

CONVENTION HYDROMINE
Rapport de synthèse 2009-2011



(76 pages, 56 figures, 19 tableaux, 16 annexes)

Rapport Hydromine 2011

Préambule

Le rapport HYDROMINE 2011 intitulé « *Rapport de synthèse 2009-2011* » est relatif à la convention en date du 24 décembre 2010 signée entre le Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, l'Université de la Nouvelle-Calédonie (UNC) et le Centre de Formation aux Techniques de la Mine et des Carrières (CFTMC). Cette convention a pour objet la mise en œuvre de la troisième campagne de mesures du projet HYDROMINE, l'analyse et la synthèse de l'ensemble des données visant à la caractérisation des processus de ruissellement et au bilan des transferts de sédiments sur un site pilote des bassins versants miniers, localisé au CFTMC.

Pour mener à bien le programme défini, l'UNC s'est adjoint la collaboration de l'IRSTEA, partenaire privilégié et caution scientifique du consortium (UNC, IRSTEA, IRD, UR, Meteo-France et A2EP) ayant décroché le programme du CNRT « *Fonctionnement des petits bassins versants miniers* ». Le bassin expérimental de mesures mis en place dans le cadre du programme HYDROMINE, sur le site de Poro est, en effet, au cœur du programme du CNRT qui court de mai 2010 à mai 2014. Les résultats de ces deux programmes sont intimement liés au plan de la problématique et l'expertise scientifique reconnue de l'IRSTEA sur ce domaine ont logiquement appellé une collaboration avec l'UNC.

Le document produit est donc une synthèse scientifique réalisée et validée par l'Unité de Recherche Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches d'Irstea (ex. Cemagref). Il s'appuie très largement sur les rapports de stage de Laureen Carpentier (IGAL, stagiaire Hydromine 2011) et Lucie Navanrot (ENGEES, stagiaire Hydromine 2012), co-encadrés par l'Irstea (Nicolle Mathys) et l'UNC (Michel Allenbach). La partie 3 du document correspond à la synthèse des trois premières années d'observation réalisées sur le site de Poro. Les parties 1 et 2 de ce rapport sont issues du rapport de campagne 2011. Elles sont néanmoins reprises ici car la partie 1 contient des éléments de présentation du site et des méthodes indispensables et la partie 2 contient des résultats originaux sur la granulométrie qui ne sont pas rediscutés en partie 3. La synthèse a fait l'objet, par ailleurs, de nombreux échanges techniques entre les stagiaires impliqués dans le programme, la coordinatrice scientifique des stages (Nicolle Mathys) et la DAVAR (Geoffroy Wotling). Ce service gouvernemental était plus spécialement en charge, dans le programme, de la production d'une base de données hydropluviométriques, de la maintenance des équipements et de la mise en place, en partenariat, avec les autres parties des protocoles. Conformément aux termes de la convention, la DAVAR a également participé à l'interprétation des résultats et a apporté son assistance et son expertise hydrologique au service des résultats produits dans le rapport.

Sommaire

Rapport Hydromine 2011	3
Préambule.....	3
Sommaire	5
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
1 Rappels sur le projet Hydromine.....	9
1.1 Présentation des bassins instrumentés et contexte environnemental	9
1.1.1 Contexte et localisation	9
1.1.2 Installations de mesure et données obtenues.....	11
1.2 Etat du bassin, formations superficielles et gestion de l'eau.....	12
1.3 Matériels et méthodes.....	16
1.3.1 Prélèvements	16
1.3.1.1 Objectifs et méthodes	16
1.3.1.2 Procédure de relevé des préleveurs	17
1.3.2 Entretien des seuils de mesures.....	19
1.3.3 Jaugeages.....	19
1.3.3.1 Jaugeages au moulinet.....	19
1.3.3.2 Jaugeages au flotteur	21
1.3.4 Mesure au laboratoire de la concentration en MES des échantillons.....	22
1.3.5 Analyse granulométrique laser.....	24
2 Observations, mesures et résultats de la campagne 2011.....	26
2.1 Jaugeages et mesures de vitesse pour améliorer la courbe de tarage	26
2.2 Mesure des concentrations des échantillons prélevés	28
2.3 Distributions granulométriques des matières en suspension dans les prélèvements	29
2.3.1 Taille des particules à différents niveaux dans la section d'écoulement	30
2.3.2 Granulométrie entre prélèvement automatique et manuel	30
2.3.3 Evolution granulométrique sur plusieurs crues	31
2.3.4 Evolution granulométrique au cours d'une crue	34
2.4 Suivi du fonctionnement des décanteurs	36
2.4.1 Présentation des décanteurs.....	36
2.4.2 Volumes déposés.....	37
2.4.3 Granulométrie des dépôts.....	39
2.4.4 Concentration et granulométrie des suspensions en entrée et sortie des décanteurs.....	40
2.4.5 Bilan des observations 2011 sur les décanteurs	41
3 Analyse des résultats 2009-2011.....	43
3.1 Catalogue des épisodes Pluie/Débit	43
3.2 Etude de la pluviométrie	45
3.3 Caractéristiques diverses des épisodes	47
3.3.1 Définition des paramètres étudiés en prétraitement :	47
3.3.2 Caractéristiques générales des paramètres étudiés en prétraitement.....	48
3.3.3 Etudes des intensités.....	49
3.3.4 Lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie	51
3.4 Critères de séparation des épisodes faibles, moyens et intenses	52
3.4.1 Séparation faible/moyen.....	52
3.4.2 Bilan	53
3.5 Analyse du fonctionnement des bassins versants lors d'un épisode pluvieux	54
3.5.1 Période de retour des épisodes pluvieux	54
3.5.2 Analyse des temps de concentration	55
3.5.2.1 Contexte	55

