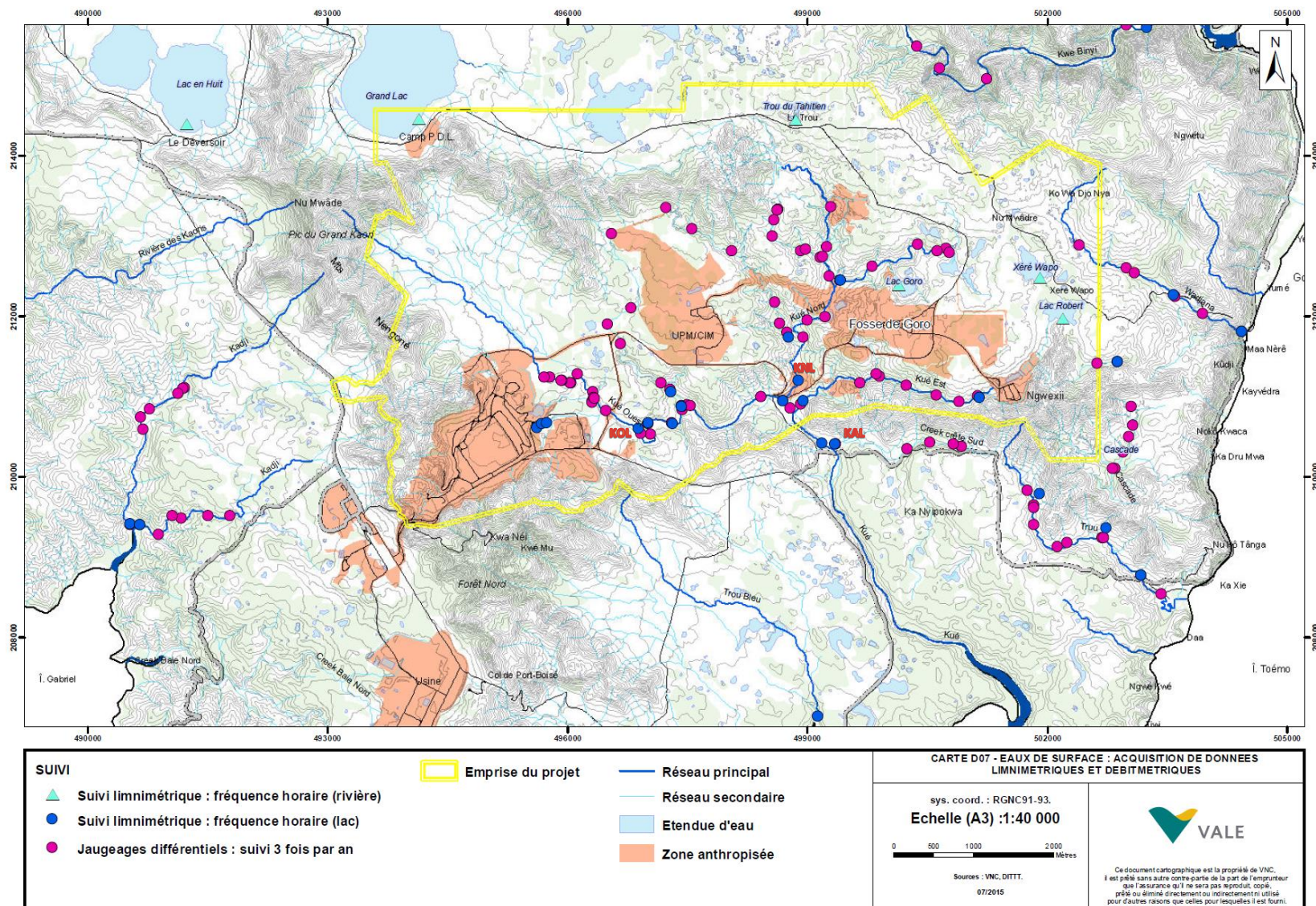


Figure 5. Carte du réseau de suivi quantitatif des eaux volontaire (Vale NC, 2014)

Tableau 3. Intégralité des stations de mesures hydrologiques volontaires en milieu lotique actuellement gérées par Vale NC

Nom	X_RGNC	Y_RGNC	Suivi	Suivi continu
Kwé Binyi	503247	215603	rivière sur section naturelle	OUI
Kwé Nord (KN18)	499411	212450	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
Déversoir_BSKN* (Kwé Nord ou KN14)	498885	211198	rivière sur déversoir rectangulaire	OUI
CPKE_05 (Kwé Est)	499067	211016	rivière sur seuil en V	OUI
CCS (Creek de la crête Sud)	499348	210409	rivière sur section naturelle	OUI
Entonnoir	502880	211428	rivière sur section naturelle	OUI
Radier_Truu	503174	208768	rivière sur section naturelle	OUI
Wajana_radier	503581	212268	rivière sur section naturelle	OUI
Wajana_tribu	504431	211804	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
Kadji1	490524	209403	rivière sur section naturelle	OUI
Kadji2	490645	209401	rivière sur section naturelle	OUI
Amont_Kwé ouest	497003	210666	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
Aval_Kwé ouest	497310	210662	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
Confluence_KO5-KO	497425	210876	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
Trou Bleu	499129	207012	rivière sur section naturelle	OUI
KOL (Kwé Ouest)	496889	210601	rivière sur section naturelle	OUI
KO-amont-conf-KN	498693	210945	rivière sur section naturelle	NON (jaugage mensuel uniquement)
KAL (Kwé principale)	499182	210420	rivière sur section naturelle	OUI
KO5	497291	211055	rivière sur seuil en V	OUI
KN1	498762	211739	rivière sur seuil en V	OUI

* la station Déversoir BSKN (Kwé Nord) s'appelle également KN14. Elle remplace la station KNL qui a été envoyée en 2008 avec la mise en service du BSKN

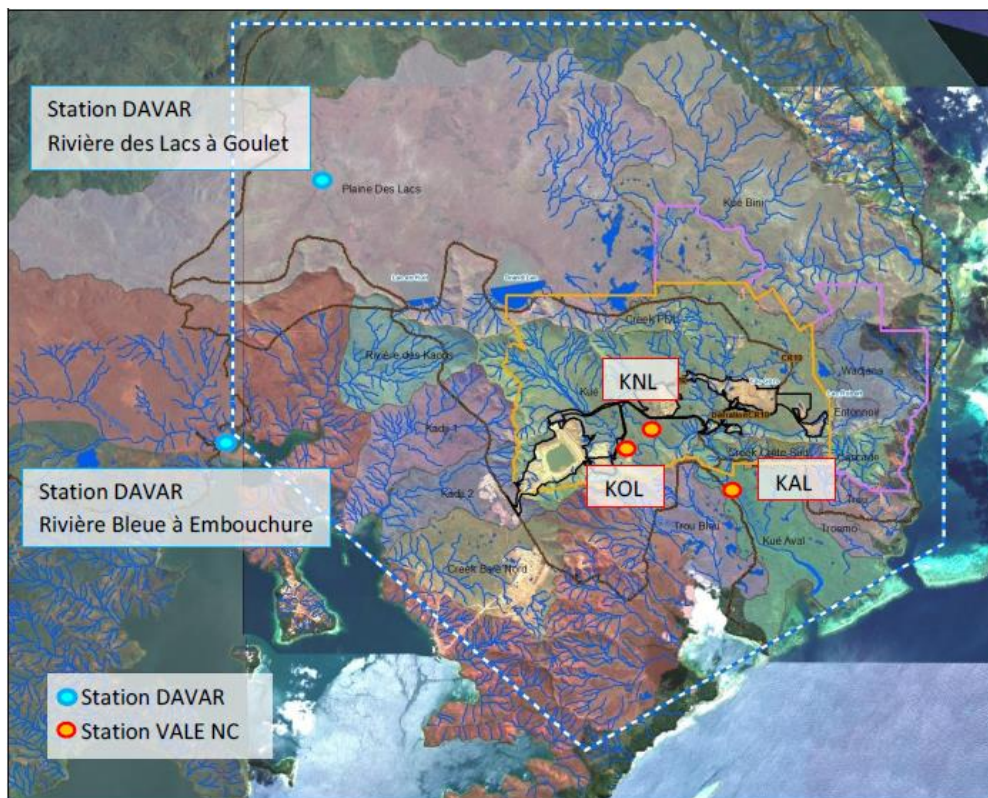


Figure 6. Stations de suivi hydrologique aux plus longues chroniques sur les bassins versant du site de Goro et ses alentours (DAEM 2014, Vale NC)

Parmi ces 15 stations, **3 stations** installées sur le bassin de la Kwé et sur ses principaux affluents présentent déjà des séries suffisamment significatives pour être intégrées en partie dans le suivi du régime. Il s'agit de la station KAL sur la Kué Principale, de la station KNL sur la Kué Nord (remplacée en 2008 par la station KN14) et de la station KOL sur la Kué Ouest. Les écoulements sur le site sont mesurés depuis 1995.

Les autres stations n'ont donc pas été positionnées pour un suivi chronique ou n'ont pas fonctionné de manière chronique (lacunes importantes) pour permettre de suivre de manière fiable le régime des cours d'eau au niveau des stations.

Dans le rapport GOLDER de 2011, il est fait référence à des chroniques de pluies au pas du ¼ d'heure. D'après les éléments présentés :

- la fréquence d'acquisition des hauteurs d'eau est horaire ;
- la fréquence de jaugeage / courbe de tarage est mensuelle.

Etant donnée la rapidité de montée d'eau ainsi que la toute aussi rapide décrue, il semble difficile de construire des hydrogrammes de crue fiables qui permettent par la suite d'apprécier le phénomène érosif. La mesure du suivi de l'érosion se basant sur une interpolation des hydrogrammes de crue, cette région soumise à des événements pluvieux parfois très brefs mais violents nécessite par conséquent des instruments précis sur un pas de temps plus court.

De surcroît, les mesures se font au micro-moulinet donc a priori en basses eaux. Cela laisserait entendre que peu ou pas de mesures sont faites pour les hautes eaux. Donc la courbe de tarage, même si elle est établie avec une erreur de 5%, ce qui est une valeur relativement optimiste, n'est surement pas bonne pour sa partie haute. Nous n'avons pas d'éléments à notre disposition pour savoir comment celle-ci été extrapolée.

Considérant toutes ces limites dans l'évaluation des écoulements, il nous paraît inadapté d'exploiter les jeux de données acquis jusqu'alors. Nous ne sommes donc pas en mesure de donner d'évolution des flux liquides.

Dans le même rapport, il est noté une bonne corrélation volume MeS et débit. En effet, pour obtenir un volume de MeS, on multiplie la concentration (mg/l) par le débit. Donc lorsque l'on compare le volume de MeS au débit, cela revient à faire une relation partiellement débit/débit. Néanmoins, il est notable que les montées de crue « nettoient » le fond des ravines et sont souvent beaucoup plus chargées que les décrues...

Implication pour le suivi :

Afin de s'abstenir de calibrages aussi fréquents, le réseau gagnerait à installer tous les limnimètres sur des sections fixes calibrées (ou de déversoirs de type Parshall) qui permettraient d'obtenir une mesure de débit bien plus fiable.

Cela permettrait en outre de se dispenser d'un ré-étalonnage après chaque crue qui modifierait les caractéristiques du cours d'eau au lieu du jaugeage, en utilisant des formules hydrauliques après un seul étalonnage initial.. Lorsque c'est possible, il faut installer le déversoir sur un seuil naturel existant, renforçant ainsi le contrôle hydraulique.

III.2.5. Suivi des paramètres physico-chimiques

Compartiment	Type de suivi	Physico-chimie de l'eau / Physico-chimie des sédiments
Eau/Qualité	Réglementaire	Qualité de l'eau : 23 stations. Paramètres ci-dessous. Fréquence d'acquisition hebdomadaire, mensuelle ou trimestrielle (cf. Annexe 2).
	Volontaire	Qualité de l'eau : 161 stations. Paramètres ci-dessous. Fréquence d'acquisition hebdomadaire, mensuelle ou trimestrielle (cf. Annexe 2).
Eau/Sédiment	Réglementaire	Qualité des sédiments : 10 stations. Teneur en métaux. Fréquence d'acquisition mensuelle (chimie) ou trimestrielle (granulométrie).

Surveillance des eaux superficielles

Parmi l'intégralité des stations existantes avec des jeux de données plus ou moins complets et bien géolocalisées dans le temps, **19 stations** ont été choisies pour le suivi physico-chimique des eaux de surface des bassins versants du Creek de la Baie Nord (CBN), de la Kwé Ouest (KO), de la Kwé Principale (KP), de la Kadji (KJ). Les différents points de suivi sont présentés dans les **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à Tableau 6.

Ces données ont permis de suivre la qualité de l'eau sur une grande partie du site et de construire le fond géochimique de la zone. Le réseau semble suffisamment dense et de fréquence appropriée pour un suivi qualitatif général. Les campagnes sont généralement réalisées de 88 à 100% selon les années.

Tableau 4. Localisation et description des points de suivi qualitatif des eaux de surface (Vale NC, 2012)

Nom	Bassin Versant	Type de suivi	Fréquence*	Raison d'être	RGNC 91 Est	RGNC 91 Nord
1-A	KP	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	499142	210447
1-E	KP	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	500042,1	208314,8
3-A	KO	Physico-chimique	M	Arrêté n°1466-2008/PS	495575	211479
3-B	KO	Physico-chimique	M	Arrêté n°1466-2008/PS	496478,1	210820,1
3-D	KO	Physico-chimique	S	Arrêté n°1466-2008/PS	495869	210942
3-E	KO	Physico-chimique	S	Arrêté n°1466-2008/PS	496393	210775
4-M	KN	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	498889,4	211632,5
4-N	KO	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	497415,6	210891,5
6-bnor1	CBN	Physico-chimique	S	Arrêté n°575-2008/PS	492084,5	207594,3
6-bnor2	CBN	Physico-chimique	S	Arrêté n°575-2008/PS	492050	207523
6-Q	CBN	Physico-chimique	M	Arrêté n°890-2007/PS Arrêté n°1467-2008/PS	492858,9	207678,4
6-R	CBN	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	696178	7528627
6-S	CBN	Physico-chimique	M	Arrêté n°1467-2008/PS	492808,9	207092,2
6-T	CBN	Physico-chimique	M	Arrêté n°890-2007/PS Arrêté n°1467-2008/PS	491882,1	207360,9
6-U	CBN	Physico-chimique	M	Arrêté n°890-2007/PS Arrêté n°1467-2008/PS	491517,2	207491,4
DOL-10	CBN	Physico-chimique	S	Arrêté N°11479-2009/PS	493380,6	208583,1-
DOL-11	KJ	Physico-chimique	S	Arrêté N°11479-2009/PS	493734,7	209166,3
WK 17	KO	Physico-chimique	H	Arrêté n°1466-2008/PS	495617,6	210613,3
WK 20	KO	Physico-chimique	H	Arrêté n°1466-2008/PS	495673,3	210663,6

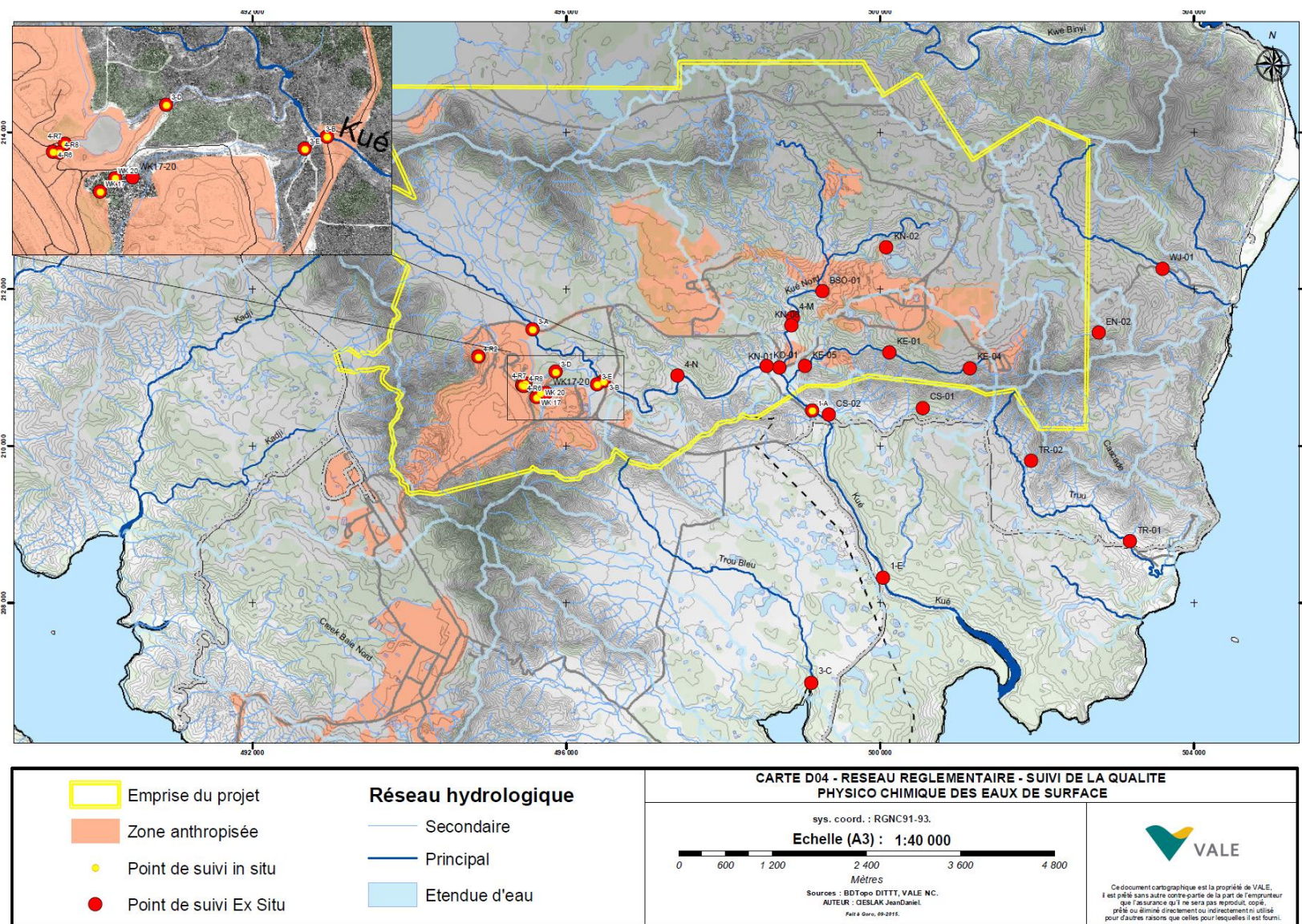


Figure 7. Carte du réseau de suivi réglementaire de la qualité physico-chimique des eaux de surface (Vale NC, 2015)

Tableau 5. Données disponibles pour le suivi des eaux de surface en 2011. (Vale NC, 2012) M : mensuel, S : semestriel, H : hebdomadaire, T : trimestriel, A : annuel.

Suivi	Qualité des eaux de surface			Nature et quantité des sédiments	
	M	S	H	M	T
Nombre de suivis préconisés dans les arrêtés	132	12	104	60	15
Nombre de suivis effectués	128	12	92	60	15
% de suivis effectués	97	100	88	100	100

Tableau 6. Valeurs moyennes rencontrées sur les réseaux de 2003 à 2012 (A2EP 2014a)

Paramètre	Eau superficielle (n = 50)				
	LQ (mg/L)	% de détection	Médiane (mg/L)	± étendue interquartile (mg/L)	Min-Max (mg/L)
Aluminium dissous	0.001	96	0.005	0.026	< 0.001 - 0.374
Ammonium dissous*	0.01	98	0.005	0	< 0.01 - 0.01
Calcium dissous	0.1	100	0.5	0.15	0.2 - 4.2
Carbonates	0.1	46	0.05	0.025	< 0.1 - 0.26
Chlorures dissous	0.1	100	10.2	1.1	6.5 - 13.4
Chrome dissous**	0.001	72	0.0055	0.006	< 0.001 - 0.037
Chrome VI**	0.005	34	0.0025	0.001	< 0.005 - 0.016
Fer dissous*	0.001	100	0.039	0.034	0.002 - 0.465
Fluorures dissous*	0.01	56	0.01	0.003	< 0.01 - 0.04
Hydrogénocarbonates	0.1	100	38.5	7.1	2.4 - 57.8
Hydroxydes	0.0017	8	0.0065	0.0026	0.0009 - 0.0389
Magnésium dissous	0.01	100	8.39	1.87	0.72 - 13.87
Manganèse dissous*	0.001	62	0.001	0.002	< 0.001 - 0.169
Nitrates dissous*	0.1	76	0.2	0.1	< 0.1 - 0.9
Nitrites dissous*	0.01	2	0.005	0.0	≤ 0.01
Phosphates dissous*	0.1	2	0.05	0.0	≤ 0.1
Potassium dissous	0.05	92	0.15	0.05	< 0.05 - 0.44
Silice dissous	0.1	94	4.0	1.9	< 0.1 - 8.0
Sodium dissous	0.01	100	5.74	0.62	4.08 - 9.33
Sulfates dissous	0.1	100	2.2	0.6	0.5 - 10.7
Conductivité	-	-	100.7	19.9	36.1 - 144.1
pH	-	-	7.61	0.17	5.67 - 8.36

Implication pour le suivi :

Ce réseau de mesure présente donc une configuration satisfaisante en termes d'acquisition de données. De surcroît, aucune interprétation ne semble être réalisée dans le sens du suivi de l'érosion.

Surveillance des sédiments

Au total, **10 stations** ont été définies pour le suivi de la nature et partiellement de la quantité des sédiments des bassins versants du Creek de la Baie Nord et de la Kwé. Les différents points de suivi sont présentés dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

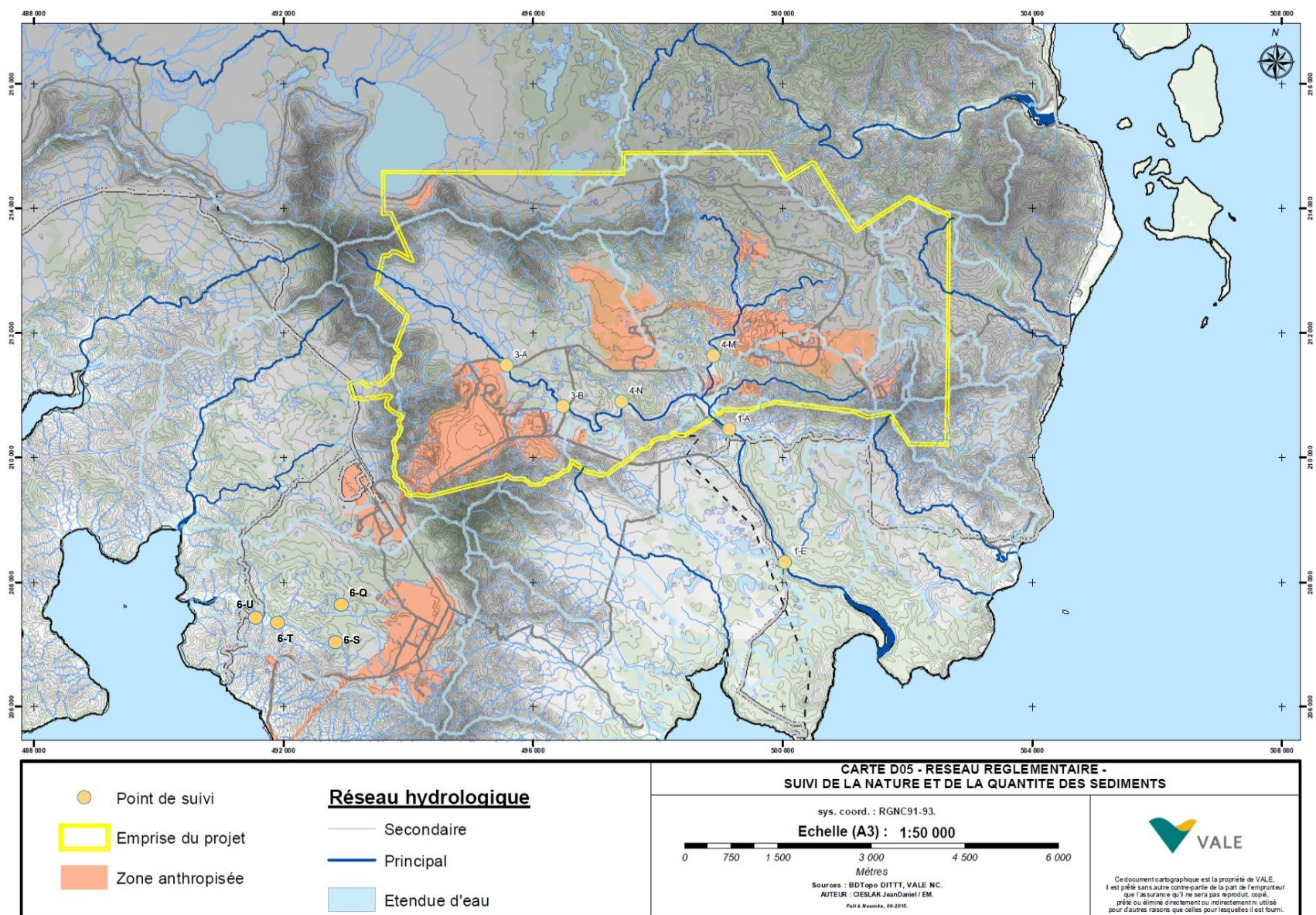


Figure 8. Carte du suivi de la nature et de la quantité de sédiment - Réseau réglementaire (Vale NC, 2015)

Tableau 7. Localisation et description des points de suivi de la nature et de la quantité des sédiments (DAEM 2014, Vale NC)

Nom	Bassin Versant	Type de suivi	Fréquence*	Raison d'être	RGNC 91 Est	RGNC 91 Nord
6-T	CBN	Sédiments	M	Arrêté n°890-2007/PS	491882,1	207360,9
6-U	CBN	Sédiments	M	Arrêté n°890-2007/PS	491517,2	207491,4
6-Q	CBN	Sédiments	M	Arrêté n°890-2007/PS Arrêté n°1467-2008/PS	492859	207678,4
6-S	CBN	Sédiments	T	Arrêté n°1467-2008/PS	492808,9	207092,2
4-M	KN	Sédiments	T	Arrêté n°1467-2008/PS	498889,4	211632,5
4-N	KO	Sédiments	T	Arrêté n°1467-2008/PS	497415,6	210891,5
1-A	KP	Sédiments	T	Arrêté n°1467-2008/PS	499142	210447
1-E	KP	Sédiments	T	Arrêté n°1467-2008/PS	500042,1	208314,8
3-A	KO	Sédiments	M	Arrêté n°1466-2008/PS	495575	211479
3-B	KO	Sédiments	M	Arrêté n°1466-2008/PS	496478,1	210820,1

Les paramètres mesurés sont :

- analyse granulométrique ;
- métaux : arsenic, cadmium, cobalt, chrome, chrome VI, manganèse, nickel, plomb, zinc ;
- matières sèches.

En termes de qualité des sédiments, aucune interprétation des données n'a été transmise à ce jour. L'évolution de la qualité des sédiments est donc inconnue et n'apporte pas d'information sur l'érosion en raison du mode de prélèvement : prélèvement des sédiments dans les mouilles, hors des événements érosifs majeurs. Si un tel mode opératoire révèle un intérêt pour la connaissance de la nature sédimentaire (teneur en métaux) et le suivi de pollutions qui peuvent subvenir (modifications de la teneur en certains métaux, enrichissement en nutriments, etc.), il ne présente aucun intérêt dans le cadre du suivi de l'érosion.

Seule la granulométrie a été relativement bien étudiée mais elle ne permet pas d'interpréter le comportement érosif.

Implication pour le suivi :

Ce suivi de la qualité physico-chimique sédimentaire recèle un potentiel d'information qui semble fortement inexploité à l'heure actuelle si on considère uniquement la phase mise en suspension lors des événements pluvieux. Différents rapports physico-chimiques en lien avec la nature des substrats géologiques sont à même de donner une information pertinente sur la dynamique de l'érosion et l'origine de celle-ci.

Plusieurs paramètres peuvent être interprétés, tels que :

- La teneur en carbone des sédiments érodés
- La teneur en magnésium
- Le rapport entre le fer et l'aluminium
- Le rapport entre la silice et le fer
- Le rapport entre le magnésium et le fer
- Le rapport entre le magnésium et le calcium
- Les teneurs en nickel, cobalt et manganèse

Tous ces paramètres permettent de réaliser une cartographie plus précise de l'érodibilité et des taux d'exportation à rapprocher de la couverture géologique et pédologique. Ils sont donc à exploiter de manière diachronique et synchronique. Il faut donc croiser les couches : topographie, sol, couvert végétal et état de surface (compacté ou pas, déblais, etc.) avec la géochimie pour chaque bassin versant.

A noter également que de récents travaux semblent entériner le fait que dans ce type de terrain et dans les régions bioclimatiques équivalentes, l'analyse de la granulométrie ne permet pas de distinguer l'origine des sédiments en cours d'eau. Ces analyses ne semblent pas présenter d'intérêt évident pour cette problématique.

III.2.6. Suivi quantitatif du transport solide

Compartiment	Type de suivi	Transport solide
Eau/Hydrologie	Réglementaire	Néant
	Volontaire	Suivi de la turbidité asservie aux évènements pluvieux turbides (supérieur à 50 NTU) sur 3 stations.

Les données disponibles montrent que le suivi mis en place ne porte que sur la qualité des sédiments et **aucun suivi réglementaire ne porte sur la quantification du transport solide**. La démarche mise en œuvre au niveau des stations KAL/KOL/KNL a été menée en réponse à une demande spécifique des autorités coutumières qui nourrissaient des craintes concernant l'envasement de la baie Kwé. C'est donc un réseau volontaire qui porte sur 3 stations uniquement.

Chacune d'entre elles est équipée de préleveurs automatiques asservis à la turbidité. Ainsi pour chaque évènement générant une turbidité supérieure à 50 NTU, le prélèvement se déclenche toutes les heures pendant 10 heures, puis toutes les 3 heures. En parallèle la mise en action ou en pause du matériel de prélèvement génère une alerte SMS auprès des techniciens qui sont en mesure d'intervenir sur place pour s'assurer de la bonne marche du matériel et du transport des flacons vers un laboratoire.



Photographie 1. Piège à sédiment sur la Kwé Est. Site de Vale NC (Asconit, 2014)

Il apparaît que ces mesures sont disponibles depuis 2007 (sur la station KAL) mais réellement exploitables depuis 2008. La complétude des chroniques est d'environ 80%. Chaque turbidimètre est calibré de manière mensuelle. La calibration consiste en une vérification visuelle du matériel et d'une mesure en doublon. La différence entre le suivi ponctuel et le suivi en ligne ne doit pas excéder 5%. Dans le cas contraire, le matériel fait l'objet d'un diagnostic plus poussé.

Il semble illusoire de vouloir quantifier des flux de sédiments avec des prélèvements horaires (puis toutes les 3h). Les documents à disposition ne donnent pas clairement les durées de crue, mais le pic de

crue dure généralement moins de 3 heures alors que c'est le phénomène qui génère le plus important phénomène érosif. Il faut donc forcément réduire l'intervalle de capture.

Le charriage ne fait l'objet d'aucun suivi à l'heure actuelle. Un piège à sédiment est installé sur le bassin de la Kwé Est (Photographie 1) mais il n'est ni suivi ni entretenu (donc totalement comblé depuis des années).

Considérant toutes ces limites dans l'évaluation du transport sédimentaire, il nous paraît inadapté d'exploiter les jeux de données acquis jusqu'alors. Nous ne sommes donc pas en mesure de donner d'évolution des flux sédimentaires.

Implication pour le suivi :

Ce réseau est très insuffisant pour assurer un bon suivi des MES et de leur devenir. Il faudrait notamment se mettre plus en amont, si possible sur des types de sols distincts (Tableau 25).

*Si le bassin versant de la Kwé, notamment la Kwé Nord, abrite à ce jour une grande partie des activités génératrices d'érosion, il ne couvre pas l'intégralité du site de Goro et **il est nécessaire d'équiper également le Creek de la Baie Nord.***

Seuls quelques événements ont un réel impact en termes de charriage et de transport de matériaux. Il est quasi impossible de les prévoir et donc de les suivre. L'idéal serait de pouvoir les équiper de déversoirs et de pièges à sédiments. Les pièges à sédiments sont très lourds à gérer car ils sont vite pleins et il faut les curer ce qui entraîne un coût et des difficultés techniques souvent handicapantes pour les exploitants.

Le charriage ne peut donc pas faire l'objet d'un suivi systématisé à haute fréquence. Cependant, il peut faire l'objet d'évaluations ponctuelles (développées dans la partie suivante).

III.2.7. Suivi des indicateurs biologiques

Compartiment	Type de suivi	Indicateurs biologiques
Hydrobiologie	Réglementaire	Suivi de l'IBNC/IBS sur 18 stations (fréquence d'acquisition annuelle, semestrielle, trimestrielle) Suivi de l'ichtyofaune et de la carcinofaune sur 6 stations pour la Kwé, 6 stations sur Creek Baie Nord (fréquence d'acquisition semestrielle) et 9 stations sur cours d'eau autres (cf. Annexe 3)
	Volontaire	Suivi de l'IBNC/IBS sur 2 stations (fréquence d'acquisition annuelle, semestrielle, trimestrielle) Suivi de l'ichtyofaune et de la carcinofaune sur 6 stations (fréquence d'acquisition annuelle ou événementielle)

Tableau 8. Données disponibles pour le suivi des eaux de surface en 2011. (Vale NC, 2012) M : mensuel, S : semestriel, T : trimestriel, A : annuel.

Suivi	IBNC	Suivi de la faune ichtyologique	Suivi de la faune dulcicole des dolines

	T	S	A	S	A
Nombre de suivis préconisés dans les arrêtés	3	6	5	11	2
Nombre de suivis effectués	3	6	5	11	2
% de suivis effectués	100	100	100	100	100

Le réseau de suivi hydrobiologique a subi de nombreuses modifications au cours de la dernière décennie. Les stations et fréquences d'échantillonnage sont variables mais le réseau actuel comprend 18 stations échantillonnées 2 à 4 fois par an.

La méthode d'échantillonnage utilisée est celle décrite dans le Guide méthodologique et technique de l'indice biotique de la Nouvelle-Calédonie (IBNC) et de l'Indice BioSédimentaire (IBS) édité par la DAVAR en 2012 et tout récemment amélioré (2015).

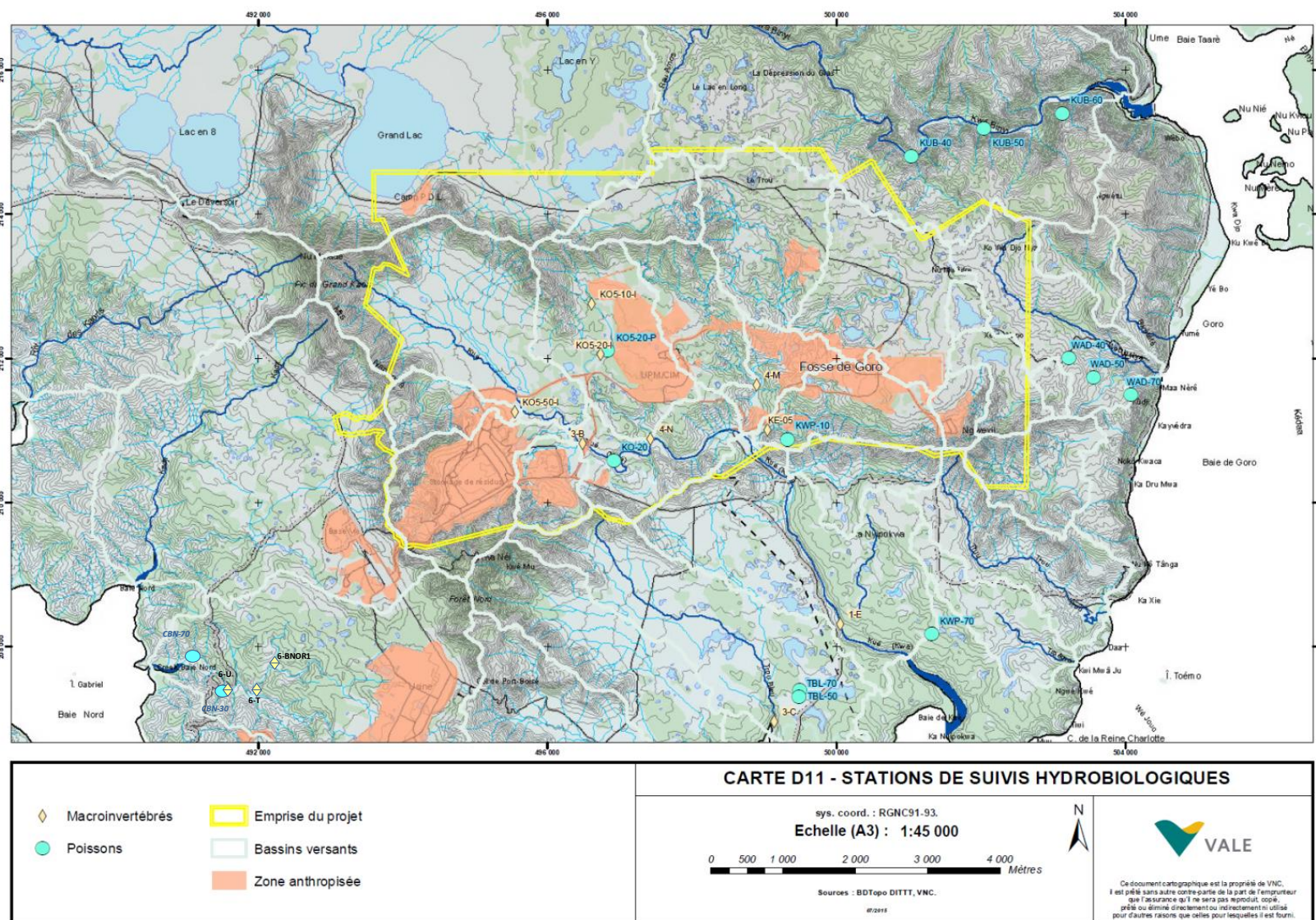


Figure 9. Carte des stations de suivis hydrobiologiques (Vale NC, 2015)

L'IBS est la méthode indicielle définie pour traduire spécifiquement les pressions causées par les perturbations liées à l'érosion des sols ultramafiques (<http://www.oeil.nc/cdrn/index.php/resource/bibliographie/view/9744>). Une analyse des résultats obtenus pour cet indice depuis 2000 est présenté ci-après au sein du bassin versant de la Kwé uniquement (cf. Tableau 9). En effet, le creek Baie Nord n'a pas été considéré dans cette analyse car ce dernier a subi de nombreuses pressions différentes qui ont influencé les résultats de l'indice. D'autre part, même si en phase de travaux des modifications du transport solide ont pu survenir, depuis la fin de cette phase (2007), l'érosion n'est plus la pression majeure altérant la qualité des eaux de ce creek. Les pollutions d'ordre chimique (rejets nutriments et rejets accidentels de solutions acides), sont les principaux facteurs d'altération qui influencent fortement les résultats des indicateurs de suivi ces dernières années.

Pour le bassin versant de la Kwé, on constate les faits suivants :

- La qualité indiquée par l'IBS au sein de la Kwé Ouest (station KOUE100 (Davar) = 3-B (Vale-NC)), oscillait entre un état passable et mauvais avant l'entrée en construction du site minier, cet état a fluctué autour de ces valeurs par la suite avec une remontée en 2011. Au niveau de la station 4-N localisée sur un affluent de la Kwé Ouest, les valeurs de cet indice ont également oscillé entre passables et mauvaises
- Au niveau de la Kwé Nord, les valeurs de l'IBS oscillent entre passables et bonnes
- Au niveau de la Kwé aval (station KOUE300 (Davar) = station 1-E (Vale-NC)), l'indice IBS indiquait d'ores et déjà une qualité mauvaise à très mauvaise avant l'entrée en construction du site minier, cet état oscille autour d'une valeur moyenne mauvaise par la suite.

Tableau 9. Evolution de la note IBS au droit du réseau de suivi du bassin versant de la Kwé (source : Vale NC, Davar et OEIL).

Bassin versant	Station	Date	IBS	Classe de qualité IBS	Moyenne annuelle	Classe de qualité moyenne
Kwé Ouest	KOUE100	26/10/00	4,56	mauvaise	4,56	mauvaise
	KOUE100	20/09/01	5,29	passable	5,29	passable
	KOUE100	16/07/02	4,75	mauvaise	4,75	mauvaise
	3_B	10/10/07	5,67	passable	5,67	passable
	3_B	05/05/09	4,57	mauvaise	4,555	mauvaise
	3_B	16/11/09	4,54	mauvaise		
	3_B	23/06/10	5,08	passable	5,08	passable
	3_B	27/07/11	6,44	bonne	6,165	bonne
	3_B	22/11/11	5,89	bonne		
	3_B	19/06/12	5,33	passable	5,33	passable
	3_B	18/01/13	5,1	passable	5,3	passable
	3_B	18/01/13	5,1	passable		
	3_B	05/06/13	5,7	bonne		
	3_B	07/01/14	5,33	passable	5,33	passable
	3_B	08/06/14		mauvaise		mauvaise
	4_N	10/10/07	4,88	mauvaise	4,88	mauvaise
	4_N	31/01/08	5,3	passable	5,4	passable
	4_N	08/10/08	5,5	passable		
	4_N	05/06/13	4,57	mauvaise	4,57	mauvaise
	Moy 2007				5,275	passable
	Moy 2008				5,4	passable

	Moy 2013				4,935	mauvaise
Kwé Nord	4_M	10/10/07	5,43	passable	5,43	passable
	4_M	08/10/08	5,38	passable	5,38	passable
	4_M	05/06/13	5,86	bonne	5,86	bonne
Kwé principal	KOUE300	26/10/00	4,43	mauvaise	4,43	mauvaise
	KOUE300	20/09/01	3,75	très mauvaise	3,75	très mauvaise
	1_E	03/08/06	4,29	mauvaise	4,685	mauvaise
	1_E	20/12/06	5,08	passable		
	1_E	28/03/07	4,71	mauvaise	4,915	mauvaise
	1_E	15/08/07	5,12	passable		
	1_E	07/10/08	5,1	passable	5,1	passable
	1_E	16/11/09	4,5	mauvaise	4,5	mauvaise
	1_E	22/06/10	4,85	mauvaise	4,85	mauvaise
	1_E	22/11/11	4,45	mauvaise	4,45	mauvaise
	1_E	22/11/11	3,86	très mauvaise	3,86	très mauvaise
	1_E	15/06/12	5,5	passable	5,5	passable
	1_E	15/01/13	4	très mauvaise	4,07	très mauvaise
	1_E	04/06/13	4,14	très mauvaise		
	1_E	15/01/13	5,25	passable	4,125	très mauvaise
	1_E	04/06/13	3	très mauvaise		
	1_E	05/06/14		mauvaise		mauvaise

Pour les stations pour lesquelles nous disposons de données au début des années 2000, nous pouvons constater qu'aucune évolution de l'état des communautés benthiques n'est observée entre 2000 et 2013. Si nous nous basons sur le postulat que l'IBS est censé retranscrire la présence d'une évolution du processus de sédimentation, celle-ci ne semble pas avoir évolué depuis 2000 au sein de ce bassin. Sur les bases de ce seul indicateur il est donc difficile de conclure sur une éventuelle modification du transport solide au sein de ce bassin suite à l'entrée en construction du site minier (2006) et au début de l'exploitation de la mine.

Il est cependant notable qu'une partie des notes indicielles utilisées ne sont pas toutes validées en raison d'un nombre de taxa trop faible. Il ressort de cette analyse qu'aucune tendance générale en termes de comportement érosif sur la zone ne peut être dégagée sur la base de ces outils.

Les communautés piscicoles sont également suivies sur le bassin de la Kwé. Ce compartiment biologique, s'il est altéré par les modifications du transport solide, n'a pas fait l'objet de développement d'outil de biomonitoring dédié au suivi de la sédimentation. En effet, ce modèle est surtout utilisé comme biomarqueurs d'effet toxique des particules polluantes contenues dans les sédiments, mais pas comme marqueurs des altérations liées directement à ces sédiments.

Pour le bassin de la Kwé, l'analyse comparative des communautés piscicoles menée sur la base des données de 2012, nous permet de constater que globalement ce bassin abrite une population de poissons aussi riche (N = 16) que celles observées au niveau des différents cours d'eau pouvant être pris pour référence (Carénage, Kaori). Le nombre d'espèces endémiques et protégées est sensiblement le même (N = 3 et N = 1 respectivement). La seule différence notable réside dans l'écart observé entre la

densité en poisson des parties basses de la Kwé (estuaire et cours inférieurs) et celles des creeks de référence (Carénage, Trou Bleu, Wadjana). Il semblerait que cette partie du bassin versant présente des conditions d'habitabilité dégradées, limitant l'abondance des différentes espèces. Cette dégradation de la partie aval n'empêche cependant pas la colonisation des parties amont (cours moyen) de la Kwé Ouest qui présente des densités tout à fait comparables à celles observées sur les cours d'eau de référence (29 ind/ha).

III.2.8. Conclusions pour le milieu terrestre

La surveillance actuelle, notamment celle des eaux superficielles et de l'hydrologie, ne permet pas de couvrir de manière pertinente le site. De même, l'instrumentation de certaines stations semble présenter quelques défaillances, notamment pour l'hydrométrie et le suivi du transport solide (stations équipées trop peu nombreuses et décanteurs parfois en limite d'utilisation).

Par ailleurs, aucun suivi n'est actuellement mis en œuvre à l'échelle des sols. Il ressort d'une manière générale que les études et rapports analysés ne permettent pas de construire une vision pertinente du suivi des forçages et des pressions subis par ce compartiment dans la zone du projet minier de Vale NC (seulement 2 rapports traitants des aspects pédologiques pour ce site).

Les informations sont disparates, non chiffrées, et aucun référentiel « Etat Initial » n'est disponible pour les données physiques concernant le sol et le transport solide sur des zones de référence (Etude d'impact).

Des études récentes donnent une vision de ce que pourrait être l'état initial sur le plan cartographique : surfaces nues, en végétation, cours d'eau, pentes, bassin versant (Vale NC - Etude BlueCham - 2012; OEIL et ROUETIS R&D - 2012), avec des données chiffrées qui seront utilisables dans le cadre d'un suivi pluriannuel.

L'étude Landloch Pty Ltd (2004) donne des pistes importantes pour réguler les transports des sédiments et également pointe le problème concernant les conditions de floculation de ces sols atypiques. Les quantités de matière transportées et sédimentées sont directement proportionnelles à l'érosion des sols (types de surfaces dénudées) ce qui en fait un bon indicateur de l'érodibilité. Elle surestime probablement l'érodibilité sur forte pente ainsi que les volumes de sols concernés (la densité apparente de ces sols est très élevée ; les mesures d'érosion étant pondérales, les volumes concernés sont plus faibles que pour la majorité des sols existant à travers le monde).

Il apparaît donc un manque significatif dans le suivi des forçages et des pressions sur les sols.

III.3. Surveillance du milieu marin

III.3.1. Préambule

En termes de suivi physico-chimique, les données IRD datant de 2006 sont réputées servir d'état des lieux. Elles sont appuyées par les données du rapport d'état initial (RESCAN, 2004). Il est à noter que la chronologie de construction et mise en service des principaux aménagements miniers place bien un début de perturbations potentielles sur la période 2005/2006 et une entrée en fonctionnement plus intense en 2008. En cela, les données antérieures à 2005 peuvent servir d'état de référence « peu influencé » pour le milieu marin.

Au lancement des différentes études, le réseau de mesure était peu fiable avec des stations de suivi qui n'étaient pas systématiquement réutilisées d'une étude à une autre. Depuis 2007 au moins, le réseau de mesure pour l'analyse de la qualité des sédiments marins a été fiabilisé avec une série de stations pérennes qui sont reprises entre tous les rapports, ainsi qu'un programme pluriannuel de prélèvements qui est détaillé dans le plan de surveillance des milieux marins de 2007 de la société Goro-Nickel.

La surveillance du milieu marin est réalisée depuis 2007 selon les prescriptions réglementaires des arrêtés d'autorisation d'exploiter (port et usine) et de la convention fixant les modalités de mise en œuvre de la démarche pour la conservation de la biodiversité entre la province Sud et Vale NC. Cette surveillance s'effectue sur la base de quatre groupes d'indicateurs physico-chimiques et biologiques, à savoir :

- Qualité physico-chimique de l'eau de mer ;
- Qualité physico-chimique des sédiments marins ;
- Suivi de la sédimentation et flux sédimentaires, qui influe directement sur les 2 précédents ;
- Qualité biologique du milieu marin, intégratrice de la qualité des 3 précédents compartiments.

La Figure 10 présente les stations suivies dans le cadre du suivi actuel.

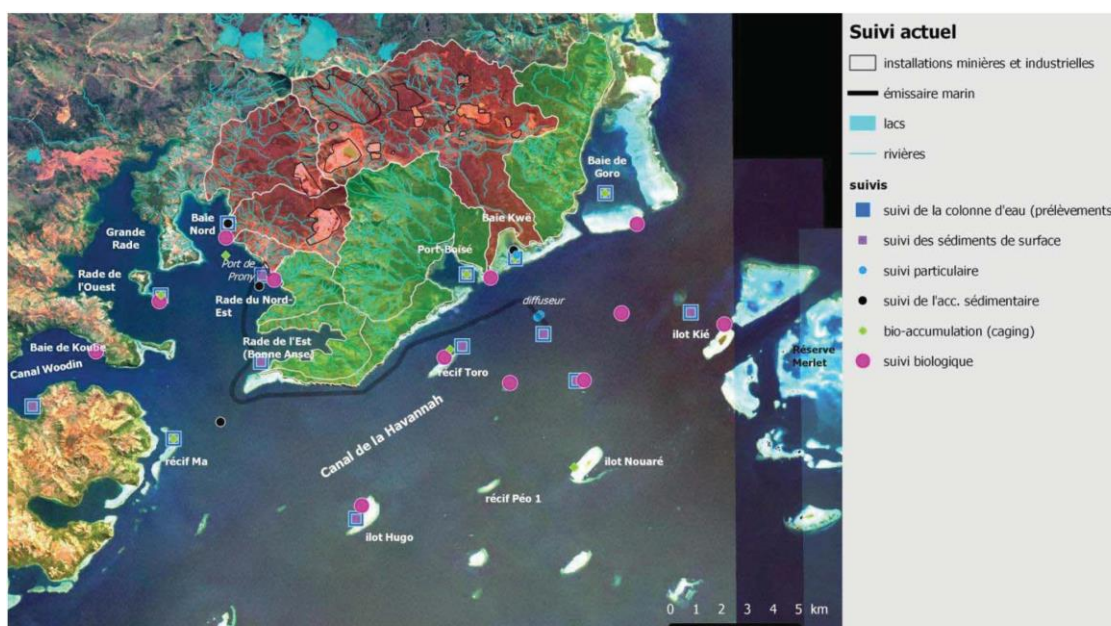


Figure 10. Carte des suivis marins actuels sur la zone d'influence de Vale NC (Melanopus et Dexen, 2015)

III.3.2. Qualité physico-chimique de l'eau de mer

Compartiment	Type de suivi	Physico-chimie de la colonne d'eau
Qualité physico-chimique de l'eau de mer	Réglementaire	Prélèvements d'eau et sonde multiparamètres : 14 stations en suivi semestriel dont 2 stations dans la baie du Prony en suivi trimestriel. - Mesures des concentrations en métaux dissous, en éléments majeurs, en nutriments, en carbonates et en MES - Mesure sur la colonne d'eau du pH, température, turbidité et fluorescence sur la colonne d'eau - Mesures des Hydrocarbures totaux sur 2 stations de la baie du Prony <u>Caging</u> : 8 stations / 1 campagne de 3 mois chaque année. Mesures des concentrations en métaux dans les tissus mous de bivalves transplantés.
	Volontaire	

Points de surveillance de la qualité des eaux marines : paramètres physico-chimiques de l'eau et structure de la colonne d'eau (St)

Le Tableau 10 et la Figure 11 permettent de localiser les stations sur le périmètre d'étude.

Tableau 10: Localisation géographique des 14 stations de prélèvement d'eau, référentiel WGS-84.

