

2012

RENDU

Mémoire d'Ingénieur ENGEES

Programme « *CNRT*

Fonctionnement des

petits bassins versants miniers »

Année 2 (juin 2011 – Novembre 2012).

AXE NICKEL & ENVIRONNEMENT

NATUREL

Auteur : Audrey CHILLOU

Pour le consortium CEMAGREF,

METEO- FRANCE (DIRNC), IRD,

UNIVERSITE DE LA REUNION, A2EP

et UNIVERSITE DE LA NOUVELLE-

CALEDONIE

Décembre 2012

LIVRABLE 2 (ANNEXE 12 au rapport rédigé par M.ALLENBACH)

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg) - CHILLOU Audrey, 09/2012.

« *Etude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie* »



Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers »	Dominique CLUZEL
--	------------------

Etude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle- Calédonie.



Mémoire de fin d'étude présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES, en cohabilitation avec le Master 2 « Systèmes Géographiques et Environnement » de la Faculté de Géographie et d'Aménagement de Strasbourg.

Travail encadré de février à juillet 2012 par Alain RECKING au sein de l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture.

REMERCIEMENTS

J'adresse mes remerciements tout d'abord à l'Irstea et à Alain Recking, ingénieur de recherche, pour m'avoir permis de mener cette étude sur la problématique de lutte contre la pollution du lagon Calédonien par les sédiments fins. Je tiens également à le remercier ainsi que Nicole Mathys, pour leur disponibilité constante, malgré leur emploi du temps chargé, et pour leur encadrement aussi bien au centre Irstea de Grenoble que sur le terrain.

Je tiens à remercier l'Université de Nouvelle-Calédonie (UNC), structure d'accueil lors de ma mission sur le terrain, et Michel Allenbach, maître de conférences en géologie au sein de l'Université de Nouvelle-Calédonie, pour avoir facilité mes démarches en Nouvelle-Calédonie.

Je souhaite également remercier Oldrich Navratil de l'Irstea et Vincent Lignier du Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement (PPME) pour leur gentillesse et leurs conseils et explications pertinentes, ainsi que les personnes référents au sein des différents sites miniers : Steeven Cogulet de Poum, Amar Chalal et Marie-France Mandaoue de Poro, Julien Blanche et Yann Vessiler de Goro, Siham Bendenia, Sarah Eurisouke et Nicolas Mathieu de Koniambo, Timothée Dupaigne de Mica environnement, Nicolas Caze de A2EP et Frédéric Bart et Henri Hmakone de la SLN, pour leur collaboration active. Je voudrais également remercier Benoît Camenen pour les réponses et éclaircissements qu'il a pu apporter à mes questions.

Je remercie enfin l'équipe de l'Irstea ainsi que celle du PPME de l'Université de Nouvelle-Calédonie qui ont apporté aide et conseils et enfin les autres stagiaires du projet, Antoine et Lucie qui ont collaboré à l'échange de données et à la réflexion sur la problématique des écoulements d'eau sur mine ainsi que toutes les personnes qui ont contribué à une ambiance de travail optimale.

Résumé

Etude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie.

Le contexte minier calédonien est à l'origine de fortes charges en sédiments fins dommageables pour l'environnement. Depuis longtemps les sites miniers se sont équipés de bassins de décantation afin de limiter les phénomènes d'érosion et de transfert en aval de ces sédiments. L'effet de ces bassins semble toutefois limité en cas de forte crue, traduisant la nécessité d'élargir les connaissances autour de la problématique des décanteurs.

Cette étude met en évidence les analogies et particularités de gestion des eaux selon la disparité des conditions climatiques et topographiques entre les différentes mines étudiées. Un état des lieux des données disponibles au niveau des différents sites de l'étude est réalisé, concernant l'hydrologie des bassins versants, la granulométrie des matériaux déposés et les caractéristiques des ouvrages en place.

Des valeurs caractéristiques de diamètre de particules sont données et des vitesses de chutes caractéristiques sont déduites pour l'ensemble des sites. Ces données sont ensuite confrontées à des méthodes classiques de conception de bassins de décantation, issues de la littérature de plusieurs domaines. Avec des paramètres d'entrée fixés, les modèles sont testés sur l'exemple d'un bassin de décantation pour lequel toutes les données sont disponibles, dans le but de donner de premières valeurs comparatives d'efficacité de décantation et de capacité de rétention selon différents modèles. Les résultats donnés par les différentes méthodes, reposant sur des paramètres d'entrée différents, coïncident et mettent en évidence les épisodes pour lesquels les bassins n'ont pas eu une efficacité optimale. Cet exemple a également pour but de donner une idée de l'utilisation de ce type de modèle afin de diversifier les connaissances concernant les outils de dimensionnement de décanteurs.

Abstract

Study of mining sediment flows management with settling tanks: New Caledonia case.

New Caledonian mining produces suspended loads which is harmful for environment. For a long time, mining sites have been equipped with settling basins to limit erosion phenomenon and transfer of sediments downstream. The efficiency of these basins seems however limited in cases of important floods, implying the necessity to improve our knowledge about these tanks.

This study highlight water management analogies and particularities according to climatic and topographic conditions disparity between the different sites considered. A current situation of available data within different sites of the study is realized about hydrology of areas, size grading of deposited materials in settling tanks and existing works characteristics. In a final step, those data are confronted with classics methods of basins design from some diverse bibliographic springs. Characteristic values of sediment diameter are provided and characteristic fall velocities are deducted for all sites. With these entry parameters fixed, models are run with the example of one settling tanks for which all data are available, aiming to present first comparative values of settling efficiency and retention ability according to different models. Results given by the different methods, resting on different entry parameters, match and highlight episodes for which basins did not had an optimal efficiency. This example also aims to give an idea of the use of this kind of models to diversify knowledge about settling tanks conception tools.

SOMMAIRE

SIGLES ET ABREVIATIONS	6
TABLE DES FIGURES	7
TABLE DES TABLEAUX	8
INTRODUCTION.....	9
1. CONTEXTE MINIER ET LOGIQUES DE GESTION DE L'EAU	10
1.1. Les sites miniers	10
1.1.1. Koniambo	10
1.1.2. Poum.....	10
1.1.3. Poro.....	11
1.1.4. Goro	11
1.2. Stratégies communes	11
1.2.1. Des situations et des contextes géologiques analogues	11
1.2.2. Un passé commun et un contexte normatif contribuant aux similitudes de gestion des flux sur mine	12
1.3. Les spécificités de gestion propres à chaque site	14
1.3.1. Un contexte topographique et climatique différent	14
1.3.2. Des sociétés exploitantes différentes	18
1.4. Conclusion	20
2. ETAT DE L'ART DES CONNAISSANCES CONCERNANT LES DECANTEURS...21	
2.1. Contexte de l'étude	21
2.2. Ressources bibliographiques	21
2.3. Justification de l'utilisation de bassins de décantation comme méthode de traitement dans le contexte local	21
2.3.1. Fixation des pollutions sur les MES (Matières En Suspension)	22
2.3.2. Rendements d'épuration pour les ouvrages de décantation	22
2.3.3. Description globale des ouvrages de décantation.....	23
2.3.4. Critique	24
2.4. Approche générale de la dynamique de dépôt de sédiments	25
2.4.1. Les mouvements des particules au sein de l'écoulement fluide.....	25
2.4.2. Les particules solides	25
2.5. Présentation des modèles classiques de décantation	28
2.5.1. Diversité des modèles existants.....	28
2.5.2. Modèle de Hazen	29
2.5.3. Modèle de Dobbins et Camp	30
2.5.4. Méthode du mélange intégral	31
2.5.5. Dimensionnement selon le volume	32

2.6. Les paramètres variables entrant en jeu dans la conception des ouvrages de décantation	32
2.6.1. Volume de l'ouvrage	32
2.6.2. Géométrie	32
2.6.3. Influence des équipements annexes	33
2.7. Conclusion sur les données d'entrée des modèles	34
3. DONNEES DISPONIBLES ET GENEREES AU COURS DU STAGE	35
3.1. Introduction et limites des données exploitées	35
3.2. Données hydrologiques	35
3.2.1. Pluviométrie	35
3.2.2. Débits	37
3.2.3. Méthodes actuelles d'estimation des débits sur mine	40
3.3. Données concernant les ouvrages existants	40
3.3.1. Données sur les bassins versants miniers	40
3.3.2. Données sur les différentes mines	41
3.4. Données concernant la sédimentologie	42
3.4.1. Concentrations en MES	42
3.4.2. Granulométrie des dépôts dans les décanteurs	45
3.4.3. Granulométrie des prélèvements ponctuels dans l'écoulement en période de crue	48
4. TEST DES MODELES DE DECANTATION AVEC LES DONNEES D'ENTREE ACQUISES	49
4.1. Introduction	49
4.2. Tests des méthodes de dimensionnement	49
4.2.1. Tests sur des cas théoriques	49
4.2.2. Tests sur des cas réels	50
4.2.2.1. <i>Comparaison des capacités des ouvrages actuels avec les volumes calculés avec la méthode 2h/2ans</i>	50
4.2.2.2. <i>Calcul de vitesse de chute</i>	51
4.2.2.3. <i>Hazen</i>	53
4.2.2.4. <i>Dobbins et Camp</i>	54
4.2.2.5. <i>Mélange intégral</i>	55
4.2.2.6. <i>Conclusion sur les modèles</i>	56
CONCLUSION	57
BIBLIOGRAPHIE	59
ANNEXES	61

Sigles et abréviations

A2EP : Agence pour l'Eau et l'Environnement du Pacifique
CFTMC : Centre de Formation des Techniques aux Mines et Carrières
CNRT : Centre National de la Recherche Technologique
CEMAGREF : Centre d'Études pour le Machinisme Agricole et le Génie Rural des Eaux et Forêts
DAVAR : Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales
DBO5 : Demande Biochimique en Oxygène en cinq jours
DCO : Demande Chimique en Oxygène
DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie
ETNA : Unité Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches (Centre Irstea de Grenoble)
GIP : Groupement d'Intérêt Public
IRD : Institut de Recherche pour le Développement
IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
KNS : Koniambo Nickel SA
MAR : *Mine Access Road* (piste d'accès à la mine)
MES : Matières En Suspension
MHR : *Mine Hall Road* (piste principale de la mine)
NTK : azote Kjeldahl (organique et ammoniacal)
NTU : *Nephelometric Turbidity Units* (unités de mesure de la turbidité)
PGE : Plan de Gestion des Eaux
PPME : Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement
SCS : *Sediment Control Structure* (structures de contrôle des sédiments)
SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
SIG : Système d'Information Géographique
SM1 : Stock de Minerai 1 (Goro)
SMBT : Stock de Minerai Basse Teneur (Goro)
STU : Service Technique de l'Urbanisme
SLN : Société Le Nickel
UNC : Université de Nouvelle-Calédonie
VS5 : Verse à Stérile n°5 (Goro)
VSEM : Verse à Stérile de l'Exercice Minier (Goro)
VSKE : Verse à Stériles de la Kué Est (Goro)

Table des figures

<i>Figure 1 : Baie de Poro contaminée par les fines latéritiques, photo de L. Carpentier (Hydromine 2011).</i>	9
<i>Figure 2 : Localisation géographique des quatre mines et de la Nouvelle-Calédonie (modifié d'après ALLENBACH(2011) et nouvelle-caledonie-tourisme.com)</i>	10
<i>Figure 3 : Profil d'altération théorique des péridotites en climat tropical, extrait de Mica Environnement (2009).</i>	12
<i>Figure 4 : Schéma de gestion des eaux d'amont en aval extrait du guide pratique des techniques et ouvrages hydrauliques de la SLN (2005).</i>	14
<i>Figure 5 : Comparaison des topographies et de l'hydrographie des différents sites à partir d'images extraites de Géoportail et du mémoire de P-E. Alloin (2011).</i>	15
<i>Figure 6 : Photographie aérienne du massif minier de Koniambo présentant de fortes déclivités, photo obtenue de KNS.</i>	16
<i>Figure 7 : Schéma (à gauche) et photographie (à droite) d'une digue de retenue sur un sous-bassin versant de Koniambo (SW35).</i>	16
<i>Figure 8 : Contraintes de terrain en termes de topographie et d'espace disponible sur la mine de Poro (à gauche) et Poum (à droite).</i>	18
<i>Figure 9 : Schéma de fonctionnement du système de vidange gravitaire, extrait de [GOUE, 2010].</i>	20
<i>Figure 10 : Schéma de fonctionnement d'un bassin de décantation, extrait de [GOUE, 2010].</i>	26
<i>Figure 11 : Schéma présentant les différents types de modèles de décantation existant</i>	28
<i>Figure 12 : Abaque de Camp pour le dimensionnement d'ouvrages de décantation, efficacité en fonction du terme $X = V_s \cdot h^2 \cdot D$ pour différentes valeurs du nombre de Hazen $Ha = V_s Q / S$ [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997].</i>	30
<i>Figure 13 : Pluviométrie annuelle et saisonnière par pluviomètre, sur tous les épisodes recensés de 2009 à 2012</i>	37
<i>Figure 14 : Relation pluie-débit sur Koniambo, exemple de la pluie du 24.12.2011, extrait de [GUYONNEAU, 2012]</i>	38
<i>Figure 15 : Ecoulements superficiels préférentiels et tailles des sous-bassins Amont et Aval du bassin-versant minier Denise, mine de Poro, source : A. GUYONNEAU (2012).</i>	38
<i>Figure 16 : Comparaison des débits de pointe mesurés à l'amont et à l'aval pour 67 évènements, considérés les plus importants,</i>	39
<i>Figure 17 : Localisation des entrées et exutoires de FRN01 (photo de gauche) (source : [CARPENTIER, 2011]) et de l'échelle de lecture de sédiments, noyée, de FRN18 (photo de droite).</i>	41
<i>Figure 18 : Evolution des concentrations maximales en MES à Poro amont et aval sur 3 ans.</i>	43
<i>Figure 19 : Flux de MES totaux amont et aval, par évènement.</i>	43
<i>Figure 20 : Localisation des prélèvements au sein de FRN01, réalisés à 15h00 le 18/04 puis à 08h30 et 15h10 le 19/04.</i>	44
<i>Figure 21 : Observation de 2 phases dans FRN01</i>	44
<i>Figure 22 : Observation de l'alternance de couches claires et sombres pour le prélèvement au centre de SW34 (Koniambo).</i>	45
<i>Figure 23 : Courbe granulométrique des dépôts de fines dans B18, réalisée par tamisage.</i>	46
<i>Figure 24 : Courbes associées aux analyses réalisées au granulomètre laser des échantillons de MES prélevés ponctuellement dans l'écoulement au cours de la saison 2012</i>	48
<i>Figure 25 : Schéma d'hydrogramme caractéristique permettant l'estimation de la zone d'efficacité des décanteurs et de la zone d'inefficacité.</i>	49

Figure 26 : Le bassin de décantation FRN01, 3 entrées, une sortie.....	50
Figure 27 : Tableau récapitulatif des calculs et comparaison d'efficacités de décanteurs selon les différentes méthodes	51
Figure 28 : Comparaison de 3 méthodes de calcul de vitesse de chute pour des diamètres de particule compris entre 0 et 200 μm	52
Figure 29 : Estimation du temps nécessaire à la sédimentation des particules pour une hauteur d'eau de 3 m et selon le diamètre des particules	52

Table des tableaux

Tableau 1 : Comparaison des pentes moyennes et des indices de dénivelé des différents bassins versants étudiés (données extraites de [GUYONNEAU, 2012]).	15
Tableau 2 : Comparaison des pluviométries annuelles moyennes des différents sites d'étude, données extraites [ROMIEUX, 2011].	17
Tableau 3 : Pollution fixée sur les particules solides en pourcentage de la pollution totale [STU, 1994], [DIREN LORRAINE, 2006].	22
Tableau 4 : Répartition de la pollution particulaire par paramètre de pollution [STU, 1994].	22
Tableau 5 : Taux d'abattements des MES contenues dans les eaux pluviales selon la vitesse de chute retenue pour le dimensionnement d'un bassin, extrait du SETRA, 1997.	23
Tableau 6 : Valeurs des coefficients de la formule de vitesse de chute de Stokes selon les matériaux considérés.....	27
Tableau 7 : Valeurs de vitesses de chute indicatives (en cm/s) selon les diamètres, extrait du SETRA, 1997.	27
Tableau 8 : Cumuls annuels des lames d'eau à Poum (à gauche) et à Poro (à droite).	36
Tableau 9 : Comparaison des débits maximum instantanés amont / aval par an	39
Tableau 10 : Capacités théoriques des décanteurs FRN01 et FRN 18 de Poro, calculées à partir de différents coefficients d'écoulement [NAVARROT, 2012].	40
Tableau 11 : Caractéristiques des bassins versants de chaque mine (données extraites de [GUYONNEAU, 2012]).	40
Tableau 12 : Données concernant les bassins FRN01 et FRN18 actualisées par L. Carpentier (2011) et A. Guyonneau (2012).	41
Tableau 13 : Comparaison des D10, D50 et D90 pour des échantillons en entrée et sortie de chaque décanteur.	46
Tableau 14 : Résultats d'analyse granulométrique de prélèvements de MES dans l'écoulement, saison 2011.....	48
Tableau 15 : Résultats d'analyse granulométrique de prélèvement de MES dans l'écoulement, saison 2012.....	48
Tableau 16 : Calculs de volume de FRN01 pour différents coefficients d'écoulement (C) avec la méthode de la SLN pour une pluie de 76.5 mm, données extraites de [NAVARROT, 2012].	51

Introduction

Cette étude est réalisée dans le cadre du groupement d'Intérêt Public (GIP), le CNRT « Nickel et son environnement » lancé en 2008 par le gouvernement de Nouvelle-Calédonie et le Ministère de la Recherche et de l'Outre-Mer. Il réunit des organismes de recherche, des partenaires industriels et des partenaires gouvernementaux et a pour objectif la réalisation d'un état des lieux des connaissances par retour d'expérience, acquisition et interprétation de données géotechniques, hydrologiques, chimiques et climatiques sur différents sites, afin de répondre à la problématique de gestion des flux d'eau et de sédiments s'écoulant sur milieu minier. L'activité minière est en effet très pauvre en données et en suivi concernant l'hydrologie et le transport solide, aussi le projet CNRT a-t-il émergé d'une volonté du gouvernement autant que d'une demande de la part des mineurs.

L'Irstea (Cemagref), organisme de recherche publique, tient une fonction de partenaire au sein du projet en apportant soutien technique et connaissances.

Le lagon de la Nouvelle-Calédonie est classé depuis 2008 au rang du patrimoine mondial de l'Unesco. La problématique environnementale des "eaux rouges" chargées en sédiments fins latéritiques est cependant une forte contradiction, allant à l'encontre de la biodiversité endémique des cours d'eau et du milieu marin de l'île (diminution de la luminosité, comblement et rehaussement des fonds de cours d'eau, asphyxie partielle des organismes recouverts par les fines). Cette problématique est liée à l'activité minière nickélifère qui constitue une grosse part de l'économie calédonienne et peut se poursuivre sur un certain nombre d'années.

Le problème d'entraînement de sédiments par les pluies (illustré par la figure 1 ci-dessous) est particulièrement accentué par le contexte hydrologique et climatique (climat subtropical associé à des pluies soutenues sur de courtes durées). La mauvaise gestion des ruissellements et le stockage aléatoire des stériles sur les mines anciennes ont en outre accentué les problèmes évoqués ci-dessus.



Figure 1 : Baie de Poro contaminée par les fines latéritiques, photo de L. Carpentier (Hydromine 2011).

Les mineurs ont depuis longtemps adopté certaines stratégies de gestion des eaux, dont la mise en place de bassins de rétention qui relèvent d'une pratique habituelle et ancienne.

Cette étude s'intègre dans la continuité de deux autres stages supervisés par l'Irstea (L. NAVARROT et A. GUYONNEAU, 2012) et vise à présenter ces stratégies de gestion globale et l'utilisation des bassins de décantation dans le contexte minier, à la lumière des recommandations et contraintes réglementaires locales. Les modèles de décantation de la littérature sont décrits. Un état des lieux des données disponibles est réalisé. Dans une dernière étape, les modèles sont confrontés aux données et mesures de terrain afin d'estimer l'efficacité des stratégies mises en place.

1. Contexte minier et logiques de gestion de l'eau

1.1. Les sites miniers

Cette étude portant sur les bassins de décantation s'inscrit dans le cadre du projet « fonctionnement des petits bassins versants miniers » du CNRT, ayant notamment pour but de comparer les expériences de gestion des eaux et des sédiments sur quatre mines de Nickel à ciel ouvert de Nouvelle-Calédonie, relevant de différentes compagnies minières. La liste des différents interlocuteurs rencontrés se trouve en annexe 1. Les quatre mines étudiées, localisées sur la carte de la figure 2 ci-dessous sont :

- Goro, mine de Vale
- Koniambo, mine de KNS (Koniambo Nickel SA)
- Poro, mine de la SLN (Société Le Nickel)
- Poum, mine de la SLN également



Figure 2 : Localisation géographique des quatre mines et de la Nouvelle-Calédonie (modifié d'après ALLENBACH(2011) et nouvelle-caledonie-tourisme.com)

On traite par la suite des bassins versants dits « miniers », s'opposant aux bassins versants hydrologiques car leur exutoire n'est pas la mer. Il s'agit de sous-bassins versants définis par les mineurs en général d'après le nom des creeks auxquels ils se rapportent. L'ensemble des bassins versants qui intéressent le projet CNRT est illustré en annexe 2.

1.1.1. Koniambo

Le site de Koniambo se trouve en province Nord (l'une des deux provinces de la Nouvelle-Calédonie possédant une gestion tout à fait particulière et autonome de leurs territoires respectifs), sur la côte Ouest de la Nouvelle-Calédonie. Alors que la côte ouest présente globalement des plaines côtières assez étalées, celle associée au massif du Koniambo est assez étroite. Le massif lui-même présente des versants à topographie accidentée aussi bien qu'en pente douce et s'élève jusqu'à 950m d'altitude par rapport au niveau de la mer. Ce site minier est l'un des plus grands de Calédonie, embauchant près de 5000 personnes. Il est géré par Koniambo Nickel Sa (KNS), entreprise semi-locale et sa mise en production est prévue pour 2012 et pour 50 ans d'exploitation.

1.1.2. Poum

La mine de Poum est gérée par la Société Le Nickel (SLN), entreprise calédonienne. Il s'agit d'une petite mine située dans un massif de basse altitude de la commune de Poum, sur une presqu'île aux pentes escarpées plongeant directement dans la mer. Elle se trouve à l'extrême

nord de la Nouvelle-Calédonie, sur la côte ouest. L'exploitation, de durée prévue d'une vingtaine d'années, a débuté en 2007.

1.1.3. Poro

Le site de Poro, est une mine-école exploitée par la SLN et gérée par le CFTMC, (Centre de Formation des Techniques aux Mines et Carrières). Le gouvernement de Nouvelle-Calédonie (DIMENC et DAVAR), en partenariat avec le CFTMC et l'UNC, a lancé un premier projet sur ce site, le projet Hydromine, afin d'apporter des connaissances sur les pluies, débits et concentrations en MES générés lors des événements pluvieux entre deux seuils successifs. Les résultats de cette étude s'intègrent dans le projet CNRT. Le site minier, implanté sur le massif de Poro, est localisé sur la côte Est de la Nouvelle-Calédonie, dans la commune de Houaïlou en Province Nord. Il s'agit d'un des plus anciens sites miniers ayant été ouvert par la SLN en 1874. Bien que l'exploitation se poursuive, l'enjeu actuel de ce site est la formation aux pratiques minières, une partie de la mine étant consacrée à la formation professionnelle par le CFTMC.

1.1.4. Goro

La mine de Goro et son usine de traitement sont basées entre la baie de Prony et la baie de Goro, dans la province Sud de la Nouvelle-Calédonie. Ce site est exploité par Goro-nickel, filiale de la multinationale Vale. L'entrée en production progressive du site minier est entreprise depuis 2009 et pour 29 ans.

Au regard des enjeux des sociétés exploitantes et des situations de chacune des quatre mines considérées, on remarque des analogies dans la logique de gestion des eaux.

1.2. Stratégies communes

1.2.1. Des situations et des contextes géologiques analogues

o La problématique des « eaux rouges »

Les analogies entre chaque site concernent la problématique commune des « eaux rouges » attachée à l'histoire de l'exploitation du nickel sur l'île. La mobilisation et le transport de sédiments lors des crues est un phénomène naturel particulièrement accentué en Nouvelle-Calédonie du fait de son contexte climatique et géologique (cf. paragraphe suivant) et constitue le problème de pollution principal des mines de nickel calédoniennes. L'activité minière a d'autant plus d'impact sur ce phénomène qu'elle génère, par remaniement des versants, des stocks de sédiments mobilisables. Le ruissellement des eaux de pluie est d'autre part accentué par la présence de surfaces nues de toute végétation et sensibles à l'érosion générées par l'activité minière (création de pistes d'accès et décapage). Les principales conséquences de ces phénomènes sont visibles au niveau de la faune et la flore aquatique et marine des cours d'eau et du lagon ainsi qu'au niveau des surfaces érodées qui ne sont plus propices au développement de végétation. La formation de ravines est une conséquence directe de l'érosion, l'accentuant en permettant l'augmentation de la vitesse de l'eau.

o Contexte géologique semblable

Les contextes géologique et pédologique des différentes mines sont globalement similaires bien qu'il y ait des nuances localement. Les sols calédoniens présentent une forte proportion de péridotites. Celles-ci ont tendance à s'altérer sous l'effet du climat tropical (pluies abondantes et température élevée). On distingue ainsi un profil d'altération des péridotites (cf. figure 3) formé de blocs résiduels et de saprolites issus de l'altération des péridotites par les diaclases. Ce stade évolue progressivement vers de la latérite et enfin vers de la cuirasse

ferrugineuse. Ce profil se rencontre cependant rarement dans sa totalité sur le terrain. [Mica Environnement, 2009].

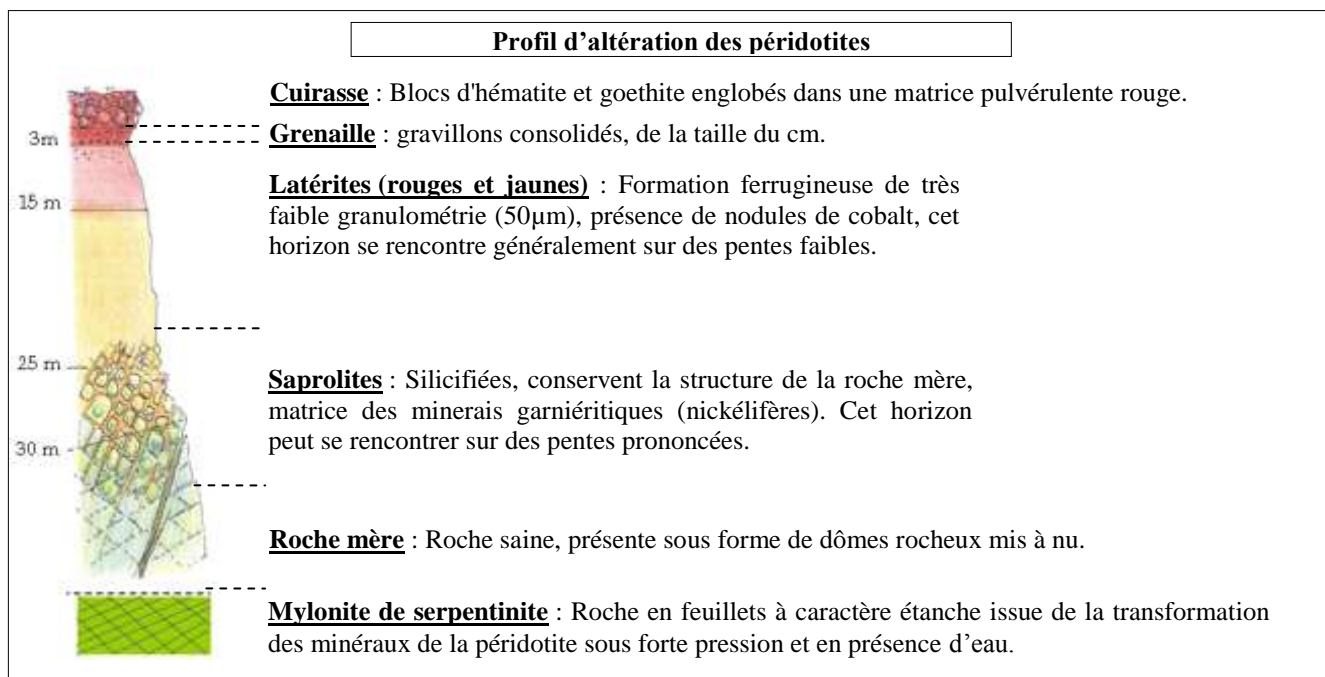


Figure 3 : Profil d'altération théorique des péridotites en climat tropical, extrait de Mica Environnement (2009).

La formation d'horizons superficiels permet le développement de sols épais, vulnérables à l'entraînement par le ruissellement dès que la couverture végétale disparaît. Les conditions d'écoulement sont par ailleurs liées aux pentes des versants et à la dénudation des sols miniers. La dégradation des sols est en outre aggravée par l'intensité des pluies et par l'accélération des écoulements provoquant le lessivage de ces sols sensibles à l'érosion.

1.2.1. Un passé commun et un contexte normatif contribuant aux similitudes de gestion des flux sur mine

○ Les stratégies de gestion des matériaux grossiers

Un exemple direct de stratégie commune établie suite à la prise de conscience des conséquences des pratiques passées est la création de verses pour stocker les stériles générés par l'exploitation de sorte à ce qu'ils ne soient pas remobilisés par les écoulements. Ces verses « stabilisées » (surfaces planes et étagées pour contrecarrer la pente des sites miniers) sont mises hors d'eau par détournement des ruissellements. Les stocks de stériles (matériel en général grossier) sont compactés pour ne pas être repris par les écoulements d'eau de pluie et pour permettre la revégétalisation des sites.

○ Les mesures de revégétalisation

Afin de limiter la mise à nu des sols, des actions de revégétalisation sont en cours, particulièrement avancée sur Goro et Koniambo où elles ont débuté au lancement du projet. La revégétalisation permet de reconstituer l'action naturelle de la végétation, à savoir la rétention d'eau et de sédiments ainsi que la protection par couverture du sol et la favorisation de l'infiltration. Elle est cependant compliquée du fait de la difficulté à manipuler des espèces endémiques.

Cette démarche a pour effet à long terme (lorsque les sols sont stabilisés par les racines de la végétation) la réduction de la charge et des fines arrivant aux ouvrages de décantation. Elle

influence donc l'hydraulique des écoulements sur mine et s'intègre dans une gestion globale. Les effets de la revégétalisation sont illustrés par la comparaison des résultats de l'étude granulométrique menée sur SP1A et SW35 à Koniambo (cf. partie 3.4.2). Ces ouvrages de rétention drainent respectivement un bassin versant revégétalisé et un bassin versant nouvellement remanié par ouverture d'un chantier.

○ *Le suivi environnemental et le rôle des mineurs dans la gestion des ouvrages*

Un autre point, développé par l'ensemble des mines considérées et également lié à la prise de conscience environnementale est le suivi hydrologique des sites miniers et des cours d'eau impactés par l'activité minière. Ce suivi s'est orchestré par l'équipement en matériel de mesure et par le lancement du projet Hydromine à Poro.

Découlant du principe précédent, l'importance d'intégrer la question de suivi environnemental directement dans les pratiques minières a mené, dans le cas des quatre sites considérés, à confier aux mineurs la mise en place (choix de géométrie, localisation, design) et la gestion des ouvrages de contrôle des écoulements.

○ *Une méthode de dimensionnement commune proposée par le gouvernement*

Au vu des problèmes environnementaux générés par l'exploitation minière passée et de l'absence d'étude pouvant servir de référence aux mineurs dans ce domaine, le gouvernement calédonien et les structures rattachées dont la DAVAR et la DIMENC, a mis en place des critères généraux communs de conception d'ouvrages. Ils se trouvent sous la forme de recommandations dans une Charte des Bonnes Pratiques Minières dont la dernière version date de mai 2011. Des extraits de cette charte se trouvent en annexe 3.

Ces critères ne prennent cependant pas en compte les spécificités de chaque site et correspondent toujours à une situation extrême afin d'être le plus préventif possible et d'être adaptable à n'importe quel site. Le coefficient de ruissellement est par exemple imposé à un minimum de 0,8, représentant une situation de ruissellement sur sol nu et sans infiltration. Il s'agit d'une valeur maximaliste par défaut car il n'y a aucune étude qui permette à ce jour de justifier d'autres coefficients de ruissellement (plus faibles).

La DAVAR est également à l'origine du choix de dimensionnement de la capacité des ouvrages selon le principe dit des " 2h/2ans" (retenir deux heures de précipitation d'un évènement de récurrence 2 ans).

Il n'y a encore aucune obligation de monitoring ou de suivi des ouvrages mais les arrêtés d'exploitation des mines restent ouverts, une nouvelle procédure pouvant être lancée à tout moment.

En l'absence d'étude permettant de justifier un dimensionnement autre, les mines conçoivent donc leurs ouvrages selon les critères de la charte minière et on retrouve des ouvrages conçus selon le même principe sur les sites de Poro, Poum, Goro et une partie du site de Koniambo. Ce sont en définitive les contraintes locales (espace disponible, pentes) qui imposent ce qui peut concrètement être réalisé (partie 1.3.1) et les mineurs sont tenus de justifier les volumes de rétention inférieurs à 100%. C'est ce point qui est à l'origine de la demande d'étude actuelle des mineurs concernant la justification de la végétalisation ou du design comme critères de rétention aussi pertinents que le volume.

○ *Les ouvrages de contrôle des flux*

On note la présence d'ouvrages communs à toutes les mines formant un ensemble de mesures ayant pour but le contrôle des flux depuis leur génération en amont jusqu'à leur rejet en aval. Ce principe est résumé par le schéma du guide pratique de la SLN (2005) qui suit (figure 4).

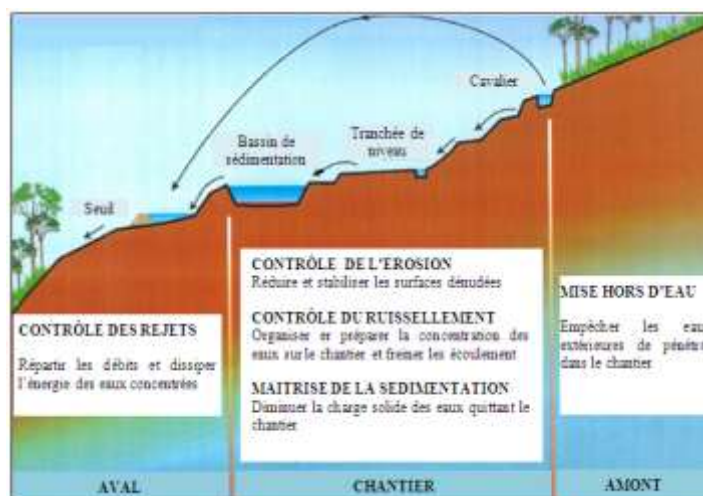


Figure 4 : Schéma de gestion des eaux d'amont en aval extrait du guide pratique des techniques et ouvrages hydrauliques de la SLN (2005).

Sont ainsi mis en place :

- Des ouvrages de détournement (cavaliers, buses, cassis, merlons et fossés), créés afin d'éviter que les écoulements ne traversent et ravinent les pistes d'accès aux sites mais suivent leur tracé afin d'être dirigé vers les ouvrages de dépollution successifs.
- Des ouvrages de ralentissement de l'eau (seuils en enrochement, tranchées et bassins ralentisseurs ou « brise charge hydraulique ») qui ont pour but le ralentissement de la vitesse et la réduction de force érosive de l'eau (dans les creeks ou bien au niveau des chemins préférentiels de l'eau) par étalage de la lame d'eau et par rupture de pente. Dans l'ensemble, les ouvrages ralentisseurs influencent la charge sédimentaire des écoulements car dès qu'il y a un ralentissement, des particules se déposent. Aussi sont-ils suivis et remis en état de fonctionnement en permanence car ils sont rapidement obstrués par les sédiments.
- Des ouvrages de traitement des eaux (les bassins de retenue), développés en parallèle de la mise en place de verses afin de gérer les fines (les verses gérant plutôt le grossier). Ils sont basés sur le principe de décantation des Matières En Suspension (MES) dans l'eau afin de permettre le rejet au milieu récepteur d'eaux moins chargées en sédiments. Ces bassins ou retenues de sédimentation sont une stratégie commune à tous les sites miniers dans leur principe (la décantation des MES de l'eau) mais relèvent de stratégies différentes dans leur mise en place et dans leur conception (cf. partie 1.3).

1.3. Les spécificités de gestion propres à chaque site

1.3.1. Un contexte topographique et climatique différent

o Contexte topographique de la Nouvelle-Calédonie

Certaines des mines sont plus exposées que d'autres à une forte topographie, Poum et Koniambo en particulier, se trouvant sur des massifs escarpés (figure 5). La Nouvelle-Calédonie est en effet partagée en deux par une chaîne de montagne d'orientation NO-SE suivant celle de l'île, et dont les sommets dépassent 1000 m en général. 80 % de l'île est ainsi

occupé par du relief, les pentes étant parfois très raides localement. La côte Est n'a pratiquement pas de plaine côtière, la chaîne plongeant directement dans la mer, tandis que la côte Ouest à des surfaces côtières plus aplanies et étagées, présentant des zones collinaires entre la chaîne et la mer.

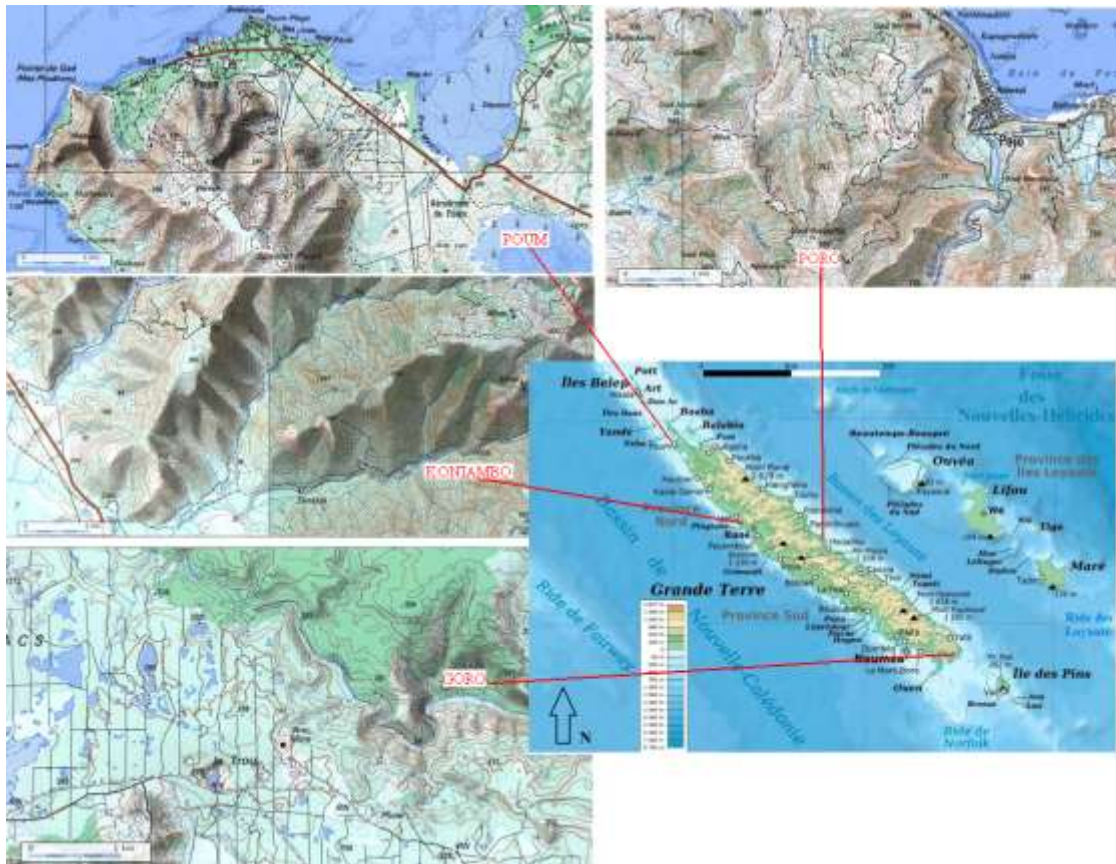


Figure 5 : Comparaison des topographies et de l'hydrographie des différents sites à partir d'images extraites de Géoportail et du mémoire de P-E. Alloin (2011).

Les pentes des différents bassins versants peuvent être comparées quantitativement (tableau 1) et confrontées au dénivelé, ou indice de Melton (Dn), qui prend en compte la superficie des bassins versants selon la formule suivante :

$$Dn = \frac{(\text{Altitude max} - \text{Altitude min})}{\sqrt{\text{Surface du bassin versant}}} \quad (1)$$

	Poro		Poum		Koniambo		Goro		Statistiques		
Nom du BV	Poro_amont	Poro_aval	Pôvio	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN1	Moyenne	Max	Min
Pente moyenne (%)	32%	36%	37%	30%	36%	42%	14%	20%	31%	42%	14%
Indice de Melton (%)	24%	31%	33%	36%	27%	13%	12%	21%	24%	36%	12%

Tableau 1 : Comparaison des pentes moyennes et des indices de dénivelé des différents bassins versants étudiés (données extraites de [GUYONNEAU, 2012]).

On remarque que l'apparente différence observée qualitativement à partir des cartes topographiques n'est pas forcément vérifiée quantitativement. Les pentes et le dénivelé sont en effet globalement plus importants sur Poum, Poro et Koniambo qu'à Goro mais la différence entre Koniambo et Goro est peu marquée si on s'attache à l'indice de Melton (dénivelé) plutôt qu'à la pente moyenne. Aussi la pente moyenne semble être la plus

importante à Koniambo par rapport aux autres mines tandis que le dénivelé est le plus marqué à Poum.

Au vu de ces différences de situation, les mines adoptent des stratégies de gestion des eaux particulières. La conception des bassins est également dépendante des contraintes locales de chaque site.

A Koniambo, l'étroitesse des bassins versants liée à la topographie accidentée (cf. photo aérienne de la figure 6) permet la mise en place de digues de retenues.



Figure 6 : Photographie aérienne du massif minier de Koniambo présentant de fortes déclivités, photo obtenue de KNS.

Ces barrages (digue en enrochements bétonné et noyau latéritique) sont placés en travers du thalweg des sous-bassins versants miniers, près de leur exutoire, et c'est le sous-bassin lui-même qui retient les eaux à décanner (cf. schéma et photo de la figure 7). On considère en effet de grands espaces qui, bien qu'ils soient escarpés, permettent de consacrer des zones assez importantes à la rétention d'eau pour décantation sans avoir besoin de creuser artificiellement les bassins (on donne l'exemple de la retenue nommée COB, de 48 000 m³ de capacité constituant le plus grand ouvrage du site).