3.5.2.2	Méthode graphique d'estimation du temps de concentration	55
3.5.2.3	Utilisation des formules de la littérature	56
3.5.3	Analyse des coefficients d'écoulement	57
3.5.4	Fonctionnement des décanteurs	58
3.5.5	Facteurs explicatifs de la réponse des bassins aux précipitations : analyses en composantes principales.....	59
3.5.5.1	Restriction du nombre de variables.....	59
3.5.5.2	Résultats	61
3.5.6	Flux de matières en suspension pendant les crues	62
3.5.6.1	Contexte et étapes de travail.....	62
3.5.6.2	Exemple de détermination des flux épisodique appliqué à l'épisode 125 ...	63
3.5.6.3	Reconstitution des flux épisodiques manquants.....	66
3.5.6.4	Flux annuel.....	69
3.6	Proposition d'amélioration des méthodes de suivi.....	71
Conclusion.....		72
Ces premiers résultats seront complétés et affinés dans la synthèse générale prévue à l'issue de la campagne 2011-2012. Ils devront également être confrontés aux observations et résultats des sites expérimentaux du programme CNRT « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » et il est essentiel au-delà de ces deux programmes de pérenniser l'acquisition des séries en cours sur le site-pilote de Poro.	72	
Liste des annexes.....		73
Bibliographie		74

Liste des figures

Figure 1	Carte de localisation du centre minier de Poro en Nouvelle-Calédonie (d'après DIMENC, 2011).....	9
Figure 2:	Carte de localisation des bassins versants du site pilote de Poro	10
Figure 3	Végétation sur le site minier de Poro.....	10
Figure 4	Synoptique des dispositifs de mesure d'une station.....	11
Figure 5 :	a. Station de mesure amont ; b. Station de mesure aval	12
Figure 6	Station de mesure aval par temps de pluie.....	13
Figure 7	Cartographie de l'état de surface du sol du bassin versant Denise et délimitation des sous bassins versants (échelle non respectée car réduction du plan au 1/2500°).....	14
Figure 8	Panorama est-ouest du bassin versant Denise.....	15
Figure 9 :	Baie de Poro le 16/04/2011.....	15
Figure 10 :	Préleveur automatique ISCO (à gauche) et module de vitesse 750 (à droite	17
Figure 11 :	Planche photos illustrant l'installation sur le terrain	17
Figure 12 :	Planche photos illustrant la manipulation pour extraire les échantillons (Pour l'étape 4 l'utilisation d'un entonnoir permet un transvasement plus rapide).....	18
Figure 13 :	Schéma des étapes à suivre lors du prélèvement des échantillons	19
Figure 14 :	Photos de la tranchée du seuil amont avant et après nettoyage	19
Figure 15 :	1. Débit et champ de vitesses à travers une section ; 2. Positon de l'hélice en fonction de la hauteur d'eau de la section	20
Figure 16 :	Méthode du jaugeage au moulinet.....	21
Figure 17 :	1. Matériels nécessaires ; 2. Position du flotteur dans l'eau ; 3. Parcours du flotteur dans la section de mesure du seuil aval.....	22
FigureFigure 18	Schéma du dispositif de filtration sous vide.....	23
Figure 19	Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000	24
Figure 20 :	Module 750 1. Obturation de l'appareil ; 2. Module 750 sans capot ; 3. Blanchiment du module	26
Figure 21 :	Courbe de tarage amont	27

Figure 22 : Courbe de tarage aval	27
Figure 23 : mesures de vitesses du capteur Doppler comparées à celle des jaugeages.....	27
Figure 24 : Gamme des concentrations 2011 pour les seuils amont et aval.....	28
Figure 25 : Relation concentrations maximales et intensités maximales pour toutes les crues recensées en 2011	29
Figure 26 : Distribution granulométrique sur une même verticale, crue du 15/04/11	30
Figure 27 : Distribution granulométrique des MES de la crue du 02/03/11 pour deux prélèvements, automatique et manuel	31
Figure 28 : Distribution granulométrique des échantillons amont (en haut) et aval (en bas) sur l'ensemble des crues.....	33
Figure 29 : Relation concentration diamètre D50 des particules de MES	34
Figure 30 : Relation débit-granulométrie au cours de la crue du 29/04/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)	34
Figure 31 : Evolution granulométrique au cours de la crue du 29/01/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)	35
Figure 32 : Evolution granulométrique au cours de la crue du 17/01/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)	35
Figure 33 : Décanteur FRN01 ; 1. Décanteur vide ; 2 : Décanteur déversant.....	36
Figure 34 : Entrées et exutoire de FRN01	36
Figure 35 : Mesure du niveau des dépôts sur les perches dans FRN01	37
Figure 36 : Localisation du bloc de sédiments échantillonné au fond du décanteur FRN01 ...	38
Figure 37 : Interprétation sédimentologique : correspondance épisodes pluvieux/dépôts de sédiments.....	38
Figure 38 : Distributions granulométriques avec et sans ultrasons des horizons sédimentaires du bloc	39
Figure 40 : Distributions granulométriques des prélèvements d'eau à l'amont et à l'aval du décanteur FRN01 pendant déversement.....	41
Figure 41 : Détermination de la fin de ruissellement.....	44
Figure 42 : Pluviométrie annuelle et saisonnière par pluviomètre	46
Figure 43: Variation mensuelle de la pluviométrie sur Poro Amont et Houailou.....	47
Figure 44 : Comparaison de la pluie amont et aval par épisode	47
Figure 45 : Lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie.....	51
Figure 46: Coefficient d'écoulement zoné en fonction de la pluie pour l'amont	57
Figure 47: Projection des variables de l'ACP sur les plans 1 et 2 (remarque, les cadres bleus n'ont pas de signification particulière, ils sont placés automatiquement par Stasistica)	60
Figure 48: Débits et prélèvements en fonction du temps, exemple pour l'épisode 125à l'amont	63
Figure 49: Débit et concentration en fonction du temps exemple, pour l'épisode 125à l'amont	64
Figure 50: Hystérésis amont et aval de l'épisode 125	64
Figure 51: Flux observés en fonction du flux prévus.....	67
Figure 52: Flux en fonction du débit maximal pour l'amont	67
Figure 53: Flux en fonction du débit maximal pour l'aval	68
Figure 54: Comparaison des résultats des flux amont obtenus par les deux méthodes	68
Figure 55: Evolution du flux mensuel de MES au cours des années	69
Figure 56: Illustration du phénomène d'« eaux rouges »	70