Localisation	Station	Longitude E	Latitude S	Profondeur (m)
Basse Chambeyron	St2	167° 00,506	22° 23,599	33
Baie Port Boisé	St3	166° 58,010	22° 21,190	29
Ilot Kié	St5	167° 03,100	22° 22,050	34
Récif de la Baie Kwé	St6	166° 59,112	22° 20,830	20
Récif Ioro	St7	166° 57,910	22° 22,820	41
Canal de la Havannah	St9	166° 59,754	22° 22,540	47
Pointe Nord du récif Ma	St13	166° 51,354	22° 24,914	35
Port de Goro	St14	167° 01,160	22° 19,350	37
Prony Creek Baie Nord	St15	166° 52,590	22° 20,037	25
Prony Wharf	St16	166° 53,365	22° 21,210	44
Prony Ilot Casy	St18	166° 51,061	22° 21,668	26
Rade de l'Est	St19	166° 53,340	22° 23,170	38
Baie Iré	St20	166° 48,150	22° 24,180	25
Ilot Ugo	St21	166°55,501	22°26,728	36

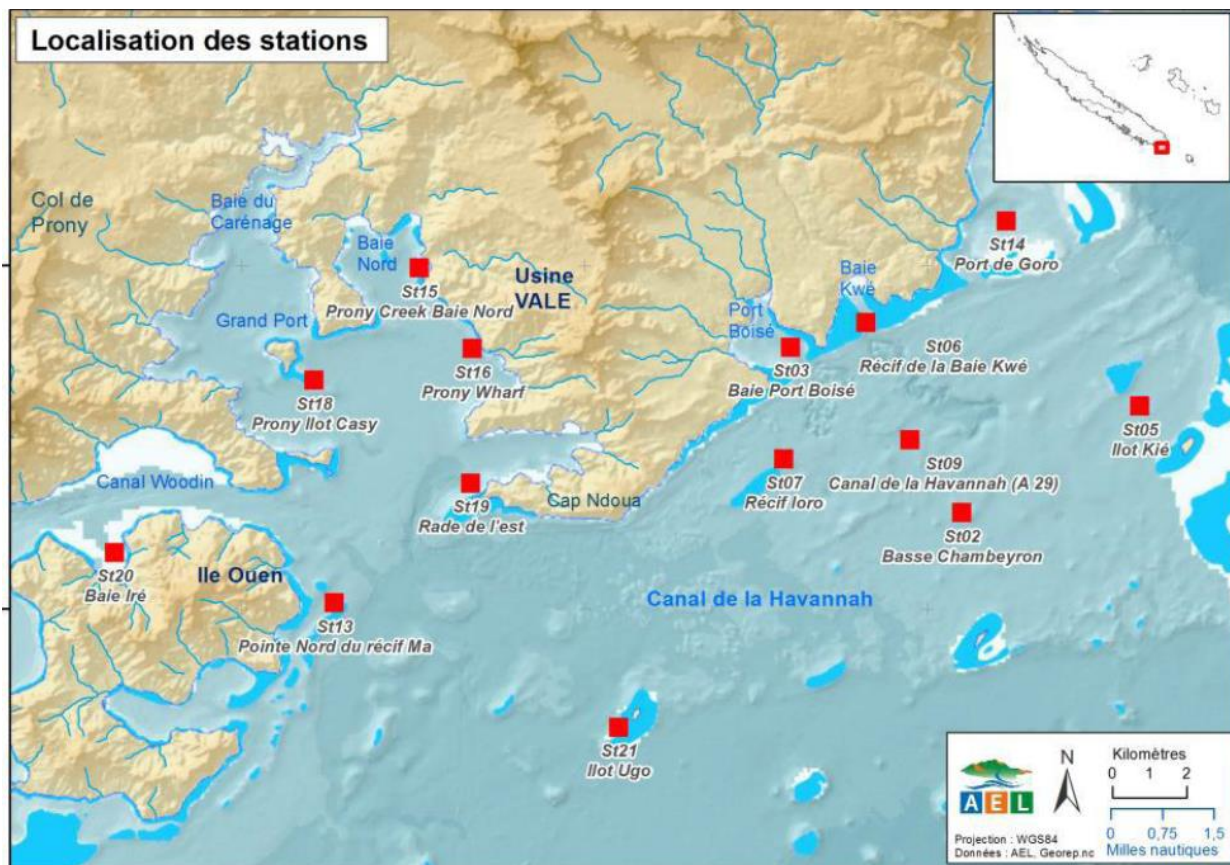


Figure 11. Localisation géographique des stations de prélèvement et mesure de l'eau (Vale NC, 2013).

Le Tableau 11 inventorie les différents paramètres analysés sur la matrice « eau de mer ».

Tableau 11: Paramètres analysés dans le cadre du suivi physicochimique de la qualité de l'eau de mer
Paramètres mesurés sur les profils physico-chimiques (Melanopus & Dexen 2015)

PROFIL							
Paramètres	Echantillonnage terrain	Nbre échantillons	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification (résolution)	Nombre d'analyses acquisition
température	profil	1 acquisition / 25cm	Sonde CTD – capteurs de température	-	non précisé	-5 à 35°C (0.0001)	1
salinité	profil	1 acquisition / 25cm	Sonde CTD - mesure de la conductivité	-	non précisé	0 à 9 s.m ⁻¹ (0.0007)	1
fluorescence	profil	1 acquisition / 25cm	Sonde CTD – capteurs Wet labs	-	non précisé	0 à 50 mg/m ³ (0.025)	1
turbidité	profil	1 acquisition / 25cm	Sonde CTD – mesure de la néphélométrie (NTU)	-	non précisé	0 à 25 NTU (0.01)	1

Paramètres mesurés dans les échantillons d'eau (éléments majeurs, MES, sels nutritifs, hydrocarbures)

ELEMENTS MAJEURS, pH, MES							
Paramètres	Échantillonnage terrain	Nbre échantillons par profondeur	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses par échantillon
pH	Prélèvement à trois profondeurs (quantité non précisée)	1	Bouteille Niskin®	pHmètre WTW	non précisé	0.01 UpH	1
MES				Filtration et pesée du filtre (Nucleopore porosité 0,45µm)	non précisé	0.1 mg/L	1
K ⁺				ICP-OES directe	non précisé	0.050 µg/L	1
Mg ²⁺					non précisé	0.050 µg/L	1
Na ⁺					non précisé	0.050 µg/L	1
Ca ²⁺							
Cl				Chromatographie ionique capillaire (Waters, CIA)	non précisé	0.050 µg/L	1
SO ₄ ²⁻							
Carbonates			Bouteille Niskin® puis PEHD et observation à 4°C	Dosage potentiométrique de l'alcalinité totale	Anderson & Robinson 1946	0.050 µg/L	1
SELS NUTRITIFS							
Paramètres	Échantillonnage terrain	Nbre échantillons par profondeur	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses par échantillon
Ammonium (NH4 ⁺)	Prélèvement à trois profondeurs (quantité non précisée)	3	Bouteille Niskin® puis conditionnement en verre borosilicaté	Dosage par réactif et mesure fluorométrique	Holmes et al. 1999	1.5 nmol/L	1
Nitrates (NO3+NO2)			Bouteille Niskin® puis PEHD et stockage à temp. ambiante	Auto-analyseur Bran & Luegbbe	Oudot & Montel 1988	0.02 µmol/L	1
Phosphates (PO ₄ ³⁻)					Murphy et Riley, 1962	0.01 µmol/L	1
Silicates (SiO ₄)			Bouteille Niskin® puis PEHD et stockage congelé à -20°C		Fanning et Pilson 1973	0.05 µmol/L	1
Azote Organique Dissous (NOD)		non précisé			0.13 µmol/L	1	
Phosphore Organique Dissous (POD)		non précisé			0.01 µmol/L	1	
Azote particulaire (NOP)		Raimbault et al. 1990			0.13 µmol/L	1	
Phosphore particulaire (POP)		Raimbault et al. 1990			0.01 µmol/L	1	
Carbone particulaire (COP)		1	Bouteille Niskin® puis PEHD ambré, filtres Whatman (porosité 0,7µm) congelés à -20°C	Analyseur CHN (IRD Dakar)	non précisé	non précisé	1
Chlorophylle et phéopigments				Fluorimètre Turner design 700	Lorenzen 1966	10 ng/L	1
HYDROCARBURES							
Paramètres	Échantillonnage terrain	Nbre échantillons par profondeur	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses par échantillon
Hydrocarbures totaux	Prélèvement à trois profondeurs (quantité non précisée)	1	Bouteille Go-Flo puis flacons de verre	Chromatographie gazeuse (GC/FID)	Norme NF T90-203 ou DIN EN ISO 9377-2	0.1 mg/L	

Paramètres mesurés dans les échantillons d'eau (métaux dissous)

METAUX							
Paramètres	Échantillonnage terrain	Nbre échantillons par profondeur	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre de mesures par échantillon
Cr/Cr(VI)	Prélèvement à trois profondeurs (quantité non précisée)	3	Bouteille Go-Flo Metal-Free puis filtre 0.45µm	Electrochimie (Voltampérométrie)	non précisé	0.030 µg/L	1 ⁷⁴
As				ICP-MS	non précisé	0.500 µg/L	
Cd						0.200 µg/L	
Pb						0.200 µg/L	
Ni			Bouteille Go-Flo Metal-Free, puis filtre 0.45µm puis préconcentration sur résines cationiques	Elution + ICP OES	Moreton et al. 2009	0.012 µg/L	
Co						0.012 µg/L	
Mn						0.011 µg/L	
Fe						0.011 µg/L	
Cu						0.015 µg/L	
Zn						0.015 µg/L	

Les données disponibles actuellement ont été acquises d'août 2008 à mars 2013 sur la qualité de l'eau.

Profil de la colonne d'eau

Les profils verticaux de la colonne d'eau de mer mettent en évidence les stations influencées par les apports d'eaux douces des creeks de la Baie du Prony (St15, St16, voire St18 à Casy), et des rivières des baies avec la station Kwé (St06) et de celle de Port Boisé (St03). Les profils permettent également de distinguer les stations influencées par les masses d'eaux océaniques telles que les stations St02 et St05 dont les variables physico-chimiques sont remarquablement stables au sein de la colonne d'eau. En effet, dans le Canal de la Havannah, d'importants brassages verticaux des couches d'eaux ont lieu. Les stations les plus proches de la zone de rejet de l'effluent n'enregistrent aucune modification dans la structure verticale de leur colonne d'eau. Ces résultats sont cohérents avec les études et modélisations de l'hydrodynamisme dans le canal de la Havannah et en baie du Prony.

Eléments majeurs, sels nutritifs

En 2013, Aucune embouchure de creek ne montre une concentration en MES élevée lors de cette campagne.

Une concentration ponctuelle et en surface, avec une valeur haute de la teneur en nitrates & nitrites dans la baie Kué a été observée en 2013. Il n'y a pas de risque d'eutrophisation ni de perturbation. Les concentrations des sels nutritifs mesurées lors de cette dernière campagne restent dans le même ordre de grandeur que celles mesurées lors des campagnes « saison humide » depuis 2007, à l'exception des concentrations de NO₃+NO₂ de 2012 et 2013 qui, globalement, subissent une légère diminution.

Hydrocarbures

L'analyse des prélèvements aux stations St15 et St16 n'a pas permis de mettre en évidence des concentrations en hydrocarbures totaux supérieures à la limite de détection de la méthode (LQ < 0,1 mg/L). Ces deux stations ont un bilan annuel qui leur est dédié.

Métaux

Comme il a été observé lors des campagnes précédentes et lors de l'état des lieux, les métaux naturellement contenus dans les roches latéritiques du sud calédonien (Co, Mn, Ni, Cr(VI) et Cr (total) se distribuent selon un gradient côte-large bien individualisé. Les stations du Canal de la Havannah (St02,

St05, St07, St09 et St21) influencées par les masses d'eau océaniques, se distinguent clairement par des concentrations en métaux (Co, Mn, Ni, Cr(VI) et Cr (total) nettement inférieures à celles mesurées aux stations proches des côtes (St03, St06, St14, St15, St18, St19 et St 20).

Le dernier suivi disponible datant de 2013 indique que les concentrations de métaux dissous mesurées ne diffèrent pas de manière significative par rapport aux concentrations moyennes obtenues lors des précédentes campagnes « saison humide » (2007 à 2013) à l'exception du Cu dont la concentration varie à travers les années. Dans la zone d'étude, les concentrations moyennes de Cr(VI) et Ni sont relativement similaires entre 2012 et 2013 alors que les concentrations de Co, Fe, Mn et Zn diminuent très légèrement.

Synthèse 2013

Les principales variations des variables physico-chimiques et des concentrations de silicates, POD, NOP, POP et des métaux dissous tels que Co, Cr(VI), Cr total, Mn et Ni mesurées lors de la campagne semestrielle d'août 2013, mettent en évidence les apports terrigènes. Ainsi, les concentrations de ces paramètres se distribuent selon un gradient « côte-large » bien défini.

Les stations de Port Boisé et de la Baie Kwé se démarquent des stations de la Baie du Prony par une nette stratification des eaux qui isole la couche de surface. Cette couche présente les salinités les plus faibles, les turbidités les plus fortes et les concentrations en métaux dissous (Co, Cr(VI), Cr tot, Mn et Ni) les plus élevées de toute la zone d'étude. A contrario, les concentrations en As mesurées dans cette couche sont les plus faibles mesurées.

En 2013 des concentrations côtières en métaux sont plus élevées. Ces résultats sont explicables par l'effet mécanique des précipitations atmosphériques exceptionnelles qui ont eu lieu en juillet 2013 et aussi pendant la campagne d'août 2013. En effet, ces pluies ont été responsables d'un lessivage des sols plus importants que d'ordinaire en « saison fraîche/ sèche ». Ces événements météorologiques ont induit, dans un deuxième temps, des solubilisations importantes en métaux dissous tels que Co, Cr(VI), Mn et Ni ; ces concentrations plus élevées s'étant ensuite retrouvées dans les eaux de surface des baies.

Bien que naturelle, le niveau de concentration en métaux dissous est néanmoins à surveiller, particulièrement au niveau des deux baies, les stations St03 (Port Boisé) et St06 (Baie Kwé) présentant les variations les plus importantes au sein de la zone d'étude. Variations en relations avec les pluies exceptionnelles de janvier et juillet 2013.

Implication pour le suivi :

Ce réseau, techniquement au point, présente le principal défaut de tous les réseaux à prélèvements ponctuels, c'est-à-dire qu'il n'est représentatif que d'un instant donné, instant dont on ne connaît rien par rapport aux variations naturelles du milieu au cours du temps.

Comme cela est indiqué dans le rapport de Melanopus et Dexen (2015) : « En termes de surveillance, il est beaucoup plus informatif de connaître une quantité de polluants (métaux, composés organiques) qui transite en un point pendant un laps de temps déterminé (i.e. un flux) plutôt qu'une concentration à un instant donné sur ce même point. À ce titre, il apparaît évident que la technique de prélèvement d'eau classiquement utilisée souffre de limites considérables en termes de représentativité temporelle, voire spatiale, en raison de l'aspect instantané et éphémère de la mesure réalisée. Les mesures de concentrations en polluants effectuées via ce type de méthode ne sont généralement pas représentatives au-delà de quelques secondes/minutes/heures selon la situation environnementale locale et l'hydrodynamisme, et apparaissent donc extrêmement variables. Consécutivement, les mesures fondées sur des prélèvements ponctuels ne permettent d'assurer une bonne représentativité

spatio-temporelle du milieu qu'à condition de respecter une fréquence suffisamment élevée (Mazzella et al. 2011), ce qui pose inévitablement des problèmes de coûts et de logistique. »

Ainsi si les paramètres mesurés semblent pertinents par rapport au suivi de l'érosion et de son impact sur le milieu marin, l'instantanéité des informations récoltées (prélèvements ponctuels), l'impossibilité de relier ces données aux conditions de flux de nutriments, MES, contaminants et à la courantologie locale ne permettent pas un suivi satisfaisant.

Enfin comme indiqué précédemment, les épisodes de charriage et de transport de matériaux les plus importants sont des événements ponctuels, peu fréquents qui ont probablement un impact très fort sur l'environnement marin, mais qu'il faudrait réussir à capter via les suivis de VALE NC.

Caging : bioaccumulation des métaux dans des espèces bio-indicatrices placées en cages sous-marines

Tableau 12: Localisation géographique des lieux de position des cages, référentiel WGS-84.

Localisation	Station	Longitude E	Latitude S	Profondeur de la zone (en m)	Profondeur d'immersion de la cage (en m)
Chenal Baie Port Boisé	St03	166° 58,011	22° 21,190	28,4	10,5
Chenal de la Baie Kwé	St06	166° 59,117	22° 20,829	27,2	10
Récif Ioro	St07	166° 57,633	22° 22,893	38,5	12,5
Pointe Nord du récif Ma	St13	166° 51,356	22° 24,914	32 ,4	10
Port naturel de Goro	St14	167° 01,153	22° 19,351	35,2	12,5
Port de Prony	St16	166° 53,290	22° 21,441	42,6	12,5
Prony Ilot Casy	St18	166° 51,068	22° 21,667	22	10
Illet Nouaré	St31	167° 00,450	22° 25,560	35	11,5

Figure 12. Localisation géographique des cages de transplantation (Vale NC, 2013).

| 2 km |

Le Tableau 13 inventorie les différents paramètres mesurés pour la bioaccumulation par caging.

Tableau 13: Paramètres mesurés pour la bioaccumulation (Melanopus & Dexen 2015)

Paramètres	Échantillonnage	Nbre échantillons par station	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses par échantillon	
Paramètres physiologiques bivalves :	Lot de 30 spécimens d' <i>Isognomon isognomon</i> et de <i>Lobophora variegata</i>	1	<i>Caging (immersion pendant 3 mois)</i>				9 (bivalves) ou 5 (algues)	
Croissance relative				Mesures biométriques et calculs	-	-		
Taux de croissance journalier					-	-		
Indice de condition physiologique					-	-		
Métaux dans les chairs								
As				ICP-OES	Breau 2003; Breau 2009	0.01 à 1 µg/g de poids sec		
Co								
Cr						1 à 8 µg/g de poids sec		
Cu								
Fe								
Mn								
Ni								
Zn								

La méthode du caging est utilisée pour la bio-surveillance du milieu marin (Fernandez 2014b) dans la zone de Vale NC. Elle est qualifiée de biosurveillance active, contrairement aux méthodes fondées sur la collecte d'organismes marins locaux (bio-surveillance passive). Cette méthode s'appuie sur le calcul des taux d'accumulation des métaux dans les organismes transplantés à l'issue de leur période d'immersion dans la zone d'influence de Vale NC (complété par des données biométriques), selon la norme ASTM E2122-02(2013).

Quatre campagnes ont été réalisées annuellement depuis 2010, mais seules les données 2010-2012 sont disponibles actuellement.

Des précipitations particulièrement importantes ont eu lieu pendant la campagne 2013. Ces précipitations seraient à l'origine des augmentations en teneurs des métaux terrigènes enregistrées en 2013, particulièrement aux stations St06 (baie Kué) et St18 (îlot Casy) ; les températures relevées aux stations côtières (St03, St06, St16 et St18) ont clairement montré que les cages ont été exposées aux apports intenses d'eau de pluies notamment en juillet.

Les teneurs minimales sont toujours obtenues au niveau des stations St13 et St07 (stations lagunaire sous influence océanique) et les teneurs maximales sont observées aux stations St03 et St06 (stations côtières sous influence terrigène).

Implication pour le suivi :

Ce réseau de caging fonctionne techniquement et a permis de valider en 2013 le pouvoir « intégrateur » des bivalves par leur bioaccumulation en métaux en démontrant l'influence des apports terrigènes sur les stations côtières par rapport aux stations sous influence océanique. En revanche la croissance et l'indice de condition de ces bivalves ne semblent pas évoluer entre les stations de suivis.

La principale contrainte du caging est de se baser sur du matériel biologique, dont les résultats restent tributaires d'une prise en compte normée des phénomènes physiologiques complexes d'intégration biologique (encore peu connus dans le cadre de cette méthode en développement).

Si le caging permet de démontrer l'impact des milieux côtiers par les apports terrigènes, il n'est pas possible d'appréhender la toxicité ou de suivre précisément des flux de contaminants bien discriminés. Enfin la capacité de bioaccumulation des bivalves sur une exposition courte, mais très intense (érosion très forte), n'est a priori pas connue et donc leur capacité à traduire les effets d'événements érosifs majeurs ne semble pas prouvée.

III.3.3. Qualité physico-chimique des sédiments marins

Compartiment	Type de suivi	Physico-chimie des sédiments
Hydrobiologie	Réglementaire	Prélèvement de sédiments : 15 stations prélevées 1 fois tous les 3 ans. Granulométrie, mesure des concentrations en métaux.
	Volontaire	

Le Tableau 14 et Figure 13 permettent de localiser les stations sur le périmètre d'étude.

Tableau 14: Localisation géographique des stations de prélèvements d'analyse, référentiel WGS-84.

Localisation	Station	Longitude E	Latitude S	Profondeur (m)
Basse Chambeyron	S2	167° 00,506	22° 23,599	33
Baie Port Boisé	S3	166° 58,010	22° 21,190	29
Ilôt Kié	S5	167° 03,100	22° 22,050	34
Récif de la Baie Kwé	S6	166° 59,112	22° 20,830	20
Récif Ioro	S7	166° 57,910	22° 22,820	41
Canal de la Havannah	S9	166° 59,754	22° 22,540	47
Pointe Nord du récif Ma	S13	166° 51,354	22° 24,914	35
Port de Goro	S14	167° 01,160	22° 19,350	37
Prony Creek Baie Nord	S15	166° 52,590	22° 20,037	25
Prony Wharf	S16	166° 53,365	22° 21,210	44
Prony Ilôt Casy	S18	166° 51,061	22° 21,668	26
Rade de l'est	S19	166° 53,340	22° 23,170	38
Baie Iré	S20	166° 48,150	22° 24,180	25
Ilôt Ugo	S21	166° 55,501	22° 26,728	36
+ Ile Ouen	S133	166° 52,398	22° 25,147	60

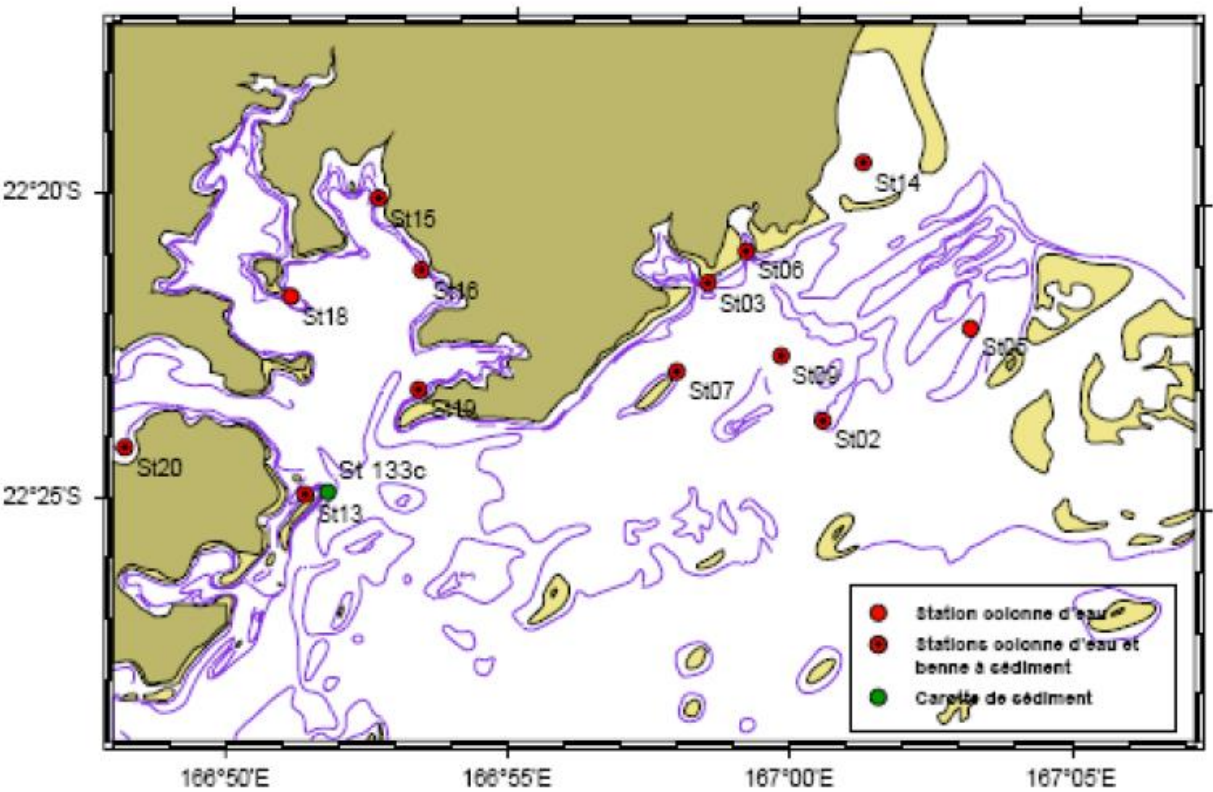


Figure 13. Localisation géographique des stations (Vale NC, 2013).

Le Tableau 15 inventorie les différents paramètres mesurés sur les sédiments.

Tableau 15: Paramètres mesurés sur les sédiments (Melanopus & Dexen 2015)

Paramètres	Échantillonnage	Nbre échantillons par station	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre de mesures par échantillon
Granulométrie	Prélèvement des sédiments de surface (couche centrimétrique, quantité non précisée)	1	Benne à sédiments De type Van-Veen	Granulométrie laser	non précisé	-	1
Minéralogie				Diffraction Rayons X	non précisé	-	
Métaux par phase 75 : As Ca Cd Co Cr Cu Fe Mn Ni Zn				Mise en solution des pélites puis attaque totale et dosage par ICP-OES	Tessier et al. 1979	non précisé	

Ce suivi a pour but d'évaluer les concentrations en polluants (métaux et composés organiques dissous) dans les sédiments déposés sur le fond et de comparer ces concentrations avec celles mesurées dans les zones de référence. Il doit permettre de déterminer d'éventuelles évolutions anormales autant dans l'identité des polluants présents que dans leur concentration.

Les quantités totales de cobalt, chrome et nickel sont constantes depuis 2006, toutefois une différence est notée dans la répartition de certaines formes géochimiques de ces métaux, en particulier les carbonates. Cette évolution temporelle affecte de manière différente les métaux en fonction, d'une part, des caractéristiques physico-chimiques propres et d'autre part, du terme source (creek Baie Nord ou Kwé). Les formes organiques évoluent de manière assez aléatoire tandis que les formes carbonatées semblent bien être liées aux apports en métaux dissous ; les concentrations étant plus élevées au droit du Creek de la Baie Nord que dans la Baie Kwé.

Implication pour le suivi :

Le suivi actuel des sédiments de surface est effectué sur 14 stations, une fois tous les 3 ans (sauf sur la station ST16, près du port annuellement). Les sédiments de surface fournissent des informations primordiales en termes de caractérisation environnementale et leur composition est **en lien fort avec les caractéristiques de la colonne d'eau et les transports terrigènes**. La répartition des stations sur l'ensemble du périmètre de suivi permet d'avoir une vision globale et de suivre à long terme l'évolution des concentrations. Il convient de maintenir ce suivi et sa répartition spatiale, des ajustements spatiaux pourraient être faits à moyen terme une fois la courantologie locale très bien connue (mise en place modèle hydrodynamique robuste).

Comme le préconise le rapport Melanopus et Dexen 2015, en regard de l'intérêt de surveillance et des exigences en matière de réactivité, ce suivi apparaît dans son état actuel insuffisant tant en fréquence qu'en effort d'échantillonnage (en particulier en baie de Prony avec seulement 3 points de prélèvements).

III.3.4. Suivi de la sédimentation et flux sédimentaires

Il a été décidé de faire ressortir ce paragraphe, interface entre qualité des eaux marines et des sédiments, puisqu'il pourrait être l'outil essentiel pour le suivi de l'érosion.

Compartment	Type de suivi	Accumulation sédimentaire / Flux de particules dans la colonne d'eau
Suivi de la sédimentation et flux sédimentaires	Réglementaire	Pièges à particules : 3 stations dont 2 de part et d'autre du diffuseur. Périodicité 6 mois pour une immersion de 1.5 mois. Granulométrie, mesure des carbonates, minéralogie et concentrations en métaux. Carotte sédimentaire : 4 stations dont 3 échantillonnées tous les 3 ans et 1 annuellement. Granulométrie, mesure des concentrations en métaux. Taux d'accumulation en g/cm ² /an.
	Volontaire	

Pièges à particules

Le suivi du flux sédimentaire s'effectue sur 3 stations (Tableau 16). Deux stations sont situées en zone d'influence de l'effluent (ST60-NE et ST60-SW), et une station est située proche de l'embouchure de la rivière Kwë (STKW1) afin d'assurer le suivi des apports induits par ce bassin versant.

Le Tableau 16 et Figure 14 permettent de localiser les stations sur le périmètre d'étude.

Tableau 16: Localisation géographique des stations de prélèvements d'analyse, référentiel WGS-84.

Station	Latitude S	Longitude E	Profondeur
St60SW	22°22.154	166°59.621	37m
St60NE	22°22.113	166°59.677	39m
StKW-1	22°20.75	166°59.144	18m

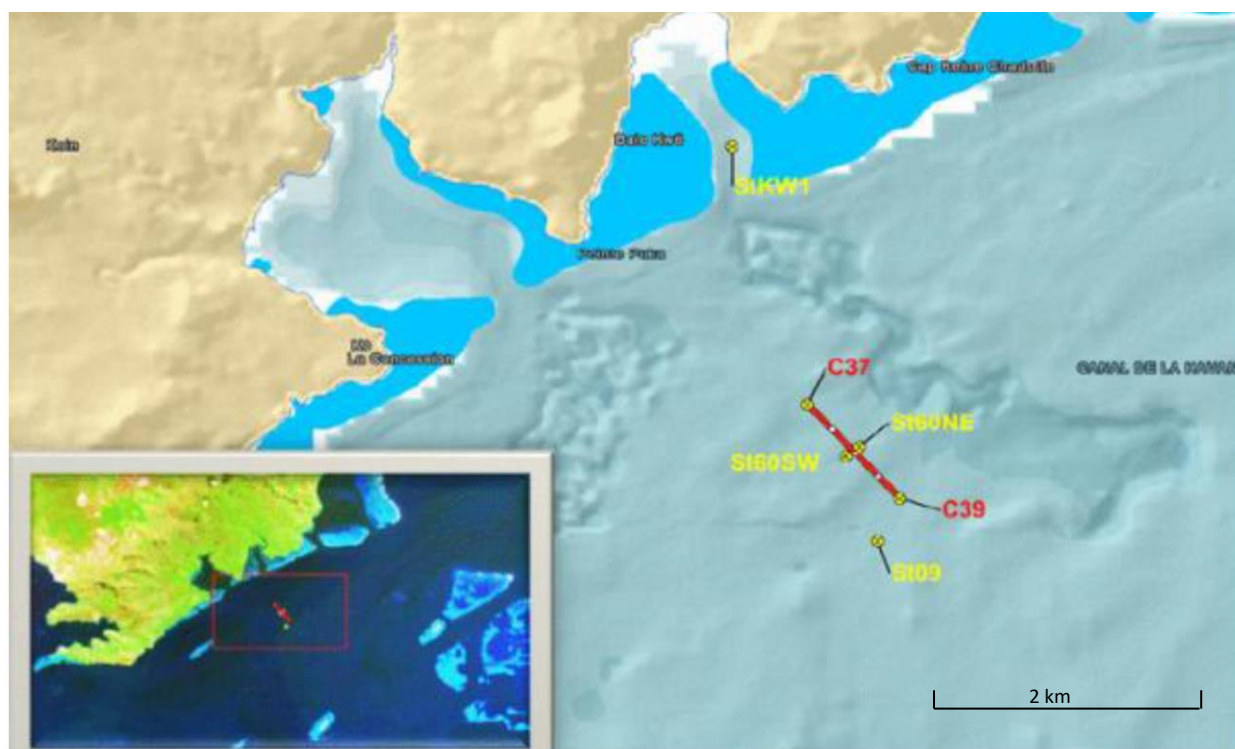


Figure 14. Localisation géographique des stations (Vale NC, 2013).

Dans le cadre du présent dossier seul le suivi temporel des apports terrigènes générés par l'activité minière en sortie de la Baie Kwë, dans un secteur de relative profondeur ($h > 15\text{m}$) nous intéresse.

Le Tableau 17 inventorie les différents paramètres mesurés sur les carottes de sédiments.

Tableau 17: Paramètres mesurés pour le flux sédimentaire (Melanopus & Dexen 2015)

Paramètres	Échantillon nage	Nbre échantillons	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses par échantillon
Flux de MES	Godets sur pièges à sédiments séquentiel	12	Carrousel de 12 godets (piège à sédiment Technicap type PPS4/3)		non précisé	-	1
Carbonates				Calcimètre de Bernard		-	
Granulométrie		4		Granulométrie laser	non précisé	-	
Minéralogie				Diffraction Rayons X	non précisé	-	
Soufre		12		ICP-OES	non précisé	-	
Hydrocarbures totaux				Chromatographie gazeuse (GC/FID)	Norme NF EN ISO 9377-2	-	
Métaux dans les MES :							
Ca				Attaque totale et dosage par ICP-OES	non précisé	A priori entre 0.005 et 0.02 µg/L selon le métal mais non précisé dans les rapports	
Co					non précisé		
Cr					non précisé		
Fe					non précisé		
Mn					non précisé		
Ni				non précisé			

En 2013, l'influence terrigène à la station St60-KW1 de la baie Kwé: d'une part, est plus importante en raison des conditions hydro-climatiques exceptionnelles de juillet 2013 ; d'autre part, paraît s'accroître notablement dans le temps. En effet, les valeurs moyennes du rapport Ca/Fe, toutes saisons confondues, diminuent progressivement d'une campagne à l'autre passant de $3,17 \pm 0,5$ (juillet-août 2011) à $0,98 \pm 0,46$ (juillet-août 2013).

Pour la Baie Kwé, les valeurs moyennes des densités de flux en métaux totaux ont augmenté entre 2011 et 2013.

- les valeurs maximales sont restées du même ordre de grandeur,
- les valeurs minimales quant à elles ont fortement progressé.

Cette augmentation est explicitée par l'accroissement régulier des flux de matière terrigène particulière de faible diamètre, donc de plus forte concentration spécifique en métaux ; ces apports étant liés au débit solide de la rivière Kwé.

Implication pour le suivi :

Le suivi à l'aide de piège dans la baie Kwé donne des résultats intéressants qui corréler les fortes pluies (épisodes pluvieux très important de 2013) à la sédimentation, qui permettent par l'étude des carbonates de connaître l'origine des sédiments fins et semblent par ailleurs montrer une augmentation des teneurs de fonds en métaux lourds.

Ce type de suivi des flux particulière est particulièrement intéressant pour l'étude de l'érosion. En revanche l'échantillonnage actuel et la fréquence des campagnes paraissent insuffisants pour caractériser correctement l'érosion.

Suivi du taux d'accumulation sédimentaire

Le Tableau 14 et la Figure 15 permettent de localiser les stations sur le périmètre d'étude.

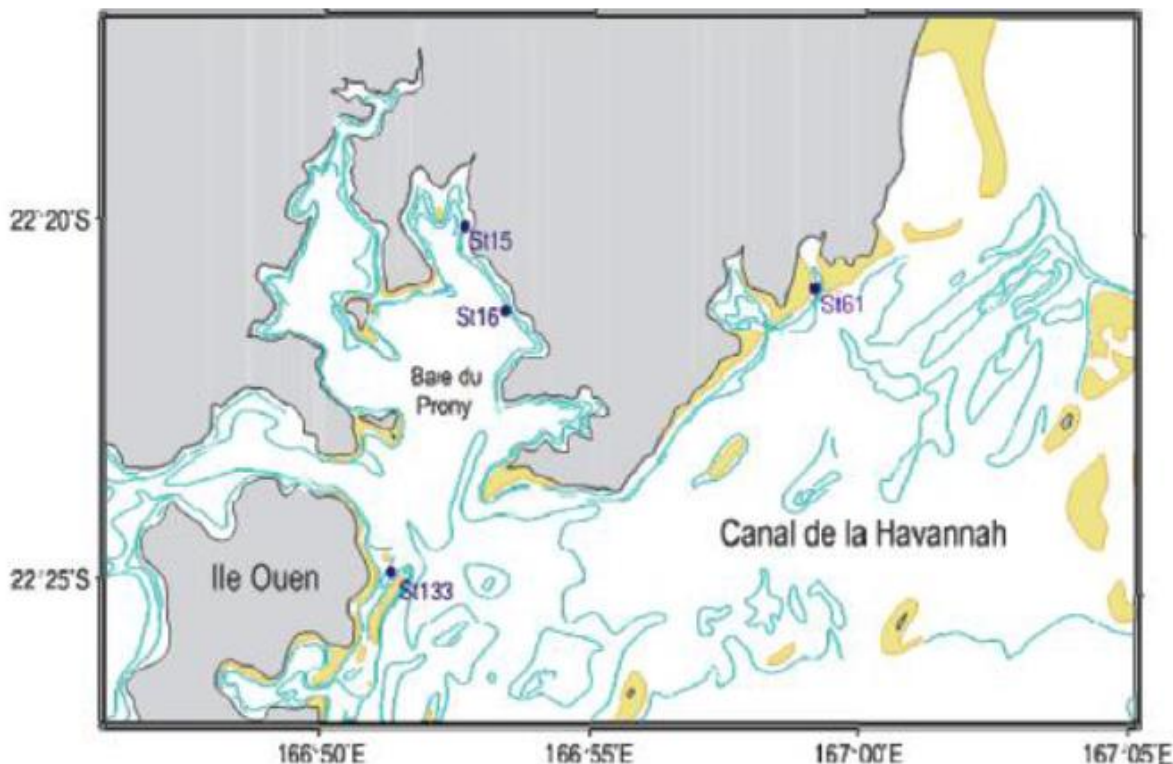


Figure 15. Localisation des stations d'étude du taux d'accumulation sédimentaire (Vale NC, 2013).

Le Tableau 18 inventorie les différents paramètres mesurés sur les carottes de sédiments.

Tableau 18: Paramètres mesurés dans les carottes de sédiments (Melanopus & Dexen 2015)

Paramètres	Echantillonnage	Nbre échantillons par station	Méthode terrain	Méthode laboratoire	Norme ou référence utilisée	Limite de quantification	Nombre d'analyses
Carbonates	Carotte de 14 à 26 cm de profondeur (35 cm en baie Kwé)	1	Carottage par carottier-tube	Calcimètre de Bernard	non précisé	-	1
Granulométrie				Granulométrie laser (Malvern)	non précisé	-	
Minéralogie				Diffraction Rayons X	non précisé	-	
Métaux totaux :							
Ca				Attaque totale et dosage par ICP-OES	non précisé	A priori entre 0.005 et 0.02 µg/L selon le métal mais non précisé dans les rapports	
Co					non précisé		
Cr					non précisé		
Fe					non précisé		
Mn					non précisé		
Ni				non précisé			
Datation :							
²¹⁰ Pb				Spectrométrie gamma basse énergie	He & Walling 1996	0.003 Bq/g	

La dernière campagne date de 2013. Les résultats ont permis d'identifier des différences de sédimentation importantes entre les stations, sédimentation pouvant être quasi nulle ou dépasser les

1.8 g/cm²/an dans la baie de Kwé. Par ailleurs l'étude du ratio Ca/Fe dans la carotte permet de caractériser le type de sols érodés (couches latéritiques de surface riches en Fer).

Implication pour le suivi :

Ce suivi a été efficace pour étudier les différentes dynamiques de sédimentations entre les stations et aider à la caractérisation des apports terrigènes (plus ou moins ferreux au cours du temps).

L'étude de l'accumulation sédimentaire par carottage permet une exploration des sédiments en profondeur et la reconstitution d'un historique de sédimentation sur le long terme (évolution du taux de sédimentation et de la composition des sédiments sur des périodes de plusieurs dizaines d'années). Cette méthode, mise en œuvre jusqu'à présent sur une base trisannuelle, a permis d'établir l'historique sédimentaire local et d'en étudier la structuration. Ces connaissances étant désormais acquises, son implémentation sur une base routinière et l'acquisition d'informations complémentaires sur des pas de temps courts (un à trois ans) présente a priori un intérêt limité.

III.3.5. Qualité biologique du milieu marin

Compartment	Type de suivi	Habitats coralliens et peuplements biologique
Hydrobiologie	Réglementaire	12 stations, périodicité semestrielle : - Habitats récifaux : Pas de prélèvement. Observations et photographies + vidéo - Ichtyofaune (taxons de la liste restreinte) : Pas de prélèvement. Observations et photographies + vidéo - Macrobenthos (taxons de la liste restreinte) : Pas de prélèvement. Observations et photographies + vidéo
	Volontaire	

Les Figure 16 et Tableau 19 permettent de localiser les stations pour le suivi biologique.

Tableau 19: Localisation géographique des stations, référentiel WGS-84.

Identifiant de station	Coord. X	Coord. Y	Localisation	Profondeur A (m)	Profondeur B (m)	Profondeur C (m)
ST01	166,850544	-22,363317	Ilot Casy	7	10	-
ST02	166,875767	-22,339276	Creek de la baie Nord	10	12	-
ST03	166,893980	-22,355201	Port de Prony	5	10	13
ST04	166,826546	-22,382220	Canal Woodin	4	11	21
ST05	166,958446	-22,384542	Récif Ioro	5	10	20
ST06	166,983247	-22,394173	Banc Ionon tea	9	15	21
ST07	167,011180	-22,393187	Basse Chambeyron	7	17	22
ST08	166,975897	-22,354403	Récif Pointe Puka	9	12	-
ST09	167,025477	-22,367841	Banc de Kié	7	17	20
ST10	167,064364	-22,372072	Ilot Kié	10	16	21
ST11	167,031250	-22,334104	Récif Touémo	6	11	-
ST12	166,927164	-22,440509	Ugo	5	13	-

Le Tableau 20 inventorie les différents paramètres biologiques mesurés.

Composante du suivi	Paramètre	Nb de stations	Fréquence d'échantillonnage
Habitats récifaux	Données brutes	12	semestrielle (mars et septembre)
	% recouvrement 28 catégories LIT		
Ichtyofaune (taxons de la liste restreinte)	Données brutes	12	semestrielle (mars et septembre)
	Présence/absence établies par les prestataires		
	Densités calculées par les prestataires		
	Biomasses calculées par les prestataires		
Macrobenthos (taxons de la liste restreinte)	Données brutes	12	semestrielle (mars et septembre)
	Abondance semi-quantitative établies par les prestataires		
	Présence/absence établies par les prestataires		

Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie. OEIL
11 rue Guynemer I 98800 Nouméa - Tél. / Fax : 23 69 69 - www.oeil.nc

Tableau 21. Résumé des méthodes de suivi mises en œuvre par Vale NC (Vale, 2010).

Méthode de suivi	Description de la méthode	Information recueillie
Line Intercept Transect	Recensement de la nature du fond le long d'un décamètre, avec une précision centimétrique. 28 catégories de substrats prédéfinies. 3 transects de 20m par station de suivi.	% de recouvrement des différentes catégories de substrats récifaux, dont 12 formes de croissance corallienne (catégories AIMS). Coraux durs / Autres coraux / Autres organismes Vivants / Algues / Substrat Abiotique
Macro et épi-benthos	Comptage des individus le long de transects à largeur fixe (L=20m ; l=5m). 3 transects par station de suivi. Liste de taxa cibles demandée par VALE ; recensement effectué sur toutes les espèces par les prestataires en charge du suivi + Echelle de recouvrement pour certaines espèces ou groupes taxonomiques : scléactiniaires (identification à l'échelle du genre, si possible espèce), algues, éponges, ascidies, béditiers, trocas et échinodermes.	Composition du peuplement macrobenthique (richesse spécifique et densité) et taille des béditiers et trocas. Prestations complémentaires : liste taxonomique des coraux scléactiniaires (identification à l'échelle du genre, si possible espèce) et abondance par espèce ; présence de colonies juvéniles ; état de santé des colonies coralliennes : en cours de blanchissement ou en cours de recolonisation par des zooxanthelles.
Poissons	Comptage des individus sur des transects à largeur variable (L=20m). 3 transects par station de suivi. Liste de taxa cibles demandée par VALE ; recensement effectué sur toutes les espèces par les prestataires en charge du suivi.	Composition du peuplement de poissons (richesse spécifique, densité et biomasse).

Poissons

La comparaison des indicateurs biologiques entre les stations corrobore exactement les déductions des études des paramètres physico-chimiques, à savoir des unités fonctionnelles très différentes entre la baie de Prony, le centre du canal de la Havannah soumis à un fort hydrodynamisme, et les stations côtières. D'un point de vue écologique la station dans la réserve Merlet se différencie par une richesse biologique qui surpasse celle de toutes les autres stations. De façon résumée et synthétique on peut différencier quatre systèmes :

- celui de la baie de Prony,
- celui du canal de la Havannah (la station de la réserve Merlet s'en rapproche mais avec une richesse très supérieure notamment en densité et biomasse des poissons),
- celui du canal Woodin
- celui des baies avec apport terrigènes au nord du canal : baie de port Boisé et baie Kwé.

Un gradient de croissance des influences marines ou terrestres sépare (ou relie) ces systèmes.

Compte tenu de l'importance des intervalles de confiance, les résultats quantitatifs concernant les communautés de poissons sont à considérer comme stables depuis 2007. La station portuaire ne permet pas d'identifier d'impact.

Corail

Il n'y a aucune variation de la couverture du substrat corail dur (Scléactiniaires) sur les transects des 5 stations du canal de la Havannah qui entourent le rejet d'effluent, ni sur la station côtière Puka qui fait l'objet d'un suivi renforcé. Les récifs coralliens ont tendance à se diversifier progressivement dans le temps.

Les analyses sur le long terme montrent que suite à une dépression une petite baisse de diversité est enregistrée. Puis avec le temps, une stabilité est constatée et le récif se régénère progressivement.

Les variations de recouvrement, liées aux algues, quant à elles, sont cycliques et ne paraissent pas avoir de cause liée à une pollution ou une dégradation d'origine anthropique du milieu. Aucune

eutrophisation par exemple.

Macro et épi-benthos

Les résultats des suivis 2007-2013 ne montrent pas d'évolution particulière des peuplements.

On remarque également que suite à des perturbations d'une grande ampleur, le récif ne met pas très longtemps à se stabiliser dans le temps et se régénérer pour les invertébrés. En effet suite à un évènement d'une ampleur exceptionnelle tel qu'une dépression ou cyclone, les inventaires spécifiques montrent que la recolonisation se fait dans le semestre suivant (périodicité semestrielle des missions de suivi biologique).

Dans tous les cas, aucune relation entre les résultats des suivis et apports terrigènes n'ont été étudiés.

Implication pour le suivi :

Les suivis biologiques des récifs, ichtyofaune et macrobenthos sont particulièrement intéressants pour caractériser l'état de conservation du milieu marin en général.

Par ailleurs les peuplements biologiques récifo-lagonaires (qu'ils soient mobiles ou sessiles) présentent des saisonnalités complexes, aux processus souvent méconnus et d'amplitudes parfois importantes (dépendant des taxons considérés). Il apparaît donc préférable, notamment pour des études de surveillance opérationnelle, de suivre les peuplements biologiques à saison fixe afin de s'affranchir de cette variabilité saisonnière (Melanopus & Dexen, 2015).

Les paramètres biologiques sont suivis depuis 2007. Les conclusions du suivi 2007-2013 sont :

« Le bio-indicateur le plus sensible et lisible est le corail, le moins sensible : les poissons. Cependant la mise en commun de tous les indicateurs disponibles, qu'ils soient instantanés ou intégrateurs, biologiques, chimiques ou physiques, est nécessaire et la qualité du milieu ne peut pas être décrite par un seul paramètre, une synthèse de tous les indicateurs est nécessaire. Une attention est aussi portée aux éventuelles espèces exogènes ou envahissantes. »

Aucun des suivis biologiques ne semble pour l'instant présenter des impacts représentatifs des apports terrigènes lié à l'érosion des bassins versants exploités. Cependant la station Puka présente une communauté récifale perturbée sans qu'il soit possible de relier ces observations à l'érosion. Les hypothèses actuelles envisagées pour expliquer cette dégradation sont l'apport de matière en suspension et d'eau douce des deux baies (Port boisé et Kwé).

Par ailleurs les peuplements biologiques récifo-lagonaires (qu'ils soient mobiles ou sessiles) présentent des saisonnalités complexes, aux processus souvent méconnus et d'amplitudes parfois importantes (dépendant des taxons considérés). Il apparaît donc préférable, notamment pour des études de surveillance opérationnelle, de suivre les peuplements biologiques à saison fixe afin de s'affranchir de cette variabilité saisonnière (Melanopus & Dexen, 2015).

Dans sa forme actuelle, et par le manque de connaissances des causes à effets reliant les problématiques d'érosion et l'état de conservation des peuplements, ce suivi n'apporte encore que peu d'information pour suivre les pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels.

III.3.6. Conclusions pour le milieu marin

La surveillance actuelle du milieu marin est à la fois complète par sa diversité d'analyses sur les différents compartiments (eau, sédiments, biologie) et par le grand nombre de stations et de paramètres étudiés, et cependant toutes ces données n'apportent que peu de réponses à l'impact de la pression associée à l'érosion des sols.

Globalement les suivis ponctuels de la qualité de l'eau par prélèvements ne sont pas satisfaisants, car par définition ponctuels. De même le caging permet une mise en relation des apports côtiers avec la bioaccumulation, mais l'estimation des flux et comparaison inter-stations voire intra station dans le temps est très complexe puisque la bioaccumulation est très dépendante des conditions du milieu.

L'étude des sédiments superficiels est un état des lieux des sédiments récemment déposés. Pour cette raison, ce suivi est particulièrement intéressant bien que dans le cas présent la fréquence d'analyse soit trop faible et le nombre de stations insuffisant pour étudier l'érosion.

Les carottages ont permis d'étudier l'évolution historique de la sédimentation dans le périmètre d'étude, mais ce type de suivi ne semble pas utile pour un contrôle de surveillance qui se veut le plus précis possible, tout du moins si le suivi des sédiments superficiels est fréquent.

En revanche, l'étude des flux de sédiments dans la colonne d'eau à l'aide de pièges est prometteuse et permet de mieux appréhender les épisodes de fortes pluviométries associées normalement aux phénomènes érosifs importants. Cependant, il semblerait nécessaire d'augmenter le nombre de stations de suivis et la périodicité des campagnes pour comprendre les phénomènes d'érosion.

Enfin, les familles biologiques étudiées sont particulièrement intéressantes pour caractériser l'état de conservation du milieu, qui est le paramètre le plus intégrateur et représentatif à long terme de l'évolution du milieu marin. Cependant dans le suivi actuel, les paramètres suivis sur le compartiment biologique ne peuvent pas encore être mis en relation avec la problématique de l'érosion et il est donc très difficile d'en estimer l'impact. A moyen terme, il convient de compléter / modifier le suivi pour trouver des paramètres qui permettront de suivre l'érosion, voir ajouter des suivis sur d'autres groupes (faune ou flore). Ce dernier point demandera aux experts de cibler les paramètres les plus sensibles (d'après les connaissances actuelles) et la mise en place de quelques programmes R&D pour valider scientifiquement des indicateurs de pressions liées à l'érosion.

En conclusion l'actuel suivi ne semble pas adapté pour caractériser la pression de l'érosion sur le milieu marin.