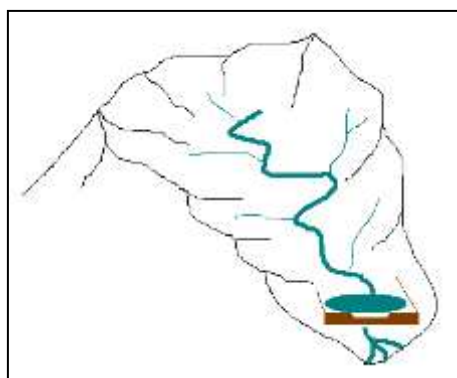


Figure 7 : Schéma (à gauche) et photographie (à droite) d'une digue de retenue sur un sous-bassin versant de Koniambo (SW35).

Contrairement aux autres mines étudiées dont les ouvrages sont tous conçus selon la méthode des 2h/2ans, les mineurs du site de Koniambo distinguent les "barrages de retenue", situés près des zones d'exploitation minières, gérés par les mineurs¹ et conçus selon la 2h/2 ans, des

¹ Le dimensionnement des ouvrages relevant des mineurs a cependant été confié à différents sous-traitants privés au cours du projet (dont KCB plus récemment ou A2EP) par souci de responsabilité.

"bassins de décantation creusés", conçus au niveau de la MAR (route d'accès aux sites d'exploitation) par la société privée responsable de la MAR.

○ *Manque d'espace associé à la topographie accidentée*

On rencontre d'autre part des ouvrages mixtes. SP10 (cf. carte de localisation des ouvrages de décantation de Koniambo, en annexe 4) est un exemple de compromis par rapport au manque d'espace disponible et à la nécessité d'un SCS (Sediment Control Structure). Il s'agit d'un fossé de décantation mis en place le long de la MAR avec enrochements à intervalles réguliers et bassin de tranquillisation en sortie (afin de casser l'énergie de la chute d'eau avant rejet dans le milieu naturel).

Une logique de compensation, comparable à la méthode de mise en place des ouvrages à Poum et Poro est suivie à Koniambo. Lorsqu'il n'y a pas assez de place à l'aval pour stocker le volume ruisselé sur un bassin versant, d'autres ouvrages sont mis en place plus en amont (où il y a de la place) en compensation de ce manque de capacité de stockage.

En termes de positionnement d'ouvrages sur le réseau hydrique minier, la démarche à Poum et Poro consiste en effet à les positionner au niveau des espaces disponibles et à les étudier à posteriori. Le critère 2h/2ans est appliqué dans les situations où il est possible sans quoi la taille des bassins est justifiée par le manque d'espace et la morphologie du terrain. La pluviométrie est d'autre part plus importante qu'à Koniambo et nécessite de mettre en place des ouvrages plus grands dès lors que la méthode des 2h/2ans est appliquée, alors qu'il y a moins d'espace disponible.

○ *Différence de pluviométrie entre les mines*

Bien que la situation soit différente localement en fonction des massifs considérés, globalement, les différences de topographie précédemment évoquées ainsi que l'exposition au vent favorisée au Sud et sur la côte Est sont à l'origine d'un régime pluvial différent (sachant que localement, la pluviométrie a tendance à augmenter avec l'altitude). La côte Est se trouve en effet presque deux fois plus arrosée que la côte Ouest [ALLOIN, 2011]. Pour illustrer ce fait, on peut comparer les pluviométries annuelles des différents sites (tableau 2) ;

Site minier concerné	Pluviométrie annuelle (en mm/an)
Koniambo	1100
Poum	1499
Poro	1831
Goro	2834

Tableau 2 : Comparaison des pluviométries annuelles moyennes des différents sites d'étude, données extraites [ROMIEUX, 2011].

Le secteur de Goro est la deuxième zone géographique la plus pluvieuse de Nouvelle-Calédonie, avec près de trois mètres de précipitations annuelles. Les pics de pluviométrie renforcent les ruissellements naturels, qui proviennent à la fois de la circulation des eaux de surface et des réseaux souterrains. Une des stratégies de Goro est donc de rejeter les eaux dès qu'elles sont traitées afin de ne pas surcharger les bassins. Le détournement des eaux de la végétation (eaux propres) directement vers les creeks afin d'éviter qu'elles ne se salissent ou aillent surcharger les bassins de décantation est un autre exemple de cette gestion pointue des flux d'eau. Ces stratégies sont par ailleurs particulièrement possibles à Goro du fait de la topographie assez plane et du réseau hydrographique très fourni (passage de cours d'eau à proximité et sur la mine) (cf. figure 5).

Ce principe s'oppose directement à la situation de Poro ou de Poum où la mise en place d'ouvrages successifs tous plus ou moins reliés permet l'écrêtage et le traitement au fil de l'eau. L'écrêtage par décanteurs successifs est remis en question dans certains cas en considération de l'efficacité du traitement de l'eau par un bassin, estimée suffisante (cf. partie 3.4.1). La modification de ce principe à Poum et à Poro impliquerait par ailleurs de repenser complètement le système de gestion des eaux, ce qui n'est pas forcément possible étant donné le fait que les ouvrages soient déjà en place et les contraintes de terrain (cf. ci-avant et photos de la figure 8 ci-dessous).



Figure 8 : Contraintes de terrain en termes de topographie et d'espace disponible sur la mine de Poro (à gauche) et Poum (à droite).

La volonté, à Goro, d'optimiser le volume de traitement de chaque décanteur en n'y faisant parvenir que les eaux de sa surface de drainage s'accompagne de la mise en place d'un ouvrage immense sécuritaire en aval de tous les autres ouvrages. Cet ouvrage, nommé BSKN, de 365 000 m³ de capacité de rétention, se comparant aux 207 900 m³ de capacité totale des 11 autres bassins additionnés (cf. tableau de données sur les bassins de Goro en annexe 5), est donc présent en cas de problème sur le système de gestion amont (crue très forte ou dysfonctionnement d'un ou plusieurs ouvrages de décantation).

○ *Contrainte de localisation liée à la végétation*

La localisation des mines et la végétation de la zone d'implantation des mines constituent un autre paramètre à prendre en compte, certaines espèces devant être conservées ou n'étant présentes que sur quelques zones. C'est ainsi qu'est appliquée à Goro une « contrainte du défrichage », interdisant de défricher certaines zones et ayant pour conséquence le choix de la localisation d'un ouvrage ou d'un déversoir de sortie par exemple.

1.3.2. Des sociétés exploitantes différentes

La SLN est une société ancienne datant des premières exploitations de Nickel alors que KNS (dont la création date de 2005) et Goro Nickel sont des sociétés plus récentes. Aussi a-t-on, sur Goro et Koniambo, une prise en compte de la gestion des eaux intégrée dans la construction des sites miniers. La gestion des eaux s'est au contraire improvisée au fur et à mesure de l'exploitation minière pour les sites de la SLN et les mineurs doivent à présent raisonner avec des ouvrages existant.

L'enjeu des différentes sociétés influence la réflexion concernant la gestion environnementale sur site. Les seuils de mesure ou bassins de décantation mis en place peuvent être déplacés à n'importe quel moment pour des nécessités d'exploitation. Cette notion de non-pérennité des structures mise en place rajoute une difficulté à la gestion des eaux qui ne donne des résultats que sur un certain nombre d'années. La conception d'ouvrages « évolutifs » doit être intégrée

dans la réflexion concernant la gestion des eaux, particulièrement dans les mines récentes telles qu'à Goro ou Koniambo.

○ *Suivi des ouvrages et suivi environnemental*

On peut évoquer les différences dans le suivi des bassins et de la gestion environnementale de façon globale. On distingue le suivi des ouvrages du suivi environnemental regroupant les relevés de mesures de débit, de concentration en MES et de pluviométrie sur les creeks environnants.

A Poro le suivi des ouvrages est géré par le chef d'exploitation et consiste principalement en leur restauration en cas de dégradation et en leur curage tous les ans en fonction des disponibilités des machines et du remplissage des bassins, le suivi environnemental étant réalisé par le biais du projet Hydromine.

A Poum, le suivi des ouvrages est réalisé par une personne dédiée à cela ainsi qu'au suivi des mesures de débit et de MES sur les différentes stations de mesure. Le curage est également réalisé en moyenne une fois par an, dépendant du remplissage des bassins.

A Goro et Koniambo le suivi est beaucoup plus poussé étant donné que ce sont des mines d'ouverture récente dont les ouvrages ont pu être pour certains pensés et suivis dès leur mise en place. Le suivi environnemental est donc géré par une équipe "environnement" dédié à cette tâche tandis que la gestion des ouvrages est laissée aux mineurs.

Certains critères allant au-delà du dimensionnement uniquement volumétrique à partir de la méthode 2h/2ans ont été intégrés à la mise en place des bassins de décantation, à Goro, afin d'éviter les aberrations dans leur conception. Il est par exemple imposé une profondeur maximum de 5 m et une longueur équivalente au triple de la largeur afin de laisser une certaine distance à parcourir à l'eau durant laquelle les sédiments peuvent décanter (cf. partie 2.4.1).

○ *Vidange des bassins*

Il semble que les bassins ne se vident pas assez rapidement de façon naturelle. Les bassins sont systématiquement équipés de déversoirs d'orage fonctionnant par surverse. On distingue ainsi une situation déversante coïncidant avec les fortes crues, et une situation non déversante, pour les événements générant des pluies inférieures à la 2h/2ans. Il n'est parfois pas aisé d'observer clairement la situation déversante sur le terrain en raison de l'existence d'écoulements par exfiltration (à travers les enrochements constituant certains déversoirs ou bien par le sol). Lorsque le niveau de l'eau atteint la limite inférieure du déversoir, le bassin ne se vide alors plus que par infiltration et évaporation, ce qui met jusqu'à deux trois jours pour les bassins de taille moyenne.

Le temps de vidange trop long entre deux pluies pose problème car le volume de rétention disponible pour une pluie est grandement diminué par la présence de l'eau de la pluie précédente. La nouvelle pluie va donc remettre en mouvement les eaux partiellement décantées mobilisant le bassin, en plus de créer un surplus d'eau amenant à déversement sans période de rétention préalable. Cela « annule » l'effet de la décantation précédente. On note alors une perte d'efficacité de l'ouvrage, voire une "transparence" totale de l'ouvrage malgré son grand volume. Ce problème justifie l'intérêt des systèmes de vidange superficiels évoqués à Koniambo ou Goro.

La vidange est une problématique pour la SLN au niveau des sites de Poro et Poum car aucun ouvrage ne présente de dispositif de vidange. Les nouveaux bassins sont de plus en plus

conçus sans que de tels dispositifs ne soient prévus et le problème d'inefficacité de l'ouvrage décrit plus haut est en conséquence de plus en plus rencontré.

A Goro, des pompes gravitaires de vidange (figure 9) sont fréquemment utilisées afin de contrôler la vidange des bassins en prévision des crues futures. Les bassins sont munis de vannes de vidange par surface déclenchées après mesure de turbidité et de concentration en MES (objectif de rejet de 35mg/l). Ce système est tout à fait validé par la littérature à condition qu'il soit conçu de sorte à ce qu'il n'y ait pas de reprise (cf. partie 2.6.3).

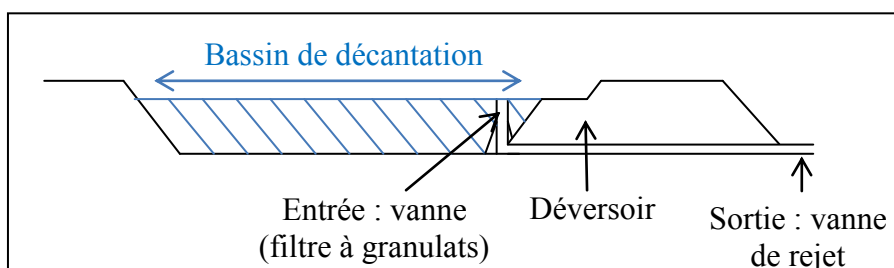


Figure 9 : Schéma de fonctionnement du système de vidange gravitaire, extrait de [GOUE, 2010].

Des études ont été lancées dans le but de déterminer une corrélation entre MES et turbidité. Cette corrélation permettrait d'assurer une meilleure réactivité en ce qui concerne la vidange des ouvrages, les résultats de concentration en MES du laboratoire de la mine étant assez longs (il faut attendre 24h), par rapport à l'enchaînement des crues parfois très rapide.

1.4. Conclusion

Les différents sites miniers présentent globalement une vision analogue des écoulements considérés dans leur continuité (cf. partie 3.2.3). Cette analogie est à nuancer avec les différences dans les stratégies adoptées. Les contraintes locales sont à prendre en compte. Il y a une volonté commune en terme d'attentes du projet CNRT afin d'améliorer la gestion des eaux et la gestion de l'environnement, de la part de l'ensemble des mineurs. Les questions récurrentes, de la part des mineurs, reflètent la nécessité de réfléchir aux questions telles que : Quel type de géométrie adopter ? Convient-il de favoriser la surface ou bien la profondeur d'un bassin ? Un ouvrage de taille importante est-il préférable ou équivaut-t-il à plusieurs petits ? Des ouvrages en "zigzag" peuvent-ils être judicieux compte-tenu du fait qu'ils permettent un volume de stockage moindre mais qu'ils permettent un plus fort ralentissement ? Les bassins de décantation sont-ils des ouvrages de traitement adaptés ? Quel est l'effet des bassins pluri-entrées sur l'étalement de la lame d'eau et sont-ils à développer étant donné la problématiques de leur instrumentation ?

La partie suivante s'accorde donc à présenter les connaissances de la littérature concernant l'usage de bassins de décantation, leur dimensionnement et les paramètres sur lesquels il est possible d'intervenir afin d'améliorer leur efficacité.

2. Etat de l'art des connaissances concernant les décanteurs

2.1. Contexte de l'étude

Il n'y a pas de normes concernant les rejets de MES ou la mise en place de décanteurs en Nouvelle-Calédonie. Les méthodes utilisées par la DAVAR et conseillées par la Charte des bonnes pratiques minières, Version 8.4 (Mai 2011) définissent davantage des objectifs, ce qui paraît plus pertinent dans un milieu aussi ouvert et vaste que les mines.

Le seul critère de dimensionnement donné par les textes en Nouvelle-Calédonie concerne donc le volume de rétention. Dans la littérature, notamment en assainissement urbain, il est pourtant mentionné nombre d'autres facteurs intervenant dans le dimensionnement des bassins, tels que, par exemple, leur géométrie, les dispositifs d'entrée et de sortie d'eau, le rapport longueur/largeur ou longueur/profondeur, ou encore l'agencement des différents bassins entre eux [COX, 1967].

La partie Conception (II.c.4) de la charte minière mentionne toutefois les points suivants :

- Géométrie des bassins adaptée au sens d'écoulement afin d'optimiser le temps de séjour.
- Bassins équipés de repères permettant l'appréciation des volumes décantés
- Digue de retenue inférieures à 10 m de hauteur totale (talus aval)
- Hauteur d'eau dans la retenue inférieure à 5 m
- Bassins conçus pour pouvoir être curés efficacement, sans risque
- Bassins équipés d'un système de vidange avec prise d'eau en surface, dans la frange supérieure clarifiée (pour optimiser le traitement d'épisodes pluvieux successifs en le libérant de son eau).
- Curage dans les meilleurs délais des ouvrages de décantation présentant un taux de remplissage supérieur à 30% du volume d'eau nécessaire, produits de curage stockés dans des zones hors eau appropriés et protégés des phénomènes d'érosion des talus.

Ces paramètres pris en compte de façon précise pourraient permettre d'améliorer l'efficacité de décantation. C'est ce qui est à l'origine de cette étude sur les décanteurs.

2.2. Ressources bibliographiques

Les références concernant les questions d'écoulements en milieu minier sont peu nombreuses, cette problématique n'étant à priori pas rencontrée dans la mesure où elle est rencontrée en Nouvelle-Calédonie, au niveau des pays de référence en termes d'activité minière (Australie, Canada, Etats-Unis). Les ressources bibliographiques prennent donc en compte d'autres disciplines telles que l'hydrologie urbaine, l'assainissement, l'urbanisme, l'aménagement des territoires agricoles, l'aménagement du réseau autoroutier ou encore le génie civil et l'hydraulique fluviale. Les mécanismes entrant en jeu dans les ouvrages considérés par ces différents domaines sont en effet généralement analogues en ce qui concerne l'hydraulique et le transport solide [LAFOND, 1995].

Les valeurs et fourchettes de valeurs données dans les paragraphes suivants sont extraites de références bibliographiques, aussi dépendent-elles des situations c'est-à-dire des épisodes pluvieux considérés et des sites d'études. On peut également imputer la variabilité des résultats aux protocoles et appareils de mesures [JACOPIN, 1999]. Ces données sont donc à considérer avec précaution.

2.3. Justification de l'utilisation de bassins de décantation comme méthode de traitement dans le contexte local

2.3.1. Fixation des pollutions sur les MES (Matières En Suspension)

La méthode de dépollution par bassin de décantation est couramment utilisée par les mineurs. Cette méthode est d'autre part validée par certains auteurs tels que Chocat, Chebbo, Saget et recommandée par des structures telles que la DIREN de Lorraine dans son cahier des charges pour la gestion des eaux pluviales dans les projets d'aménagements (2006), car elle constitue un des moyens les plus efficaces pour lutter contre les pollutions générées par le ruissellement des eaux pluviales. En effet, la plupart des polluants s'accumulent sur les particules solides et particulièrement sur les MES [CHEBBO, 1992], [SAGET & al., 1994], [STU, 1994], [LAFOND, 1995], [SATIN & AL., 1995],[CHOCAT, 1997], [JACOPIN, 1999]. D'autre part, les MES constituent la majeure part des sédiments transférés par temps de pluie. Les MES, qui sont donc les particules solides ou sédiments transportés par suspension dans l'écoulement, sont en général considérées comme des particules fines (de diamètre inférieur à 100 µm ou moins, selon les auteurs). Elles s'opposent aux particules de diamètre plus grossier et transportées par charriage sur le fond. Il est difficile de définir une valeur-seuil de diamètre à partir duquel on considèrerait que les particules relèvent de la suspension ou du charriage car les mécanismes de mise en suspension ou de charriage dépendent de l'écoulement (2.4.1).

Les valeurs qui suivent (tableau 3 et 4), issues du Guide technique des bassins de retenue d'eaux pluviales (STU, 1994), concernent les eaux pluviales et sont également mentionnées par la DIREN de Lorraine.

Le premier tableau présente la proportion de pollution fixée sur les particules solides par rapport à la pollution totale, justifiant qu'une proportion majeure de pollution de tous types se trouve dans la phase solide de l'écoulement. Le deuxième tableau présente les proportions de pollution particulaire selon la granulométrie considérée, permettant de déduire que la majeure partie de la pollution particulaire (pollution fixée sur les particules solides) se trouve sur les fines, de diamètre inférieur à 50 µm.

Paramètres de pollution			
DCO (%)	DBO5 (%)	Hydrocarbures (%)	Métaux (%)
83 à 95	83 à 92	82 à 99	79 à 99

Tableau 3 : Pollution fixée sur les particules solides en pourcentage de la pollution totale [STU, 1994], [DIREN LORRAINE, 2006].

Fraction granulométrique	DCO	DBO5	NTK	Plomb
> 250 µm	30%	25%	13%	41%
50-250 µm	0%	9%	3%	
< 50 µm	70%	66%	84%	59%

Tableau 4 : Répartition de la pollution particulaire par paramètre de pollution [STU, 1994].

2.3.2. Rendements d'épuration pour les ouvrages de décantation

Outre le fait d'être de mise en place et de gestion aisée, les ouvrages de décantation présentent des rendements d'épuration assez satisfaisants. Les rendements attendus, c'est-à-dire la proportion de MES décantée dans l'ouvrage par rapport à la pollution totale varient en fonction de l'épisode pluvieux considéré et se situent sur des fourchettes plus ou moins importantes selon les auteurs et selon les temps de décantation. On indique par exemple entre 80 et 90% de taux d'abattement après 30 mn de décantation [CHEBBO, 1992], 60 à 90% [SETRA, 1997] ou 80 à 85% [CHOCAT, 1997] après quelques heures, ou encore 83 à 90% [STU, 1994] au-delà de 24h.

Les situations et valeurs de paramètres pris en compte dans les différents travaux sont également à considérer dans cette diversité des temps de décantation proposés.

Le guide du SETRA donne à titre indicatif un tableau (tableau 5) de valeurs d'efficacité de traitement en fonction de la vitesse de chute retenue pour le dimensionnement d'un ouvrage selon la méthode de Hazen simple pour un débit d'entrée fixe (cf. partie 2.5.2.). On remarque que, plus la vitesse de chute considérée pour le dimensionnement est choisie faible, plus l'efficacité de l'ouvrage sera importante.

VITESSE DE CHUTE (cm/s)	VITESSE DE CHUTE (m/h)	RENDEMENT (%)
0,0003	0,01	100
0,001	0,04	98
0,003	0,1	95
0,014	0,5	88
0,027	1	80
0,14	5	60
0,28	10	40
1,39	50	15
2,78	100	10
13,89	500	7
27,78	1000	5

Tableau 5 : Taux d'abattements des MES contenues dans les eaux pluviales selon la vitesse de chute retenue pour le dimensionnement d'un bassin, extrait du SETRA, 1997.

Les rendements de traitement par décantation évoqués ne sont cependant pas donnés en comparaison d'autres méthodes de traitement (par filtration, infiltration, floculation etc.) et ne permettent donc pas de conclure par rapport à l'efficacité de cette méthode.

2.3.3. Description globale des ouvrages de décantation

Au vu des arguments et rendements avancés précédemment, les ouvrages de décantation sont donc justifiés dans la stratégie de diminution de la concentration en polluant avant rejet au milieu naturel. Parmi les différentes sortes d'ouvrages existant, par exemple explicitées dans le STU (1994), le contexte minier s'intéresse à des bassins à ciel ouvert, secs en dehors des périodes de pluie et qui ne traitent que des eaux pluviales. Une définition peut être donnée:

« Bassin de décantation (*settling tank*) : Bassin de traitement destiné au stockage temporaire des eaux pluviales en réseau séparatif, dans le but de les décanter avant leur rejet au milieu récepteur. » [CHOCAT, 1997].

Les ouvrages de décantation étant les derniers ouvrages avant rejet dans le milieu récepteur [SINHA & AL., 2000], ils ont pour but de réduire les concentrations en polluants des eaux de sortie de l'ouvrage. Ils ont d'autre part une fonction d'écrêtage des crues étant donné le stockage d'eau temporaire effectué durant la crue pour être décanté. Le piégeage des sédiments reste toutefois primordial, aussi les bassins de retenue simple employés en hydrologie ne peuvent être considérés s'ils ne prennent pas en compte la dimension décantation [STU, 1994].

L'un des principes de conception sous-entendu est le ralentissement de l'écoulement, afin de permettre la décantation (cf. partie 2.4). D'autre part, le temps de séjour de l'eau dans l'ouvrage doit être optimisé étant donné les volumes en jeu et la récurrence des événements

pluvieux [CHOCAT, 1997], [LAFOND, 1995]. Ce paradoxe est un exemple de la complexité des phénomènes entrant en jeu dans la conception d'ouvrages de décantation.

Il existe des ouvrages visant à optimiser la séparation des MES par centrifugation (les séparateurs hydrodynamiques) toutefois les avis sur leur rendement sont partagés. Le principe des décanteurs lamellaires, consistant à augmenter la surface de décantation par des structures lamellaires, tubulaires ou en nids d'abeilles [CHOCAT, 1997], [LAFOND, 1995], [SATIN & AL. 1995] est difficilement envisageable dans le contexte minier du fait du colmatage des structures, nécessitant un curage spécifique.

2.3.4. Critique

La décantation est une solution de traitement qui nécessite des volumes de stockage considérables [CHOCAT, 1997]. Ce détail pose particulièrement problème dans le contexte de l'étude, avec des topographies accidentées laissant peu d'espace pour la mise en place de ces structures de dépollution. Les ouvrages de décantation sont d'autre part relativement efficaces pour les événements pluvieux de faible intensité et forte récurrence, leur « transparence » lors des fortes pluies ayant au contraire été relatée sur l'ensemble des mines de l'étude. Le débit devient en effet trop important pour être ralenti au niveau des ouvrages et permettre la décantation. Les ouvrages deviennent alors inutiles [WALCH & AL., 1986].

La problématique de remise en suspension reste entière, l'état des connaissances actuelles concernant ce point n'étant pas suffisant pour permettre une conclusion. On ne sait pas, en effet, si les bassins ne représentent pas un risque d'accentuation de la pollution du milieu récepteur par effet choc en cas d'évènement extrême. La stratégie de gestion des eaux à l'échelle des bassins ne permet pas forcément la sédimentation définitive des particules solides, celles-ci étant parfois remobilisées lorsque les bassins n'ont pas eu le temps de se vider entre deux événements pluvieux (cf. partie 3.4.1). Aussi peut-on se demander si, lors d'un événement de d'occurrence plus rare (crue centennale par exemple), le bassin de décantation ne représenterait pas un stock de sédiments mobilisables par le flux d'eau, auquel cas l'impact sur le milieu récepteur serait néfaste et l'utilité du bassin remise en cause. Il n'y a pas de modèle prenant bien en compte ce facteur de reprise en fin d'évènement, seule l'étude de cas sur bassin réel permettrait éventuellement d'étudier plus en détail ce phénomène [CHOCAT, 1997].

L'efficacité des ouvrages de stockage et donc de la décantation physique seule est remise en cause pour les particules fines et notamment pour les diamètres inférieurs à 50µm [SETRA, 1997]. La décantation peut dans certains cas être améliorée. On peut dans ce sens mentionner un écart de rendement de 40% entre le taux d'abattement de MES de 50% sans ajout de réactif et le taux d'abattement de 90% avec ajout de réactifs permettant la floculation, dans le cas des décanteurs en traitement des eaux usées [SADOWSKI, 2011] (cf. 2.4.1).

La mise en place d'ouvrage de décantation constitue une méthode curative, lorsque le problème est déjà existant. La majorité des auteurs prônent la mise en place de mesures préventives ne développant les méthodes curatives que dans les cas extrêmes ou aucune autre méthode ne peut être appliquée. Le cas des mines étudiées est toutefois déjà une situation extrême, ne présentant plus aucune ressource ou marge d'action considérant la mise à nu des sols et la topographie accidentée du terrain. Suivant la même logique, il est recommandé de tenter de résoudre le problème le plus à l'amont possible plutôt que de chercher à amener l'eau à l'aval pour la traiter, ayant pour effet d'engendrer des volumes très importants à traiter [CHOCAT, 1997], [WALCH & AL., 1986].

2.4. Approche générale de la dynamique de dépôt de sédiments

2.4.1. Les mouvements des particules au sein de l'écoulement fluide

Les particules solides, selon leurs caractéristiques et selon les conditions d'écoulement du fluide dans lequel elles se trouvent peuvent être transportées par charriage ou par suspension.

- Le transport par suspension² concerne les particules transportées sur toute la section de l'écoulement, au gré du champ de vitesse du fluide.
- Le transport par charriage est localisé sur le fond et concerne les particules transportées par saltation, glissement ou bien roulement.

Le mouvement d'une particule de caractéristiques données peut donc varier au fil du cours d'eau en fonction de l'évolution de l'écoulement (débit, turbulence). Il n'est donc pas aisé de définir une valeur seuil de diamètre de particule qui permettrait de la considérer en suspension ou charriée. On considère cependant l'analogie entre les MES et les fines car 70 à 80 pourcents de la masse de matière en suspension est constituée par des particules dont la taille est inférieure à 100 µm [CHEBBO, 1992], [CHOCAT, 1997].

Lors d'un évènement pluvieux, les matériaux fins sont en général mobilisés en premier par les eaux de ruissellement. L'augmentation du débit et de la turbulence au fil du parcours de l'eau sur le bassin versant entraîne les particules de plus grande taille. Ces matériaux se redéposent lorsqu'ils rencontrent des zones de ralentissement et, inversement, les matériaux les plus grossiers ont tendance à se déposer avant les matériaux fins. Certaines particules de vitesse de chute très faible (les "fines") ne se déposeront qu'après un certain temps d'arrêt complet de l'écoulement (cf. 2.4.2).

On comprend aisément le rôle hydraulique des bassins sur le ralentissement de l'écoulement, permettant le dépôt des particules en suspension qui ne pouvaient se déposer depuis leur mobilisation (cf. 2.4.2).

2.4.2. Les particules solides

○ Granulométrie

La granulométrie est le paramètre indispensable pour caractériser les particules. Ce paramètre est représenté sous la forme de "courbe granulométrique", donnant la répartition cumulée massique ou volumique des particules suivant leur taille (cf. partie 3.4.2). On retient en général le D50 (ou D10, D90, D60 selon les usages), terme utilisé dans les calculs et représentant le diamètre médian, pour lequel 50% (ou respectivement 90 %, 10% et 40 %) des particules ont un diamètre inférieur à ce diamètre. Ces particules de taille inférieure au diamètre de référence sont qualifiées de "passants". La qualification des particules selon leur taille (argiles, silts, sables, graviers...) varie en fonction des auteurs.

○ Vitesse de chute

La vitesse de chute est par ailleurs le paramètre qui représente le mieux les interactions solide/liquide des particules au sein de l'écoulement [CHEBBO, 1992], [CHOCAT, 1997]. Les particules lâchées à l'entrée d'un bassin où l'eau est immobile ont tendance à chuter jusqu'à atteindre une vitesse V_s , leur vitesse de chute [LAFOND, 1995]. Le schéma de la figure 10 ci-dessous illustre ce principe.

² La littérature anglaise considère les notions de *Bed load* et de *Wash load* (ou *suspended load*) mettant l'accent sur le contact avec le lit du cours d'eau ou au contraire l'absence de contact totale avec le lit et donc l'absence d'effet sur la morphologie du cours d'eau, lors du transport.

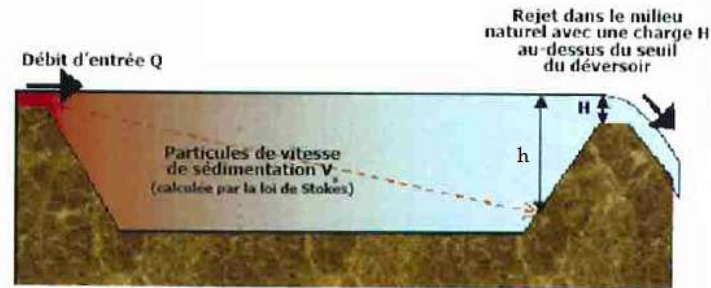


Figure 10 : Schéma de fonctionnement d'un bassin de décantation, extrait de [GOUE, 2010].

La vitesse de chute peut être calculée théoriquement (cf. ci-après formule de Stokes) mais il est préférable de la déterminer expérimentalement in-situ car les paramètres du terrain tels que l'agrégation des particules sont alors pris en compte. On obtient généralement des vitesses expérimentales 1 à 5 fois plus élevée que les valeurs données par le calcul théorique [CHEBBO, 1992], [CHOCAT, 1997]. Les outils permettant de mesurer la vitesse de chute sont variés (VICAS, cône de Imhoff, colonne de sédimentation, pipette d'Andresen, mesure de la vitesse de descente de l'interface liquide/boue).

La vitesse de chute d'une particule (ou d'une fraction de particule de mêmes caractéristiques) dépend du diamètre, de la densité, de la forme de la particule et de la viscosité³ cinématique de l'eau [COX, 1967], [CHEBBO, 1992], [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997], [SETRA, 1997], [SINHA &AL., 2000].

Pour une particule sphérique de faible diamètre (inférieur à 0.1 mm), et dans l'hypothèse d'un régime laminaire ou d'un fluide au repos autour de la particule, la loi de Stokes s'écrit ;

$$V_s = \frac{g(s-1)D^2}{18\nu} \quad (\text{STOKES, 1851}) \quad (2)$$

Avec :

g : Accélération de la pesanteur, prise égale à 9,81 m/s²

s : Densité de la particule, comprise entre 2,5 et 2,8 pour des matériaux de rivière, prise égale à 2.65 en général

D : Diamètre de la particule (m)

ν : Viscosité cinématique de l'eau prise égale à 10⁻⁶ m²/s à 20°C

Une extrapolation de la loi de Stokes prenant en compte la forme naturelle de la particule est donnée par Camenen (2010) ;

$$V_s = \frac{\nu}{D} \left[\sqrt[3]{\frac{1}{4} \left(\frac{A}{B}\right)^{\frac{2}{m}} + \left(\frac{4 d^*}{3 B}\right)^{\frac{1}{m}} - \frac{1}{2} \left(\frac{A}{B}\right)^{\frac{1}{m}}} \right]^m \quad (3)$$

Avec :

A, B et m : coefficients d'ajustement liés à la nature de la particule

d* : diamètre sédimentologique :

$$d^* = \frac{(s-1)g^{1/3}}{\nu^2} D \quad (4)$$

Les valeurs proposées par Camenen pour les coefficients A, B et m selon les matériaux proposés se trouvent dans le tableau 6 suivant ;

³ La viscosité de l'eau est influencée par la température [COX, 1967], cependant ce paramètre semble être négligeable par rapport à l'incertitude liée aux autres paramètres intervenant dans la décantation.

Type de matériau	Diamètre indicatif (mm)	Coefficient de forme csf	Angularité P	A	B	m
Particules sphériques		1,0	6,0	24,0	0,39	1,92
Galets	20 à 200	0,7	5,0	24,5	0,62	1,71
Sable grossier (graviers)	2 à 20	0,7	3,5	24,6	0,96	1,53
Sable fin	0,05 à 2	0,7	2,0	24,7	1,36	1,36
Silts	< 0.05	0,4	2,0	38,0	3,55	1,12
Flocs		0,6	1,0	26,8	2,11	1,19

Tableau 6 : Valeurs des coefficients de la formule de vitesse de chute de Stokes selon les matériaux considérés.

De la même façon que pour la granulométrie, une vitesse de chute médiane V50 peut être estimée afin de constituer un terme de calcul représentatif d'une moyenne de vitesses de chute associées aux différentes fractions de particules. Des valeurs de vitesse de chute données dans la littérature s'étalent sur une fourchette de 0.1 à 0.3 cm/s pour des particules de diamètre inférieur à 100 µm [LAFOND, 1995] et 5 à 11.7 cm/s pour des particules inférieures à 50 µm [CHEBBO, 1992], [CHOCAT, 1997]. A partir de la loi de Stokes, le SETRA donne un tableau indicatif de la vitesse de chute en fonction de la taille de particule considérée :

DIAMETRE (µm)	PARTICULES A DOMINANTE ORGANIQUE $\rho_s = 1,2$	PARTICULES A DOMINANTE MINERALE $\rho_s = 2,5$
2000	8,9	29,2
1500	6,8	23,7
1000	4,4	17
500	1,8	8,4
200	0,4	2,5
100	0,1	0,8
50	0,03	0,2
10	0,002	0,01

Tableau 7 : Valeurs de vitesses de chute indicatives (en cm/s) selon les diamètres, extrait du SETRA, 1997.

On ne développera pas ici les autres relations permettant de calculer la vitesse de chute pour des particules de taille supérieure (Oseen, Zanke, Van Rijn...)

L'effet de la concentration en particules sur la vitesse de chute est sujet à discussion. La multiplication des chocs des particules a tendance à être un frein à leur chute ("entravement de la chute") mais favorise paradoxalement la formation de flocs et augmente donc la vitesse de chute globale de la phase solide (cf. partie suivante) [LAFOND, 1995].

○ Floculation

La floculation est la capacité d'agrégation des particules entre elles selon des phénomènes physiques d'interaction liés à :

- la fréquence de choc des particules les unes avec les autres, phénomène dépendant de l'agitation moléculaire et notamment influencé par la température ;
- la charge des particules, s'attirant ou se repoussant. L'interaction électrique des particules est influencée par l'éventuelle présence de particules colloïdales (matière organique) ayant tendance à accentuer la formation de flocs du fait de leurs charges [MICHELBACH & AL., 1994]. On comprend de ce fait la distinction, pour un même diamètre, entre les vitesses de chute des "particules à dominante minérale" et les "particules à dominante organique" dans le tableau 7 précédent du SETRA.

La floculation a un effet certain sur la vitesse de chute puisque celle-ci est liée au diamètre et à la densité de la particule et que la floculation influence ces paramètres. Sinha & al. (2000) ont ainsi distingué des particules "discrètes" de vitesse de chute constante et des particules "floculantes" de vitesse de chute augmentant avec la profondeur. Les mécanismes de floculation sont assez complexes et il n'y a pas de règle générale concluant sur l'accélération ou le ralentissement de la chute d'un floc par rapport à des particules non agrégées.

On remarque néanmoins que les vitesses de chute expérimentales ont tendance à être plus élevées que les vitesses de chute calculées théoriquement avec la relation de Stokes [SATIN & AL., 1995]. Découlant de cette observation, la durée de traversée efficace se trouve généralement inférieure à la durée de rétention théorique [CHEBBO, 1992].

2.5. Présentation des modèles classiques de décantation

2.5.1. Diversité des modèles existants

Il existe de très nombreuses approches pour concevoir un bassin de décantation. On peut faire entrer en jeu des critères différents et avoir des objectifs distincts selon les modèles.

Dans son Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, Chocat distingue parmi les modèles classiques de dimensionnement de décanteur, plusieurs types de démarche. Celles-ci sont synthétisées dans la figure 11 suivante.

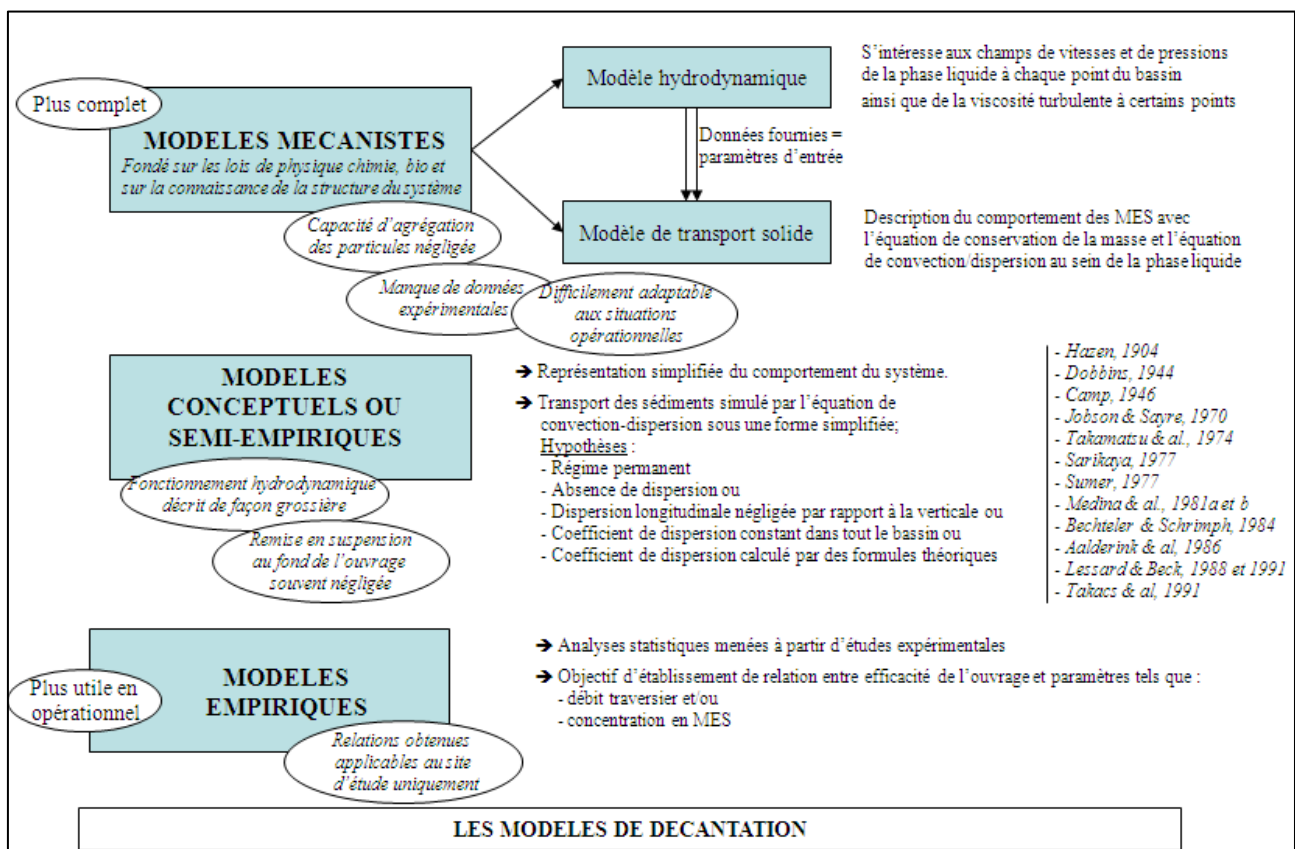


Figure 11 : Schéma présentant les différents types de modèles de décantation existant

Les travaux de Lafond, en 1995, concluent que pour des géométries simples (rectangulaires), les modèles simples sont valables et donnent d'aussi bons résultats (voire meilleurs) que les modèles complexes numériques. Pour des géométries plus complexes (géométries quelconques) les modèles simples ne sont plus valables, il faut alors considérer des modèles numériques complexes qui acceptent une grande diversité de géométrie. Considérant des géométries en général simples en contexte minier, les méthodes numériques peuvent ainsi être

écartées dans un premier temps, les paragraphes suivants se focalisant sur la présentation de méthodes classiques proposées dans la littérature.

Les modèles de Hazen et Camp servent de base de comparaison à des modèles plus complets. Ils ont beaucoup été appliqués du fait de leur simplicité de mise en œuvre [CHEBBO, 1992], [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997]. C'est pourquoi ces modèles sont explicités par la suite.

2.5.2. Modèle de Hazen

Le modèle développé par Hazen en 1904 est le premier décrivant le fonctionnement théorique des bassins de décantation. Il est explicité par plusieurs auteurs tels que [LAFOND, 1995], [SATIN & AL., 1995], [CHOCAT, 1997] ou [SINHA & AL., 2000] et recommandé par certains guides de dimensionnement de bassin de décantation, à l'usage des porteurs de projet et bureaux d'études, tels que le cahier des charges de la DIREN de Lorraine, de 2006 ou le guide du SETRA, 1997. Ce modèle, aisé à mettre en œuvre, ne prend pas en compte la turbulence et néglige donc la dispersion des particules ainsi que l'agrégation des particules entre elles, favorisée ou non par la turbulence. Les conditions de fond (rebond, saltation, arrêt aléatoire, reprise en bouffées turbulentes) ne sont pas non-plus prises en compte alors qu'elles ne sont pas négligeables sur le terrain [LAFOND, 1995].

Considérant une particule soumise à un écoulement uniforme et atteignant immédiatement sa vitesse de chute V_s , en l'absence de turbulence, Hazen donne la relation suivante :

$$\frac{V_s}{h} = \frac{V}{L} \quad (5)$$

Avec :

V : Vitesse moyenne de l'écoulement auquel la particule est soumise (m/s)

V_s : Vitesse de chute de la particule (m/s) (théorique ou mesurée)

h : hauteur de la particule à son entrée dans le bassin (m)

L : Distance parcourue par la particule (m)

Soit pour un bassin de géométrie rectangulaire simple :

$$V_s = \frac{h \cdot V}{L} = \frac{Q}{l \cdot L} = \frac{Q}{S} \quad (6)$$

Avec :

Q : débit permanent entrant dans le bassin (m³/s)

l : Largeur du bassin (m)

S : surface du bassin (m²)

Q/S : charge ou débit surfacique

Pour le dimensionnement :

- Toutes les particules ayant une vitesse de chute $V_s > Q/S$ décanteront : méthode de Hazen "simple" ;
- Certaines des particules telles que $V_s < Q/S$ décanteront également au prorata de leur hauteur d'injection par rapport à la hauteur h : méthode de Hazen « corrigée ».