Liste des tableaux

Tableau 1 Propriétés physiques des sous-bassins versants	13
Tableau 2 : Correspondance épaisseurs déposées-crues et poids exportés mesurés à la station amont	38

Tableau 3 : Diamètres médians des différents horizons du bloc de dépôt	40
Tableau 4 : Concentrations en MES de l'eau prélevée à l'amont et à l'aval du décanteur FRN01	40
Tableau 5 : Diamètres caractéristiques en entrée et sortie du décanteur.....	40
Tableau 6 : Altitude et distance deux à deux des pluviomètres et stations de mesure.....	45
Tableau 7 : Paramètres traités lors de la phase de prétraitement (définitions selon ROCHE M.F., 1986).....	48
Tableau 8 : Statistiques sur les paramètres étudiés en prétraitement (Q1 : quantile 25%, Q3 : quantile 75 %)	49
Tableau 9 : Statistiques sur les Imax6, 15, 60, 120 et 1440min.....	51
Tableau 10 : Caractéristiques des pluies amont par catégorie de ruissellement pour l'amont .	53
Tableau 11: Caractéristiques des pluies aval par catégorie de ruissellement pour l'aval.....	53
Tableau 12 : Paramètre de Gumbel pour le site de Poro (ROMIEUX N. ; 2011).....	54
Tableau 13 : Nombre d'épisode par classe de périodes de retour pour l'amont et l'aval	54
Tableau 14 : Temps de concentration calculé avec les formules utilisées par les mineurs.....	56
Tableau 15: Volume théorique des décanteurs en fonction du coefficient d'écoulement	59
Tableau 16: tableau des variables explicatives de chaque axe.....	61
Tableau 17: Flux annuel en MES calculés à partir des résultats du modèle (*jusqu'en mai pour 2011).....	69
Tableau 18: Flux annuel en MES calculés à partir des résultats de la méthode graphique	69
Tableau 19:Répartition des flux en fonction des pluies et des années	71

1 Rappels sur le projet Hydromine

Les sites et les méthodes de mesure ont été largement décrits dans les rapports des années antérieures. Un rappel est néanmoins nécessaire. Il sera complété par un exposé des méthodes employées tant sur le terrain qu'au laboratoire. Les illustrations sont pour la plupart issues du stage Hydromine 2011 (CARPENTIER, 2011).

1.1 Présentation des bassins instrumentés et contexte environnemental

1.1.1 Contexte et localisation

Les bassins versants étudiés sont localisés sur le massif de Poro, plus particulièrement sur la mine Française gérée par le CFTMC (Figure 1), situé sur la commune de Houaïlou, en Province Nord, sur la côte est de la Grande Terre, à environ 3h30 de Nouméa dont il est distant de 220 km.