III.4. Bilan de l'évaluation des suivis environnementaux actuels liés à l'érosion

SOL	Fréquence actuelle	Atouts/Opportunités	Faiblesses/Menaces
Surface de sol dénudé/évolution de la dégradation	Ponctuelle	Base de photo-interprétation existante	Sans objet
Couverture végétale	Ponctuelle	La photo-interprétation est aisée à mettre en œuvre	Pas de suivi terrain orienté érosion
EAUX CONTINENTALES	Fréquence actuelle	Atouts/Opportunités	Faiblesses/Menaces
Météorologie	15 minutes (pluviométrie)	Bonne couverture pour le suivi général du site	Couverture insuffisante pour connaître l'intensité pluviométrique locale au niveau des stations de suivi limnimétriques. Fréquence d'acquisition inadaptée (temps trop long entre les mesures).
Limnimétrie	Continu (horaire) Mensuel Trimestriel Ponctuel	Présence de limnigraphes et d'ISCO en télétransmission	Seules 3 stations sont équipées pour le suivi du transport sédimentaire. La majorité des limnimètres ne sont pas positionnés sur des sections calibrées faussant les mesures de débit. Le pas de temps d'acquisition est au mieux horaire : fréquence trop basse et déconnectée avec la pluie pour le suivi de l'érosion. Les mesures de débit mensuelles ou trimestrielles ne présentent aucun intérêt pour le suivi de l'érosion (fréquence trop faible pour déduire un régime et un transport solide).
Physico-chimie de l'eau	Hebdomadaire, mensuelle ou trimestrielle	Bonne couverture géographique des perturbations potentielles.	Pas de suivi orienté vers l'érosion. Pas d'interprétation des données centrées sur la problématique érosion.
Physico-chimie des sédiments	Hebdomadaire, mensuelle ou trimestrielle	Sans objet	Protocole de prélèvement inadapté. Aucune interprétation des données physico-chimiques. Analyse de la granulométrie inutile dans le suivi de l'érosion.
Transport solide	Horaire ou toutes les 3h en montée d'eau	3 stations de suivi de la turbidité en continu. Calibration des turbidimètres mensuelle.	Le seuil de déclenchement des préleveurs automatiques n'est pas étayé. Les fréquences de prélèvement (horaire puis toutes les 3h) ne sont pas du tout adaptées aux épisodes de crues locaux. Les stations équipées sont disposées dans des zones drainant de trop grands bassins versant. Aucun suivi de la conductivité. Le creek de la baie nord n'est pas suivi. Il n'y a pas de connaissance des flux érosifs dans des zones de référence.

Indicateurs biologiques	Annuelle	Bonne couverture de la zone.	Les résultats et indices ne discriminent pas suffisamment la perturbation érosion.
-------------------------	----------	------------------------------	--

EAUX COTIERES ET MARINES		Fréquence	Atouts/Opportunités	Faiblesses/Menaces
Flux de particules dans la colonne d'eau		Annuelle	Simplicité de la méthode et efficacité	Peu de stations, fréquence des campagnes trop faibles.
Physico-chimie de la colonne d'eau	Concentrations en nutriments dans la colonne d'eau	Semestrielle à trimestrielle	Sans objet	Paramètres suivis non adaptés au suivi de l'érosion
	Concentration en métaux dissous	Semestrielle à trimestrielle	Sans objet	Prélèvement ponctuel sans idée de flux. Peu d'intérêt sur la fraction dissoute au regard la thématique érosion.
	Bio-accumulation (caging)	Annuelle - 1 campagne. 3 mois par an	Bonne relation pour mettre en avant l'influence terrigène côtière.	Pas de possibilité d'estimation de flux. Bioaccumulation trop dépendante des conditions du milieu (matériel vivant).
Physico-chimie des sédiments		3 ans	Très bon descripteur	Pas assez de stations, fréquence de prélèvement trop faible.
Accumulation sédimentaire (carottage)		3 ans	Bon descripteur temporel	Coût élevé et difficulté d'interprétation. Pas/peu d'intérêt pour suivre l'érosion.
Habitats coralliens		Semestrielle	Bon descripteur de l'état de conservation global du milieu marin	Coût élevé. Pas de descripteur des coraux en lien avec les phénomènes érosifs. Nécessité de suivre les peuplements biologiques à saison fixe.
Peuplements biologiques (ichtyofaune et macrobenthos)		Semestrielle	Bons descripteurs de l'état de conservation global du milieu marin	Coût élevé. Pas de descripteurs en lien avec les phénomènes érosifs ⁴ . Nécessité de suivre les peuplements biologiques à saison fixe.

⁴ Le LIT n'est pas un bon descripteur actuellement car il ne prend pas en compte l'enrichissement en MES, envasement et sensibilité des espèces de coraux aux apports terrigènes liés à l'érosion.

Chapitre IV - Proposition de révision des modes de surveillance de la pression érosion

IV.1. Stratégie générale de surveillance des milieux

L'évaluation de l'impact est le calcul d'un écart entre une situation observée et **une situation de référence**. Cette dernière peut être déterminée de différentes manières évoquées ci-après. Cependant la situation de connaissance des différents milieux laisse à penser que la stratégie la plus adéquate serait une combinaison de ces différentes approches selon le principe BACIPS : Before/After - Control/Impact - Paired Series.

IV.1.1. Avant / après (référence temporelle)

La plus répandue consiste à faire des mesures sur le milieu avant l'implantation d'une activité. C'est la méthode qui est réputée la plus fiable, mais elle présente toutefois dans notre cas de figure l'inconvénient de prendre en compte les perturbations déjà existantes, liées à des activités antérieures souvent peu contrôlées. Tout en accompagnant ces mesures, il faut anticiper de façon la plus précise possible quelles seront les pressions qui vont s'appliquer sur le milieu. C'est la parfaite connaissance de ces pressions qui va déterminer le détail du programme de surveillance du milieu et les paramètres à prendre en compte.

Dans le cadre de l'étude en cours, les données sur les milieux ont commencé à être collectées en 2004 et 2006 qui servent pour l'instant d'années de référence. Cependant, il s'avère qu'en raison de la préexistence de prospections minières, d'anciens complexes miniers mais également des premiers travaux liés au complexe minier (usine pilote et autres terrassements), **cette situation ne peut être qualifiée de véritable état initial avant-projet pour bon nombre de paramètres de suivis**. De surcroît, les autres activités existantes, non liées à la mine, n'avaient pas non plus été qualifiées et quantifiées en termes d'impact sur l'érosion.

En tout état de cause, les véritables valeurs de référence peuvent être considérées antérieures à 1998.

De fait, ce mode de calcul ne semble pas totalement satisfaisant.

IV.1.2. Comparaison à un milieu de référence (référence géographique)

Le programme de surveillance va être appliqué au milieu perturbé et à un milieu non perturbé proche et comparable. C'est l'écart entre ces deux milieux qui permet d'évaluer « l'écart à la référence », le milieu non perturbé servant de référence. Cependant les sites de référence sont toujours différents, leur comparaison est donc délicate et doit être faite avec des arguments fiables.

Pour le milieu terrestre et l'hydrologie, les zones de référence sont à trouver dans le secteur d'étude tant la pédologie et la géologie de cette région sont uniques. Des propositions sont faites dans les chapitres ultérieurs mais il est notable que **cet exercice est particulièrement difficile dans cette zone très prospectée**. Sachant qu'il est utopique de trouver des zones de référence exemptes de toute pression liée à l'érosion dans la zone d'étude, les sites retenus doivent présenter des sources de pressions qui sont anciennes, stables et connues.

Pour le milieu dulçaquicole, la même logique prévaut concernant les caractéristiques d'écoulement et physico-chimiques que pour les sols. C'est d'autant plus complexe que la capacité à trouver des cours d'eau d'un gabarit équivalent mais non perturbé est limité du fait de l'activité industrielle récente.

Concernant les marqueurs biologiques, **cela semble plus aisé en raison de la mobilité des organismes** leur permettant de créer un peuplement de référence dans des zones de moindre impact (Hytec, Ethyco, 2014).

Pour le milieu marin, il est possible de trouver des milieux comparables pour la zone côtière sud, le canal de la Havannah générant des conditions hydrologiques tout à fait particulières (sous zones de la baie du prony, baie de Port Boisé, etc. Melanopus & Dexten, 2015).

Ce mode de calcul semble donc plus approprié pour les milieux aquatiques mais à manipuler avec la plus grande précaution notamment par le contrôle systématique de l'évolution des pressions sur les zones dites de référence. Il nous semble pertinent de recommander, dans ce cas, de multiplier autant que possible les zones de référence afin d'avoir une mesure de la variabilité de ces sites.

IV.1.3. Comparaison avec un état théorique

Cela consiste à utiliser des grilles de valeurs seuils qui définissent des classes de qualité généralistes pas ou peu régionalisées (par exemples américaines ou françaises). Dès qu'une situation se retrouve en classe dégradée, et hormis exception typologique, on considère qu'il y a un impact. Cependant, en raison de la faible antériorité des suivis en Nouvelle-Calédonie (20 dernières années), le caractère extrêmement atypique des milieux et la faible disponibilité de grilles de référence dans la région, il semble que **ce mode de calcul doit de fait être abandonné dans l'état actuel des connaissances**.

IV.1.4. Comparaison avec un modèle

La modélisation est un recours fréquent dans les phénomènes physiques (ou chimiques) complexes et qui se développe pour les processus biologiques ou écologiques.

En raison de la difficulté à trouver une situation de références géographiques ou temporelles **pour les milieux terrestres et l'hydrologie, la construction d'un modèle semble la plus adaptée à la problématique**. En effet, les deux premières questions centrales de cette étude sont l'aptitude des suivis actuels :

1. à quantifier de manière précise (ampleur de cet impact) l'évolution de l'ensemble des pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels : nous avons montré que ces suivis ne permettent pas de répondre à cette question.
2. à qualifier de manière précise (origine de l'érosion, impact des pratiques de l'activité minière récente, efficacité des mesures d'atténuation) la part due aux activités humaines dans ces évolutions : de la même manière, les suivis ne permettent pas de répondre à ces questions.

Par contre, une partie des suivis actuels sont de nature à alimenter un modèle.

Le modèle doit ainsi permettre de prédire l'érosion dans un bassin versant en fonction de différentes caractéristiques pédologiques, géologiques, topographie, d'occupation du sol, etc. Sur la base de phénomènes observés à petite échelle, un fonctionnement est modélisé et amplifié selon des critères typologiques jusqu'à couvrir l'intégralité d'un bassin versant. Les grandeurs caractéristiques définies servent donc de valeurs de référence qui seront ensuite confrontées aux données de suivi.

Enfin, la modélisation revêt plusieurs intérêts dans le cadre de la surveillance :

- L'utilisation d'un modèle est un outil permettant d'optimiser la gestion environnementale (identification zones contributrices à l'érosion, évaluation de l'efficacité des ouvrages de sédimentation etc.) ;
- Une fois calé et estimé fiable, le modèle permet également de réduire la surveillance environnementale.

IV.2. Cadre logique de la mise en place de la surveillance érosion

IV.2.1. Cadre logique en milieu terrestre

Il est généralement prouvé que de nombreux bassins versants ont, vis à vis de l'érosion, un feed-back positif: plus ils sont érodés, plus ils sont érodables. La comparaison entre les mesures et un modèle permet une approche rapide sur l'agradation du système (si la végétation recouvre davantage les sols mis à nu) de sa résilience ou au contraire de sa dégradation.

La modélisation est donc un outil qui sert à prévoir pour un évènement exceptionnel la quantité potentielle de sédiments exportés en fonction d'un état de surface donné en cas de déficience de l'instrumentation (souvent liée aux évènements exceptionnels). Cette donnée est importante en particulier dans les bassins versants faiblement instrumentés d'une part pour calibrer les ouvrages de rétention de sédiments et d'autre part pour vérifier l'état des remblais de stockage.

L'Equation universelle de pertes en sol (Wischmeier & Smith 1978) ou sa forme révisée (Revised Universal Soil Loss Equation RUSLE; Renard et al., 1997) s'applique à la quantification des pertes en sol par érosion en nappes. C'est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : agressivité climatique, érodibilité des sols, inclinaison et longueur de pente, occupation des sols, pratiques anti-érosives :

$$A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$$

où

- **A** est le taux annuel de perte en sol en t/ha/an ;
- **R** est le facteur de l'érosivité des pluies ; il correspond à la moyenne annuelle des sommes des produits de l'énergie cinétique de la pluie par son intensité en 30 mn consécutives ; il est exprimé en MJ.mm / ha.h.an ;
- **K** est l'érodibilité des sols ; il dépend de la texture, de la quantité de matière organique de la perméabilité et de la structure du sol ; il est exprimé en t.ha.h / ha.MJ.mm ;
- **LS** est un facteur sans dimension qui représente l'inclinaison (S en %) et la longueur de pente (L en m) ;
- **C** est un facteur sans dimension qui représente l'effet de la couverture végétale ;
- **P**, facteur sans dimension, est un rapport qui tient compte des pratiques antiérosives telles que les plantations ou alignements de cailloux en courbes de niveau.

Cette équation apparemment simple est néanmoins complexe dans la définition de chaque paramètre. Elle a été définie pour des sols cultivés dans des zones assez planes pour des parcelles allongées de 22m². Elle doit être revisitée pour tenir compte des fortes pentes où l'infiltration devient dominante par rapport au ruissellement, des sols très particuliers et surtout des états de surface qui sont très différents (état granulaire, encroûté, cuirasse, lithoreliques⁵, etc...).

Cette modélisation s'effectue à partir de « cellules » de mesure (de petites à très petite taille) dans des zones véritablement le moins impactées possible afin de définir les valeurs de base qui seront utilisées pour définir les valeurs de perte en sol standard à de plus grandes échelles (sous-bassin versant ou bassin versant). Ces cellules peuvent être des surfaces d'un m² (pour l'érodibilité par exemple) à quelques km² pour les suivis hydrologiques mais le plus homogène possible.

La modélisation présente de nombreux avantages qu'il est nécessaire de relier à l'effort de suivi environnemental de l'érosion qui est l'objet de cette étude (puisqu'elle se nourrit d'une grande partie des suivis envisagés) :

⁵ Traits pédologiques constitués de petits débris de roches altérées (taille du gravier ou moindre).

1. Elle permet dans un premier temps de **prédire l'érosion dans un bassin versant** puis d'**ajuster les paramètres de l'équation universelle** de pertes en sol à la mesure des flux dans le bassin versant (au niveau des seuils jaugeurs – **Suivi 5/9/10** ci-après).
2. Elle permet par la suite d'**évaluer l'importance des différents paramètres** qui contribuent aux quantités de pertes en terres dans un bassin versant - pour une quantité et Intensité de pluie donnée caractérisant le **facteur R** (d'où la nécessité de pluviographes – **Suivi 4** ci-après) – Le modèle permet à chaque évènement de recalculer les résultats par rapport à la prédiction et ainsi **prévoir les pertes en terres dans des bassins versants non équipés**.
3. Cette évaluation permet ensuite d'**agir ponctuellement sur les paramètres les plus importants dans le bassin versant** comme par exemple protéger les aires les plus érodibles : en résumé faire agir les **facteurs P et C** – notamment la couverture végétale (d'où l'intérêt de la télédétection – **Suivi 2/3** ci-après) - dans les lieux où les **variables LS (pente) et K** (susceptibilité des sols à l'érosion) sont les plus importantes et d'en prédire les effets une fois le modèle bien calé (**Suivi/Etat 1** ci-après).⁶
4. Pour **parfaire la modélisation dans un cycle d'amélioration continue** : les parcelles d'érosion sont un des moyens pour **mesurer le facteur K**, c'est à dire l'érodibilité des différents horizons de sols et des différents états de surface (croûtes, blocs, gravillons libres) exposés à la pluie et au ruissellement (**Suivi 6/8** ci-après).

Ce modèle est donc un état initial uniquement pour l'érosion terrestre qui demande de nombreuses données pour être construit mais également un outil évolutif qui doit continuer à être nourri des différents suivis :



Tableau 22. Suivis/Etat utilisés pour la construction du modèle d'érosion terrestre

Facteur	Erosivité des pluies	Erodibilité	Topographie	Couvert végétal	Pratique antiérosive ⁷	Perte de sol
Données de base pour le modèle	Suivi 4. Météorologie Suivi 5. Limnimétrie	Suivi 8. Parcelles de ruissellement Suivis 9. Physico-chimie eau et sédiments Suivi 10. Piège à sédiment Suivi 11. Bassin de décantation minier	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière sur pente forte (Cf MNT)	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière	Suivi 3. Couverture végétale	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière
Suivi ferme	Suivi 4. Météorologie Suivi 5. Limnimétrie	Suivis 9. Physico-chimie eau et sédiments Suivi 10. Piège à sédiment	Suivi 2. Surface de sol dénudé Sur pente forte (Cf MNT)	Suivi 2. Surface de sol dénudé ou dégradé	Suivi 2. Surface de sol dénudé Sur pente forte (Cf MNT)	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière
Suivi optionnel		Suivi 6. Règle topographique Suivi 7. Erosion des ravines Suivi 8. Parcelles de ruissellement Suivi 11. Bassin de décantation minier Suivi 12. Quantification du colmatage			Suivi 3. Couverture végétale	

⁶ Au-delà de cette étude, cela permet également de bien cibler les pratiques anti-érosives à entreprendre en priorité et à suivre leur efficacité.

⁷ Les pratiques antiérosives concernent aussi les terrasses, talus et autres ouvrages pour limiter l'érosion sur les déblais miniers notamment.

IV.2.2. Cadre logique général

Aux causes naturelles de l'érosion évoquées ci-avant (érosion par gravité, érosion hydrique provoquée par l'énergie cinétique de l'eau par splash ou par ruissellement) s'ajoutent des causes anthropiques (feu, routes, excavations, remblais) qui augmentent les valeurs de l'érosion. Par exemple, en cas de décapage de la croûte de surface ou de la végétation, des sols plus sensibles peuvent être mis à jour et ainsi modifier grandement les facteurs K, C et P explicités précédemment dans la modélisation, élément majeur de cette approche. C'est principalement par ce biais que le réseau de suivi pourra répondre aux deux principales questions.

Il est important de noter que contrairement à la majorité des écosystèmes tropicaux, le couvert herbacé continu, le plus efficace pour limiter le splash et le ruissellement n'existe pas sur ces sols oxydiques. L'altération de la densité du couvert végétal est donc un facteur prépondérant.

De fait, l'objectif de la surveillance est de suivre les dégradations d'origine anthropique (Tableau 23) à partir des méthodologies actuellement en place et pouvant susciter des améliorations suite au travail présenté dans le chapitre précédent.

Tableau 23. Récapitulatif des causes et moyens de suivis des dégradations de l'environnement à intégrer à la modélisation

CAUSES de la dégradation	Altération du couvert végétal	Présence de matériaux érodibles	Sédimentation de particules érodées	Altération de flux hydriques	Biodisponibilité des métaux lourds
Mesure de L'ETENDUE des zones vulnérables	Suivi 3. Couverture végétale → Influence C et P	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière → Influence K, LS, C et P	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière → Influence K, LS, C et P		
SUIVI de l'évolution spatiale de la dégradation	Suivi 2. Surface de sol dénudé → Influence K, LS, C et P	Suivi 2. Surface de sol dénudé Influence K, LS, C et P			
Mesurer les FLUX d'eau et de matière	Suivi 4. Météorologie Suivi 5. Limnimétrie → Influence R et K	Suivi 6. Règles topographiques Suivi 8. Parcelles de ruissellement → Influence K ou LS si les parcelles sont placées dans des inclinaisons de pentes différentes	Suivi 8. Parcelles de ruissellement → Influence K ou LS	Suivi 7. Erosion des ravines Suivi 9. Quantification des MES Suivi 10 à 12. Pièges à sédiments, bassins de sédimentation et colmatage → Influence K et P	Suivi 9bis et suivi 9ter. Physico-chimie des sédiments et de l'eau → Influence K

Remarque : Il est important de bien séparer les causes de l'érosion de ses conséquences - et les moyens de mesurer et de contrôler les dégradations.

Afin de fiabiliser cette surveillance, il convient d'agir selon le cadre logique suivant :

Etablir la vulnérabilité actuelle en milieu terrestre

-> Modéliser le phénomène d'érosion avec les données acquises ou en cours d'acquisition*

-> Adapter le réseau de surveillance actuel

Mesurer l'évolution de l'érosion par type de zone terrestre et par comparaison à une situation de référence donnée par la modélisation (permet d'évaluer l'origine anthropique)*

Mesurer l'évolution des flux en milieu marin en croisant le modèle continental construit avec le modèle hydrodynamique marin (permet d'évaluer l'origine anthropique) *

Adapter le réseau de surveillance terrestre utilisé pour construire le modèle initial en fonction des dégradations d'origines anthropiques observées notamment avec les indicateurs d'état biologiques

*** Avertissement**

Les trois premières phases doivent être menées en parallèle afin d'obtenir des jeux de données de suivi suffisamment robuste pour construire le modèle et conclure sur une dégradation d'origine anthropique.

Dans le cas présent, la modélisation doit être établie sur le bassin versant le mieux instrumenté (rivière Kwe) pour être validé ; le modèle pourra ensuite être recalibré et appliqué aux bassins versants qui sont moins instrumentés.

Premièrement, il est nécessaire de modéliser le phénomène érosif selon le modèle RUSLE présenté ci avant. En mesurant les MES, on définit le taux de sédiments en fonction du débit, ou encore une reprise de sédiments de fond pour une pluie après épisode sec. Il s'agit donc d'établir un modèle permettant d'appréhender l'irrégularité des pluies et leur violence. La relation n'est pas une fonction linéaire du débit, notamment car le flux sédimentaire dépend de nombreux facteurs dont l'intensité de la pluie et des pluies antécédentes. En effet, il est extrêmement difficile de mesurer l'intégralité des débits solides en continu. La seule mesure réellement continue provient du limnigraphe (débit total = liquide+solide dont particules en suspension + sédiments de fond).

L'établissement de ce modèle repose sur la connaissance du contexte actuel à partir de laquelle sont ébauchées des hypothèses de comportements érosifs (issues des données existantes) et des suivis à renforcer ou à créer. Ces suivis sont présentés en page suivante dans une vue synoptique uniquement centrée sur le bassin de la Kwé. Il est à noter que le Creek de la Baie Nord est également ciblé par une grande partie de ces suivis car le phénomène érosif doit être apprécié sur ce bassin versant également.

Schéma synoptique des suivis (centré sur la Kwé)



Deuxièmement, une fois cette érodibilité établie, il est nécessaire de connaître les conditions de référence en zone pas ou peu dégradée afin d'évaluer le profil d'une érosion dite naturelle. Les différences mesurées entre les paramètres et indicateurs de suivi provenant d'une situation potentiellement dégradée par rapport à la situation de référence permettent de définir l'existence et l'importance d'une dégradation.

Cette démarche n'a pour l'instant pas été menée pour le milieu terrestre. Il convient par conséquent de définir ces indicateurs pour le milieu terrestre. À partir de cette donnée de base, doivent être définis :

- En milieu terrestre, le « bruit de fond » sur les bassins de référence pour tous les paramètres (qualitatifs et quantitatifs, physiques, chimiques et biologiques) en période de crue ;
- Une fois ce bruit de fond acquis, il peut alors être défini la signature chimique en milieu marin d'un bassin de référence (suivi 14 à 17) ;
- Les caractéristiques de l'érosion sur des bassins marqués par un type de perturbation (déblais, etc.) sur différents substrats afin de définir le profil type de flux sortants et leur signature en milieu dulçaquicole puis en milieu marin notamment à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

Les indicateurs d'état notamment biologiques en milieux dulçaquicoles (Suivi 13) et marins (Suivi 18 à 21) doivent être construits de manière à refléter le plus fidèlement possible les perturbations d'origine anthropique de sorte à être principalement utilisée en phase ultérieure.

Troisièmement, ces profils type établis, les stations de suivis environnementaux terrestres et marines actuelles doivent être modifiées et agrémentées de nouveaux suivis au regard des éléments exposés ci-après (nouvelles matrices et nouveaux indices à développer). Il s'agit alors d'entrer dans une logique réelle de surveillance à partir des données de terrain permettant d'évaluer l'ampleur de la dégradation (d'origine anthropique donc d'écart à la référence) et d'améliorer le modèle initial.

IV.2.3. Niveau de priorité

Les adaptations du suivi érosion présentées dans cette partie sont nombreuses et possiblement lourdes à mettre en place. Il nous a semblé important de hiérarchiser celles-ci pour leur mise en œuvre et pour l'information érosion qu'elles sont susceptibles d'apporter.

Les niveaux de priorité ont donc été distingués entre :

- Priorité 1 : le plus urgent pour avoir un modèle fiable et bilan de l'érosion ;
- Priorité 2 : moins urgent du fait d'un rapport coût de la mesure/ bénéfice de l'information à court terme moyennement favorable.

Sera également énoncé ce qui relève du « Suivi » pur, permettant d'avoir des réponses à court terme, de ce qui relève du Suivi pour la « R&D » afin de mieux comprendre le milieu et l'origine des produits de l'érosion (anthropique ou non).

Tableau 24. Niveau de priorité et adaptations des suivis proposés dans la surveillance de l'érosion.

		Priorité/Intérêt				Suivi existant		Suivi à créer
		Utilisati-on pour modèle	Priorité 1	Priorité 2	R&D	A conserver	A adapter	
SOL	Etat 1. Vulnérabilité à la perte de matière							
	Suivi 2. Surface de sol dénudé							
	Suivi 3. Couverture végétale							
EAUX CONTINENTALES	Suivi 4. Météorologie							
	Suivi 5. Limnimétrie							
	Suivi 6. Règle topographique							
	Suivi 7. Erosion des ravines							
	Suivi 8. Parcelles de ruissellement							
	Suivis 9. Physico-chimie eau et sédiments (Quantification des MES)							
	Suivi 10. Piège à sédiment							
	Suivi 11. Bassin de décantation minier							
	Suivi 12. Quantification du colmatage							
	Suivi 13. Indicateurs biologiques							
EAUX CÔTIÈRES ET MARINES	Suivi 14. Turbidité et salinité en continu dans la colonne d'eau							
	Suivi 15. Flux de particules dans la colonne d'eau							
	Suivi 16. Flux en métaux dissous							
	Suivi 17. Composition des sédiments déposés sur le fond							
	Suivi 18. Habitats macrobenthiques et ichtyologiques							
	Suivi 19. Communautés coralliennes							
	Suivi 20. Herbiers de phanérogames							
	Suivi 21. Macrofaune benthique de substrat meuble							

Avertissement

Les éléments de suivi proposés ci-après ne s'entendent que pour la surveillance de l'érosion. Les adaptations des protocoles font en partie abstraction des autres objectifs de surveillance sur l'environnement : surveillance des rejets de polluants dans les différents compartiments, dégradation des biotopes et biocénoses autres que celles liées à l'érosion, surveillance limnimétrique liée aux assecs, etc. Néanmoins nous avons tenté de faire apparaître les mesures qui pourraient sembler contradictoires et qui peuvent nécessiter un choix (coût/avantage) de la part des organes de vérifications.

IV.3. Evaluer l'étendue des différentes aires vulnérables

ETAT 1	Vulnérabilité à la dégradation
Priorité	1, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	1 seule fois au plus tôt
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	Faible : 1 géomaticien assisté de 2 à 3 experts thématiques Analyse SIG : 3 jours pour une personne + 1 ou 2 jours de terrain pour vérification
Ressource matérielle	PC + acquisition d'image
Adaptation du suivi actuel	Nouvel outil
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Carte et rapport d'interprétation

Un état initial par analyse géo-spatiale du secteur du projet minier avant son implantation est nécessaire (sans doute disponible auprès de la DITTT). La répartition dans l'espace des zones a priori vulnérables dans un premier temps sera complétée au fur et à mesure grâce aux données acquises sur l'érodibilité et la sensibilité à la dégradation de zones témoin. La télédétection (images satellites, images radar ou photos aériennes, photos par drones) offrent l'avantage de cartographier des surfaces et de pouvoir se répéter dans le temps selon une cadence adaptée au suivi que l'on veut faire. La cartographie des différents écosystèmes végétaux a été réalisée avec une relative bonne précision. Un état des lieux des différentes surfaces dégradées doit être effectué avec la même précision. Il s'agit **des sols ou des surfaces excavées à nu, des remblais, des zones de sédimentation, des chemins de l'eau**. Les zones à infiltration réduite (routes goudronnées, bâtiments, édifices) ne sont pas considérées comme vulnérables en tant que telles mais doivent être répertoriées comme participant à la nouvelle « écologie » de l'ensemble.

IV.3.1. Formations végétales

La cartographie des différents écosystèmes végétaux a été réalisée avec une relative bonne précision sans qu'il soit nécessaire de refaire ce travail. Pour assurer une continuité du travail réalisé, il faut garder les mêmes paramètres⁸ (signatures spectrales) pour la végétation que dans le rapport de « Blue-cham ».

⁸ Le protocole de l'étude BlueCham précise que le point zéro de la couverture végétale a été réalisé à l'échelle 1/2500 (1 cm = 25 m). L'étude est faite à partir de l'analyse des images satellitaires GeoEye 1 de 2011 (détail à 0,5 m). Le modèle numérique de l'analyse est celui du Gouvernement de Nouvelle-Calédonie à la résolution de 10 m ou de 50 m. Le protocole détaillé est donc reproductible aisément. Observatoire de l'environnement en Nouvelle-Calédonie. OEIL
11 rue Guynemer I 98800 Nouméa - Tél. / Fax : 23 69 69 - www.oeil.nc

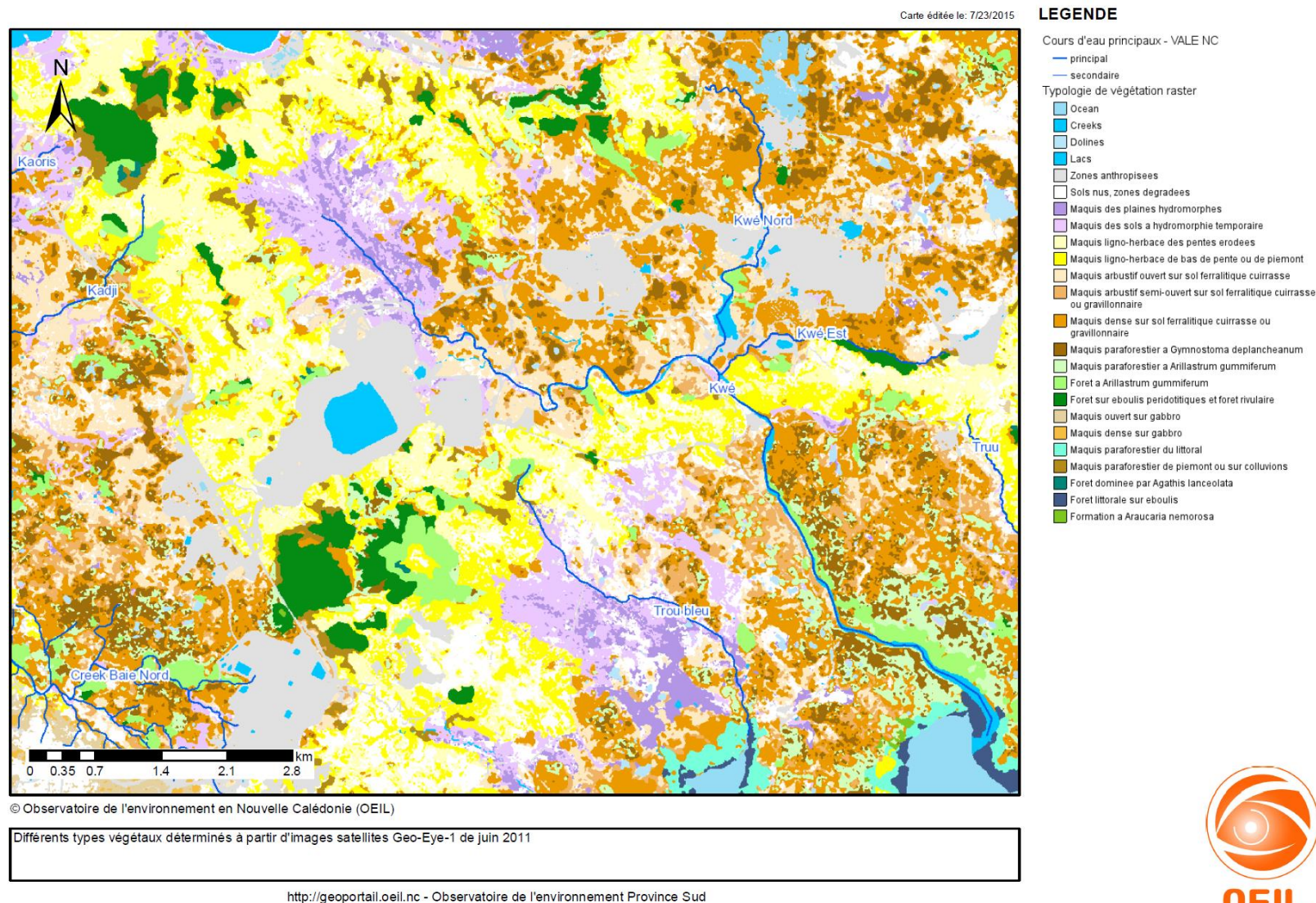


Figure 17. Cartographie des différents types végétaux sur la zone d'influence de Vale NC (interprétation à partir d'image satellites GEO-EYE de juin 2011)

IV.3.2. Sols

IV.3.2.a. Les sols à nu

i. Les différents faciès

Les sols à nu de la zone peuvent présenter des faciès très différents avec des contraintes très différentes vis à vis de l'érosion et du potentiel de fertilité et donc de régénération du couvert végétal en cas de sa disparition (Tableau 2). Cette érodibilité est pour le moment estimée mais doit être mesurée pour parfaire la carte des zones vulnérables.

➤ Les sols sur péridotites

- L'horizon A, rouge très sombre, parfois avec une croûte pelliculaire riche en gravillons, donc capacité de rétention en eau très faible, couleur sombre qui absorbe la chaleur d'où des grosses difficultés de régénération naturelle à partir de semences ou graines. Complètement carencé en éléments minéraux. CEC très basse, capacité d'échange anionique (caractère gérique). Rétrogradation rapide de P ;
- L'horizon B jaune - orangé, capacité de rétention en eau sans doute supérieure, carencé en éléments nutritifs, capacité de rétention en P très élevée ;
- Horizon C, capacité de rétention en eau, balance Ca/Mg totalement déséquilibrée provoquant une carence en Ca rédhibitoire pour la croissance de la plupart des plantes ;
- Horizon R, (roche mère de type péridotite) apparaissent après excavation du saprolite, parfois fracturé, étanche et très dur.

➤ Sols sur gabbros très peu étudiés

Moins déséquilibrés que les sols sur péridotite, plus acides, à kaolinite avec de plus grandes possibilités de colmatage. Moins de problèmes potentiels de rétrogradation du phosphore et balance Mg/Ca sans doute moins déséquilibrée (à vérifier). Sols sans doute moins drainants.

ii. Leur position dans l'espace

Les sols sur les parties hautes (amont) ou les parties les plus en pente sont les plus exposés à l'érosion hydrique. La longueur et le pourcentage de la pente sont souvent positivement corrélés à l'intensité de l'érosion. Les fortes pentes sont exposées aux glissements de terrain.

Les piémonts sont fortement exposés aux érosions ravinaires car ils concentrent les flux d'eau à énergie croissante en fonction de la longueur et du degré de pente.

Tableau 25. Comportement et contraintes à l'érosion et au reboisement des différents horizons apparaissant à la surface (Asconit, 2014)

Horizons	Facteurs limitant l'érosion	Contraintes physiques	Contraintes chimiques
PERIDOTITE			
Cuirasse continue	Difficile à éroder	Surface chaude imperméable Induration	Oligotrophe ⁹

⁹ Très faibles quantités de nutriments (Ca, K, P, oligo-éléments Cu, Mo, etc...), mais aussi en Si assimilable pour les horizons supérieurs des sols sur péridotites. L'absence de graminées est un fort marqueur de cette carence qui n'a jamais été bien étudiée à ce jour.

Cuirasse fragmentée	Difficile à éroder Perméable Concentre l'eau entre les fragments Réduit l'évaporation	Les plantes ne peuvent se développer que dans les interstices	Oligotrophe ⁹ CEC très faible Rétrogradation P Absence de Si assimilable
Roche fragmentée en surface	Difficile à éroder Perméable Concentre l'eau entre les fragments Réduit l'évaporation	Les plantes ne peuvent se développer que dans les interstices	Oligotrophe ⁹ CEC très faible
Horizon gravillonnaire	Très perméable	Chaud Parfois micro-cimenté Rétention en eau très faible	Oligotrophe ⁹ CEC très faible Rétrogradation P Absence de Si assimilable
Horizon meuble jaune	Très perméable	Rétention en eau faible Possibilité de croûte ¹⁰ ?	Oligotrophe ⁹ CEC très faible Rétrogradation P Absence de Si assimilable
Horizon saprolite et/ou remblais miniers	Rétention en eau un peu plus forte	Moins perméable Faible cohésion ² Possibilité de croûte ¹⁰ ?	Oligotrophe ⁹ Balance Mg/Ca Rétrogradation P Métaux lourds en zone hydromorphe seulement.
GABBRO*			
Carapace ou Roche fragmentée	Difficile à éroder, perméable, concentre l'eau entre les fragments Réduit l'évaporation	Les plantes ne peuvent se développer que dans les interstices	Oligotrophe ⁹
Horizon meuble beige pâle à rose pâle	Rétention en eau un peu plus forte que péridotite	Moins perméable, possibilité de zones plus hydromorphes ¹¹ Possibilité de croûte ¹⁰	Oligotrophe ⁹ Acidité ³ Al échangeable ³
Horizon saprolite	Rétention en eau un peu plus forte	Moins perméable Possibilité de croûte ¹⁰	Oligotrophe ⁹ Acidité ³ Al échangeable ³

Pour tous les horizons, il n'existe aucune mesure de la capacité de rétention pondérale en eau du sol (reconstituer la courbe à différents pF), ni les capacités de gonflement-retrait de ces sols (capacité de rétention volumique). Il est donc peu possible de répondre aux questions de capacités du sol à retenir l'eau après un gros événement et à en différer le ruissellement de subsurface.

Il faudrait procéder au prélèvement in situ d'échantillons non perturbés (cylindres de 100cm³) des horizons pédologiques les plus représentatifs des profils de sol en place ainsi que de déblais, d'en mesurer la densité apparente et réelle, la courbe de rétention en eau (presses Richards et planche à succion) et de passer les échantillons au rétractomètre (Assi et *al.*, 2014 ; Braudeau et Mohtar, 2009 ; Braudeau et *al.*, 2014) pour distinguer la macroporosité (agit comme un stockage provisoire facilement accessible pour les gros événements) de la microporosité (stockage de l'eau lors des contraintes de sécheresse). Cela sert à mesurer la variabilité des propriétés pédo-hydriques dans différents compartiments de l'écosystème en mesurant leur capacité de rétention en eau avant ruissellement.

¹⁰ Les propriétés des sols de Nouvelle Calédonie à créer des agrégats stables à l'eau n'ont jamais été étudiées ; l'érodibilité des sols aussi bien sur péridotite que sur gabbro n'est pas connue.

¹¹ Les propriétés physiques (infiltrabilité) et chimiques (acidité d'échange, rétrogradation du phosphore, balance cationique) des sols sur gabbro comparativement aux sols sur péridotites sont très peu décrites dans la littérature. Ces sols sont sans doute plus acides avec une CEC bien plus élevée mais une toxicité aluminique potentielle. Sans doute chimiquement plus faciles à mettre en valeurs que les sols sur péridotites mais A VERIFIER.

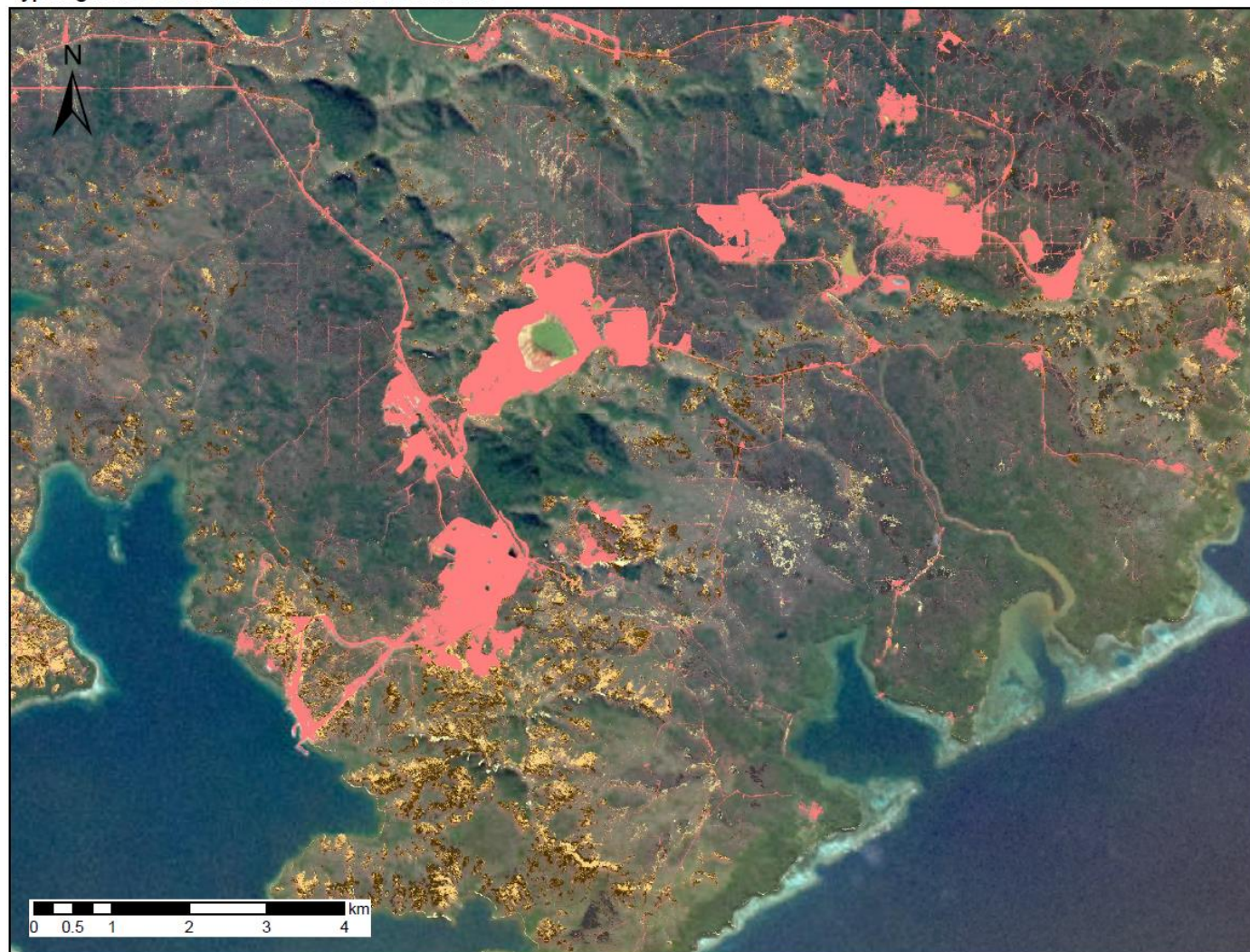
Typologie des sols nus sur le secteur de VALE NC

Carte éditée le: 7/21/2015

LEGENDE

Typologie des sols nus raster

- Cuirasse en place
- Cuirasse potentiellement remaniée
- Laterites en place
- Laterites potentiellement remaniées
- Ravines, lavaka, érosion diffuse
- Sols nus autres
- Depot sédimentaire en transit ou à vif
- Sols anthropisés



© Observatoire de l'environnement en Nouvelle Calédonie (OEIL)

Figure 18. Typologie des sols nus sur la zone d'influence de Vale NC.

IV.3.2.b. Les sols sur déblais

- La nature des déblais est importante
 - Les horizons A et B sont décapés pour avoir accès à l'horizon BC qui est exploité compte tenu de sa relative richesse en Nickel (NiO). Les remblais peuvent avoir différentes origines soit de décapage (horizon A ou C) soit résiduels avec des refus.
 - Si les déblais proviennent d'horizons BC (le saprolite) profonds où l'on exploite le nickel : Le rapport Ca/Mg des cations échangeables est déséquilibré en faveur du magnésium (rapport Mg/Ca >10 pouvant atteindre 100). Cela induit des carences en calcium. C'est plus rédhibitoire pour la croissance des plantes que les horizons A et B (caractères gériques et oligotrophes). Absence de phosphore. Les saprolites d'où sont extraites le nickel sont également riches en d'autres métaux lourds comme Co, Cr, Mn (qui sont à l'état d'oxydes donc très peu solubles sauf s'ils sont dans des milieux réducteurs comme des zones marécageuses avec peu de circulation d'eau et de la matière organique qui absorbe l'oxygène).
- L'âge et la forme des déblais est importante
 - Les déblais les plus anciens n'ont pas été stabilisés lors de leur dépôt et sont paradoxalement plus érodibles que les dépôts les plus récents obéissant à un cahier des charges plus strict. Il n'en demeure pas moins que ces déblais sont très difficilement re-végétalisables et ont une absence de cohésion de par une totale absence de structuration du sol.
 - La forme des déblais/talus est importante car elle va conditionner le possible départ de ruissellement de surface et ou de rigoles d'érosion.

IV.3.2.c. Les sols compactés

Les zones compactées (chemins, voie d'accès), ont une conductivité hydraulique très faible et donc fortement soumises au ruissellement. Ces zones sont très peu propices à la régénération végétale, et potentiellement très érodibles en particulier dans les zones en aval par la canalisation des flux hydriques et la grande vélocité des flux surtout sur les aires de contact entre les zones compactées et non compactées.

IV.3.2.d. Aires de dépôt de matériel érodé

Ces dépôts non contrôlés de matériaux peu stables, non consolidés, qui peuvent être repris par l'érosion hydrique peuvent constituer de vastes surfaces peu fertiles, difficiles à recoloniser par la végétation.

La cartographie des zones érodibles a été faite en 2004 par Landloch. Elle donne une représentation acceptable de la carte de vulnérabilité. Toutefois elle ne prend pas en compte les risques potentiels liés au surcroît d'activité routière (camions Cf rapport Lanloch), ni aux nouveaux remblais et déblais dus à l'exploitation minière sensu stricto. Il faut donc remettre la carte à jour et la compléter (et l'intégrer dans un SIG si cela n'a pas été fait).

Il n'est pas non plus mentionné les aires de dépôts potentiels après érosion.

IV.4. Mesurer l'évolution spatiale de la dégradation

IV.4.1. Suivi diachronique des sols nus

SUIVI 2	Surface de sol dénudé / évolution de la dégradation
Priorité	1, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	Tous les 4 ans
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	Faible : 1 géomaticien assisté de 2 à 3 expert thématiques Analyse SIG : 3 jours pour une personne plus 1-2 jours de terrain pour vérification
Ressource matérielle	PC + acquisition d'image
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Carte et rapport d'interprétation

Il s'agit de mener une étude diachronique d'images montrant l'évolution des zones sensibles à l'érosion : méthode rapide à mettre en place et à suivre, qui peut être facilement couplée avec d'autres méthodes de mesures in situ (comme le piège à sédiments). La base de ce travail reposerait sur l'étude précédente de vulnérabilité.

Les outils (satellite, radar, drone) sont identiques à ceux pour l'état des lieux et doivent être adaptés aux surfaces test suivies et/ou aux événements majeurs (cyclones) susceptibles de modifier l'hydrologie et la géomorphologie du paysage et des sédiments.

La fréquence de mesure : tous les 4 ans serait suffisant, sauf événement exceptionnel comme un cyclone de grande amplitude avec un retour de 10 ans qui nécessiterait un nouvel « état des lieux » immédiatement après son passage.

Les mesures de surface concernent les zones sensibles décrites précédemment :

- le couvert végétal
 - mesures de colonisation ou de dégradation de surface ;
- Les sols
 - En place et à nu (bien délimiter la nature des horizons) ;
 - Les déblais remblais et autres dépôts anthropiques non consolidés ;
 - Les aires compactées (surfaces terrassées, chemins) ;
 - Les aires de sédimentation.
- les eaux
 - Les étendues d'eau (mares, bassins) ;
 - Les chemins de l'eau potentiels (routes) et actifs (cours d'eau permanents et temporaires, ravines).

Remarque : Les zones de construction ne figurent pas dans les zones vulnérables à l'érosion (contrairement aux surfaces terrassées ou chemin) mais altèrent l'infiltration de l'eau donc génératrices de ruissellement.

IV.4.2. Suivi du couvert végétal

SUIVI 3	Couverture végétale
Priorité	2,R&D, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	Annuel ¹² pendant 2 ans puis tous les 2 ou 4 ans
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	- Une ligne permanente¹³ de 50 m en milieux dense : environ 3h à deux personnes. - Un carré de biomasse¹⁴ herbacée en milieu dense : 4 h de récolte des plantes et tri sur place, séchage et mesures des biomasses : 1 journée pour une personne. - Un carré de biomasse arborée de 100m² en milieu dense : 1 journée à 1 personne. - Un carré permanent de lecture¹⁵ : environ 3h à 1 personne.
Ressource matérielle	PC + acquisition d'image
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Carte et rapport d'interprétation

La caractérisation de la végétation de chaque habitat est déjà effectuée. Elle s'intéresse principalement au recouvrement et densités des espèces.

La perte de couvert arboré et le remplacement par le développement de fougères est par exemple un signal d'alerte d'une zone qui a été brûlée au préalable et qui a donc potentiellement été très érodible d'autant plus dans cette zone où les graminées sont très peu ou pas représentées.

Il est désormais nécessaire d'installer des parcelles de suivis (Ligne permanente, carré permanent, Carré à Biomasse...) afin de corréliser les résultats avec les phénomènes érosifs mesurés par ailleurs. Chaque parcelle sera détaillée (végétation, cartographie, sol). La vitesse d'érosion d'un sol dépend fortement du couvert végétal. En effet, ce dernier a un rôle de protection du sol vis-à-vis des phénomènes érosifs (pluies, ruissellements, vents, gel, dessèchement...). La végétation est sensible aux impacts anthropiques (terrassement, poussières, drainage, broutage...), le suivi de la végétation est donc un outil indirect pour suivre l'extension ou la régression de l'érosion d'un secteur. Le suivi précis de la végétation par ligne permanente / carré permanent peut être effectué avec une périodicité plus grande (2 - 4 ou 5 ans) en

¹² Le suivi peut être réalisé tous les 4 ans dans les secteurs les plus éloignés des sources de perturbations, et être réduit à 2 ans seulement dans les secteurs les plus soumis aux perturbations (abords immédiats des mines, pistes routières, sous les vents dominants...). La périodicité des analyses n'est pas fixée de manière définitive. Elle peut être discutée avec les experts qui sont sur le terrain. Mais attention : à la vue de la fragilité de l'écosystème et de sa faible résilience aux perturbations, il serait bon de commencer le suivi de manière annuelle sur toutes les parcelles, et d'adapter la périodicité en fonction de la pression de / distance de la perturbation après quelques années. En effet, un écosystème fragile peut basculer dans une dynamique de dégradation très rapidement s'il dépasse un seuil (résilience). Ce seuil peut-être atteint par accumulation de perturbations chroniques, ou en une seule fois.

¹³ Une ligne permanente est un dispositif de suivi de l'évolution de la végétation. Elle peut faire entre 25 et 50 m de longueur. La lecture de la végétation se fait avec une aiguille et par points contacts tous les 10 cm de longueur et par strate de 10 cm de hauteur. La ligne est installée une fois et lue régulièrement (3 fois par an pendant plusieurs années).

¹⁴ Un carré de biomasse peut faire de 1m² de superficie si la végétation est dense (100 % de recouvrement) à 10 m² de superficie si la végétation est très éparse (moins de 25 % de recouvrement).

¹⁵ Le carré permanent de végétation est basé sur le principe de la ligne permanente mais rapporté à une surface. L'analyse de la végétation se fait par lecture de points contacts le long de lignes distantes de 10 cm. Chaque point contact est distant de 10 cm du précédent (cf schéma ci-après).

fonction de l'éloignement par rapport aux perturbations. Mais attention : Au vu de la fragilité de l'écosystème et de sa faible résilience aux perturbations, il serait bon de commencer le suivi de manière annuelle sur toutes les parcelles, et d'adapter la périodicité en fonction de la pression de perturbation après quelques années.

Le suivi de la végétation est un outil adapté à l'échelle locale. Il vient en complément de l'analyse spatiale par SIG en réduisant les limites de la télédétection. En effet, le suivi in situ permet d'avoir une vision :

- instantanée des impacts (réactivité à quelque jours/ semaines) de la végétation. Ce que ne permet pas l'analyse spatiale ;
- des effets de bordures (évolution des écotones ; de l'extension / réduction des surfaces découvertes sous les arbres ; présence d'espèces envahissantes à des stades juvéniles...). Ce qui ne peut pas être détecté par analyse spatiale surtout en présence de couvert arboré.