Dans les cas où les bassins déversent, le SETRA donne la relation de Hazen simple en incluant un débit de sortie Q_s distinct du débit d'entrée Q_e . La relation est alors :

$$V_s > \frac{(Q_e - Q_s) \cdot 100}{S \cdot (\log \frac{Q_e}{Q_s})} \quad (7)$$

Avec :

S : surface du décanteur (m²)

Q_e : Débit d'entrée (m³/s)

Q_s : Débit de sortie (m³/s)

V_s : Vitesse de chute des particules

2.5.3. Modèle de Dobbins et Camp

Les recherches menées par Dobbins (1944) ont été les premières à intégrer les effets de la turbulence. Les hypothèses simplificatrices apportées par Camp sont les suivantes :

- ❖ Ecoulement uniforme et régime permanent
- ❖ Vitesse du fluide V constante dans tout le domaine de calcul
- ❖ Coefficient de dispersion verticale D constant
- ❖ Dispersion longitudinale négligée par rapport à la dispersion verticale

Dobbins propose une solution de l'équation de convection-dispersion sous une forme simplifiée. Camp (1946) reprendra cette solution afin de calculer l'efficacité η d'un ouvrage vis-à-vis de l'élimination des MES. Ces équations sont détaillées en annexe 6. Elles sont d'autre part illustrées par un abaque de dimensionnement (figure 12 ci-dessous) donnant l'efficacité théorique au sens de Camp du décanteur en fonction de la vitesse de chute des particules (V_s), du débit surfacique, de la hauteur d'eau moyenne (h) dans le bassin et du coefficient de dispersion (D) supposé constant.

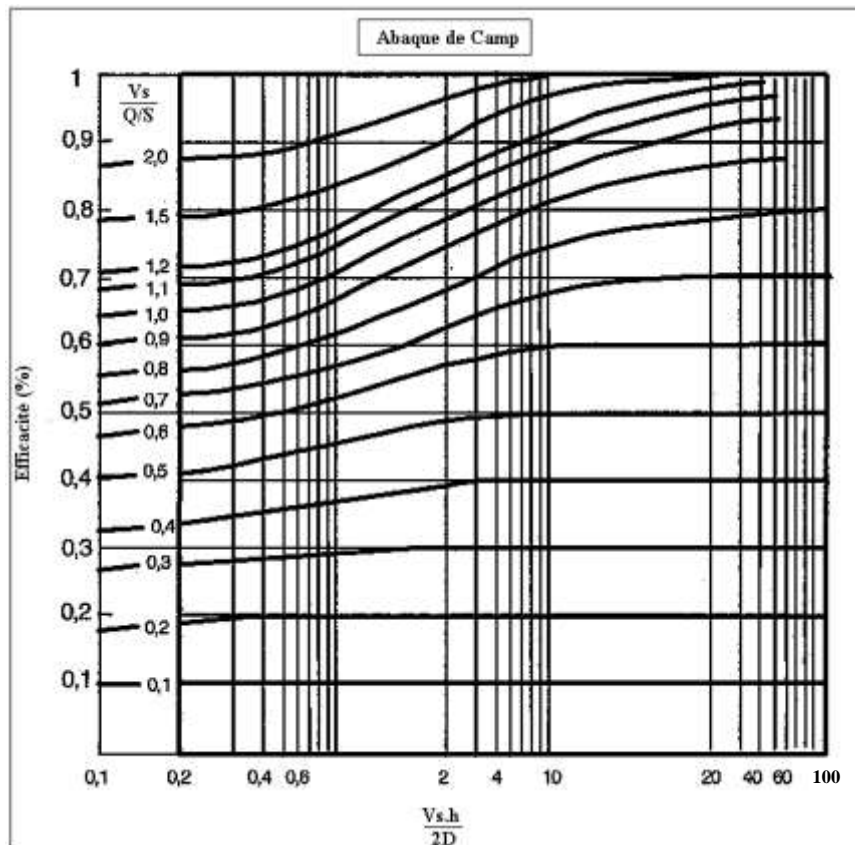


Figure 12 : Abaque de Camp pour le dimensionnement d'ouvrages de décantation, efficacité en fonction du terme $X = \frac{V_s \cdot h}{2 \cdot D}$ pour différentes valeurs du nombre de Hazen $Ha = \frac{V_s}{Q/S}$ [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997].

Ce graphique comporte deux paramètres d'entrée. Le rapport entre la vitesse de chute V_s et le débit surfacique Q/S correspond au calcul d'efficacité selon la méthode de Hazen. Ce rapport adimensionnel est souvent appelé nombre de Hazen, noté Ha . L'autre paramètre d'entrée du graphique est le terme adimensionnel $X = \frac{V_s \cdot h}{2 \cdot D}$, entrant dans l'équation du calcul de

l'efficacité selon Camp. Pour calculer le coefficient de dispersion D, Camp propose la formule suivante :

$$D = 0,075 \cdot h \cdot U_* \quad (8)$$

Avec :

h : hauteur d'eau ;

U_* : vitesse de frottement supposée directement proportionnelle à la vitesse moyenne telle que :

$$U_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot V \quad (9)$$

Avec :

τ_0 : Tension de cisaillement au fond ;

ρ : masse volumique du fluide ;

f : coefficient de friction de Darcy (souvent pris égal à 0.0455).

V : vitesse moyenne du fluide

Pour appliquer la méthode de Camp lorsque les vitesses de chute des particules sont variables, il est nécessaire de connaître leur distribution. La suspension de particules pourra alors être fractionnée et la solution de Camp s'appliquera à chacune des fractions, en supposant que toutes les particules d'une fraction donnée ont la même vitesse de chute [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997].

2.5.4. Méthode du mélange intégral [LAFOND, 1995], [CHOCAT, 1997]

Cette méthode permet d'obtenir la concentration attendue en sortie de bassin en fonction du temps selon des paramètres fixes du bassin (volume V et surface S fixes) et des particules (vitesse de chute V_s constante) et en faisant varier le débit et la concentration en MES en entrée du bassin. Elle se base sur les hypothèses suivantes :

- ❖ Vitesse uniforme en tout point du bassin
- ❖ Mélange parfait ou "intégral", c'est-à-dire constance de la concentration spatialement.

Selon ces hypothèses, l'équation de convection-dispersion peut être intégrée sous la forme :

$$C_s(t) = A(t) \int_0^t \frac{Q(t) \cdot C_e(t)}{A(t) \cdot V} dt + C_s(0) \cdot A(t) \quad (10)$$

Avec A(t) :

$$A(t) = \exp \left[- \int_0^t \left(\frac{Q(t)}{V} + \frac{K}{V} \right) \cdot dt \right] \quad (11)$$

Avec :

$C_s(t)$: Concentration en sortie d'ouvrage en fonction du temps

$C_e(t)$: Concentration en entrée en fonction du temps

V : Volume du bassin, constant

Q(t) : Débit entrant en fonction du temps

K : coefficient constant pouvant être lié à la vitesse de chute des particules :

$$K = S \cdot V_s \quad (12)$$

S : Surface horizontale du bassin, constante

V_s : Vitesse de chute des particules, constante

Application au cas d'étude : On peut déterminer en combien de temps, compte tenu des débits et concentrations en entrée, la concentration en sortie de bassin atteint une valeur raisonnable, ce qui permet de donner une idée du temps de séjour théorique attendu dans l'ouvrage.

Idéalement, les résultats obtenus par cette méthode sont à comparer avec des résultats expérimentaux de mesures de concentration en sortie en fonction du temps par exemple.

2.5.5. Dimensionnement selon le volume

On retrouve la notion de dimensionnement selon un critère volumétrique dans la méthode recommandée par le guide technique de la SLN, par le STU ou encore par la DIREN de Lorraine sous le nom de « méthode des pluies ». Il s'agit du calcul d'un volume à stocker. Ce volume est déterminé à partir de la pluie précipitée, de la surface du bassin versant considéré et du coefficient de ruissellement. La relation est la suivante :

$$V = C. H. S \quad (13)$$

Avec :

V : Volume à stocker (m³)

C : Coefficient de ruissellement (cf. partie 3.2.2)

S : Surface du bassin versant considéré (m²)⁴

H : hauteur de pluie précipitée (m)

La hauteur de pluie précipitée considérée par la SLN correspond à 2 heures de précipitation de période de retour deux ans et varie donc en fonction de chaque site.

Un débit de fuite est pris en compte dans le guide de la SLN et dans le cahier des charges de la DIREN de Lorraine et calculé selon les caractéristiques du dispositif de sortie des eaux, lorsque les ouvrages déversent (cf. 2.6.3). Ce débit de fuite, rapporté à la surface du bassin versant, donne la lame d'eau de fuite qui peut être directement soustraite à la hauteur d'eau précipitée de la relation précédente.

2.6. Les paramètres variables, propres aux ouvrages de décantation, entrant en jeu dans leur conception

2.6.1. Volume de l'ouvrage

Les résultats de Chebbo (1992), sur une étude de bassins réels, rejoignent ceux de l'article de Saget & al. (1994), donnant les valeurs de 50 à 100 m³ de volume de rétention à prévoir par hectare imperméabilisé. Les valeurs d'efficacité associées sont de 57 à 92% (l'efficacité d'interception étant ici définie comme le rapport de la masse interceptée par la masse totale de MES produite au cours de l'évènement).

2.6.2. Géométrie

Les bassins de décantation doivent permettre le transit de volumes importants sur des durées courtes [LAFOND, 1995]. La géométrie est donc un facteur fondamental à prendre en compte afin de favoriser la décantation en tenant compte de ces contraintes. La forme des bassins doit d'autre part compenser les tensions du sol lorsqu'ils sont vides.

D'un point de vue financier et pratique, on a tendance à privilégier la mise en place d'un seul décanteur de dimensions importantes en aval plutôt que plusieurs petits bassins successifs le long du talweg [WALCH & AL., 1986] cependant CHAÏB (1997) recommande au contraire de développer le principe de décantation par passage de l'eau dans plusieurs bassins et d'agir le plus possible à la source. Il semblerait enfin que d'un point de vue hydraulique, plusieurs petits bassins soient plus "transparents" en cas de forte crue qu'un grand ouvrage

⁴ Le produit de la surface (S) par le coefficient de ruissellement (C) correspond au pourcentage de surface imperméable, c'est-à-dire à la surface active du projet.

[MATHYS, 1993]. Aussi cette question reste-t-elle un point de débat entre les différents auteurs de la littérature.

Des géométries de bassins rectangulaires, particulièrement plus longs que larges et peu profonds, sont globalement préférables par rapport à des géométries circulaires afin de favoriser la décantation [COX, 1967], [CHOCAT, 1997]. Il faut toutefois prendre en compte l'encombrement de ces géométries rectangulaires [LAFOND, 1995]. La détermination de dimensions adaptées pour un bassin permet notamment d'optimiser son encombrement [FREY, 1991], facteur déterminant dans les possibilités d'action des mineurs.

Le rapport longueur/largeur est un principe à débattre car la longueur est un paramètre que l'on cherche à prendre assez important afin d'optimiser le temps de séjour ainsi que la distance entre l'entrée et la sortie permettant aux particules de décanter [FREY, 1991], [SETRA, 1997]. D'autre part, un autre principe de dimensionnement est de ralentir l'écoulement à l'entrée du bassin en étalant notamment la lame d'eau entrante au maximum. La réduction du débit entrant à un débit de projet adapté aux caractéristiques des particules afin de permettre leur décantation paraît fondamentale. La détermination de ce débit de projet est conditionnée par la largeur du bassin choisie, sachant que plus elle est importante, plus elle permet le ralentissement de l'écoulement et la baisse de probabilité de sortie des particules [FREY, 1991]. La DIREN de Lorraine donne une valeur indicative minimale de rapport longueur / largeur de 6 pour favoriser la décantation.

Les travaux de Frey concernant l'influence de la profondeur amènent aux conclusions selon lesquelles une augmentation de profondeur est inutile. L'hypothèse explicative apportée est la suivante. Une profondeur plus importante entraînerait une diminution plus forte des vitesses d'où a priori un pourcentage de sortie moindre cependant si le radier est plus éloigné de la surface libre, les particules mettront plus de temps à se déposer et auront donc une probabilité plus élevée d'être reprises par le cœur de l'écoulement et aspirées par le déversoir de sortie.

Ces deux effets se compenseraient de sorte que la profondeur dans une certaine limite n'interviendrait pas. Les travaux de Sinha et Dutta (2000) appuient cette indépendance de la décantation par rapport à la profondeur.

2.6.3. Influence des équipements annexes

- **Dispositif d'entrée**

Les structures d'entrée d'eau dans un bassin doivent favoriser la répartition de l'eau dans tout le bassin de façon uniforme afin de réduire au maximum la vitesse de l'écoulement et doivent limiter la turbulence. La mise en place de merlons ou de murets brise énergie en début d'ouvrage peut permettre la réduction de la vitesse de l'écoulement dans l'ouvrage et favoriser de cette façon la décantation. Cependant ils peuvent également être source de turbulence et de reprise de sédiments (remous créés) [SETRA, 1997].

Une position plus basse du dispositif d'entrée dans le bassin entraîne des pourcentages de sortie plus faibles. La particule étant injectée plus bas, sa distance avec le fond du décanteur est plus faible et elle aura donc une plus grande chance de sédimenter [FREY, 1991].

- **Dispositif de sortie**

Afin d'éviter la reprise de MES à proximité de la sortie du bassin, il convient de maîtriser la vitesse horizontale sur les cinq derniers mètres pour éviter leur entraînement lors de la vidange [SETRA, 1997].

L'équipement des bassins avec des déversoirs est recommandé, [CHOCAT, 1997]. S'il y a un dispositif de vidange, système également recommandé afin de pouvoir contrôler le remplissage d'un bassin en prévision d'une crue, une fosse de décantation peut être mise en place avant la sortie du bassin de sorte à éviter l'aspiration ou la remise en mouvement de sédiments lors de la vidange [SETRA]. De la même façon que pour la lame d'eau d'entrée dans l'ouvrage, on cherche à étaler la lame d'eau de sortie au maximum afin de limiter l'entraînement de particules lors de la vidange ou du déversement du bassin [SETRA].

- **Acheminement de l'eau jusqu'au bassin**

Les bassins, pour justifier de leur mise en place, doivent pouvoir traiter le maximum d'eaux chargées ruisselées [CHOCAT, 1997]. Pour cela les structures d'orientation et d'acheminement des flux d'eau vers les ouvrages doivent s'intégrer dans une stratégie globale de gestion des eaux sur mine comprenant des ouvrages de rupture d'énergie en bas de pente et des démarches de canalisation de l'eau afin que l'ensemble des écoulements soient traités avant rejet au milieu naturel.

- **Améliorations constructives**

La suppression des potentielles zones de recirculation ou de zones mortes diminuant les performances de l'ouvrage [JACOPIN, 1999] peut être permise par l'installation de dispositifs tels que des murets, des déflecteurs ou des brises jet. La mise en place de déflecteur peut en effet permettre d'allonger le parcours de l'eau et/ou réduire les turbulences [HEINKE & al., 1978], [JACOPIN, 1999].

Par ailleurs dans les bassins de retenue secs, la végétation contribue au piégeage des sédiments et réduit de ce fait les remises en suspension, [BAADE & al., 1993].

- **Propositions concernant le mode de gestion du bassin**

L'interception des flux les plus pollués par le contrôle de la vidange du bassin, recommandé par Jacopin, 1999, s'oppose aux conclusions de Chebbo en 1992, selon lesquelles l'interception de certaines parties de la crue considérées comme les plus polluées ne conduiraient pas à des résultats flagrants, la masse de pollution étant répartie et diffuse sur l'ensemble de la crue. Le contrôle de la vidange au regard de la concentration en MES après la crue et donc après décantation de l'ensemble d'un événement (cf. partie 1.3.2.) permet néanmoins de libérer le volume du bassin en prévision d'une crue suivante et justifie la politique de dimensionnement et l'utilité de l'ouvrage.

2.7. Conclusion sur les données d'entrée des modèles

L'ensemble des données de calage nécessaire afin de tester les différents modèles peut être réparti en trois catégories :

<u>Hydrologie</u>	<u>Caractéristiques des bassins</u>	<u>Sédimentologie</u>
❖ Hauteurs d'eau (H) précipitées sur le bassin versant	❖ Volume des bassins (V)	❖ Concentrations en entrée de bassin (Ce)
❖ Débits d'entrée (Q)	❖ Surface (S)	❖ Vitesse de chute des particules (Vs) ou diamètre des particules (D)
❖ Coefficients de ruissellement (C)	❖ Hauteur (h)	
	❖ Taille des bassins versant drainés par les décanteurs (A)	

La nécessité de connaître ces paramètres donne lieu à un travail d'état des lieux et de caractérisation de ces données, ce qui est l'objet de la partie suivante.

3. Données disponibles et générées au cours du stage

3.1. Introduction et limites des données exploitées

Cette partie présente un état des lieux des données disponibles dans les domaines de l'hydrologie des bassins versants miniers, des ouvrages en place et de la sédimentologie sur les différents sites d'étude. On considère les données susceptibles d'être utilisées comme paramètres d'entrée dans les modèles précédemment explicités. Cet état des lieux est constitué à partir des données fournies par les mineurs et autres organismes et projets impliqués dans la gestion de l'eau des mines, collectées pour l'étude. Les données ont été récupérées sous forme de rapports, de mesures ou de retours d'expériences sur site par la rencontre avec les interlocuteurs et la visite des ouvrages. Aussi sont-elles soumises à certaines contraintes de disponibilité ou de rigueur de suivi. Elles sont d'autre part sujettes à changement selon l'activité minière et le remaniement du terrain lié à cette activité.

○ *Imprécision liée aux évènements hydrologiques échantillonnés*

Tous les évènements ne sont pas échantillonnés. Cela peut-être dû au fonctionnement des appareils de mesures, au moment d'arrivée sur site pour récupérer les prélèvements ou bien au choix d'analyse. Les précipitations sont d'autre part référencées en évènement pluvieux à partir de certains critères dont la quantité de pluie tombée (20 mm minimum), à Poro. Les évènements non-analysés mais provoquant tout de même des écoulements et du transport solide, additionnés sur l'année, peuvent être une source d'erreur par rapport au bilan sédimentaire annuel (quantité de matériel ayant circulé avec les écoulements sur les bassins versants). Plus généralement, les données récupérées sont déjà traitées, aussi dépendent-elles de la méthode de traitement employée par l'opérateur.

○ *Imprécision liée à la disponibilité des données*

Les données fournies dans les domaines évoqués sont dépendantes des interlocuteurs les fournissant et des délais d'obtention. Les informations sont encore en attente de réception en ce qui concerne Goro. Le SIG du PGE (Plan de Gestion des Eaux) de Poum est actuellement en construction par un des agents de la SLN et n'est donc pas encore disponible. On a davantage d'informations sur certains ouvrages par rapport à d'autres selon l'intérêt de ces ouvrages (présence d'une station de relevés de mesures hydrologiques, ouvrage créé récemment, présence d'une échelle d'indication de niveau de sédiments). Enfin la rotation du personnel au sein des mines peut également être une source de perte de données.

○ *Imprécision liée au nombre de mesures et à la durée de la période de suivi*

Les informations donnant lieu à des études de récurrence ou des statistiques d'occurrence sont limitées par le nombre de mesures réalisées (pour la sédimentologie par exemple) ou par le nombre d'année de suivi. La mise en place de suivi et l'équipement des sites sont très récents pour certaines mines (installation de matériel datant de cette année pour Poum) et les données sont peu nombreuses ou non exploitées. Si elles ne semblent pas représentatives à l'échelle des temps hydrologiques, ces données sont cependant les seules qui peuvent permettre une première approche des phénomènes en jeu dans les écoulements sur site et donner un ordre d'idée des différents paramètres entrant dans la conception de retenues de décantation.

3.2. Données hydrologiques

3.2.1. Pluviométrie

○ *Suivi de la pluviométrie*

Des différences de pluviométrie existent entre les différents sites (cf. partie 1.3.1). La pluviométrie mensuelle, journalière ou par épisode, a été suivie et est disponible sur trois années pour Poro et une année pour Poum. Les graphiques associés à ces études se trouvent

en annexe 7. Les autres sites miniers ne présentent pas de suivi continu de la pluviométrie (ou bien celui-ci n'est pas disponible) permettant de délimiter des événements pluvieux ou d'estimer les périodes de temps sec (Ts). Plus de détails sur les techniques de relevés et le suivi sont disponibles dans les rapports suivants, [MICA ENVIRONNEMENT, 2011] pour Poum, [GUYONNEAU, 2012] et [NAVARROT, 2012] pour Poro. Les données de pluies et débits sont en attente pour le site de Goro. Il existe, outre ces mesures spécifiques aux sites miniers, une synthèse pluviométrique réalisée sur l'ensemble de la Nouvelle-Calédonie par N. Romieux, de la DAVAR (2011). Elle comporte des résultats de moyennes pluviométriques interannuelles réalisées à partir d'études statistiques sur la période 1990 – 2009 et d'extrapolations. Les valeurs extraites pour les quatre mines étudiées figurent dans le tableau 2 de la partie 1.3.1.

Une étude statistique sur les pluies de la mine de Poro est réalisée dans le rapport de L. Navarrot (2012). L'une des conclusions est la suivante ;

- On note 199 épisodes (soit 75%) ayant une pluie⁵ inférieure à 20 mm (mais > 5 mm).
- 57 épisodes (soit 21%) ayant une pluie comprise dans l'intervalle [20 ; 85 mm[
- 10 épisodes (4%) ayant une pluie supérieure à 85 mm.

Trois seuils (5, 20 et 85 mm) ont ainsi été retenus pour classer les événements selon leur importance. La suite de l'étude s'intéresse principalement aux événements importants (générant une lame d'eau de plus de 20 mm en moyenne sur l'amont et l'aval), c'est-à-dire à 67 épisodes sur les 266 recensés.

o *Cumuls annuels et observations*

Les lames d'eau cumulées à l'année ont pu être calculées à Poum (MICA ENVIRONNEMENT, 2011) et à Poro (sachant que seuls les événements générant plus de 20 mm de pluie ont été retenus, ce choix influençant le résultat à l'année) (cf. tableau 8).

Année	Cumul plateau (mm)	Cumul village (en mm)	Année	Cumul pluviomètre amont (mm)	Cumul pluviomètre aval (mm)
2009	2180	2013	2009	1629	1684
2010	1183	1156	2010	755	772
			2011	967	980

Tableau 8 : Cumuls annuels des lames d'eau à Poum (à gauche) et à Poro (à droite).

L'année 2010 est exceptionnelle pour Poro par le peu d'événements recensés. On note que la différence entre les relevés réalisés par le pluviomètre amont et le pluviomètre aval pour Poro est faible (moins de 4%). Leur espacement de moins de 2 km (localisation des pluviomètres sur l'annexe 8) permet d'avancer l'idée d'homogénéité spatiale des pluies pour de si petits bassins versants et justifie l'utilisation d'une pluie moyenne⁵ [NAVARROT, 2012]. Pour Poum les cumuls annuels donnés pour le pluviomètre du village de Poum, se trouvant à 22 m d'altitude et le pluviomètre du plateau localisé à 412 m NGNC présentent une différence un peu plus importante (2 à 8%) liée à l'altitude [MICA ENVIRONNEMENT, 2011].

Une plus forte occurrence de précipitations existe lors d'une période définie comme «saison des pluies » de janvier à mai, par rapport à la saison « sèche », le reste de l'année. Le graphique suivant (figure 13) présente ces différences pour la mine de Poro sachant que l'ensemble des pluies est pris en compte. On peut en outre avoir une idée de la différence de volume engendrée par la prise en compte de tous les événements pluvieux (figure 13) ou bien de ceux supérieurs à 20 mm (tableau 8). Les cumuls annuels en prenant en compte tous les

⁵ On considère ici une pluie moyenne par épisode, i.e. une moyenne entre les pluviomètres amont et aval. Les pluies locales à l'amont ou à l'aval peuvent donc être inférieures ou bien dépasser les seuils considérés.

événements supérieurs à 5 mm (266 épisodes) sont 1,4 à 2,2 fois plus importants par rapport aux cumuls annuels des événements au seuil 20 mm (67 épisodes).

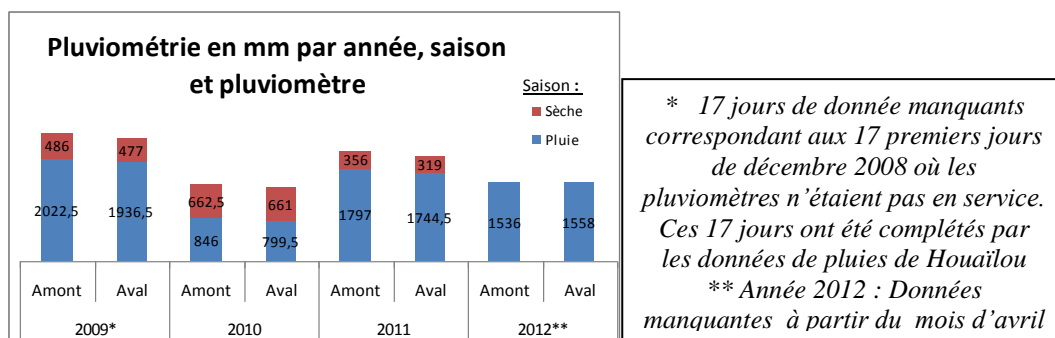


Figure 13 : Pluviométrie annuelle et saisonnière par pluviomètre, sur tous les épisodes recensés de 2009 à 2012

o Etude de l'occurrence des pluies

La période de temps sec (T_s) a pu être suivie pour chacun des 67 épisodes recensés sur Poro de 2009 à 2011. Cette durée est de 67h en moyenne sur l'ensemble des épisodes, soit presque trois jours. Cette valeur n'est cependant pas représentative, les durées de temps sec étant hétérogènes. Pour 37 épisodes (i.e. près de 55% des épisodes), la période de temps sec depuis la dernière pluie ruisselante est inférieure à 24h et est de 7 heures en moyenne pour ces épisodes. 8 épisodes (12%) ont une période de temps sec comprise entre 24 et 48 h et 22 épisodes (33%) ont une période de temps sec supérieure, allant jusqu'à 553 heures⁶, équivalant à 23 jours sans pluie ruisselante. Il semble difficile de déterminer une durée minimum de rétention dans les bassins de décantation compte-tenu de l'occurrence des pluies.

A Poum, cette période de temps sec peut être estimée en jours uniquement. Il n'y a pas de découpage clair d'événements pluvieux et on dispose de la pluviométrie journalière suivie sur un an pour tous les événements supérieurs à 0.2 mm. On distingue ainsi 32 épisodes (soit 45% des épisodes) pour lesquels la période de temps sec est de 1 jour, 18 épisodes (25% des pluies) pour lesquels elle est de 2 jours et 22 épisodes (30% des pluies) pour lesquels elle est égale ou supérieure à 3 jours, allant jusqu'à 18 jours de temps sec en juillet 2011.

Ces données de temps sec sont mises en relation avec les calculs de vitesses de chutes des particules dans la partie 4.

3.2.2. Débits

De la même façon que pour les pluies, on dispose de relevés de débits pour les seuils amont et aval sur trois années d'études à Poro et sur un an à Poum (annexe 9), au niveau de seuils situés sur deux creeks différents (Povio et Titch). Les données sont en attente pour Goro et non exploitables à Koniambo.

o Réponse pluie-débit et temps de concentration

A Koniambo, les premières analyses hydrologiques datent en effet de cette année. Une des premières conclusions présentées dans l'étude de A. GUYONNEAU (2012), concernant l'année de mesure 2012 de Koniambo, est la réponse pluie/débit traduisant la petite taille des bassins versants. La forme des hydrogrammes apparaît directement corrélée au profil de pluie (cf. figure 14 ci-dessous) et est donc très variable et régionalisé, comme les pluies. C'est d'autre part une raison pour laquelle il semble difficile de donner un profil d'hydrogramme-type. Il n'y a pas encore de découpage par épisode comme à Poro et le peu d'événements est une autre raison limitant la caractérisation d'un hydrogramme de crue pour le site.

⁶ Episode du 8 décembre 2010



Figure 14 : Relation pluie-débit sur Koniambo, exemple de la pluie du 24.12.2011, extrait de [GUYONNEAU, 2012]

On remarque en général plusieurs pics de débit au cours d'une crue. La réaction directe des petits bassins versants miniers aux précipitations est d'autre part traduite par des temps de concentration très courts (temps séparant le centre de gravité du hyétogramme et le pic de débit). Ils sont en moyenne compris entre 16 mn (seuil amont) et 25 mn (aval) à Poro [NAVARROT, 2012].

La difficulté de caractérisation des hydrogrammes justifie par ailleurs l'utilisation des eaux précipitées plutôt que des eaux ruisselées, dans le dimensionnement des décanteurs. Il manque encore un certain nombre d'années de suivi pour pouvoir réellement tirer des conclusions sur l'hydrologie des petits bassins versants miniers⁷.

Une étude de la DAVAR ([ALRIC, 2009]) présente des données de débits à partir de 20 stations réparties sur l'île et sur 10 ans d'étude. Elles peuvent être consultées à titre indicatif (cf. annexe 10) pour les sites où les données sont insuffisantes ou inexploitable (données brutes non traitées ou lacunaires), notamment pour Goro et Koniambo, afin de donner une idée des débits transitant sur ces sites. Ces données ne sont cependant pas suffisantes pour renseigner les modèles de notre étude et ne seront par conséquent pas exploitées. Une des conclusions de cette étude rejoint néanmoins les observations précédentes : la forte variabilité de la pluie explique en grande partie la variabilité des débits.

○ Ruissellement sur site minier



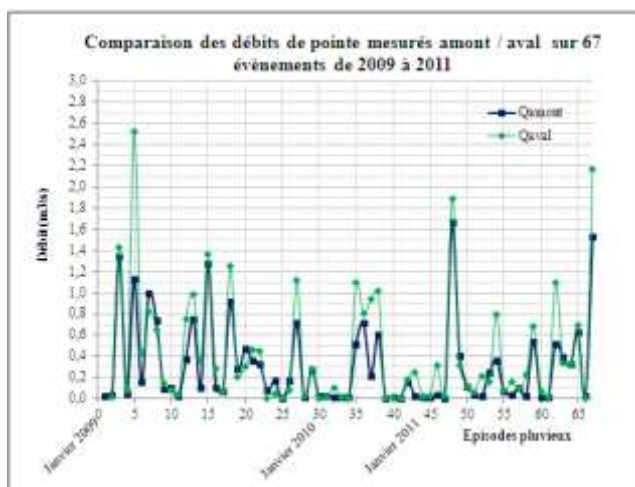
Le ruissellement est influencé par la présence des ouvrages. Une carte des drains, à Poro (cf. figure 15), rend compte de cette influence. Certains bassins, antérieurs aux ouvrages pour lesquels on dispose d'informations, n'ont pas de levé topo ni de suivi et devront néanmoins être pris en compte dans le trajet de l'eau car ils sont toujours curés et retiennent de l'eau. Cela illustre la difficulté de détermination des trajectoires des eaux de ruissellement. On peut distinguer sur la figure 15 l'existence d'écoulements annexes ne passant pas par le seuil amont dans FRN01, ce qui va influencer les résultats de comparaison de flux de MES annuellement charriés par les seuils avec les curages annuels (cf. partie 3.4.1).

Figure 15 : Ecoulements superficiels préférentiels et tailles des sous-bassins Amont et Aval du bassin-versant minier Denise, mine de Poro, source : A. GUYONNEAU (2012).

⁷ Le projet CNRT a, pour cette raison, logiquement été lancé avant toute autre étude portant sur un dimensionnement de décanteurs différent de la méthode des 2h/2ans, afin de disposer d'un suivi de mesures plus complet et sur un certain nombre d'années.

○ *Etude de l'abattement amont/aval des débits de pointe mesurés*

Il est possible de comparer les débits de pointe amont et aval à Poro (figure 15), afin de quantifier l'abattement potentiel lié aux bassins de décantation (cf. figure 16 et tableau 9).



		PORO	
		Amont	Aval
Q_{max} (m ³ /s)	2009	1,34	2,52
	2010	0,72	1,09
	2011	3,65	9,24

Tableau 9 : Comparaison des débits maximum instantanés amont / aval par an

Figure 16 : Comparaison des débits de pointe mesurés à l'amont et à l'aval pour 67 événements. considérés les plus importants.

Bien que les deux courbes de débit aient une allure similaire, il semble difficile de tirer des conclusions concernant l'abattement en termes de débit de pointe. Les débits à l'aval sont en effet plus élevés que les débits à l'amont, de façon générale, du fait de la différence de taille des bassins versants (cf. partie 3.3.1 et figure 15 ci-avant) ainsi que de l'accumulation d'écoulements annexes mesurés à l'aval mais ne passant pas par le seuil amont. L'effet des bassins de décantation au niveau de l'écrêtage des débits n'apparaît donc pas clairement et il conviendrait de réaliser des mesures directement à la sortie des décanteurs. Le calcul de débit spécifique (rapporté à la taille du bassin considéré) permet de rendre de compte de débits indépendants par rapport à la surface des bassins versants. Les débits spécifiques sont alors plus importants (de l'ordre de 45 %) à l'amont qu'à l'aval.

On ne peut pas comparer de données amont / aval sur Poum (figuré annexe 2) étant donné que les débits sont mesurés sur deux bassins versants différents. Leur comparaison permet néanmoins de renseigner sur l'influence de l'activité minière et de la taille des bassins versants. Le débit maximum instantané sur Titch (0.778 km²), bassin le moins impacté par l'activité minière, est de 7 m³/s tandis qu'il est de 10,85 m³/s pour Povio (0.995 km²), plus impacté. Il est donc majoré de 1/3. Les modules journaliers sont cependant plus proches, avec une valeur de 29.2 l/s pour Povio et 25,7 l/s pour Titch ([MICA ENVIRONNEMENT, 2011]).

○ *Lames d'eau ruisselées*

Le tableau de l'annexe 11 récapitule les quantités écoulées par année pour Poro et Poum, en tenant compte des tailles de bassin versant (extraites de [GUYONNEAU, 2012]). Ces données peuvent être comparées aux données de pluie du tableau 8 et de la figure 13 afin d'estimer l'infiltration et/ou l'évaporation. On retiendra cependant, pour l'étude, les lames d'eau écoulées par épisode, à Poro (données qui ne peuvent être produites pour Poum étant donné qu'il n'y a pas de découpage des pluies en épisode). La différence entre la hauteur d'eau écoulée au seuil amont et au seuil aval a été calculée pour les 67 épisodes considérés. La lame d'eau écoulée à l'amont est supérieure de 32% en moyenne par rapport à l'aval. Cet apparent abattement rejoint les résultats de la comparaison des débits spécifiques explicités ci-avant.

La quantité d'eau ruisselée peut être comparée à la quantité d'eau précipitée en introduisant la notion de coefficient d'écoulement.

○ *Coefficients d'écoulement rapide*

Le coefficient d'écoulement rapide de crue est défini comme le rapport du volume ruisselé à l'exutoire par rapport au volume total précipité sur le bassin versant.

Un des objectifs du site de Poro est de redéfinir ce coefficient. Les récentes analyses du projet Hydromine 2012 ont abouti à un coefficient moyen de 0,55-0,60 à Poro. Aussi les capacités des décanteurs ont été recalculées compte tenu de ces nouveaux coefficients (tableau 10), par comparaison avec le choix d'un coefficient égal à 1 sur mine.

	Volume théorique en m ³		
	C = 1	C = 0,6	C = 0,3
FRN01	10 787	6 472	3 236
FRN18	765	459	230

Tableau 10 : Capacités théoriques des décanteurs FRN01 et FRN 18 de Poro, calculées à partir de différents coefficients d'écoulement [NAVARROT, 2012].

Partant du même principe que pour les pluies (partie 3.2.1), le calcul d'une lame d'eau moyenne ne semble pas pertinent étant donné l'hétérogénéité des quantités d'eau écoulées, on retient donc des seuils de hauteurs d'eau ruisselées. Le coefficient d'écoulement pris en compte sur mine étant de 1, les seuils évoqués sont les mêmes que les seuils de précipitations. On dénombre ainsi :
 - 55 épisodes (82%) présentant un ruissellement inférieur à 20 mm,
 - 10 épisodes (15%) ayant une lame d'eau ruisselée entre 20 et 85 mm
 - 2 épisodes (3% des épisodes) de ruissellement supérieur à 85 mm.

Le volume d'eau ruisselé par épisode est comparé à la capacité des ouvrages, dans la partie 4.

Les coefficients d'écoulement à Pouvou sont de 0.46 (Povio) et 0.52 (Titch).

3.2.3. Méthodes actuelles d'estimation des débits sur mine

Sur mine, le débit décennal est en général utilisé. La méthode d'estimation des débits actuellement employée sur site est la méthode rationnelle, faisant intervenir le coefficient de ruissellement (C), l'intensité horaire de la pluie (I) relative à la crue décennale, et la surface du bassin versant (A) selon la relation suivante ;

$$Q_{10} = C \cdot I_{10} \cdot A \quad (14)$$

L'intensité est définie selon les courbes IDF (Intensité – Durée – Fréquence) de chaque site, en fonction du temps de concentration (Tc) [ENNOUR & al., 2005]. La méthode de calcul de ces Tc, employée par la SLN, se trouve en annexe 12.

3.3. Données concernant les ouvrages existants

3.3.1. Données sur les bassins versants miniers

Les caractéristiques des bassins versants qui intéressent cette étude sont résumées dans le tableau 12, dont les données sont extraites du rapport d'A. Guyonneau (2012). Le tableau complet, extrait du rapport, se trouve en annexe 13.

Mine	Poro		Pouvou		Koniambo		Goro	
	Dns Amont	Dns Aval*	Povio	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN1
Nom du Bassin								
Surface (km ²)	0,090	0,304	0,995	0,778	0,482	0,366	2,720	2,110
Longueur rectangle équivalent (m)	612	3072	1998	1839	1444	1083	6650	4178
largeur rectangle équivalent (m)	147	99	498	423	334	338	409	505
Coefficient de Gravelius	1,42	3,22	1,4	1,43	1,43	1,32	2,4	1,81
% de surface végétalisée	0	20,2	50,7	70,9	0	80,3		
% de surface de piste	14,4	14,3	3	3,2				
% de Remblai	1	7						

*L'étude menée à Poro considère deux bassins versants emboîtés, aussi le bassin Aval comprend-il le bassin Amont.
 Tableau 11 : Caractéristiques des bassins versants de chaque mine (données extraites de [GUYONNEAU, 2012]).

Les différences observées entre le débit spécifique amont et aval du site de Poro ainsi qu'entre les lames d'eau ruisselées (partie 3.2.2) peuvent ainsi avoir pour explication l'occupation du sol. Le bassin aval présente en effet une surface végétalisée plus importante que le bassin

amont et permet donc un ralentissement et une infiltration plus importants. En pratique, on relate des épisodes ruisselant au seuil amont mais ne provoquant pas de ruissellement au seuil aval. D'autre part, la taille plus grande du bassin aval peut venir en explication aux débits et lames d'eau ruisselées moins importants à l'amont par effet de déconcentration et d'étalement. Enfin le coefficient de Gravelius indique un allongement plus important du bassin aval, ce qui peut influencer l'écoulement. L'effet des décanteurs sur l'abattement des débits et quantités d'eau ruisselées est présumé mais on ne sait pas dans quelle mesure.

Les informations qui suivent concernent les décanteurs (nombre, localisation, dimensions, géométries, superficie drainée, particularités) et sont issues de données récupérées exclusivement. Il n'y a pas formellement de fiches complètes pour chaque ouvrage.

3.3.2. Données sur les différentes mines

○ Poro

Les tables du PGE (Plan de Gestion des Eaux) 2009, en ce qui concerne les ouvrages de décantation du bassin versant "Denise" (englobant les sous-bassins amont et aval) du projet CNRT, sont disponibles en annexe 14. FRN01 et FRN18 sont les ouvrages pour lesquels on a le plus de données étant donné qu'ils se situent entre les deux seuils de mesure (cf. carte du PGE en annexe 14). Les données du PGE pour ces décanteurs ont notamment été réactualisées lors de l'étude Hydromine de 2011 et par A. Guyonneau en 2012 (tableau 12) :

Décanteur	Surface du décanteur (km ²)	Superficie développée, drainée par le décanteur (km ²)	Pourcentage de surface du décanteur par rapport à la superficie drainée (%)	Volume réel (m ³)	Volume théorique* (m ³)	Longueur L (m)	Profondeur (m)
FRN01	0,000949	0,141	0,7	2847	10 787	62,6	3
FRN18	0,000175	0,151	0,12	340	12 567	17	2,5

*Volume théorique calculé avec la méthode de la SLN (2.5.5, équation 13).

Tableau 12 : Données concernant les bassins FRN01 et FRN18 actualisées par L. Carpentier (2011) et A. Guyonneau (2012).

Il n'y a pas une seule mais plusieurs arrivées d'eau au niveau de FRN01. C'est également le cas pour d'autres décanteurs. La présence d'échelles donnant le niveau de sédiments dans FRN 18 et FRN01 est limitée par l'impossibilité la lecture du niveau de sédiments lorsque le bassin est rempli d'eau (cf. figure 17 ci-dessous), ce qui est ce cas la plupart du temps en saison de pluie (période majeure de remplissage des bassins par les sédiments).



Figure 17 : Localisation des entrées et exutoires de FRN01 (photo de gauche) (source : [CARPENTIER, 2011]) et de l'échelle de lecture de sédiments, noyée, de FRN18 (photo de droite).

○ Poum

La carte de localisation des ouvrages de Poum ainsi qu'une table d'information sur les ouvrages extraite du PGE, se trouvent en annexe 15. Il n'y a pas plus d'information à ce stade. L'ouvrage se trouvant le plus en amont sur la mine est B20. Il récupère surtout le produit de l'érosion naturelle (site amont non exploité) et ne se remplit donc pas forcément vite. Des échantillons ont été prélevés dans B18, second ouvrage en amont (cf. partie 3.4.2). Ce décanteur est filtrant par défaut de l'ouvrage et a donc tendance à retenir beaucoup de sédiments. Il est prévu que ce bassin soit supprimé étant donné sa position sur un versant et le risque d'écroulement (sous la quantité de sédiments) qu'il présente. Les décanteurs sont effectivement creusés sur les versants pour la plupart des cas et l'aspect hydrogéologie est un élément considéré comme majeur par la SLN. La considération de la géologie est en effet

essentielle pour positionner un ouvrage tout en prévoyant et limitant les risques de renardage (dégradation de l'ouvrage par présence de trou allant à l'encontre du principe de l'ouvrage de retenir l'eau) ou d'effondrement de l'ouvrage.

- *Goro*

Les ouvrages (dont le tableau descriptif se trouve en annexe 5) sont localisés sur un extrait de carte du PGE 2011 de Goro (annexe 16) en l'absence de plans plus précis et plus détaillés.