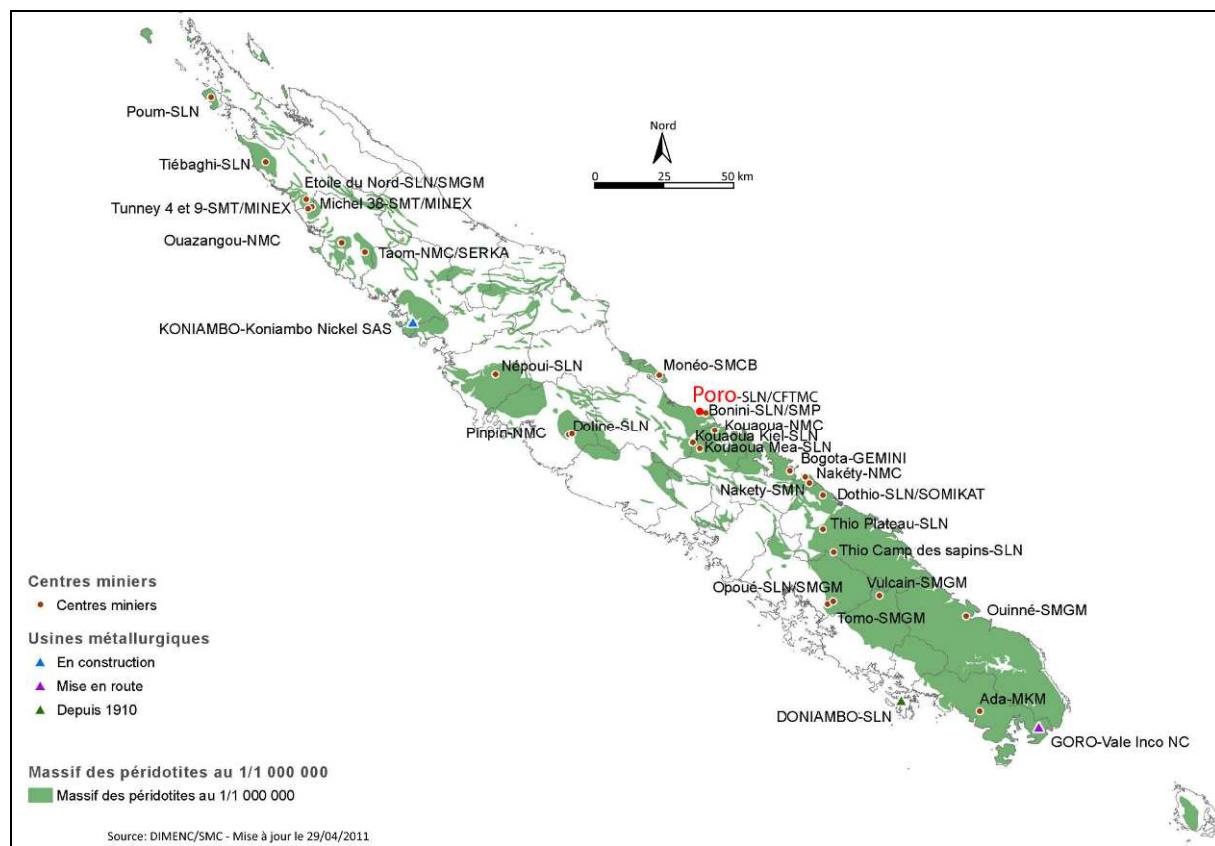


Figure 1 Carte de localisation du centre minier de Poro en Nouvelle-Calédonie (d'après DIMENC, 2011)

Les bassins équipés sont deux bassins emboîtés compris entre 200 et 370 m d'altitude. Le bassin est globalement orienté Nord-nord-est/Sud-sud-ouest. Son ouverture vers le Nord-est sur la mer favorise l'entrée d'une masse d'air marine (Figure 2).

Le climat est tropical, la période pluvieuse est comprise entre décembre et juin. Le relief joue un rôle certain dans la distribution des précipitations. La faible altitude du bassin et sa position face à la mer lui confère une position privilégiée. La chaîne centrale joue le rôle de rempart, favorise les précipitations en provoquant l'ascendance des flux humides apportés par l'alizé de Sud Est et induit un effet de foehn sur les versants ouest.

Le couvert végétal du bassin est relativement pauvre. La végétation est de type maquis minier. (Figure 3).