Le suivi de la végétation se fera par :

- Suivi de lignes permanentes (5 sites explicités ci-après) :
Des lignes permanentes seront installées sur des parcelles de suivis. Ces lignes permettront de suivre l'évolution de la végétation et / ou de la couverture végétale (et donc de l'extension de l'érosion). Chaque ligne permanente sera matérialisée par un point de départ et un point d'arrivée. Elles feront entre 25 et 50 m de longueur. Un point de lecture sera réalisé tous les 10 cm avec une aiguille graduée de 10 en 10 cm. La lecture se fera ainsi :
 - 1) Tendre un décimètre entre les deux piquets de la ligne permanente
 - 2) Planter l'aiguille sur le point de lecture.
 - 3) Lire les contacts des plantes sur l'aiguille sur chaque hauteur (depuis le bas vers le haut) : 1 contact, 2 contacts, 3 contacts, 4 contacts, 5 contacts, au-delà de 5 contacts noter végétation dense.
 - 4) Décrire le substrat : litière, sol nu, roche...
 - 5) Déplacer l'aiguille de 10 cm et recommencer l'opération jusqu'à la fin de la ligne.

La durée de la lecture d'une ligne permanente dépend de sa longueur et de la densité de végétation. Il faut compter 2 à 3 h pour une ligne de 50 m avec végétation dense avec 2 opérateurs.

L'analyse de la végétation se fait par un calcul de la fréquence relative de chaque espèce en fonction du nombre de points contacts, et une estimation de la longueur du substrat. L'évolution annuelle est calculée en comparant les fréquences sur plusieurs années.

- Suivi de carré de biomasse (5 sites explicités ci-après) :
Sur un carré d'1m², toute la végétation herbacée au sol est ramassée et triée par espèce. La végétation est pesée à l'état sec. L'évolution du peuplement est faite par comparaison interannuelle.
- Suivi de carré de biomasse arborée (5 sites explicités ci-après) :

Sur une parcelle de 100 m², la taille et le volume du houppier de chaque arbre est mesuré. Son état de santé est noté (bon, moyen, mauvais). La comparaison interannuelle permet d'estimer l'évolution du peuplement.

- Suivi de carré permanent (ponctuel sur zone soumise à érosion intense) :

Le carré permanent est le même principe que la ligne permanente. Il permet de lire de plus petites surfaces ayant des évolutions rapides.

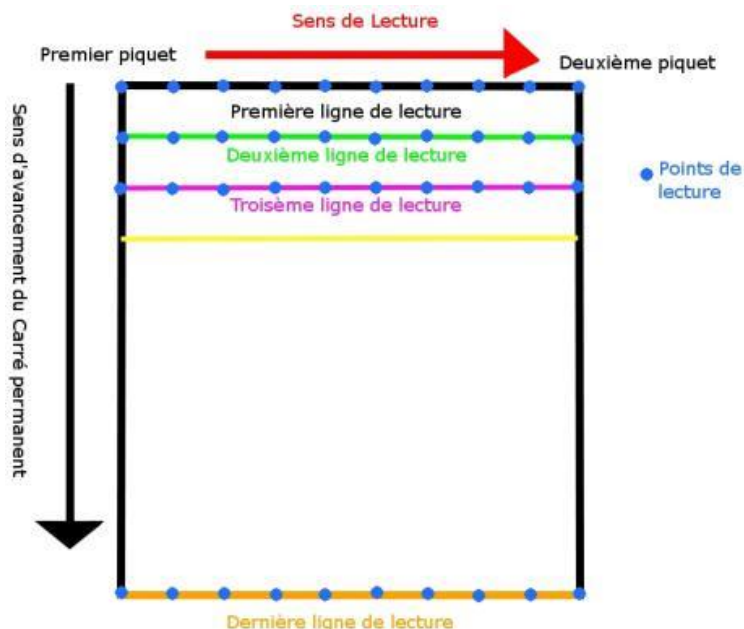


Figure 19. Exemple de carré permanent et sens de lecture

Les 5 sites proposés seront définis avec l'exploitant sur les 3 branches de la Kwé, 1 site sur le creek de la baie Nord et un dernier site sur la Kwé aval. Les critères de choix pour l'emplacement des parcelles de suivis nécessitent de bien définir l'objectif à atteindre :

- Orienter la gestion du site (qu'elle soit conservatoire, économique, paysagère...)
- Améliorer la connaissance de la dynamique et de la structure de la végétation d'un site ;
- Acquérir des informations patrimoniales directes (suivi d'espèces de plantes particulières, d'habitats naturels...) ou indirectes (sur les animaux...) ;
- Suivre l'impact d'une activité sur l'écologie du site (espèces indicatrices, pédologie, biomasse végétale...),

Sur le terrain, le phytosociologue choisit l'emplacement de ses relevés selon deux niveaux de perception successifs (GEHU, 1980) :

- une première vision à l'échelle paysagère l'amène à choisir les éléments majeurs, significatifs, représentatifs et répétitifs du paysage végétal (formations végétales) qu'il veut étudier ;
- une deuxième vision à l'intérieur de l'élément paysager choisi guidera le choix de l'emplacement du relevé et de ses limites. Les critères fondamentaux de ce choix d'emplacement et de limites du relevé sont l'homogénéité floristique et l'homogénéité écologique de la station.

L'installation des quadrats se fait au centre des groupements végétaux, sur des critères d'homogénéité du tapis végétal. La taille doit être adaptée au type de végétation, comme pour les relevés phytosociologiques (aire minimale). Pour les quadrats de grande surface, il est recommandé de les subdiviser en "sous-quadrats". En cas de végétation très homogène, quelques quadrats suffisent. En cas

de mosaïque fine, on préférera des transects ou bien des quadrats distribués de manière systématique (selon une maille carrée) ou aléatoire. Si l'objectif est de suivre la transition entre deux groupements végétaux, ou une variation de la végétation liée à un gradient dans les conditions de milieu, on utilisera de préférence des transects linéaires, installés perpendiculairement aux lignes de transition. Dans le cas d'un suivi d'un impact, la distance à la perturbation sera prise en compte tant pour les parcelles potentiellement soumises à l'impact que pour les parcelles témoins (éloignées le plus possible de l'impact).

Le repérage des quadrats est primordial. Ils sont positionnés sur une carte à partir de repères visibles (arbre, buisson, angle de clôture, borne...), et d'un levé GPS. Il est presque indispensable de matérialiser sur le terrain un angle ou le centre du quadrat avec un piquet solide (métal ou matière synthétique). Les piquets peuvent être enterrés (notamment dans les zones pâturées) et peuvent être retrouvés par la suite avec un détecteur de métaux.

Les espaces proposés sont :

- Les abords du site exploités (forêts, prairies...) ;
- Les ravines ;
- Les terrils ;
- Des espaces vierges comme références.

Le choix définitif sera fait in situ après visite des sites miniers et après concertation des différents acteurs du projet. Si possible les parcelles témoins doivent être dans le même bassin versant, situées "écologiquement" en amont des perturbations. C'est à dire dans un secteur qui ne subit pas les perturbations (en dehors du site minier, en dehors des vents dominants...).

Toutes ces investigations sont finalement traitées de manière cartographique et en bilan annuel en fonction de type de flore. Ces outils permettront d'évaluer la perte de végétation (extension des zones nues) dans le temps¹⁶.

IV.5. Mesurer les flux hydriques

IV.5.1. Stations de mesure des pluies

SUIVI 4	Météorologie
Priorité	1, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	Toutes les 7 minutes pour les pluviographes installés au niveau des ISCO
Difficulté	Faible
Ressources humaines	2 personnes en charge de l'entretien hebdomadaire et lors des événements pluvieux intenses 1 personne en charge du contrôle et de la bancarisation des données dans la base de données ¹⁷ .
Ressource matérielle	1 pluviographe opérationnel et télétransmis par site de suivi sédimentaire
Adaptation du suivi actuel	Installation de 6 pluviographes supplémentaires

¹⁶ La télédétection permet de suivre de grands secteurs mais ne permet pas de détecter les petits secteurs où l'érosion débute, ni les prémices / seuils de la dégradation. Les petites parcelles permettent de suivre et d'appréhender ces changements avant qu'elles ne soient détectables en télédétection.

¹⁷ Poste à généraliser sur l'ensemble des suivis érosion (voire environnementaux).

Suivi actuel à conserver	Tous conservés
Produit	Chronique de précipitation à corrélérer avec les débits liquides et solides au niveau de la station

Pour mesurer les pluies dites « érosives » de forte intensité, il faut installer des pluviographes, si possible au niveau de chaque station de mesure du flux sédimentaire (variabilité spatiale). Il serait également intéressant d'installer des pluviomètres (dispositifs bien plus légers) supplémentaires pour vérifier la variation spatiale de la pluviosité¹⁸ à l'échelle du bassin versant mais ils demandent un effort plus important de collecte de données (équipe de relève). Pour ces pluviographes il est nécessaire de mesurer les intensités de pluies à un pas de temps de 6 à 7 minutes.

Les pluviographes enregistreurs enregistrent le temps nécessaire à la pluie pour remplir un auget généralement de 20g (2ml) en fonction de la section d'ouverture du pluviographe, et sont en général calibrés pour 0,1mm de pluie. L'appareillage ainsi que la forme des augets doit être capable d'enregistrer des intensités pouvant dépasser 200mm/h dans les cas les plus extrêmes. Les intensités peuvent ainsi être mesurées au pas de temps de la minute mais sont souvent données dans la littérature pour des pas de temps de 6'. En effet, la fréquence d'acquisition de 15' utilisée sur les stations météorologiques généralistes ne permet pas de connaître les intensités maximales.

A chaque prévision d'un avis de dépression ou cyclonique, les pluviographes devront faire l'objet d'une vérification au même titre que les limnigraphes et préleveurs automatiques. Il en sera de même à la suite du passage de ces événements exceptionnels..

IV.5.2. Les stations de mesure des débits

SUIVI 5	Limnimétrie
Priorité	1, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	Toutes les 3 minutes
Difficulté	Faible
Ressources humaines	2 personnes en charge de l'entretien hebdomadaire et lors des événements pluvieux intenses (alarme SMS) 1 personne en charge du contrôle et de la bancarisation des données dans la base de données
Ressource matérielle	5 limnigraphes
Adaptation du suivi actuel	Installation de 4 limnigraphes supplémentaires sur des seuils de type PARSHALL Les équipes de suivis s'affranchissent des campagnes de jaugeage différentiel
Suivi actuel à conserver	Les autres limnigraphes actuels sont à conserver sous condition d'aménagement de sections de mesure calibre (=fixes)
Produit	Chronique de débit liquide à corrélérer avec les précipitations et le transport solide au niveau de la station

Le réseau de limnigraphes existe déjà. Il est nécessaire d'installer d'autres limnigraphes « emboîtés » pour suivre les flux des cours d'eaux des principaux bassins versants.

Par différence entre le temps enregistré par le pluviographe et la réponse du limnigraphe, on pourra évaluer le temps de réponse du ruissellement et en déduire par calcul les quantités d'eau qui ont été

¹⁸ Action de pleuvoir. Les pluviomètres sont là pour voir la variabilité spatiale de la pluviosité.

stockées par le sol avant le ruissellement (pre-pounding rainfall). Les sols de cet écosystème sont très drainants ; aucune étude systématique n'ayant été réalisée sur la formation des encroûtements de surface ni sur la conductivité hydraulique des différents horizons exposés à la surface du sol, il faut faire une estimation globale pour observer ensuite en détail les causes du ruissellement ainsi que l'origine et la nature des sédiments transportés.

Il faudrait donc installer à minima 5 stations supplémentaires, dont une en amont des zones d'extraction, pour connaître le débit liquide et solide « naturel » ou de base vers la zone OUEST.

Le nombre de stations de suivi pourrait être augmenté en reprenant une partie des stations de « suivi qualité ». Cinq stations supplémentaires seraient un nombre adéquat, si elles sont positionnées sur des bassins versants de petite taille (de l'ordre de 1 à 2 km²). L'idéal serait d'avoir ces stations sur des typologies homogènes (sol, géologie) afin de caractériser chaque type d'érosion.

A noter que le KN14 dans sa situation actuelle ne présente pas un intérêt particulier pour le suivi de l'érosion du fait de sa situation en aval du bassin tampon.

Tableau 26. Disposition des nouveaux limnigraphes.

	Nom	Coordonnées	Contrôle	Dégradation
1	Weir_1_naturel	22°17'4.82"S 166°54'35.78"E	Végétation naturelle dense peu dégradée sur pente Station de référence	NON Station de référence
2	Weir_2_emboîté	22°17'44.67"S 166°55'35.94"E	Aval du seuil jaugeur précédent, contrôle de l'érosion provenant des routes et chemins sur le glacis	Chemins
	KOL	EXISTANT	Situé à l'aval des 2 précédents, contrôle l'érosion issue des déblais	Déblais, remblais, chemins,
3	Weir31_erosion_naturelle OU	22°16'20.54"S 166°56'54.71"E	Contrôle d'une série de ravines d'un versant très dégradé	Ravine naturelle
	Weir32_erosion_naturelle	22°17'56.65"S 166°54'52.93"E	Contrôle d'une série de ravines d'un versant très dégradé	Ravine naturelle
4	Weir_deblais 1 OU	22°17'14.10"S 166°57'48.01"E	Contrôle d'un déblai	Déblais, remblais, chemins
	Weir_deblais2	22°17'58.96"S 166°58'3.59"E	Contrôle d'une série de déblais, tempéré par végétation naturelle	Déblais, remblais, chemins
	KAL Weir collecteur	EXISTANT	Situé à l'aval des 2 précédents, contrôle la Kwé	Déblais, remblais, chemins,

Proposition d'installation de 4 seuils :

1. Pour le contrôle de l'érosion sur pente dans une zone peu dégradée
2. Pour le contrôle des chemins de l'eau sur un glacis peu dégradé
- 1 et 2 sont ensuite comparés à KOL ; les 3 seuils jaugeurs étant emboîtés
3. Pour le contrôle de l'érosion naturelle sur pente, végétation et sol très dégradés (2 sites possibles)
4. Pour le contrôle d'une zone de déblais (2 sites possibles)

Le site 4 est comparé aux données acquises par le collecteur de la rivière Kwé.

A ceux-ci, s'ajoute le complément d'équipement du seuil actuel sur le creek de la baie (6Q) nord afin de suivre les flux de matières. Il n'est pas nécessaire d'ajouter un équipement spécifique sur ce bassin.



Figure 20. Cartographie d'implantation des stations de référence (source : OEIL, google earth)

Chaque station devrait soit se situer sur des seuils naturels (chute, rupture de pente), soit être équipée de seuil PARSHALL, afin d'avoir un contrôle hydraulique stable. Ces ouvrages hydrauliques ont la particularité d'être autonettoyants, donc pas d'accumulation de sédiments en amont contrairement au simple déversoir. De plus, ils assurent une excellente relation hauteur-débit, avec l'utilisation de formules hydrauliques si il n'y a pas possibilité de les calibrer par des mesures de débit.



Photographie 2. Dispositifs Parshall et matériels de mesure associés.

Le pas de temps d'acquisition doit être mené à **3 minutes pour la hauteur d'eau lors d'une variation de débit**. Mais cette mesure peut être conditionnelle. Ainsi, on peut ne pas enregistrer les données si la variation du plan d'eau est inférieure à 1 centimètre par exemple, ou s'il n'y a pas de variation.

Il est indispensable, mais c'est déjà le cas pour le réseau existant, d'équiper les nouvelles stations de mesure de la télétransmission automatique des données, en utilisant le réseau GSM/GPRS.

Toutes les données acquises sont validées par les opérateurs avant entrée dans la base WISKY¹⁹.

Lors des événements intenses, les équipes d'astreinte doivent s'assurer du bon fonctionnement du matériel. Ces nouvelles stations devront donc bénéficier d'un accès sécurisé pour leur accès en véhicule tout terrain ainsi que pour la vérification du module de transmission des données à distance du cours d'eau.

L'installation de nouveaux limnigraphes sur des seuils de types PARSHALL représente un investissement financier non négligeable. Par ailleurs le suivi et l'entretien de ces dispositifs par l'équipe environnement représente également un coût de fonctionnement à ne pas négliger. Cependant il est notable que la donnée ainsi acquise sera de bien meilleure qualité que celle fournie à l'heure actuelle et que l'automatisation sera rapidement compensée par l'économie du personnel pour le suivi des mesures puis la modélisation de l'érosion.

De surcroît, la phase d'étude de base de fonctionnement du milieu prenant fin en 2016, le réseau de connaissance des régimes du réseau hydrographique ne doit plus être mené avec une même intensité : des dizaines d'interventions de jaugeage différentiel annuellement qui donnent certes une idée des débits caractéristiques au niveau de certains points nodaux mais qui n'apportent pas d'information exhaustive sur les débits du réseau superficiel (même s'ils donnent des informations sur les eaux souterraines) et clairement pas les informations nécessaires sur le suivi de l'érosion. Il nous semble dès lors plus opportun de basculer cet effort sur les nouveaux limnigraphes et les limnigraphes bien équipés avec une section fixe. Même s'il n'est pas question d'abandonner le suivi des stations limnimétriques existantes, il est préférable d'avoir des données que l'on peut relier à une série chronologique. Par contre, les mesures ponctuelles n'ont aucune utilité pour ce type de suivi.

IV.6. Mesurer les flux de sédiments

IV.6.1. Les mesures volumiques à l'échelle d'une structure (terril, déblais, ravine) – approche géomorphologique

SUIVI 6	Règles topographiques
Priorité	2, R&D
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	6 mois
Difficulté	Faible
Ressources humaines	2 personnes en charge de la mise en place et du suivi semestriel 1 personne en charge de la bancarisation des données dans WISKY
Ressource matérielle	500 pieux métalliques (50 pieux sur 10 parcelles)
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Chronique annuelle et bilan quinquennal

Pour un talus ou un site de stockage (terril), qui sont potentiellement les plus érodibles, difficiles à faire recoloniser par la végétation, et les plus susceptibles de contenir des résidus de métaux lourds et des rapports Mg^{++}/Ca^{++} complètement déséquilibrés, on peut contrôler au moyen de piquets (ne pas hésiter

¹⁹ Base de données dans laquelle Vale NC capitalise les résultats des réseaux de suivis.

à en mettre 50 voire 100 sur une surface de 1ha maximum) enfoncés profondément avec une tête de 10 cm de hauteur qui dépasse et à partir de cette hauteur on mesurera par distancemètre laser (c'est plus rapide et très précis à partir d'un support fixe sur les piquets fixes) l'épaisseur de sol érodée et ou accumulée dans la structure. Mesurer 1 fois tous les 6 mois et après un événement majeur (pluie de 100 mm par exemple). Attention à bien relier les volumes déplacés aux masses.

Nous n'avons pas à ce jour la cartographie précise des talus et zones de stockage. Notre équipe se tient à la disposition des exploitants pour effectuer une « pré-implantation » sur carte des parcelles de suivi.

SUIVI 7	Erosion des ravines naturelles (ou creek secs)
Priorité	2, R&D
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	6 mois
Difficulté	Faible
Ressources humaines	2 personnes en charge de la mise en place et du suivi semestriel 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base de données
Ressource matérielle	Matériel topographique (théodolite) ou LIDAR
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Chronique annuelle et bilan quinquennal

Ce suivi a pour but de définir des conditions de référence de régime d'érosion sur des zones non impactées. Les ravines naturelles et creek secs sont des pourvoyeurs naturels de sédiments durant les événements pluvieux exceptionnels.

Ainsi, le suivi peut consister à suivre 2 ravines en zone de référence amont des bassins versant (cf. Figure 20) et 2 autres ravines en zone perturbées. Cela permet de confronter, pour un même événement, l'érosion non anthropique à l'érosion anthropique. Ce relève néanmoins de la Recherche et Développement.

On peut procéder de manière similaire sur des ravines naturelles de préférence sur chacun des 2 substrats géologiques (péridotite et gabbro). Le profil en long des cours d'eau peut être modifié au fil du temps, suffisamment pour être mesurable d'une année sur l'autre en fonction de l'intensité du transport solide.

La réponse morphologique du lit ne peut être étudiée que sur une période suffisamment longue. Il correspond à l'élaboration d'un suivi topographique réalisé au niveau du lit actif du cours d'eau qui correspond à la zone à l'intérieur de laquelle le lit, nu ou dénudé annuellement, peut être remanié par érosion ou dépôt. La végétation ne peut s'y développer de manière pérenne et les dépôts des matériaux érodés y sont négligeables.

Le premier examen met en évidence des zones de stockage préférentielles des matériaux au sein du lit. Puis, au rythme des années et de manière discontinue en fonction des débits, ces matériaux atteignent des zones de stockage temporaire du lit. Ces zones peuvent être mises en évidence



avec un indice géomorphologique principal : la rupture de pente.

La réalisation d'un profil en long de toute la ravine implique de procéder par cheminement ou par l'acquisition d'image LIDAR. Cette méthode consiste à choisir des points intermédiaires de mesures. On mesure ainsi des dénivelées successives qu'il suffira d'ajouter afin d'obtenir la dénivelée totale.

Il est également possible d'installer dans 3 ravines différentes (selon les grands types de sols) des marqueurs fixes, puis de mesurer les écartements et profondeurs avec des télémètres laser.

Les mesures des écartements peuvent également être faites avec un DGPS (mais l'équipement est relativement cher).

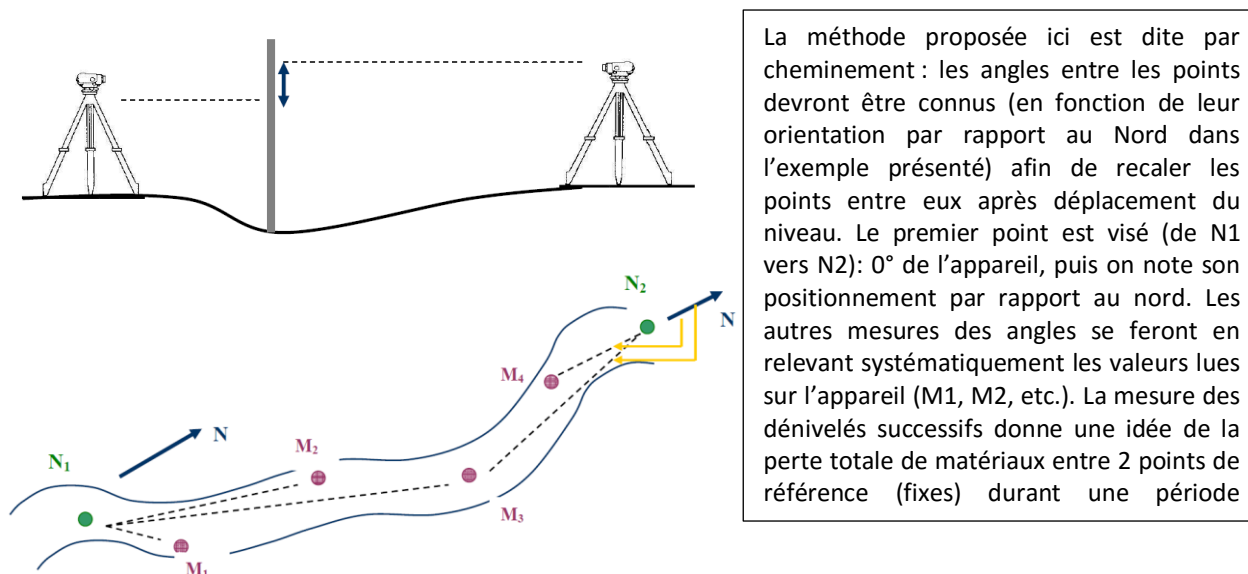


Figure 21. Principe de la méthode par cheminement et visée à la mire (CEMAGREF/PRAM 2009)

Remarque : Les ravines sont l'expression la plus facilement mesurable de l'érosion linéaire par comparaison avec l'érosion en nappe. Cette approche permet d'accéder aux variations de stock de sol et sédiments dans le tronçon mesuré. Néanmoins les entrées et sorties n'étant pas connues, le bilan ne peut être bouclé dans les conditions actuelles de connaissance. Cela reste une étude relevant de la R&D. Pour rapporter les masses aux volumes, il faut contrôler les valeurs de densité apparente de la terre fine pour chaque type de substrat et les valeurs pour la Nouvelle-Calédonie sont bien plus élevées que les références généralement obtenues dans la littérature. Les densités apparentes des différents horizons peuvent être très différentes.

IV.6.2. Evaluation de l'érodibilité de différents substrats (horizons) en fonction de situations topographiques

SUIVI 8	Parcelles de ruissellement
Priorité	2, R&D, (utilité pour le modèle)
Périmètre	R&D parcelles à mettre en zone de référence
Fréquence	Mensuelle, ou immédiatement après un événement de plus de 30mm
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	1 personne en charge de la mise en place et du suivi mensuel (2 jours par mois)

	pour toutes les parcelles) ²⁰ 1 personne en charge de la bancarisation des données dans WISKY
Ressource matérielle	Installation de 15 parcelles d'érosion de 1m ² (5 sites avec 3 répétitions par site) correspondant aux zones testées par Lanloch : limonite jaune en place, limonite ancienne (rouge) en place, zone gravillonnaire, remblais (2 sites différents). Coût d'une parcelle environ 100€ (Cf : Janeau et <i>al.</i> , 2003). Positionner les parcelles d'érosion sur une pente moyenne identique (par exemple entre 10 et 15%)
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel sur 15 parcelles de ruissellement

Il est important de bien connaître la nature des sédiments érodés et/ou re-sédimentés. C'est à partir de la bonne connaissance de l'érodibilité et de la nature des substrats à restaurer que l'on pourra développer une stratégie conservatrice. Ces mesures de détachabilité s'effectuent par parcelles de ruissellement ou par simulation de pluie.

Ces 2 méthodes donnent une idée de la détachabilité d'un substrat. Pour connaître les priorités à donner pour la protection et la végétalisation des zones à nu, ces méthodes permettent de caractériser l'érodibilité comparée des différents horizons sols à nu dans leur contexte topographique et s'attacher à conserver en premier lieu les zones les plus sensibles à la dégradation.

- Les parcelles de ruissellement sont « passives » et enregistrent des évènements naturels. Elles mesurent le potentiel d'une surface à infiltrer (ou ruisseler) et l'érodibilité de cette surface (on utilisera préférentiellement la notion de détachabilité potentielle des particules et leur transport sur une courte distance). D'une taille de 1m², enfoncées de 20 cm dans le sol, elles possèdent une gouttière qui permet de recueillir dans un récipient (poubelle de 50 à 80l) la lame d'eau ruisselée ainsi que la charge en sédiments. Associées à un auget et synchronisées avec le pluviographe, elles permettent de mesurer l'initiation du ruissellement par rapport au début de la pluie.
 - Ces parcelles enregistrent le détachement des particules mais ne mesurent pas l'érosion sensu stricto qui est un phénomène plus vaste à l'échelle de la topographie et du bassin versant. En partant du principe que les parcelles enregistrent la détachabilité des sols soumis à l'érosion de type « splash ». Les parcelles sont simples à mettre en place. Il est préférable d'étudier le comportement des sols dans une toposéquence. Cependant elles n'offrent aucune indication sur la translocation des particules le long d'une pente (érosion en amont/sédimentation en aval) ni sur l'effet du ruissellement le long d'une pente. Elles nécessitent toutefois un personnel pour le suivi permanent (après chaque évènement pluvieux).
 - Il est préférable d'avoir 3 répétitions par site étudié et il serait utile de répartir les parcelles sur le plus grand nombre d'horizons meubles possibles soit 6 à 9 parcelles à implanter (comme définis dans le Tableau 11).

²⁰ Suggestion : Ce travail peut faire l'objet d'un suivi de stage de géologie/pédologie pour Licence 3 ou Master 1 de l'Université de Nouvelle Calédonie avec un coût raisonnable. Cette étude devrait être faite pour longue période d'au moins 3 ans pour en dégager des données scientifiques fiables.

- La simulation de pluie est plus lourde à mettre en place : c'est une « douche », reliée à un système d'aspersion dont le débit est contrôlé ; mais elle ne nécessite pas de suivi puisqu'elle mesure directement l'infiltrabilité et l'érodibilité (charge en sédiments de l'eau ruisselée prélevée dans l'exutoire de la parcelle) en fonction de l'intensité d'une pluie, avec les mêmes parcelles que les parcelles d'érosion. Après cela il est inutile de mettre en place le suivi des parcelles d'érosion.
 - Une simulation de pluie nécessite une structure en toile protégeant le simulateur du vent, groupe électrogène, des motopompes, des contrôleurs de pression, beaucoup de flacons (plusieurs centaines par campagne pour collecter les sédiments).
 - Généralement on effectue une première pluie de faible intensité (30mm/h pendant 30 minutes) et on refait une simulation 24h plus tard (effet d'une pluie antécédente) avec un débit plus soutenu proche des grosses pluies érosives (60 mm/h ou davantage pendant 30 minutes).

Il faut s'appuyer sur les résultats de l'étude comparative Landloch pour installer des parcelles d'érosion qui vont enregistrer des pluies naturelles sur les zones sensibles comme la limonite jaune récente, la limonite rouge ancienne, les horizons compactés des remblais oxydiques, les remblais riches en saprolite (plus riches en serpentine et moins riches en goethite) - inutile d'en mettre sur la cuirasse en place, la cuirasse fragmentée ou sur un chemin - la zone sensible étant le contact entre le chemin compacté et le sol en place.

IV.6.3. Les mesures volumiques d'érosion dans les cours d'eau

Pour évaluer un volume érodé à partir d'un bassin versant : il faut évaluer la masse de sédiments exportés par les cours d'eau en essayant de prendre en compte la partie qui se redépose au sein du cours d'eau, dans le fond du cours d'eau, le long des berges ou dans les zones de sédimentation massive lorsque la dynamique du courant décroît fortement. On donne ensuite les valeurs d'érosion au sein du bassin versant en t h⁻¹.

IV.6.3.a. Les matières en suspension et dissoutes

SUIVI 9	Quantification des matières en suspension
Priorité	1, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	Toutes les 6 minutes
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	2 ²¹ personnes en charge de la mise en place et du suivi annuel + les astreintes lors des événements pluvieux intenses 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base
Ressource matérielle	Préleveurs automatiques type ISCO (déjà utilisés sur le site)

²¹ Considérations générales

Toutes les études de suivi hydrologique et de suivi de l'érosion sont exigeantes en ressources humaines. Il faut donc s'assurer que des techniciens soient en nombre suffisant, disponibles et également bien formés pour assurer le suivi des installations.

Si on ajoute des stations, les 5 techniciens de terrain feront migrer leurs activités vers le suivi de l'érosion. Si cela n'est pas envisagé, il faudra recourir à un renforcement de l'équipe d'une ou 2 personnes. Néanmoins cette activité est très ponctuelle et essentiellement liée aux phénomènes de crues.

Adaptation du suivi actuel	4 nouveaux préleveurs automatiques
Suivi actuel à conserver	Les ISCO en place sont conservés sous réserve d'être utilisés sur des sites aménagés
Produit	Chronique de débit solide à corrélérer avec les précipitations et le débit liquide au niveau de la station

i. La quantification physique

Les suivis ponctuels de MES ne sont pas complètement satisfaisants car fréquemment en dehors des événements importants. Si des suivis ponctuels sont les seuls suivis réguliers, compte tenu de la rapidité des écoulements lors d'évènements pluvieux, il est quasi certain que les variations ne seront pas mesurées. Seul le « bruit de fond » sera mesuré régulièrement.

Nombre de dispositifs

Cela veut dire équiper les cours d'eau majeurs avec au moins 5 seuils jaugeurs (3 au minimum sous l'influence de l'exploitation, comparés avec des cours d'eau en milieu naturel – un sur péridotite, l'autre sur gabbro) et avec des préleveurs automatiques pour mesurer les particules en suspension :

- 1 station du creek de la baie nord (existante en limnigraphe 6Q mais à équiper en suivi conductivité/turbidité et avec un préleveur automatique) ;
- 4 nouvelles stations (Weir 1, Weir 2, Weir 3 et Weir déblai, Figure 20) en accord avec l'argumentaire du Tableau 25. A cela s'ajoutent les 2 stations existantes (KAL et KOL)

Type de dispositif

La mise en place d'un système d'acquisition en continu de la turbidité vise à mesurer la variabilité temporelle du transport solide en suspension. C'est l'un des plus importants problèmes associé à l'acquisition de données fiables sur les charges transportées par les cours d'eau. On fait trop souvent l'hypothèse que l'échantillonnage ponctuel est suffisant pour réaliser de bonnes estimations des flux de MES (Walling *et al.*, 1992 ; Meybeck *et al.*, 1996).

Chaque station doit avoir au minimum l'équipement suivant :

- Un enregistreur de données ;
- Un capteur de hauteur d'eau et un pluviographe ;
- Une sonde de qualité avec capteur de conductivité et de turbidité.

Il est indispensable d'équiper les stations de mesure de la télétransmission automatique des données, en utilisant le réseau GSM/GPRS (ce qui est déjà le cas sur les stations existantes). En outre, cela permet l'envoi d'alarme par SMS sur des valeurs de seuil, sur n'importe quel capteur. Cela contribue donc au suivi des stations et à leur entretien.

Une alternative au capteur de hauteur d'eau serait de mettre une sonde de vitesse et une de turbidité, couplée à la conductivité (manquante aujourd'hui sur tous les dispositifs). Chaque station doit être équipée d'un déversoir, type PARSHALL, calibré et étalonné.

A cela doit être ajouté un échantillonneur automatique asservi (préférentiellement à la conductivité, ou à défaut à la turbidité).

Des préleveurs automatiques de type ISCO ont la capacité de conserver de 10 à 30 échantillons dans des conditions scientifiquement acceptables. Les préleveurs sont le plus souvent autonomes en énergie (batterie principale + secours alimentées par panneau solaire) et peuvent conserver des échantillons réfrigérés pour éviter les biais analytiques si nécessaire en complément.

Ces prélèvements sont réalisés afin d'avoir une connaissance plus précise du transport solide en suspension en estimant les flux lors des événements de crues durant lesquelles les mesures au turbidimètre peuvent être altérées ou simplement sortir des gammes de mesure. Ils permettent également de caler la relation turbidité / MES afin de mieux connaître les flux.

Le transport solide se fait en tout début de ruissellement donc il faut serrer les échantillonnages en début de crue et espacer après le pic de crue. Sur l'image suivante (image de droite), on voit bien le début, le pic puis des eaux moins chargées. Les prélèvements sont toutes les 3 minutes dans l'illustration.



Photographie 3. Préleveurs ISCO site de Vale NC (Asconit – N. Bargier 2014)



Photographie 4. Prélèvements réalisés par préleveur automatique en période de crue – Fréquence 3 minutes (J.P. Bricquet)

Les prélèvements sont ensuite récupérés par des opérateurs de manière sécurisée et sont transférés en laboratoire pour filtration et quantification.

Rappels importants sur les préleveurs

Les mesures de débit sont enregistrées en permanence et les prélèvements automatiques de sédiments doivent être calibrés pour prélever lors de la montée de la crue, puis durant la crue dans un intervalle de temps variable. Il est difficile de prévoir à l'avance la calibration volumique et temporelle des préleveurs ; cela dépend de leur emplacement topographique et de la variabilité du débit du cours d'eau. Il faut s'assurer de la présence d'un hydrologue confirmé pour équiper correctement un cours d'eau.

- Mettre les seuils jaugeurs dans des resserrements naturels, et éviter les perturbations pouvant être occasionnées par les routes qui canalisent les flux d'eau (comme sur le seuil jaugeur de la photo de couverture du rapport de la convention Hydromine) ;
- Bien s'assurer que les préleveurs de sédiments fonctionnent lors de crues et bien calibrer les appareils pour des crues extrêmes ;
- Si possible, faire le maximum de mesures immédiatement après un événement majeur prévisible (cyclone). Ceci mobilise une équipe de 2 personnes.

Type de déclenchement des préleveurs automatiques

Les alarmes doivent être liées aux variations de conductivité qui donnent plus de réactivité et donc de possibilité d'arriver sur site pendant la crue.

La mesure en continu de la conductivité permet de pallier ce manque d'informations. Elle est beaucoup plus fiable que la turbidité (dans le cadre du suivi de l'érosion), car le matériel mesurant ce paramètre peut être envasé, colmaté, ou colonisé par du biofilm, donnant des résultats biaisés. De plus, la réponse de la conductivité est immédiate alors que nous observons souvent un décalage entre hauteur et turbidité.

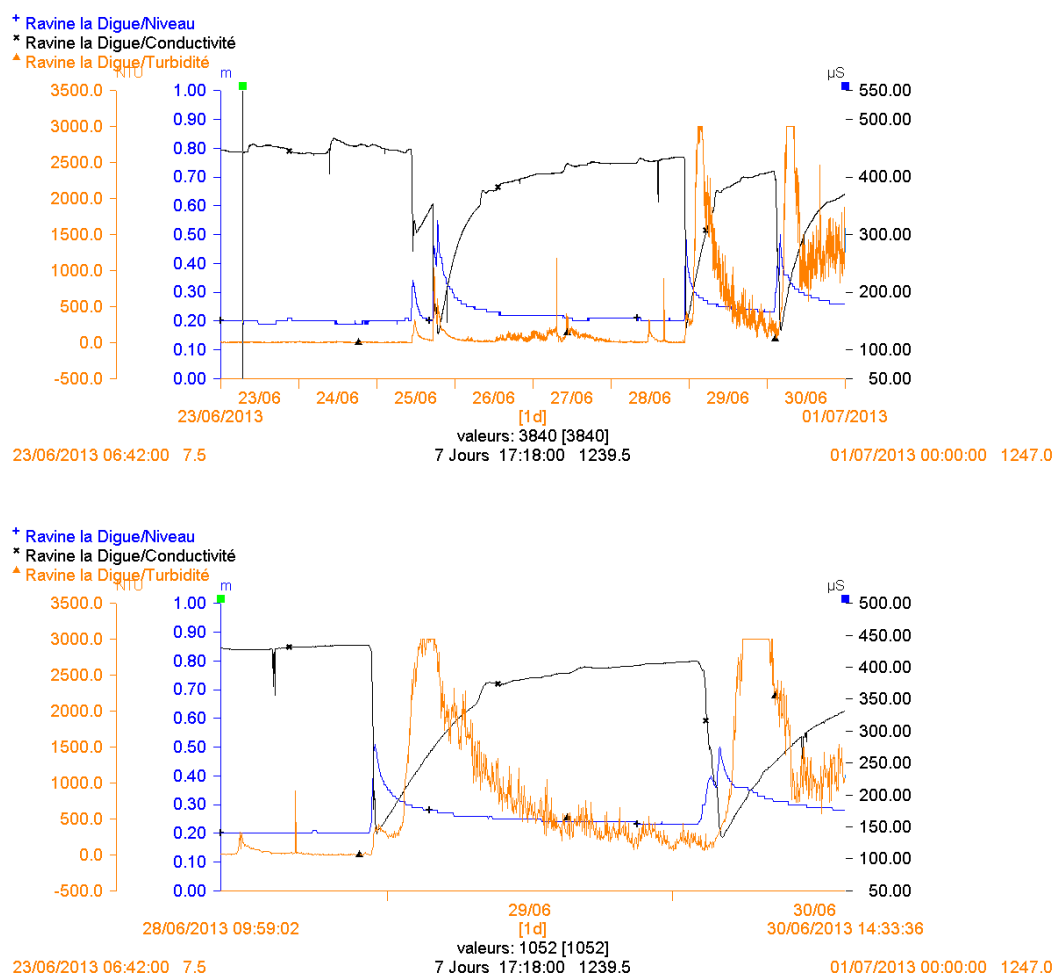


Figure 22. Diagrammes de crue lus de manière synchronique sur trois paramètres : Niveau d'eau, Conductivité, Turbidité (IRD Martinique programme OPA-C, 2013).

Alternative : capteur de suivi des MES

Pour des mesures directes des matériaux en suspension, on peut se tourner aujourd'hui vers des mesures en continu par méthode acoustique. Il permet notamment de mesurer des flux supérieurs à 150 g/l. Le principe de cette mesure repose sur l'émission par un transducteur immergé d'impulsions acoustiques de haute fréquence (de 1 à 5 MHz) et de très courte durée (environ 10 μ s), dirigées vers la zone d'étude. Une partie du signal acoustique est réfléchi par les sédiments et revient au transducteur. Lorsque le sédiment est de taille uniforme, l'intensité du signal réfléchi permet de déterminer la concentration en sédiments. La colonne d'eau est discrétisée en cellules déterminées à partir des temps de retour du signal réfléchi. L'intensité réfléchie dépend de la taille des particules et de la concentration. Cette propriété peut être exploitée en utilisant un signal acoustique multifréquence pour déterminer à la fois la taille des particules et la concentration en sédiments. Aux fréquences élevées généralement employées, la profondeur sur laquelle peuvent s'effectuer les mesures est comprise entre 1 et 2 m. Ces nouveaux outils, apparus il y a quelques années déjà, sont très informatifs sur la quantité de sédiments en suspension transportés. En effet, les mesures sont faites en continu, et non de manière ponctuelle comme lors de prélèvement d'échantillons. Au final, on a un suivi de la crue de bien meilleure qualité, sans avoir à être sur place pour faire des prises d'échantillons. Donc cela paraît être une très bonne alternative. La mise en œuvre de ces méthodes acoustiques est assez facile puisqu'elle repose sur une un « ADCP²² » horizontal. Le coût n'est pas exorbitant et bien installé, ne craint pas les crues. Le tarif d'une telle station comprenant turbidimètre, préleveur automatique, capteur de niveau d'eau, centrale d'acquisition, alimentation électrique représente un coût global de 10 à 12 k€.

Le matériel doit être adapté à la taille du bassin versant équipé. L'ADCP vu son coût serait plus judicieux au niveau du collecteur principal (Cf <http://oredraixbleone.irstea.fr/bassins/>).

<http://www.documentation.eaufrance.fr/notice/mesure-hydro-acoustique-des-flux-de-matieres-en-suspension-mes0>

Pas de temps d'acquisition

Les rythmes les plus appropriés sont :

- Toutes les 6 minutes pour la conductivité et la turbidité. Là aussi, ces mesures peuvent être conditionnelles.
- Toutes les 3 minutes pour l'échantillonneur, afin de bien prendre en compte la montée des crues qui représentent 80 à 90 % des matières transportées. Sur tous les préleveurs (ISCO, SIGMA) on peut faire du prélèvement à pas de temps variable. Et une fois encore, ce qui importe, c'est la montée de la crue mais cela laisse la possibilité à une équipe d'astreinte de se rendre sur site.
- A défaut de 3 minutes pour des contraintes de disponibilité du personnel, serrer toutes les 10 minutes soit 4 heures de prélèvement.

Analyses granulométriques réalisées sur les sédiments prélevés

Les analyses de granulométrie effectuées de manière trimestrielle à même le cours d'eau n'apportent aucune information sur le fonctionnement érosif de la zone. **Nous préconisons l'abandon pur et simple de cette pratique coûteuse et inexploitable.** En revanche, il est important de calibrer lors de 2 ou 3

²² *Acoustic Doppler Current Profiler*

crues à l'installation du seuil et 4 à 5 ans après (opération coûteuse) en effectuant un fractionnement granulométrique sur la phase prélevée dans les échantillonneurs automatique lors de crues (les sédiments les plus fins sont les plus « réactifs ») toutes les 10 minutes.

Nous proposons de discriminer les 3 fractions classiquement mesurées en pédologie (fins inférieurs à 2 microns si c'est possible sinon inférieurs à 50 microns²³) – puis les sables fins 50-200 µm – et les sables grossiers 200 - 2000 et > 2000 (graviers) sur chaque échantillon prélevé sur les sites de référence sur latérites et gabbro lors d'une crue annuelle

ii. Composition chimique des éléments particuliers (éléments majeurs)

Ce suivi permet principalement de distinguer l'origine des sédiments et donc l'origine anthropique. Il vise à :

1. Avoir “le bruit de fond” avec une eau de subsurface (faire une mesure chimique en étiage et une mesure en hautes eaux) pour avoir le fond géochimique des différents BV.
2. Mesurer 2 ou 3 crues par an : lors d'une crue prélever un échantillon et le mesurer toutes les 10 min par exemple pour voir la variation géochimique permettant de :
 - distinguer les eaux de surface (ruissellement et érosion) des eaux de subsurface (qui s'infiltrent)
 - traçage des sédiments érodés d'une part du point de vue de leur position dans l'espace (en fonction de la nature et la composition des sols souvent différentes entre l'amont et l'aval) ;
 - traçage des sédiments pour savoir quelle est la nature géochimique des horizons principaux contributeurs aux sédiments (surface, “milieu de profil” et/ou saprolite):
 - traçage de la roche mère éventuellement (serpentine, harzburgite, gabbro).

Tableau 27. Suivi chimiques des MES et interprétation des résultats.

Paramètre à suivre dans les MES	Fréquence	Méthode	Interprétation
Teneur en carbone particulaire des sédiments érodés	Tous les 6 mois + 2 ou 3 crues calibrées dans l'année	Analyse par combustion	Savoir si l'érosion est sélective – érosion en nappe (concerne la partie supérieure du sol) souvent sous-évaluée par rapport à l'érosion en ravine mieux visible et non sélective.
Rapport entre le fer et l'aluminium	idem	ICP	Déterminer l'origine de sédiments et de l'influence des gabbros. Dans un même profil, plus l'érosion concerne le saprolite de la péridotite, plus ce rapport sera élevé. Différence de 1 à 10
Rapport entre la silice et le fer	idem	ICP	Dans un même profil, plus l'érosion concerne le saprolite de la péridotite, plus ce rapport sera élevé. Différence de 1 à 5
Rapport entre le magnésium et le fer	idem	ICP	Idem que précédemment

²³ Si mesuré par vitesse de sédimentation, attention au biais provoqué par la densité importante des particules ferrugineuses.

Rapport entre le magnésium et le calcium	idem	ICP	Idem que précédemment– différence de 1 à 100
--	------	-----	--

iii. Détermination et composition chimique des éléments solubles

Pour les éléments solubles on a déjà une bonne idée des différences entre eaux de surface et eaux de sub-surface.

Calculer le rapport Mg/Ca des eaux dans le préleveur automatique d'eau (et donc de sédiment) puis si c'est possible Ni, Co, Cr et Mn en solution uniquement au niveau de KAL (aval) en période de basses eaux. Le plus important pour ces éléments métalliques étant qu'ils ne se retrouvent pas dans une zone potentiellement hydromorphe et un milieu réducteur, pour générer des ions solubles. Les mesures d'oxydo-réduction et de conductivité électrique doivent être réalisées de manière quasi-continue par sonde multiparamètre et électrodes spécifiques.

Tableau 28. Suivi chimiques des éléments solubles et interprétation des résultats.

Paramètre à suivre dans les MES	Fréquence	Méthode	Interprétation
Teneur en magnésium	Tous les 6 mois + 2 ou 3 crues calibrées dans l'année	ICP	Permet de connaître la différence entre une eau de sub-surface (teneur élevée en Mg) et une eau de ruissellement (teneur plus faible)
Rapport entre le magnésium et le calcium	idem	ICP	Idem que précédemment– différence de 1 à 100
Teneurs en nickel, cobalt et manganèse	Tous les ans en débit d'étiage	ICP	Indicateur de l'état d'oxydo-réduction et de la biodisponibilité de ces éléments

Une expérience et des enseignements : Le programme HYDROMINE

Un dispositif de suivi des épisodes pluvieux a été mis en place sur deux petits bassins versant de la mine de Poro (Poro amont, 0,090 km² et Poro aval, 0,304 km²) permettant le calcul des transferts de matières solides (Hydromine 2009-2012).

Les flux de MES ont été mesurés sur le bassin versant de Poro durant 4 années (2009 à 2012) pour un total de 1000 échantillons d'eau. Il ressort que les phénomènes d'arrachement dominant à l'amont où les concentrations sont en général supérieures. Les matériaux en suspension sont fins avec des diamètres médians (Diamètre 50) s'étageant entre 4 et 13 µ à l'amont, 5 et 30 µ à l'aval. A noter que le seul épisode de décembre 2011 a exporté en quelques heures deux fois plus de matières en suspension que toutes les crues des quatre années d'observation.

Deux décanteurs de Poro sont suivis dans le cadre du projet Hydromine, FRN01 et FRN18. Les dispositifs de perches mis en place s'avèrent peu adaptés au suivi des dépôts successifs en période pluvieuse. En effet, les matériaux extraits des décanteurs comprennent une importante fraction de matériaux

transportés par charriage (graviers, roches, divers,...). Un levé topographique avant et après le curage apparaît également nécessaire pour fiabiliser les estimations de volume de MES transités.

Les volumes solides piégés permettent cependant de conclure à une efficacité certaine de ces décanteurs pour les épisodes "normaux". Mais ils ne peuvent plus jouer leur rôle pour les événements extrêmes.

Le site pilote de Poro a fait la preuve de l'intérêt du suivi en continu des flux d'eau et de sédiments produits par les bassins versants miniers. L'instrumentation mise en place a fait preuve de sa robustesse et permet d'accéder aux données indispensables à la compréhension des phénomènes en jeu et à la quantification des flux. Des améliorations nécessaires ont été identifiées. Certaines, comme la mise en place de turbidimètres ont été entreprises en 2013. L'implication des équipes locales du CFTMC serait indispensable pour améliorer l'efficacité de ce dispositif de mesure d'un intérêt capital pour la connaissance de l'hydrologie en domaine minier.

Afin de faire progresser les connaissances en hydrologie minière, accroître l'efficacité des plans de gestion des eaux sur mines et optimiser la lutte contre les processus d'érosion et de pollutions liées à l'exploitation des massifs de péridotite, il conviendrait de :

- *Développer un réseau de sites de référence suivant les différents contextes spécifiques de l'exploitation minière en Nouvelle-Calédonie (c'est-à-dire développer plus en avant le projet programme CNRT petits bassins versants).*
- *La lecture des hydrogrammes de crue couplée avec les pluviographes est primordiale. Une grande partie des eaux devraient provenir du ruissellement de subsurface car sur la plupart des sols (sauf zones compactées) la conductivité hydraulique (Ks) est très élevée.*
- *Instrumenter plus précisément différents types de décanteurs pour mieux maîtriser leur performance et pouvoir tester objectivement l'efficacité de différents modes de conception (chicane, filtre,...) ou de gestion (curage, vidange volontaire, etc.) peut-être plus adaptés aux caractéristiques des flux solides identifiés.*
- *Poursuivre les séries chronologiques pour fiabiliser les analyses fréquentielles*
- *Améliorer les stations et méthodes de mesures pour les rendre plus performantes (télétransmission, seuils d'étiages, turbidimètre, etc.)*
- *Etudier les transferts d'échelle et le devenir des flux sédimentaires de la mine au lagon (tel que prévu dans le nouvel appel à projet CNRT).*
- *Essayer d'avoir des données lors d'événements extraordinaires. Si possible avoir quelqu'un sur place – en toute sécurité - pour effectuer les mesures immédiatement après le passage d'un gros événement.*
- *Calibrer le matériel et sécuriser les seuils jaugeurs et les instruments pour des pluies > 500 mm/24 h. S'assurer que le matériel est apte à réceptionner des quantités de pluie journalières pouvant excéder 500 mm (lors du cyclone Gyan en 1981 dans la plaine des lacs il y a eu 800 mm dans la journée). Envoyer sur le site de Vale NC un hydrologue pour des mesures en cas d'alerte cyclonique (une astreinte).*

Note des rédacteurs

Ce dispositif s'applique à des petits bassins versant, plus faciles à maîtriser. Lorsque l'on passe à des bassins versant d'une surface supérieure à 10ha, les contraintes logistiques obligent modifier les équipements pour non plus mesurer mais estimer les sédiments de fond à partir d'autres techniques comme celles utilisées dans le système montagneux et très érosif du bassin de la Draix dans les Alpes du Sud (<http://oredraixbleone.irstea.fr/bassins/>).

IV.6.3.b. Le charriage

SUIVI 10	Pièges à sédiments
Priorité	1, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	À chaque crue
Difficulté	Forte
Ressources humaines	1 personne en charge de la mise en place et du suivi annuel (2 jours par parcelle) 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base
Ressource matérielle	Construction de piège à sédiment
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Rapport annuel des volumes extraits et les résultats physico-chimiques

Les pièges à sédiments ou décanteurs

Les matériaux qui composent le lit du cours d'eau, soumis à un ensemble de forces exercées par le fluide sont mis en mouvement et constituent le transport par charriage. Les matériaux charriés se déplacent à une vitesse inférieure à celle du fluide, contrairement aux matières en suspension qui se déplacent sensiblement à la vitesse du fluide. En cassant l'énergie de l'eau, le piège à sédiment force le fluide à déposer les éléments charriés.