- *Koniambo*

La localisation des ouvrages de Koniambo se situe annexe 3. Globalement, il est estimé qu'au maximum 30 à 40 % du volume d'eau transitant sur la mine sera retenu par les ouvrages.

- *Utilité et insuffisance des bassins en termes de volumes d'eau retenus*

Le volume total d'eau devant théoriquement être retenu par les ouvrages sur le bassin versant aval (comprenant le bassin amont) de Poro est estimé à 30 215 m³, selon le PGE 2009 (annexe 14). Cette capacité théorique du système formé par l'ensemble des décanteurs serait ainsi suffisante pour retenir une 2h/2ans, correspondant à une lame d'eau écoulée de 76.5 mm et donc, pour la superficie totale du bassin versant (0.304 km²), à un volume de 23 256 m³. Cette capacité permettrait même de retenir le volume engendré par une lame d'eau de 85 mm (25 840 m³) pour reprendre les seuils précédemment évoqués. En réalité, la capacité totale de stockage, donnée par addition de l'ensemble des volumes réels des ouvrages, est de 6920 m³ (soit 23% de la capacité théorique prévue), ce qui permet à peine le stockage du volume d'eau engendré par une lame d'eau de ruissellement de 20 mm (6080 m³). Aussi la plupart des pluies sur Poro engendrent des déversements des ouvrages, limitant l'efficacité de décantation. On s'intéresse dans la suite (partie 4) plus précisément à la capacité de FRN01 à retenir les eaux dont le débit est mesuré en entrée (au seuil amont), selon les épisodes.

Il est possible, à Poum, d'estimer les volumes de rétention à partir des surfaces de bassin (sonnées par le SIG, dont un extrait figure annexe 15) et sur base de 3 m de profondeur des décanteurs (maximum recommandé par la SLN dans le guide pratique 2005). Le volume de rétention total des ouvrages est ainsi de 62 352 m³ cependant ce résultat reste approximatif. A Goro ou Koniambo, l'absence de données hydrologiques traitées ne permet pas de rendre compte de la réalité de rétention des ruissellements par les ouvrages, pour la comparer aux informations données par les mineurs (à Koniambo notamment).

3.4. Données concernant la sédimentologie

3.4.1. Concentrations en MES

- *Suivi annuel des MES*

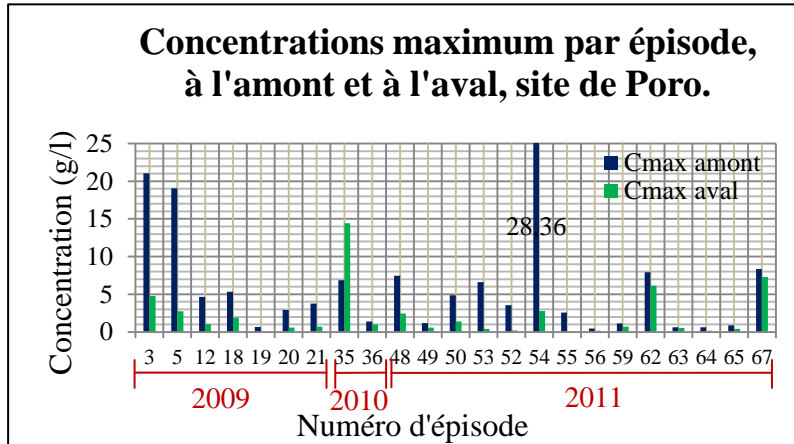
Des études de mesures MES sont réalisées par les équipes environnement des différentes mines (ou dans le cadre du projet Hydromine à Poro) afin d'obtenir des indications sur ce qui est transporté selon les différents événements pluvieux au cours de l'année et selon les débits engendrés. Elles donnent ainsi une indication sur le pouvoir polluant des ruissellements sur mine selon les événements considérés. La variation verticale de la concentration en MES au niveau des seuils de prélèvement a été étudiée dans les travaux de L. Carpentier en 2011. Sa conclusion indique une variation inférieure à 4% entre trois prélèvements sur une tranche d'eau de 200 mm, ce qui est donc considéré comme négligeable par L. Carpentier.

- *Concentrations et taux d'abattement amont / aval*

L'étude de L. Navarrot (2012) présente des résultats (cf. tableau en annexe 17) selon lesquels les concentrations en MES sont globalement plus fortes au niveau du seuil amont qu'au seuil aval. Pour 75% des prélèvements elles sont inférieures à 1,9 g/l en amont et à 0,7 g/l en aval. On rappelle à titre indicatif que la norme NF T 90105 recommandée par la DIREN Lorraine fixe des concentrations inférieures à 0.035 g/l pour les eaux de rejets dans le milieu naturel.

Un l'effet « first flush » (illustré par l'annexe 18) est remarqué au début des crues, selon les évènements, et semble plus marqué à l'amont. Bien que la concentration suive l'évolution du débit, elle atteint en effet rarement les concentrations atteintes lors du premier pic de crue.

L'étude des concentrations maximum rencontrées sur 23 épisodes des 67 relevés sur la période (2009-2011) de l'étude conforte la dominance des concentrations à l'amont par rapport à l'aval, excepté pour un évènement (le 6 mai 2010), cf. figure 18 ci-dessous.



Il existe des flux transitant par le seuil aval mais ne passant pas par les bassins de décantation et donc plus chargés (cf. carte des drains figure 15) qui entrent en compte dans l'explication de la concentration encore élevée à l'aval malgré les ouvrages en place.

Figure 18 : Evolution des concentrations maximales en MES à Poro amont et aval sur 3 ans.

On calcule par ailleurs les taux d'abattement (cf. 2.3.2.), c'est-à-dire le rapport entre la quantité de MES décantées (concentration mesurée au seuil amont soustraite de la concentration mesurée au seuil aval) et les MES totales (concentration mesurée en entrée, au seuil amont), pour les 23 épisodes. En écartant l'épisode pour lequel la concentration aval est supérieure à la concentration amont, l'abattement moyen entre les deux seuils est de 65%. 8 évènements présentent un taux d'abattement supérieur à 80%, pour 7 autres, le taux d'abattement est compris entre 60 et 80 % et 7 évènements présentent un taux d'abattement inférieur à 60%. De la même façon que pour la différence entre le débit spécifique amont et aval, cet abattement de la concentration maximum entre l'amont et l'aval peut être expliqué par les caractéristiques des bassins versants (surfaces végétalisées, tailles, formes) et est lié à la baisse du débit spécifique (tout ralentissement provoquant du dépôt). Les décanteurs sont de nouveau un facteur d'influence non connue dans ce système.

Lors de la crue estimée centennale du 24 décembre 2011, les concentrations ont atteint un maximum de 21,1 g/l à l'aval alors qu'elles n'atteignaient que 11 g/l à l'amont soit presque deux fois moins ce qui laisse penser à une reprise de sédiments lors d'évènements forts. D'autre part, sur la crue du 6 mai 2010 (14.2 mm de précipitations), la concentration à l'aval est de 14,4 g/l soit 5 fois plus que la concentration amont de 2,9 g/l alors que l'épisode n'a pas été exceptionnel du point de vue hydrologique.

o Flux totaux amont/aval

Les flux de MES transportés lors de l'ensemble d'un épisode, peuvent être estimés (figure 19).

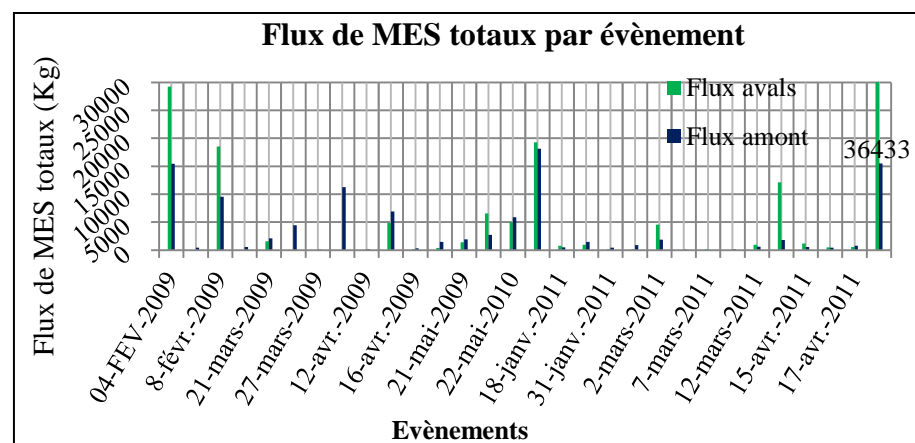


Figure 19 : Flux de MES totaux amont et aval, par évènement.

L'existence d'une corrélation flux/débit (différente à l'amont et à l'aval) est mise en avant par l'utilisation de modèles, dans l'étude de L. Navarrot (2012).

On remarque que les flux MES sont souvent plus importants à l'aval qu'à l'amont, cependant, rapportés à la superficie des bassins versants, les flux spécifiques avals sont inférieurs aux flux spécifiques amonts (comme les débits) d'une valeur moyenne d'abattement de 56%.

○ *Estimation des flux entrants et des flux sortants annuellement*

A Poro, pour certaines crues où les mesures de concentrations en MES ne sont pas disponibles, des estimations à partir d'un hydrogramme caractéristique ont été réalisées au niveau du seuil amont et aval afin de donner une idée des bilans annuels sédimentaires (annexe 19). Ces résultats peuvent alors être comparés avec les volumes de curage référencés par les mineurs (annexe 20). Pour FRN01, la quantité curée en 2011 (882.4 tonnes) est nettement supérieure au bilan sédimentaire mesuré ou estimé (respectivement 78 et 125,7 tonnes). Les décanteurs ne sont pas efficaces à 100% et il semble donc qu'il y ait une erreur dans le flux annuel de MES. Comme remarqué auparavant (figure 15), il existe des apports d'eaux au niveau de FRN01 ne passant pas par le seuil amont qui peuvent être impliqués dans cette différence. Les épisodes non pris en compte car trop peu importants (199 épisodes) génèrent un flux solide qui, accumulé à l'année, entre également en compte dans cette erreur.

Les 10 plus gros épisodes pluvieux représentent 85% du flux total amont (et 66% du flux total aval) sur 2009-2011, ce résultat variant selon les années (tableau complet en annexe 21).

○ *Mesure des concentrations en MES au sein d'un décanteur*

Les mesures présentées ci-dessus ne permettent pas de se rendre compte de ce qui se passe lors d'une crue à l'échelle d'un ouvrage de décantation. Des relevés ont donc été effectués, lors de la crue du 18/04/12. Ces relevés en entrée, centre et en sortie de bassin au moment du pic de crue (15h00) puis le jour suivant (prélèvements à 08h30 puis 15h00) donnent une idée de l'évolution de la concentration en MES au cours de la crue puis de la décantation effectuée par FRN01. Les résultats des analyses de concentration MES, réalisées par filtration Büchner et pesée, sont représentées sur la figure 20 ci-dessous et en annexe 22. Le protocole complet et détaillé de la mesure de concentration MES se trouve dans le mémoire de Laureen Carpentier (2011).



Figure 20 : Localisation des prélèvements au sein de FRN01, réalisés à 15h00 le 18/04 puis à 08h30 et 15h10 le 19/04.

On remarque d'autre part que le 19/04 à 15h, les valeurs de concentration ont augmenté en entrée et au centre du bassin. L'existence d'une marche, visible le long du bassin sur la figure 20 peut être source de remous et de reprise de sédiments lorsque le niveau de l'eau baisse jusqu'à l'atteindre. Cela expliquerait une augmentation locale de la concentration aux prélèvements en entrée et au centre.

On remarque une forte disparité entre les mesures effectuées le 18/04 en entrée de FRN01, où l'eau chargée arrive, et en son centre, où l'eau de la crue précédente a commencé à décanter. Cette disparité est visible à l'œil nu sur le terrain, comme le montre la figure 21 ci-dessous. Le flux arrivant dans le bassin a tendance à mélanger les eaux décantées avec les nouvelles eaux chargées. Un système de vidange aurait permis d'éviter ce phénomène en évacuant les eaux déjà décantées.



Figure 21 : Observation de 2 phases dans FRN01

Cette mesure renseigne sur l'efficacité du bassin en termes de décantation, malgré la zone de reprise observée. En 24h, les concentrations ont chuté de 3.35 g/l à 0.013 g/l qui est une valeur de concentration des eaux de rejet acceptable selon la norme NF T 90105. L'efficacité des bassins de décantation est également une conclusion de L. Carpentier (2011). Cette efficacité est toutefois limitée aux évènements peu importants, la transparence des ouvrages par saturation de leur capacité de stockage étant remarquée pour les plus grosses crues.

Ces valeurs de prélèvements ponctuels ont été mises en relation avec les concentrations en MES mesurées au seuil amont et aval lors de la crue du 18/04/12 (annexe 23). Il est cependant peu aisé de tirer des conclusions au vu du décalage temporel des courbes de concentration.

Les données évoquées ci-dessus donnent une idée de la quantité de sédiments piégée dans les bassins et circulant sur bassin plus généralement. Les mesures de MES au cours des crues ne sont cependant pas suffisantes pour rendre compte des différents facteurs intervenant dans l'érosion des bassins versants et dans le transport solide [MICA ENVIRONNEMENT, 2009]. On ne sait effectivement pas quel type de matériaux, fins ou grossiers, se déposent. Il faut donc associer des mesures de granulométrie aux données de concentration et flux MES afin d'avoir des données exploitables pour les modèles de décantation de la littérature.

3.4.2. Granulométrie des dépôts dans les décanteurs

On ne dispose d'aucune donnée granulométrique concernant les dépôts dans les décanteurs sur les 4 mines à part quelques mesures réalisées pour le projet Hydromine 2011, sur Poro.

○ Prélèvements et hypothèses

Des prélèvements en entrée et en sortie ont été réalisés au sein d'un ou plusieurs bassins de décantation de chaque mine. Les zones de prélèvement sont localisées en annexe 24. Ces relevés en entrée et en sortie ou centre du bassin sont réalisés dans le but d'avoir une idée de la répartition horizontale de la granulométrie dans un décanteur. On s'attend en effet à ce qu'il y ait des matériaux grossiers de charriage en entrée et des matériaux plus fins transportés par suspension plus au centre et en sortie de bassin.

On cherche d'autre part à avoir une idée de la répartition verticale de la granulométrie à chaque point de prélèvement. Des prélèvements plus précis ont ainsi été réalisés afin d'analyser les différentes couches observées (prélèvement avec un tube selon les conditions de terrain, cf. annexe 25). Pour les sites où les conditions de prélèvement étaient les meilleures (épaisseur et humidité des couches de dépôts), on a en effet pu observer une stratification (figure 22). Les conditions de prélèvement sont explicitées en annexe 26.



Figure 22 : Observation de l'alternance de couches claires et sombres pour le prélèvement au centre de SW34 (Koniambo).

L'alternance de couches claires et de couches sombres permet d'émettre l'hypothèse de dépôt de particules selon leur vitesse de chute et selon les conditions hydrauliques de l'écoulement. Ces couches correspondraient selon la même hypothèse à des fines latéritiques (10 à 20µm) pour les couches les plus claires et à de la grenaille (matériaux plus grossiers) pour les couches les plus sombres. On ne peut cependant pas écarter l'hypothèse selon laquelle la couleur des différentes couches pourrait être due à d'autres phénomènes. Une analyse fine de la granulométrie de ces différentes couches s'avère donc nécessaire.

○ Méthodes d'analyses

Des analyses au tamis ont d'abord été réalisées. La description du protocole employé se trouve en annexe 27. Il est ressorti des résultats obtenus une imprécision pour les diamètres inférieurs à 100 µm (cf. figure 23) du fait que les tamis du laboratoire n'étaient pas assez

nombreux en dessous de ce diamètre pour donner des résultats pertinents. Il ressort d'autre part de ces premiers résultats que les D50 des particules se trouvent précisément en dessous de 100 μm .

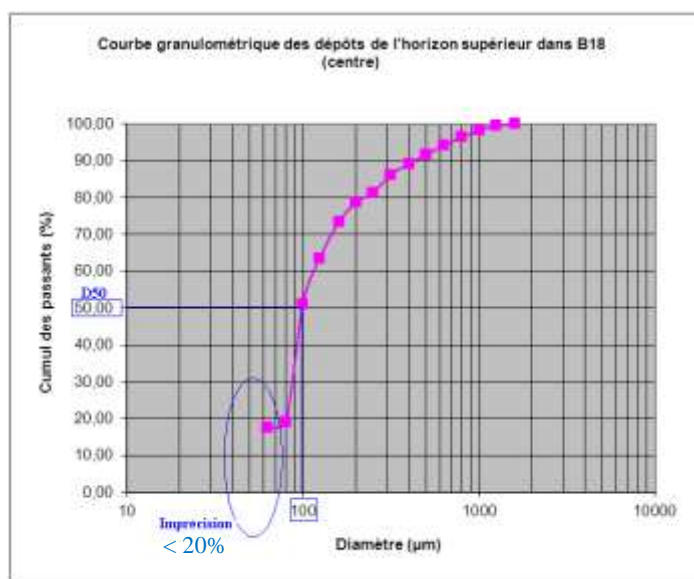


Figure 23 : Courbe granulométrique des dépôts de fines dans B18, réalisée par tamisage.

Pour la suite des analyses, le granulomètre laser Mastersizer 2000 a été utilisé (les résultats obtenus par méthode des tamis sont disponibles en annexe 28). Ce matériel est en effet plus précis pour les diamètres auxquels on s'intéresse car il traite les particules inférieures à 2000 μm . Son utilisation est détaillée dans le mémoire de L. Carpentier (2011). La limite de l'utilisation d'un tel appareil réside dans son imprécision pour les tailles de grain plus importantes. Cette limite ainsi qu'une discussion sur l'agrégation des particules lors des mesures, sont donnés avec plus de détails en annexe 29.

○ Résultats globaux et comparaison des dépôts spatialement

On peut en premier lieu comparer les granulométries globales (comprenant plusieurs strates de dépôt mélangées) des différents décanteurs, en entrée et en sortie (ou centre). Le tableau suivant présente les D10, D50 et D90 pour les différents décanteurs, selon le lieu de prélèvement dans le bassin, donnant ainsi une idée de la taille des particules les plus petites, de la taille médiane et de la taille des particules les plus grandes que l'on peut retrouver dans l'échantillon. Les courbes granulométriques correspondantes se trouvent en annexe 30.

	Echantillon	D10 (μm)	D50 (μm)	D90 (μm)
PORO	FRN01 entrée	6,8	44,7	117,1
	FRN01 centre	3,4	21,3	60,7
	FRN18 entrée	6	39,2	107,1
	FRN18 sortie	3,3	16,8	61,4
POUM	B18 entrée	6,7	25,7	72,1
	B18 centre	5,9	23,1	66,2
KONIAMBO	SP1A centre	2,7	12,9	43,9
	SW35 entrée 1	2,2	19	113,9
	SW35 entrée 2 avant digue	2,5	18,9	75,8
	SW35 entrée 2 après digue	2,3	18,2	145,8
	SW34 entrée	2,4	18,6	110,9
	SW34 centre	1,9	14,1	83,7

Tableau 13 : Comparaison des D10, D50 et D90 pour des échantillons en entrée et sortie de chaque décanteur.

D'un point de vue global, les fines ($< 100 \mu\text{m}$) représentent la fraction granulométrique dominante dans les dépôts (80 à 90 % des échantillons). Ces analyses couplées aux observations de terrain (présence de gros blocs et galets en entrée) permettent de conclure qu'il y a dépôt de matériel plus grossier (voire de matériel de charriage) en entrée par rapport au centre ou en sortie de décanteur. Cela peut-être expliqué par le ralentissement de l'écoulement en entrée du bassin du fait de l'étalement de la lame d'eau (cf. 2.6.3). Ce ralentissement provoque la chute des matériaux les plus grossiers tandis que la vitesse de l'écoulement reste trop importante pour permettre la chute des particules les plus fines ne

pouvant décanter que sur de plus longues distances. Les matériaux rencontrés dans les bassins de Koniambo semblent plus fins que ceux rencontrés dans le bassin B18 de Poum ou dans les bassins de Poro.

○ *Comparaison de différentes crues*

Les granulométries des différentes couches, sur les bassins où une stratification a pu être observée (SW34, SW35), peuvent d'autre part être confrontées. Les tableaux de résultats d'analyse ainsi que des schémas reconstituants l'alternance des couches pour les décanteurs de la mine de Koniambo, se trouvent en annexe 31.

Pour SW34 en entrée comme au centre, les D50 des couches claires sont compris entre 10,5 et 15,6 μm tandis que les D50 des couches sombres sont compris entre 20,9 et 42,9 μm soit près de deux fois plus. Cette observation est à nuancer par le fait que les tailles des sédiments des couches claires peuvent atteindre celles des couches sombres, ce qui est traduit par les valeurs de D90. La différence de granulométrie relatée entre les couches claires et les couches sombres peut être expliquée par la dynamique des crues. Les éléments les plus gros se déposeraient en premier, formant une couche sombre et les éléments plus fins se déposeraient ensuite, après un certain temps d'arrêt de l'écoulement, formant une couche plus claire. La différence d'épaisseur peut être un argument à l'idée qu'il y ait d'avantage de matériaux très fins (de diamètre de l'ordre de 10 à 20 μm) transportés au sein des bassins versants durant la plupart des crues. Aussi l'alternance des couples couche sombre – couche claire correspondrait aux différentes crues de l'année.

Cette alternance n'est cependant pas systématique. Au niveau de SW35, toujours à Koniambo, on ne peut pas clairement distinguer une alternance de couches de fines et de grossier et les couches ne sont pas moins fines plus en profondeur (à part la couche de grenaille, en dernier). Il semble au regard des épaisseurs des couches que les quantités de matériaux transportés au cours d'un événement soient importantes. Une des hypothèses explicatives serait la non-production de matériaux grossiers par l'activité minière en amont. Le bassin versant amont de ce décanteur est en effet une zone de chantier de création de verse récemment ouvert qui génère beaucoup de matières superficielles latéritiques. L'inexistence de matériaux grossiers ne permettrait pas la formation de dépôts en couche sombre et on aurait de ce fait que des couches de fines. La présence de strates peut cependant être le reflet de dynamiques de dépôt différentes pour chaque couche. Ces couches peuvent correspondre à des crues différentes mais peuvent aussi justifier que l'écoulement n'est pas trop perturbé puisqu'il permet le dépôt en strate. L'homogénéité au sein d'une couche traduit soit une vitesse de chute identique pour toutes les particules soit une turbulence trop forte pour qu'il y ait stratification au sein d'une couche.

Bien que cela puisse apporter des informations intéressantes, il n'est pas possible d'étudier ces différentes couches à la lumière de chroniques pluviométriques ou débitométriques car les sites où une stratification est observable ne présentent pas d'informations exploitables assez récentes pour attribuer des crues aux différentes couches de dépôts. Une étude de la sorte a été réalisée à Poro, par L. Carpentier en 2011. Ses résultats sont redonnés en annexe 32. Les D50 mesurés dans les différentes couches d'un bloc prélevé au centre de FRN01, à Poro, sont compris entre 4,36 et 5,26 μm (avec ultrasons⁸) et entre 9,57 et 11,53 μm (sans ultrasons), ce qui est donc beaucoup plus fin que la granulométrie des échantillons mesurée en 2012. Cette différence témoigne de la variation de la granulométrie selon les années et surtout selon l'activité minière en amont.

L'analyse granulométrique des prélèvements de Goro n'a pas été prise en compte en raison de l'absence de données hydrologiques.

⁸ Le granulomètre laser permet de briser les liaisons entre les particules agglomérées par émission d'ultrason, permettant de rendre compte de l'effet de la floculation sur les diamètres mesurés.

3.4.3. Granulométrie des prélèvements ponctuels dans l'écoulement en période de crue

Lors de la saison 2011, analysée par L. Carpentier, 7 crues à l'amont et 6 à l'aval ont pu être analysées en termes de granulométrie des MES transportées dans l'écoulement. Les conclusions de L. Carpentier concernant ces mesures sont synthétisées dans le tableau 14, les courbes granulométriques associées étant données en annexe ;

	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
Amont	[0,9 - 2,9]	[4,4 - 13,2]	[15,1 - 89,6]
Aval	[1,4 - 15,1]	[9 - 20] et [26,3 - 45,7]	[34,7 - 104,7]

Tableau 14 : Résultats d'analyse granulométrique de prélèvements de MES dans l'écoulement, saison 2011

Lors de la saison 2012, analysée par L. Navarrot, 5 crues à l'amont et 5 autres à l'aval ont pu être analysées. De la même façon que pour la saison 2011, les résultats sont synthétisés dans le tableau 15 ci-après et les courbes associées sont représentées dans la figure 24.

	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
Amont	[1,4 - 2,9]	[7,6 - 20]	[30,2 - 79,4]
Aval	[1,3 - 13,2]	[10 - 17,4] et [30,2 - 52,5]	[39,7 - 91,2]

Tableau 15 : Résultats d'analyse granulométrique de prélèvement de MES dans l'écoulement, saison 2012

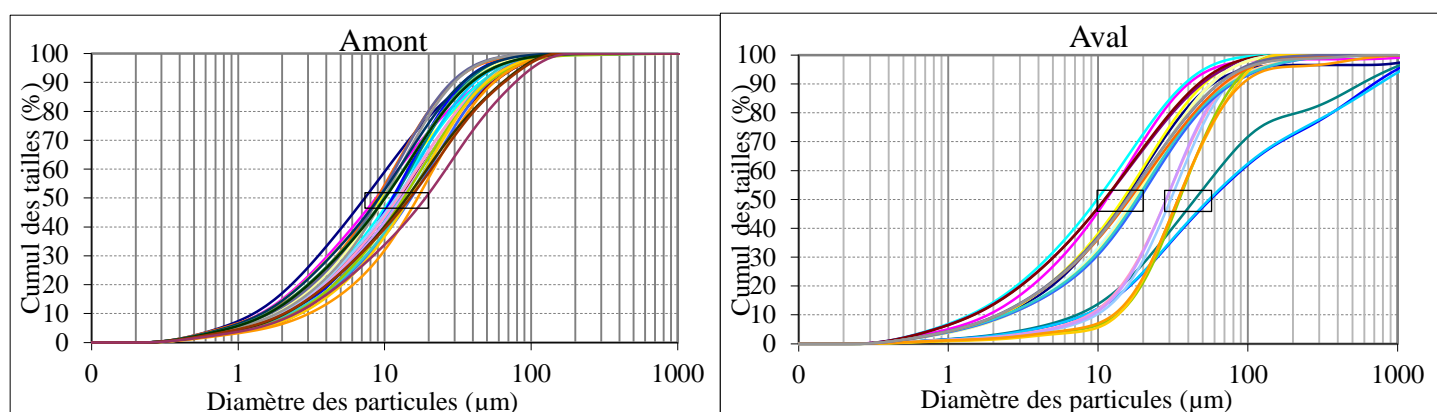


Figure 24 : Courbes associées aux analyses réalisées au granulomètre laser des échantillons de MES prélevés ponctuellement dans l'écoulement au cours de la saison 2012

On dispose de données granulométriques au niveau des dépôts dans les décanteurs et pour les prélèvements de MES réalisés ponctuellement dans l'écoulement, lors des crues. Les dépôts dans les décanteurs comprennent des MES décantées ainsi que des produits de charriage. On choisira donc plutôt les diamètres représentatifs des prélèvements de MES afin de déterminer les vitesses de chute des particules en suspension dans l'écoulement (avant et à l'entrée des décanteurs). A l'amont, on a globalement des particules de 5 à 20 µm (D50), pouvant s'étendre de 1-3 µm (D10) à 15-90µm (D90). Ces diamètres constituent les données d'entrées aux modèles testés dans la partie 4 suivante.

4. Test des modèles de décantation avec les données d'entrée acquises

4.1. Introduction

Cette partie vise à fournir, à titre indicatif, des ordres de grandeurs de dimensions de bassins de décantation et d'efficacité selon différentes méthodes recommandées par les auteurs de la partie 2, et en faisant varier plusieurs paramètres.

L'utilisation de ces méthodes est comparée à la situation sur mine dans un paragraphe de discussion par rapport à l'applicabilité au domaine minier de modèles de décantation issus d'autres domaines (urbanisme, réseau autoroutier, ...).

On considérera une ou plusieurs situations selon le degré de variabilité des paramètres par rapport aux sites d'étude.

4.2. Tests des méthodes de dimensionnement

4.2.1. Tests sur des cas théoriques

La détermination d'un ou de plusieurs hydrogrammes-type a en premier lieu été recherchée. Cela aurait nécessité la caractérisation du débit de pointe, des temps de montée de crue et de décrue ainsi que de la forme de l'hydrogramme. Il aurait alors été possible de calculer une efficacité pour chaque point de l'hydrogramme théorique et de déterminer à partir de quel débit, à capacité de décanteur fixée, l'efficacité du bassin ne serait plus optimale. Ce principe est illustré par le schéma de la figure ci-dessous.

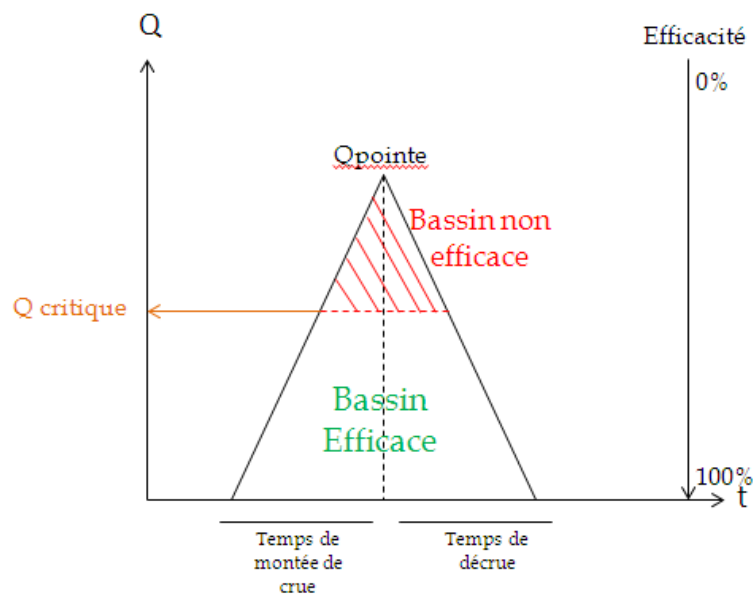


Figure 25 : Schéma d'hydrogramme caractéristique permettant l'estimation de la zone d'efficacité des décanteurs et de la zone d'inefficacité.

Cependant, la caractérisation de l'hydrologie des bassins nécessite un certain nombre d'années de suivi en continu qui n'est pas disponible actuellement sur l'ensemble des sites miniers. D'autre part, la forme-type des hydrogrammes n'est pas aisée à déterminer étant donné la réponse pluie-débit des petits bassins versants miniers (cf. partie 3.2.2), engendrant une grande variabilité dans la forme des hydrogrammes.

Seul le site de Poro présente pour l'instant un suivi continu ainsi que des informations précises sur un ouvrage (FRN01). Les différentes méthodes d'estimation de l'efficacité des bassins ont par conséquent été comparées sur un cas réel afin de donner un exemple d'utilisation de ces méthodes. On considère pour la suite le bassin FRN01 (figure 26), à Poro, pour lequel on a les données à l'amont (seuil amont) et les données à l'aval (seuil aval).



Figure 26 : Le bassin de décantation FRN01, 3 entrées, une sortie.

4.2.2. Tests sur des cas réels

Les résultats évoqués dans les paragraphes suivants sont comparés dans le tableau récapitulatif des calculs pour les différentes méthodes (SLN, Hazen, Dobbins et Camp), en figure 27 suivante.

n° épiso de	Date	PARAMETRES D'ENTREE						MODELES										
		Hydrologie						Caractéristiques du décanateur (fixées)		Sédimentolo gie (fixée)		Méthode SLN		HAZEN		Dobbins et Camp		
		Q entrée (m3/s)	H (mm)	Ts (h)	I (mm/1 5mn)	C	Aire BV drainé (m²)	Vs (m/s)	Vthéorique décanateur (m3)	% de remplissage de la capacité réelle du décanateur	Q théoriq ue max (m3/s)	Vs min décané (m/h)	d min décané (µm)	Ha = Vs/(Q/S)	X = Vs.h/2D	Efficacité		
							141000	5,0E-05										
4	6-janv.-09	0,022	0,9	90	16,0	0,04	Volume théorique (m3)		5	0,002	2,3E-05	5	2,13	188	1			
13	25-janv.-09	0,040	2,2	20	22,0	0,11	10787		34	0,012	4,3E-05	7	1,18	104	1			
17	3-févr.-09	1,338	137,1	177	82,0	0,55	Volume réel (m3)		10557	3,708	1,4E-03	40	0,04	3	0,04			
19	6-févr.-09	0,050	6,0	13	14,0	0,27	2847		229	0,081	5,3E-05	8	0,95	84	0,95			
21	8-févr.-09	1,127	72,2	1	76,0	0,80	Surface du décanateur (m²)		8114	2,850	1,2E-03	36	0,04	4	0,04			
24	12-févr.-09	0,157	2,3	85	6,0	0,93	949		304	0,107	1,7E-04	14	0,30	27	0,3			
25	17-févr.-09	0,998	80,1	100	42,0	0,76	L (m)		8532	2,997	1,1E-03	34	0,05	4	0,05			
26	18-févr.-09	0,738	33,6	3	34,0	0,86	62,6		4072	1,430	7,8E-04	29	0,06	6	0,07			
29	27-févr.-09	0,097	3,0	3	32,0	0,13	hauteur d'eau max dans le décanateur (m)		57	0,020	1,0E-04	11	0,49	43	0,5			
37	7-mars-09	0,102	2,4	43	34,0	0,11	3		36	0,013	1,1E-04	11	0,47	41	0,5			
41	10-mars-09	0,022	1,8	11	32,0	0,06			14	0,005	2,3E-05	5	2,19	194	1			
49	21-mars-09	0,370	14,8	6	38,0	0,25			517	0,181	3,9E-04	21	0,13	11	0,14			
51	23-mars-09	0,756	99,8	22	40,0	0,53			7464	2,622	8,0E-04	30	0,06	6	0,07			
54	27-mars-09	0,103	3,9	30	28,0	0,13			72	0,025	1,1E-04	11	0,46	41	0,5			
56	29-mars-09	1,279	20,3	22	70,0	0,48			1384	0,486	1,3E-03	39	0,04	3	0,04			
59	31-mars-09	0,106	9,8	3	34,0	0,33			447	0,157	1,1E-04	11	0,45	40	0,5			
69	12-avr.-09	0,068	4,7	1	20,0	0,14			96	0,034	7,1E-05	9	0,70	62	0,75			
75	16-avr.-09	0,921	41,7	5	40,0	0,73			4265	1,498	9,7E-04	33	0,05	5	0,05			
76	16-avr.-09	0,282	20,6	3	24,0	0,56			1632	0,573	3,0E-04	18	0,17	15	0,18			
83	16-mai-09	0,470	15,5	1	54,0	0,31			679	0,239	5,0E-04	23	0,10	9	0,11			
85	21-mai-09	0,363	50,8	3	58,0	0,60			4287	1,506	3,8E-04	21	0,13	12	0,14			
86	21-mai-09	0,331	87,3	2	24,0	0,78			9595	3,370	3,5E-04	20	0,14	13	0,15			
87	23-mai-09	0,078	8,7	6	8,0	0,39			479	0,168	8,2E-05	10	0,61	54	0,6			
98	27-juin-09	0,166	5,0	39	28,0	0,16			110	0,039	1,8E-04	14	0,29	25	0,3			
100	8-juil.-09	0,004	1,0	238	4,0	0,04			6	0,002	4,2E-06	2	11,85	1047	1			
102	9-juil.-09	0,174	6,7	6	42,0	0,24			228	0,080	1,8E-04	14	0,27	24	0,3			
104	16-juil.-09	0,714	18,0	137	82,0	0,27			693	0,243	7,5E-04	29	0,07	6	0,07			
113	10-sept.-09	0,014	0,7	58	18,0	0,03			3	0,001	1,5E-05	4	3,31	292	1			
125	2-déc.-09	0,276	14,5	232	60,0	0,18			369	0,129	2,9E-04	18	0,17	15	0,18			
144	8-févr.-10	0,022	1,4	2	14,0	0,07			13	0,005	2,3E-05	5	2,13	188	1			
146	11-févr.-10	0,028	5,4	46	18,0	0,19			144	0,050	3,0E-05	6	1,68	149	1			
148	27-févr.-10	0,016	1,6	312	24,0	0,04			9	0,003	1,7E-05	4	2,99	264	1			
155	15-avr.-10	0,016	0,1	392	84,0	0,01			0	0,000	1,7E-05	4	2,99	264	1			
157	3-mai-10	0,013	0,3	392	48,0	0,01			0	0,000	1,4E-05	4	3,65	323	1			
158	6-mai-10	0,517	14,2	47	52,0	0,21			416	0,146	5,5E-04	25	0,09	8	0,1			

161	22-mai-10	0,719	76,6	41	50,0	0,54	5871	2,062	7,6E-04	29	0,07	6	0,07
162	1-juin-10	0,220	8,9	208	60,0	0,15	193	0,068	2,3E-04	16	0,22	19	0,25
172	13-août-10	0,608	59,3	132	98,0	0,34	2815	0,989	6,4E-04	27	0,08	7	0,08
175	17-oct-10	0,009	0,6	254	22,0	0,02	2	0,001	9,6E-06	3	5,22	461	1
176	18-oct-10	0,017	0,8	11	32,0	0,04	5	0,002	1,8E-05	4	2,81	248	1
177	19-oct-10	0,009	1,2	18	28,0	0,04	7	0,003	9,2E-06	3	5,45	481	1
184	4-nov-10	0,162	11,6	70	38,0	0,17	276	0,097	1,7E-04	14	0,29	26	0,3
193	8-déc-10	0,023	0,3	553	66,0	0,02	1	0,000	2,5E-05	5	2,03	179	1
203	3-janv.-11	0,016	0,7	45	18,0	0,03	3	0,001	1,7E-05	4	2,89	256	1
205	4-janv.-11	0,016	0,7	3	24,0	0,05	5	0,002	1,7E-05	4	2,99	264	1
207	7-janv.-11	0,035	1,6	65	80,0	0,06	13	0,004	3,7E-05	6	1,34	118	1
210	14-janv.-11	0,007	1,3	12	12,0	0,03	5	0,002	7,5E-06	3	6,66	588	1
212	17-janv.-11	1,659	78,3	11	64,0	0,83	9198	3,231	1,7E-03	44	0,03	3	0,03
214	18-janv.-11	0,405	11,1	4	36,0	0,41	647	0,227	4,3E-04	22	0,12	10	0,12
215	20-janv.-11	0,121	22,8	58	28,0	0,32	1028	0,361	1,3E-04	12	0,39	35	0,5
218	25-janv.-11	0,042	10,0	46	20,0	0,27	374	0,131	4,4E-05	7	1,13	100	1
220	31-janv.-11	0,027	1,0	98	52,0	0,04	5	0,002	2,9E-05	6	1,74	154	1
223	3-févr.-11	0,245	11,4	7	30,0	0,35	557	0,196	2,6E-04	17	0,19	17	0,23
235	2-mars-11	0,366	14,9	13	76,0	0,30	630	0,221	3,9E-04	21	0,13	11	0,14
237	3-mars-11	0,073	4,1	8	32,0	0,20	113	0,040	7,7E-05	9	0,65	58	0,7
239	6-mars-11	0,042	4,7	2	36,0	0,24	157	0,055	4,4E-05	7	1,13	100	1
240	7-mars-11	0,102	15,0	4	20,0	0,61	1288	0,453	1,1E-04	11	0,46	41	0,5
241	10-mars-11	0,030	1,7	78	26,0	0,08	19	0,007	3,1E-05	6	1,60	141	1
244	12-mars-11	0,534	26,6	3	24,0	0,84	3164	1,111	5,6E-04	25	0,09	8	0,09
247	17-mars-11	0,021	0,6	70	68,0	0,01	1	0,000	2,2E-05	5	2,27	201	1
250	4-avr.-11	0,019	1,1	12	20,0	0,03	5	0,002	2,0E-05	5	2,45	217	1
254	14-avr.-11	0,521	14,5	4	94,0	0,26	541	0,190	5,5E-04	25	0,09	8	0,1
255	15-avr.-11	0,393	30,5	5	36,0	0,53	2262	0,794	4,1E-04	21	0,12	11	0,13
256	16-avr.-11	0,323	28,9	10	24,0	0,64	2591	0,910	3,4E-04	19	0,15	13	0,16
258	17-avr.-11	0,629	16,1	6	38,0	0,67	1521	0,534	6,6E-04	27	0,08	7	0,08
261	29-avr.-11	0,022	4,4	103	14,0	0,17	103	0,036	2,3E-05	5	2,17	192	1
262	29-avr.-11	1,531	71,0	4	118,0	0,63	6295	2,211	1,6E-03	42	0,03	3	0,03

Figure 27 : Tableau récapitulatif des calculs et comparaison d'efficacités de décanteurs selon les différentes méthodes

4.2.2.1. Comparaison des capacités des ouvrages actuels avec les volumes calculés avec la méthode 2h/2ans

On cherche à calculer les capacités de rétention nécessaires pour les 67 évènements pour lesquels toutes les données d'hydrologie sont disponibles sur la période 2009-2011 à Poro. La méthode de dimensionnement donnée par le guide pratique de la SLN (2005) est pour cela utilisée (cf. partie 2.5.5). On rappelle la formule :

$$V_{2h} = C \cdot H_{2h} \cdot S$$

Avec :

V : Volume à stocker pour une pluie biennale (m³)

C : Coefficient de ruissellement

S : Surface du bassin versant considéré (m²)

H : hauteur de pluie relative à un temps de concentration de 2 h et à une période de retour de 2ans (m)

On fait varier plusieurs paramètres ;

- Variabilité du volume du bassin avec le coefficient d'écoulement (C)

Le paramètre "pluie" est fixé. La lame d'eau correspondant à une pluie 2h/2ans est de 76,5 mm [NAVARROT, 2012].

Le coefficient donné par la DAVAR pour dimensionner les décanteurs est de 0,8 à 1. Le coefficient calculé par l'étude Hydromine se situe aux alentours de [0,55-0,6]. Le volume de FRN01 est donc calculé pour un coefficient d'écoulement de 1 (DAVAR), de 0,6 et de 0,3. On remarque, selon les valeurs données dans le tableau suivant que les capacités des décanteurs sont très variable suivant le coefficient d'écoulement retenu et qu'il s'agit donc d'un paramètre de poids dans cette méthode de dimensionnement.

C	1	0,6	0,3
Volume FRN01 (m ³)	10 787	6 472	3 236

Tableau 16 : Calculs de volume de FRN01 pour différents coefficients d'écoulement (C) avec la méthode de la SLN pour une pluie de 76.5 mm, données extraites de [NAVARROT, 2012].

○ *Variabilité de la lame d'eau (H) avec le coefficient de ruissellement*

La comparaison des différentes lames d'eau maximum prises en charge par FRN01 lorsque l'on fixe son volume et que l'on fait varier le coefficient d'écoulement ne donne pas de résultat pertinent.