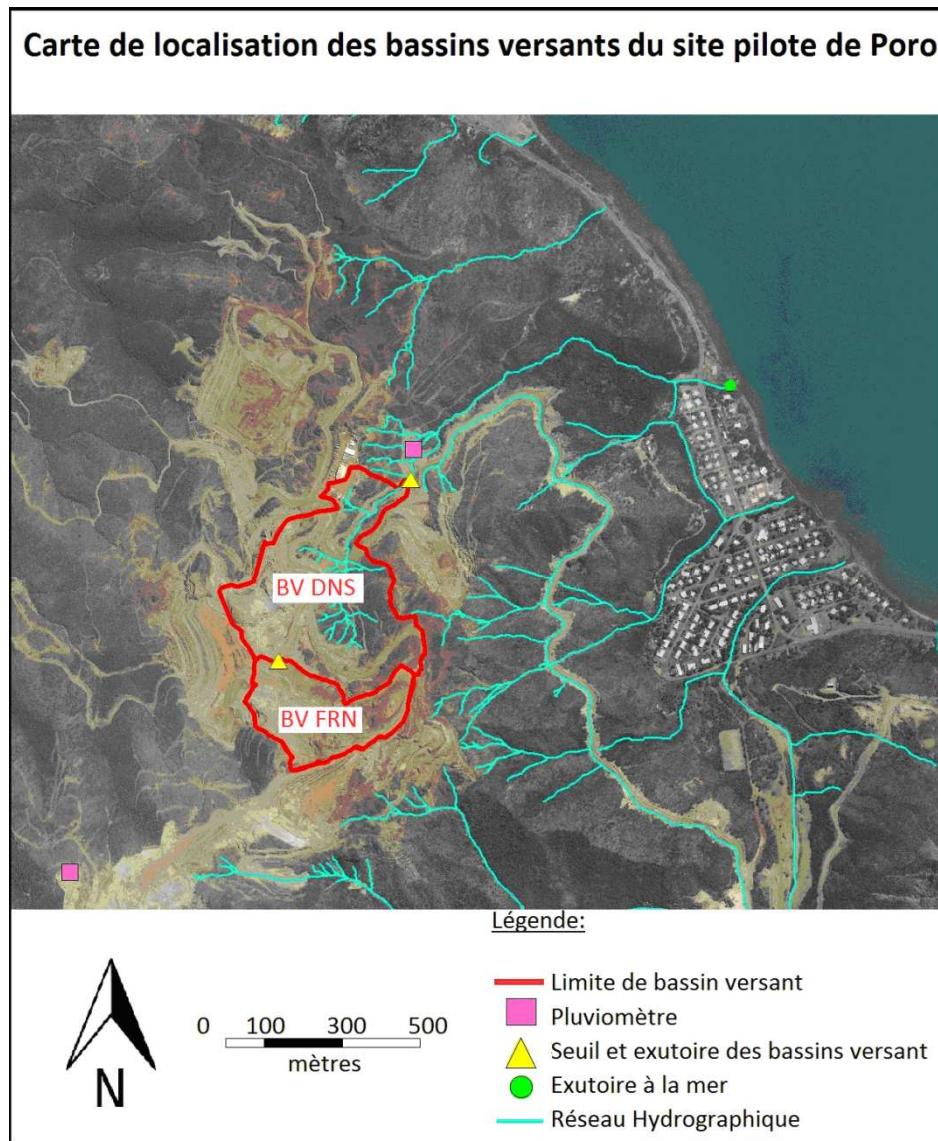


Figure 2: Carte de localisation des bassins versants du site pilote de Poro



Figure 3 Végétation sur le site minier de Poro

1.1.2 Installations de mesure et données obtenues

Les installations ont été mises en place en 2008 et ont pour objectif la mesure des précipitations, des débits liquides et des charges en matières en suspension (MES). Ces dernières sont déterminées par des prélevements automatiques d'échantillons lors des crues.

Les pluies sont mesurées à l'aide de deux pluviomètres enregistreurs (modèle à augets basculeurs de Précis-Mécanique de surface réceptrice 400 cm²) à l'amont (455 m d'altitude) et à l'aval (200 m d'altitude) de la zone d'étude.

Afin d'assurer de bonnes conditions de mesure de débits, chaque station limnigraphique est constituée d'un canal de mesure de section trapézoïdale. Chaque section de mesure est équipée d'une sonde de pression (sonde *In Situ* de modèle *Level Troll 500*) pour mesurer le niveau d'eau et d'un préleveur automatique ISCO 6712. Le préleveur dispose de sa propre mesure de niveau par capteur de pression (module 720 ISCO) afin de programmer les prélevements (Figure 4 & Figure 5). Ces appareils sont protégés par une guérite de protection fermée par un cadenas. Le seuil béton est équipé d'une échelle limnimétrique pour vérifier la hauteur d'eau dans la section. La crête servant à prélever l'eau est placée sur le fond du seuil, mais elle garde une certaine mobilité pour permettre un prélevement dans la section au cours de la crue.

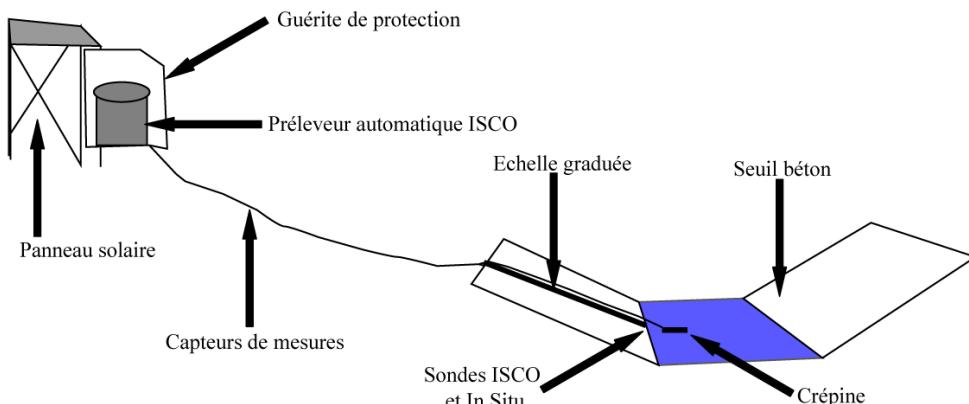


Figure 4 Synoptique des dispositifs de mesure d'une station

La relation hauteur-débit (courbe de tarage) des seuils béton a été établie par la DAVAR par l'application d'un modèle hydraulique à la géométrie du canal (entonnoir, section en travers, pente). Néanmoins, il était nécessaire de vérifier cette loi théorique par des mesures de jaugeage in situ. Or depuis la mise en service des seuils aucun jaugeage n'avait pu être réalisé en raison du temps de réponse rapide du bassin versant, du caractère aléatoire des crues et parfois de difficultés d'accès en période pluvieuse. Les jaugeages au moulinet réalisés en 2011 dans le cadre du stage de Laureen Carpentier ont permis de préciser et de valider la courbe de tarage.

Les données obtenues sont critiquées, validées et archivées par la DAVAR.

On dispose donc pour ce site de plusieurs chroniques

- chroniques des précipitations à pas de temps variable de Poro amont et Poro aval (établies par la DAVAR)
- chroniques des hauteurs à pas de temps variable Poro amont et Poro aval (établies par la DAVAR)
- chroniques des concentrations en crue des prélevements effectués, Poro amont et Poro aval (établies par l'UNC)

Les données validées sont ensuite traitées pour déterminer un certain nombre de paramètres décrivant l'épisode : volume liquide transité par la station, débit maximal, lame d'eau écoulée, coefficient d'écoulement, concentration maximale, concentration moyenne, charge solide transita par la station... Le détail de ces calculs sera explicité en partie 3.



Figure 5 : a. Station de mesure amont ; b. Station de mesure aval

1.2 Etat du bassin, formations superficielles et gestion de l'eau

La carte établie sous ArcGis 10, disponible en Annexe 1. 1, renseigne sur l'état du bassin pendant l'année 2011. Le fond topographique utilisé est tiré du relevé topographique de la SLN réalisé en décembre 2010.