Ce type de dispositif permet d'avoir une idée bien plus précise de la charge totale de sédiment qui transite lorsqu'il est couplé à un préleveur automatique car il intègre alors la matière en suspension et la charge de fond. En cela, c'est un outil de mesure primordial de la charge de fond.

Il présente cependant plusieurs aspects contraignants :

- Il doit être régulièrement contrôlé, et vidangé si nécessaire pour accueillir la crue suivante dans la mesure où le piège n'a aucune utilité s'il est constamment rempli, afin de connaître l'ampleur du transport sur un pas de temps donné (crue, mois, semestre, année, etc.) immédiatement après une grosse crue, puis régulièrement.
- Il nécessite un aménagement en génie civil relativement lourd et pouvant introduire une perturbation dans le transport naturel localement et des dysfonctionnements sur le tronçon aval.
- Il ne peut être installé que sur des ravines ou creeks de taille restreinte afin d'avoir une donnée interprétable et des contraintes d'entretien supportables.

Nous préconisons donc d'installer ces dispositifs exclusivement sur les petits bassins versant tests (Figure 20) qui devront avoir préférentiellement une superficie inférieure à 2 km² pour en faciliter l'usage et donc la bonne collecte de données. Notons que le seul piège à sédiment du site disposé en aval de la Kwé Est au niveau de la station (KE-05) a été rapidement engravé et n'est pas nettoyé notamment en raison des difficultés d'accès. Il n'est de fait pas utilisé alors que sa mise en fonction permettrait de tirer de précieux enseignements mais la surface drainée (2,37 km²) montre bien les limites d'utilisation de type d'ouvrage.

Sur les 3 ouvrages proposés, il semble opportun à chaque vidange du piège à sédiment d'effectuer 3 mesures du rapport Mg/Ca, teneurs en SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. Pour l'identification des zones émettrice (cf Tableau 27).



Photographie 5. Piège à sédiment en ravine (Jean Louis Janeau, IRD prise sur le site du projet MSEC à Phrae en Thaïlande ; Valentin et al., 2008.



La mesure de capacité des bassins de sédimentation miniers

SUIVI 11	Bassins de sédimentation miniers
Priorité	2, Suivi, (utilité pour le modèle)
Périmètre	Bassins de sédimentation principaux (BSKN en priorité)
Fréquence	Suivi annuel + chaque crue d'importance
Difficulté	Forte
Ressources humaines	1 personne en charge de la mise en place et du suivi annuel (2 jours par parcelle) 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base
Ressource matérielle	Construction de piège à sédiment
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Rapport annuel des volumes mesurés ou extraits

Les décanteurs ont été mis en place par la société Vale pour réduire la vitesse de transport des flux hydriques pour accélérer les vitesses de sédimentation et collecter le maximum de particules en suspension et sédiments de fond avant qu'ils n'envahissent le lagon.

Les collectes des sédiments de fond dans les seuils jaugeurs permettent de mesurer les flux des particules les plus lourdes lorsque le bassin versant fait moins de 10ha. Au-delà les flux deviennent trop importants et un autre système de mesure doit être mis en place.

Une évaluation de ce transport doit être réalisée au niveau des décanteurs sur le site. Le département mine du site est en mesure d'évaluer l'érosion en amont de chaque décanteur par suivi de la

bathymétrie rapportée au bassin versant drainé (cf. Etude CAPSE – Diagnostic Topo Bathymétrique BSKN).

La fréquence de suivi proposée serait :

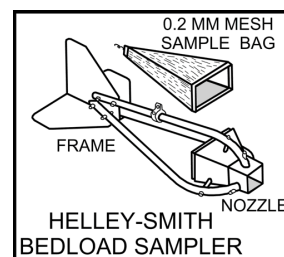
- Suivi annuel de la bathymétrie
- Suivi post très gros évènement (pluie supérieure à de 300 mm en 2 jours).

Alternative (R&D)

Il n'existe toujours pas de méthode directe pleinement satisfaisante pour mesurer le charriage de fond. La mesure du charriage est très difficile car la plus grande partie des matériaux, notamment les plus gros, sont transportés pendant les crues. Il s'agit d'un phénomène très discontinu et il n'est pas rare que le volume transporté par charriage au cours d'une crue soit aussi important que le charriage total d'une ou plusieurs autres années.

Certes, il est possible d'utiliser des préleveurs type Helley Smith²⁴ mais cela reste ponctuel et difficile à mettre en œuvre en écoulement torrentiel. Ou encore des géophones ou hydrophones mais dans ce cas la mise en place est onéreuse pour des résultats encore expérimentaux.

Par contre, les **mesures par traceur** (peintures fluorescentes, résines, traceurs radioactifs) paraissent mieux adaptées et donnent en général de meilleurs résultats : on injecte dans le cours d'eau une masse connue M de matériau et l'on étudie ensuite le déplacement de ce matériau entre deux dates. On obtient ainsi le débit solide moyen sur la période considérée. Cette méthode peut être utilisée sur l'ensemble d'un cours d'eau et pour valider l'efficacité de la rétention des matériaux dans les décanteurs. Mais il est préférable de définir d'abord des tronçons à peu près de longueur identique afin de faciliter le suivi et d'éviter de perdre pas mal de matériel de mesure.



IV.6.3.c. Mesure du colmatage

SUIVI 12	Quantification du colmatage
Priorité	2, R&D
Périmètre	Bassin versant Kwé et Creek de la Baie Nord
Fréquence	2 opérations par an en période de hautes eaux
Difficulté	Faible
Ressources humaines	1 personne en charge de la mise en place et du suivi annuel (1 journée de mise en place pour 5 stations + 1 journée de relèvement) 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base
Ressource matérielle	Substrats artificiels
Adaptation du suivi actuel	Nouveau suivi

²⁴ <http://www.rickly.com/ss/bedload.htm#Helley-Smith>

Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel sur les 5 stations

Le sédiment formant le lit des cours d'eau constitue un habitat (le milieu interstitiel ou hyporhéique²⁵) particulièrement sensible aux pressions hydromorphologiques. Le colmatage désigne les dépôts de sédiments fins ou de matières organiques, qui s'infiltreront dans les interstices du benthos et de l'hyporhéos (Vanek, 1997). Il entraîne une modification des habitats, de la structure et de la stabilité du substrat, ainsi que des échanges d'eau, de matières et d'oxygène entre la surface et l'hyporhéos, conduisant à l'apparition de processus anaérobies (Bou 1977, Brunke1999). Ces modifications du fonctionnement physique, chimique et microbiologique des sédiments affectent la survie des macro-organismes. Il est donc fondamental de pouvoir apprécier cet impact hydromorphologique sur la qualité des sédiments des cours d'eau.

Les particules goethitiques ne sont pas attirées les unes aux autres comme le seraient les particules argileuses. Donc la présence de kaolinite est déterminante pour créer une base étanche dans les zones de subsurface.

Protocole et niveau de précision souhaité

Aucune méthode fiable, reproductible et facile à mettre en œuvre à grande échelle et en routine n'est vraiment disponible. Toutefois, il est possible d'appréhender l'intensité du colmatage du lit des cours d'eau en évaluant la profondeur d'oxygénation du substrat via le développement de bactéries sulforéductrices sur des supports en bois (Marmonier et al., 2004).



Cette méthode consiste à implanter dans les sédiments des substrats artificiels en bois pour une durée d'un mois. Au contact des zones désoxygénées, ces substrats artificiels changent de couleur, passant du brun jaunâtre au noir. Ce changement de couleur est lié aux activités microbiennes stimulées par le substrat carboné. La couleur noire est sans doute attribuable à un dépôt de sels de manganèse. Cette méthode offre donc une mesure intégrative et fonctionnelle des conditions d'oxygénation du milieu.

A titre d'exemple, les substrats artificiels sont des carrelets de bois clair (pin, sapin de bois non traité), de 8 x 8 mm et d'une longueur de 30 cm. Un trou est percé à 1 cm de l'extrémité supérieure du piquet afin d'y attacher un fil électrique gainé de plastique coloré qui permettra d'identifier la position des substrats immergés.

Photographie 6. Dispositifs substrat artificiel avant implantation. (fil électrique pour repérage en fin d'incubation) (Protocole CARHYCE – IRSTEA 2012)

²⁵ Zone en dessous et à côté du lit d'un [ruisseau](#) d'[eau douce](#), où il y a mélange des [eaux souterraines](#) profondes et des eaux de surface.

Après avoir repéré 2 radiers (ou plats courants) sur la station, 4 répliqués sont installés sur la tête de chacun d'entre eux (ou un plat courant en cas d'absence) transversalement par rapport à l'écoulement. Si un seul radier (ou plat courant) est disponible, la manipulation n'est réalisée qu'une seule fois, au niveau de celui-ci.

Les substrats artificiels sont mis en place directement à la main dans les creeks à fond sableux en tête de radier ou en tête de mouille, ou après avoir implanté une barre à mine dans les sédiments plus grossiers. La profondeur du trou doit être d'environ 30 cm, de façon à ce que l'extrémité supérieure du piquet affleure au niveau du substrat.

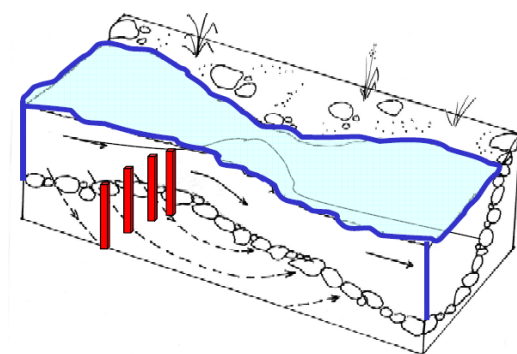
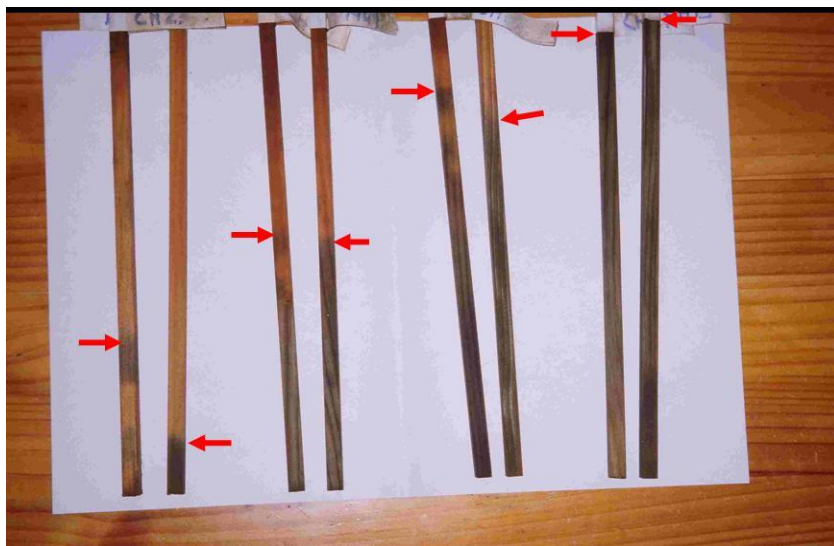


Figure 23. Position des carrelats de bois sur un radier (Protocole CARHYCE – IRSTEA 2012)

Au moins 1 mois après l'installation de ces dispositifs expérimentaux, une deuxième visite terrain est pratiquée par les opérateurs afin de les récupérer. Lors de leur retrait, la longueur entre le sommet du piquet (partie affleurant avec l'eau) et la première zone de noircissement (même ponctuelle) d'une des 4 faces est mesurée en cm (précision millimétrique) avec un double-décimètre (Figure suivante).

Le passage de la couleur claire au noir donne la profondeur d'alternance oxygéné-hypoxique (ex : substrat totalement colmaté = zone de noircissement au sommet du bâton = 0,0 cm et substrat totalement poreux = aucune zone de noircissement = 30,0 cm).

Remarque : la lecture doit se faire immédiatement sur le terrain car la couleur s'estompe quand le biofilm sèche. Par précaution et dans le cas d'une mesure plus tardive, la zone de changement de couleur sera surlignée sur le piquet à l'aide d'un crayon de papier à bois.



Photographie 7. Exemple de changement de coloration sur différents substrats artificiels après 1 mois d'implantation dans différents cours d'eau (Protocole CARHYCE – IRSTEA 2012)

Problèmes éventuels :

- une difficulté de cette méthode est de repérer le plus précisément possible l'endroit où le carret a été placé pour pouvoir le retrouver un mois plus tard, le périphyton se développant sur la partie affleurant du bois. Il est donc important de bien repérer la zone d'implantation et il est conseillé de prendre une photographie de l'aire de travail en incluant la berge la plus proche.
- Une seconde difficulté est due au très fort transport solide des cours d'eau de la zone. L'ensemble des dispositifs pourraient ainsi être perdus ou détruits très rapidement c'est pourquoi nous proposons cette manipulation uniquement sur 5 stations lors d'une phase test d'une année. Selon les résultats cette surveillance pourra être reconduite ou non. Notons également que la taille et l'épaisseur du substrat artificiel devra également être adaptée au contexte (minimum 50 cm de hauteur en localisation en tête ou queue de mouille et une section de 10x10mm ou 15x15mm).

Implantation

- 2 stations sur la Kwé aval : à déterminer suite à une reconnaissance de terrain à partir de l'étude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie - Prolongation du suivi des pièges à sédiments - Rapport Final.pdf (EMR, 2010)
- 2 stations sur les zones de dépôt des bassins versant tests
- 1 station sur la Kwé Ouest à proximité de KO4.

IV.6.4. Les suivis hydrobiologiques

SUIVI 13	Indicateurs biologiques
Priorité	2, Suivi
Périmètre	Bassin de la Kwé et cours d'eau de référence
Fréquence	Annuel
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	2 personnes pour 3 prélèvements par jour + 1,5 jour de tri par station par personne 3 jours de rapport annuel 1 personne en charge de la bancarisation des données dans la base
Ressource matérielle	Matériel de prélèvement (Filet Surber, matériel de pêche électrique, etc.)
Adaptation du suivi actuel	Planter des stations de référence sur un bassin versant similaires à celui de la Kwé. Les rivières Kuebini (2 stations MIB et P&C), ainsi que la Fausse Yaté (2 station MIB et P&C + 3 stations poisson) pour les poissons (le seuil du captage AEP disposé sur la partie basse de la Kuebini est susceptible d'altérer les communautés de poissons), apparaissent comme de bons candidats.
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel

Les indicateurs actuels ne sont pas dimensionnés pour suivre l'érosion. Seul l'IBS est initialement destiné à cet usage, mais on manque encore de recul et de jeu de données fiables pour être sûr que cet indice

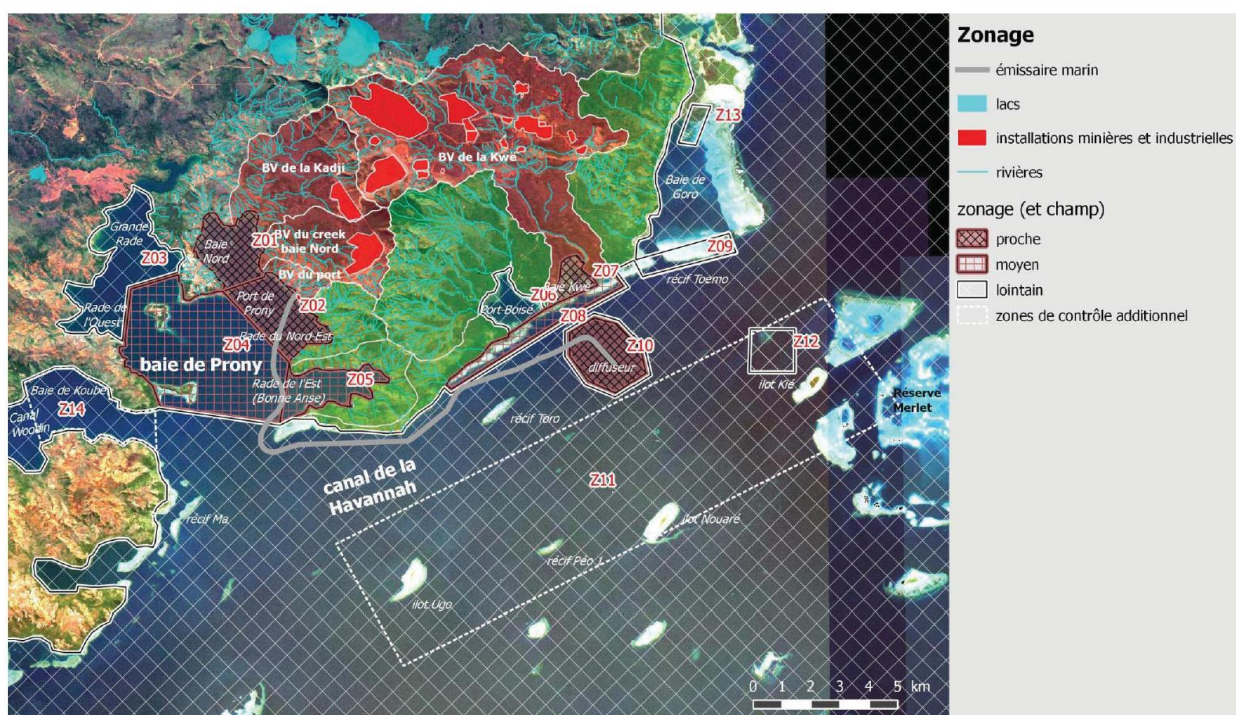
ne réponde qu'à l'érosion et non pas à d'autres variables hydromorphologiques du milieu aquatique, voire des variables morphologiques du bassin versant (couverture forestière). Il est donc difficile d'interpréter simplement leurs résultats en regards de la simple problématique érosion.

Cependant, conserver un suivi biologique peut permettre d'évaluer le degré d'habitabilité global d'un milieu pour ce qui est des invertébrés et poissons : lorsque l'érosion est la seule pression, ils peuvent alors renseigner sur son impact sur le milieu aquatique, si d'autres facteurs de pression entrent en jeu, voire même des facteurs naturels (sécheresse, événements pluvieux extrêmes), alors il devient compliqué de les interpréter en l'état de méthodologie actuelle. Ils sont à conserver pour d'autres fins, mais également pour conserver une chronique de données qui pourraient servir le jour où ces compartiments biologiques seront mieux compris.

En tout état de cause, nous ne proposons pas d'adaptation de ce suivi.

IV.7. Sur le milieu marin

Le milieu marin est le réceptacle naturel des apports terrigènes qui contribuent à sa richesse en minéraux, matières organiques, etc. et qui sont à l'origine des biotopes très particuliers observés habituellement et graduellement des eaux saumâtres aux eaux océaniques. L'anthropisation des bassins versants et l'exploitation minière à ciel ouvert contribuent à augmenter l'érosion des sols et les pressions associées sur le milieu marin, particulièrement dans les zonages proches et moyens sous l'influence des exutoires des bassins versants impactés (Figure 24).



Dans la pratique, la position du milieu marin en aval du bassin versant, permet à la fois de suivre les phénomènes d'érosion importants dans le milieu mais aussi d'étudier indirectement l'impact de ceux-ci à moyen-long terme en suivant l'état de conservation du milieu et de ses peuplements.

En 2015, Melanopus et Dexen ont rédigé une étude relative à la révision du plan de suivi du milieu marin dans la zone d'influence du complexe industriel et minier de Vale NC. Cette étude très complète propose un suivi « idéal » du milieu marin avec étude des coûts associés. Suite à ce travail, nous proposons de nous baser sur ce suivi « idéal », afin d'en faire ressortir les analyses répondant à la problématique de suivi des phénomènes érosifs et leurs impacts sur le milieu marin, et de compléter à minima celui-ci lorsque cela nous semble nécessaire. Ce suivi « idéal » en plus d'étudier les champs proches à lointains, propose aussi différentes stations et protocoles au niveau du diffuseur. Les propositions concernant le « diffuseur » ne sont pas à prendre en compte pour l'étude de l'érosion.

L'étude 2015 (Melanopus & Dexen) a montré que le suivi marin réglementaire actuel ne satisfait que très partiellement les objectifs de surveillance, essentiellement en raison d'un plan d'échantillonnage inadéquat (pour le volet biologique et, dans une moindre mesure, pour le volet physico-chimique) et dans certains cas en raison de l'utilisation de méthodologies inadaptées. Plusieurs recommandations d'amélioration ont donc été formulées, tant concernant le cadre conceptuel du plan de suivi que les spécifications techniques des différentes composantes (nombre de stations, fréquences d'échantillonnage, méthodologies, etc.). Les recommandations du rapport relatif à la révision du plan de suivi, permettront de suivre plus objectivement (suivi spatio-temporel élargi) le phénomène d'érosion.

Afin de suivre de manière différenciée les phénomènes érosifs et leurs impacts sur le milieu naturel, les compartiments à suivre doivent permettre de caractériser respectivement :

- les apports en MES (et les teneurs en métaux associées) dans le milieu naturel et leur zone d'évolution et de dépôt suite aux forts événements pluvieux et remises en suspension par les tempêtes et courants locaux ;
- l'impact de ces apports sur les peuplements marins (faune et flore) sur le court terme lors des forts phénomènes érosifs (avec des concentrations en MES et métaux peuvent être très importantes) et le moyen-long terme par une exposition sur la durée à des concentrations plus élevées qu'originellement.

Afin de répondre à ces problématiques, nous proposons le suivi de différents paramètres dans la colonne d'eau, sur les sédiments et les groupes biologiques pertinents en adaptant les fréquences d'échantillonnage aux temps d'intégration des différents compartiments.

IV.7.1. Suivi du phénomène d'érosion dans le milieu marin

IV.7.1.a. Suivi en continu de la turbidité et de la salinité

SUIVI 14	Turbidité et salinité en continu dans la colonne d'eau
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à moyen (cf. Melanopus/Dexen 2015)
Fréquence	annuelle en continu
Difficulté	faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et 2 techniciens
Ressource matérielle	Moyens nautiques, sondes enregistreuses avec batterie longue durée
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015 Entretien mensuel ou tous les 2 mois pour nettoyage des sondes et vérification des mouillages.
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel

Pour améliorer les connaissances du milieu naturel et étudier l'enrichissement du milieu en MES, il est préconisé de suivre en continu : salinité et turbidité.

La température bien qu'apportant peu d'informations *a priori* est fournie par les sondes enregistreuses, donc autant la suivre parallèlement.

La salinité permet de suivre les apports en eaux douces des bassins versants, de mieux comprendre les courants locaux et les zones de mélanges eaux douces-océan.

La turbidité dépend de plusieurs facteurs : apports sédimentaires terrigènes (nature et quantité), remise en suspension et eutrophisation (Beliaeff et al. 2011). La turbidité peut avoir un fort impact sur le développement des biocénoses benthiques en modifiant certains processus écotrophiques ou fonctionnels (ex. comportements alimentaires) au sein de peuplements biologiques locaux, ou en limitant la quantité de lumière reçue par les organismes photosynthétiques. **La turbidité n'est pas spécifique des pressions liées à l'érosion, mais sa mise en relation avec les valeurs de salinité, le suivi en continu de la pluviométrie (et des débits) sur le bassin versant permettra de relier les phénomènes érosifs aux pics de turbidité.**

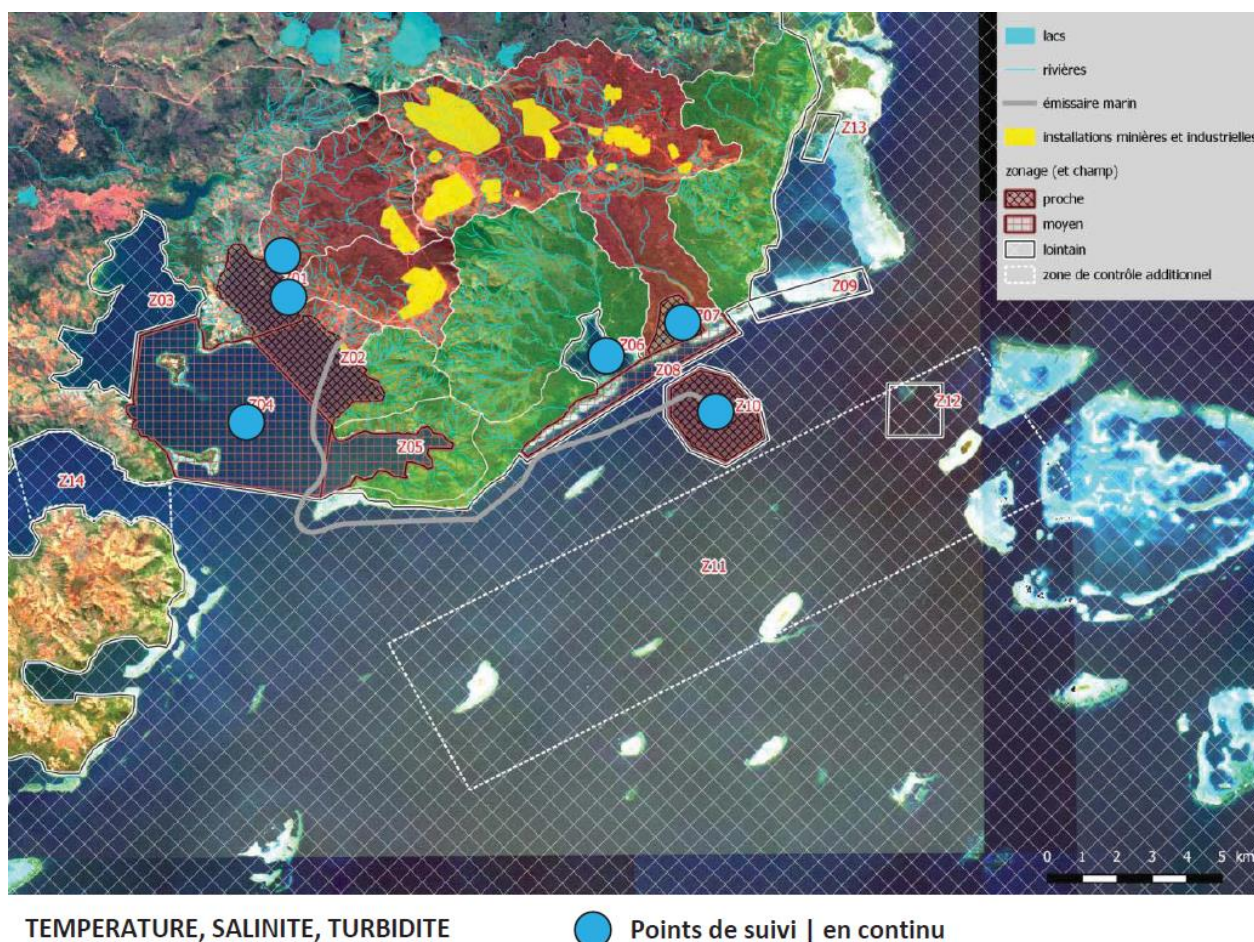


Figure 25. Stations de suivi en continu de la turbidité/salinité/température (Melanopus & Dexen 2015).

Caractéristiques du suivi :

Nombre de stations : 5 stations (la station située au niveau du diffuseur n'a pas d'intérêt pour la problématique érosion).

Durée de l'immersion de l'appareil : 1 an.

Nombre de campagnes d'entretien et récupération des données : a minima 6 / an

IV.7.1.b. Suivi des flux de particules dans la colonne d'eau

SUIVI 15	Flux de particules dans la colonne d'eau
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à lointain (hors zone diffuseur) (cf. Melanopus & Dexen 2015)
Fréquence	Bi-annuelle
Difficulté	Faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et de plongeurs
Ressource matérielle	Moyens nautiques et pièges à sédiment
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015
Suivi actuel à conserver	Pérenniser le suivi actuel
Produit	Bilan annuel

Ce suivi a pour but d'évaluer la quantité de particules et leur origine (terrestre ou marine) dans la colonne d'eau et de comparer ces flux avec ceux mesurés dans les zones de référence.

Ce suivi est à la fois intéressant pour mieux connaître les fluctuations naturelles de ce paramètre dans la colonne d'eau, mais devrait aussi servir à cibler les événements érosifs majeurs pour mieux les caractériser.

Caractéristiques du suivi :

Nombre de stations : 5 stations (la station située au niveau du diffuseur n'a pas d'intérêt pour la problématique érosion).

Temps d'immersion du piège : 48 jours ;

Nombre de campagnes d'immersion : champs proche et lointain : 2 / an (toujours aux mêmes périodes) ;

Prévoir **au moins une campagne en période de plus forte pluviométrie**, afin d'intégrer 1 ou plusieurs événements d'érosion importants.

Analyses pour chaque godet :

- teneur en Al (indicateur de particules fines) ;
- masse de sédiments piégés ;

- % de CaCO_3 , Aragonite, dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), carbonate de sodium ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), sidérite (FeCO_3) (marqueur de sédiments marins) ;
- granulométrie ;
- biomarqueurs lipidiques (discrimination facilitée marin/fluvial).

L'analyse des autres métaux serait par ailleurs un plus, bien qu'actuellement il est difficile de relier des teneurs en métaux avec l'érosion. En effet les sols de Nouvelle-Calédonie étant très riches en métaux, il n'est pas étonnant de trouver naturellement des teneurs élevées dans le milieu marin ; et ces teneurs en différents métaux retrouvés dépendent particulièrement de la géologie de chaque bassin versant. Cette dernière donnée n'étant actuellement pas connue (mais doit l'être à terme avec les suivis proposés), il est difficile de traiter cette information, qui permettrait pourtant de comparer des bassins versants présentant de l'érosion forte par rapport à des bassins versants avec peu d'érosion.

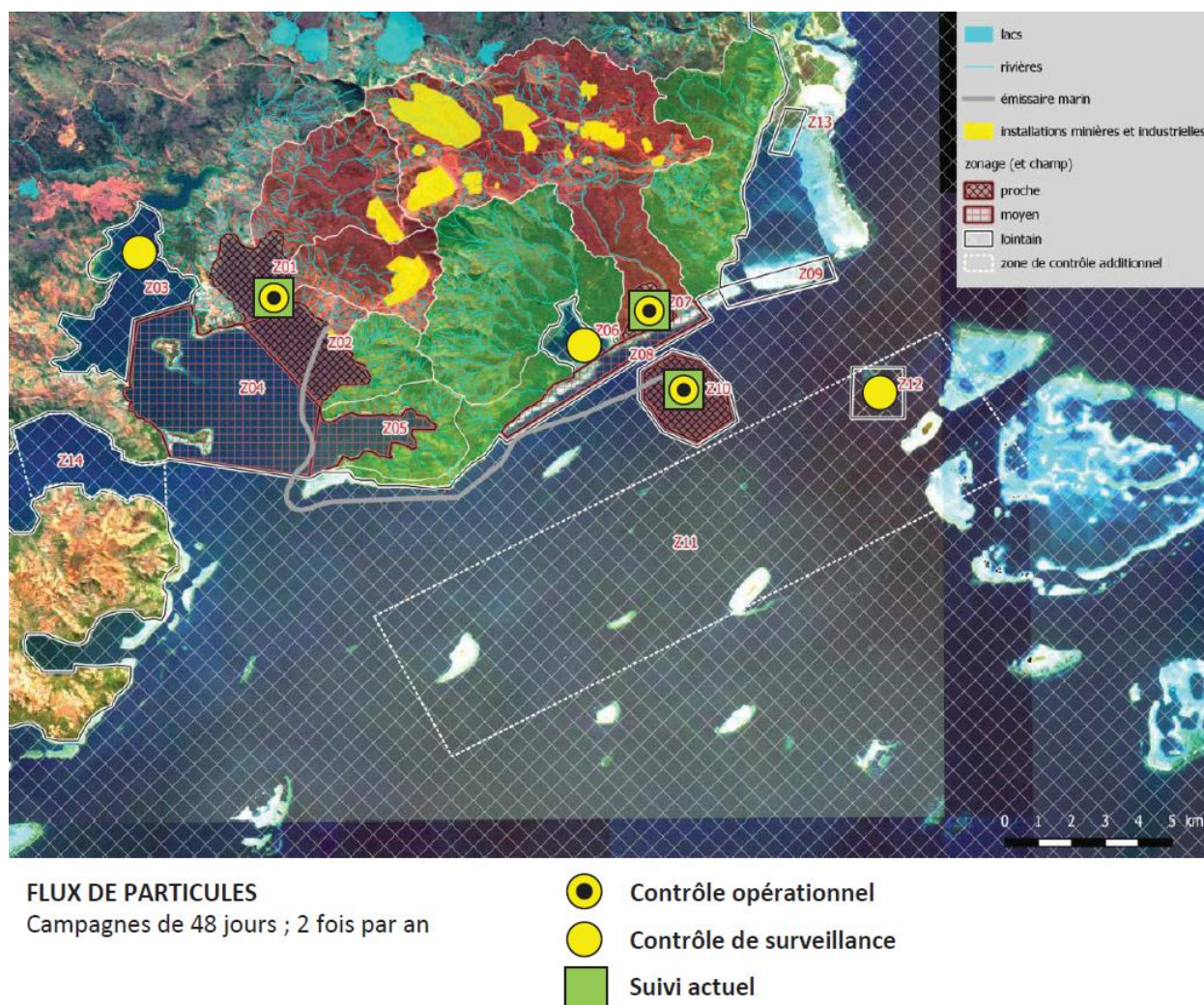


Figure 26. Stations de suivi des flux sédimentaires (Melanopus & Dexen 2015).

IV.7.1.c. Suivi des Flux en métaux dissous

Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à lointain (hors zone diffuseur)(cf. Melanopus & Dexen 2015)
Fréquence	Trimestrielle
Difficulté	Faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et techniciens
Ressource matérielle	Moyens nautiques et DGT
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel

Afin de compléter le suivi de particules dans la colonne d'eau et d'apporter des informations dans la courantologie locale et l'évolution de la contamination du milieu, la mise en place de suivi des Flux en métaux dissous à l'aide de DGT. Ce suivi a pour but d'évaluer la quantité de métaux dissous transitant en différents points de la zone d'influence marine de Vale NC et de comparer les flux mesurés en champs proche et moyen avec ceux mesurés dans les zones de référence.

Notons que l'étude ADIIP (Amélioration et Développement d'Indicateurs d'Impacts et de Pression pour le suivi du milieu lagunaire) a été finalisée et restituée par le CNRT et que dans le cadre de cette étude les modalités de mise en œuvre des DGT en Nouvelle-Calédonie ont été définies.

Dans le rapport Melanopus (2015), il est conseillé un effort d'échantillonnage différencié entre les champs proche et moyen / lointain. Afin de faciliter le suivi, nous pensons qu'un effort uniforme de 7 jours tous les 3 mois permettrait déjà d'acquérir de nombreuses informations. Bien entendu l'acquisition de données sur 1 mois tous les 3 mois pour le champ proche apporterait aussi des informations très intéressantes sur une contamination dans la durée mais peut-être moins facilement corrélables aux aléas climatiques et aux phénomènes d'érosion.

Dans chacune des zones, les stations seront positionnées de telle sorte que les comparaisons entre zone impactée et zone de référence soient pertinentes : la profondeur, la proximité à la côte ou à l'exutoire, et le degré d'influence océanique devront être considérés.

Caractéristiques du suivi :

Nombre de stations : 5 obligatoires et 6 en option pour avoir une vision globale de la masse d'eau;

Nombre de campagnes :

- champ proche : 5 stations, 4 / an ;
- en option : champs moyen et lointain : 6 stations, 4 / an.

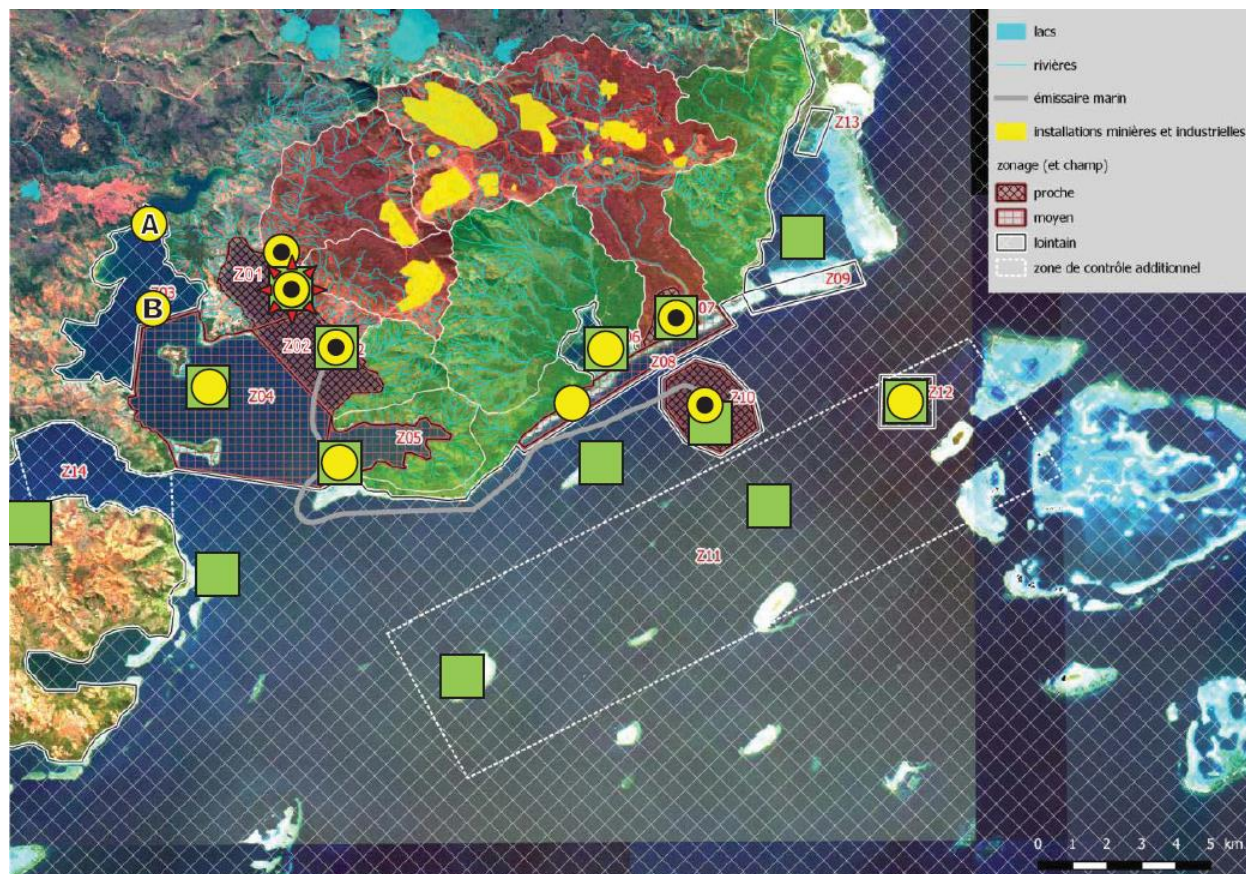
Echantillonner à mi-profondeur ne permet pas de mesurer les flux en métaux dissous dans la couche la plus superficielle (les premiers 50 cm depuis la surface), bien que les concentrations les plus fortes y soient enregistrées. En termes de suivi des impacts chroniques, et afin de s'affranchir des fortes amplitudes de variations dans cette strate de sub-surface, il semble plus pertinent de caractériser les flux dans la strate inférieure d'eau salée, car c'est à ce niveau que les concentrations en métaux seront les plus représentatives

Analyses pour étudier les flux en métaux :

- Ag
- As51
- Ca
- Cd
- Co
- Cr/Cr(VI)
- Cu
- Fe
- Mn
- Ni
- Pb

Cette liste est exhaustive et permet une bonne caractérisation des flux et n'entraîne pas de surcoût important (au regard du coût des campagnes) lors de l'analyse des DGT.

Pour bien comprendre les résultats de ces analyses des sédiments, il sera indispensable d'avoir recours à la modélisation hydrodynamique. Sur le présent site d'étude, des modélisations avec MARS 3D ont déjà été effectuées (J. M. Fernandez 2014), il faudra par la suite pour expliquer au mieux les résultats et optimiser les plans d'échantillonnages sur le long terme aboutir à un modèle hydrodynamique de qualité qui intégrera la courantologie locale et les apports d'eaux douces lors des crues sur l'ensemble des zones (proches à lointaines).



FLUX EN METAUX DISSOUS

-  Contrôle opérationnel
-  Contrôle opérationnel (en continu toute l'année)
-  Contrôle de surveillance
-  Suivi actuel (prélèvement d'eau)

Figure 27. Carte de localisation des stations DGT (rond jaune) (Melanopus & Dexen 2015).

IV.7.1.d. Suivi sédimentaire

SUIVI 17	Composition des sédiments déposés sur le fond
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à lointain (hors zone diffuseur) (cf. Melanopus & Dexen 2015)
Fréquence	Annuelle
Difficulté	Faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et techniciens
Ressource matérielle	Moyens nautiques et benne
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015
Suivi actuel à conserver	Modifier la fréquence et le type d'analyse
Produit	Bilan annuel

Ce suivi a pour but d'évaluer les concentrations en polluants (métaux et composés organiques dissous) dans les sédiments déposés sur le fond et de comparer ces concentrations avec celles mesurées dans les zones de référence. Il doit permettre de déterminer d'éventuelles évolutions anormales autant dans l'identité des polluants présents que dans leurs concentrations.

Le suivi de la qualité des sédiments superficiels permettra par ailleurs d'apporter des informations utiles pour mise en place d'un modèle hydrodynamique local de qualité.

De plus la qualité des sédiments si elle s'éloigne des teneurs des zones de références pourra à moyen terme aider à expliquer l'évolution des peuplements biologiques, peuplements qui mettent parfois plusieurs années avant de montrer une dégradation visible.

Caractéristiques du suivi :

Nombre de stations : 14 (nécessaires pour mieux caractériser l'ensemble du secteur);

Nombre d'échantillons de sédiments par station : 1 échantillon constitué par mélange de 3 prélèvements effectués dans un rayon d'une centaine de mètres autour du point de station ;

Nombre de campagnes :

- champ proche : 1 / an ;
- champs moyen et lointain : 1 / an ;

Analyses réalisées spécifiquement pour suivi érosion :

- Granulométrie ;
- Fer ;
- CaCO₃.

L'analyse des autres métaux serait par ailleurs un plus, bien qu'actuellement il est difficile de relier des teneurs en métaux avec l'érosion. En effet les sols de Nouvelle-Calédonie étant très riches en métaux, il

n'est pas étonnant de trouver naturellement des teneurs élevées dans le milieu marin ; et ces teneurs et différents métaux retrouvés dépendent particulièrement de la géologie de chaque bassin versant. Cette dernière donnée n'étant actuellement pas connue, il est difficile de traiter cette information, qui permettrait pourtant de comparer des bassins versant présentant de l'érosion forte par rapport à des bassins versants avec peu d'érosion.

Comme pour le suivi précédent, pour bien comprendre les résultats de ces analyses des sédiments, il sera indispensable d'avoir recours à la modélisation hydrodynamique.

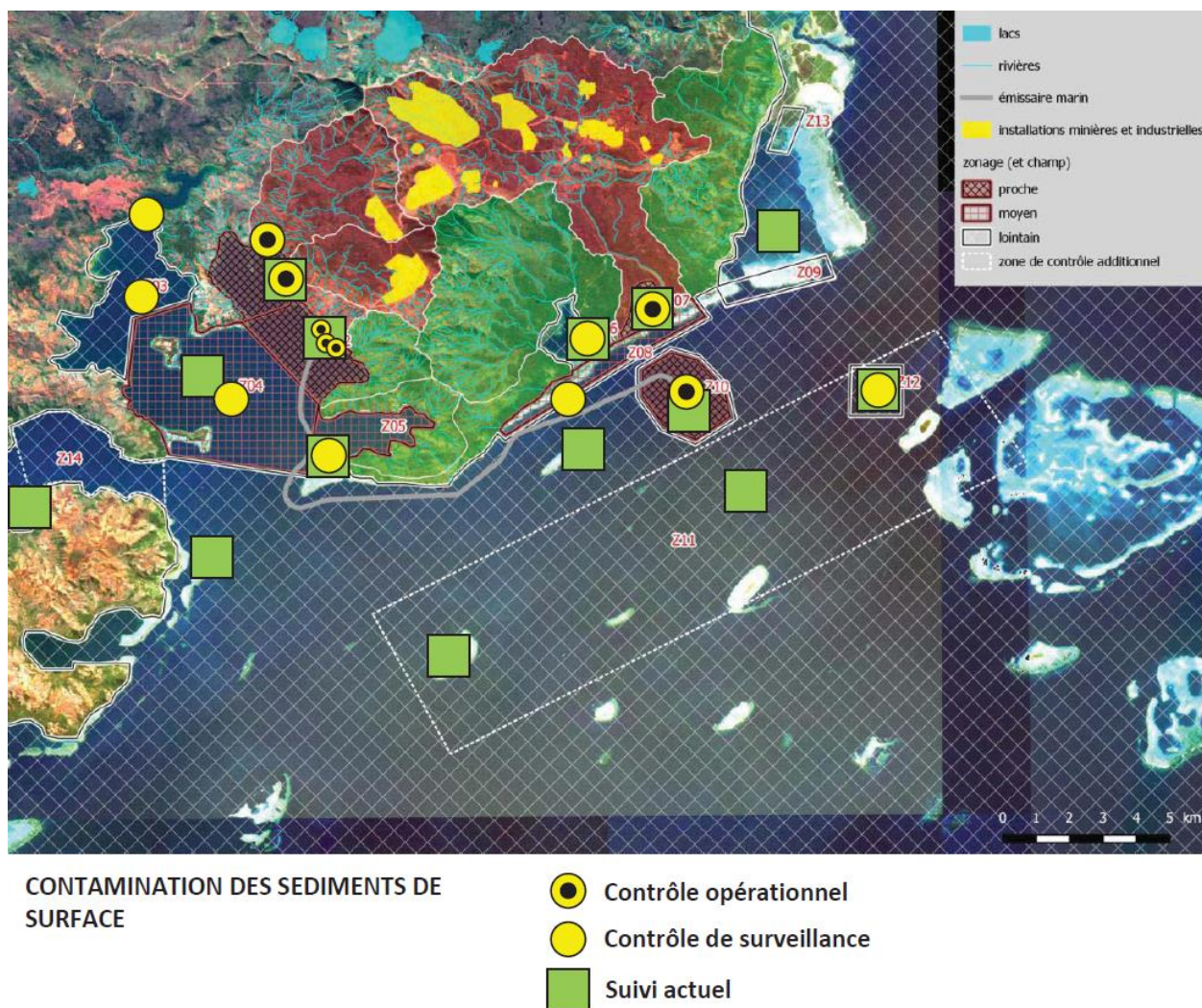


Figure 28. Carte de localisation des stations sédiment superficiel (Melanopus & Dexen 2015).

IV.7.2. Suivi de l'impact à moyen long terme de l'érosion sur les composantes biologiques

Les écosystèmes en bonne santé présentent généralement une diversité biologique et une résilience qui leur permettent de ne pas réagir rapidement aux premières pressions (sauf si trop fortes) mais plus sur la durée. Ainsi suivre la composante biologique comme cela est réalisé depuis 2007 semble difficile à relier aux pressions liées à l'érosion, mais il est indispensable de continuer ces suivis comme préconisé (Melanopus & Dexen, 2015), car ils permettront potentiellement de voir / comprendre à moyen terme ces impacts.

Dans les paragraphes qui suivent, nous préconisons donc de suivre le « suivi idéal » (Melanopus & Dexen 2015), hormis la zone lointaine, avec si possible la mise en place de quelques indicateurs orientés plutôt vers un excès de MES et une hypersédimentation. Le Tableau 29 résume le suivi proposé pour la composante biologique.

Tableau 29 : Suivis proposés sur la composante biologique (Melanopus & Dexen 2015)

Composante du suivi biologique	Nombre de campagnes par an	Période d'échantillonnage	Nombre de zones suivies	Nombre de stations par campagne	Nombre de stations par zone	Nombre de transects ou quadrats par station	Longueur ou surface des transects et quadrats	Linéaire ou surface échantillonnée par station	Echelles d'étude possibles
Habitats coralliens par LIT	1	début de saison chaude (~ octobre - novembre)	11	39	3 à 4	3	20 m	60 m	stations, zones
Habitats coralliens par photos/vidéos						10	0,25 m ²	2,5 m ²	stations, zones
Macrobenthos par UVC (liste restreinte)						3	20 m	60 m	stations, zones
Organismes fixés						1	20 m	20 m	zones
Organismes mobiles						1	50 m	50 m	zones
Ichtyofaune par UVC (toutes espèces)	1	début de saison fraîche (~ mai)	3	9	3	10	0,25 m ²	2,5 m ²	stations, zones
Herbiers par quadrats									

IV.7.2.a. Conservation des habitats macrobenthiques de substrat dur et ichthyologiques

SUIVI 18	Habitats macrobenthiques et ichthyologiques
Priorité	1 Suivi
Périmètre	Proche à lointain (hors zone diffuseur) (cf. Melanopus & Dexen 2015)
Fréquence	Annuelle
Difficulté	Moyenne
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et plongeurs
Ressource matérielle	Navire support, équipe de plongeurs professionnels et bennes de prélèvement
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015 Travailler sur des paramètres supplémentaires qui pourraient être reliés à une sensibilité aux MES (envasement, favorisation de certaines espèces...)
Suivi actuel à conserver	A pérenniser et compléter selon les caractéristiques ci-dessous.
Produit	Bilan annuel

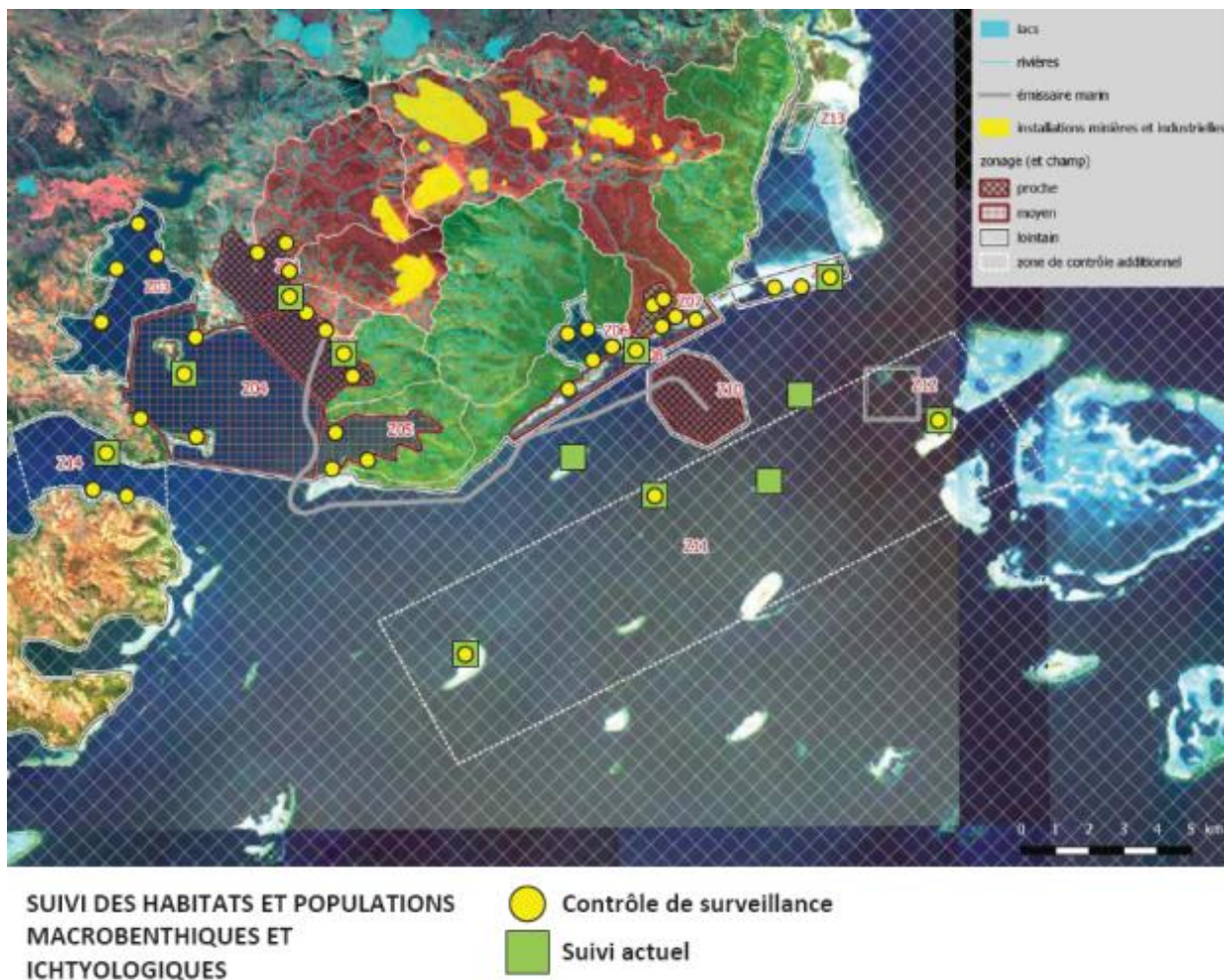


Figure 29. Carte de localisation des stations de suivi biologique (Melanopus & Dexen 2015)

Les peuplements biologiques dépendent directement de leur milieu de vie et donc de son évolution. Les stations et transects de suivis étant les mêmes dans le temps, nous préconisons la mise en place d'une description succincte de ces stations centrées sur les apports en MES : par exemple avec la mise en place de transects photo et d'une analyse rapide (via logiciel photo) du recouvrement en particules fines, ou encore de la mise en place d'échelle limnimétrique sur les stations de suivis pour suivre au fil des années la sédimentation.