○ *Variabilité de V selon C et H et pour l'ensemble des évènements*

La capacité théorique nécessaire du bassin FRN01 est recalculée pour chaque évènement i ayant un débit (Q_i) et un coefficient d'écoulement calculé (C_i) propres. Pour 12 des 67 évènements (soit 18% des évènements), la capacité réelle du décanteur actuel (2847 m³) est insuffisante. La capacité du bassin de décantation actuel est jusqu'à 5 fois insuffisante pour certains épisodes, l'ouvrage va donc inévitablement déverser des eaux qui n'auront pas eu le temps de décanter.

La capacité théorique des ouvrages peut être estimée selon cette méthode pour le site de Goro afin de la comparer aux volumes réels actuels des décanteurs. On prend un coefficient d'écoulement de 1 et une pluie de 76.5 mm, en l'absence de données hydrologiques du site. Sur les 12 ouvrages, 4 sont sous-dimensionnés de 14 à 58%, 4 sont surdimensionnés de 14 à 60 % et globalement (sans prendre en compte BSKN), les ouvrages sont surdimensionnés. Cependant les pluies à Goro sont plus importantes qu'à Poro, aussi la 2h/2ans doit-elle être plus importante. Il aurait été intéressant de pouvoir comparer ces résultats avec des données hydrologiques afin d'estimer la quantité d'eau et donc la crue, à partir de laquelle les ouvrages ne sont plus efficaces.

4.2.2.2. Calcul de vitesse de chute

On cherche en premier lieu à calculer les vitesses de chute caractéristiques des particules car il s'agit d'un paramètre d'entrée aux modèles de décantation. Les résultats obtenus par les différentes méthodes exposées dans la partie littérature sont comparés. On distingue 2 cas :

- L'utilisation de la formule de Stokes pour des particules supposées sphériques
- L'extrapolation de la formule de Stokes en prenant en compte la forme naturelle de la particule, avec des coefficients d'ajustement correspondant à des silts ou bien des floccs, selon Camenen.

Les valeurs de granulométrie caractéristiques retenues sont en effet des valeurs mesurées au granulomètre laser avec ultrasons et représentent donc des particules élémentaires pour lesquelles la floculation n'est pas prise en compte. Ce paramètre est intégré au cours du calcul de la vitesse de chute, avec l'extrapolation de Camenen. Il conviendrait néanmoins d'étudier ce paramètre en détail au niveau des différents sites étudiés, ce qui est le sujet d'une étude actuellement entamée sur le site de Poro.

Les calculs sont réalisés avec les hypothèses suivantes :

- $g = 9.81 \text{ m/s}^2$
- $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- $s \text{ particules solides} = 2.65$ (particules de cours d'eau naturels et de rivières)

○ *Résultats et observations*

On observe sur la figure 28 suivante des résultats du même ordre de grandeur avec la formule de Stokes (régime laminaire, particules sphériques) et dans le tableau du SETRA (tableau 7, partie 2 ci-avant). Les valeurs du tableau ont en effet été calculées avec Stokes. Les vitesses de chute calculées avec Stokes pour des particules supposées sphériques (et donc le tableau SETRA) sont cependant surestimées de 40 à 50 % par rapport aux vitesses de chute calculées en prenant en compte la forme naturelle de la particule en supposant que l'on soit en présence

de silts (Camenen). Ces mêmes vitesses sont surestimées de 10 à 40 % par rapport aux vitesses de chute calculées pour des floccs (Camenen).

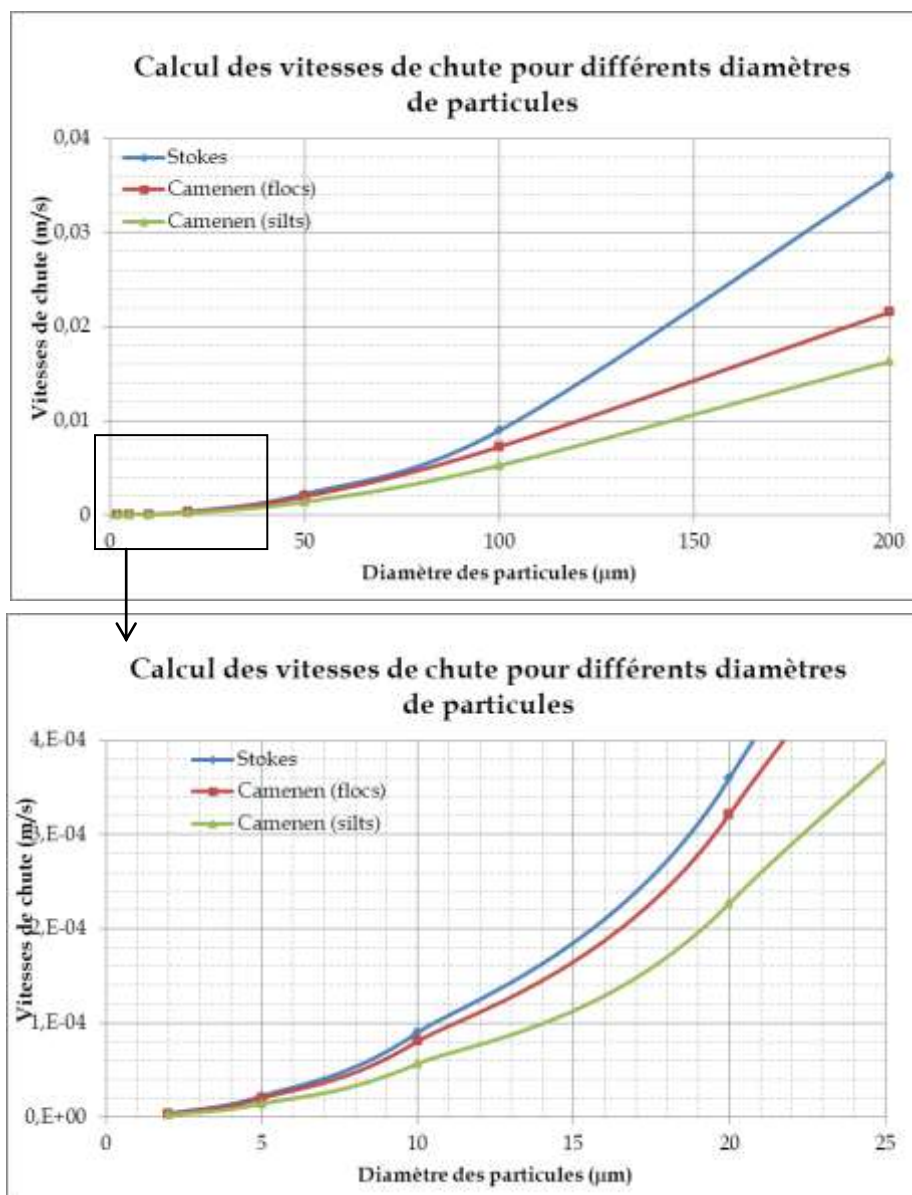


Figure 28 : Comparaison de 3 méthodes de calcul de vitesse de chute pour des diamètres de particule compris entre 0 et 200 μm.

En se plaçant dans le cas le plus critique i.e. pour des particules silteuses n'ayant pas tendance à flocculer, on retient des fourchettes de valeur de $1,4E^{-5}$ à $2,3E^{-4}$ m/s pour les diamètres les plus récurrents (5 à 20 μm). Pour la suite des calculs on fixera la vitesse de chute de référence ($V_{S\text{ REF}}$) à $5,0E^{-5}$ m/s, se situant dans cette fourchette et correspondant à des diamètres de 10-15 μm.

○ Temps de décantation

Un calcul a été réalisé afin de déterminer le temps nécessaire à la sédimentation des particules selon leur vitesse de chute (et donc leur diamètre) sur une hauteur d'eau de 3 m (profondeur max de FRN01, bassin utilisé pour la comparaison des modèles et profondeur maximum conseillée par le guide de la SLN).

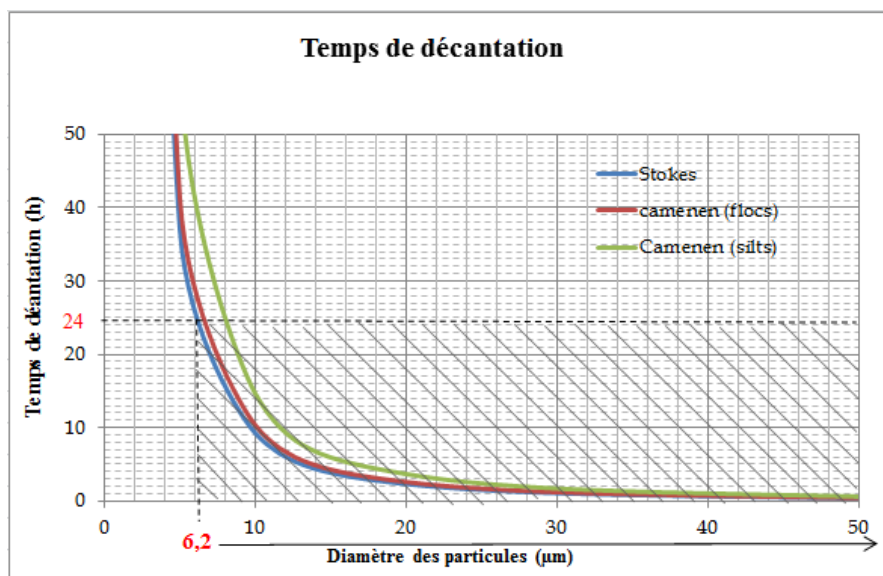


Figure 29 : Estimation du temps nécessaire à la sédimentation des particules pour une hauteur d'eau de 3 m et selon le diamètre des particules

On remarque que pour une période de rétention de 24 heures, toutes les particules de diamètre supérieur à 6.2 µm décanteront (d'après les calculs avec Stokes, les différences avec les deux autres méthodes étant infimes). Deux tendances fortes apparaissent nettement sur cette courbe, avec un seuil de rupture de pente équivalent à un diamètre de 10 µm approximativement. En deçà de ce diamètre, la décantation semble limitée malgré un temps très long. Le diamètre de 10 µm correspond à un temps de décantation de 9h (selon Stokes). On peut donc estimer que pour des diamètres supérieurs à 10 µm, la période de rétention minimum du bassin de décantation doit être de 9h et qu'en dessous de ce chiffre, la décantation n'est pas optimale.

Ce résultat est supérieur à la période de temps sec moyenne (7h) des évènements pluvieux de période de temps sec inférieure à 24h (partie 3.2.1). La période de temps sec moyenne de 7h correspond à des diamètres supérieurs à 11 µm. Si on ne prend pas en compte les remises en mouvement dues aux écoulements suivants ou aux particularités physiques des bassins de décantation (présence de marches ou de zones de turbulence), on peut espérer que la décantation sera donc effective dans la majorité des cas, pour des particules de diamètre supérieur à 11 µm.

Certains paramètres non évoqués, tels que la concentration en particules dans le fluide considéré, interviennent également sur la vitesse de chute. Il semble finalement plus simple et beaucoup plus précis de mesurer les vitesses de chute expérimentalement. On peut par exemple employer des colonnes de sédimentation.

4.2.2.3. Hazen

La méthode de Hazen, reliant la vitesse de chute des particules au débit entrant et à la surface du décanteur, permet en premier lieu de calculer le débit maximum permis par les caractéristiques actuelles du bassin. La surface actuelle du bassin est en effet de 949 m². La vitesse de chute des particules est fixée à 5,0E⁻⁵ m/s aussi le débit maximum permis est-il de 0,05 m³/s. On recense ainsi 42 épisodes (figure 27), soit 61% des épisodes, présentant un débit supérieur à ce débit maximum permis par l'ouvrage pour une bonne décantation des particules de 10 - 15 µm (ou de diamètre inférieur).

On calcule d'autre part la taille des particules les plus fines qui sont décantées lors de chaque évènement. Pour cela, le calcul intermédiaire de la vitesse de chute maximum des particules

selon les caractéristiques de l'écoulement est utilisé. La surface du décanteur est toujours fixée et le débit mesuré pour chaque évènement entre cette fois en compte dans le calcul.

On recense 22 épisodes pour lesquels le bassin ne pourra pas décanter des particules plus petites que 20 µm, dont 7 cas pour lesquels les particules décantées seront de taille supérieure à 30 µm. Tous les épisodes critiques au sens d'une capacité de rétention actuelle insuffisante avec les calculs de la SLN (cf. 4.2.2.1), correspondent à des tailles de particules décantées supérieures à 20 µm, par calcul avec la relation de Hazen.

D'autre part, les 10 épisodes restant qui correspondent à une inefficacité de décantation pour les particules de tailles inférieures à 20 µm (soit plus de 50% des particules selon les résultats issus des courbes granulométriques plus haut) ne sont pas notés comme inefficaces avec le calcul de capacité de stockage de la SLN. Le volume de FRN01 est en effet suffisant pour contenir l'intégralité de ces écoulements et les sédiments de taille inférieure à 20 µm finiront par décanter, selon la période de temps sec après la fin de la crue. La méthode de Hazen trouve à ce sens sa limite puisque l'on considère des débits d'entrée variables et que l'efficacité de décantation des ouvrages reposera davantage, lors des fortes crues, sur la durée de la période de temps sec entre les évènements plutôt que sur la valeur du débit surfacique dans l'ouvrage durant la crue. On rappelle que les régimes d'écoulement sur les mines calédoniennes relèvent du torrentiel et s'éloignent donc assez des cas considérés pour le dimensionnement d'ouvrage selon Hazen. Cette méthode étant toutefois une référence en matière de conception d'ouvrage de décantation et les valeurs données peuvent être considérées en comparaison des autres méthodes afin de percevoir l'influence des différents paramètres, mis en avant de façon plus ou moins prononcée selon les méthodes de conception.

4.2.2.4. Dobbins et Camp

La méthode de Dobbins et Camp permet d'estimer l'efficacité d'un ouvrage grâce à un abaque, donné en partie 2.5.3. On calcule pour chaque évènement les deux paramètres de cet abaque c'est-à-dire d'une part le nombre de Hazen : $Ha = \frac{V_s}{Q/S}$ et d'autre part le terme adimensionnel $X = \frac{V_s \cdot h}{2 \cdot D}$. La vitesse de chute des sédiments, la profondeur d'eau et la surface du bassin sont fixées. A partir de ces deux paramètres et par lecture de l'abaque de Camp, on peut déterminer l'efficacité au sens de Dobbins et Camp du décanteur actuel (FRN01) pour chacune des 67 crues recensées. On estime que les bassins présentant des valeurs de $Ha > 2.0$ ou bien des valeurs de $X > 100$ (valeurs limites apparaissant sur l'abaque), les bassins présentent une efficacité égale à 100% au sens de Dobbins et Camp. On s'attache donc à détailler les efficacités des évènements pour lesquels le bassin présente une efficacité $< 100\%$.

On remarque que pour la plupart des cas où on peut estimer une efficacité inférieure à 100% (cas où les deux conditions $Ha < 2$ et $X < 100$ sont réunies), le calcul réalisé à partir de la méthode de la SLN dénotait justement une capacité de décanteur insuffisante pour la crue considérée.

On distingue cependant des cas où l'efficacité des décanteurs n'est pas de 100% alors que la capacité calculée avec la méthode SLN est inférieure au volume du bassin actuel et que le bassin est donc sensé être efficace (épisodes 56 du 29/03/09 et 104 du 16/07/09).

On peut calculer l'efficacité des bassins pour d'autres valeurs de vitesses de chutes et donc d'autres tailles de particules. Les bassins de faible efficacité pour des particules de 10 µm de diamètre peuvent être complètement efficaces pour des particules de plus grande taille. Il s'agit encore une fois d'un exemple d'utilisation de cette méthode mais les paramètres d'entrée fixés peuvent être variés afin d'obtenir d'autres résultats.

4.2.2.5. Mélange intégral

On cherche à estimer, par la méthode du mélange intégral, la concentration en sortie ($C_s(t)$) et à la comparer à la concentration mesurée au seuil aval afin d'estimer la contribution des arrivées d'eau ne passant pas par FRN01 mais intervenant au niveau du flux aval. Cela peut ainsi donner une idée de la marge d'erreur relative entre la concentration en sortie de décanteur et la concentration mesurée au seuil aval. On travaille toujours au niveau de FRN01 à Poro, sur un exemple d'échantillonnage au cours du temps. On dispose des relevés de débit à l'amont de FRN01, à pas de temps 5 mn sur toute la durée de la crue ainsi que des relevés ponctuels de MES au seuil amont et aval durant la crue. Les pas de temps sont donc à homogénéiser afin de pouvoir appliquer l'équation 10 explicitée au paragraphe 2.5.4. On choisit d'associer un débit à chaque pas de temps de mesure de MES à l'amont.

L'annexe 34 présente les valeurs obtenues, à titre d'exemple, pour chaque pas de temps pour lequel $C_s(t)$ est calculé. La concentration calculée est toujours inférieure à la concentration mesurée. Quantitativement sur l'exemple pris, $C_s(t)$ calculé en sortie d'ouvrage représente 2 à 14 % des MES mesurés au seuil aval. Les 76 à 98 % restant correspondent donc aux flux annexes ne passant pas par le seuil amont mais passant à l'aval.

4.2.2.6. Conclusion et critique des modèles

Les différentes méthodes ont été testées à Poro, mine présentant toute les données d'entrée en terme d'hydrologie, de caractéristiques de bassin ou de données sédimentologiques. On remarque globalement une correspondance entre les résultats des différentes méthodes, c'est-à-dire la logique de conception de bassins selon la SLN, selon Hazen ou bien l'efficacité déterminée selon Dobbins et Camp. Chaque modèle est dépendant de paramètres différents, impliquant une détermination précise de ces paramètres.

Les modèles ne sont pas forcément adaptés à la situation des petits bassins versants miniers mais donnent un ordre d'idée de l'efficacité de fonctionnement des décanteurs vis-à-vis de l'hydrologie locale. Ces modèles peuvent être employés dans le sens d'un dimensionnement d'ouvrages. De façon optimale, il faudrait prendre en compte l'action combinée de FRN01 et FRN18 (qui ont été conçus pour fonctionner en série). Il faut pour cela connaître le débit sortant de FRN01 (ou le débit entrant dans FRN18), ce qui n'est pas aisé étant donné les phénomènes d'exfiltration en sortie de FRN01 et étant donné que la station de mesure de débit aval n'est pas située directement à la sortie de FRN01 mais au niveau du seuil aval, soit beaucoup plus loin.

Une des critiques à propos des méthodes évoquées concerne le fait qu'elles ne tiennent pas compte des caractéristiques des pluies alors que la quantité de sédiments mobilisés et transportés est fortement liée à l'intensité de la pluie ainsi qu'à sa durée. D'autre part le débit considéré ici est le débit de pointe de ruissellement mesuré au seuil, on ne prend donc pas en compte les écoulements hypodermiques ou bien la hauteur piézométrique au sein de la surface drainée par chacun des ouvrages et la durée de temps sec (influençant la capacité d'infiltration du sol). Si ces paramètres interviennent, ils agissent toutefois au niveau de l'augmentation de la capacité de stockage des bassins par infiltration de l'eau et augmentent donc la vitesse de décantation des sédiments dans l'ouvrage, ils ne faussent donc pas les valeurs de vitesse de chute ou d'efficacité d'ouvrage de façon néfaste. Il pourrait être intéressant de mener une étude sur la capacité d'infiltration de ces sols sur les différentes mines et au sein des bassins de décantation dans la définition des temps de séjour. La capacité d'évaporation des eaux dans les bassins serait alors un paramètre à considérer également. On ne prend pas non plus en compte l'effet de battance des sols, cependant des mesures directes de ruissellements sont utilisées, aussi n'a-t-on pas besoin d'estimer ce facteur dans le cas de l'étude.

Conclusion

Cette étude, menée en plusieurs phases a consisté en une analyse bibliographique, puis une étude de terrain et enfin une confrontation des modèles avec les données de terrain.

Les entreprises minières des quatre sites étudiés (Poro, Poum, Koniambo et Goro) adoptent plusieurs stratégies selon les conditions d'écoulement sur site. La pluviométrie, la topographie, la taille des bassins versants ou encore l'espace disponible sur mine sont autant de paramètres variables selon les sites qui conditionnent la mise en place d'ouvrages de gestion des eaux.

Un suivi hydrologique réalisé sur Poum et Poro ainsi que des données obtenues pour Goro et Koniambo ont permis d'illustrer les disparités de précipitations sur mine. Ce suivi hydrologique a d'autre part permis, à Poro, de mettre en évidence certaines relations à l'origine des processus observés pour ce cas particulier des petits bassins versants miniers. La relation pluie-débit est une de ces relations et a une forte influence sur cette étude puisqu'elle est directement reliée à la forme des hydrogrammes. On peut d'autre part relier le débit de pointe à la taille du bassin versant alors que la lame d'eau ruisselée est mise en relation avec les caractéristiques du bassin versant. Les flux de MES sont corrélés au débit de pointe et le calcul de flux spécifiques de MES permet de se rendre compte qu'ils sont plus importants à l'amont qu'à l'aval. L'abattement des MES observé entre l'amont et l'aval est lié à l'occupation du sol et aux caractéristiques des bassins versants, différents entre l'amont et l'aval. L'influence des décanteurs dans cet abattement est indéniable cependant il est difficilement quantifiable du fait de l'influence des autres facteurs évoqués.

Une étude granulométrique menée dans différents décanteurs des sites miniers apporte les premiers résultats selon lesquels les particules considérées sont, pour la majeure partie (80%), constituées de fines latéritiques. Ces fines sont d'un diamètre de 5 à 20 μm selon les situations et l'activité minière en amont des bassins où les prélèvements ont été réalisés. Aussi les systèmes de filtration ou de décantation lamellaire sont difficilement envisageables du fait du risque de colmatage. Bien que les diamètres considérés soient très fins, il semble que la décantation soit efficace en condition non déversante. L'abattement maximum recensé en 2011 était en effet une chute de concentration de 21 g/l à l'amont à 5 g/l au seuil aval. L'observation par la mesure directe des concentrations en MES dans les bassins justifie cette bonne décantation (clarification des eaux en moins de 24h). La charge en MES a tendance à diminuer moins rapidement au-delà de ce délai et est d'autre part potentiellement perturbée par les arrivées d'eau de ruissellement de nouvelles pluies. Le problème actuel principal des bassins réside en effet dans les volumes réellement mis en place, très inférieurs aux volumes estimés par les calculs. Quelle que soit la méthode de dimensionnement, l'espace disponible sur mine est le facteur limitant. L'occurrence des pluies accentue le problème car les bassins ne semblent pas avoir le temps de se vider entre deux crues malgré l'efficacité de décantation relatée ci-avant. Une étude de confrontation des données de terrain avec les modèles de la littérature permet en effet de donner des indications d'autres gammes de capacités d'ouvrages ainsi que de renseigner sur leur efficacité en prenant en compte d'autres paramètres tels que la vitesse de chute des particules ou les caractéristiques géométriques du bassin de décantation.

La recommandation la plus pertinente à ce stade des observations des sites miniers semble ainsi être l'équipement systématique des bassins avec des systèmes de vidange et la réactivité après une crue pour vider le bassin une fois que les solides sont suffisamment décantés pour que la concentration des eaux de rejet soit acceptable.

Il peut être d'autre part être intéressant de mieux déterminer les vitesses de chute des sédiments, par mesure expérimentale (avec colonnes de sédimentation par exemple) et de mieux déterminer les débits (suivi et mesures en continu sur une durée suffisante). L'échantillonnage des zones sources de sédiments et l'analyse de leur granulométrie permettrait d'autre part de comparer les différents sites entre eux et de comparer avec ce qui est déposé dans les bassins. Il peut en outre être intéressant de comparer les productions annuelles de curage des différentes mines pour se rendre compte des différences entre les quantités de stocks sources de sédiments, selon les mines.

L'alternance de couples de strates claires, de granulométrie fine, et de strates sombres, de granulométrie plus grossière, au sein des décanteurs dénoterait l'occurrence des différentes crues. L'épaisseur de la couche de fines latéritiques observée apporte un argument de plus à la composition des dépôts, majoritairement fins. Il peut être intéressant de retracer la correspondance de ces différentes crues avec les événements hydrologiques et pluviométrique afin de réaliser une comparaison d'ordre temporelle des dépôts dans les décanteurs. Cette analyse ne peut cependant être menée qu'avec de chroniques de pluies et de débits exploitables et en continu.

Des études de suivi environnemental et hydrologiques sont entamées sur les quatre mines par mise en place de matériel. En dépit du nombre important d'appareils de mesure mis en place sur les sites, toutes les données ne sont pas exploitables. L'absence de suivi en continu ou bien la production de données brutes non expliquées et/ou non traitées ne permet pas de déterminer des gammes de données représentatives de scénarios-type. L'initiative Hydromine est un bon exemple puisque ce projet mené depuis à présent 4 ans fournit des résultats permettant de donner des coefficients d'écoulements et des gammes de débits entrant en compte dans les modèles comme paramètres de calage. Une étude complète hydrologique aboutit en effet à la définition et au découpage d'épisodes pluvieux pouvant alors être étudiés.

Les modèles ainsi présentés et testés en exemple sur Poro fournissent des résultats concordants par rapport à l'efficacité de rétention et de décantation es bassins. Ils ne sont pas forcément adaptés au contexte local mais donnent un ordre d'idée de l'efficacité de décantation des bassins et seront susceptibles d'être utilisés pour le dimensionnement lorsque le suivi sera suffisant pour que l'hydrologie des différents sites, et notamment les hydrogrammes de crue, puissent être caractérisés. Il n'y a en effet pas de situation-type discernable à ce stade de l'étude, chaque bassin ayant une situation particulière et des conditions d'exploitation minière en zone amont différentes. Il peut en outre être mis en évidence, par l'exemple d'utilisation de la méthode du Mélange Intégral, que tous les écoulements ne passent pas par les décanteurs et que certains de ces écoulements contribuent fortement à la charge en MES encore élevée à l'aval. L'une des améliorations possibles de l'influence de la présence des décanteurs au sein du schéma de gestion des écoulements consiste à étudier ces écoulements assez précisément pour que l'intégralité des eaux passe par les bassins de décantation.

On peut enfin évoquer les limites des bassins de décantation et les risques qu'ils représentent en termes d'effondrement ou bien de reprise de sédiments. Les risques d'effondrement sont déjà pris en compte et gérés par les mineurs, cependant la reprise des sédiments en cas de forte crue est un phénomène encore peu étudié. Les résultats d'abattement des concentrations en MES pour la crue centennale de décembre 2011 dénotent cependant la réalité de cet aléa.

Bibliographie

Ouvrages

- CHAIB J.** Les eaux pluviales, gestion intégrée. Collection : écologie urbaine, les guides pratiques. Coédité par Foncier Conseil et les éditions Sang de la terre **1997**. 173p. ISBN 2-86985-091-3.
- CHOCAT B.** Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Lavoisier Tec & doc Londres - New-York – Paris, **1997**. 1136p. ISBN 13 : 9782743001261.
- SATIN M., SELMI B.** Guide technique de l'assainissement. Editions Le Moniteur **1995**. 628p. ISBN 2281111520.
- SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes).** L'eau et la route, volume 7 : Les dispositifs de traitement des eaux pluviales. **1997**. ISBN : 2-11-085815 X.
- WALCH L., CERTAIN F., LAMBERT P.** Maitrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau, guide à l'usage des aménageurs. Cemagref Lyon **1986**. 126p. ISBN 2-85362-416-1.
- STU.** Guide technique des bassins de retenue d'eaux pluviales. Lavoisier Tec & Doc **1994**. 275p. ISBN 2-85206-934-2.

Articles de périodiques

- BAADE J., BARSCH D., MÄUSBACHER R., SCHKRAFT G.** Sediment yield and sediment retention in a small loess-covered catchment in SW-Germany. Z. Geomorph. N. F, **1993**, 217-230, Berlin-Stuttgart.
- CAMP, T.R.** Sedimentation and the design of settling tanks. Transaction ASCE. **1946**. Pp. 895-936.
- COX, C.R.** Techniques et contrôle du traitement des eaux, chapitre 6. Organisation Mondiale de la Santé, **1967**, série de monographies, n°49.
- DOBBINS, W.E.** Effect of turbulence on sedimentation. Transaction ASCE. **1944**. Vol.109, n°2218, pp. 629-253.
- HEINKE G.W., QAZI M.A. and TAY A.** Design and performance criteria for settling tanks for the removal of physical - chemical flocs. Volume I et II – Research program for the abatement of municipal pollution within the provision of Canada-Ontario agreement on great lakes water quality – Project n° 72-5-7, **1977**. 115p.
- MICHELBAACH S., WÖHRLE C.** Settleable solids from combined sewers: settling, stormwater treatment and sedimentation rates in rivers. Water Science and Technology, **1994**, Vol. n°29(1-2), pp.95-102.
- SAGET A., CHEBBO G., BACHOC A.** Des décanteurs pour traiter la pollution des rejets urbains de temps de pluie. La Houille Blanche, **1994**, n°1/2, pp.185-190.
- SINHA S., DUTTA P.** Soil erosion control measures for mined watershed. Journal of Mines, Metal & fuels, Mars - Avril **2000**, pp. 56-62.

Mémoires de fin d'étude et thèses

- ALLOIN E.** Fonctionnement des petits bassins versants miniers en Nouvelle-Calédonie. Mémoire de fin d'études, Institut polytechnique LaSalle Beauvais, **2011**. 128p.
- CARPENTIER L.** Mesure et analyse des flux d'eau et de sédiments sur le site de Poro (Nouvelle-Calédonie). Mémoire de fin d'études, Institut polytechnique LaSalle Beauvais, **2011**. 179p.

- CHEBBO G.** Solides des rejets pluviaux urbains, caractérisation et traitabilité. Thèse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, Sciences et techniques de l'environnement, **1992**. 420p.
- FREY P.** Etude expérimentale et simulation numérique du transport turbulent de particules solides dans un décanteur. Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon. Spécialité Mécanique, **1991**. 150p.
- GIRAUD F.** Mise à jour du plan de gestion des eaux de la mine française Poro – Houailou. Rapport de stage de DEUST Géoscience de l'Université de Nouvelle-Calédonie. **2009**.
- GUYONNEAU A.** Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires de petits bassins versants miniers en Nouvelle-Calédonie. Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, **2012**. 87p.
- JACOPIN C.** Contribution à la gestion des rejets urbains de temps de pluie par les bassins de retenue. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, **1999**. 293p.
- LAFOND J.M.** Comparaison de modèles de transport en suspension. Application à des ouvrages de stockage-dépollution. Thèse de doctorat, université Lyon I, **1995**. 235p.
- NAVARROT L.** Caractérisation et modélisation des flux d'eau et de MES sur le site de la mine de Poro (projet Hydromine). Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, **2012**. 94p.

Autres références, travaux et colloques

- ALLENBACH M., MATHYS N.** Vers une gestion optimisée des flux particuliers issus du ruissellement sur les sites miniers néo-calédoniens. Présentation lors du Colloque Gouvernance Minière, Nouméa, novembre 2011.
- CAMENEN B.** Transport solide dans le lit des cours d'eau. Cours de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, **2010**. 62p.
- DIREN de Lorraine.** Cahier des charges pour la gestion des eaux pluviales. Réalisé à partir de la doctrine « eaux pluviales » en collaboration avec les services de police de l'eau de Lorraine (DDAF 54, 55, 57 et 88, DDE 55 et 88, SNNE), le CETE de l'Est (+ LRPC) et le service ingénierie de la DDAF 57. **2006**. 73p.
- ENNOUR S., BART F.** Guide pratique techniques et ouvrages hydrauliques. Le Nickel – SLN, **2005**. 24p.
- GOUE G.** Efficacité des ouvrages de gestion des eaux : bassins de sédimentation, détermination d'un critère de rejet. Rapport de stage de DU environnement, Université de Nouvelle-Calédonie, **2010**. 25p.
- MATHYS N.** Estimation de l'effet du laminage dans plusieurs retenues de faible volume sur les crues de la Baillaury. Etude du Cemagref, groupement de Grenoble, **1993**. 79p.
- MICA ENVIRONNEMENT.** Synthèse du suivi hydrologique et sédimentologique du creek Tontou novembre 2009 à novembre 2012. Rapport d'étude pour la SLN, **2009**. 136 pages.
- MICA ENVIRONNEMENT.** Rapport de synthèse du suivi hydrologique et hydrogéologique du massif de Poum, Août 2010 à Août 2011, Le Nickel-SLN-Centre de Poum, **2011**. 111p.
- OUETCHO A.** Protocole de suivi des bassins de sédimentation. Rapport de stage de DU environnement, Université de Nouvelle-Calédonie, **2010**. 19p.
- ROMIEUX N.** Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle-Calédonie. Rapport de la DAVAR : Direction des Affaires Vétérinaires, Alimentaires et Rurales, **2011**. 83p.
- Charte des bonnes pratiques minières**, version 8.4, 4, Nouvelle-Calédonie, **2011**.
- SADOWSKI A.** Cours de traitement des eaux usées, Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement, formation initiale, **2009**.

ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

- ANNEXE 1 : Interlocuteurs rencontrés
- ANNEXE 2 : Localisation des bassins-versants d'étude sur les différentes mines
- ANNEXE 3 : Extraits concernant la conception d'ouvrages de décantation, selon la Charte des bonnes pratiques minières, version 8.4, Mai 2011, II.3.3
- ANNEXE 4 : Carte de localisation des ouvrages de Koniambo
- ANNEXE 5 : Tableau de données concernant les ouvrages de décantation de Goro
- ANNEXE 6 : Equations de Dobbins et Camp
- ANNEXE 7 : Pluviométries journalières, mensuelles ou épisodiques sur les sites de Poro et Poum.
- ANNEXE 8 : Localisation des pluviomètres sur le site de Poro
- ANNEXE 9 : Débits de pointe par jour sur la mine de Poum (2010-2011)
- ANNEXE 10 : Tableaux de synthèse des données de débits en Nouvelle-Calédonie
- ANNEXE 11 : Lames d'eau et volumes totaux écoulés par années d'études, à Poro et à Poum
- ANNEXE 12 : Calcul des temps de concentration, entrant en compte dans la détermination des intensités de pluie pour le calcul du débit de crue, sur mine
- ANNEXE 13 : Tableau récapitulatif des données concernant les petits bassins versants miniers du projet CNRT
- ANNEXE 14 : Extrait modifié du Plan de Gestion des Eaux 2011 de la SLN pour le site minier de Poro et tables de données associées aux ouvrages du bassin versant Denise
- ANNEXE 15 : Carte de localisation des ouvrages de gestion des eaux sur le site de Poum et exemple de table d'information sur les ouvrages que l'on peut rencontrer dans le PGE
- ANNEXE 16 : Plan de localisation des ouvrages de Goro
- ANNEXE 17 : Gammes de concentrations en MES dans les écoulements d'eau superficiels de Poro
- ANNEXE 18 : Représentation de l'effet *first flush*, pour l'épisode 125 à l'amont
- ANNEXE 19 : Bilans annuels sédimentaires pour les événements mesurés ou obtenus par calcul, à Poro
- ANNEXE 20 : Registre du curage des ouvrages de décantation de Poro, relevé par les chefs d'exploitation minière pour la période novembre – décembre 2011.
- ANNEXE 21 : Répartition des flux en fonction des pluies et des années
- ANNEXE 22 : Prélèvements d'eau dans FRN01, à Poro, pour analyse de concentration en MES
- ANNEXE 23 : Débits et concentrations MES aux seuils amont et aval, et valeur de concentration du prélèvement ponctuel dans FRN01 pour la crue du 18/04/12
- ANNEXE 24 : Détail sur les zones de prélèvement d'échantillons pour analyse granulométrique de dépôts au sein des décanteurs des différents sites miniers.
- ANNEXE 25 : Dispositif d'extraction de carotte dans du matériel humide et meuble. Observation de plusieurs couches sur la carotte extraite (BS6 à Goro) après séchage à l'étuve afin de permettre la conservation de la structure des sédiments.
- ANNEXE 26 : Note de détail sur le prélèvement d'échantillons pour analyse granulométrique
- ANNEXE 27 : Manipulation de granulométrie par tamis
- ANNEXE 28 : Courbes granulométriques des échantillons obtenues par tamisage
- ANNEXE 29 : Discussion sur les limites du granulomètre laser et l'agrégation des particules lors des mesures.
- ANNEXE 30 : Courbes granulométriques réalisées par granulométrie laser sur des échantillons moyens,
- ANNEXE 31 : Tableaux de résultats d'analyse granulométriques des dépôts dans les décanteurs de Koniambo (SW34 et SW35) et schémas reconstituants l'alternance des couches au sein des carottes prélevées.
- ANNEXE 32 : Mesures granulométriques des différentes couches d'un bloc de sédiment prélevé au centre de FRN01 et correspondance avec des épisodes pluvieux
- ANNEXE 33 : Courbes associées aux analyses granulométriques des prélèvements de MES dans l'écoulement en temps de crue, lors de la saison de mesures 2011
- ANNEXE 34 : Exemple de calcul de la concentration en MES en sortie d'ouvrage par la méthode du Mélange Intégral, sur un épisode de crue à Poro, au niveau du décanteur FRN01.

ANNEXE 1 : Interlocuteurs rencontrés

Koniambo :

- Nicolas Mathieu (chef du suivi environnemental du département hydrologie),
- Siham Bendenia (ingénieur d'étude du même service),
- Sarah Eurissouke (Ingénieur d'étude du service de gestion des eaux sur mine).
- Nicolas Caze d'A2EP, bureau d'étude calédonien ayant participé à des études pour KNS, notamment en partenariat avec d'autres bureaux d'études (Golder, et KCB).

Poum :

- Les représentants environnementaux de la SLN, Frédéric Bart (chef du service environnement minier du département géologie et études minières) et
- Henri Hmakone (chef de projet environnement),
- Steeven Cogulet, technicien-géologue travaillant sur le site de Poum et réalisant notamment les mesures hydrologiques
- Timothée Dupaigne, ingénieur du bureau d'étude calédonien Mica Environnement

Poro :

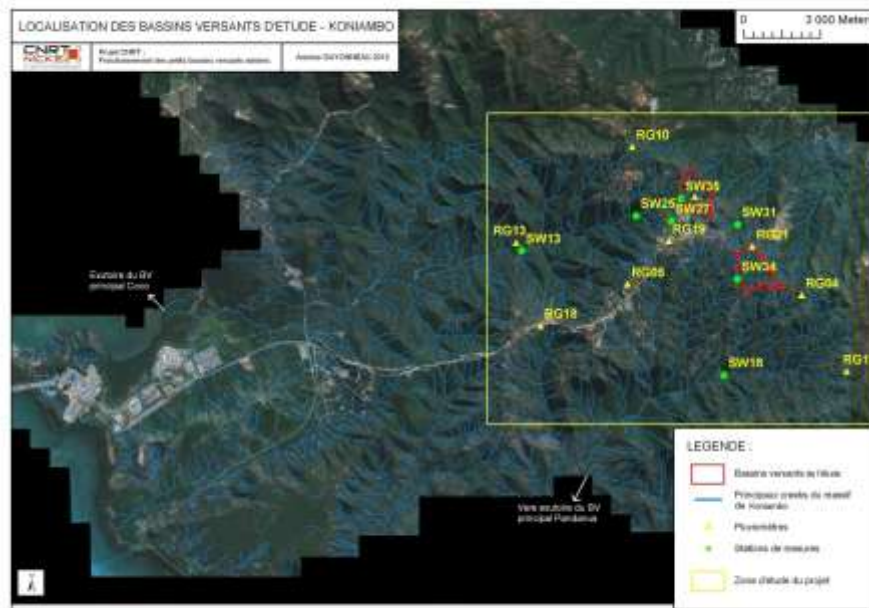
- les mêmes interlocuteurs du service environnement de la SLN que ceux rencontrés pour Poum,
- Amar Chalal et Marie-France Mandaoue, chefs d'exploitation sur le site de Poro.

Goro :

- Julien Blanche (ingénieur conformité et opération mine),
- Yann Vessiler (ingénieur du service environnement minier).

ANNEXE 2 : Localisation des bassins-versants d'étude sur les différentes mines (extraits d'Arc-GIS réalisés par Antoine Guyonneau).

- Koniambo : On s'intéresse au bassin de la Pandanus, considéré comme peu impacté par l'activité minière à venir, et le bassin de la Coco. Ces bassins versants étant assez grands, ils ont été découpés en sous-bassins versants par les mineurs. On s'intéresse plus particulièrement au sous-bassin de la Coco amont lié à la station de mesure SW35 et au bassin de décantation du même nom, et au sous-bassin de la Pandanus amont, lié à la station (et au bassin de décantation) SW34.



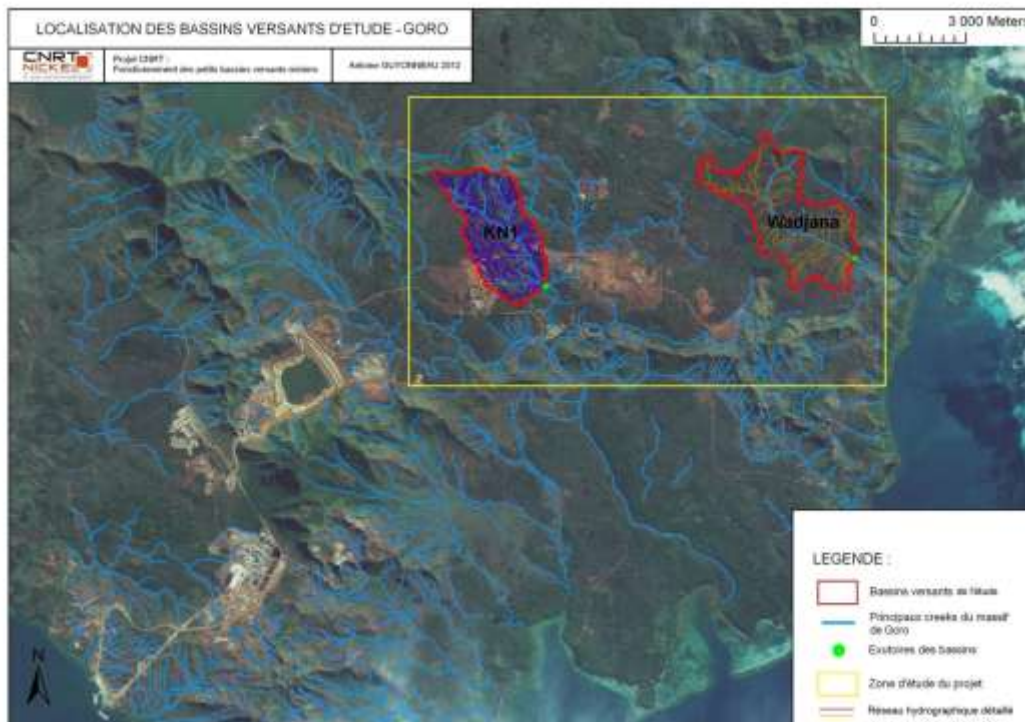
- Poum : Le projet CNRT s'intéresse aux bassins versants miniers de « Povio » et « Titch », ceux-ci ayant été équipés récemment. Povio est plus fortement impacté par l'activité minière.



- Poro : Les bassins versants retenus pour le projet CNRT sont les sous-bassins du bassin versant minier « Denise » retenu pour le projet Hydromine. Ces bassins sont le sous-bassin dit « amont » et le sous-bassin dit « aval ».