Le bassin versant d'étude appelé aussi bassin versant Denise, a une superficie de 30.4 ha (0,304 km²) et une pente moyenne de 36%. Le bassin est traversé par 2 km de pistes principales et de 3 km de pistes secondaires, rendant l'accès au site facilement praticable.

Ce bassin est découpé en 4 sous-bassins versants emboîtés. Les 4 sous bassins versants étudiés pour le projet sont :

- Le sous bassin versant amont : avec une superficie développée de 9 ha (0,090 km²), ce bassin a pour exutoire la station de mesure amont. Le bassin est recouvert par 27% de saprolite, 27% de latérite, 12% de roche, 1% de remblai, 12% d'aire de stockage de latérites, 3% d'aire de stockage de saprolites et 18% de pistes et lits de creeks. La station de mesure amont est distante à vol d'oiseau de 847 m du pluviomètre amont, de 721 m du pluviomètre aval et de 646 m de la station de mesure aval.
- Le sous bassin versant FRN01 : de surface égale à 14,1 ha (0,141 km²), il correspond au bassin de la station amont complété des apports complémentaires arrivant au décanter FRN01.

- Le sous bassin versant FRN18 : d'une surface de 15,1 ha (0,151 km²) : il correspond au bassin FRN01 auquel viennent s'ajouter quelques apports directs dans le décanteur FRN18.
- Le bassin versant aval : drainant toutes les eaux des bassins précédents auxquels viennent s'ajouter d'autres surfaces, notamment la zone des ateliers, il a pour exutoire la station de mesure aval. Le bassin est recouvert par 14% de saprolites, 17% de latérite, 9% de roche saine, 7% de remblai, 20% de végétation, 5% d'aire de stockage de latérites, 1% d'aire de stockage de saprolites, 2% par une plateforme d'atelier et 25% par les pistes et lits de creeks. La répartition spatiale de ces états de surface est visible sur la carte de l'Annexe 1. La station aval est distante de 88 m du pluviomètre aval et de 1 486 m du pluviomètre amont.

Tableau 1 Propriétés physiques des sous-bassins versants

Sous-bassins	Superficie (km ²)	Taux de végétation (%)	Taux de terrain découvert (%)	Pente moyenne	Altitude min-max
Amont	0,098	0	100	32%	298-373
FRN01	0,141	0	94	33%	276-373
FRN18	0,151	14	85	35%	253-373
Aval	0,304	20	80	36%	195-373

Le centre minier de Poro est l'un des plus anciens sites miniers de la Nouvelle-Calédonie. Il a fonctionné de 1874 à 1986 sous la conduite de la SLN. En 1989, le CFTMC a été créé et s'est implanté sur la mine Française. Mais il reste des reliques de l'ancienne exploitation telles que des verses à stériles sur les versants, laissant la gestion des eaux difficile. De nombreuses rivières sont présentes au sud du bassin, traversant les zones latéritiques et saprolitiques plus tendres et donc facilement érodables. Le transport de particules dans l'eau de ruissellement y est important rendant la couleur de l'eau d'un rouge ocre (Figure 6).