Par ailleurs certaines espèces sont favorisées par une plus forte turbidité, des apports en matière organique accrus etc. Il est donc intéressant de suivre ces guildes qui pourraient fournir à moyen terme une preuve de l'impact de l'érosion des sols sur la qualité de l'environnement marin.

IV.7.2.b. Suivi des communautés coralliennes

SUIVI 19	Communautés coralliennes
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à lointain (hors zone diffuseur)
Fréquence	annuelle
Difficulté	faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et techniciens
Ressource matérielle	Moyens nautiques et benne
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015
Suivi actuel à conserver	A pérenniser et compléter la méthodologie LIT
Produit	Bilan annuel

Compte tenu de l'analyse faite (connaissances existantes et opérationnelles ; plan de suivi de Vale NC), le Tableau 30 présente le suivi permettant de caractériser les communautés récifales.

Comme pour la macrofaune de substrat dur ou l'ichtyofaune, ce suivi ne peut pas directement mettre en relation ces résultats et l'érosion du bassin versant. Pour cette raison, nous préconisons la mise en place d'une description succincte de ces stations centrée sur les apports en MES. Un simple ajustement des LIT pourrait permettre de suivre ces informations mais les stations restent les mêmes que celles utilisées précédemment.

Par ailleurs, certaines espèces sont favorisées par une plus forte turbidité ou des apports en matière organique accrus. Il est donc intéressant de suivre ces guildes qui pourraient fournir à moyen terme une preuve de l'impact de l'érosion des sols sur la qualité de l'environnement marin.

Tableau 30. Suivi des communautés coralliennes sur la zone d'emprise de Vale NC.

Compartiment suivi	Description de la méthode	Etat de la donnée
Recrutement corallien	Suivi de l'approvisionnement en larves coralliennes sur des plaques d'implantation (terracota). Les plaques sont installées quelques semaines avant la période de ponte des coraux (conditionnement des plaques par l'installation d'une communauté bactérienne spécifique). Identification sous microscope, à la famille (au mieux).	Non réalisé dans le cadre du suivi de Vale NC, ni en Nouvelle-Calédonie de manière pérenne. Le suivi devra impérativement se faire sur des récifs non impactés (témoins) et dans la zone d'emprise de Vale NC afin d'évaluer si la sédimentation liée à l'activité minière affecte le recrutement corallien.
Démographie du peuplement corallien	Suivi de la structure de taille et de la densité des colonies coralliennes juvéniles (coraux durs et mous). Comptage des colonies juvéniles le long des transects à largeur fixe. Identification au genre, espèce si possible, et répartition en classes de taille (0-2cm ; >2-5cm ; >5-10cm).	La présence de colonies juvéniles est déjà évaluée. La répartition en classes de taille donnerait des informations supplémentaires sur la dynamique de colonisation des récifs en nouveaux individus.
Composition du peuplement corallien	Suivi de l'évolution de la stratification du peuplement avec la profondeur (migration des espèces selon leurs besoins en lumière). Suivi de l'évolution de la composition en espèces coralliennes selon leur tolérance/vulnérabilité à la sédimentation. Suivi des formes de croissance corallienne.	Une liste taxonomique des coraux scléactiniaires à un niveau d'identification poussé est déjà établie pour chaque station (donc selon différentes profondeurs). De même des données sur les formes de croissance sont acquises au travers du LIT. Au niveau de l'interprétation des résultats du suivi, une réflexion doit être menée sur la composition en espèces du peuplement, leur stratification en fonction de la profondeur, et les formes de croissance en présence, mise en perspective avec la tolérance/vulnérabilité de ces espèces et formes de croissance à la sédimentation et turbidité. Une analyse bibliographique complétée d'observations de terrain pour une mise en cohérence au contexte local est nécessaire.
Tolérance des coraux scléactiniaires et octocoralliaires à la sédimentation	Suivi des taux de mortalités partielles et totales des coraux scléactiniaires et octocoralliaires (au niveau de l'espèce si possible), en relation avec les taux de sédimentation et de turbidité mesurés localement.	Non réalisé dans le cadre du suivi actuel. La définition des valeurs seuils de tolérance des différentes espèces coralliennes est un pré-requis pour évaluer l'impact spécifique de la sédimentation et de la turbidité.
Richesse taxonomique en octocoralliaires phototrophes et hétérotrophes	Suivi de la richesse taxonomique en octocoralliaires phototrophes et hétérotrophes le long de transects à largeur fixe.	Non réalisé dans le cadre du suivi actuel.

IV.7.2.c. Conservation des herbiers de phanérogames

SUIVI 20	Herbiers de phanérogames
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche
Fréquence	annuelle
Difficulté	moyenne
Ressources humaines	pilote d'un navire support et plongeurs professionnels biologistes
Ressource matérielle	Moyens nautiques et quadrats, décamètres, appareil photo....
Adaptation du suivi actuel	Recommandations de l'étude révision du plan de suivi du milieu marin 2015
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel

Les herbiers représentent un biotope écologiquement clé dans le fonctionnement des écosystèmes marins côtiers. Ils sont par ailleurs reconnus comme sensibles aux changements environnementaux (leur croissance et leur survie pouvant dépendre de différents paramètres tels que, entre autre, la salinité, la turbidité, les flux de nutriments ou l'évolution du substrat abiotique auquel ils sont associés) (Mellors *et al.* 2005). Bien que les effets détaillés de ces différents paramètres environnementaux sur la dynamique des herbiers méritent encore d'être mieux compris (Schaffelke 2005), le suivi des herbiers est susceptible de fournir des indicateurs opérationnels de perturbations notamment en regard de pressions telles que la sur-sédimentation (voir en particulier (Van Wynsberge *et al.* 2014) portant sur le lagon nord-ouest de Nouvelle-Calédonie). Il est recommandé pour le **suivi des herbiers un échantillonnage annuel en saison fraîche (à partir de mai/juin)**.

Il est recommandé que le suivi des herbiers de la baie Kwé et de leur évolution soit effectué selon deux approches complémentaires :

- un suivi fondé sur des images aériennes (ortho-photos) ou satellitaires ;
- un suivi fondé sur des observations visuelles in situ (sans prélèvement) sur 6 stations en baie Kwé et 3 en baie Kwé Est de référence.

Le premier suivi permettra de détourer et de déterminer l'étendue totale des herbiers, et donc d'observer leur dynamique à l'échelle de la baie, qui sera à relier si possible aux forts évènements pluvieux des mois précédents. Le second suivi viendra compléter les informations issues du premier en caractérisant plus précisément la nature des peuplements de phanérogames locaux (diversité, densité, etc.), et fournira également une vérité terrain aux analyses d'images. Le premier permettra d'avoir une vision globale de l'herbier et de l'impact direct de l'érosion sur celui-ci étant donné que les phanérogames sont très sensibles à la turbidité et aux apports excessifs en MES. Le second suivi permettra une approche plus fine, si la superficie de l'herbier ne varie que faiblement dans le temps, mais si l'état de conservation se dégrade tout de même (augmentation de l'envasement, vitalité et photosynthèse réduite...).

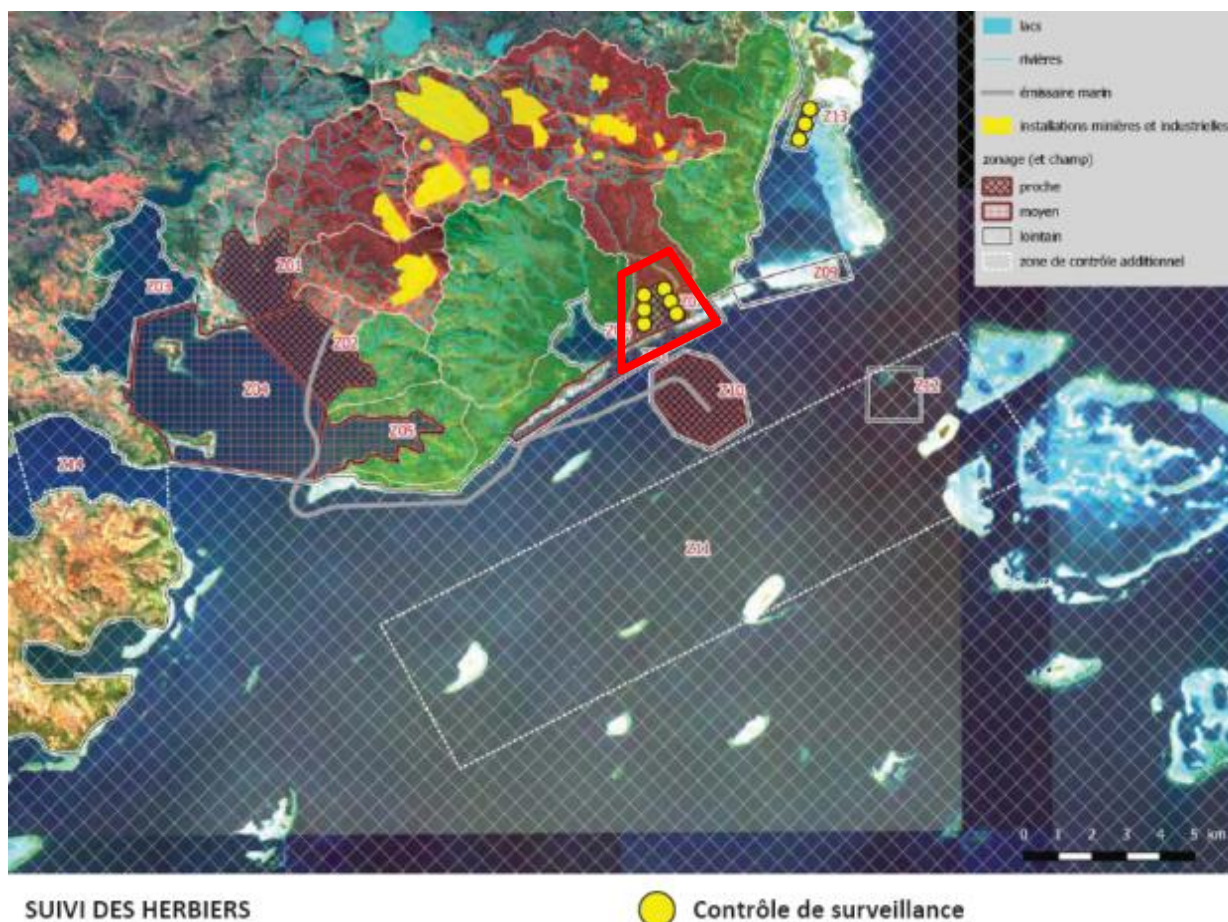


Figure 30. Carte représentant les stations pour le suivi des herbiers + périmètre d'étude par photographie aérienne (trapèze rouge) (Melanopus & Dexen 2015).

IV.7.2.d. Suivi de la macrofaune benthique de substrat meuble

SUIVI 21	Macrofaune benthique de substrat meuble
Priorité	1, Suivi
Périmètre	Proche à lointain (cf. Melanopus & Dexen 2015)
Fréquence	Annuelle
Difficulté	Faible
Ressources humaines	Pilote d'un navire support et techniciens
Ressource matérielle	Moyens nautiques et benne
Adaptation du suivi actuel	A réaliser en même temps et sur les mêmes stations que le suivi sédimentaire (Melanopus & Dexen 2015)
Suivi actuel à conserver	Sans objet
Produit	Bilan annuel

Il serait intéressant de suivre la macrofaune benthique de substrat meuble au niveau des stations sédiments superficiels retenues pour le contrôle opérationnel (Figure 28). L'apport de matières terrigènes peut induire une modification de la topographie et de la granulométrie des fonds littoraux, l'instabilité écologique engendrée par la modification itérative des caractéristiques physico-chimiques et granulométriques des sédiments peut entraîner des modifications structurelles et fonctionnelles durables au sein des communautés d'invertébrés benthiques de substrat meubles. Ces derniers sont

généralement considérés comme de bons intégrateurs des changements de qualité environnementale, notamment en raison de leur sédentarité, de leurs implications aux processus de recyclage des nutriments et de re-minéralisation à l'interface eau-sédiment, et de leurs degrés variables de tolérance aux pressions anthropiques.

Les prélèvements de la macrofaune benthique seront réalisés à l'aide d'une benne de 0.1 m² (5 répliques collectés par station, d'une surface unitaire de 0.1 m²) à partir d'un navire support.

Le traitement des échantillons de benthos respectera scrupuleusement les recommandations préconisées par la norme AFNOR ISO/FDIS 16665 « *Lignes directrices pour l'échantillonnage quantitatif et le traitement d'échantillons de la macrofaune marine fonds meubles* ». Chaque échantillon aura été pré-tamisé à bord à l'aide d'une maille carrée de 1 mm.

L'ensemble du matériel retenu (macrobenthos, débris coquilliers et sédiments grossiers) sera transvasé dans un contenant hermétique, puis fixé dans une solution d'eau de mer formolée à 5 %. Les échantillons seront « déformolés » au laboratoire, sous hotte, par rinçages successifs à l'eau douce sur une maille de tamis inférieure à celle utilisée sur le terrain (500 µm).

Les échantillons seront manipulés en respectant les conditions de sécurité suggérées par la norme : port de masques avec filtres adaptés (type formaldéhyde), de lunettes de protection et de gants. Tous les produits formolés sont éliminés par une société spécialisée dans le retraitement des déchets toxiques.

L'étape consistant à séparer la macrofaune benthique des éléments minéraux, encore appelée « phase de tri », sera réalisée sous loupe binoculaire, afin d'assurer la bonne quantification des petits spécimens. Les individus seront identifiés et dénombrés au niveau spécifique, à l'exception des spécimens trop altérés et de quelques groupes taxonomiques mentionnés dans la norme : plathelminthes, némertes, macronématodes et oligochètes. Les nomenclatures spécifiques seront contrôlées et actualisées à partir du référentiel WORMS (registre mondial des espèces marines).

Tous les invertébrés identifiés devront être conservés dans de l'alcool à 70°, et stockés dans des flacons référencés pour d'éventuels contrôles.

Comme pour la compréhension des résultats d'analyse sur sédiment, Il serait intéressant d'utiliser un **modèle courantologique**, avec un maillage en éléments finis permettant de simuler précisément les conditions de courant et de dispersion dans les zones d'intérêt de l'étude.

Nombre de stations : 14 ;

Nombre d'échantillons de benthos par station : 3 prélèvements de 0.1 m² par station (rayon d'une centaine de mètres autour du point de station) ;

Nombre de campagnes :

- champ proche : 1 / an ;
- champs moyen et lointain : 1 / an.

IV.8. Bilan sur l'amélioration des suivis

Le tableau suivant synthétise les propositions d'amélioration des suivis et des nouveaux suivis. Le champ « Niveau de priorité » synthétise les informations relatives au niveau de priorité donné à l'action (1 ou 2), son objectif (action menée dans une perspective de surveillance « suivi », de recherche et développement « R&D » ou d'acquisition de connaissance ponctuelle « Etat »).

SOL	Suivi existant	Niveau de priorité	Atouts/Opportunités	Faiblesse/Menaces	Recommandation
Suivi 1. Vulnérabilité à la perte de matière	Non	1 M/Etat	Etude de Landloch 2004 donne une première évaluation	Pas de typologie réellement adaptée au milieu	Établissement d'une nouvelle cartographie des zones vulnérables. Installation de 15 parcelles d'érosion permanentes mesurées à un rythme mensuel.
Suivi 2. Surface de sol dénudé/évolution de la dégradation	Non	1 M/Suivi	Base de photo-interprétation existante	Sans objet	Etude diachronique par photo-interprétation sur la base de la carte de vulnérabilité à une fréquence de 3 ans
Suivi 3. Couverture végétale	Non	2 M/R&D	Parcelles permettent de suivre et d'appréhender les changements avant qu'ils ne soient détectables en télédétection	Pas de suivi terrain orienté érosion	Mise en place d'un suivi annuel de lignes permanentes, carré biomasse, carré biomasse arborée sur 5 sites. Des carrés permanents peuvent ajoutés si nécessaire.

EAUX CONTINENTALES	Suivi existant	Niveau de priorité	Atouts/Opportunités	Faiblesse/Menaces	Recommandation
Suivi 4. Météorologie	Oui	1 M/Suivi	Bonne couverture pour le suivi général du site	Couverture insuffisante pour connaître l'intensité pluviométrique locale au niveau des stations de suivi limnimétriques Fréquence d'acquisition inadaptée (temps trop long entre les mesures)	Installation de 6 pluviographes supplémentaires (au niveau des 5 nouvelles stations de suivi des débits + au niveau de la station de jaugeage du Creek de la Baie Nord). Passage à une fréquence d'acquisition de 6 ou 7 minutes au lieu des 15 minutes actuelles.
Suivi 5. Limnimétrie	Oui	1 M/Suivi	Présence de limnigraphes et d'ISCO en télétransmission	Seules 3 stations sont équipées pour le suivi du transport sédimentaire. La majorité des limnimètres ne sont pas positionnées sur sections calibrées faussant les mesures de débit. Le pas de temps d'acquisition est horaire : fréquence trop basse et déconnectée avec la pluie pour le suivi de l'érosion. Les mesures de débit mensuelles ou trimestrielles ne présentent aucun intérêt pour le suivi de l'érosion.	Installation et équipement de 4 nouveaux limnigraphes sur des seuils calibrés de type Parshall. Passage à un pas de temps d'acquisition de 3 minutes asservi à la montée des eaux. Transfert de l'effort de connaissance et de calibration des équipes techniques vers la maintenance de ces stations de mesure.

Suivi 6. Règles topographiques	Non	2 R&D			Implantation de 500 pieux à l'échelle du site pour suivi de l'érosion
Suivi 7. Erosion des ravines	Non	2 R&D			Suivi de l'érosion des ravines à mettre en place sur 4 sites (2 de référence et 2 perturbés)
Suivi 8. Parcelles de ruissellement	Non	2 M/R&D			Implantation de 15 parcelles de ruissellement en complément à l'étude Landloch
Suivi 9. Quantification des matières en suspension	Oui	1 M/Suivi	3 stations de suivi de la turbidité en continu, Calibration des turbidimètres mensuelle.	Le seuil de déclenchement des préleveurs automatiques n'est pas étayé. Les fréquences de prélèvement (horaire puis toutes les 3h) ne sont pas du tout adaptées aux épisodes de crues locaux. Les stations équipées sont disposées dans des zones drainant de trop grands bassins versant. Aucun suivi de la conductivité. Le creek de la baie nord n'est pas suivi. Il n'y a pas de connaissance des flux érosifs dans des zones de référence.	Suivi de la conductivité en temps réel (ou 6 minutes télétransmises). Asservissement des préleveurs automatiques à la conductivité. Mise en place de préleveurs automatiques sur les 4 nouvelles stations. Prélèvements toutes les 3 minutes en période de crue.
Suivi 9 bis. Physico-chimie des MES	Non	1 M/Suivi		Protocole de prélèvement inadapté. Aucune interprétation des données physico-chimiques. Analyse de la granulométrie totalement inutile dans le suivi de l'érosion.	Abandon de la granulométrie pour le suivi érosion. Analyse sur les sédiments prélevés en crue : Mg, Al, Fe, Si, Ca, Ni, Co, Mn.
Suivi 9 ter. Physico chimie de l'eau	Oui	1 M/Suivi	Bonne couverture géographique des perturbations potentielles.	Pas de suivi orienté vers l'érosion. Pas d'interprétation des données centrée sur la problématique érosion.	Le suivi du magnésium dans les analyses à faible fréquence est suffisant. Le suivi de la conductivité sur l'ensemble des points de mesure à haute fréquence est indispensable.
Suivi 10. Pièges à sédiments	Non	1 M/Suivi	Présence d'un piège à sédiment	Un seul piège à sédiment sur tout le site. Emplacement de celui-ci inadapté pour les conditions locales. Piège non entretenu donc non utilisé.	Création de nouveaux pièges à sédiments sur les nouvelles stations Suivi Mg/Ca, teneurs en SiO ₂ , Al ₂ O ₃ et Fe ₂ O ₃
Suivi 11. Bassins de sédimentation miniers	Non	2 M/Suivi			Suivi de la bathymétrie sur les bassins de décantation (BSKN en priorité) annuellement et lors de gros événements pluvieux
Suivi 12. Quantification du colmatage	Non	2 R&D			Mesure test de colmatage par l'oxydation des substrats artificiels.
Suivi 13. Indicateurs biologiques	Oui	2 Suivi	Bonne couverture de la zone.	Les résultats et indices ne discriminent pas suffisamment la perturbation érosion.	Pas de modifications.

EAUX COTIERES ET MARINES	Suivi exist	Niveau de	Atouts/Opportunités	Faiblesse/Menaces	Recommandation
--------------------------	-------------	-----------	---------------------	-------------------	----------------

	ant	priorité			
Suivi 14. Turbidité et salinité en continu dans la colonne d'eau	Oui	1 Suivi	Simplicité de la méthode et bonne couverture de la zone d'étude	Pas de relation directe entre Turbidité et MES / Nécessité de nettoyage – contrôle des capteurs tous les 2 mois	Amplification du suivi pour passer à 6 stations et un suivi en continu.
Suivi 15. Flux de particules dans la colonne d'eau	Oui	1 Suivi	Simplicité de la méthode et bonne couverture de la zone d'étude	Nécessité d'un modèle hydrodynamique de qualité	6 stations. Temps d'immersion du piège 48 jours. Ajout des biomarqueurs lipidiques pour distinguer l'origine marin ou fluviale.
Suivi 16. Flux en métaux dissous	Non	1 Suivi	Bon descripteur synthétique d'une contamination sur une période	Nécessité d'un modèle hydrodynamique de qualité	Etudier particulièrement les métaux et rapports Ca/Fe indicateurs des apports terrigènes
Suivi 17. Composition des sédiments déposés sur le fond	Oui	1 Suivi	bon descripteur	Nécessité d'un modèle hydrodynamique de qualité	Tourné vers la granulométrie.
Suivi 18. Habitats macrobenthiques et ichtyologiques	Oui	1 Suivi	Bon descripteur	Difficile à relier directement à l'érosion	Nécessité de travailler sur des indicateurs ciblant les espèces sensibles aux MES et l'envasement des stations de suivi
Suivi 19. Communautés coralliennes	Oui	1 Suivi	Bonne réponse aux pressions du milieu	Coût	
Suivi 20. Herbiers de phanérogames	Non	1 Suivi	Très bon descripteur Bonne réponse aux pressions du milieu	Pas de connaissance au jour d'aujourd'hui	
Suivi 21. Macrofaune benthique de substrat meuble	Non	1 Suivi	Très bon descripteur. Bonne réponse aux pressions du milieu Facile à mettre en œuvre	Pas de connaissance au jour d'aujourd'hui	5 bennes par station

Chapitre V - Analyse de tendance des pressions associées à l'érosion

Au cours des chapitres précédent, nous avons fait référence aux principaux problèmes méthodologiques concernant les outils de lecture de la pression érosion à l'échelle de la zone d'étude.

Rappelons que ce sont les crues les plus fortes qui induisent les plus fortes charges sédimentaires. Ce principe de base doit bien mettre en avant le rôle contributif majeur des événements exceptionnels dans la connaissance de l'érosion.

Nous reprenons dans le tableau suivant les différents paramètres qui permettraient d'obtenir une évolution claire de cette perturbation et nous qualifions les manques.

SOL	Aptitude de la donnée à être exploitée	Tendance observée
Suivi 1. Vulnérabilité à la perte de matière	Etude de Landloch 2004 à pousser plus loin et adapter au contexte. La typologie n'étant pas arrêtée, il ne peut y avoir les bases d'évaluation d'une évolution solide	Sans objet
Suivi 2. Surface de sol dénudé/évolution de la dégradation	L'évolution des surfaces dénudées est d'ores et déjà exploitable mais n'est pas liée aux autres indicateurs de dégradation	Sans objet
Suivi 3. Couverture végétale	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet

EAUX CONTINENTALES	Aptitude de la donnée à être exploitée	Tendance observée
Suivi 4. Météorologie	Jeu de donnée existant et de qualité (la climatologie est le paramètre explicatif des écoulements mais ne qualifie pas directement la pression) mais : - non lié aux principales zones de suivi des flux sédimentaires. - A une fréquence insuffisante. Son exploitation (réalisé dans le cadre de la DAEM) est donc insuffisant à l'heure actuelle.	Sans objet
Suivi 5. Limnimétrie	Seules 3 stations sont équipées pour le suivi du transport sédimentaire. La majorité des limnimètres ne sont pas positionnées sur sections calibrées faussant les mesures de débit. Le pas de temps d'acquisition est horaire : fréquence trop basse et déconnectée avec la pluie pour le suivi de l'érosion. Les mesures de débit mensuelles ou trimestrielles ne présentent aucun intérêt pour le suivi de l'érosion. Les stations de suivi n'ont pas de référence géographique ou temporelle et ne peuvent donc être comparées.	Sans objet
Suivi 6. Règles topographiques	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 7. Erosion des ravines	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 8. Parcelles de ruissellement	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 9. Quantification des matières en suspension	Les fréquences de prélèvement (horaire puis toutes les 3h) ne sont pas du tout adaptées aux épisodes de crues locaux très rapides. Les stations équipées sont disposées dans des zones drainant de trop grands bassins versant. Aucun suivi de la conductivité. Il n'y a pas de connaissance des flux érosifs dans des zones de référence.	Les caractéristiques de crue et flux sédimentaires ont été évaluées aux stations KAL et KNL (DAEM 2014. Annexe 4). Cependant, en raison des limites méthodologiques exprimées, nous ne pouvons totalement valider cette estimation. De surcroît, elle ne permet en rien de définir une tendance plus ou moins importante à l'érosion en

		raison de l'absence de données de référence.
Suivi 9 bis. Physico-chimie des MES	Aucune données physico-chimiques des MES (Mg, Al, Fe, Si, Ca, Ni, Co, Mn). Analyse de la granulométrie totalement inutile dans ce contexte	Sans objet
Suivi 9 ter. Physico-chimie de l'eau	Données théoriquement disponibles (Mg, Ca, Ni, Co, Mn) mais les données à disposition sont brutes sans vérification, validation ou qualification. Les corrections effectuées pour la réalisation des rapports réglementaires ne sont pas prise en compte dans ces lots de données (invalidation, inversions...). Le jeu de données est inexploitable en l'état et ne sert que de donnée de base pour qualifier le fond géochimique de chaque sous-bassin versant hors épisode de crue.	Sans objet
Suivi 10. Pièges à sédiments	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 11. Bassins de sédimentation miniers	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 12. Quantification du colmatage	Pas de suivi selon la méthode proposée	Sans objet
Suivi 13. Indicateurs biologiques	IBS ne semble pas discriminer suffisamment le transport sédimentaire. Le nombre de taxons indicateur est insuffisant pour les notes disponibles. Les données sont tout de même exploitables.	Sur la base des limites d'aptitudes, il semblerait qu'aucune tendance ne puisse être dégagée depuis 2000 (III.2.7.).

EAUX COTIERES ET MARINES	Aptitude de la donnée à être exploitée	Tendance observée
Suivi 14. Turbidité et salinité en continu dans la colonne d'eau	Données ponctuelles avec nombre de stations et fréquence d'échantillonnage insuffisantes	Sans objet
Suivi 15. Flux de particules dans la colonne d'eau	Peu de stations, fréquence des campagnes trop faibles	Bonne corrélation entre les fortes pluies (épisodes de 2013) et la sédimentation Pas assez de données pour conclure sur une tendance
Suivi 16. Flux de métaux dissous	Nécessité de mettre en place ce suivi dans le temps Bon descripteur de la contamination sur une période	Sans objet
Suivi 17. Composition des sédiments déposés sur le fond	Nombre de stations et fréquence d'échantillonnage insuffisantes	Sans objet
Suivi 18. Habitats macrobenthiques et ichtyologiques, herbiers	Bons descripteurs de l'état de conservation du milieu Pas d'indicateur directement relié à la pression érosion	Aucun des suivis biologiques ne semblent pour l'instant présenter des impacts représentatifs des apports terrigènes liés à l'érosion des bassins versants exploités
Suivi 19. Communautés coralliennes	Bons descripteurs de l'état de conservation du milieu Pas d'indicateur directement relié à la pression érosion	Aucun des suivis biologiques ne semblent pour l'instant présenter des impacts représentatifs des apports terrigènes liés à l'érosion des bassins versants exploités

A la lumière des éléments disponibles, il n'est donc pas possible de dégager une réelle tendance globale de la pression érosion. Malgré l'existence de la base WISKY, nous montrons que son exploitation n'est pas aisément réalisable pour le suivi de l'érosion en raison des problèmes de paramètres inadaptés, fréquence d'acquisition inadaptée et surtout de manque de rapport à une référence peu ou pas perturbée.

Chapitre VI - Pistes pour le développement de nouveaux indicateurs d'évaluation des pressions associées à l'érosion

VI.1. Opportunités et faisabilité sur les sols

VI.1.1. Approche dite de pédosignature

VI.1.1.a. Principe

Les méthodes de traçage de l'origine des sédiments sont basées sur une logique source/puits comprenant la reconnaissance dans des sédiments (MES et/ou dépôts sédimentaires) de signatures de source (fingerprint).

Par définition ces signatures doivent être discriminantes des différentes sources de sédiments, conservatives et quantifiables en mélange. Les estimations quantitatives de l'origine sont basées soit sur des équations de mélange des éléments chimiques qui composent les sols (plus ou moins raffinées) ou sur des approches expérimentales couplées à des méthodes chimiométrique.

Ces signatures sont classiquement i) des signatures géochimiques (concentration élémentaire - éléments majeurs, traces et terre rare) ; ii) des radioléments (^{137}Cs ; ^{210}Pb ; ^7Be) ou iii) des signatures isotopiques (Nd, Sr).

Plus récemment, une approche basée sur des signatures spectroscopique (dans le visible, dans le proche et moyen Infrarouge NIRS/MIRS) a été développée. L'intérêt est de pouvoir disposer d'une signature "low-cost" permettant de multiplier les échantillons sources et les échantillons de sédiments.

Dans la même logique des signatures géochimiques par XRF²⁶ (portable pour les sources ; core-scanner pour des sédiments) peuvent être utilisées pour augmenter le nombre d'échantillons (et donc la résolution spatiale et temporelle).

Un élément déterminant pour pouvoir utiliser ces "empreintes digitales" est une homogénéité granulométrique entre source et sédiments.

Cette "homogénéité" est obtenue par préparation au laboratoire et/ou par correction dans les calculs.

VI.1.1.b. Méthode

- Étude des sources potentielles de sédiments et des modes de transfert ;
- Prélèvement des sources - caractérisation géochimique et spectroscopique des signatures - tests statistiques pour déterminer les éléments (ou les parties du spectre) discriminants ;
- Prélèvement des sédiments (MES ou dépôts sédimentaires selon les cas) ;
- Mesure géochimique et spectroscopique sur les sédiments ;
- Modélisation des mélanges - Estimation qualitative des sources dominantes puis estimation quantitative des sources.

On doit imaginer une première phase avec couplage des méthodes géochimiques et spectroscopiques avant de dégager éventuellement les indicateurs pouvant ensuite être suivis de manière opérationnelle.

²⁶ X-Ray Fluorescence : spectrométrie de fluorescence des rayons X.

VI.1.1.c. Domaines et zones d'application actuelle

Ce type d'approche a été mis en place dans de nombreux contextes de bassin versant agricole où l'on cherche les Zones Sources Contributives (ZSC) : recherche par exemple de la proportion de sédiments provenant de l'érosion d'horizons de surface de sols agricoles versus sédiments provenant de l'érosion de berges ; recherche de type de sols contribuant à l'érosion ; recherche de sols érodés issus de zones brûlées en contexte méditerranéen. Les bassins versants considérés vont de quelques centaines d'hectares à des bassins de relativement grandes tailles (plusieurs milliers de km²).

Exemples : Derniers travaux de l'équipe Edytem (Poulenard et al. 2009 2011 – Environnement, Dynamiques et Territoires de la Montagne, UMR 5204 Université Savoie Mont-Blanc) et Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Evrard et al. – LSCE UMR 8212 Université de Versailles) : Bassin versant agricole Savoie ; Bassins versants emboîtés Alpes du Sud ; Bassin versant Mexique ; Bassin versant Fukushima...

VI.1.1.d. Intérêt et limite

L'intérêt est de connaître l'origine des sédiments et donc :

- La responsabilité relative de chaque source ;
- Les périodes clefs de tel ou tel usage ;
- Ceci permet d'envisager la gestion différenciée de telle ou telle ZSC.

Cependant, ces méthodes doivent bien évidemment être adaptées au contexte géologique et géochimique très spécifique de la Nouvelle-Calédonie. Les méthodes sont *a priori* adaptées mais sans doute à réadapter au contexte à la fois en terme de sources à considérer et en terme de signature à utiliser.

VI.1.1.e. Typologie de projet R&D à envisager

Cette approche très novatrice, peut être abordée de différentes manières :

1. Phase exploratoire

Une telle phase permettrait d'en savoir plus sur l'applicabilité de la méthode et de s'assurer de sa bonne mise en œuvre. Elle nécessiterait :

- une mission de prélèvement de sources (et de sédiments) : 15j*4personnes.
- une première phase analytique (géochimie et spectro) sur une centaine d'échantillons tests (sources, MES, sédiments dans des retenues) : de l'ordre de grandeur 20 k€ (A préciser).
- un financement pour 2 stagiaires pendant 6 mois (1 stagiaire géochimie ; 1 stagiaire spectro).

2. Phase d'adaptation de l'outil

Partant du postulat que cette méthode semble *a priori* aisément adaptable au contexte, cette deuxième solution serait d'entrer directement dans la phase projet :

- Travail de terrain / prélèvement et étude des sources ;
- 2 années hydrologiques de prélèvement (MES ; carottes dans les retenues sédimentaires - et les lacs de la zone) ;

- Manipulations et modèle de prédiction d'origine des sources. Comparaison des approches géochimie/spectroscopie ;
- Mise en place d'indicateurs opérationnels (basé sur des mesures spectroscopiques).

Un tel projet serait mené sur 2 à 3 ans idéalement à travers une thèse.

Informations sur les moyens à mettre en oeuvre :

- Missions :
 - Une mission étude de terrain et prélèvement de sources (15j*4 pers.) ;
 - Une mission annuelle de prélèvements/récupération de MES (voir dispositif existant²⁷) et de sédiments lacs/retenus (soit pour deux ans : 2*10j*2 pers.).
- Analyses : Frais analytiques à préciser en fonction des contraintes locales de laboratoire.
- Matériels : À préciser en fonction des dispositifs existants sur le terrain et dans les laboratoires partenaires.

VI.1.2. Modèle prédictif

Par la suite, grâce aux données agrégées sur le terrain et à partir des appareils de mesure de routine décrits tout au long de ce document, il conviendrait de créer un modèle prédictif de l'érosion de ces bassins versants.

- Dans un premier temps, il conviendrait d'établir des modèles hydrologiques de pluie-débit puis de pluie/débits/sédiments pour chaque bassin ou sous-bassin versant étudié.
- Ensuite en croisant ces données avec un système d'information géographique suffisamment développé, d'interpoler les relations entre l'érodibilité et les dépôts sédimentaires, la nature des formations superficielles afin d'anticiper l'origine des sédiments et d'établir des mesures de prévention idoines.

VI.2. Opportunités et faisabilité sur le milieu dulçaquicole

VI.2.1. Evolution de l'indice bio-sédimentaire (IBS)

Les suivis traditionnels de la qualité physico-chimique de l'eau se révèlent habituellement vite très onéreux en temps et en analyses. De fait les gestionnaires des milieux aquatiques ont dernièrement remis en avant des approches basses fréquences de biomonitoring. Ces approches développées depuis de nombreuses années pour certaines, ont en effet repris de l'importance dans l'évaluation de la qualité des masses d'eau avec la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau en Europe et la Water Act aux USA. La DCE préconise de suivre l'état écologique sur la base minima de deux indicateurs biologiques et d'indicateurs physico-chimiques soutenant la biologie, les indicateurs biologiques prévalant in-fine sur les indicateurs physico-chimiques. Ces indicateurs biologiques ou bio-indicateurs utilisés pour le biomonitoring peuvent se définir de manière générale comme : « l'utilisation des compartiments biologiques pour évaluer et suivre les évolutions de la qualité de l'environnement » (Wright et *al.*, 1993 ; Gerhardt, 2000 ; Friberg et *al.*, 2011). Ces approches se basent sur la capacité de prédire la composition de la faune ou flore d'un site si ce dernier était dans ou proche de l'état de référence. Quand la

²⁷ Intérêt de se servir des dispositifs existants mais en les adaptant à de nouvelles contraintes d'acquisition.

communauté observée ne dévie pas significativement de l'état attendu en conditions de référence, aucun programme majeur de monitoring physico-chimique ou programme d'atténuation d'impact ne sont nécessaires, dans le cas contraire des analyses physico-chimiques sont à déployer pour essayer d'identifier les causes de la perturbation. D'autre part des mesures d'atténuation et/ou de remédiation sont à envisager.

Concernant l'évaluation de la sédimentation liée à l'érosion des bassins versants, des indicateurs biologiques ont été développés dans plusieurs pays. Une revue rapide de ces derniers est proposée ci-après :

Le PSI Index ou « Proportion of Sediment-sensitive Invertebrate Index », a été élaboré au Royaume-Uni pour identifier le degré de sédimentation au sein des cours d'eau (Extence *et al.*, 2011). Cet indice est basé sur l'utilisation des macroinvertébrés benthiques (MIB) et l'étude de leur trait de vie. En fonction de ces traits de vie, l'indice affecte les taxa dans une des 4 classes de sensibilité aux sédiments fins. L'abondance relative des taxa de chaque groupe est utilisée pour calculer un score global compris entre 0 (milieu complètement colmaté) et 100 (milieu propre). Les traits de vie utilisés sont les adaptations morphologiques résultant de la sensibilité ou tolérance aux sédiments. La sensibilité de cet indice au transport solide a été testée par plusieurs auteurs dont Glendell *et al.* (2011), qui ont analysé les résultats fournis par cet indice en regards des variables physiques et hydromorphologiques suivantes relatives à la sédimentation (i) : la concentration moyenne en matières en suspension (MES) durant 6 mois, (ii) : la concentration en sédiments fins remobilisables, (iii) : % du lit échantillonné recouvert par des sédiments fins et (iv) : % cumulé du temps où le seuil de 25 mg/L de MES. L'indice présente la plus forte corrélation avec la troisième variable susmentionnée. Les auteurs valident donc l'utilisation du PSI comme outil de biomonitoring de la sédimentation résultant du transport solide et préconisent un couplage avec des mesures du taux de recouvrement du lit de la rivière par les sédiments fins.

Les traits de vie des invertébrés aquatiques ont également été utilisés au Canada comme outil de biomonitoring de la sédimentation. Dans ses travaux de thèse, Logan (2004) a pu déterminer plusieurs métriques dont des traits biologiques répondant à l'intensité de la sédimentation. Par exemple le taux de taxa fouisseurs et le taux de larves de Chironominae apparaissent positivement corrélés au taux de sédimentation. Inversement le taux d'EPT, l'EPT et l'abondance en larves d'Orthocladinae y sont négativement corrélés. Au niveau des traits de vie cet auteur a mis en avant que : la respiration à l'aide d'un plastron, la forme du corps allongée, un mode de nutrition par filtration ou le multivoltisme sont l'apanage des taxa vivant dans les zones perturbées à forte sédimentation. L'univoltisme, la position abdominale des branchies, la forme aplatie du corps et des branchies et la réophilie sont au contraire des traits associés négativement au taux de sédimentation.

En Nouvelle-Calédonie, l'indice bioSédimentaire (IBS) a été élaboré dans les années 2000. Cet indice basé sur l'utilisation des macroinvertébrés permet d'évaluer la qualité de l'eau des massifs ultramafiques de l'île. Cet indice repose sur la sensibilité des différents taxa à un ensemble de métriques mésologiques (environnement général, largeur du lit mineur, Couverture par la végétation riveraine, type de végétation des rives, ombrage, type de substrat, dépôt latéritique, présence d'algues vertes ou autres végétaux, importance de la matière organique végétale, MES, Conductivité). Les principales métriques contribuant à la typologie mésologique retenue pour le scorage des taxa sont selon l'auteur : l'environnement général de la station, le type de végétation des berges et son importance en recouvrement, l'ombrage, la quantité de matière organiques d'origines végétale, la superficie du bassin à la station, l'ordre de drainage et la granulométrie. Un coefficient de pondération a été affecté à chaque groupe en fonction de son niveau de perturbation sédimentaire évalué à « dire d'expert ».

Contrairement au PSI index ou autres outils de biomonitoring de la sédimentation basé sur les macroinvertébrés benthique, le scorage des taxa au sein de l'IBS ne repose pas uniquement sur des métriques retranscrivant la charge solide transitant et sédimentant dans le cours d'eau, mais sur un

ensemble de variables traduisant principalement le type de couverture végétale du bassin versant, le positionnement de la station le long du gradient longitudinal et l'état de la ripisylve.

Cet indice est utilisé depuis plusieurs années par Vale NC pour suivre l'état des communautés benthiques du bassin versant de la rivière Kwé. À partir des relevés de faune benthique effectués au début des années 2000 par la DAVAR (Gouvernement de Nouvelle-Calédonie), l'IBS a pu être à posteriori recalculé pour ce bassin versant. Cet indice a été récemment revu afin d'améliorer sa robustesse et fiabilité. Les modalités de scorage des taxa et de prélèvements ont été revues. Cependant les métriques d'entrée sont restées les mêmes, rendant cet indice sensibles à d'autres composantes que l'érosion seule.

Cet indice demanderait à être testé en parallèle d'un dispositif de suivi de l'érosion afin d'évaluer sa robustesse et si besoin intégrer des métriques relatives à l'érosion pour scorer les taxa.

Une piste de développement pourrait être de travailler sur la résistance et résilience des communautés notamment de macro-invertébrés après les événements pluvieux extrêmes. Aujourd'hui le principal impact de l'érosion est l'accentuation de l'intensité des crues (ruissellement favorisé vs infiltration) et de facto l'accentuation du transport solide. Observer la résistance des communautés de MIB suite aux épisodes pluvieux peut renseigner sur l'altération des capacités naturelles des communautés à résister à ces événements extrêmes et également sur leur capacité de résilience (quelle est la cinétique de récupération du milieu et comment l'érosion l'altère).

VI.2.2. Intérêt du suivi du biofilm

Différents travaux (Annexe 5) sont en cours de réalisation pour évaluer l'opportunité du suivi du biofilm pour le transport de métaux (Cd, Zn, Cu, Fe, etc.) qui sont régulièrement pris comme marqueurs de l'érosion en terrain minier. Il ressort que même avec des travaux de décontamination et de remédiation, les communautés ne retrouvent pas leur statut d'origine (ou de référence). Il est difficile de faire des comparaisons site contaminé/site de référence à la manière EQR/indice diatomique classique.

De ce fait, les manipulations de transplantation des communautés du site contaminé vers un site non perturbé sont à retenir pour évaluer l'impact. Elles peuvent donner une bonne mesure de la pression exercée sur les communautés. Il faut ensuite partir sur de l'analyse multicritère entre biofilm développé en zone non contaminée/biofilm développé en zone contaminée et transplantée en zone non contaminée/biofilm restant dans la zone contaminée.

- Mesure gravimétrique et chlorophylle ;
- Mesure d'accumulation des métaux dans le biofilm vs dans le milieu vs MES (Mesure du contaminant intracellulaire vs extracellulaire) ;
- Densité cellulaire, biovolume et forme de vie (l'érosion aura tendance à favoriser les petites formes adhérentes au substrat plutôt que les grosses formes érigées) ;
- Repérage des espèces résistantes ;
- Formes anormales.

L'opportunité de ressources humaines déjà disponible en Nouvelle-Calédonie (présence J. Marquié – Asconit Consultants) serait à exploiter si une telle piste d'indicateur devait être prise en compte. L'intervention d'expert de cette problématique lors de 2 à 3 missions est à prévoir.

A ce jour, il pourrait consister en :

- Travail de terrain : prélèvement sur site sur un nombre de site à définir (10 à 15 sites en fonction des caractéristiques pédologiques des sous bassins) au cours de 2 x 1 semaine / an pendant 1 an.
- Comparaison avec les données récemment acquises (1 homme/mois).
- Mesures et dénombrement des diatomées (8 hommes/mois).
- Analyses chimiques : Frais analytiques à préciser en fonction des contraintes locales de laboratoire.
- Construction de l'indice fonctionnel (2 hommes/mois).
- Matériel : existant sur place.
- Durée : 1,5 an en première approche. L'indice fonctionnel construit sera à amender au fur et à mesure des années d'acquisition.

VI.3. Evaluation de la pression érosion sur les milieux marins

VI.3.1. Suivis physique de l'érosion dans le milieu marin

VI.3.1.a. Evolution de la bathymétrie dans les petits fonds

Bien que les échosondeurs soient la méthode la plus répandue pour mesurer les profondeurs à l'heure actuelle, les lasers peuvent être utilisés lorsqu'il s'agit d'eaux claires et peu profondes. Les lasers peuvent également être utilisés pour mesurer les hauteurs sur terre près de la côte, ou pour situer des structures sur le littoral.

Lidar, de l'anglais « Light Detection and Ranging », ce qui signifie détection et télémétrie par ondes lumineuses, utilise le temps de vol d'une impulsion laser afin de déterminer une distance. Étant donné que la lumière voyage à environ 3 milliards de mètres par seconde (m/s), ce système doit être réglé avec une extrême précision pour mesurer une distance avec exactitude. Le lidar bathymétrique utilise un laser bleu vert, qui pénètre facilement les eaux claires. Le lidar bathymétrique aéroporté (avion ou hélicoptère) déploie deux lasers : un laser rouge mesure la hauteur de la surface de la mer puisqu'il ne pénètre pas l'eau, et un laser bleu vert mesure la distance jusqu'au fond, à condition qu'il y ait suffisamment de retours d'énergie rétrodiffusée à l'aéronef. L'écart de temps entre les deux retours de laser, après un traitement perfectionné des signaux, indique la profondeur de l'eau.

Le lidar bathymétrique est très bien adapté à des profondeurs de moins de 50 mètres environ, lorsque l'eau est claire et le fond marin est d'une couleur pâle, comme près des récifs coralliens. Il ne convient pas pour mesurer les profondeurs lorsque les eaux sont troubles, ou s'il y a du matériel en suspension dans la colonne d'eau, comme des bulles d'air, des poissons ou du varech.

En métropole, la bathymétrie côtière (< 10 m de fond) est suivie depuis plusieurs années à l'aide de LIDAR aéroporté (site web Litto3D du SHOM).

Dans le cas présent, il pourrait être intéressant de prévoir quelques campagnes annuelles de prospection LIDAR sur les embouchures des principaux cours d'eau. Ces campagnes pourraient être lancées quelques jours (pour permettre le dépôt des MES) après les forts événements érosifs, et par traitement SIG les évolutions de la bathymétrie pourraient ressortir très rapidement (mise en place traitement automatique).

Depuis deux ans, certains drones indiquent pouvoir utiliser le LIDAR avec une bonne résolution. Nous n'avons pas de retour sur la qualité de ces suivis, mais l'utilisation d'un drone étant bien plus simple et moins onéreuse qu'un petit avion, c'est une piste à étudier.

Ce suivi permettra de rapidement visualiser les transports de MES, leurs directions et de localiser les zones de dépôts des plus grosses particules (qui sédimentent rapidement).

VI.3.1.b. Suivi des panaches turbides par survols aériens en période de forte érosion

Dans la même veine que le précédent paragraphe, des drones / avions légers pourraient être envoyés en survol du périmètre d'étude suite aux fortes pluies (Attention aux conditions météo qui limitent le vol de certains appareils) afin de réaliser des photographies aériennes géoréférencées qui permettraient de suivre quasiment en direct les panaches turbides et leur extension en mer.

À moyen terme en couplant ce type de suivi avec les caractéristiques des bassins versant (surface impluvium, surface de forêt détruite, pluies mesurées localement...), il semble envisageable de différencier des bassins versants sur lesquels l'érosion est naturelle de ceux qui présentent une forte problématique d'érosion.

VI.3.2. Synthèse bibliographique des méthodologies actuellement mises en œuvre pour mesurer les impacts de la sédimentation sur la composante biologique

Sur l'ensemble de la bibliographie réalisée (plus de 130 documents techniques et scientifiques consultés) et des contacts pris par ailleurs avec des spécialistes (chercheurs de l'Australian Institute of Marine Science et de l'université James Cook), il apparaît qu'à l'heure actuelle aucun suivi dédié à l'impact de la sédimentation seule sur les communautés récifales n'est mis en œuvre de manière opérationnelle de par le monde.

En Australie, un suivi de la qualité des eaux et de ses impacts sur la Grande Barrière de Corail a été mis en place depuis 2005 par l'administration en charge du parc marin de la Grande Barrière de Corail (GBRMPA), sous le nom de Reef Rescue Marine Monitoring Program (RRMMP) (Thompson et al., 2013). Ce suivi opérationnel intègre les avancées et découvertes scientifiques les plus récentes sur le sujet. Il est à noter que les mesures sur la qualité des eaux incluent les impacts de la sédimentation d'une part (apports terrigènes liés à l'érosion du bassin-versant) et de l'eutrophisation d'autre part (apports d'éléments nutritifs liés à l'utilisation des sols par l'agriculture, l'élevage ou l'urbanisation).

Le programme inclus :

- Un suivi des communautés benthiques
- Un suivi de la qualité des sédiments
- Un suivi de la température de l'eau

Les méthodes de suivi des communautés benthiques sont présentées dans le Tableau 31.

Tableau 31. Résumé des méthodes de suivi utilisées dans le cadre du RRMMP (Thompson et al., 2013).

Méthode de suivi	Information recueillie	Description de la méthode
Photo Point Intercept	% de recouvrement des différentes catégories de	Une photo tous les 50cm le long de transects de 20m. Au total 32 images par transect. Identification du

	substrats récifaux.	substrat à des points donnés.
Démographie	Structure de taille et densité des colonies coralliennes juvéniles (coraux durs et mous).	Comptage des colonies juvéniles (<10cm de diamètre) le long de transects à largeur fixe (L=20m ; l=34cm). Identification au genre et répartition en classes de taille (0-2cm ; >2-5cm ; >5-10cm). N'inclus pas les colonies résultantes de la fragmentation ou de la mortalité partielle de colonies plus larges.
Recherche en Plongée	Occurrence de facteurs causant la mortalité des coraux.	Recherche des causes de mortalité le long de transects à largeur fixe (L=20m ; l=2m) : nécroses, marques de prédation, prédateurs corallivores, blanchissement, maladies, ...
Plaques d'implantation (des recrues coralliennes)	Approvisionnement en larves coralliennes.	Les plaques sont installées quelques semaines avant la période de ponte des coraux (conditionnement des plaques par l'installation d'une communauté bactérienne spécifique). 6 plaques à chaque début de transect. Identification sous microscope, à la famille (au mieux).
Échantillonnage des sédiments	Granulométrie et composition chimique en azote, carbone organique et inorganique.	Échantillonnage de sédiments déposés sur l'ensemble de la zone étudiée.