- Goro : Les bassins versants proposés pour le projet CNRT sont le bassin versant de la Wadjana, considéré comme intact et le bassin versant KN1, sous-bassin de la Kwé Nord, considéré comme impacté.



ANNEXE 3 : Extraits concernant la conception d'ouvrages de décantation, selon la Charte des bonnes pratiques minières, version 8.4, Mai 2011, II.3.3 :

II.3.3 - Dimensionnement des ouvrages

« Les ouvrages permanents destinés à la collecte des eaux, à leur dérivation ainsi que les déversoirs des bassins et retenues de décantation permanents sont dimensionnés pour pouvoir, au minimum, évacuer sans risque, un débit de pointe de récurrence centennale. »

« Les bassins et retenues de décantation sont dimensionnés pour retenir, sans débordement, le volume d'eau généré par une pluie d'une durée de 2 heures de temps et d'une récurrence de 2 ans. Dans le cas où il n'est raisonnablement pas envisageable de retenir cette fréquence, la récurrence de l'événement dimensionnant est justifiée au regard de la durée de vie des ouvrages et des enjeux environnementaux. »

« D'une manière générale, le dimensionnement de chaque ouvrage est justifié au regard des objectifs (sédimentation, laminage de crues, durée de vie,...), des enjeux environnementaux et sécuritaires et des contraintes techniques et économiques. Les notes de calculs hydrologiques et hydrauliques, les plans de conceptions et les principes de construction sont annexés. A défaut d'enregistrement sur le site, les valeurs de référence de la pluviométrie proviennent de la station météorologique la plus représentative. »

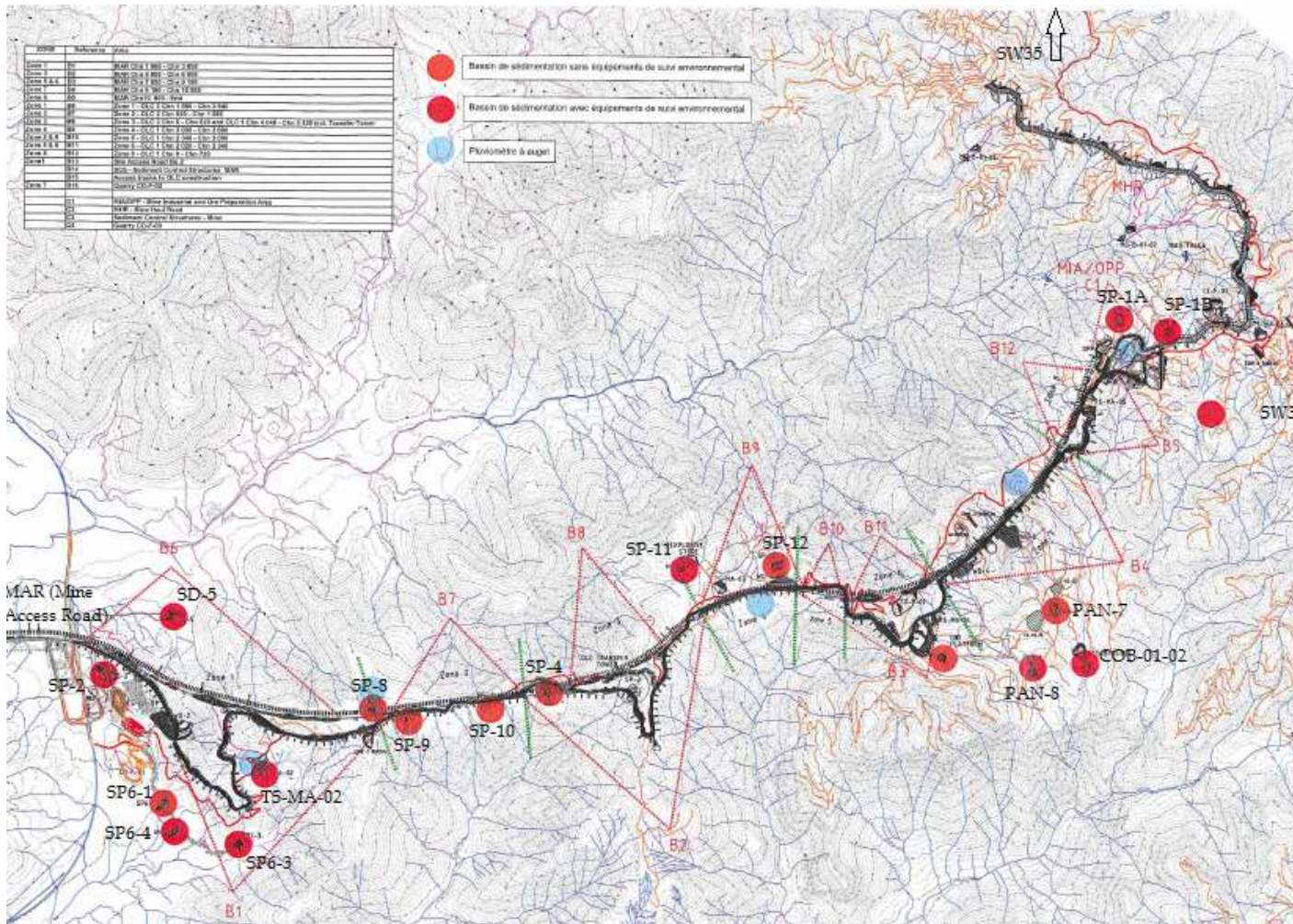
« Le coefficient de ruissellement est justifié en fonction de la récurrence de l'événement de référence, la nature des terrains et les conditions de recouvrement par la végétation, à défaut il est au minimum égal à 0.8. »

La charte des bonnes pratiques minières fait la distinction entre « bassin de décantation » et « décanteur » ;

« **Bassin de décantation** : bassin de rétention d'eau aménagé par creusement dans le terrain naturel, généralement muni d'un dispositif d'évacuation des crues et servant à la décantation des eaux de ruissellement ».

« **Décanteur** : trou creusé dans le sol servant à récupérer une certaine quantité d'eau souillée par des fines particules en suspension. Bassin de décantation de faible dimension (< 50 m³ environ) ».

ANNEXE 4 : Carte de localisation des ouvrages de Koniambo



ANNEXE 5 : Tableau de données concernant les ouvrages de décantation de Goro

Bassin de sédimentation	Date création	Volume (m3)	Volume de sédiments max contenu (30% de V total) (m3)	Surface du BV de l'ouvrage (Ha)	Origine des eaux de ruissellement (BV amont)	Dispositif d'évacuation des eaux	Rejet des eaux en sortie d'ouvrage
BS1	avr-07	6 600	1 980	12	MHR et plateforme globale du FPP	1 buse de 1200 mm, 1 vanne de vidange	Vers creek Kué Ouest via l'affluent KO5 (Kué Ouest 5)
BS2	mai-07	1 300	390	2,65	"	1 Déversoir (crue centennale)	"
BS3	06/2007 - 11/2009	15 084	4 525	20	Emergency Stockpile, MHR	1 Déversoir (crue centennale), 1 vanne de vidange	Vers la Kué Nord via l'affluent KN1 (Kué Nord 1) et BSKN
BS4	juil-08	5 581	1 675	3	MHR	"	"
BS5	oct-08	18 350	5 505	23	SMBT et MHR	"	Vers la Kué Nord, en amont de BSKN
BS6	sept-11	106 000	31 800	136	SM1	2 déversoirs (crues cinquantenales), 2 vannes de vidange	Vers creek Kué Ouest via affluent KO5
BS7A	sept-08	34 585	10 375	39	VSKE et MHR	1 buse de 600 mm, 1 vanne de vidange	vers BS7B via 2 buses 1000 mm, puis vers Kué Est
BS8	juin-09	32 500	9 750	19	VSKE	1 Déversoir (crue centennale), 1 vanne de vidange	Vers le Lac Robert, au Nord
BS9	juin-09	23 000	6 900	35	VS5	"	Vers le Lac Goro puis vers BSC
BSC*	déc-05	45 000	13 500	*	Fosse minière	"	Vers Kué nord, amont de BSKN
BSO	oct-04	9 000	2 700	4,5	VSEM	Projet de busage	"
BSKN	nov-08	365 000	109 500	1 140	Toute la mine sauf VSKE	1 Déversoir (crue millénaire), 2 vannes de vidange	Vers Kué Ouest

Observations complémentaires

Les eaux entrant dans les ouvrages peuvent provenir de la *Mine Hall Road* (MHR), piste principale de la mine, de l'*Emergency Stockpile* (zone de stockage d'urgence, produisant donc des fines), du *Stock de Minerai Basse Teneur* (SMBT), du *Stock de Minerai 1* (SM1), de la *Verse à Stériles de la Kué Est* (VSKE), de la *Verse à Stérile n°5* (VS5), de la *verse à Stérile de l'Exercice Minier* (VSEM).

Trois types de terrains sont identifiés :

- les terrains latéritiques produisant des sédiments fins (correspondants aux stocks)
- les terrains de cuirasse
- les terrains mixtes avec tout type de granulométries

BS1 est un ouvrage qui compte 2 entrées. Il est sous-dimensionné de 20% par rapport à la capacité qu'il devrait faire. Sa surface est connue (2642m²) ainsi que son périmètre (212m). Le système de vidange de BS3 est également sous-dimensionné et pose des difficultés à être curé en raison de la quantité de sédiments qu'il récupère. BSO est au contraire surdimensionné et récupère des eaux de la verse en amont, terminée et revégétalisée. Il reçoit donc des eaux propres en général. BSC constitue le bassin central de la mine. Il s'agit d'un ouvrage évolutif qui s'agrandira au fur et à mesure de l'avancée de la fosse minière. Son volume n'est donc pas fixe et la surface de son bassin versant est dépendante de la topographie de la fosse. BSKN est conçu en parallèle des autres ouvrages. Le volume total de rétention de sédiments permis par les ouvrages, sans compter BSKN, est de 89 100 m³. Le volume de rétention total de rétention d'eau, en enlevant les 30% de volume réservé aux sédiments et sans prendre en compte BSKN est de 207 900 m³.

ANNEXE 6 : Equations de Dobbins et Camp

Solution de l'équation de convection-dispersion sous forme simplifiée proposée par Dobbins :

$$V \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + V_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (15)$$

Avec :

C : Concentration

V : Vitesse moyenne de l'écoulement,

V_s : Vitesse de chute des particules solides

D : coefficient de dispersion

Solution proposée sous la forme :

$$C(z, t) = e^{\frac{V_s z}{2D}} \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\alpha_n^2 D + \frac{V_s^2}{4D}\right)t} \cdot C_n \cdot Z_n \quad (16)$$

Avec :

$$C_n = \frac{2\alpha_n^2 \cdot V_s C_0 \cdot e^{\frac{V_s h}{2D}} \cdot h_n}{\left(\alpha_n^2 \cdot D + \frac{V_s^2}{4D}\right) \cdot \left[\left(\alpha_n^2 + \frac{V_s^2}{4D}\right) h + \frac{V_s}{D}\right]} \quad (17)$$

$$Z_n = \cos(\alpha_n \cdot z) + \frac{V_s}{2D\alpha_n} \sin(\alpha_n z) \quad (18)$$

$$h_n = Z_n(z = h) \quad (19)$$

Les coefficients α_n sont les solutions réelles de :

$$2 \cos(\alpha_n h) = \frac{\alpha}{\frac{V_s}{2D}} - \frac{V_s}{\alpha} \quad (20)$$

Calcul de l'efficacité η d'un l'ouvrage vis-à-vis de l'élimination des MES (proposé par Camp à partir de la solution de Dobbins) :

$$\eta = \frac{\int_{z=0}^{z=h} C_0(z, 0) dz - \int_{z=0}^{z=h} C(z, \frac{L}{V}) dz}{\int_{z=0}^{z=h} C_0(z, 0) dz} = 1 - 8x^2 e^x \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{\alpha_n^2 h_n e^J}{[x^2 + 2x + \alpha_n^2][x^2 + \alpha_n^2]} \right) \quad (21)$$

Avec

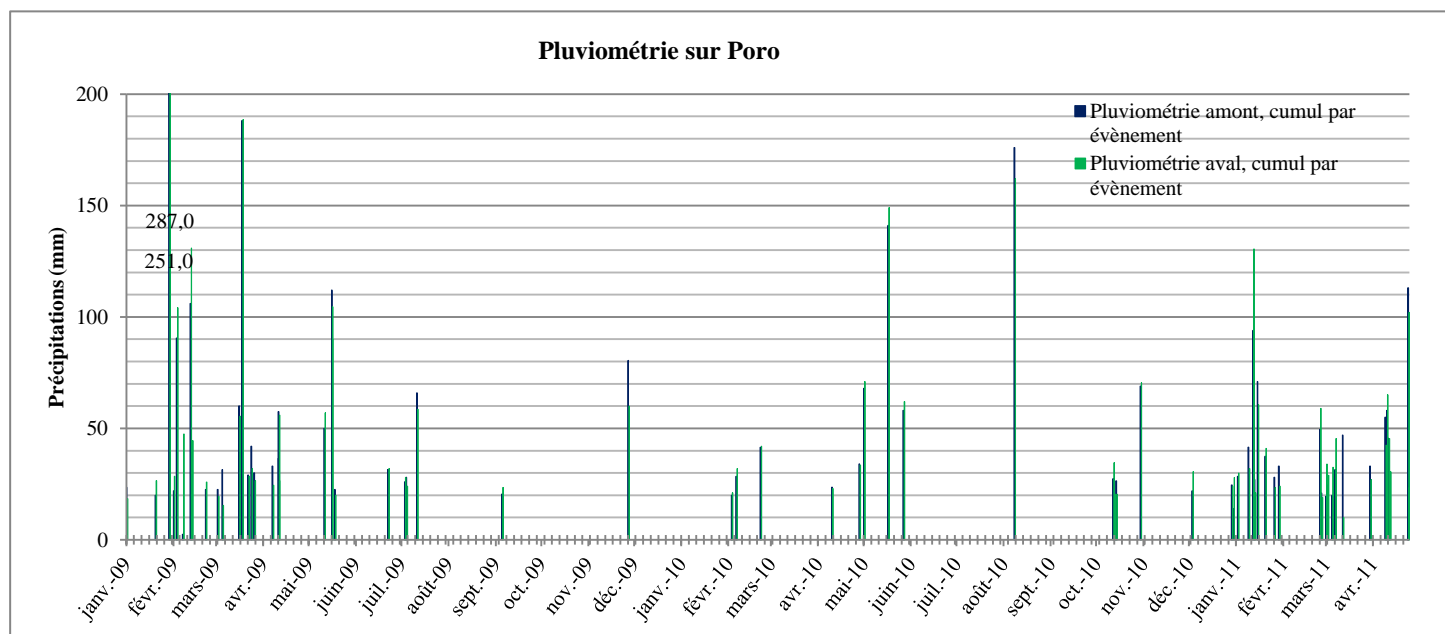
$$J = -(x^2 + \alpha_n^2) \frac{V_s}{2x \frac{Q}{S}} \quad (22)$$

Et :

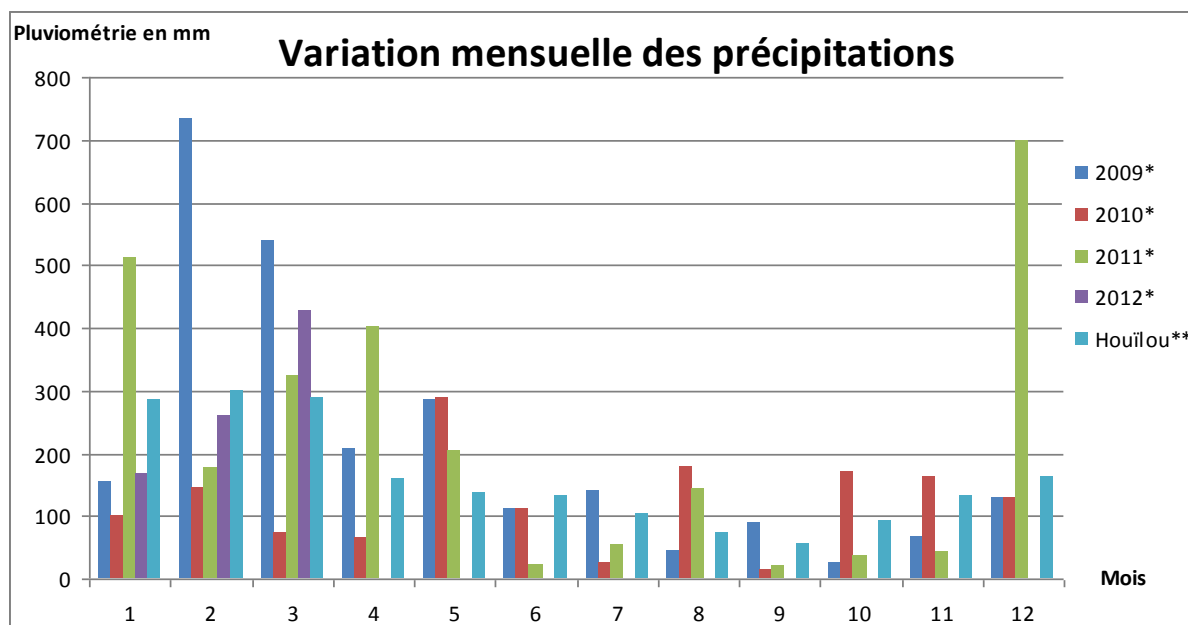
$$X = \frac{V_s \cdot h}{2 \cdot D} \quad (23)$$

ANNEXE 7 : Pluviométries journalières, mensuelles ou épisodiques sur les sites de Poro et Poum.

- Pluviométrie par épisode, enregistrée sur la période janvier 2009 – avril 2011 au pluviomètre amont et au pluviomètre aval de Poro



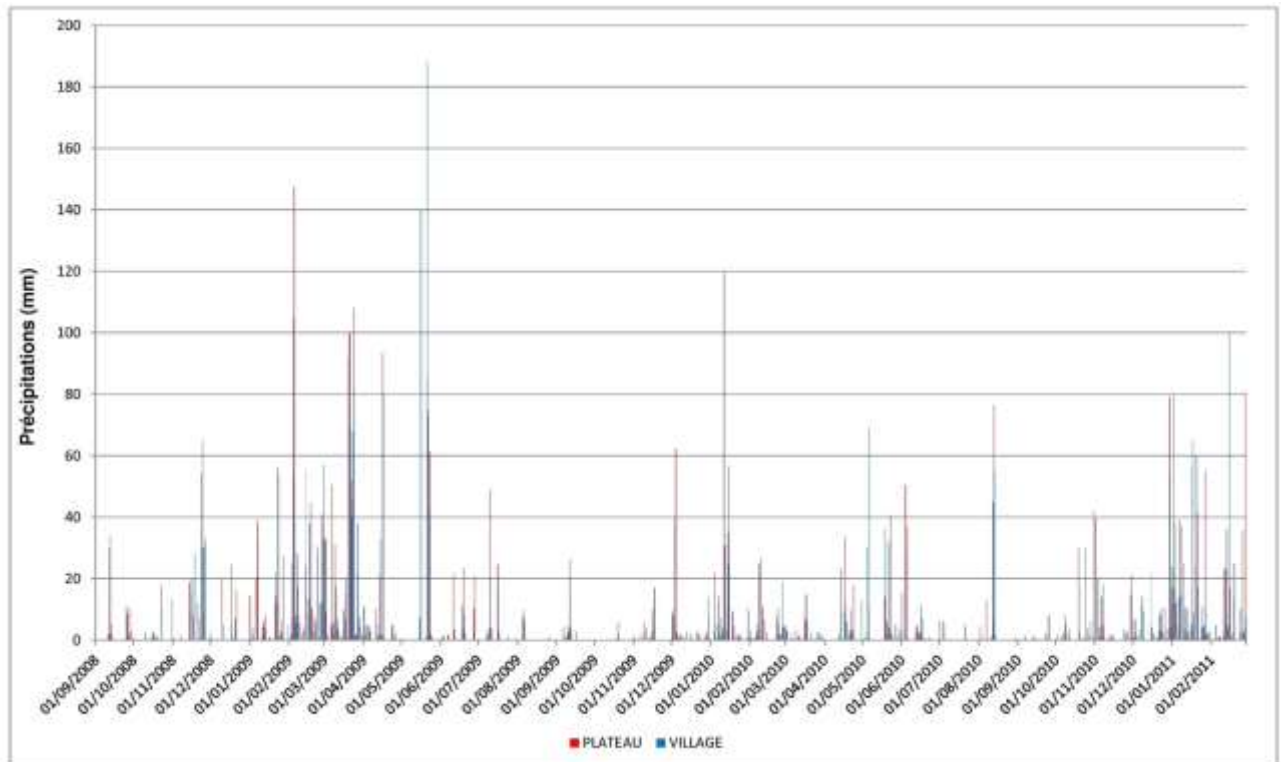
- Variation mensuelle de la pluviométrie sur Poro Amont et Houailou de 2008 à mars 2012.



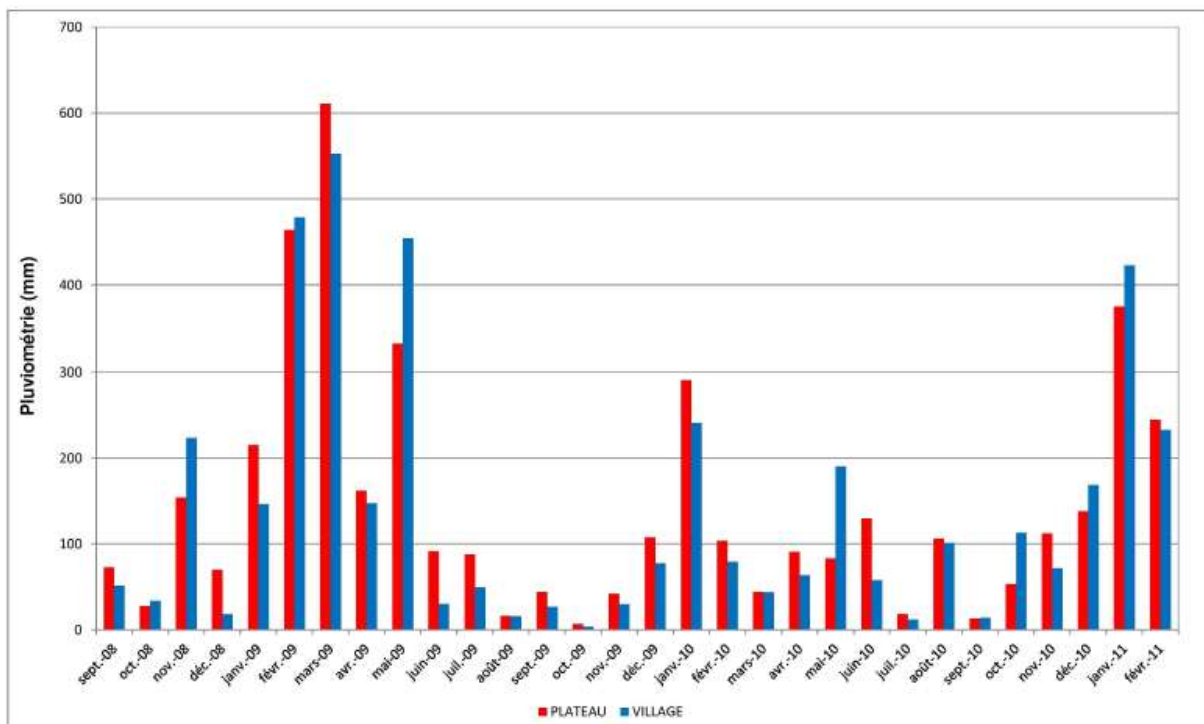
* Année 2009 incomplète : 17 jours de donnée manquants, correspondant aux 17 premiers jours de décembre 2008 où les pluviomètres n'étaient pas en service

** Année 2012 incomplète : données des mois d'avril et mai manquantes.

- *Pluviométrie journalière enregistrée sur la période septembre 2008 – Février 2011 sur le plateau de Poum et au Village de Poum. Données extraites de [MICA ENVIRONNEMENT, 2011].*



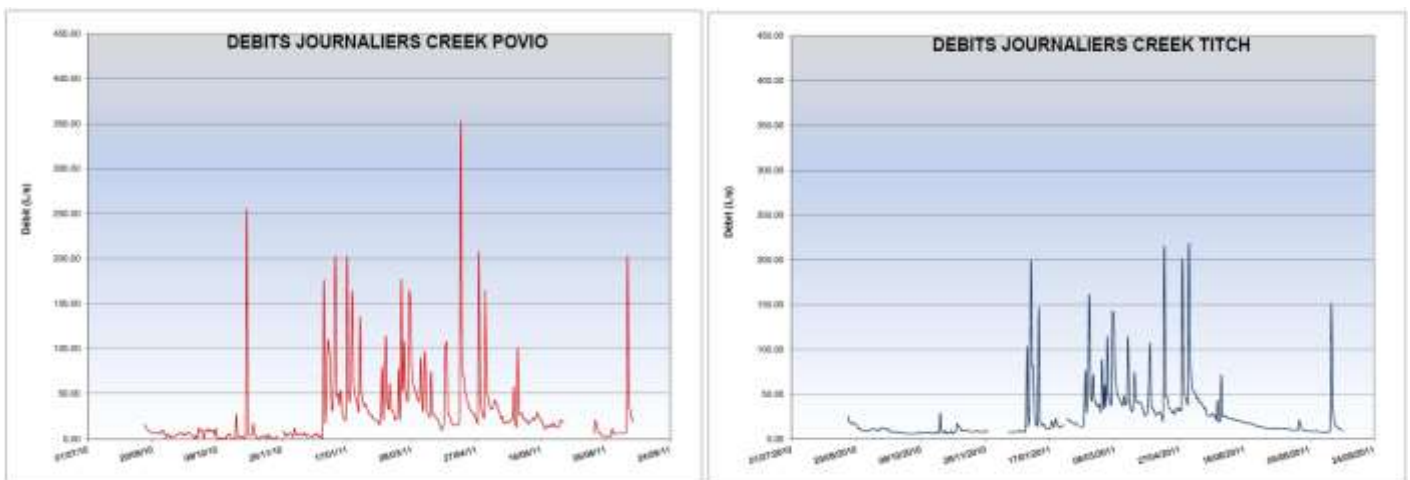
- *Pluviométrie mensuelle enregistrée sur la période septembre 2008 – Février 2011 sur le plateau de Poum et au Village de Poum. Données extraites de [MICA ENVIRONNEMENT, 2011].*



ANNEXE 8 : Localisation des pluviomètres sur le site de Poro (carte extraite de [NAVARROT, 2012])



ANNEXE 9 : Débits de pointe par jour sur la mine de Poum (2010-2011)



ANNEXE 10 : Tableaux de synthèse des données de débits en Nouvelle-Calédonie, extraits de [ALRIC, 2012]

○ Modules⁹ interannuels et débits caractéristiques d'étiage :

Stations & Bassins Versants				Débits journaliers classés (Loi Log Normale)										Débits journaliers classés (Empirique)					Q _{95%}	
N°	Noms	Durée obs. (ans)	Superficie (km ²)	Altitude (m)	Drain Hydr. (km)	0.01 (m3/s)	0.10 (m3/s)	0.25 (m3/s)	0.50 (m3/s)	0.75 (m3/s)	0.90 (m3/s)	0.99 (m3/s)	0.01 (m3/s)	0.10 (m3/s)	0.25 (m3/s)	0.50 (m3/s)	0.75 (m3/s)	0.90 (m3/s)		0.99 (m3/s)
1	Rivière des Lacs	49	77	235	14.1	0.2	0.6	1.2	2.7	5.9	11.9	40.6	0.2	0.6	1.3	2.5	5.5	12.5	46.3	32.7
2	Rivière Bleue	32	33	1	10.9	0.1	0.3	0.5	0.9	1.9	3.6	23.4	0.1	0.3	0.4	0.8	1.8	3.7	15.5	25.3
3	Rivière des Pirogues	16	104	5	17.6	0.4	0.9	1.5	2.7	4.8	8.2	20.3	0.5	0.9	1.5	2.5	4.4	8.3	32.1	23.7
4	La coulée	15	44	10	10.9	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	3.9	11.9	0.1	0.3	0.4	0.9	1.9	3.8	18.1	20.9
5	Dumbéa Est	31	51	120	11.7	0.1	0.4	0.7	1.4	2.8	5.3	15.6	0.2	0.4	0.7	1.2	2.7	5.5	28.6	23.8
6	Dumbéa Nord	38	32	50	8.4	0.1	0.2	0.4	0.8	1.5	3.0	9.0	0.1	0.2	0.4	0.7	1.4	3.2	17.4	21.4
7	Couvelée	39	40	30	12.4	0.1	0.2	0.3	0.6	1.2	2.3	6.7	0.1	0.2	0.3	0.5	1.1	2.5	12.2	13.4
8	Tontouta	41	385	22	37.6	0.9	2.2	3.7	6.7	12.2	20.9	52.5	1.8	2.6	3.7	5.7	10.2	21.0	124.0	14.9
9	Ouenghi	45	212	10	26.5	0.4	1.1	1.9	3.5	6.6	11.6	30.9	0.8	1.3	1.8	3.0	5.7	12.6	65.7	14.0
10	La Foa	28	116	19	22.1	0.0	0.2	0.4	0.9	2.1	4.5	16.7	0.1	0.2	0.4	0.8	1.7	4.5	43.6	6.7
11	Boghen	49	113	31	19.9	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	4.0	12.4	0.2	0.3	0.5	0.8	1.6	4.2	31.6	7.4
12	Papaïnda	27	9	50	5.8	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	1.4	6.4
13	Boutana	43	181	28	34.4	0.0	0.2	0.3	0.8	1.8	3.8	14.0	0.1	0.2	0.3	0.7	1.5	4.0	32.0	3.7
14	Faténaoué	38	111	30	30.6	0.0	0.1	0.1	0.4	0.9	2.3	10.4	0.0	0.1	0.1	0.3	0.8	2.3	15.2	2.9
15	Diahot	43	248	3	54.6	0.2	0.6	1.1	2.3	4.6	9.7	25.9	0.4	0.8	1.1	1.9	3.4	8.5	84.8	7.6
16	Oualème	31	325	10	33.6	0.5	1.5	2.9	5.8	11.8	22.2	66.0	1.1	1.9	2.9	4.7	9.7	22.2	200.9	14.5
17	Tipinje	52	252	7	32.7	0.1	0.4	1.0	2.2	5.2	11.1	40.9	0.3	0.6	0.9	1.8	3.8	12.0	145.8	7.0
18	Tiwaka	47	261	15	37.2	0.5	0.5	2.5	5.0	10.0	18.6	53.9	0.9	1.6	2.5	4.3	8.1	17.4	157.2	16.5
19	Tchamba	45	72	15	19.1	0.1	0.4	0.8	1.8	3.8	7.5	24.3	0.2	0.5	0.8	1.6	3.5	7.8	40.1	22.4
20	Nimbaye	35	283	3	40.8	0.2	0.7	1.5	3.2	7.2	14.8	50.9	0.4	0.9	1.4	2.7	6.4	16.2	109.4	9.4
21	Houailou	52	266	18	24.4	0.3	0.9	1.7	3.4	7.0	13.3	40.1	0.5	1.1	1.6	3.0	6.0	13.8	92.3	11.2
22	Thio	22	345	15	33.4	0.4	1.1	2.0	4.0	7.8	14.4	41.3	0.8	1.3	2.0	3.5	6.4	13.7	120.0	10.1

○ Débits maximum de crue

Stations & Bassins Versants			Débits Maximums de Crues							Paramètres loi			Tps Conc [*] (h)
N°	Noms	Superficie (km ²)	Q1 (m ³ /s/km ²)	Q2 (m ³ /s/km ²)	Q5 (m ³ /s/km ²)	Q10 (m ³ /s/km ²)	Q20 (m ³ /s/km ²)	Q50 (m ³ /s/km ²)	Q100 (m ³ /s/km ²)	Qd	P0	c	
1	Rivière des Lacs	77	1.5	2.6	4.8	6.2	7.6	9.3	10.6	146	150	10.5	
2	Rivière Bleue	33	2.0	2.6	4.4	5.7	6.9	8.4	9.5	55	65	4.2	
3	Rivière des Pirogues	104	1.7	2.4	4.5	5.8	7.2	8.9	10.1	190	180	1.4	
4	La coulée	44	2.3	4.0	9.2	12.6	15.9	20.1	23.3	200	100	2.0	
5	Dumbéa Est	51	3.9	5.7	11.2	14.9	18.4	23.0	26.4	250	200	1.3	
6	Dumbéa Nord	32	3.1	4.7	9.6	12.8	16.0	20.0	23.0	140	100	1.5	
7	Couvelée	40	1.1	2.5	6.9	9.8	12.6	16.2	18.9	155	45	1.7	
8	Tontouta	385	0.7	1.7	4.6	6.5	8.4	10.8	12.7	1000	270	5.1	
9	Ouenghi	212	1.0	1.9	4.6	6.3	8.0	10.2	11.9	500	220	3.8	
10	La Foa	116	3.0	3.9	6.7	8.5	10.2	12.5	14.2	280	350	2.6	
11	Boghen	113	2.7	4.2	8.8	11.9	14.9	18.7	21.6	465	300	1.6	
12	Papaïnda	9	1.3	2.3	5.5	7.5	9.5	12.1	14.0	25	12	0.7	
13	Boutana	181	1.4	2.4	5.6	7.7	10.4	12.4	14.4	510	250	2.4	
14	Faténaoué	111	1.5	2.8	6.8	9.4	12.0	15.2	17.7	390	170	3.7	
15	Diahot	248	2.0	2.9	5.8	7.7	9.5	11.9	13.6	625	500	4.4	
16	Oualème	325	4.9	6.5	11.4	14.6	17.7	21.7	24.7	1400	1600	1.9	
17	Tipinje	252	3.2	5.0	10.6	14.3	17.9	22.5	26.0	1250	800	3.7	
18	Tiwaka	261	3.3	4.7	9.3	12.3	15.2	19.0	21.8	1050	850	3.8	
19	Tchamba	72	4.4	6.6	13.6	18.2	22.6	28.3	32.6	440	315	1.1	
20	Nimbaye	283	2.1	3.9	9.6	13.3	16.8	21.5	24.9	1400	600	2.7	
21	Houailou	266	1.9	2.5	5.4	8.1	12.8	17.8	24.3	450	500	-0.4	
22	Thio	345	2.2	3.8	8.7	12.0	16.1	19.2	22.2	1500	750	3.9	

ANNEXE 11 : Lames d'eau et volumes totaux écoulés par années d'études, à Poro et à Poum (données extraites de [MICA ENVIRONNEMENT, 2011] et [NAVARROT, 2012]).

		Poro (67 ép)		Poro (266 ép)		Poum*	
		Amont	Aval	Amont	Aval	Povio	Titch
Lame d'eau écoulee totale (mm)	2009	765	426,1	1073,6	1744,1	855	974
	2010	182,4	70	329,5	215,1		
	2011	372,8	156,6	703,9	538,2		
Taille BV (km ²)		0,09	0,304	0,09	0,304	0,995	0,778
Volume total écoulé (m ³)	2009	68 882	129 527	96 623	530 214	855 034	745 201
	2010	16 412	21 289	29 656	65 371		
	2011	33 556	47 613	63 352	163 612		

* Données mesurées à Poum entre septembre 2010 et septembre 2011

⁹ Le module est la moyenne annuelle des débits

ANNEXE 12 : Calcul des temps de concentration, entrant en compte dans la détermination des intensités de pluie pour le calcul du débit de crue, sur mine

- Pour une pente de bassin versant supérieure à 30%, le temps de concentration (en heures) est calculé selon la relation suivante ;

$$t_c = \frac{1,5L + 4\sqrt{A}}{0,8\sqrt{H}}$$

Avec :

L : Longueur du plus long chemin d'écoulement (km)

A : Surface du bassin versant (km²)

H : Dénivellé moyen (m) calculé par différence entre la moyenne d'altitude (entre le point le plus haut et le point le plus bas) et l'altitude du point le plus bas

- Pour une pente de bassin inférieure à 30%, le temps de concentration (en secondes) est défini par la relation suivante :

$$t_c = \frac{L}{V}$$

Avec :

L : Longueur du plus long chemin d'écoulement (m)

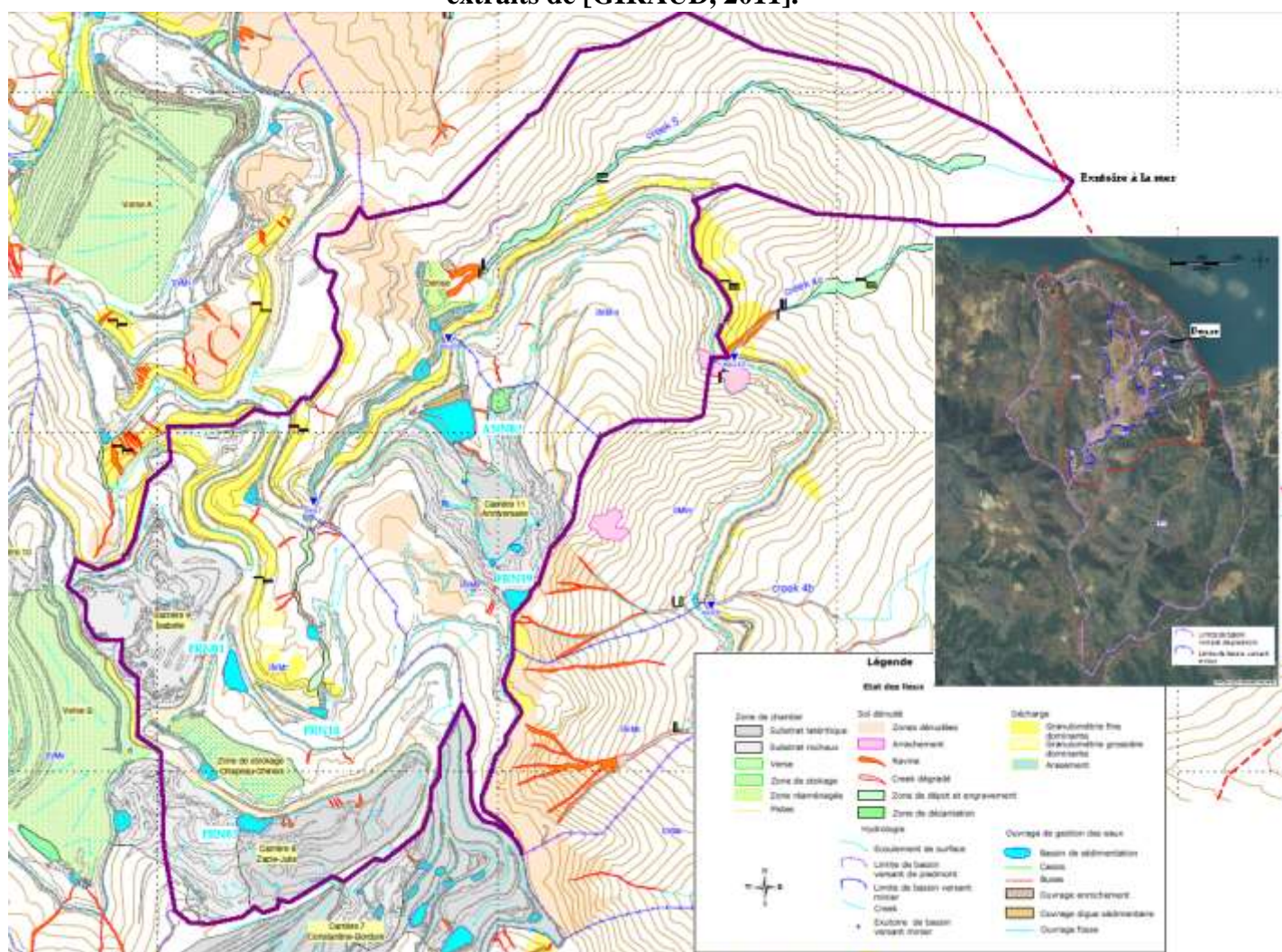
V : Vitesse de l'écoulement (m/s), définie selon la pente et les caractéristiques du terrain. Le tableau suivant, extrait du guide pratique technique de la SLN (2005) présente des valeurs de vitesse selon ces paramètres ;

Pente (%)	Terrain nu	Maquis minier	Forêt
0 - 3	0,6	0,45	0,3
4 - 7	1	0,9	0,6
8 - 11	1,5	1,3	0,9
12 - 15	2,5	1,5	1,05
15 - 30	3	2,5	2

ANNEXE 13 : Tableau récapitulatif des données concernant les petits bassins versants miniers du projet CNRT (extrait de [GUYONNEAU, 2012]).