**Figure 6 Station de mesure aval par temps de pluie**

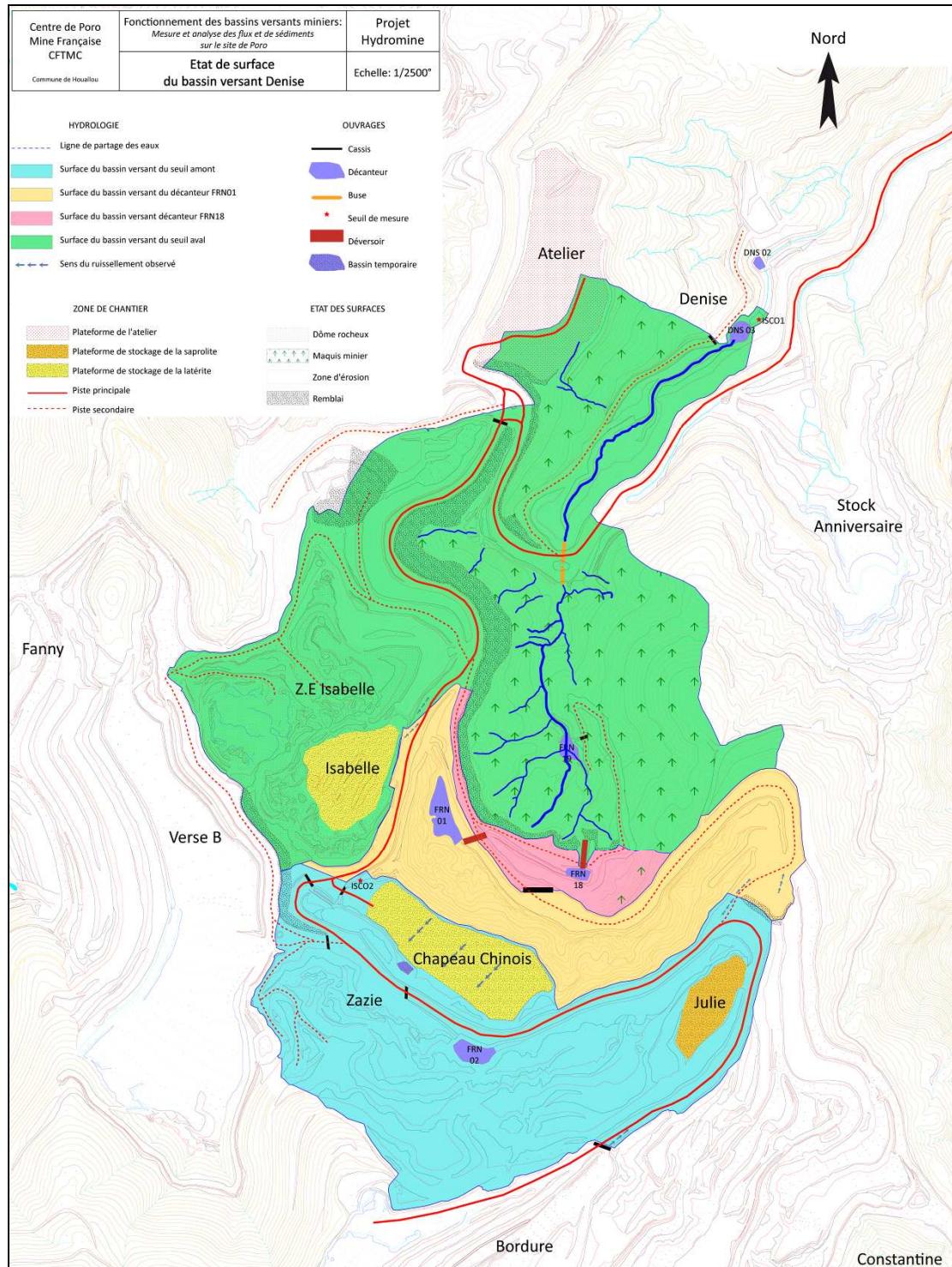


Figure 7 Cartographie de l'état de surface du sol du bassin versant Denise et délimitation des sous bassins versants (échelle non respectée car réduction du plan au 1/2500°)

Le seuil amont (Figure 8) est situé sur une zone de trafic. La zone comporte plusieurs chantiers actifs pendant la période des relevés de la station entre janvier et mai 2011. Le seuil de mesure peut être contaminé par les engins chargés de minéraux et circulant autour de la station. Celle-ci se situe à la jonction de deux zones de stockage, Isabelle et Chapeau Chinois. Le seuil amont se situe donc au centre des activités de la mine et subit de plein fouet les dégâts causés par les poussières volantes et l'érosion anthropique.

La station aval se situe plus en aval et en retrait de l'activité minière. Elle se trouve à une centaine de mètres de l'exutoire du bassin versant Denise. Malgré sa proximité avec la piste principale accédant à la mine, le seuil est très peu touché par l'activité journalière. Les différents décanteurs séparant les deux seuils tentent de diminuer le flux de sédiments transportés. De plus, à l'inverse du bassin versant amont, celui-ci comporte à l'aval une couverture végétale réduisant l'érosion des sols. A l'amont, le couvert végétal est nettement plus réduit voire absent.

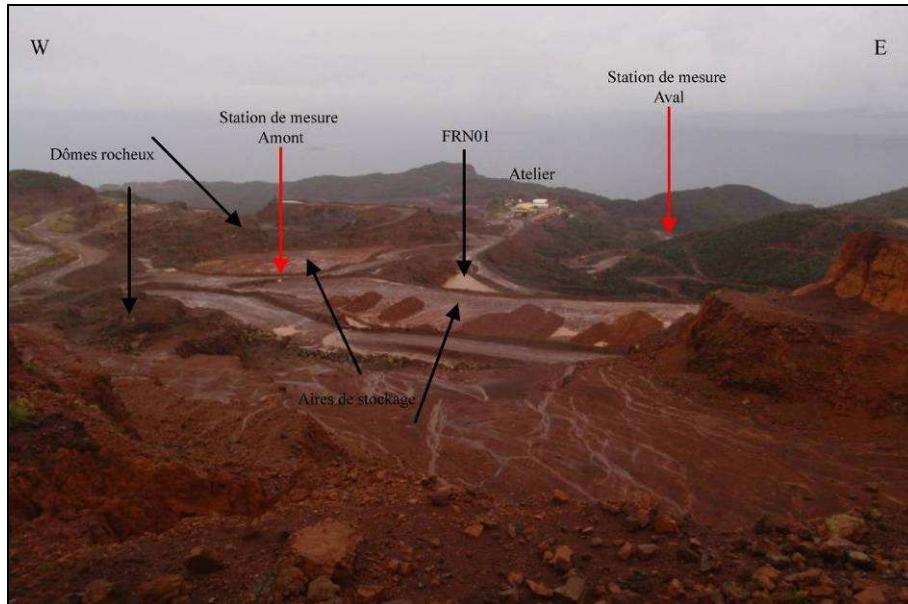


Figure 8 Panorama est-ouest du bassin versant Denise

La gestion des eaux sur mine constitue une étape désormais fondamentale dans le suivi et l'évolution de l'exploitation. Le CFTMC a installé des dispositifs pour tenter de conserver au mieux l'environnement et d'éviter une érosion prématuree du sol et cela en canalisant l'eau de ruissellement. Le projet Hydromine évalue la capacité et l'efficacité de ces dispositifs face à des situations concrètes en périodes pluvieuses. Il s'agit de préserver le lagon des dépôts de matières en suspension (Figure 9).