Evaluation de la condition du récif

Les résultats du RRMMP entre 2005 et 2012 indiquent que les conditions environnementales locales exercent une forte influence sur les communautés coralliennes. Les relations ne sont toutefois pas simples à traduire en termes de vitalité des communautés, les conditions environnementales et les communautés coralliennes présentent naturellement des gradients et variations.

Pour pallier à ces fluctuations naturelles pouvant masquer les impacts éventuels de la dégradation des conditions environnementales ou des communautés coralliennes, un certain nombre de paramètres sont considérés :

- La couverture combinée en coraux durs (scléactiniaires) et mous (alcyonnaires)
- Le taux d'augmentation (ou diminution) de la couverture en coraux durs
- La couverture en macroalgues (corallinacées et gazons algaux exclus)
- La densité des colonies coralliennes juvéniles
- Le recrutement corallien
- La combinaison des valeurs des indicateurs à différentes échelles spatiales

Le Tableau 32 présente les valeurs seuils retenues pour chacun de ces paramètres. Ces valeurs seuils ont été calculées et affinées à partir d'observations menées sur ces compartiments pendant une période de 3 à 5 ans. Elles ne sont pas directement applicables aux récifs sur la zone d'emprise du projet de Vale NC, dont des valeurs seuils devront être calculées à partir d'observations et mesures spécifiques sur site.

Tableau 32. Valeurs seuils pour l'évaluation de la condition du récif et sa résilience, utilisées dans le cadre du RRMMP (Thompson et *al.*, 2013).

Paramètre	Catégorie de l'évaluation	Valeurs seuils
Couverture combinée en coraux durs et mous	Positif	>50%
	Neutre	Entre 25% et 50%
	Négatif	<25%
Taux d'augmentation (ou diminution) de la couverture en coraux durs	Positif	Au-dessus de l'intervalle de confiance du modèle de prédiction des changements
	Neutre	Dans l'intervalle de confiance du modèle de prédiction des changements
	Négatif	En dessous de l'intervalle de confiance du modèle de prédiction des changements
Couverture en macroalgues	Positif	<5% ; ou <10% et en déclin par rapport à un état où la couverture était élevée due à une perturbation
	Neutre	Stable entre 5% et 15% ; ou entre 10% et 20% et en déclin
	Négatif	>15% ou en augmentation
Densité des colonies coralliennes juvéniles	Positif	>10,5 juvéniles/m ² de substrats disponibles (à -2m) ou >13 juvéniles/m ² de substrats disponibles (à -5m)
	Neutre	Entre 7 et 10,5 juvéniles/m ² de substrats disponibles (à -2m) ou Entre 7 et 13 juvéniles/m ² de substrats disponibles (à -5m)
	Négatif	<7 juvéniles/m ² de substrats disponibles
Recrutement corallien	Positif	>70 recrues / plaque
	Neutre	Entre 30 et 70 recrues / plaque
	Négatif	<30 recrues / plaque

Une fois les valeurs des paramètres obtenues et catégorisées (+ ; = ; -), la condition du récif émane d'une réflexion basée sur la combinaison de ces paramètres et de leur évolution. Pour plus de détails concernant cette évaluation, se référer au rapport de Thompson et *al.* (2013).

D'autres paramètres sont suivis en parallèle pour évaluer la qualité des eaux de la Grande Barrière de Corail, en lien direct avec l'état de santé des récifs coralliens (De'ath & Fabricius, 2008). Ils consistent en des mesures de la qualité des eaux et des réponses des communautés récifales.

Les mesures de la qualité des eaux :

- Le taux de chlorophylle a (comme mesure de l'eutrophisation) ;
- La profondeur de Secchi (comme mesure de la turbidité et de la profondeur critique à laquelle les communautés benthiques ne reçoivent plus de lumière) ;

- Le taux de matières en suspension, phosphore et azote particulaires, phosphore et azote dissous, phosphore et azote totaux.

Des valeurs seuils pour ces paramètres sont proposés dans De'ath & Fabricius (2008).

La réponse biotique est évaluée par :

- La richesse taxonomique en coraux durs ;
- La couverture en algues ;
- La richesse taxonomique en octocoralliaires phototrophes et hétérotrophes.

Avec l'amélioration de la qualité des eaux (meilleure clarté et réduction de la chlorophylle a) il est attendu :

- Une augmentation de la richesse taxonomique en coraux durs ;
- Une réduction drastique de la couverture en algues ;
- Une augmentation de la richesse taxonomique en octocoralliaires phototrophes ;
- Une diminution de la richesse taxonomique en octocoralliaires hétérotrophes avec l'augmentation de la clarté de l'eau et leur augmentation avec une réduction de la chlorophylle a.

Limites

A l'heure actuelle il n'existe aucun suivi opérationnel :

- Des herbiers de phanérogames marines et mangroves en rapport avec la sédimentation ou l'apport de métaux lourds ;
- Des populations de poissons en rapport avec la sédimentation ou l'apport de métaux lourds ;
- Des communautés coralliennes en rapport avec l'apport de métaux lourds.

VI.3.3. Valeurs seuils de sédimentation et de turbidité

Le taux d'accumulation moyen communément accepté et acceptable pour la survie des coraux est de 10 mg/cm²/jour ou moins. Au-delà de 50 mg/cm²/jour, de nombreux scientifiques considèrent que les risques de dégradation du récif sont élevés. Toutefois, sur les récifs côtiers, où les apports sédimentaires sont naturellement plus élevés et les communautés coralliennes adaptées à ces charges, la valeur seuil peut être plus élevée.

En ce qui concerne la turbidité, la concentration « normale » sur un récif sain serait de 10 mg/l ou moins, pour des récifs océaniques non perturbés. De la même manière, sur les récifs côtiers, où les apports sédimentaires sont naturellement plus élevés et les communautés coralliennes adaptées à ces charges, la valeur seuil peut être plus élevée.

Les tableaux ci-dessous, issus d'une synthèse bibliographique récente (Erftemeijer et al., 2012), présentent des valeurs seuils de sédimentation et de turbidité pour le maintien de récifs sains.

Tableau 33. Valeurs de sédimentation et de turbidité pour le maintien de récifs sains (Erftemeije et al., 2012)

Table 7 Some published critical thresholds of coral reefs for sedimentation ($\text{mg cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$).			
Species/type of corals	Location	$\text{mg cm}^{-2} \text{ day}^{-1}$	References
Coral reefs	Worldwide (moderate to severe)	10	Pastorok and Bilyard (1985)
Coral reefs	Caribbean	10	Rogers (1990)
Coral reefs	Caribbean	37	Pastorok and Bilyard (1985)
Coral reefs	Worldwide (catastrophic)	50	Pastorok and Bilyard (1985)
Coral reefs	Puerto Rico	90	Miller and Cruise (1995)
Coral reefs	Indo-Pacific	228	Pastorok and Bilyard (1985)
Most coral species	Worldwide	300	Bak and Elgershuizen (1976)

Table 4 Some published critical thresholds of corals (reefs) for Total Suspended Sediment (mg L^{-1}).			
Description	Location	mg L^{-1}	References
Coral reefs	Great Barrier Reef (GBR), Australia	3.3	Bell (1990)
Coral reefs	Fanning lagoon, Florida, USA	10	Roy and Smith (1971)
Coral reefs	Caribbean	10	Rogers (1990)
Coral reefs	Papua New Guinea	15	Thomas et al. (2003)
Coral reefs	Florida, USA	20	Bogers and Gardner (2004)
Corals	Dominican Republic	20	Van der Klis and Bogers (2004)
Marginal reef environments	Banten Bay, Java, Indonesia	40	Hoitink (2003)
Marginal reef environments	Paluma Shoals, QLD Australia	40	Larcombe et al. (2001)
Nearshore fringing reefs	Magnetic Island, GBR, Australia	75–120	Mapstone et al. (1989)
Nearshore fringing reefs	Cape Tribulation, GBR, Australia	100–260	Hopley et al. (1993)
Seven resistant coral species	Florida, USA	165	Rice and Hunter (1992)

VI.3.4. Variabilité dans la réponse de l'écosystème corallien

La réponse des communautés coralliennes à un épisode de forte turbidité ou sédimentation n'est pas uniforme. Elle va dépendre de :

- La durée, fréquence et intensité de l'exposition aux sédiments ;
- La qualité du sédiment ;
- La dispersion du sédiment (par les courants marins) ;
- La composition du peuplement corallien, certaines espèces étant plus tolérantes que d'autres (de par leur capacité à rejeter les sédiments ou à supporter l'abrasion ou l'étouffement par les sédiments notamment) ;
- L'effet synergique avec d'autres facteurs de perturbation ;
- Du niveau de perturbation des récifs avant l'impact de la sédimentation/turbidité : la réponse d'un récif à une perturbation donnée dépend de l'impact des perturbations antérieures ayant déjà affecté ce récif.

Ainsi, les valeurs seuils varient en fonction de nombreux paramètres et elles sont spécifiques à un récif donné (avec son cortège d'espèces), soumis à des conditions environnementales particulières. A titre d'exemple, la présence de courant sur un récif participe à nettoyer les sédiments des tissus coralliens. C'est le cas des récifs de Halifax Bay (Australie), qui vivent dans un milieu où la turbidité atteint 220 mg/l, aidés par la présence d'un courant côtier et de vagues qui remettent en suspension les sédiments déposés sur les coraux (Anthony & Larcombe, 2000). Plus proche de nous, on peut prendre l'exemple des récifs côtiers de Bourail, situés dans l'axe de la Néra, ou ceux de Pinjen (lagon de Koné), où les eaux sont excessivement chargées en sédiments (la visibilité y est souvent inférieure au mètre), n'empêchant pas pour autant la présence et le maintien de récifs peuplés de coraux denses et adaptés à ces conditions extrêmes (S. Job, obs. pers. sur stations RORC).

Il est important de souligner que de faibles apports chroniques sont potentiellement plus néfastes pour un récif qu'un apport élevé de courte exposition (Connell, 1997). Par ailleurs, des stress répétés, ne laissant pas suffisamment de temps aux coraux pour se régénérer, peuvent conduire à des mortalités importantes (McArthur et al., 2002).

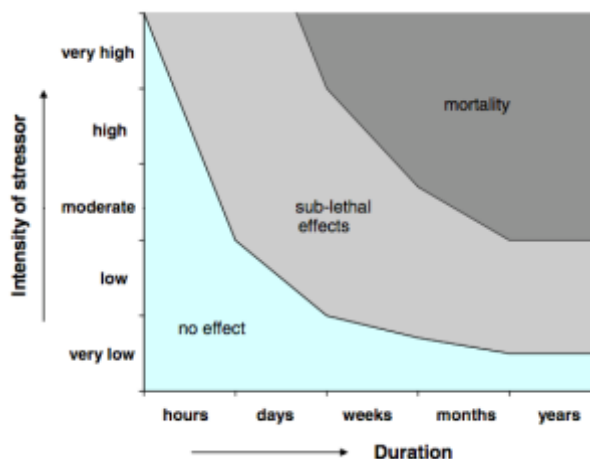


Figure 31. Relation conceptuelle entre l'intensité et la durée d'un stress et le risque d'effets sub-létaux à létaux sur les communautés coralliennes (McArthur *et al.*, 2002).

Implications pour le suivi

Compte tenu des larges variations dans la vulnérabilité des peuplements coralliens à l'augmentation de turbidité et de sédimentation, la mise en place de valeurs seuils de réponse du système corallien à ces perturbations doivent résulter d'une approche spécifique au site. Elle doit prendre en compte la composition de l'assemblage corallien et les conditions environnementales spécifiques du site, notamment en termes de variabilité temporelle et spatiale des niveaux de turbidité et de sédimentation naturels et anthropiques.

VI.3.5. Qualité du sédiment

Il a été longtemps admis que le principal facteur affectant les coraux soumis à l'augmentation de la turbidité était la réduction de la quantité de lumière disponible pour l'activité photosynthétique réalisée par les zooxanthelles. Récemment, il a été démontré que la réduction de la lumière ne jouerait qu'un rôle mineur dans la perte de vitalité des coraux, en revanche la taille des sédiments et leur composition en nutriments et composés organiques seraient les facteurs prépondérants pour expliquer le stress corallien.

Il a notamment été démontré que des sédiments vaseux ($<63 \mu\text{m}$) peuvent stresser les coraux après une très courte exposition ($<36 \text{ h}$) alors que des sédiments plus grossiers (aragonite pur ou sableux) ne provoquent aucun stress corallien après 2 jours d'exposition. En effet, les vases ou argiles ($<63 \mu\text{m}$), de par leurs propriétés physique et chimique, sont plus enclins à développer une communauté bactérienne pouvant endommager les coraux. Par ailleurs, les fractions fines (vases et argiles) sont des vecteurs de transport des éléments chimiques adsorbés, en particulier le phosphore, les pesticides chlorés et la plupart des métaux, qui sont ensuite transportés jusqu'au milieu marin par les sédiments.

La matière organique contenue dans le sédiment accroît l'activité microbienne au sein du sédiment, qui, au travers des processus de respiration, en augmente l'anoxie et fait diminuer le pH. En contact avec le tissu corallien, ce sédiment anoxique et plus acide engendre la dégradation des tissus coralliens et la production de mucus. Tissus et mucus étant riches en composés sulfurés, leur dégradation conduit à la production de sulfure d'hydrogène, qui a pour effet de propager les dégradations aux tissus voisins et d'en accélérer la dégradation.

L'érosion des sols ultramafiques entraîne l'apport de métaux dans le milieu marin : nickel, fer, chrome, cobalt en particulier. L'effet de ces métaux sur les communautés récifales n'est pas connu.

Implications pour le suivi

Une attention particulière devra être portée à la composition du sédiment arrivant au lagon via les phénomènes d'érosion, et notamment sa composition en matière organique, afin d'apprécier au mieux les effets de la sédimentation sur les communautés coralliennes à différentes échelles de temps.

La qualité de l'expertise dépend alors de la qualité des grilles fournies. Les seules grilles de références citées dans les rapports étudiés sont dans les Tableau 34 et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ces valeurs proviennent des études effectuées dans le lagon sud (Canal de la Havannah et Baie de Prony) entre 2004 et 2009 par l'Unité de Recherches CAMELIA de l'IRD de Nouméa sur des sites peu à moyennement perturbés par les activités anthropiques.

Tableau 34. Concentration en métaux dans les sédiments de surface, habituellement mesurées dans des zones sous influence marine (IRD, 2011²⁸)

(µg/g)	Phase organique	Phase carbonatée	Phase hydroxydée	Phase réfractaire	Concentration totale
Co	10.1±2.4	9.6±12.3	9.5±8.5	45.9±14.5	73.0±8.6
Cr	47.3±31.7	14.6±13.4	10.9±8.3	2536±1067	2608±1014
Fe	9.7±13.4	202.5±177.6	340.5±95.5	85730 ±37340	86280 ±37080
Mn	36.6±3.3	219.0±32.5	50.6±21.6	356.0±21.2	662.5±6.4
Ni	13.8±4.5	7.6±2.9	18.8±5.9	1040±50	1080±50

Tableau 35. Concentration en métaux dans les sédiments de surface, habituellement mesurées dans des zones sous influence terrigène modérée (IRD, 2011)

(µg/g)	Phase organique	Phase carbonatée	Phase hydroxydée	Phase réfractaire	Concentration totale
Co	5.1±4.7	22.6±10.7	41.4±9.9	107.3±30.0	176.3±7.7
Cr	29.6±38.1	18.4±15.6	31.8±12.1	7740 ±3585	7820 ±3520
Fe	19.3±27.0	24.2±27.3	897.0±240.4	192970 ±74810	193900±74900
Mn	97.4±45.4	494.0±81.3	248.6±78.1	828.5±90.5	1668±83
Ni	10.6±3.3	17.3±12.1	49.7±18.8	2230 ±540	2300 ±535

VI.3.6. Tolérance et vulnérabilité des espèces coralliennes à la sédimentation et turbidité

La présence de récifs coralliens dans des environnements naturellement turbides, et qui s'y sont développés il y a des milliers d'années, reflète la capacité de certaines espèces à s'adapter à ces conditions particulières. Les différences dans la composition des assemblages coralliens, entre des zones côtières turbides et des récifs plus océaniques aux eaux claires, reflètent des différences dans les niches écologiques optimales pour chaque espèce.

Afin de mieux comprendre l'effet de la sédimentation et turbidité sur les peuplements coralliens, un grand nombre d'études ont été menées, sur diverses espèces coralliennes, visant à évaluer la capacité de tolérance de chaque espèce à ces pressions.

Il a été clairement démontré que chaque espèce corallienne possède son propre seuil de résistance à la sédimentation et à la turbidité, défini par une valeur critique de concentration en sédiments au-delà de

²⁸ Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie – IRD 2011

laquelle des effets mortels peuvent survenir. Ce seuil critique est très variable selon les espèces, la durée et l'intensité de l'exposition et la nature des sédiments.

Certaines espèces peuvent tolérer une exposition courte (quelques jours) à un taux de matières solides en suspension très élevé (1000 mg/l), tandis que d'autres meurent après une exposition de quelques semaines à des concentrations faibles (30 mg/l). La durée de vie des coraux soumis à une sédimentation anormalement forte varie de quelques jours (pour les espèces vulnérables) à au moins 5 ou 6 semaines (pour les espèces tolérantes).

Une récente synthèse des études expérimentales et observations de terrain a permis de compiler une liste d'espèces de coraux classées selon leur vulnérabilité à la turbidité et à la sédimentation (Erftemeijer *et al.*, 2012).

Par ailleurs, l'analyse de ces données a montré que la capacité de résistance à la turbidité et à la sédimentation est principalement due à la forme de croissance des colonies (Figure 32).

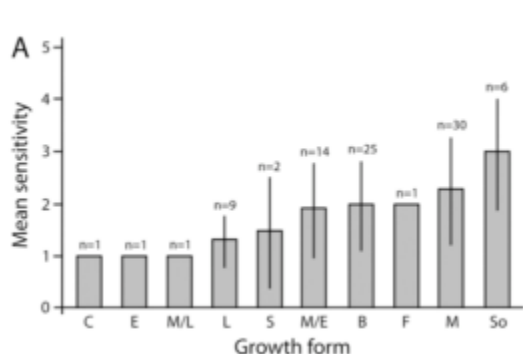


Fig. 5. Relationship between the sensitivity of corals to turbidity and [A] their growth form, and [B] their calyx size. Sensitivity (mean score $\pm$ SD) was determined by ranking corals according to their type of response to different levels of turbidity (see text and Table 6). Legend (growth forms): B = branching; C = columnar (incl. digitate); E = encrusting; F = foliaceous; L = laminar (incl. plate & tabular); M = massive; S = solitary (free-living); So = soft corals & gorgonians.

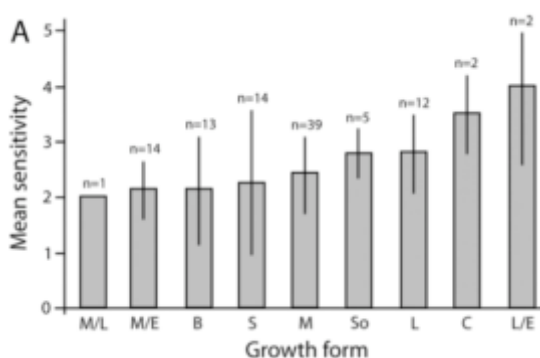


Fig. 6. Relationship between the sensitivity of corals to sedimentation and [A] their growth form, and [B] their calyx size. Sensitivity (mean score $\pm$ SD) was determined by ranking corals according to their type of response to different rates of sedimentation (see text and Table 10). Legend (growth forms): B = branching; C = columnar (incl. digitate); E = encrusting; L = laminar (incl. plate & tabular); M = massive; S = solitary (free-living); So = soft corals & gorgonians.

Figure 32. Capacité de résistance à la turbidité et à la sédimentation en fonction de la forme de croissance

Implications pour le suivi :

Compte tenu des différents niveaux de tolérance des espèces à la sédimentation ou à la turbidité, la composition du peuplement tend à se modifier sous l'effet de ces pressions, avec à terme une dominance des espèces tolérantes, associée à une diminution des espèces plus vulnérables. Une attention particulière devra être portée à la modification de la composition du peuplement corallien et à leur forme de croissance.

Les seuils de tolérance aux apports sédimentaires ne sont pour l'heure pas connus pour les coraux de la zone d'influence de l'usine de Vale NC. Afin d'établir ces seuils, il est nécessaire de relever, lors des suivis biologiques et physico-chimiques, des données sur les mortalités partielles et totales des coraux, en relation avec les taux de sédimentation et de turbidité. La connaissance des seuils de tolérance devrait permettre à terme d'anticiper sur les effets néfastes des apports sédimentaires sur les communautés coralliennes.

VI.3.7. Effets de la sédimentation et turbidité sur les colonies coralliennes

A l'exception de quelques espèces libres (comme les Fungiidae), les coraux sont des organismes sessiles. Quand les conditions environnementales deviennent néfastes pour leur développement, à défaut de ne pouvoir bouger, ils doivent s'adapter (quand ils le peuvent) pour survivre en modifiant leur forme de croissance et certains traits de leur physiologie.

Animal vivant en symbiose avec des algues unicellulaires (les zooxanthelles) incluses dans son tissu, le corail a besoin de lumière pour satisfaire les besoins de la photosynthèse, qui en retour lui fournit une source d'alimentation et d'énergie pour assurer ses fonctions vitales.

La sédimentation et l'augmentation de la turbidité dans la colonne d'eau affectent les coraux de plusieurs manières :

- En diminuant la quantité et la qualité de la lumière arrivant au récif (par augmentation de la turbidité), l'activité photosynthétique est réduite, provoquant de multiples réactions physiologiques pour le corail : réduction du taux de calcification, réduction du taux de croissance, plus grande vulnérabilité aux maladies coralliennes ou aux dommages physiques, réduction des capacités de régénération des tissus nécrosés, réduction de la capacité de reproduction.
- En se déposant sur le substrat, les sédiments diminuent voir inhibent le recrutement larvaire en rendant le substrat impropre à l'installation des larves. Par ailleurs les sédiments en suspension dans la colonne d'eau peuvent abraser les nouvelles recrues ou les étouffer en se déposant sur le substrat.
- En se déposant à la surface des tissus coralliens, les sédiments peuvent entraîner la mort des coraux par 1/ étouffement des tissus sous conditions anoxiques ; 2/ famine des polypes par l'inhibition de la production photosynthétique ou de l'alimentation par voie hétérotrophique. En effet, le dépôt de sédiment sur les tissus coralliens provoque une rétraction des polypes et l'arrêt des mouvements des tentacules. Ainsi, en cas de forte sédimentation, il devient, pour la plupart des coraux, impossible de compenser les pertes alimentaires autotrophiques (via la suppression ou la réduction de l'activité photosynthétique) par une activité hétérotrophique (les polypes ne pouvant plus capturer de la nourriture par leur tentacules), conduisant à la mort des coraux par famine. Il est à noter toutefois que certains coraux peuvent utiliser les éléments nutritifs contenus dans les sédiments comme source de nourriture (alimentation hétérotrophe), phénomène observé dans des cas de faibles niveaux de sédimentation et pour des sédiments contenant du carbone organique.
- Tous les coraux ont la capacité de rejeter les sédiments déposés sur leurs polypes, de manière plus ou moins efficace selon les espèces. Il existe 3 mécanismes de rejet (voir § IV.1.9) ; tous sont très coûteux en énergie, alors détournée des fonctions vitales telles que la croissance ou autres processus métaboliques. Si non rejetés, le dépôt de sédiments peut également conduire à la nécrose partielle des tissus ensevelis voire leur mort. Ce phénomène est exacerbé par la présence de matière organique dans le sédiment (voir § 4).
- Certains coraux peuvent s'adapter aux conditions turbides ou à l'apport de sédiments en modifiant leur forme de croissance, comme cela a été observé en Indonésie chez une espèce d'*Acropores* branchue dont la forme a varié de branches érigées verticalement dans un site non impacté à une forme presque tabulaire, avec le bout des branches érigées verticalement dans un site soumis à la sédimentation (Crabbe & Smith, 2005).

VI.3.8. Sédimentation, turbidité et recrutement corallien

L'effet le plus critique de la sédimentation est très certainement l'inhibition du recrutement corallien ; la composition et vitalité du peuplement adulte étant directement liées à la survie, installation et croissance des larves et jeunes recrues coralliennes.

Nous avons vu précédemment que les coraux adultes présentent des niveaux de tolérance différents à la sédimentation et à la turbidité. En revanche, il a été démontré que les recrues coralliennes sont moins tolérantes que les adultes à ces perturbations, et que leur seuil critique de survie est plus bas que celui des colonies adultes (synthèse dans ISRS, 2014). Lorsque les sédiments recouvrent les surfaces du récif, le substrat devient impropre à la colonisation par des larves coralliennes. Si des larves sont récemment fixées, elles peuvent être abrasées ou étouffées par les sédiments.

Sur un récif dégradé, la présence de gazons algaux réduit voir inhibe le recrutement corallien. L'effet varie en fonction de la composition des gazons algaux : un gazon établi depuis longtemps et brouté par les herbivores n'aura que peu d'effet tandis qu'un gazon nouveau (<6 semaines) et épais aura un effet très néfaste. Le recrutement est d'autant plus réduit que les gazons algaux piègent des sédiments.

Il a été démontré que des niveaux élevés de turbidité (50 mg/l, 100 mg/l) affectent la fécondation des œufs, la survie des larves et l'installation des larves chez *Acropora digitifera*, *A. millepora*, *Pectinia lactuca* et *Pocillopora damicornis*.

Implications pour le suivi

Un grand nombre d'études ont démontré la relation de causalité entre l'augmentation de la turbidité et de la sédimentation et la réduction du recrutement corallien. Le suivi du taux de recrutement corallien comme indicateur de l'évolution de la qualité des eaux (en particulier lié au taux de sédimentation/turbidité) est réalisé en routine depuis une dizaine d'années sur les récifs australiens par l'Australian Institute of Marine Science (AIMS, Townsville) dans le cadre du programme de suivi Reed Rescue Marine Monitoring Program (Thompson *et al.*, 2013). Le suivi de ce paramètre pourrait être un indicateur utile et pertinent pour évaluer l'impact de l'érosion sur les communautés récifales dans la zone d'emprise de l'usine de Vale NC. Ce type de suivi doit être engagé sur le long terme afin de prendre en compte les variations temporelles associées au recrutement corallien.

VI.3.9. Conséquences à l'échelle de la communauté corallienne

A l'échelle du récif l'augmentation de turbidité ou de sédimentation se manifeste par :

- La diminution de la couverture corallienne ;
- La diminution de la diversité en espèces coralliennes ;
- La zonation des espèces coralliennes depuis les zones profondes jusqu'aux zones moins profondes (où la quantité de lumière requise pour leur développement est plus importante) ;
- La modification de la composition du peuplement corallien par la dominance d'espèces moins demandeuses en lumière (espèces hétérotrophes par exemple) et/ou plus tolérantes aux apports sédimentaires ;
- La modification des formes coralliennes en réponse à une adaptation au rejet passif des sédiments. ;
- En cas de mortalité massive : un changement dans les communautés benthiques, vers un état dominé par les macroalgues ;

➤ L'augmentation de la diversité et de la densité en octocoralliaires.

Les exemples de réduction dans la couverture et diversité coralliennes sous l'effet de l'augmentation de la turbidité ou de la sédimentation sont nombreux et ont été observés de par le monde. Ces 2 paramètres sont utilisés dans toutes les études (expérimentales, *in situ* ou dans le cadre de suivis environnementaux) comme indicateurs de changement dans la vitalité du récif. Toutes ces études montrent également une augmentation de ces paramètres à mesure que l'on s'éloigne des sources terrigènes.

Les effets sur la croissance corallienne sont plus mitigés. La plupart des études concluent à une réduction de la croissance corallienne avec la turbidité ou sédimentation, certaines études toutefois ne permettent pas de mettre en évidence cette relation inverse (Browne, 2012). Il a été suggéré que le taux de croissance ne serait pas un bon indicateur de la vitalité du récif dans les zones régulièrement soumises à la sédimentation et à l'eutrophisation (Edinger et al., 2000). En effet, il a été montré que la croissance corallienne pouvait être accrue dans le cas d'apports organiques modérés, au droit d'émissaires d'eaux usées (Lough & Barnes, 1997), notamment par la capacité de certaines espèces à consommer de la matière organique pour couvrir leurs besoins énergétiques (Mendes et al., 1997). En revanche dans le cas d'apports élevés en sédiments, le taux de croissance diminue en réponse à la diminution de la lumière disponible.

La perte de lumière (par augmentation de la turbidité) est un facteur critique pour le développement du récif. De nombreux cas de migration d'espèces vers des eaux moins profondes, pour capturer la quantité de lumière adéquate à leur croissance, ont été observés en réponse à l'augmentation de turbidité. Ceci souligne l'importance de suivre l'évolution de la stratification de la communauté corallienne selon la profondeur en réponse aux apports sédimentaires.

Ainsi, la composition du peuplement corallien peut être indicatrice d'une exposition chronique aux sédiments. Sur un récif chroniquement soumis à la sédimentation ou forte turbidité, le peuplement est composé d'espèces généralement trouvées plus en profondeur et d'espèces adaptées aux milieux turbides.

Implications pour le suivi :

- *Un grand nombre d'études et de suivis environnementaux des impacts anthropiques ont démontré la relation de causalité entre la réduction de la couverture corallienne totale, la réduction de la diversité spécifique et l'augmentation de la turbidité et de la sédimentation. Ces paramètres doivent être nécessairement pris en compte dans l'évaluation des effets de l'érosion sur les communautés récifales.*
- *Le taux de croissance des colonies coralliennes pourrait être suivi, dans le cas où les sédiments seraient très pauvres en composés organiques.*
- *La composition du peuplement corallien semble fournir une bonne indication de l'exposition du récif aux apports de sédiments, notamment en rapport avec la migration des espèces le long d'un gradient de profondeur et le changement de la communauté vers la dominance des espèces tolérantes aux charges sédimentaires.*

VI.3.10. Mécanismes de rejet des sédiments par les polypes coralliens

Le rejet des sédiments peut se faire de manière passive ou active.

La capacité de rejet passif est principalement liée à la forme de croissance du corail. Naturellement, les formes de croissance les plus affectées par la sédimentation sont celles concaves ou plates, contrairement aux formes convexes et branchues qui retiennent peu ou pas les sédiments. Le rejet passif peut aussi se faire sous l'effet de l'hydrodynamisme (courants). Enfin, des organismes commensaux peuvent aider dans le rejet des sédiments, comme des crabes inféodés à *Pocillopora damicornis* et *Acropora hyacinthus* qui génèrent, par une activité accrue lors d'épisodes de sédimentation, des micro-courants locaux participant au nettoyage des sédiments.

Le rejet actif se fait au travers de 3 mécanismes :

1. Le gonflement du tissu corallien.
2. Le nettoyage par les tentacules et cils.
3. La production de mucus.

Toutes les espèces de coraux ne sont pas aussi efficaces dans le rejet actif des sédiments. À titre d'exemple, grâce à une production importante de mucus, les coraux massifs *Porites* tolèrent les milieux turbides, bien que peu efficaces dans le rejet des sédiments par leurs tentacules et cils.

Ces 3 mécanismes peuvent être utilisés de manière simultanée, tous requièrent une importante dépense d'énergie, alors déviée des autres fonctions vitales.

Quand la quantité de sédiments excède la capacité des coraux à les rejeter, il va se former une couche de sédiments anoxique à la surface des tissus qui peut conduire à sa nécrose puis mortalité.

Implications pour le suivi

La capacité de rejet des sédiments (de manière active ou passive) par les différentes espèces en présence va déterminer la composition du peuplement dans les zones soumises aux apports sédimentaires, les plus habiles seront les espèces dominantes. Ceci souligne l'importance d'intégrer dans les suivis biologiques la composition en espèces du peuplement corallien et les formes de croissance.

VI.3.11. Sédimentation et communautés de poissons

La très grande majorité des études sur les effets des apports sédimentaires dans le milieu marin s'est focalisée sur les organismes coralliens. Étant à la base de la construction du récif, habitat dominant et source d'alimentation pour de nombreuses espèces, on peut logiquement s'attendre à ce qu'une modification de la structure de l'habitat corallien ait des conséquences sur la faune et la flore récifale.

Quelques rares et récentes études se sont toutefois attachées à comprendre les effets de la sédimentation sur les poissons récifaux.

Goatley & Belwood (2008) ont montré que la présence de sédiments dans les gazons algaux réduit le taux d'herbivorie par les poissons chirurgiens (*Acanthuridae*), perroquets (*Scaridae*) et lapins (*Siganidae*), et ce sur tous les types de récifs considérés (platier, crête et pente récifale). Les poissons herbivores jouent un rôle crucial dans le maintien des récifs coralliens, en régulant la couverture en algues et en évitant que le récif ne glisse vers un état dominé par les algues (plutôt que les coraux).

Une augmentation de la concentration en sédiments dans la colonne d'eau peut affecter les poissons juvéniles en agissant sur le succès du recrutement via la suppression des signaux chimiques permettant l'installation des poissons sur un récif lors de leur stade planctonique, et en réduisant leur croissance en interférant avec l'alimentation des poissons (Wenger et *al.*, 2011, 2012).

Johansen & Jones (2013) ont démontré que la turbidité affecte la capacité des poissons planctivores (4 espèces de demoiselles) à s'alimenter en altérant leur performance de recherche des proies. En effet, le succès des attaques de proies diminue avec la turbidité. Les seuils de tolérance à la turbidité varient entre les espèces avec un seuil plus élevé (8 NTU) pour les espèces typiquement rencontrées sur les récifs côtiers ; tandis que les espèces plus océaniques ne supportent qu'une plus faible augmentation de la turbidité (4 NTU).

VI.3.12. Sédimentation et herbiers de phanérogames marines

Les effets de la turbidité sur les herbiers sont encore mal compris (Brodie et *al.*, 2008). On sait que la distribution et la croissance des herbiers dépend de divers facteurs : température, salinité, lumière (turbidité), disponibilité en nutriments et caractéristiques du substrat. De forts épisodes de sédimentation conduisent à l'augmentation de la turbidité et à la modification des caractéristiques du sédiment, pouvant affecter la croissance et la survie des herbiers. Des études sont encore nécessaires pour en comprendre les effets spécifiques.

VI.3.12.a. Etude de l'incidence lumineuse au niveau des herbiers

En méditerranée, des études **sur les posidonies** ont montré que la tolérance des herbiers de posidonies à supporter de faibles niveaux d'éclairement dépend de leur valeur d'éclairement minimum. La bibliographie existante indique des seuils critiques variant de 8 à 16 % de la lumière incidente (Ruiz et Romero, 2001 ; Erftemeijer et Lewis, 2006).

Ce type de suivi avec la mise en place de luxmètres au niveau des herbiers de Kwé pourrait être une piste de R&D à moyen terme si une dégradation de la superficie et de la vitalité des herbiers était observée sans réussir à le relier à des pressions locales.

Pour traiter convenablement les données acquises, cela demande cependant un travail bibliographique important ainsi que des suivis *in situ* sur plusieurs herbiers de Nouvelle-Calédonie dans différents secteurs (et turbidité probablement aussi différente). Un travail important en amont est donc nécessaire avant d'envisager un suivi de ce paramètre par Vale NC.

Chapitre VII - Conclusion

Cette étude visait à apporter des pistes pour l'amélioration du suivi de la pression érosion sur l'intégralité des milieux, en partant des têtes de bassin versant jusqu'au milieu côtier, dans la zone d'influence du complexe industriel et minier du Grand Sud. La complexité et le caractère unique des écosystèmes de la région représentent une richesse qu'il est nécessaire de protéger avec une attention particulière.

La première partie consistait à analyser la pertinence des suivis actuels menés par Vale NC et qui peuvent être associés au suivi de la pression générée par l'érosion. Il est tout d'abord frappant de remarquer que la pression érosion n'a pas jusqu'à ce jour fait l'objet d'un encadrement réglementaire sur la zone du projet. L'activité minière à ciel ouvert présente cependant des caractéristiques qui favorisent notamment cette pression. Mentionnons également qu'une évaluation de cette pression a toutefois été menée assez tôt par Vale NC, rappelant l'intérêt de l'industriel à prendre en compte cette perturbation sur les milieux.

Toutefois, l'examen des différents suivis menés sur les principaux compartiments impactés par cette pression mène à des conclusions peu favorables :

- Sur le sol : après un bref diagnostic initial lors de l'étude préalable (Landloch, 2004), aucun suivi n'a été mis en place durant de nombreuses années sur la base de méthodes courantes d'évaluation de la dégradation et du décapage des sols. De récentes études permettent de commencer un suivi (notamment sur la typologie des sols à nu et la végétation), mais un pan non négligeable du suivi a été totalement occulté.
- Sur le milieu dulcaquicole : si les suivis environnementaux sont nombreux, ils ne sont pas organisés de manière à établir un diagnostic de l'érosion fiable et reproductible (également en raison de l'absence d'encadrement réglementaire). Malgré les efforts de l'industriel pour échauder une stratégie de suivi, celle-ci butte sur des écueils méthodologiques qui ne permettent pas de quantifier de manière satisfaisante la pression. Les nombreuses données physico-chimiques ne sont par ailleurs pas exploitées pour évaluer la pression érosion soit par manque de paramètres explicatifs, soit par défaut de la matrice à suivre, soit encore par des fréquences inadaptées pour mener une évaluation satisfaisante. Le charriage, qui représente une fraction importante des matériaux déplacés, n'est pas suivi ni évalué. Enfin les indicateurs biologiques suivis ne semblent pas totalement adaptés pour discriminer la perturbation érosion.
- Sur le milieu côtier et marin : contrairement aux deux premiers compartiments, les suivis en milieu marin ont été lancés rapidement dès 2007 sur tous les compartiments (eau, sédiment, biote) avec une optique de suivi des pressions anthropiques sur les milieux aquatiques littoraux et de qualification de l'état de conservation des écosystèmes (indicateur essentiel et indispensable pour tout suivi à moyen-long terme du milieu marin). Les suivis réguliers n'étaient cependant pas optimisés en terme de fréquence et type de suivi, ce qui a conduit à la proposition en 2015 d'un suivi optimisé par l'OEIL (Melanopus et Dexen, 2015). Ce suivi proposé, très complet, ne cible pas directement la pression érosion. De nombreuses informations deviendront disponibles grâce à ce suivi qui pourra être complété en marge afin de mieux répondre au suivi des pressions liées à l'érosion.

Sur la base de cet examen des suivis très partiellement exploitables pour suivre la pression érosion, nous avons formulé des recommandations afin de créer un suivi, là où il est quasi inexistant, ou améliorer le suivi actuellement mené. Les méthodes d'acquisition et d'interprétation ont été explorées afin de s'adapter au contexte de la zone d'étude. Cependant, la question de l'apparition d'une exigence

réglementaire de suivi de l'érosion et du niveau d'information souhaité reste primordiale pour affiner les pistes mises en avant notamment en termes d'investissement financier pour satisfaire à cette exigence. A ce titre, nous évoquons ci-dessous les principaux suivis proposés, assorti d'un niveau de priorité de mise en œuvre, ainsi qu'une évaluation qualitative de l'effort financier à allouer :

- Investissement : comprend les coûts d'acquisition de matériels, mise en œuvre ou d'étude ;
- Fonctionnement : comprend les coûts salariaux des équipes en interne à dédier au suivi et les consommables.

Il faut également noter que certains suivis s'inscrivent dans un besoin fort de quantification de l'érosion tandis que d'autres suivis s'intéressent plus à la qualification de l'érosion notamment dans la définition des sources (notamment en discriminant l'érosion anthropique de l'érosion naturelle).

SOL	Niveau de priorité	Liens opérationnels avec d'autres suivis	Investissement	Fonctionnement
Suivi 1. Vulnérabilité à la perte de matière	1 Etat	S2	+	+
Suivi 2. Surface de sol dénudé/évolution de la dégradation	1 Suivi	S1	++	+
Suivi 3. Couverture végétale	2 R&D		+	+

EAUX CONTINENTALES	Niveau de priorité		Investissement	Fonctionnement
Suivi 4. Météorologie	1 Suivi	S5/S8/S9/S10	++	++
Suivi 5. Limnimétrie	1 Suivi	S4/S8/S9/S10	+++	++
Suivi 6. Règles topographiques	2 R&D	S1/S2	++	++
Suivi 7. Erosion des ravines	2 R&D		+	++
Suivi 8. Parcelles de ruissellement	2 R&D	S4/S5/S9/S10	++	+
Suivi 9. Quantification des matières en suspension	1 Suivi	S4/S5/S8/S10	+++	++
Suivi 9 bis. Physico-chimie des MES	1 Suivi	S4/S5/S8	++	++
Suivi 9 ter. Physico chimie de l'eau	1 Suivi	S4/S5/S8	+	+
Suivi 10. Pièges à sédiments	1 Suivi	S11	+++	+++
Suivi 11. Bassins de sédimentation miniers	2 Suivi	S10	+	++
Suivi 12. Quantification du colmatage	2 R&D		+	++
Suivi 13. Indicateurs biologiques	2 Suivi		++	/

EAUX COTIERES ET MARINES	Niveau de priorité		Investissement	Fonctionnement
Suivi 14. Turbidité et salinité en continu dans la colonne d'eau	1 Suivi		++	/
Suivi 15. Flux de particules dans la colonne d'eau	1 Suivi		+++	/
Suivi 16. Flux en métaux dissous	1 Suivi		+++	/
Suivi 17. Composition des sédiments déposés sur le fond	1 Suivi		+++	/
Suivi 18. Habitats macrobenthiques et ichtyologiques	1 Suivi		+++	/
Suivi 19. Communautés coralliennes	1 Suivi		+++	/
Suivi 20. Herbiers de phanérogames	1 Suivi		++	/
Suivi 21. Macrofaune benthique de substrat meuble	1 Suivi		+	

En complément de ces approches pratiques de quantification des flux, il est prioritaire de stabiliser l'approche méthodologique et de ramener l'ensemble des paramètres suivis en zone potentiellement soumise à perturbation à des zones de référence ou des valeurs de références temporelles (plus difficile à trouver). Il s'agit de combiner ces différentes approches selon le principe BACIPS : Before/After - Control/Impact - Paired Series. Cette démarche n'a pour l'instant quasiment pas été menée pour le milieu terrestre à proprement parler et de manière très parcellaire pour les milieux aquatiques terrestres (physico-chimie et indicateurs biologiques).

Ceci s'explique principalement par la difficulté à trouver une situation de référence géographique ou temporelle pour les milieux terrestres et l'hydrologie. De fait, le phénomène de l'érosion étant complexe, il nous semble que **la construction d'un modèle est la plus adaptée à la problématique**. En effet, un modèle permet de qualifier et quantifier précisément l'ampleur, l'évolution mais aussi l'origine du phénomène à différentes échelles. Ainsi, le modèle permet de prédire l'érosion dans un bassin versant en fonction de différentes caractéristiques pédologiques, géologiques, topographie, d'occupation du sol, etc. Les grandeurs caractéristiques définies servent donc de valeurs de référence qui seront ensuite confrontées aux données de suivi.

Enfin, la modélisation revêt plusieurs intérêts dans le cadre de la surveillance :

- L'utilisation d'un modèle est un outil permettant d'optimiser la gestion environnementale (identification zones contributrices à l'érosion, évaluation de l'efficacité des ouvrages de sédimentation etc.) ;
- Une fois calé et estimé fiable, le modèle permet également de réduire la surveillance environnementale.

À partir de cette donnée de base, doivent être définis en milieu terrestre :

- Le « bruit de fond » sur les bassins de référence pour tous les paramètres (qualitatifs et quantitatifs, physiques, chimiques et biologiques) notamment en période de crue ;
- Une fois acquis, ce bruit de fond peut alors être défini la signature chimique en milieu marin d'un bassin de référence ;
- Les caractéristiques de l'érosion sur des bassins marqués par un type de perturbation (déblais, etc.) sur différents substrats afin de définir le profil type de flux sortants et leur signature en milieu dulçaquicole puis en milieu marin.

Ces profils type établis, les stations de suivis environnementaux terrestres actuelles peuvent être aménagés au regard des contraintes techniques évoquées et agrémentés de nouveaux types de suivis. Enfin, en milieu marin, les suivis actuels sont revisités au regard de ces signatures types des différentes érosions mais également enrichis par de nouveaux paramètres.

La **troisième étape** de ce travail consistait à réaliser une synthèse des tendances d'évolution des pressions associées à l'érosion dans l'ensemble de compartiments à partir des données bibliographiques. Cette tâche n'a pas pu être menée à bien en raison de l'état du jeu de données intégré à la base (matrices inadaptées, fréquence d'acquisition inadaptée, valeurs aberrantes). Par ailleurs, comme il a été évoqué auparavant, une partie des paramètres de base permettant d'évaluer les tendances n'étaient pas acquises de manière suffisamment satisfaisante pour répondre à cette demande exprimée par la maîtrise d'ouvrage. Les seuls paramètres pouvant fournir quelques indications sur la tendance à l'érosion (flux sédimentaires, IBS, suivis biologiques marins) ne présentent à ce jour pas une évolution marquée de cette pression depuis 2006.

Enfin la **dernière étape** de cette prestation avait pour objectif de réaliser une étude de faisabilité pour la production d'un (ou plusieurs) indicateur(s) de suivi des « pression(s) associée(s) à l'érosion d'origine anthropique ». Différents éléments ont pu être amenés à cette réflexion.

Toutefois, nous avons mené un benchmark permettant de focaliser l'attention sur certaines pistes prometteuses :

- Sur les sols, la caractérisation des pédosignatures, sortent « d'empreintes digitales des sols » qui permettent de retracer l'origine d'un sédiment par traçage spectroscopique infra-rouge ou fluorescence.
- Sur le milieu dulçaquicole, l'adaptation de l'IBS actuellement utilisé ou le recours à l'étude du biofilm pour créer un nouvel indicateur. À noter que cette méthode a fait l'objet d'une étude pour son amélioration rendue en 2015 par l'CEIL (<http://www.oeil.nc/cdrn/index.php/resource/bibliographie/view/9744>).
- Sur le milieu marin, l'usage de nouveaux suivis géophysique par survols aériens des panaches turbides et zone de sédimentation fortes, et suivis des biocénoses marines notamment en s'intéressant au recrutement corallien et à l'évolution des herbiers de phanérogames.

Chapitre VIII - Bibliographie

Afin d'en faciliter l'utilisation la bibliographie a été présentée par grande thématique (Eaux de surfaces, Mer, Sol, Générale).

Thématique Eau de surface

- A2EP, 2004. Campagne de caractérisation des sédiments de la rivière Kwé - Février 2004. VALE.
- A2EP, 2013. Projet d'identification de bassins versants de référence Site de Goro. VALE.
- A2EP, 2012. Synthèse sur la Qualité des eaux souterraines et superficielles - Site de Goro. VALE.
- A2EP, 2012. Analyse approfondie de la Qualité des eaux souterraines et superficielles - Site de Goro. VALE.
- ASCONIT/BIOTOP, 2011. Définition des hydro-écorégions dans le cadre des conseils de l'eau - Rapport d'état d'avancement : Phases 1 et 2. DAVAR/PS-DENV.
- BioIMPACT, 2012. Étude de l'état écologique de la Kwé à partir des données historiques de suivi.. VALE.
- BIOTOP, 2010. Suivi du fonctionnement physico-chimique et biologique du creek de la baie Nord (2000-2009):Synthèse. VALE.
- CAPSE, 2011. Diagnostic topo bathymétrique – BSKN. VALE.
- EMR, 2007. Détermination et mise à jour de la courbe de tarage du creek Baie Nord. VALE.
- EMR, 2009. Installation de 2 stations hydrologiques provisoires sur les rivières KO5 et KN1 - compte rendu de mission de terrain. VALE.
- EMR, 2009. Réalisation d'une campagne de mesures de débits sur le creek Baie Nord - Rapport de consolidation des données/interprétations - année 2008. VALE.
- EMR, 2010. Réalisation d'un suivi hydrologique et hydrogéologique sur CPKE - rapport de fin de mission - janvier/juin 2010. VALE.
- EMR, 2010. Campagne de jaugeage différentiel tous secteurs Goro - Décembre 2010. VALE.
- EMR, 2010. Réalisation d'une campagne de mesures de débits sur le creek Baie Nord - Rapport semestriel (mars 2010 - octobre 2010). VALE.
- EMR, 2010. Réalisation d'une campagne de mesures de débits sur le creek Baie Nord - Rapport de consolidation des données/interprétations - année 2009. VALE.
- EMR, 2010. Étude de l'engravement de la rivière Kwé, de son estuaire et de la baie - Prolongation du suivi des pièges à sédiments - Rapport Final. VALE.
- EMR, 2010. Réalisation du suivi hydrologique sur SHLT - Rapport final - octobre 2009/septembre 2010. VALE.
- EMR, 2010. Réalisation du suivi hydrologique sur SHLT - Rapport semestriel - octobre 2009/avril 2010. VALE.
- ERBIO, 2005. Écosystème d'eau douce - Partie I : Caractérisation de l'état initial, Janvier 2005 - Partie II : Stratégies d'échantillonnage et bio-indicateurs, Mars 2005. VALE.
- GOLDER, 2011. Traitement et Analyse des données d'Eaux de Surface - Stations KAL, KOL et KNL Période 2003 à 2011. VALE.
- GORO, 2005. État de référence des eaux de surface, février 2005 2006 - Annexe III-A-3-3. GORO.
- GORO, 2004. Suivi en période de crue de la qualité des eaux des rivières Kwe, Kuébini, Trou Bleu et Wadjana (Avril à Mai 2004). GORO.
- GORO, 2004. Etude d'Impact, TOME 3 - Volume 2: Origine, Nature et gravité de la pollution - Chapitre 2: Eaux de

Ruissellement. GORO.

GORO, 2007. Plan de suivi de la qualité des eaux de surface - Raffinerie & Usine de préparation du minerai - Centre industriel - Annexe III-C-4-2. GORO.

HYTEC ETHYCO, 2014. Suivi comparatif de la qualité de certains cours d'eau dans le périmètre d'influence du projet minier et industriel de Vale Nouvelle-Calédonie - Phase 2 : exploitation des données recueillies en vue de l'élaboration d'un état de référence de la qualité des cours d'eau. ŒIL.

IRSTEA, 2009. Caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent - Site atelier de la baie du Robert. IRSTEA.

ŒIL, 2011. La Kué: Évolution de la qualité des eaux superficielles. Synthèse des rapports sur la Kué : 1995 - 2010. ŒIL.

ŒIL/ VALE/ DIMENC/ DAVAR, 2010. Expertise du plan de suivi des eaux superficielles de la société VALE Nouvelle-Calédonie. .

PS/UNC, 2010. Analyse des perturbations physico-chimiques subies par le creek baie Nord depuis l'installation du complexe industriel dans le bassin versant. PS/UNC.

UNC, 2011. Rapport intermédiaire. Programme " fonctionnement des petits bassins versants miniers". Année 1: mai 2010-mai 2011. AXE NICKEL & ENVIRONNEMENT NATUREL. CNRT.

VALE, 2008. Suivi Environnemental Goro Nickel Captage Rapport Annuel 2007-2008. VALE.

VALE, 2009. Suivi environnemental- rapport annuel 2008-eaux douces de surface (mars 2009). VALE.

VALE, 2010. suivi environnemental- rapport annuel 2009-captages. VALE.

VALE, 2010. suivi environnemental- rapport annuel 2009-eaux douces de surface (mars 2009). VALE.

VALE, 2011. Suivi environnemental - Rapport Annuel 2010 - Eaux douces de surface. VALE.

VALE, 2011. Suivi environnemental Premier semestre 2011 EAUX DOUCES DE SURFACE. VALE.

VALE, 2011. Suivi environnemental Rapport annuel 2010 CAPTAGES. VALE.

VALE, 2011. Suivi environnemental - Rapport Annuel 2010 - Eaux douces de surface. VALE.

VALE, 2012. Suivi environnemental Rapport annuel 2011 EAUX DOUCES DE SURFACE. VALE.

VALE, 2012. Suivi environnemental Rapport annuel 2011 CAPTAGES. VALE.

VALE, 2013. Synthèse de l'évolution des charges sédimentaires dans les eaux superficielles. VALE.

VALE, 2014. DAEM - Livret D – Gestion et protection des eaux superficielles et souterraines - Volet E – Etat des lieux hydrologique et hydrogéologique. VALE.