	Poro FTMC	Poro FTMC	Poum SLN	Poum SLN	Koniambo KNS	Koniambo KNS	Goro Vale INCO	Goro Vale INCO	Statistiques
Nom_BV	Poro_ami	Poro_aval	Pouvo	Titch	SW34	SW35	Wadjana	KN1	Moyenne Max Min
Distance_Noumes (km)	220	220	425	425	295	295	70	70	253 425 70
Remarques	très impacté	contient Poro amont	le plus impacté	le moins impacté	le moins impacté	verse	peu impacté	impacté	
Nom_BVP	BVP4 (confit avec BVP1)	BVP4 (confit avec BVP1)			Pandanus	Coco	pas de station	Kwé	
Pourcentage en surface des affluents en différents composants									
%_saproliite	27%	14%							
%_laterite	27%	17%							
%_peridotite	12%	9%							
Caractéristiques morphométriques									
Surface (km²)	0,090	0,304	0,995	0,778	0,482	0,366	2,720	2,110	0,981 2,720 0,090
Perimetre (m)	1315	6341	4994	4513	3556	2843	14109	9369	5905 14109 1518
Surface_developpee (km²)	0,102	0,346	1,077	0,835	0,529	0,406	2,772	2,199	1,033 2,772 0,102
Surface_BVP (km²)	0,718	0,718	*	*	1,961	1,941	*	*	1,285 1,961 0,718
Perimetre_BVP (m)	5365	5368	*	*	9423	5840	*	*	6500 9423 5368
L_rectangle_equi (m)	612	3072	1998	1839	1444	1083	6650	4178	2609 6650 612
L_rectangle_equi (m) L/l	147	99	498	423	334	338	409	505	344 505 99
Altitude_aval (m)	4,2	31,0	4,0	4,3	4,3	3,2	16,3	8,3	9,5 31,0 3,2
Altitude_moyenne (m)	295	197	56	34	709	628	150	103	272 709 103
Altitude_moyenne (m)	321	286	246	285	790	788	235	215	393 790 215
Altitude_amont (m)	366	366	384	382	898	705	340	410	478 898 340
Pente_moyenne (%)	32%	36%	37%	30%	36%	42%	14%	20%	31% 42% 14%
Pente_max (%)	147%	166%	148%	84%	118%	166%	96%	104%	129% 166% 84%
Pente_min (%)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0% 0% 0%
Kc (coeff de Gravelius)	1,42	3,22	1,40	1,43	1,43	1,32	2,40	1,81	1,80 3,22 1,32
Caractéristiques hydrologiques									
Long_creek (l1 en m)	*	597	1531	936	1243	846	3667	3438	1764 3667 397
Cumul_creek (m)	*	1916	14449	12168	6237	4364	47722	21009	13409 47722 1916
Long_creek_BVP (m)	1784	1784	4153	4153	2774	2774	*	*	2624 4153 1784
L (m)	326	870	1678	1400	994	929	2500	2158	1357 2500 326
L (m)	485	586	1034	1037	942	688	2474	1780	1128 2474 485
L/l	0,67	1,48	1,62	1,35	1,06	1,35	1,01	1,21	1,22 1,62 0,67
Lg (m)	202	492	898	879	378	324	1235	1132	693 1235 202
Ordre_Strahler_exu	*	3							3 3 3
Bassin_hydrogeol									
Bassin_mnt (km²)		0,348							0,348 0,348 0,348
Densite_drainage (DD en m)	*	6,3	14,5	15,6	12,9	11,9	17,5	10,0	12,7 17,5 6,3
Occupation du sol									
Surface_vegetalisee (km²)	0,000	0,061	0,504	0,532		0,294			0,282 0,532 0,000
%_surface_vegetalisee	0,0%	20,2%	50,7%	70,9%	0,0%	80,3%			37% 80,3% 0,0%
surface_piste (km²)	0,043	0,044	0,030	0,023					0,028 0,044 0,013
longueur_piste (%)	14,4%	14,3%	3,0%	3,2%					8,7% 14,4% 3,0%
longueur_piste (m)	981	3716	5104	4217					3505 5104 981
largeur_moyenne_piste (m)	13,3	11,7	5,9	5,9					9,2 13,3 5,9
Rembrai (%)	1%	7%							
Aire_stockage_laterite (%)	12%	5%							
Aire_stockage_saproliite (%)	3%	1%							
Iltoral									
Distance_moyenne_Exutoire_BVP_Corail (m)	1095	1098							1098 1098 1098
Surface_mangrove_exposee (km²)	0	0							0 0 0

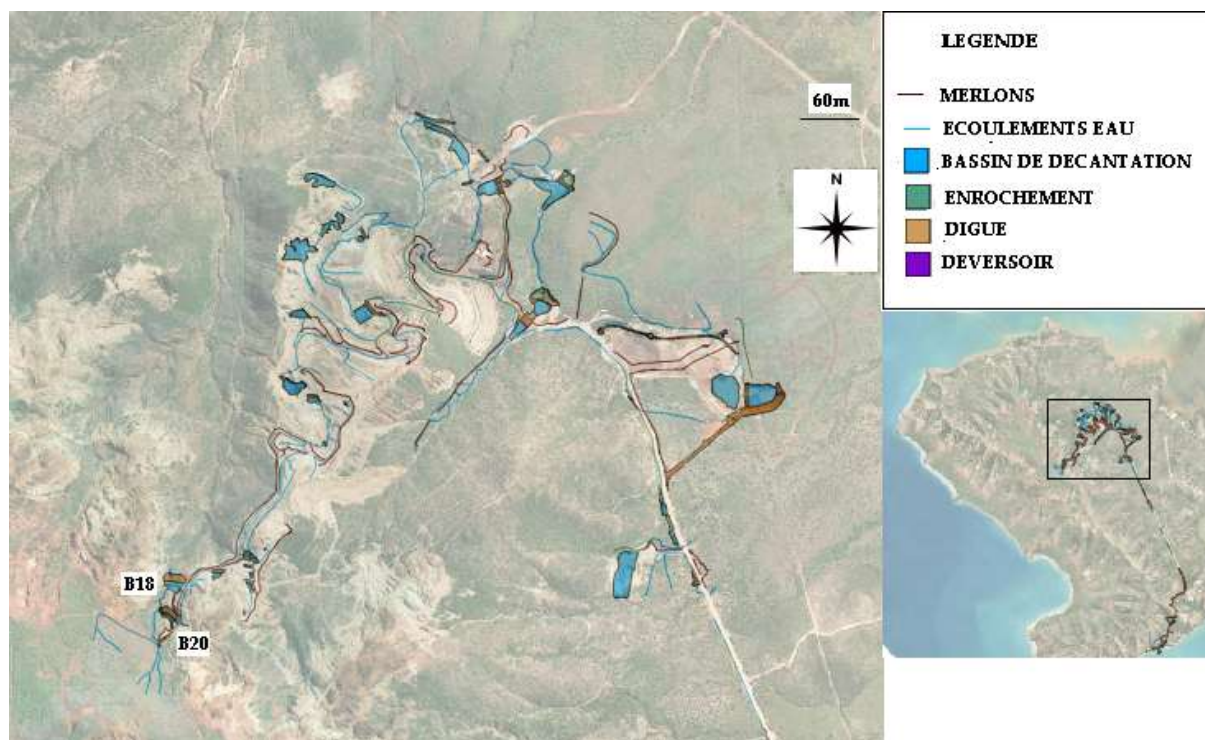
ANNEXE 14 : Extrait modifié du Plan de Gestion des Eaux 2011 de la SLN pour le site minier de Poro et tables de données associées aux ouvrages du bassin versant Denise, extraits de [GIRAUD, 2011].



						Données de terrain		Données calculées	
BV Denise						Déversoirs		Déversoirs Théoriques	
Bassin de Sédimentation	Longueurs	Largeurs	Profondeurs	Volume (m ³)	V Théorique	Largeurs (m)	Hauteurs (m)	Largeurs	Hauteurs
FRN 01	55	9	3	1485	11659			4,2	1
FRN 02	22	14	6,5	2002	4708,99	4	2	2,7	0,75
FRN 18	17	8	2,5	340	12566,71	2	2,15	4,2	1
FRN 19	22	12	1,5	396	13991,69	2	1,5	5	1
ANN 02	21	16	2,5	840	6721,28	3	2,5	2	1
DNS 03	18	10	2,5	450	28519,74	6	1	10,76	1
DNS 04	15	6	0,5	45	30215,5	6	2,5	11	1

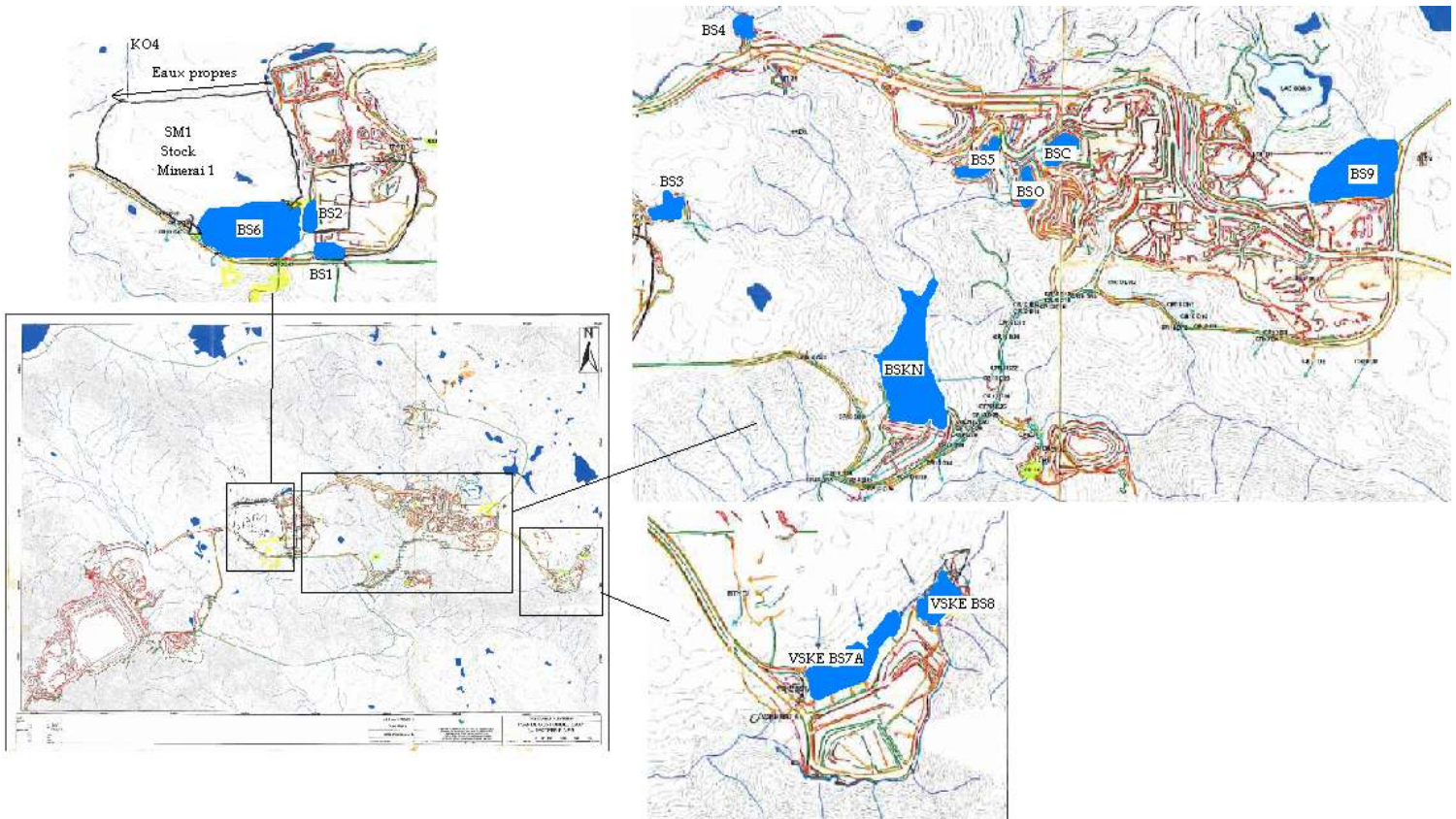
		<i>Surfaces (km²)</i>	<i>Longueurs (m)</i>	<i>Altitude Z(m)</i>	<i>C</i>	<i>Tc (min)</i>	<i>I10 (mm/h⁻¹)</i>	<i>Q₁₀(m³/s)</i>	<i>Q₁₀₀(m³/s)</i>
Caractéristiques du BV Denise		0,356	1 897,79	188	1	37,56	128	12,66	22,8
Caractéristiques des superficies drainées selon les décanteurs auxquelles elles sont associées	FRN 01	0,131	1 023,67	274	1	26,56	140	5,09	9,17
	FRN 02	0,053	541,28	306,59	1	18,3	148	2,18	3,92
	FRN 18	0,141	1 150,37	271,91	1	35,23	130	5,1	9,18
	FRN 19	0,157	1 268,71	248,76	1	28,87	138	6,03	10,85
	ANN 02	0,076	930,9	242,12	1	23,82	148	3,1	5,59
	DNS 03	0,32	1 749,95	203,88	1	35,96	130	11,57	20,83
	DNS 04	0,34	1 829,98	194,22	1	36,75	125	11,79	21,22

ANNEXE 15 : Carte de localisation des ouvrages de gestion des eaux sur le site de Poum et exemple de table d'information sur les ouvrages que l'on peut rencontrer dans le PGE. Cette table ne présente pas de nom d'ouvrage et n'est donc pas exploitée ici.



	X_CENTROID	Y_CENTROID	OBSERVATIO	ID_BVP	SURFACE	Perimetre
0	195725.695474	437330.689734	NULL	NULL	347.832	76
1	195788.806696	437391.330978	NULL	NULL	867.594	112
2	195829.301818	437710.430863	NULL	NULL	817.316	136
3	195643.605792	437722.152614	NULL	NULL	809.074	107
4	195549.444894	437833.425998	NULL	NULL	1603.28	205
5	196334.985749	437150.820862	NULL	NULL	6981.78	538
6	194969.431154	436611.500104	NULL	NULL	299.764	76
7	195277.857223	437578.480753	NULL	NULL	166.195	47
8	195277.699671	437597.384642	NULL	NULL	44.6689	26
9	195222.68576	437548.492395	NULL	NULL	199.741	67
10	195025.580252	437008.520134	NULL	NULL	12.7759	15
11	195060.997769	437013.4128	NULL	NULL	55.9316	29
12	195179.045209	437005.782901	NULL	NULL	201.636	53
13	195236.673288	437119.828594	NULL	NULL	49.4536	28
14	194964.390918	436696.418017	NULL	NULL	454.236	88
15	194963.584393	436665.787338	NULL	NULL	151.867	59
16	194972.79873	436642.068263	NULL	NULL	110.607	42
17	194984.228795	436679.138425	NULL	NULL	226.911	62
18	195011.856619	436712.966514	NULL	NULL	41.9712	25
19	194876.858913	436640.784044	NULL	NULL	319.14	75
20	196019.353982	436663.466412	NULL	NULL	1649.9	258
21	195280.699602	437366.226394	NULL	NULL	821.283	110
22	195164.618723	437741.16783	NULL	NULL	1309.95	249
23	194755.090931	436606.729921	NULL	NULL	519.899	113
24	195036.128701	436783.348183	NULL	NULL	501.215	83
25	194953.618845	436534.287553	NULL	NULL	37.8472	27
26	195087.620926	437162.125938	NULL	NULL	446.063	93
27	196441.155743	435880.057115	NULL	NULL	716.322	100
28	192893.673456	437571.057185	NULL	NULL	90.3404	39
29	195493.49044	437364.909426	NULL	NULL	59.8671	29
30	195396.281691	437414.435088	NULL	NULL	27.0432	19
31	195450.945448	437522.966596	NULL	NULL	127.347	42
32	195602.323239	437804.669225	NULL	NULL	229.06	55
33	195765.833878	437904.065558	NULL	NULL	486.081	82

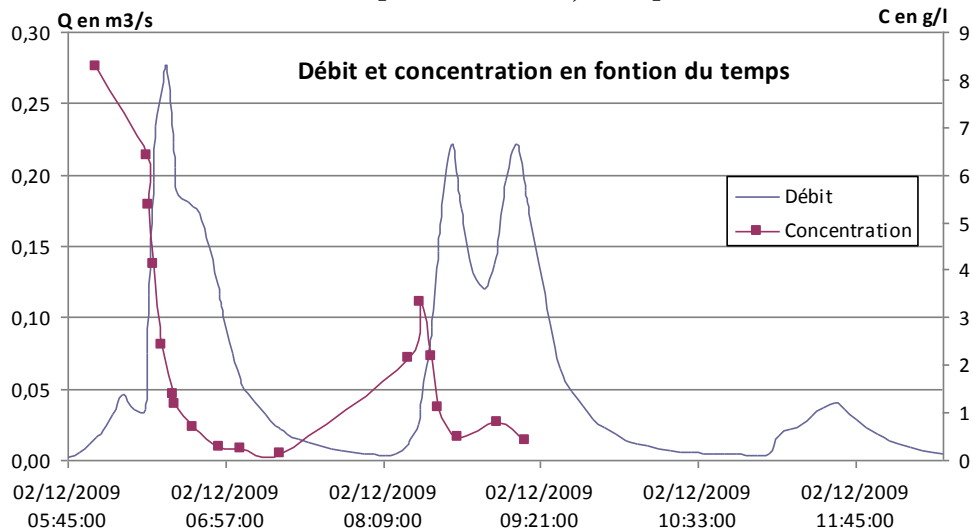
ANNEXE 16 : Plan de localisation des ouvrages de Goro (extraits de scan du PGE de Goro, Avril 2011)



ANNEXE 17 : Gammes de concentrations en MES dans les écoulements d'eau superficiels de Poro (source : [NAVARROT, 2012])

C en g/l	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max
Aval	0,002	0,06	0,2	1	0,7	21,5
Amont	0,017	0,23	0,7	1,7	1,9	28,4

ANNEXE 18 : Représentation de l'effet *first flush*, pour l'épisode 125 à l'amont, extrait de : [NAVARROT, 2012]



ANNEXE 19 : Bilans annuels sédimentaires pour les évènements mesurés ou obtenus par calcul, à Poro

		Amont	Aval
Masse de sédiments totale mesurée (t)	2009	54,6	60,8
	2010	8,6	11,6
	2011	43,3	78
Masse de sédiments totale calculée (t)	2009	68,2	74,9
	2010	15,6	45,8
	2011	47,7	125,7

ANNEXE 20 : Registre du curage des ouvrages de décantation de Poro, relevé par les chefs d'exploitation minière pour la période novembre – décembre 2011.

Origine (n° décanteur)	N° de décanteur selon plans de la SLN	Destination	Volume (m3)	Tonne	Commentaire
1	FRN 15	Verse B	64,80	116,64	
2	décanteur sans nom	Verse B	68,70	123,66	
3	FRN 02	Verse B	694,20	1 249,56	
4	décanteur sans nom	Verse B	163,80	294,84	
5	FRN 01	Verse B	490,20	882,36	240 m3 curés le 18/11/10 (Laureen)
6	décanteur sans nom	Verse B	159,60	287,28	
7	décanteur sans nom	Verse A	79,80	143,64	
8	ANN 01	Verse A	873,00	1 571,40	Non curé en 2010
9	décanteur sans nom	Verse A	107,10	192,78	
10	décanteur sans nom	Verse A	87,90	158,22	
11	VEA 01	Verse A	15,30	27,54	
12	VEA 02	Verse A	15,30	27,54	
13	VEA 03	–	–	–	
14	décanteur sans nom	Verse A	30,60	55,08	
Produit de curage des décanteurs total			2 850,30	5 130,54	

ANNEXE 21 : Répartition des flux en fonction des pluies et des années, extrait de [NAVARROT, 2012].

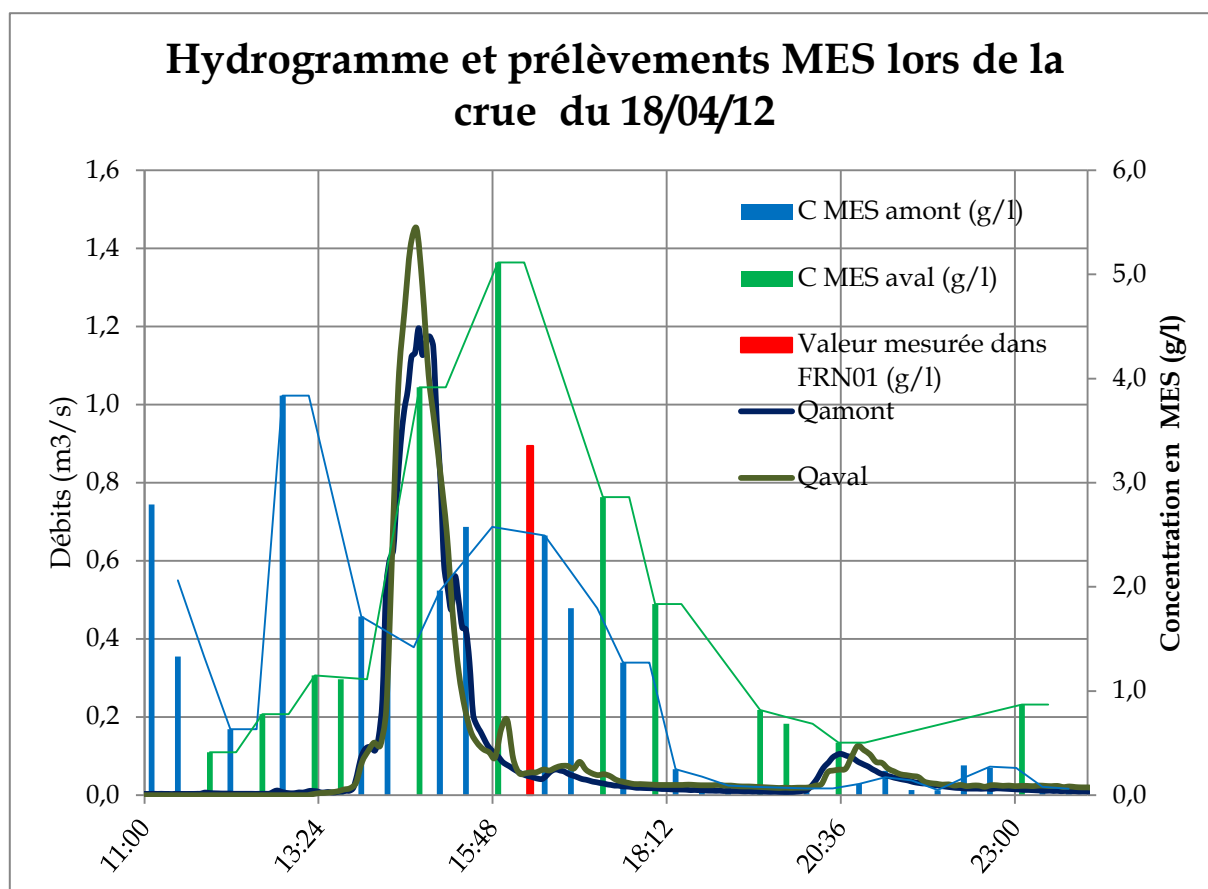
Pluie	Année	AMONT			AVAL		
		Nb d'épisode	Flux amont (t)	%	Nb d'épisode	Flux aval (t)	%
[20-85] mm	2009	23	32368	40%	20	21443	34%
	2010	12	6112		9	15281	
	2011	22	14082		21	27762	
> 85 mm	2009	6	35839	60%	6	50820	66%
	2010	2	9497		2	18572	
	2011	2	33655		2	55728	

ANNEXE 22 : Prélèvements d'eau dans FRN01, à Poro, pour analyse de concentration en MES



Echantillons	Date	Heure	Concentration MES (g/l)
FRN01 Entrée	18.04.12	15:00	3,3550
FRN01 Centre	18.04.12	15:00	0,1700
FRN01 Sortie	18.04.12	15:00	0,1700
FRN01 Entrée	19.04.12	08:30	0,0133
FRN01 Centre	19.04.12	08:30	0,0133
FRN01 Sortie	19.04.12	08:30	0,1250
FRN01 Entrée	19.04.12	15:10	0,0133
FRN01 Centre	19.04.12	15:10	0,0517
FRN01 Sortie	19.04.12	15:10	0,0083

ANNEXE 23 : Débits et concentrations MES aux seuils amont et aval, et valeur de concentration du prélèvement ponctuel dans FRN01 pour la crue du 18/04/12



ANNEXE 24 : Détail sur les zones de prélèvement d'échantillons pour analyse granulométrique de dépôts au sein des décanteurs des différents sites miniers.

Les prélèvements entrée et sortie (ou proximité¹⁰ de la sortie) ont été réalisés pour les décanteurs suivants :

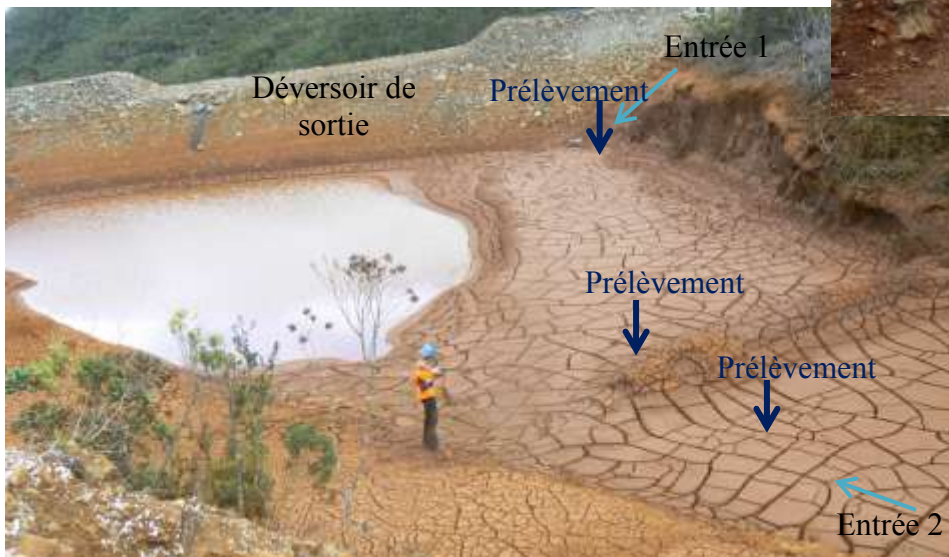
- FRN01 et FRN 18 pour Poro,
- B18 à Poum (illustration ci-dessous),
- SP1A, SW35 et SW34 à Koniambo (illustration ci-après),
- BS6 à Goro.

¹⁰ Il n'a pas toujours été possible de prélever à la sortie des bassins par souci d'accessibilité, ou bien de présence d'une entrée d'eau près de la sortie influençant le dépôt. Les bassins ne sont pas forcément rectangulaires et un prélèvement en sortie n'est alors pas pertinent.

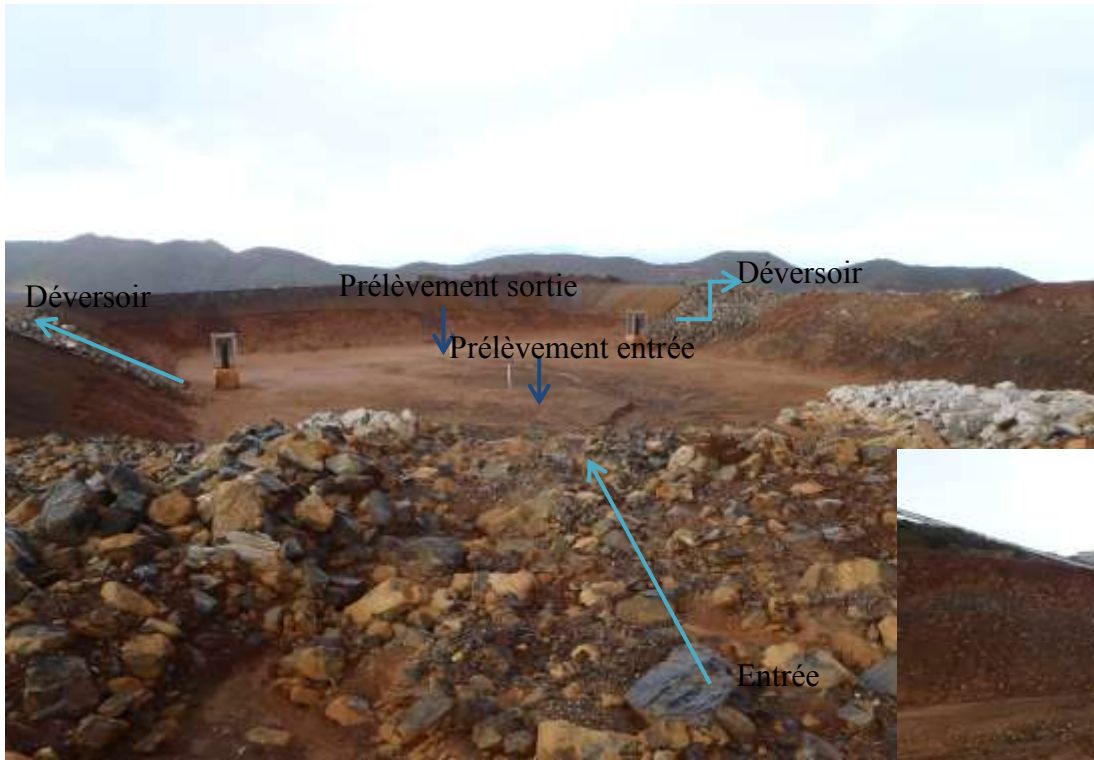
- Prélèvements de sédiments pour analyse granulométrique dans B18, à Poum.



- Prélèvements de sédiments pour analyse granulométrique dans SW35 et SPIA et SW34, à Koniambo



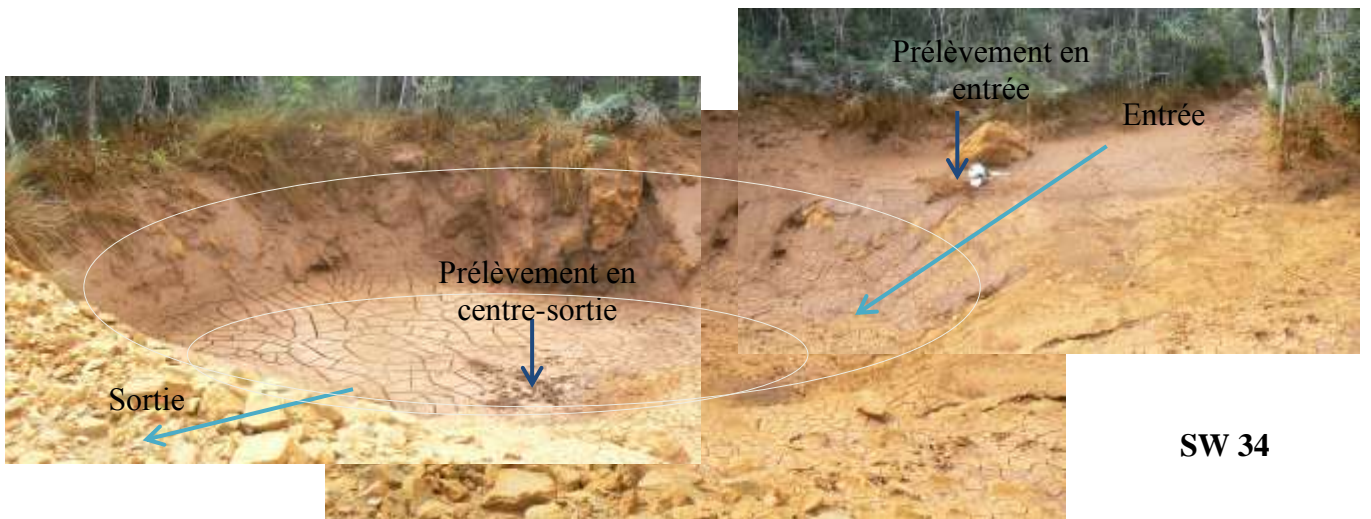
SW35



SP1A



Amont de SP1A



SW 34

ANNEXE 25 : Dispositif d'extraction de carotte dans du matériel humide et meuble. Observation de plusieurs couches sur la carotte extraite (BS6 à Goro) après séchage à l'étuve afin de permettre la conservation de la structure des sédiments.



ANNEXE 26 : Note de détail sur le prélèvement d'échantillons pour analyse granulométrique

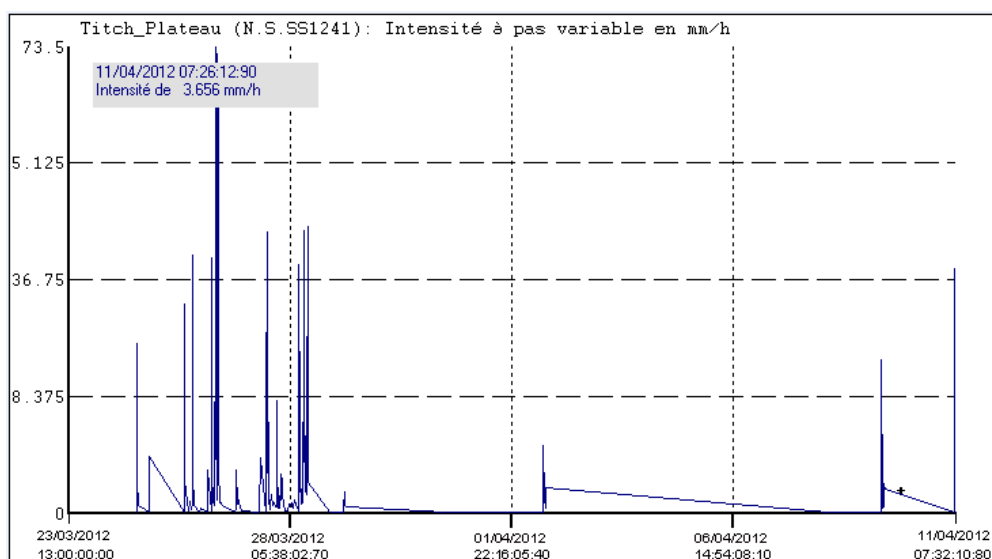
○ Poro

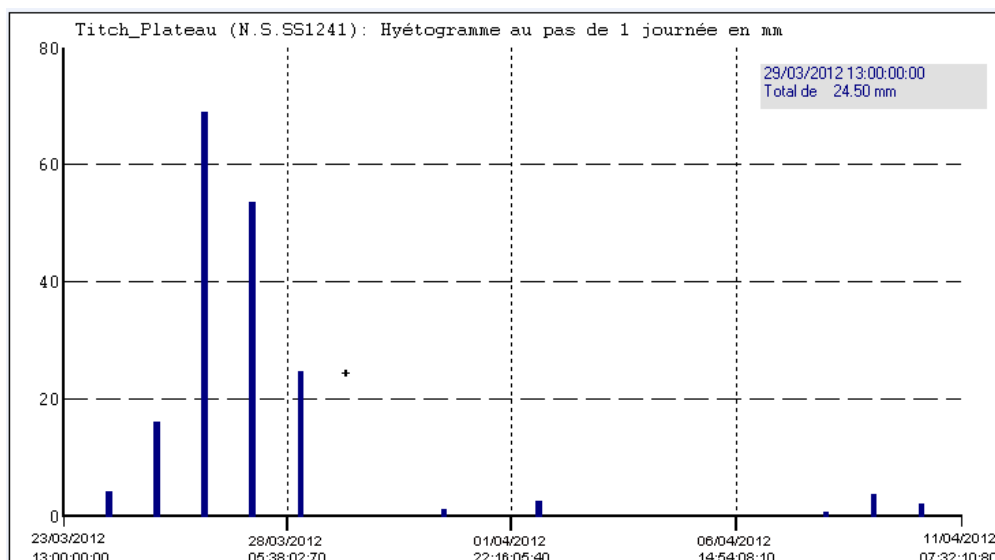
Lors de l'échantillonnage à Poro, le 10/04/12, il n'y avait pas eu de pluie depuis une semaine. Les bassins de décantation de la zone d'étude étaient presque à sec et les échelles de relevé de niveau de sédiments dans FRN01 et FRN18 étaient visibles. Le niveau de sédiment atteignait le haut du socle de l'échelle dans FRN 01 mais on ne pouvait pas lire de niveau (le bassin est toujours curé un peu plus profond que le niveau 0 de l'échelle). Deux échantillons de sédiments ont été prélevés à l'entrée et au centre du décanteur, près de l'échelle. La texture humide des matériaux et l'épaisseur pas assez importante de dépôts n'ont pas permis d'observer de stratification, aussi une mesure sur l'ensemble de l'échantillon a permis d'estimer une granulométrie moyenne des dépôts dans le bassin. Dans le bassin FRN18, la hauteur de sédiments est de moins de 2 cm à l'échelle. Des échantillons de sédiments ont également été relevés en entrée et au milieu du bassin.

○ Poum

La dernière pluie en date au moment du prélèvement était le 11 avril 2012 à 7:00, soit six jours avant le prélèvement (le 17/04/12).

Données du pluviomètre amont du bassin versant de Titch pour les crues précédant le prélèvement d'échantillons pour analyse granulométrique le 17/04/12 (enregistrements du 23/03/12 à 13:00 au 17/04/12 à 13:00, la lame d'eau cumulée est de 176.5 mm) :



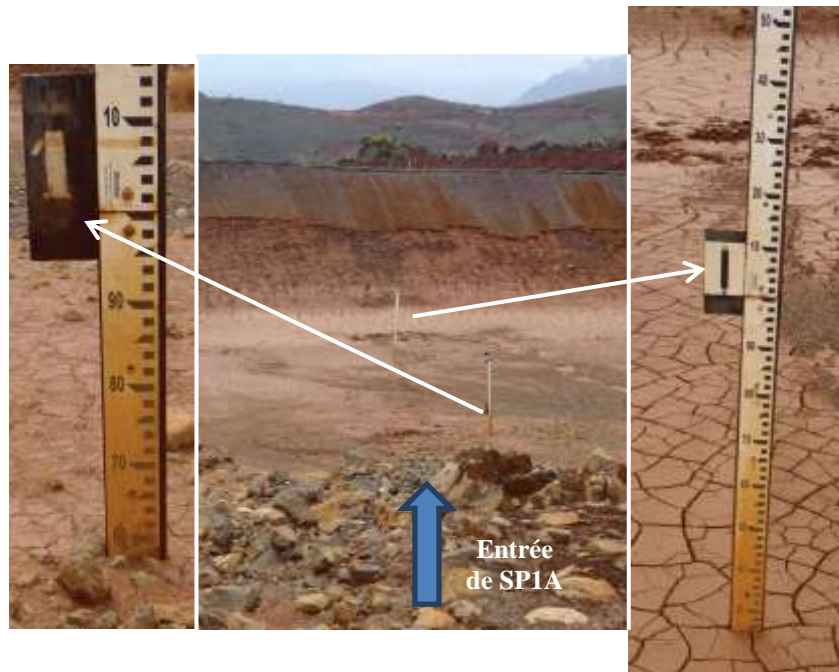


Alors que les décanteurs de pied de mine sont encore remplis d'eau (B7 déverse par exemple), les décanteurs amont sont secs. Il est donc possible de prélever dans B18, curé l'année passée (aucune donnée concernant cette information n'est cependant disponible). La hauteur des dépôts est estimée à trois mètres cependant les carottes prélevées font un peu plus de 20 cm. Cette hauteur présumée importante peut être expliquée par le fait que l'ouvrage est filtrant par défaut. Ce défaut semble de ce fait accroître son pouvoir de rétention. Un premier prélèvement est réalisé en entrée de bassin. L'une des entrées d'eau dans le bassin se trouve près du déversoir de sortie, influençant la dynamique de dépôt dans cette zone. Il a donc été choisi de prélever une seconde fois plus au centre du bassin, où la décantation de fines est supposée être facilitée afin d'avoir une idée des dépôts après une période calme. On remarque le dépôt de blocs et de galets de taille importante en entrée du bassin.

○ *Koniambo*

Les prélèvements ont été réalisés dans 3 décanteurs dont les surfaces amont présentent des caractéristiques différentes.

- La surface drainée par le bassin de décantation SP1A correspond à une zone de fin d'activité. Les travaux de "grattage" (mobilisation des couches superficielles lors de la création de pistes et de zones d'exploitation) sont achevés depuis longtemps et la zone a commencé à être revégétalisée. Aussi le matériel transporté dans le bassin semble être un mélange de fines et de grossiers retrouvés en proportion plus importante en entrée pour le grossier et au contraire plus importante en fine au centre du bassin. Etant donné la disposition géométrique du bassin un prélèvement au centre a été réalisé à la date du 20/04/12, les matériaux étant trop grossiers en entrée (galets, graviers et blocs) pour être analysés en laboratoire. Les échelles présentes dans le bassin indiquent des hauteurs de 58 cm pour l'échelle se trouvant la plus proche de l'entrée du bassin et 25 cm pour l'échelle se trouvant la plus au centre du bassin ;



- La surface drainée par le décanteur SW35 correspond au contraire à une ouverture de chantier : les travaux de préparation de la future verse en amont du bassin (cf. annexe 13). La zone vient donc d'être "grattée", produisant une forte quantité de fines. Aussi le bassin est-il encombré par près d'un mètre de fines avant la couche de grenaille (cf. figure 34 ci-dessous).



Le bassin SW35 : une forte épaisseur de fines (à gauche) avant de trouver de la grenaille (à droite).

L'un des prélèvements a été réalisé à une entrée d'eau du bassin. L'autre entrée présente l'existence d'un muret ou digue. Deux prélèvements y ont donc été réalisés de chaque côté de la digue afin d'étudier l'influence de cette perturbation sur le dépôt de sédiments. Ces prélèvements ont été réalisés le 04/05/12 alors qu'il n'a pas plu depuis environ trois semaines.

- Au niveau de SW34, un prélèvement en entrée et au centre du bassin ont été réalisés le 04/05/12. Les conditions géométriques du bassin ne permettent pas de réaliser un prélèvement à sa sortie.

Aussi dispose-t-on d'un bassin pour lequel il n'y a plus tellement de perturbations minières à l'amont (SP1A), d'un bassin représentatif de l'activité minière à son paroxysme (SW35) et un bassin témoin présentant des stations de mesures et étant peu influencé par l'activité minière (SW34).

ANNEXE 27 : MANIPULATION DE GRANULOMETRIE PAR TAMIS



Matériel :

- Une tamiseuse Retsch Biolock Scientific à impulsion rotative.
- Une balance de laboratoire Mettler Toledo Classique à une décimale.
- Des tamis allant de 63 μm à 10 000 μm (100mm).

Manipulation :

Les boues sont placées dans une coupelle, à l'étuve (60°C) durant 1 à 2 jours afin de les sécher. Cette étape a également pour but de décoller les particules fines agrégées sur les sédiments de plus gros diamètres par l'humidité. L'échantillon à analyser est alors passé au pilon délicatement afin de désolidariser les grains d'argile agrégés. Chaque tamis est pesé à vide, ce poids sera soustrait au poids des tamis pleins afin de ne retenir que le poids de l'échantillon. La tamiseuse permet d'empiler jusqu'à 8 tamis au-dessus d'un fond récepteur. Une fois l'échantillon répandu au sommet de la pile de tamis, ceux-ci sont bloqués durant l'agitation. Lorsque le tamisage est terminé, tous les tamis sont pesés une nouvelle fois un par un afin d'obtenir la répartition en masse de l'échantillon en fonction des différents diamètres de tamis. Ce qui est récupéré dans le fond récepteur (passants à 63 μm) est ajouté à ce qui est récupéré dans les tamis de 80 et 100 μm et mis de côté pour analyse au Granulomètre Laser.

Erreur relative

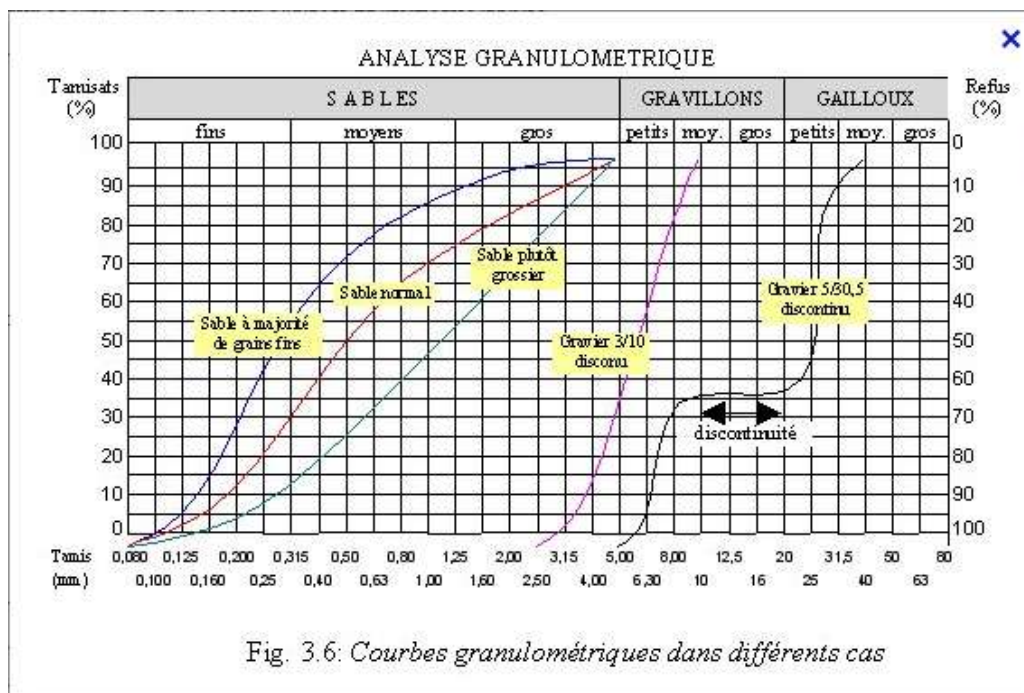
L'ensemble des tamis est nettoyé à sec et pesé après chaque manipulation afin de vérifier qu'aucune matière n'est restée à l'intérieur. Le mortier et le pilon sont également nettoyés après chaque manipulation afin de ne pas influencer les résultats de la manipulation suivante. Les coupelles dans lesquelles les échantillons ont été séchés à l'étuve ont été pesées à vide avant et après la manipulation afin de retrancher la masse potentielle de sédiments restés incrustés dans la coupelle par le séchage. Il subsiste cependant des imprécisions liées au transfert de l'échantillon dans le mortier puis dans les tamis. La balance, n'affichant qu'une décimale, peut également être source d'erreur, on remarque en effet que la plupart du temps, la somme des masses de particules après pesée est supérieure à la masse d'échantillon initiale. L'erreur liée au transport de matériel entraîne une erreur liée à la perte de matière à échantillonner tandis que dans le cas présent, on a une erreur liée au gain de matière alors que les tamis sont nettoyés jusqu'à retrouver leur masse à vide. Cette erreur est nécessairement liée à l'accumulation de légères erreurs liées à l'imprécision de la mesure au-delà de la première décimale. Il convient en outre de mentionner que tous les blocs de sédiments formés par séchage ne sont pas désagrégés par le pilon, notamment les plus petits. Il se peut donc que des fines soient piégées dans les blocs et soient pesées avec des particules de diamètre plus important, ce qui fausse la répartition granulométrique de l'échantillon.

Ces incertitudes s'ajoutent à celles de la mesure de terrain (possibilité de contamination de l'échantillon par d'autres sédiments lors du prélèvement si le matériel n'est pas assez bien nettoyé entre deux prélèvements ou perte de sédiments lors du transport de la carotte, ce qui influence les résultats reposant sur une étude statistique de la répartition des particules).

Exploitation des résultats

Un pourcentage de passants cumulé est calculé à partir des masses de particules réparties en fonction des différents diamètres de maille de tamis, sachant par exemple que toutes les particules n'étant pas retenues dans le tamis de 500µm ou les tamis de diamètre supérieur sont considérées comme des « passants » à 500µm et ont donc un diamètre inférieur à cette valeur. Un graphique donnant le pourcentage de passants cumulé en fonction des diamètres est alors créé sur une échelle semi-logarithmique. Il s'agit de la courbe de répartition granulométrique de l'échantillon prélevé. La valeur représentative extraite de ce type de graphique est généralement le D50, le D10 ou le D90 (diamètre pris à 50, 10 ou 90 % des passants) mais peut varier en fonction des usages. Le D50 sera retenu pour cette étude, ce diamètre entrant en effet en compte dans les calculs de vitesse de chute de Stokes.

On peut interpréter les courbes obtenues de différentes manières comme il est présenté dans le graphique ci-dessous (Graphique extrait du cours en ligne de génie civil de l'Université Nationale du Laos (cursus de la Filière universitaire Francophone de l'AUF).

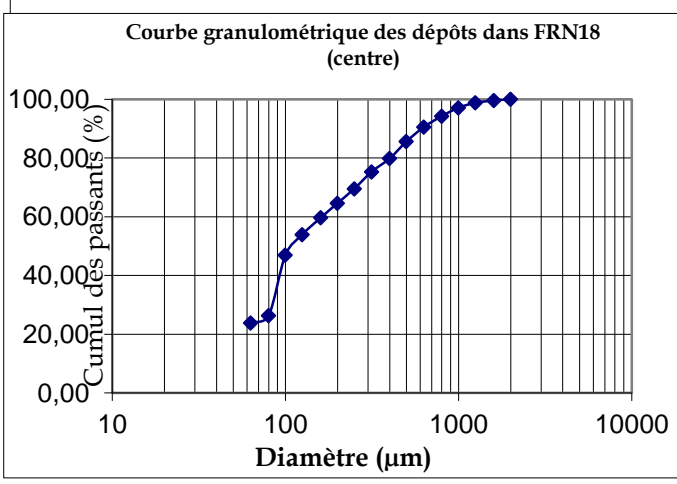
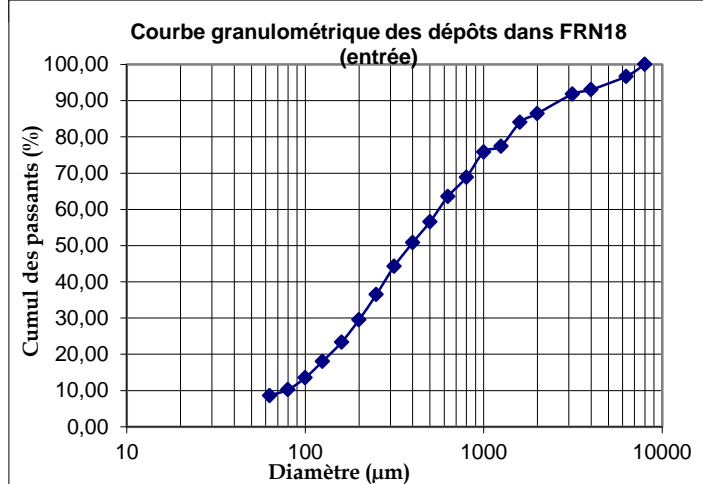
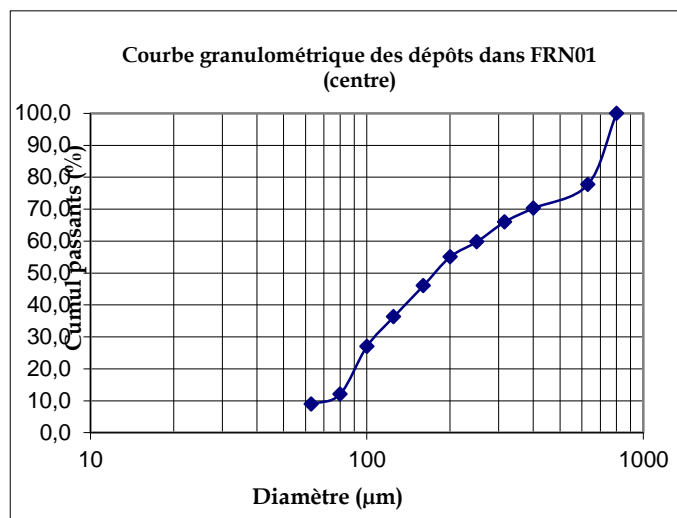
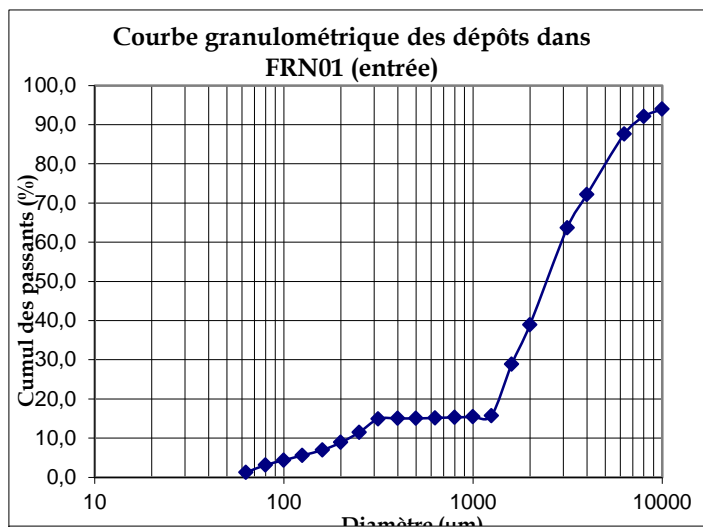


Conclusion

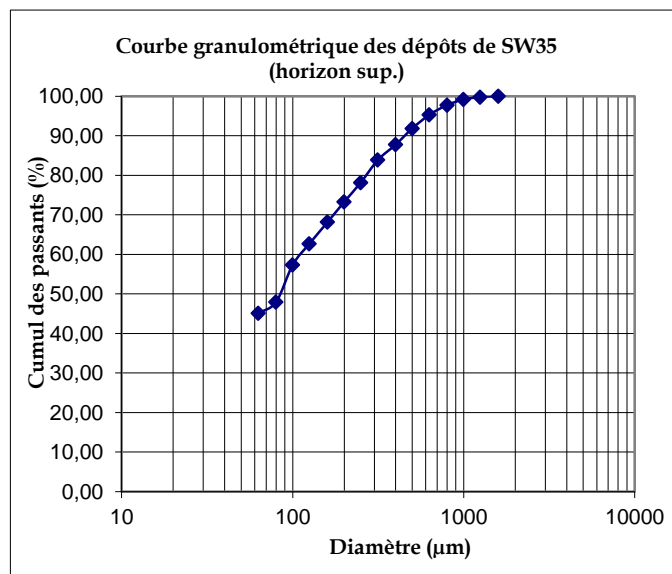
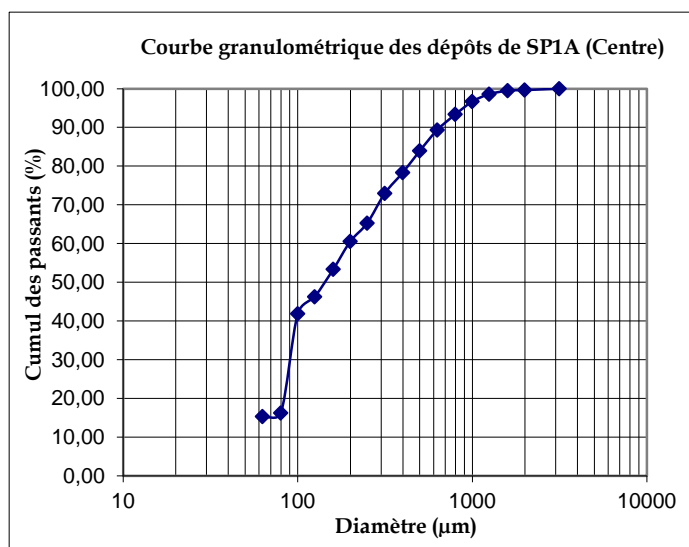
On remarque qu'on a des courbes granulométriques exploitables pour les dépôts présentant des particules de plus fort diamètre (gravillons), situation se présentant en général pour les horizons inférieurs des carottes (dépôts grossiers, charriage) car la courbe granulométrique est complète. Pour les dépôts en horizon supérieurs des carottes (fines déposées après arrêt de l'écoulement dans le bassin, donc après arrêt de l'évènement pluvieux et du ruissellement), un manque de précision notable se manifeste pour les diamètres inférieurs à 63 microns. On obtient de ce fait des courbes granulométriques plus éloignées de la réalité car incomplètes, ce qui justifie une mesure au granulomètre laser.

ANNEXE 28 : Courbes granulométriques des échantillons obtenues par tamisage selon la méthode explicitée dans l'annexe 27 précédente.

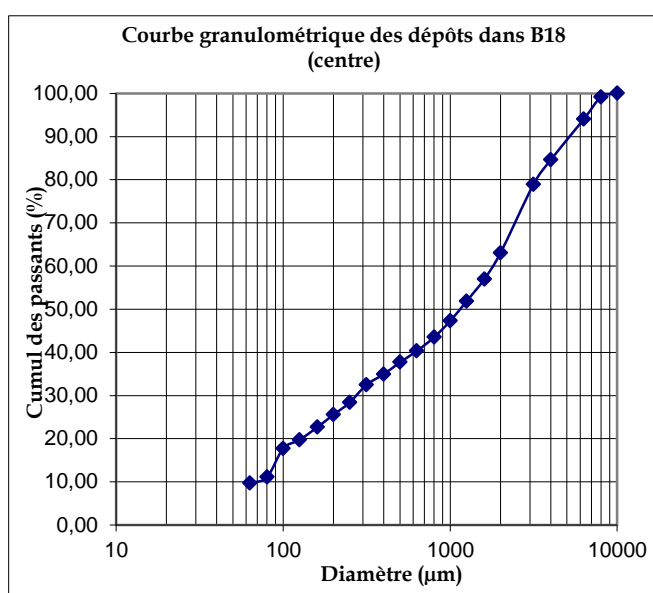
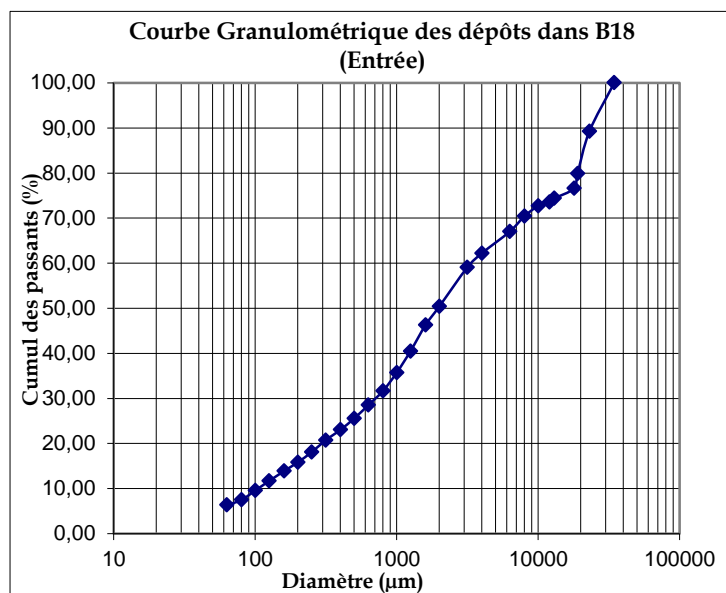
• Pororo



• Koniambo



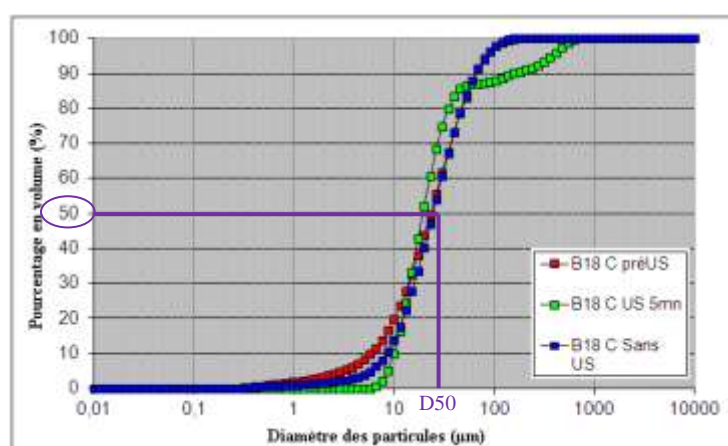
- Poum



ANNEXE 29 : Discussion sur les limites du granulomètre laser et l'agrégation des particules lors des mesures réalisées avec l'appareil.

Les mesures sont en effet précises pour les fines (moins de 100 μm) mais la gamme de diamètre traitée par le granulomètre laser s'étale de 0,020 à 2000 μm . Les particules grossières pouvant se trouver dans l'échantillon et influencer les mesures ne sont donc pas prises en compte. Il est difficile de rendre compte du rapport entre l'erreur relative liée à la mesure au tamis pour les petits diamètres et celle liée au granulomètre laser pour les diamètres importants. Les données ne sont d'autre part pas compilables facilement étant donné que les résultats sont établis sur la répartition massique des particules dans le cas des mesures au tamis tandis que le granulomètre laser fournit des résultats établis sur une répartition volumétrique des particules. On cherche à obtenir des comparaisons par rapport à des matériaux à dominante fines, aussi semble-t-il plus pertinent d'utiliser la méthode permettant d'avoir une précision sur les fines. Notre choix a donc porté sur l'utilisation du granulomètre laser.

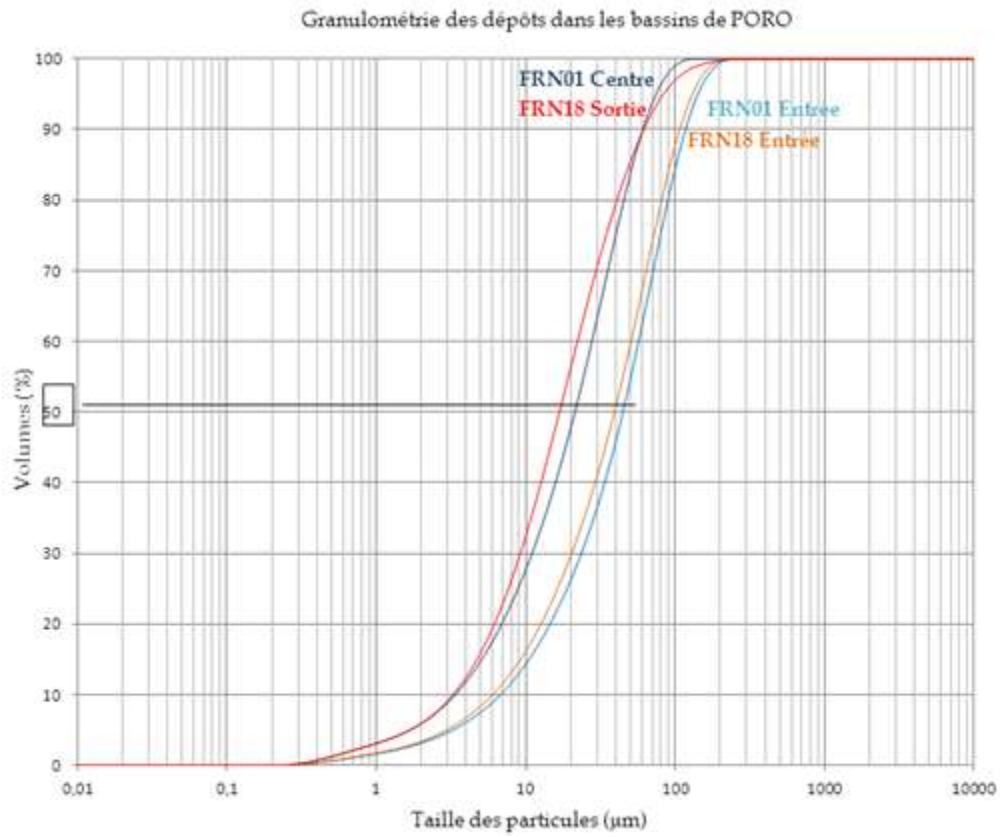
Le granulomètre Laser permet de casser les floccs formés par les MES par émission d'ultrasons. Les mesures avec et sans ultrasons peuvent permettre d'avoir une idée de la capacité de floculation/d'agrégation des particules de l'échantillon. Il convient de mentionner que les conditions de floculation des particules au moment du relevé d'échantillon ne sont plus les mêmes au moment de la mesure (agitation lors du transport, agrégation durant la période de stockage, variations de température...) et sont également différentes des conditions de floculation dans l'écoulement. Aussi la répartition granulométrique des particules sans ultrasons, donc avec des particules floculées n'est pas représentative des conditions naturelles de décantation. Cette mesure est réalisée dans l'objectif d'avoir une idée de la différence de diamètre des particules avec ou sans floculation (cf. [CARPENTIER, 2011] pour plus de détails). Aussi, une série de mesures sans ultrasons (5 mesures + 1 moyenne) a été réalisée et comparée à une série de mesures avec ultrasons avant la mesure (5 mesures + 1 moyenne). Les résultats (dont un exemple se trouve figuré ci-dessous) ne permettant pas de voir clairement l'influence de la floculation sur la granulométrie, toutes les mesures suivantes ont été réalisées avec ultrasons afin d'avoir la granulométrie des particules non influencées par la floculation en laboratoire ou pendant le transport depuis leur prélèvement. Ce fait est à considérer lors de l'exploitation des résultats pour calculer les vitesses de chute des sédiments par exemple.



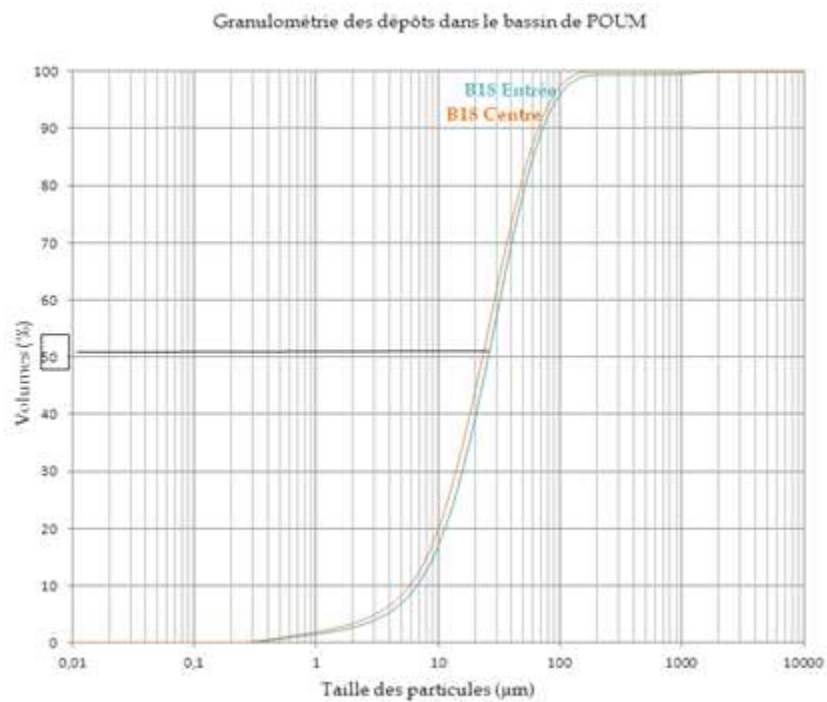
Influence de la floculation sur la granulométrie des échantillons. Mesure réalisée avec pré-ultrasons, mesure avec ultrasons durant 5 mn et mesure sans ultrason, sur les prélèvements du centre de B18.

ANNEXE 30 : Courbes granulométriques réalisées par granulométrie laser sur des échantillons moyens, pour plusieurs décanteurs.

PORO

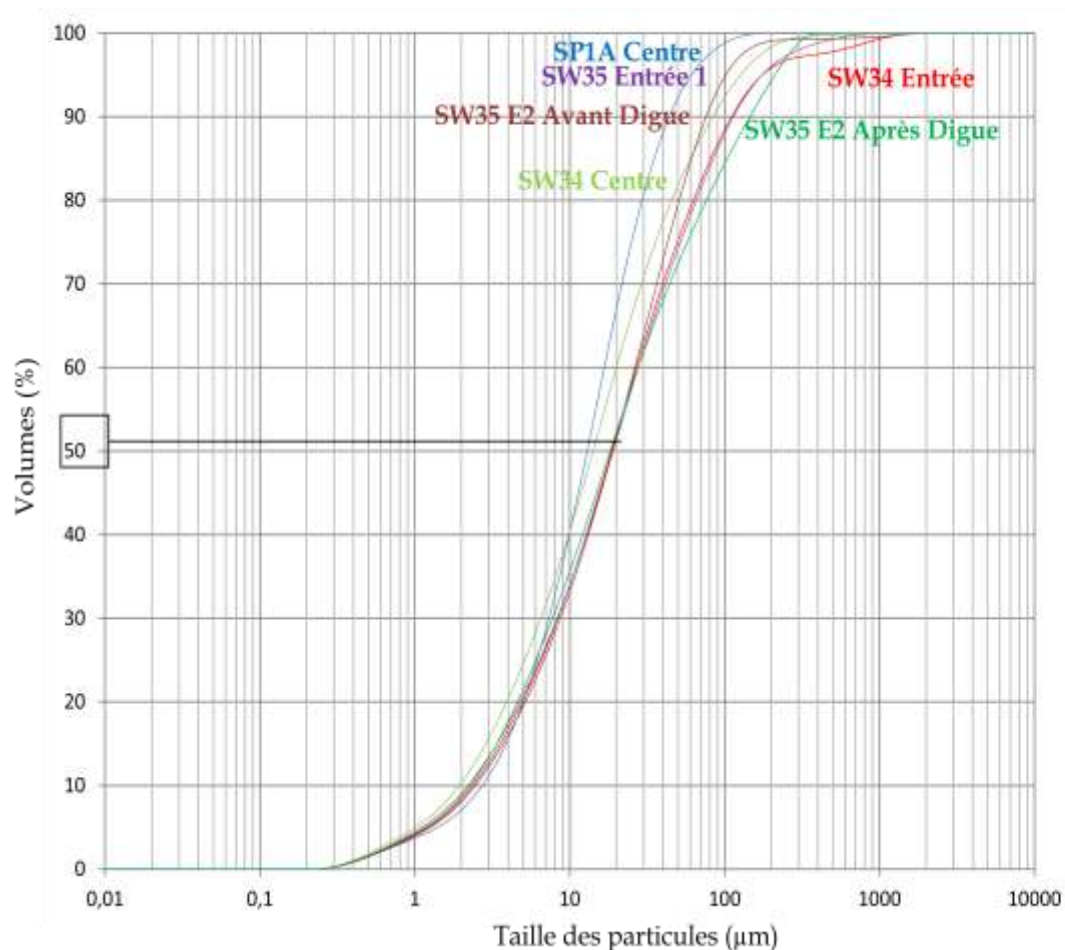


POUM



KONIAMBO

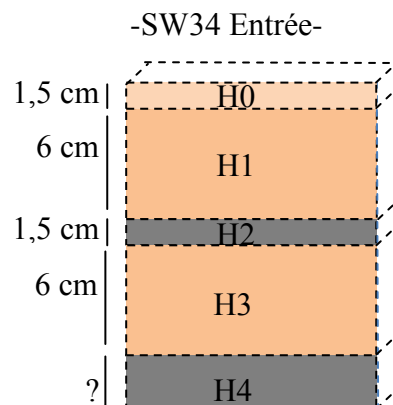
Granulométrie des dépôts dans les bassins de KONIAMBO



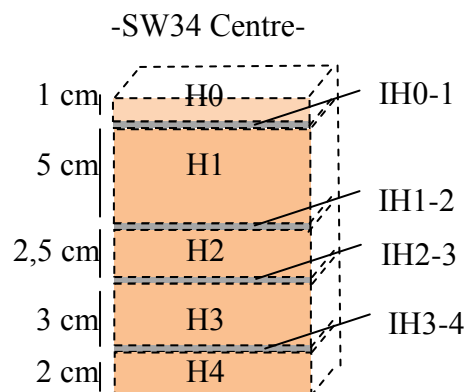
ANNEXE 31 : Tableaux de résultats d'analyse granulométriques des dépôts dans les décanteurs de Koniambo (SW34 et SW35) et schémas reconstituants l'alternance des couches au sein des carottes prélevées.

L'alternance de 5 couches claires épaisses (H0 à H4) et de 4 couches sombres plus minces, a été étudiée sur SW34 centre. En entrée de ce même décanteur, 3 couches claires et 2 couches sombres ont été étudiées. Les résultats donnés dans les tableaux suivants sont à visualiser en parallèle des schémas ci-après.

SW34 - Entrée (Koniambo)			
Couches	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
H0	2,3	14,8	63,9
H1	2,7	15,4	66,1
H2	2,6	22,4	109,4
H3	2,0	13,8	64,3
H4	4,2	42,9	856,0



SW34 - Centre (Koniambo)			
Couches	D10 (µm)	D50 (µm)	D90 (µm)
H0	1,7	14,9	1069...
IH 0-1	1,8	21,0	1342...
H1	2,2	15,6	157,3
IH 1-2	2,9	20,9	127,5
H2	1,7	10,5	57,9
IH 2-3	4,1	37,9	218,6
H3	2,1	11,0	39,5
IH 3-4	2,4	22,7	108,0
H4	1,8	12,1	67,6



Sur SW35 bien que peu d'horizons (4) aient été observés (cf. figure ci-dessous) ces horizons sont d'épaisseur importante et semblent constitués de matière de moins en moins fine au fur et à mesure que l'on creuse en profondeur. On ne doit cependant pas écarter l'option d'une illusion due à l'humidité relative des différentes couches ou à une différence de composition chimique. Une ultime couche de grenaille (matériaux grossiers) était accessible à la pelle sur une zone plus en pente près de l'entrée, où il y avait moins d'épaisseur de fines. Cette couche de grenaille a été analysée au tamis (car constituée de particules trop grosses pour passer au granulomètre laser). Les diamètres des différentes couches se trouvent dans le tableau ci-dessous et sa courbe granulométrique est également donnée.

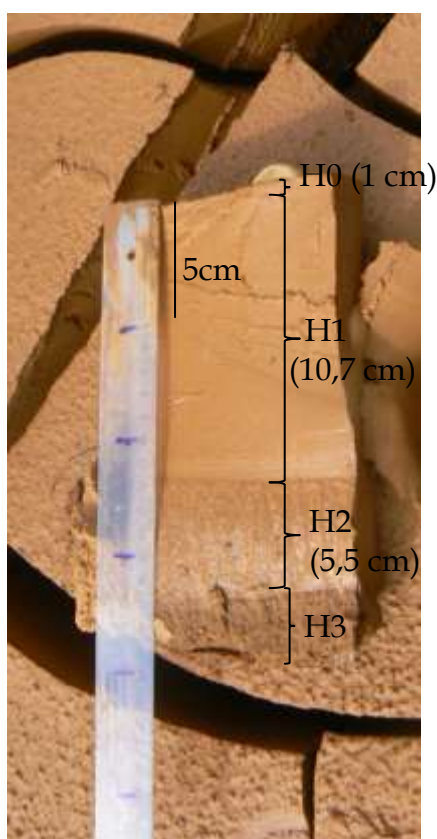
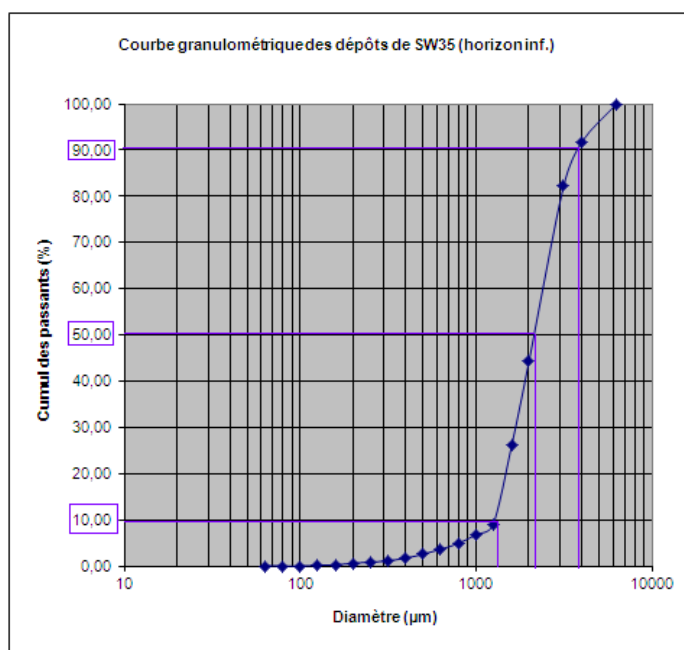


Photo du prélèvement réalisé en entrée 1 de SW 35, différents horizons ayant été délimités.

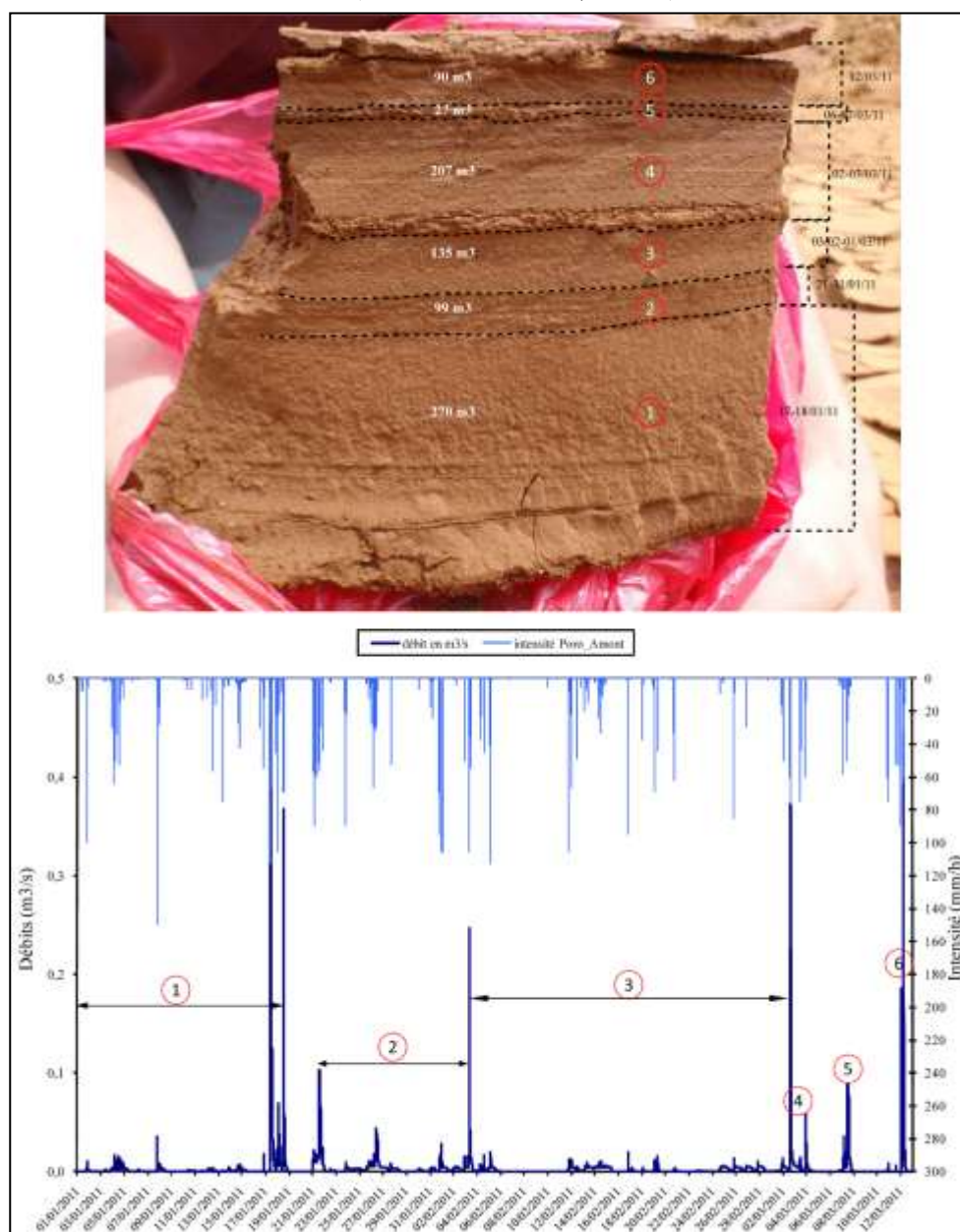


Courbe granulométrique du dépôt de grenaille dans SW35, à Koniambo.

SW35 - E1 (Koniambo)			
Couches	D10	D50	D90
H0	2,5	34,9	115,1
H1	4,3	38,6	120,2
H2	3,2	14,2	45
H3	2,3	12,0	45,6
Grenaille	1350,0	2170,0	3900

Comparaison des diamètres des particules de différentes couches apparaissant sur le prélèvement dans SW 35.

ANNEXE 32 : Mesures granulométriques des différentes couches d'un bloc de sédiment prélevé au centre de FRN01 et correspondance avec des épisodes pluvieux ([CARPENTIER, 2011])

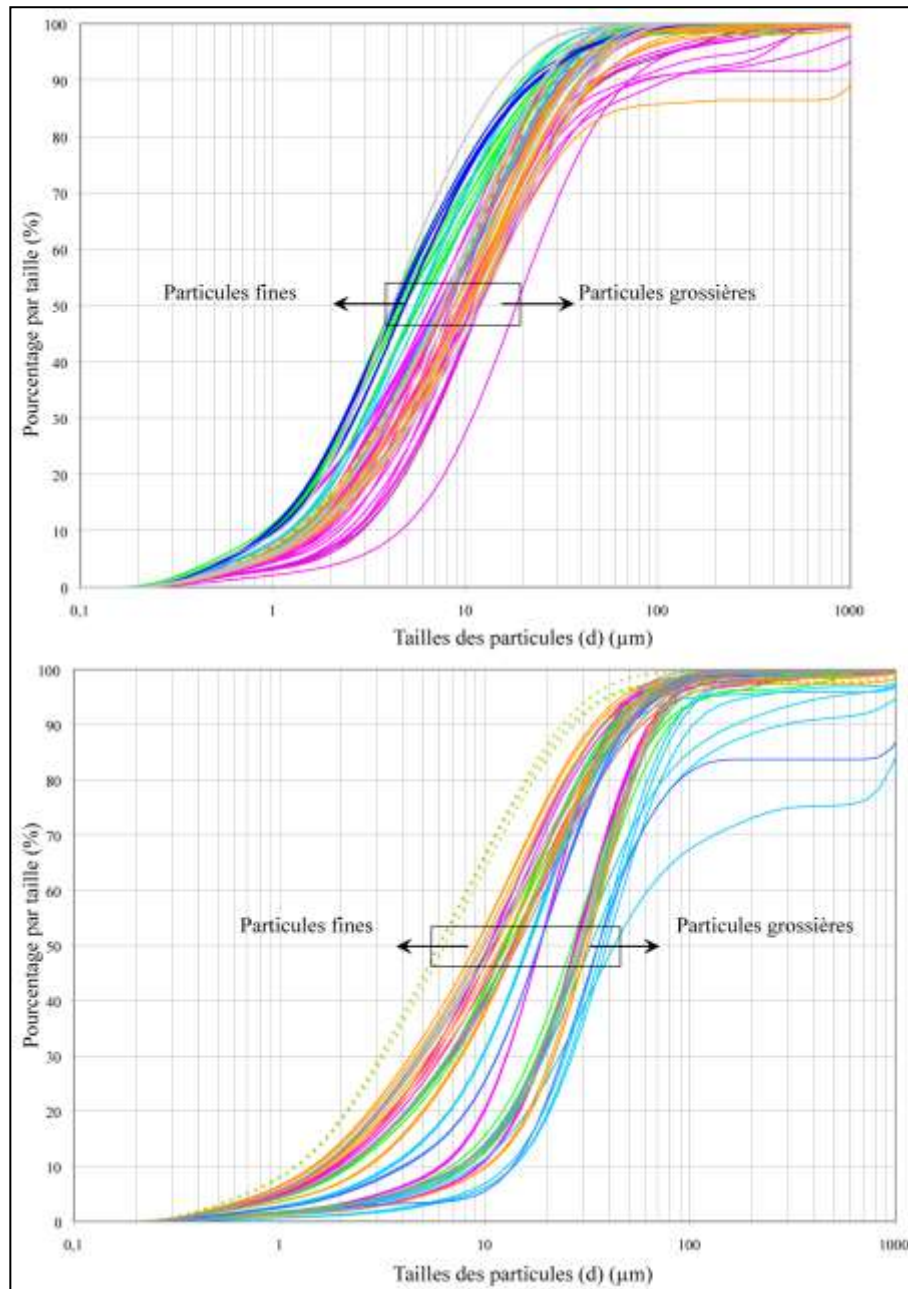


Période	Horizons	D50 avec ultrasons ¹¹ (μm)	D50 sans ultrasons (μm)
17-18/01/11	1	4,365	9,570
21-31/01/11	2	4,365	11,061
02/02-01/03/11	3	5,012	10,988
02-03/03/11	4	4,812	11,534
06-12/03/11	5 et 6	-	11,482

Les D50 mesurés à l'amont de FRN01 sont compris entre 5,01 et 13,18 μm. A l'aval, les D50 varient de 4,37 à 8,71 μm. Les diamètres des particules mesurés à l'amont du décanteur sont réduits de 34% arrivés à l'aval, les plus grosses particules, dont la vitesse de chute est forte, sont alors piégées au fond du décanteur [CARPENTIER, 2011].


¹¹ Le granulomètre laser permet de briser les liaisons entre les particules agglomérées par émission d'ultrason, permettant de rendre compte de l'effet de la floculation sur les diamètres mesurés.

ANNEXE 33 : Courbes associées aux analyses granulométriques des prélèvements de MES dans l'écoulement en temps de crue, lors de la saison de mesures 2011, extrait de : [CARPENTIER, 2011].



ANNEXE 34 : Exemple de calcul de la concentration en MES en sortie d'ouvrage par la méthode du Mélange Intégral, sur un épisode de crue à Poro, au niveau du décanteur FRN01.

Mesures ponctuelles MES Amont (g/l)		Q amont (m3/s)	dt (s)	Mesures ponctuelles MES Aval (g/l)		Surface Décanteur (m ²)	Vs (m/s)	V Décan teur (m3)	Cs(t)	Différence flux sortant mesuré - flux sortant calculé	Pourcentage représenté par Cs(t) dans la concentration mesurée à l'aval (%)
08/02/2009 08:49	1,3750	0,0150	120			949	5,00E-05	2847	0,0009		
08/02/2009 08:51	3,5017	0,0150	120	08/02/2009 08:51	0,0450				0,0022	0,0428	4,9
08/02/2009 08:53	8,2317	0,0150	120	08/02/2009 08:53	0,0883				0,0052	0,0831	5,9
08/02/2009 08:56	17,6550	0,0970	180	08/02/2009 08:56	0,7833				0,1083	0,6751	13,8
08/02/2009 08:57	19,0633	0,0970	60						0,0390		
08/02/2009 08:59	13,2367	0,3360	120						0,1875		
08/02/2009 09:01	6,2167	0,3360	120						0,0880		
08/02/2009 09:01	7,3883	0,3360	60	08/02/2009 09:06	2,6833				0,0523	2,6310	1,9
08/02/2009 09:11	1,1517	0,9910	540						0,2165		
08/02/2009 09:12	2,3617	0,9910	60						0,0493		
08/02/2009 09:26	0,9617	0,6370	300						0,0129		
08/02/2009 09:27	0,8767	0,6370	240						0,0588		
08/02/2009 09:32	0,6333	0,4830	420						0,0258		
08/02/2009 09:36	0,3933	0,3610	600						0,0209		
08/02/2009 09:43	0,2617	0,1740	1020						0,0096		
08/02/2009 10:21	0,3833	0,0440	600						0,0060		
08/02/2009 11:21	0,4583	0,3990	3600	08/02/2009 11:21	0,8000				0,0385	0,7615	4,8
08/02/2009 11:24	0,9200	0,8530	180						0,9923		

	
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES	
Diplôme(s) : Ingénieur ENGEES et Master Géographie environnementale de la Faculté de géographie et d'aménagement de Strasbourg	
Spécialité : Système Géographique et Environnement (SGE)	
Auteur Audrey CHILLOU	Année 2012
Titre Etude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie	
Nombre de pages texte : 60 annexes : 39 Nombre de références bibliographiques : 35	
Structure d'accueil :	<i>Irstea de Grenoble</i>
Maître de stage : Alain RECKING	
Résumé Cette étude a pour objectif la réalisation d'un état des lieux des connaissances afin de répondre à la problématique de gestion des flux d'eau et de sédiments s'écoulant sur milieu minier calédonien. Les particules considérées relèvent du domaine du fin i.e. de D50 inférieur à 100 µm et sont couramment traitées par les mineurs par bassin de décantation. On cherche ainsi à confronter des modèles de décantation par bassin aux données de terrain relevant de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques des décanteurs afin de déterminer l'efficacité des stratégies de gestion des fines en place sur les sites miniers.	
Mots-clés Décantation, Bassin de décantation, ruissellement, écoulement, fines, latérites	