Thématique Mer

A2EP, 2002. Sédiments marins - 1ere campagne de prélèvements de pièges à sédiment. GORO.

A2EP, 2002. Sédiments marins - Déploiement de stations de pièges à sédiments, avril 2002. GORO.

Abdel-Salam HA & Porter JW, 1988. Physiological effects of sediment rejection on photosynthesis and respiration in three caribbean reef corals. . Proc. 6th Int. Cor. Reef Symp., Australia, 1988, vol. 2. 285-292..

Acevedo R & Morelock J, 1988. Effects of terrigenous sediment influx on coral reef zonation in southwestern Puerto Rico. Proc. 6th Int. Cor. Reef Symp., Australia, 1988, vol. 2. 189-194..

AEL, 2010. Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 - Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous. VALE.

AEL, 2010. Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 - Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous - St16 - mars, mai, août et novembre 2010. VALE.

AEL, 2011. Suivi des taux d'accumulation dans la Rade du Nord (Baie du Prony), la Baie Kwé et l'Ile Ouen - Rapport final. VALE.

AEL, 2012. Suivi environnemental colonne d'eau 2010-2012 Qualité physico-chimique et concentrations en métaux dissous des eaux (2ème semestre 2011). VALE.

AEL, 2012. Suivi environnemental colonne d'eau (2010-2012) : Qualité physico-chimique et concentrations en métaux dissous des eaux : St15 et St16 (mars, mai, aout et octobre 2011). VALE.

AEL, 2012. Suivi environnemental colonne d'eau (2010-2012) : Qualité physico-chimique et concentrations en métaux dissous des eaux : St15 et St16 (mars, mai, aout et octobre 2011). VALE.

AEL, 2012. Suivi des densités de flux verticaux de particules dans le Canal de la Havannah (diffuseur) et la baie Kwé. VALE.

AEL, 2012. Suivi station St16 : Taux d'accumulation et évolution géochimique des sédiments au droit du port de commerce (Baie du Prony) - 2012 -. VALE.

AEL, 2013. Synthèse des études: impact potentiel de l'effluent de VALE NC en milieu marin (2005 - 2012). ŒIL.

AEL, 2013. Impact potentiel des activités industrielles de VALE-NC - Volume 1/3 : Etat de référence (2005-2009) - Synthèse des études. ŒIL.

AEL, 2014. Impact potentiel des activités industrielles de VALE-NC - Volume 2/3 : Programme prédictif (2006-2009) - Synthèse des études. ŒIL.

AEL, 2014. Impact potentiel des activités industrielles de VALE-NC - Volume 3/3 : Suivi physico-chimique du milieu marin (2009-2013) - Synthèse des études. ŒIL.

Anthony KRN, 1999. Coral suspension feeding on fine particulate matter. *J Exp Mar Biol Ecol* 232:85–106 .

Anthony KRN & Fabricius KE, 2000. Shifting roles of heterotrophy and autotrophy in coral energetics under varying turbidity. *J Exp Mar Biol Ecol* 252:221–253.

Anthony KRN, Ridd PV, Orpin A, Larcombe P & Lough JM, 2004. Temporal variation in light availability in coastal benthic habitats: effects of clouds, turbidity and tides. *Limnol Oceanogr* 49:2201–2211.

Ayling AM & Ayling AL, 1991. The effect of sediment run-off on the coral populations of fringing reefs at Cape Tribulation. *Sea Research*. PMB 1. GBRMPA. 48 pp..

Babcock R & Davies P, 1991. Effects of sedimentation on settlement of *Acropora millepora*. . *Coral Reefs* 9, 205–208. .

Babcock R & Smith L, 2000. Effects of sedimentation on coral settlement and survivorship. . *Proc. 9th Int. Cor. Reef Symp.*, Indonesia, 2000, vol. 1. 245-248.

Bartley R, Bainbridge ZT, Lewis SE, Kroon FJ, Wilkinson SN, Brodie JE & Silburn M, 2014. Relating sediment impacts on coral reefs to watershed sources, processes and management: A review. . *Science of the Total Environment* 468-469 (2014) 1138-1153..

Birrell CL, McCook LJ & Willis BL, 2005. Effects of algal turfs and sediment on coral settlement. *Mar. Poll. Bull.* 51, 408 – 414. .

Blakeway DR, 2005. Patterns of mortality from natural and anthropogenic influences in Dampier corals: 2004 cyclone and dredging impacts. *Mscience*, 2005. 65-76.

Brodie J, Binney J, Fabricius K, Gordon I, Hoegh-Guldberg O, Hunter H, O'Reagan P, Pearson R, Quirk M, Thorburn P, Waterhouse J, Webster I & Wilkinson S, 2008. Synthesis of evidence to support the Scientific Consensus Statement on Water Quality in the Great Barrier Reef. Reef Water Quality Protection Plan Secretariat, August 2009. 64 pp.

Brown BE, Le Tissier MDA, Scoffin TP & Tudhope AW, 1990. Evaluation of the environmental impact of dredging on intertidal coral reefs at Ko Phuket, Thailand, using ecological and physiological parameters. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* vol. 65: 273-281.

Browne NK, 2012. Spatial and temporal variations in coral growth on an inshore turbid reef subjected to multiple disturbances. *Marine Environmental Research* 77 (2012) 71-83.

- Connell JH, 1997. Disturbance and recovery of coral assemblages. *Coral Reefs* 16, 101–113.
- Crabbe MJC & Smith DJ, 2002. Comparison of two reef sites in the Wakatobi Marine National Park (SE Sulawesi, Indonesia) using digital image analysis. *Coral Reefs* (2002) 21: 242–244.
- Crabbe MJC & Smith DJ, 2005. Sediment impacts on growth rates of *Acropora* and *Porites* corals from fringing reefs of Sulawesi, Indonesia. *Coral Reefs* (2005) 24: 437–441.
- De'ath G & Fabricius KE, 2008. Water quality of the Great Barrier Reef: distributions, effects on reef biota and trigger values for the protection of ecosystem health. . Research Publication Number 89. Great Barrier Marine Park Authority, Townsville, Australia.
- De'ath G & Fabricius KE, 2010. Water quality as a regional driver of coral biodiversity and macroalgae on the Great Barrier Reef. *Ecological Applications*. 20(3): 840-850.
- Dikou A & Van Woesik R, 2006. Survival under chronic stress from sediment load: Spatial patterns of hard coral communities in the southern islands of Singapore. *Marine Pollution Bulletin* 52 (2006) 7–21.
- Dutra LXC, Kikuchi RKP & Leao ZMAN, 2006. Effects of sediment accumulation on reef corals from Abrolhos, Bahia, Brazil. *Journal of Coastal Research* 2: 633-638.
- Edinger EN, Limmon GV, Jompa J, Widjatmoko W, Heikoop JM & Risk MJ, 2000. Normal Coral Growth Rates on Dying Reefs: Are Coral Growth Rates Good Indicators of Reef Health?. *Marine Pollution Bulletin* Vol. 40, No. 5, pp. 404-425, 2000..
- Erftemeijer P.L.A., Riegl B., Hoeksema B.W., Todd P.A., 2012. Environmental impacts of dredging and other sediment disturbances on corals: A review. *Marine Pollution Bulletin* 64 (2012) 1737–1765.
- Fabricius K, Wild C, Wolanski E & Abele D, 2003. Effects of transparent exopolymer particles and muddy terrigenous sediments on the survival of hard coral recruits. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57 (2003) 613–621.
- FAO, 2012. <http://www.fao.org/docrep/w2598e/w2598e05.htm>. .
- Gilmour J, 1999. Experimental investigation into the effects of suspended sediment on fertilisation, larval survival and settlement in a scleractinian coral. *Marine Biology* (1999) 135: 451-462.
- Goatley CHR & Bellwood DR, 2012. Sediment suppresses herbivory across a coral reef depth gradient. *Biol Lett* 8: 1016–1018. doi:10.1098/rsbl.2012.0770. PubMed: 23097459. .
- Golbuu Y, Victor S, Wolanski E & Richmond RH, 2003. Trapping of fine sediment in a semi-enclosed bay, Palau, Micronesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57 (2003) 941–949.
- GORO, 2005. Rapport État de référence des eaux de mer - Avril 2005. GORO.
- GORO, 2007. Plan de surveillance du milieu marin, avril 2007 - Annexe III-C-3-5. GORO.
- Hawker DW & Connell DW, 1989. An evaluation of the tolerance of corals to nutrients and related water quality characteristics. *International Journal of Environmental Studies* 34, 179–188. .
- Hawker DW & Connell DW, 1992. Standards and criteria for pollution control in coral reef areas. Connell, D.W., Hawker, D.W. (Eds.), *Pollution in Tropical Aquatic Systems*. CRC Press. .
- Hodgson G, 1990. Sediment and the settlement of larvae of the reef coral *Pocillopora damicornis*. *Coral Reefs*. 9: 41-43..
- Humphrey C, Weber M, Lott C, Cooper T, Fabricius K, 2008. Effects of suspended sediments, dissolved inorganic nutrients and salinity on fertilization and embryo development in the coral *Acropora millepora* (Ehrenberg, 1834). *Coral Reefs* 27:837-850.
- IRD, 2008. Suivi environnemental qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous rapport final. GORO.
- IRD, 2009. Suivi sédimentologique triennal 2009: Distribution des métaux dans les sédiments de surface et Taux d'accumulation en ST133 (ILE OUEN). GORO.
- IRD, 2009. Suivi environnemental 2009 - Qualité physico-chimique et concentrations en métaux dissous des eaux. GORO.

- IRD, 2005. Rapport Final - Fiche 1: Caractéristiques physico-chimiques des eaux. GORO.
- IRD, 2006. État de référence: qualité physico-chimique des eaux et niveaux de concentration des métaux dans les sédiments. GORO.
- IRD, 2007. État de référence: Distribution superficielle des sédiments, flux sédimentaires et taux d'accumulation dans la baie du Prony (rades Nord et Nord-Est) et dans la baie Kwe. Rapport final. GORO.
- IRD, 2007. État de référence - Qualité physico-chimique des eaux du canal de la Havannah et de la baie de Prony (saison humide). GORO.
- IRD, 2006. Étude des apports sédimentaires à l'embouchure du creek de la Rade Nord (Baie du Prony). GORO.
- IRD, 2008. Suivi environnemental - Qualité physico-chimique des eaux et concentrations en métaux dissous - St16, août à décembre 2008. GORO.
- IRD/IFREMER/MELANOPUS, 2011. Guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie. CCNRT/ZONECO.
- ISRS, 2004. The effects of terrestrial runoff of sediments, nutrients and other pollutants on coral reefs. Briefing Paper 3, International Society for Reef Studies, 18 pp.
- Johansen JL & Jones GP, 2013. Sediment-induced turbidity impairs foraging performance and prey choice of planktivorous coral reef fishes. *Ecological Applications*, 23(6), 2013, pp. 1504–1517..
- Juncker M, 2006. Introduction à l'étude des pressions et des menaces sur les écosystèmes littoraux de Nouvelle-Calédonie.. Programme CRISP. 68 pp.
- Lough JM & Barnes DJ, 2000. Environmental controls on growth of the massive coral *Porites*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 245, 225-243.
- McArthur C, Ferry R & Proni J, 2002. Development of guidelines for dredged material disposal based on abiotic determinants of coral reef community structure. "Dredging '02", Proceedings of the Third Specialty Conference on Dredging and Dredged Material Disposal. Coasts, Oceans, Ports and Rivers Institute (COPRI) of ASCE, May 5, 2002, Orlando, FL, USA, pp. 1–15.
- MELANOPUS & Dexen, 2015. Révision du plan de suivi du milieu marin dans la zone d'influence du complexe industriel et minier de Vale Nouvelle-Calédonie. OEIL.
- Mendes JM, Risk MJ, Schwarcz HP & Woodley JD, 1997. Stable isotopes of nitrogen as measures of marine pollution: a preliminary assay of coral tissue from Jamaica. *Proceedings of the Eighth International Coral Reef Symposium* 2, 1869±1872.
- Philipp E & Fabricius KE, 2003. Photophysiological stress in scleractinian corals in response to short-term sedimentation. *JEMBE*. 287: 57-78.
- Riegl B & Branch GM, 1995. Effects of sediment on the energy budgets of four scleractinian and five alcyonacean corals. *JEMBE*. 186: 259-275.
- Rogers CS, 1990. Responses of coral reefs and reef organisms to sedimentation. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, Vol. 62, pp. 185-202.
- Sofonia JJ & Anthony KRN, 2008. High-sediment tolerance in the reef coral *Turbinaria mesenterina* from the inner Great Barrier Reef lagoon (Australia). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 78 (2008) 748–752.
- Stafford-Smith MG & Ormond RFG, 1992. Sediment-rejection Mechanisms of 42 Species of Australian Scleractinian Corals. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.*, 1992, 43, 683-705.
- Telesnicki GJ & Goldberg WM, 1995. Effects of turbidity on the photosynthesis and respiration of two south Florida reef coral species. *Bull. Mar. Sc.* 57(2): 527-539.
- Thompson A, Costello P, Davidson J, Schaffelke B, Uthicke S and Liddy M, 2013. Reef Rescue Marine Monitoring Program. Report of AIMS Activities – Inshore coral reef monitoring 2012. Report for Great Barrier Reef Marine Park Authority. Australian Institute of Marine Science, Townsville. 120 pp.
- Torres R, Chiappone M, Geraldès F, Rodriguez Y & Vega M, 2001. Sedimentation as an important environmental influence on Dominican Republic reefs. *Bull. Mar. Sc.* 69(2): 805-818.

- VALE, 2010. Suivi environnemental Rapport annuel 2010 MILIEU MARIN. VALE.
- VALE, 2010. suivi environnemental rapport annuel 2009 milieu marin. VALE.
- VALE, 2011. Suivi environnemental Second semestre 2011 MILIEU MARIN. VALE.
- VALE, 2011. Suivi environnemental Premier semestre 2011 MILIEU MARIN. VALE.
- VALE, 2010. Atelier marin : vers un suivi optimal des lagons et récifs Suivi environnemental du milieu marin. VALE.
- Victor S, Neth L, Golbuu Y, Wolanski E & Richmond RH, 2006. Sedimentation in mangroves and coral reefs in a wet tropical island, Pohnpei, Micronesia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 66 (2006) 409-416.
- Weber M, Beer D, Lott C, Polerecky L, Kohls K, Abed RMM, Ferdelman TG & Fabricius KE, 2012. Mechanisms of damage to corals exposed to sedimentation. . www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1100715109.
- Weber M, Lott C & Fabricius KE, 2006. Sedimentation stress in a scleractinian coral exposed to terrestrial and marine sediments with contrasting physical, organic and geochemical properties. *JEMBE*. 336: 18-32.
- Wenger AS, Johansen JL & Jones GP, 2011. Suspended sediment impairs habitat choice and chemosensory discrimination in two coral reef fishes. *Coral Reefs*. 30:879–887.
- Wenger AS, Johansen JL & Jones GP, 2012. Increasing suspended sediment reduces foraging, growth and condition of a planktivorous damselfish. *JEMB*. 428: 43-48.

Thématique Sol

- Assi, A.T., Accola, J., Hovhannissian, G., Mohtar, R. and Braudeau, E, 2014. Physics of the soil medium organization, part 2: pédostructure characterization through measurement and modelling of the soil moisture characteristic curves.. *Front. Environ. Sci.* v. 2, 5, 1-17, doi: 10.3389/fenvs. 2014, 00005.
- Baltzer F., Trescases J.J, 1971. Erosion transport, sédimentation liés aux cyclones tropicaux. ORSTOM.
- Bartoli F., Burtin, G. and Herbillon, A.J, 1991. Disaggregation and clay dispersion of Oxisols : Na resin, a recommended methodology. . *Geoderma*. 49: 301-317.
- Becquer T., Pétard J., Duwig C., Bourdon E., Moreau R., and Herbillon A.J, 2001. Mineralogical, chemical and charge properties of Geric Ferralsols from New Caledonia . *Geoderma* 103, 291–306.
- BLUE CHAM, 2012. Point zéro de la végétation - Estimation de la surface décapée - Zone prioritaire VALE NC. VALE.
- Braudeau, E., Hovhannissian, G., Assi, A.T., and Mohtar, R, 2014. Soil water thermodynamic to unify water retention curve by pressure plates and tensiometer. . *Front. Environ. Sci.* v. 2, 30, 1-13, doi: 10.3389/feart.2014.00030.
- Braudeau, E., Mohtar, R.H, 2009. Modeling the soil system: Bridging the gap between pedology and soil–water physics. . *Glob. Planet. Change* 67, 51–61.
- Chaplot, V, 2013. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. *Geomorphology* 186: 1–11.
- EMR, 2009. Réalisation d'un traçage à la fluorescéine au niveau de la zone de stockage des résidus - extension de la phase 2 (octobre/décembre 2009) - Compte rendu de la mission de terrain. VALE.
- EMR, 2009. Réalisation d'un traçage à la fluorescéine au niveau de VSKE (avril 2009). VALE.
- EMR, 2010. Réalisation d'un traçage à la fluorescéine au niveau du secteur Entonnoir - cascade - Compte rendu de mission de terrain. VALE.
- Golder, 2009. Suivi qualitatif des eaux souterraines de la Kwé-Ouest - Campagne d'échantillonnage semestrielle du 28 septembre au 22 octobre 2009 - Étude "d'Etat-zéro". GORO.
- GORO, 2007. Campagne de suivi des eaux souterraines, 2006-2007 - Rapport d'échantillonnage d'eau souterraine, Usine - Kué Ouest - Gisement. GORO.

- GORO, 2005. État de référence des eaux souterraines, octobre 2005. GORO.
- GORO, 2007. Contexte géologique et hydrogéologique du parc à résidus miniers de la Kwé Ouest. GORO.
- GORO, 2007. Plan de suivi de la qualité des eaux souterraines - Raffinerie & Usine de préparation du minerai - Centre industriel - Annexe III-C-4. GORO.
- GORO, 2004. Etude d'Impact, TOME 3 - Volume 2: Origine, Nature et gravité de la pollution - Chapitre 4: Eaux souterraines. GORO.
- Janeau, J.L., Bricquet, J.P., Planchon, O., Valentin, C, 2003. Soil crusting and infiltration on steep slopes in northern Thailand. *European Journal of Soil Science* 54, 543–554.
- Koutsoyiannis, D, 2004. Statistics of extremes and estimation of extreme rainfall: Theoretical investigation. *Hydrological Sciences Journal* 49, 575-590.
- L'Huillier, L., Jaffré, T. et Wulff, A, 2010. Mines et environnement en Nouvelle Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. . IAC editions, Païta, Nouvelle Calédonie.
- LANDLOCH, 2004. Erosion and sediment study, Goro project area. GORO.
- Latham M., Quantin P., Aubert G, 1978. Etude des sols de la Nouvelle Calédonie. Nouvel essai sur la classification, la caractérisation, la pédogenèse et les aptitudes des sols de Nouvelle Calédonie. Paris. ORSTOM. Notice explicative, 78, 138 p. + 2 cartes au 1/1 000 000..
- Poulenard J., Legout C. , Némery J., Bramorski J. , Navratil O., Fanget B., Perrette Y. Estèves M., 2012. Tracing Sources of Sediments During Flood Events by Diffuse Reflectance Infrared Fourier Transform (DRIFT) : a Case Study in Highly Erosive Mountain Catchment (South French Alps). . *Journal of Hydrology*.
- Poulenard J., Perette Y., Fanget B., Quetin P., Trevisan D., Dorioz JM., 2009. Infrared tracing of sediment sources in a rural watershed. . *Science of Total Environment*. 407 2808 2819.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder, D.C. 1997. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). *Agriculture Handbook*. No. 703. U.S. Department of Agriculture.
- Ribolzi O., Patin J., Bresson L.M., Latschack K.O., Mouche E., Sengtaheuanghong O., Silvera N., Thiébaux J.P., Valentin C, 2011. Impact of slope gradient on soil surface features and infiltration on steep slopes in northern Laos. . *Geomorphology* 127, 53–63.
- ROUETIS R&D, 2012. Cartographie de l'érosion en Province Sud : Inventaires et analyse des données existantes dans la perspective d'un suivi cartographique de l'érosion.. CEIL.
- UNC IRSTEa, 2014. Convention Hydromine_Rapport de synthèse 2009_2012. DAVAR/DIMENC.
- UNC IRSTEa, 2014. Convention Hydromine_Synthèse et conclusion 2009_2012. DAVAR/DIMENC.
- VALE, 2009. Suivi environnemental- rapport annuel 2008-eaux souterraines (mars 2009). VALE.
- VALE, 2010. Suivi environnemental rapport annuel 2009 eaux souterraines. VALE.
- VALE, 2011. Suivi environnemental Premier semestre 2011 EAUX SOUTERRAINES. VALE.
- VALE, 2011. Suivi environnemental Rapport annuel 2010 EAUX SOUTERRAINES. VALE.
- VALE, 2012. Suivi environnemental Rapport Annuel 2011 Eaux Souterraines. VALE.
- Valentin, C., Agus, F., Alamban, R., Boosaner, A., Bricquet, J.P., Chaplot, V., Guzman, T., Rouw, A., Janeau, J.L., Orange, D., Phachomphonh, K., Phai, D.D., Podwojewski, P., Ribolzi, O., Silvera, N., Subagyono, K., Thiébaux, J.P., Toan, T.D, Vadari, T, 2008. Runoff and sediment losses from 27 upland catchments in Southeast Asia: Impact of rapid land use changes and conservation practices.. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 128, 225-238.
- Walling, D.E., Webb, B.W, 1981. The reliability of suspended sediment load data. *Erosion and Sediment Transport Measurement, Proceeding of the Florence symposium*, IAHS 177-194.
- Wischmeier W.H. & Smith D.D. 1978. Prediction rainfall erosion losses, a guide to conservation planning Science. U.S. Dept. Agriculture. *Agric. Handbook* 537, 60 p.
- WRB, 2014. IUSS Working Group WRB. 2014. World Reference Base for Soil Resources 2014. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports* No. 106.

FAO.

Thématique générale

CRISP, 2007. Panorama des méthodes d'analyse de l'érosion en milieu insulaire. IRD.

Golder, 2004. Le milieu physique, rapport de base sur le climat, la géologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie - Projet Goro Nickel, Nouvelle Calédonie, novembre 2004. GORO.

GORO, 2004. Étude d'impact, TOME 3 - Volume 1 - État initial du milieu - Chapitre 1: Milieu Physique. GORO.

GORO, 2004. Etude d'Impact, TOME 3 - Volume 3: Effets environnementaux du projet - Chapitre 4: Quantité et qualité de l'eau superficielle et souterraine. GORO.

Gouvernement de la NC, 2003. Arrêté ICPE 763-2003/PS du 5 juin 2003 autorisant Goro Nickel SAS à occuper le domaine public maritime et construire un port. Gouvernement de la NC.

Gouvernement de la NC, 2003. Arrêté ICPE 1974-2003/PS du 5 dec 2003 autorisant Goro Nickel SAS à occuper le domaine public maritime pour 70 ans. Gouvernement de la NC.

Gouvernement de la NC, 2004. Arrêté ICPE 1769-2004/PS du 15 octobre 2004 autorisant Goro Nickel SAS à exploiter une usine de traitement de minerai. Gouvernement de la NC.

Gouvernement de la NC, 2005. Arrête ICPE 492-2005/PS du 28 avril 2005 modifiant les arrêtés autorisant Goro Nickel SAS à occuper le domaine public maritime. Gouvernement de la NC.

Gouvernement de la NC, 2008. Journal officiel de la Nouvelle-Calédonie. Arrêté ICPE N° 1466-2008/PS et N°1467-2008/PS. Gouvernement de la NC.

OEIL, 2012. Suivi des pressions associées à l'érosion dans les milieux naturels: panorama des principales méthodes de suivi. OEIL.

PS, 2009. Convention N°C.238-09 fixant les modalités techniques et financières de mise en œuvre de la démarche pour la conservation de la biodiversité. PS/Vale.

PS, 2010. Bilan sur la mise en oeuvre de la convention C.238-09 pour la conservation de la biodiversité au cours de la période mai 2009-août 2010 et Programme d'actions 2011. PS/VALE.

URS / GORO, 2007. Méthodologie employée dans l'évaluation des effets environnementaux, novembre 2006 - Annexe III-C-1. GORO.

VALE, 2012. Table descriptive des dispositifs de surveillance de Vale Nouvelle-Calédonie sur les milieux dulçaquicoles. VALE.

ANNEXES

ANNEXE 1

Valeurs réglementaires et états de références en milieu marin (Suivi environnemental – Premier semestre 2013 – Milieu Marin – Vale NC 2013)

Pour le suivi du milieu marin il n'y a pas de dépassement de seuils réglementaires proprement dit, il ne s'agit pas d'émissions sujettes à des seuils mais de la santé des écosystèmes (milieux récepteurs) et de la qualité du milieu par rapport à l'état de référence.

- Ce sont les états initiaux (de référence) observés avant le développement du projet Vale Nouvelle-Calédonie qui servent de référence. Les états de référence sont présentés dans les dossiers ICPE (Caractérisation des milieux, VOLUME III, SECTION A, Caractérisation de l'environnement, Chapitre 5 : Océanographie physique, Chapitre 7 : Milieu écologique marin.)
- Le guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie, élaboré par les membres des programmes ZONECO, le CNRT et de nombreux contributeurs, en 2011, présente des grilles de lecture ainsi que des références bibliographiques pour chaque type d'indicateurs, il peut servir de guide, avec toutes les recommandations interprétatives et les précautions qu'il préconise.
- Les bases de données issues des missions de suivis antérieures permettent une recherche des tendances évolutives. Ce sont ces tendances qui sont analysées par les prestataires qui assurent les suivis. Les prestataires externalisés qui effectuent les suivis ont en leur possession les bases de données des années précédentes pour pouvoir effectuer ces analyses comparatives et il est à leur charge de les utiliser et formater pour en tirer une analyse d'évolution temporelle.

Il est essentiel de raisonner en termes d'évolution et il est impossible de comparer des résultats ponctuels avec une grille de lecture immuable et universelle ou calédonienne. Comme le souligne le guide pour le suivi de la qualité du milieu marin en Nouvelle-Calédonie :

Il est impossible de donner une grille de lecture fiable de valeurs seuils, c'est la variabilité temporelle (saisonnière et inter annuelle) ou bien spatiale des valeurs qui permettra de se prononcer sur la signification des données. Pour mettre en évidence un changement significatif, cette variabilité est une information nécessaire.

Toute modification significative observée lors d'un suivi, c'est-à-dire au-delà de la marge des variations saisonnières et des incertitudes inhérentes aux méthodologies, doit être prise en considération et demande un suivi approfondi et une recherche de cause.

Chaque rapport de suivi présente une étude des variations temporelles des paramètres, en comparaison avec les suivis précédents et les états de référence.

Tout changement significatif est signalé.

Annexe 2

Suivis physico-chimiques sur le site de Vale et paramètres de suivis

Suivi volontaire des eaux de surface

Rivière/bassin versant	Nombre de points	Fréquence des mesures	Paramètres mesurés	Type de mesure
Kwé Nord	19	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	2 ((KN18, Déversoir BSKN))	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	2 (KN18, Déversoir BSKN)	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kwé Est	8	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Creek de la crête Sud	4	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kadji 1	6	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kadji 2	7	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Truu	9	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	3	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	3 (Source_Truu, Captage_Truu, Radier_Truu)	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Cascade	6	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
Entonnoir	1	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire

Rivière/bassin versant	Nombre de points	Fréquence des mesures	Paramètres mesurés	Type de mesure
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Wajana	4	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	2	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	2 (Wajana_radier, Wajana_tribu)	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kué Binyi	12	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
KN1	6	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Trou Bleu	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
Lac en huit, Grand Lac, lac Goro Sud, Xere Wapo et lac Robert	1 station par lac	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
KO5	7	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kwé Ouest	6	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	3 (KOL, Amont_Kué ouest, Aval_Kué ouest)	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ
Kwé Principale	1 (KAL)	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
Portion de Kwé Ouest comprise entre le bassin KO4 et la confluence avec la Kwé Nord	27	Tri-annuelle	pH, conductivité, température, eH, oxygène dissous	in-situ
	1 (KO-amont-conf-KN)	Tri-annuelle	CO ₃ , HCO ₃ , F, Cl, SO ₄ , NO ₂ , NO ₃ et PO ₄ , Na, K, Ca, Mg, et NH ₄ , Al, Cr, Cr VI, Fe et Mn, SiO ₂	laboratoire
	1 (KO-amont-conf-KN)	Mensuelle	pH, conductivité, température	in-situ

Suivi réglementaire

Suivi physico-chimie in-situ : ph, température, conductivité :

Nom	Bassin Versant	Type de suivi	Fréquence*	Raison d'être	Long RGNC91	Lat RGNC91
1-A	KP	Physico-chimique	C	Arrêté n°1467-2008/PS	499142	210447
3-A	KO	Physico-chimique	S	Arrêté n°1466-2008/PS	495575	211479
3-B	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	496478.1	210820.1
3-D	KO	Physico-chimique	S	Arrêté n°1466-2008/PS	495869	210942
3-E	KO	Physico-chimique	S	Arrêté n°1466-2008/PS	496393	210775
WK 17	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	495617.6	210613.3
WK 20	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	495673.3	210663.6
4-R2	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	494882.1	211134.2
4-R6	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	495439.6	210765.0
4-R7	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	495483.4	210794.3
4-R8	KO	Physico-chimique	C, S	Arrêté n°1466-2008/PS	495462.6	210761.2

C : Continu, H : Hebdomadaire, M : Mensuel, T : Trimestriel, S : Semestriel, A : Annuel.

Suivi hydrochimique (analyses en laboratoire) :

Nom	Bassin Versant	Sous type de suivi	Fréquence*	Raison d'être	long RGNC91	lat RGNC
3-A	KO	Eau de surface	M, S, H	Arrêté n° 1466-2008/PS	495575	211479
3-B	KO	Eau de surface	M, S	Arrêté n° 1466-2008/PS	496478.1	210820.1
3-C	TB	Eau de surface	T	Arrêté n°890-2007/PS	499124	206972
3-D	KO	Eau de surface	S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495869	210942
3-E	KO	Eau de surface	S	Arrêté n° 1466-2008/PS	496393	210775
CS-01	CCS	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	500552.2	210477.0
CS-02	CCS	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	499350.9	210393.8
EN-02	Entonnoir	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	502799.4	211441.3
KE-01	KE	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	500126.4	211185.0
KE-04	KE	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	501152.7	210988.1

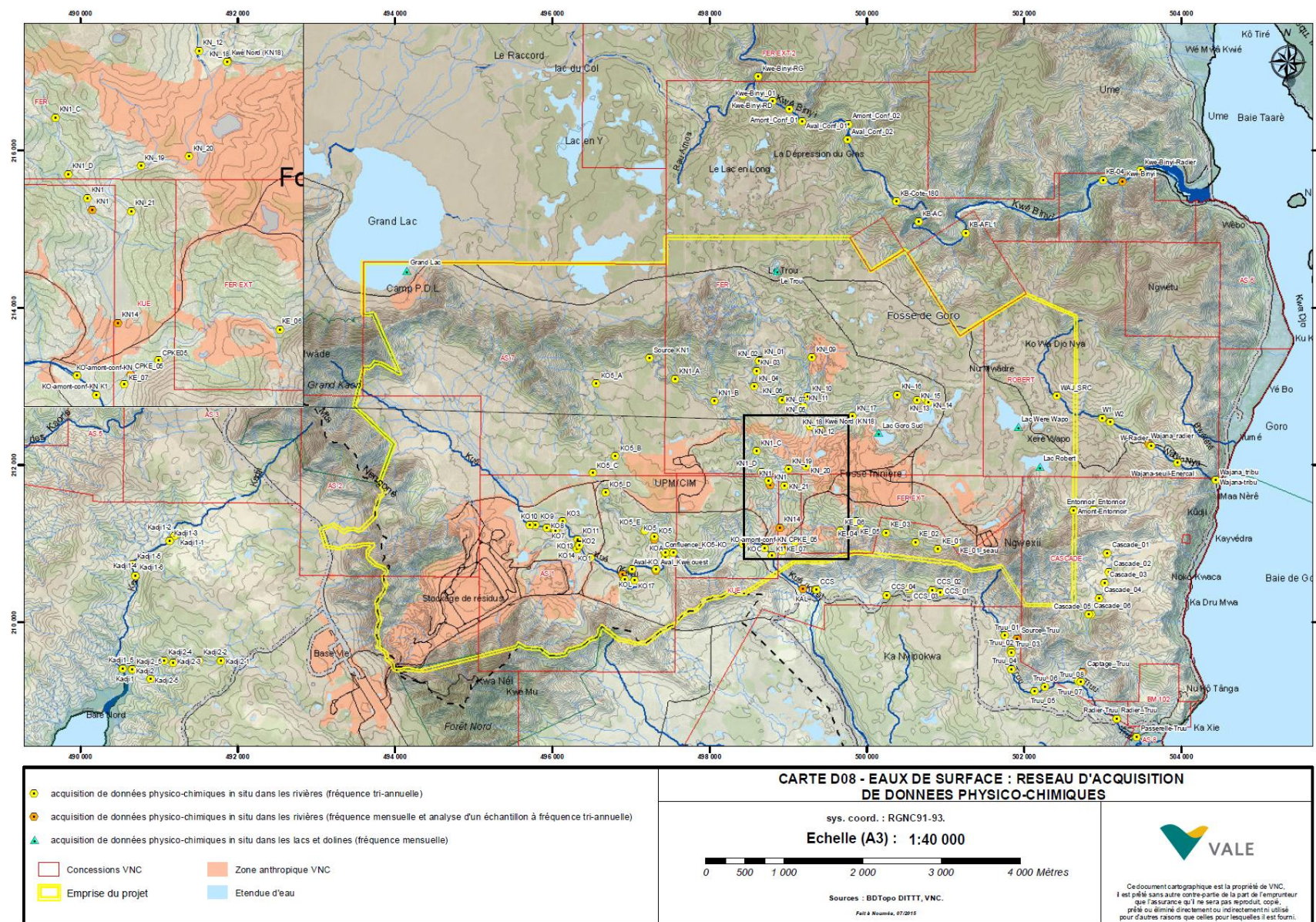
KE-05	KE	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	499043.7	211013.6
4-M	KN	Eau de surface	M	Arrêté n° 1467-2008/PS	498889.4	211632.5
BSO-01	KN	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	499270.1	211967.1
KN-01	KN	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	498719.8	210990.4
KN-02	KN	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	500087.2	212523.7
KN-08	KN	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	498869.1	211530.4
4-N	KO	Eau de surface	M	Arrêté n° 1467-2008/PS	497415.6	210891.5
KO-01	KO	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	498553.7	211010.3
1-A	KP	Eau de surface	M, T, H	Arrêté n° 1467-2008/PS	499141.5	210447.4
1-E	KP	Eau de surface	M	Arrêté n° 1467-2008/PS	500042.1	208314.8
TR-01	Truu	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	503193.6	208775.3
TR-02	Truu	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.1	501932.7	209804.5
WJ-01	WD	Eau de surface	M	Déclaration DM §7.4.2.2	503607.7	212255.8
WK 17	KO	Source	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495617.6	210613.3
WK 20	KO	Source	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495673.3	210663.6
WK17-20	KO	Source	H	Convention	495740.2	210666.1
4-R2	KO	Rejet	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	494882.1	211134.2
4-R6	KO	Rejet	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495439.6	210765.0
4-R7	KO	Rejet	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495483.4	210794.3
4-R8	KO	Rejet	H,S	Arrêté n° 1466-2008/PS	495462.6	210761.2

C : Continu, H : Hebdomadaire, M : Mensuel, T : Trimestriel, S : Semestriel, A : Annuel

Les paramètres chimiques suivis sont : Hydrocarbure total + liste dans les 2 tableaux suivants :

Labo	Analyse	Unité	LD	Méthode	Intitulé de la méthode	Norme
Interne	MES	mg/L	5	GRV02	Dosage des matières en suspension (MES)	NF EN 872 Juin 2005
Interne	pH		-	PH01	Mesure du pH	NF T90-008
Interne	Conductivité	μS/cm	5	CDT01	Mesure de la conductivité	
Interne	Cl	mg/L	0.1	ICS01	Analyse de 4 ou 6 anions par chromatographie ionique (chlorure, nitrate, phosphates, sulfate, fluorure et nitrate en plus si demandé)	NF EN ISO 10304-1
Interne	NO3	mg/L	0.2	ICS01		
Interne	SO4	mg/L	0.2	ICS01		
Interne	PO4	mg/L	0.2	ICS01		
Interne	F	mg/L	0.1	ICS01		
Interne	NO2	mg/L	0.1	ICS01		
Interne	Cl	g/l	0.01	TIT10	Titration de l'ion chlorure par potentiométrie	
Interne	DCO	mg/L	10	SPE03	Analyse de la DCO	Méthode HACH 8000
Interne	TAC as CaCO3	mg/L	2	TIT11	Titration de l'alcalinité (TA et TAC)	
Interne	TA as CaCO3	mg/L	2	TIT11		
Interne	CrVI	mg/L	0.01	SPE01	Analyse du chrome VI dissous dans les eaux naturelles et usées	NF T 90-043 Octobre 1988
Interne	Turbidité	NTU	0.1	TUR01	Mesure de la turbidité	
Interne	NH3	mg/L	0.5	SPE05	Dosage de l'ammonium dans les eaux	Méthode HACH 10205
Interne	COT	mg/L	0.3	SPE09	Dosage du Carbone Organique Total (COT) dans les eaux	Méthode HACH 10129
Interne	SiO2	mg/L	1 de Si	CAL02	Calcul de SiO2 à partir de Si mesuré par ICP02	
Interne	NT	mg/L	0.5	SPE08	Dosage de l'azote total dans les eaux	Méthode HACH 10071

Labo	Analyse	Unité	LD	Méthode	Intitulé de la méthode	Norme
Interne	Al	mg/L	0.1	ICP02	Analyse d'une cinquantaine d'éléments dissous ou totaux (si demandé) dans les solutions aqueuses faiblement concentrées par ICP-AES	NFT90-210
Interne	As	mg/L	0.05	ICP02		
Interne	Ca	mg/L	1	ICP02		
Interne	Cd	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Co	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Cr	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Cu	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Fe	mg/L	0.1	ICP02		
Interne	K	mg/L	0.1	ICP02		
Interne	Mg	mg/L	0.1	ICP02		
Interne	Mn	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Na	mg/L	1	ICP02		
Interne	Ni	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	P	mg/L	0.1	ICP02		
Interne	Pb	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	S	mg/L	1	ICP02		
Interne	Si	mg/L	1	ICP02		
Interne	Sn	mg/L	0.01	ICP02		
Interne	Zn	mg/L	0.1	ICP02		



Annexe 3

Localisation des stations de suivis hydrobiologiques

Bassin versant	Nom de la station	Début du tronçon		Fin du tronçon	
		X RGNC91	Y RGNC91	X RGNC91	Y RGNC91
Creek de la Baie Nord	CBN-01	492903	207619	492975	207552
	CBN-10	491935	207388	491966	207473
	CBN-30	491516	207489	491675	207461
	CBN-40	491374	207696	491456	207622
	CBN-70	490916	207768	490996	207828
	CBN-AFF-02	492016	207323	492110	207293
Kuébini	KUB-xx	Prospection nécessaire, station à déplacer.			
	KUB-40	501076	214810	500980	214821
	KUB-60	503505	215743	503414	215681
Kwé Ouest	KWO-10	496922	210495	496978	210425
	KWO-20	496922	210495	496830	210628
	KWO-60	498265	210914	498343	210974
Kwé Principale	KWP-10	498997	210558	498914	210615
	KWP-40	499818	208804	499830	208702
	KWP-70	500982	207824	500939	207899
Trou Bleu	TBL-50	499124	207104	499123	207196
	TBL-70	499115	206947	499139	207046
Truu	TRU-xx	Prospection nécessaire pour la détermination de la station.			
Wadjana	WAD-40	503583	212286	503531	212341
	WAD-50	503939	212024	503856	212063
	WAD-70	504463	211804	504379	211822

Coordonnées des stations de suivi ichtyologiques et carcinologiques du site de Vale-NC (source : Vale-NC)

	Long_RGNC	Lat_RGNC	Bassin Versant	Activités associées
6-BNOR1	492084.5	207594.3	Creek de la Baie Nord	Site industriel
6-T	491882.1	207360.9	Creek de la Baie Nord	Site industriel
6-U	491517.2	207491.4	Creek de la Baie Nord	Site industriel
EN-02	502882.0	211434.0	Entonnoir	Mine
5-E	491895.4	209496.9	Kadji	Base Vie
KE-05	499043.7	211013.6	Kwé Est	Mine (Verse à stériles)
4-M	498889.4	211632.5	Kwé Nord	Unité de préparation du minerais et centre industriel de la mine
3-B	496478.1	210820.1	Kwé Ouest	Parc à résidus
4-N	497415.6	210891.5	Kwé Ouest	Unité de préparation du minerais et centre industriel de la mine
1-E	500042.1	208314.8	Kwé Principale	Embouchure de la kwé (parc à résidus, unité de préparation du minerais, centre industriel de la mine et Mine
3-C	499124.3	206971.6	Trou Bleu	Aucunes activités industrielles et minières directes
TR-03	501693.0	209901.0	Truu	Aucunes activités industrielles et minières directes
TR-04	502143.0	209111.0	Truu	Aucunes activités industrielles et minières directes
TR-05	503169.0	208781.0	Truu	Aucunes activités industrielles et minières directes

	Long_RGNC	Lat_RGNC	Bassin Versant	Activités associées
KO5-10-I	496606.0	212760.0	Kwé Ouest 5	Stockage de minerais longue teneur, unité de préparation du minerais et centre industriel de la mine
KO5-20-I	496730.0	212060.0	Kwé Ouest 5	Stockage de minerais longue teneur, unité de préparation du minerais et centre industriel de la mine
KO5-50-I	496883.0	211259.0	Kwé Ouest 5	Stockage de minerais longue teneur, unité de préparation du minerais et centre industriel de la mine
KO4-20-I	495534	211574	Kwé Ouest 4	Projet sur le bassin versant KO4

Coordonnées des stations de suivi macroinvertébrés du site de Vale-NC (source : Vale-NC)

Annexe 4

Caractéristiques de crue et flux sédimentaires aux stations KAL et KNL (DAEM, Vale NC 2014)

Date début	Date fin	Nb de jours	Qp (m³/s)	V ruisselé (Mm³)	Qmoy (m³/s)	MES (tonnes)	Flux sédimentaire (kg/s)	Cmax (mg/l)
STATION KAL								
31/01/2006 08:00	01/02/2006 16:00	1,3	13	0,612	5,45	26	0,231	134
<u>28/02/2006 04:00</u>	<u>02/03/2006 09:00</u>	<u>2,2</u>	<u>62</u>	<u>4,017</u>	<u>21,13</u>	<u>255</u>	<u>1,342</u>	<u>337</u>
23/03/2006 22:00	24/03/2006 11:00	0,5	10	0,291	6,74	10	0,231	177
18/09/2006 21:00	19/09/2006 10:00	0,5	2,5	0,086	1,99	1,4	0,032	37
28/06/2007 18:00	29/06/2007 12:00	0,8	60	1,662	24,05	242	3,501	360
<u>25/08/2007 00:00</u>	<u>27/08/2007 00:00</u>	<u>2</u>	<u>93</u>	<u>3,688</u>	<u>21,34</u>	<u>404</u>	<u>2,338</u>	<u>372</u>
06/09/2007 16:00	09/09/2007 22:00	3,3	47	4,005	14,05	283	0,993	310
02/12/2007 14:00	05/12/2007 00:00	2,4	18	1,687	8,14	57	0,275	135
17/02/2008 16:00	20/02/2008 23:00	3,3	57	4,59	16,10	401	1,406	398
07/03/2008 04:00	10/03/2008 04:00	3	97	5,085	19,62	1187	4,579	1100
31/03/2008 23:00	03/04/2008 11:00	2,5	55	4,065	18,82	497	2,301	425
16/05/2008 12:00	17/05/2008 18:00	1,3	50	1,849	16,46	243	2,163	370
05/07/2008 04:00	06/07/2008 00:00	0,8	12	0,527	7,62	10	0,145	68
26/09/2008 21:00	27/09/2008 19:00	0,9	29	0,975	12,54	126	1,620	480
06/02/2009 13:00	08/02/2009 18:00	2,2	39	3,055	16,07	39	0,205	41
21/03/2009 16:00	22/03/2009 02:00	0,4	27	0,451	13,05	33	0,955	130
<u>24/03/2009 10:00</u>	<u>27/03/2009 12:00</u>	<u>3,1</u>	<u>53</u>	<u>4,357</u>	<u>16,27</u>	<u>125</u>	<u>0,467</u>	<u>140</u>
<u>28/03/2010 07:34</u>	<u>30/03/2010 09:16</u>	<u>2,1</u>	<u>55</u>	<u>2,364</u>	<u>13,03</u>	<u>222</u>	<u>1,224</u>	<u>420</u>
<u>12/01/2011 12:44</u>	<u>15/01/2011 12:27</u>	<u>3</u>	<u>294</u>	<u>13,718</u>	<u>52,92</u>	<u>1798</u>	<u>6,937</u>	<u>280</u>
24/12/2011 19:00	27/12/2011 02:00	2,3	215	8,146	40,99	1745	8,781	810
02/02/2012 15:01	04/02/2012 02:01	1,5	28	1,859	14,34	22	0,170	30
<u>12/03/2012 19:19</u>	<u>16/03/2012 06:56</u>	<u>3,5</u>	<u>116</u>	<u>8,351</u>	<u>27,62</u>	<u>385</u>	<u>1,273</u>	<u>120</u>
05/03/2013 05:00	05/03/2013 14:00	0,4	45	1,156	33,45	69	1,997	170
28/03/2013 10:00	30/03/2013 02:00	1,7	15	1,062	7,23	42	0,286	140
24/05/2013 23:00	25/05/2013 14:00	0,6	74	1,887	36,40	154	2,971	200
<u>02/07/2013 15:00</u>	<u>04/07/2013 16:00</u>	<u>2</u>	<u>328</u>	<u>10,282</u>	<u>59,50</u>	<u>1506</u>	<u>8,715</u>	<u>360</u>
STATION KNL								
31/01/2006 08:00	01/02/2006 16:00	1,3	7	0,319	2,84	17	0,151	134
<u>28/02/2006 04:00</u>	<u>02/03/2006 09:00</u>	<u>2,2</u>	<u>22</u>	<u>1,365</u>	<u>7,18</u>	<u>88</u>	<u>0,463</u>	<u>337</u>
23/03/2006 22:00	24/03/2006 11:00	0,5	2	0,057	1,32	2	0,046	177
18/09/2006 21:00	19/09/2006 10:00	0,5	1	0,036	0,83	0,6	0,014	37
24/11/2006 20:00	26/11/2006 04:00	1,3	2	0,122	1,09	4	0,036	96
05/03/2007 16:00	06/03/2007 06:00	0,6	11	0,351	6,77	35	0,675	184
29/03/2007 14:00	30/03/2007 16:00	1,1	5	0,372	3,91	10	0,105	132
28/06/2007 12:00	29/06/2007 11:00	1	16	0,452	5,23	68	0,787	360
25/08/2007 00:00	27/08/2007 14:00	2,6	30	1,309	5,83	132	0,588	372
06/09/2007 16:00	09/09/2007 22:00	3,3	17	1,335	4,68	86	0,302	310
02/12/2007 14:00	05/12/2007 00:00	2,4	8	0,764	3,68	28	0,135	135
21/12/2007 14:00	21/12/2007 22:00	0,3	3	0,041	1,58	1,5	0,058	77
16/02/2008 16:00	20/02/2008 02:00	3,4	14	1,407	4,79	107	0,364	398
02/03/2008 20:00	03/03/2008 23:00	1,1	11	0,518	5,45	24	0,253	161

Date début	Date fin	Nb de jours	Qp (m ³ /s)	V ruisselé (Mm ³)	Qmoy (m ³ /s)	MES (tonnes)	Flux sédimentaire (kg/s)	Cmax (mg/l)
31/03/2008 23:00	03/04/2008 11:00	2,5	36	1,698	7,86	198	0,917	425
06/04/2008 00:00	09/04/2008 16:00	3,7	69	3,288	10,29	89	0,278	80
19/04/2008 12:00	20/04/2008 14:00	1,1	9	0,521	5,48	14	0,147	170
16/05/2008 12:00	17/05/2008 18:00	1,3	8	0,372	3,31	43	0,383	370
05/07/2008 04:00	06/07/2008 00:00	0,8	5	0,187	2,71	4	0,058	68
<u>13/01/2011 14:00</u>	<u>15/01/2011 13:00</u>	<u>2</u>	<u>76</u>	<u>3,249</u>	<u>18,80</u>	<u>299</u>	<u>1,730</u>	<u>270</u>
13/03/2012 18:00	14/03/2012 13:00	0,8	24	0,61	8,83	48	0,694	250
01/01/2013 18:00	03/01/2013 22:00	2,2	55	3,05	16,05	216	1,136	120
14/04/2013 00:00	14/04/2013 13:00	0,5	7	0,219	5,07	9	0,208	120
<u>02/07/2013 04:00</u>	<u>04/07/2013 00:00</u>	<u>1,8</u>	<u>81</u>	<u>2,885</u>	<u>18,55</u>	<u>721</u>	<u>4,636</u>	<u>380</u>

Annexe 5

Bibliographie concernant le biofilm et les polluants métalliques

- Arini A., Feurtet-Mazel A., Maury-Brachet R., Pokrovsky O., Coste M., Delmas F., 2011. Recovery potential of periphytic biofilms exposed to metal contamination : An experimental study
- Arini A., Feurtet-Mazel A., Durant F., Coste M., Delmas F., 2011. Cd decontamination and reversal potential of teratological forms of the diatom *Planorhynchium frequentissimum* after experimental contamination
- Duong, T.T., Morin, S., Coste, M., Herlory, O., Feurtet-Mazel, A., Boudou, A., 2010. Experimental toxicity and bioaccumulation of cadmium in freshwater periphytic diatoms in relation with biofilm maturity. *Science of the Total Environment* 408, 552-562.
- Duong, T.T., Morin, S., Herlory, O., Feurtet-Mazel, A., Coste, M., Boudou, A., 2008. Seasonal effects of cadmium accumulation in periphytic diatom communities of freshwater biofilms. *Aquatic Toxicology* 90, 19-28.
- Falasco, E., Bona, F., Ginepro, M., Hlubikova, D., Hoffmann, L., Ector, L., 2009b. Morphological abnormalities of diatom silica walls in relation to heavy metal contamination and artificial growth conditions. *Water SA* 35, 595-606.
- Ferreira da Silva, E., Almeida, S.F.P., Nunes, M.L., Luís, A.T., Borg, F., Hedlund, M., de Sá, C.M., Patinha, C., Teixeira, P., 2009. Heavy metal pollution downstream the abandoned Coval da Mó mine (Portugal) and associated effects on epilithic diatom communities. *Science of The Total Environment* 407, 5620-5636.
- Foerstner, U., 1977. Metal concentrations in freshwater sediments. Natural background and cultural effects. *INTERACTIONS BETWEEN SEDIMENTS AND FRESH WATER Proc.*, 94-103.
- Foster, P., Morel, F., 1982. Reversal of Cadmium Toxicity in a Diatom: An Interaction Between Cadmium Activity and Iron. *Limnology and Oceanography* 27, 745-752.
- McFarland, B.H., Hill, B.H., Willingham, W.T., 1997. Abnormal *Fragilaria* spp. (Bacillariophyceae) in streams impacted by mine drainage. *Journal of Freshwater Ecology* 12, 141-149.
- Morin, S., 2003. Amélioration des techniques de bioindication diatomique et d'analyse des données, appliquées à la révélation des effets des pollutions à toxiques. ENITA, Bordeaux, p. 70 pp.
- Morin, S., 2006. Bioindication des effets des pollutions métalliques sur les communautés de diatomées benthiques., University Bordeaux I.
- Morin, S., Coste, M., Hamilton, P.B., 2008. Scanning electron microscopy observations of deformities in small pennate diatoms exposed to high cadmium concentrations. *Journal of Phycology* 44, 1512-1518.
- Morin, S., Duong, T.T., Herlory, O., Feurtet-Mazel, A., Coste, M., 2007. Cadmium toxicity and bioaccumulation in freshwater biofilms. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 54, 173-186.