Figure 9 : Baie de Poro le 16/04/2011

Deux décanteurs sont concernés par l'étude, il s'agit des décanteurs FRN01 et FRN18. Le décanteur FRN01 est situé à l'aval de la station de mesure amont. Le décanteur FRN18 est quant à lui localisé à l'aval du décanteur FRN01. Les surfaces respectives de ces décanteurs

sont de 900 m² et 200 m². Pour chaque décanteur, la superficie du sous-bassin versant qu'il draine a été calculée et est présentée au Tableau 1. Ces deux bassins de sédimentation sont équipés d'échelles sédimentaires permettant de lire directement la hauteur de sédiments déposés depuis le dernier curage. Le curage des décanteurs se fait chaque année vers le mois de novembre. Le décanteur FRN01 présente à l'aval un déversoir permettant de déverser quand il déborde son surplus d'eau vers le décanteur FRN18. Le bassin FRN18 présente lui aussi un déversoir débouchant directement au creek principal du bassin. D'autres décanteurs interviennent entre FRN18 et la station de mesure aval, mais ils ne sont pas étudiés dans le projet Hydromine.

De nombreux ouvrages ont été installés dans le but de gérer l'eau de ruissellement. Les cassis servent à diriger l'eau vers les décanteurs. Il s'agit de dos d'âne (forme en bosse) ou de cuvettes (forme en creux) façonnés en travers des pistes. L'eau de ruissellement coule le long de ceux-ci afin de traverser les pistes ou d'éviter certains obstacles. Il existe plusieurs de ces ouvrages répartis sur tout le bassin d'étude. Par ailleurs, une seule buse a été mise en place, afin de faire passer le creek principal sous la piste d'accès. Cet ouvrage est installé sur le bassin aval au niveau de l'interception entre la piste principale et la piste secondaire menant à la station de mesure aval. Il s'agit d'une canalisation de gros diamètre assurant la continuité du creek. De nombreux caniveaux et talus de remblai ont été réalisés le long des pistes afin de canaliser l'eau de ruissellement et d'éviter l'engorgement des voies de circulation. Ces caniveaux aboutissent aux décanteurs où l'eau est censée se décharger des particules qu'elle transporte.

Malgré ces précautions, après chaque grosse pluie, le personnel du centre refait les pistes qui ont subi d'importants dommages, notamment le creusement de ravines et le dépôt d'éléments grossiers suite à des charriages.

1.3 Matériels et méthodes

1.3.1 Prélèvements

1.3.1.1 Objectifs et méthodes

Le dispositif des stations de mesure est illustré par la Figure 4 et a été décrit plus haut. Les préleveurs automatiques installés sur les deux stations ont pour objectif de prélever des échantillons répartis de manière pertinente au cours de la crue afin de mesurer l'évolution des concentrations et de calculer le flux de sédiments exportés au cours de la crue échantillonnée. Lors du passage sur le site, il s'agit donc de retirer les flacons ISCO remplis automatiquement au cours de la crue précédant le passage sur la station afin de permettre l'analyse au laboratoire des concentrations en MES. Un seul jeu de flacon ISCO étant disponible il est nécessaire de les transvaser dans d'autres contenants (bouteilles en plastiques « Fanta » réservés à cet effet).

L'appareil ISCO 6700 est un préleveur automatique portable alimenté par batterie (12 volts) renfermant 24 flacons de 1 litre. Il est équipé d'une sonde de pression pour mesurer le niveau d'eau. Un programme établi par la DAVAR est géré par la centrale de mesure de l'appareil et permet de déclencher des prélèvements à différents instants au cours d'un épisode de crue. Le seuil minimum de prélèvement pour la station aval est de 7 cm, le seuil de prélèvement pour la station amont est de 5 cm. 18 flacons de 1 à 18 sont consacrés aux événements de type A dit normaux. Six flacons de 19 à 24 sont réservés aux événements de type B dit exceptionnels.

Une fois le seuil minimum dépassé, les prélèvements suivants sont déclenchés lorsque d'autres seuils prédéfinis sont franchis, soit en montée soit en descente. Le nombre de flacons étant limité à 24, six flacons sont réservés aux très forts niveaux de l'écoulement. Ainsi, si des

niveaux élevés, particulièrement intéressants pour l'étude du transport solide, sont atteints, il reste des flacons disponibles pour échantillonner ces forts écoulements, même si le premier lot de flacons est complet. La récupération des données se fait sur un ordinateur portable avec le logiciel Flowlink fourni par le constructeur.

En alternative à la mesure de pression, le préleveur ISCO peut être équipé d'un module de mesure de vitesse. Le module 750 (Figure 10) mesure la vitesse de l'eau selon le principe de Doppler. Pour des hauteurs d'eau <1 mètre, il détermine la vitesse d'écoulement dans le volume d'eau exploré par la sonde à partir du décalage de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie. L'onde émise est réfléchie par les particules transportées par l'écoulement, la vitesse de déplacement des particules est considérée comme égale à la vitesse de l'eau.



Figure 10 : Préleveur automatique ISCO (à gauche) et module de vitesse 750 (à droite)

1.3.1.2 Procédure de relevé des préleveurs

Le préleveur ISCO se trouve à l'intérieur de la guérite blanche fermée avec un cadenas (Figure 11). Une fois la guérite ouverte et le capot de protection de l'ISCO retiré, il suffit de brancher le câble ordinateur/ISCO à l'arrière de la machine au niveau de l'icône du pin femelle :



Figure 11 : Planche photos illustrant l'installation sur le terrain

Ensuite, la récupération des données se fait grâce au logiciel Flowlink disponible sur le bureau de l'ordinateur. L'Annexe 2 renseigne les étapes à suivre pour le transfert du rapport journal sur Flowlink.

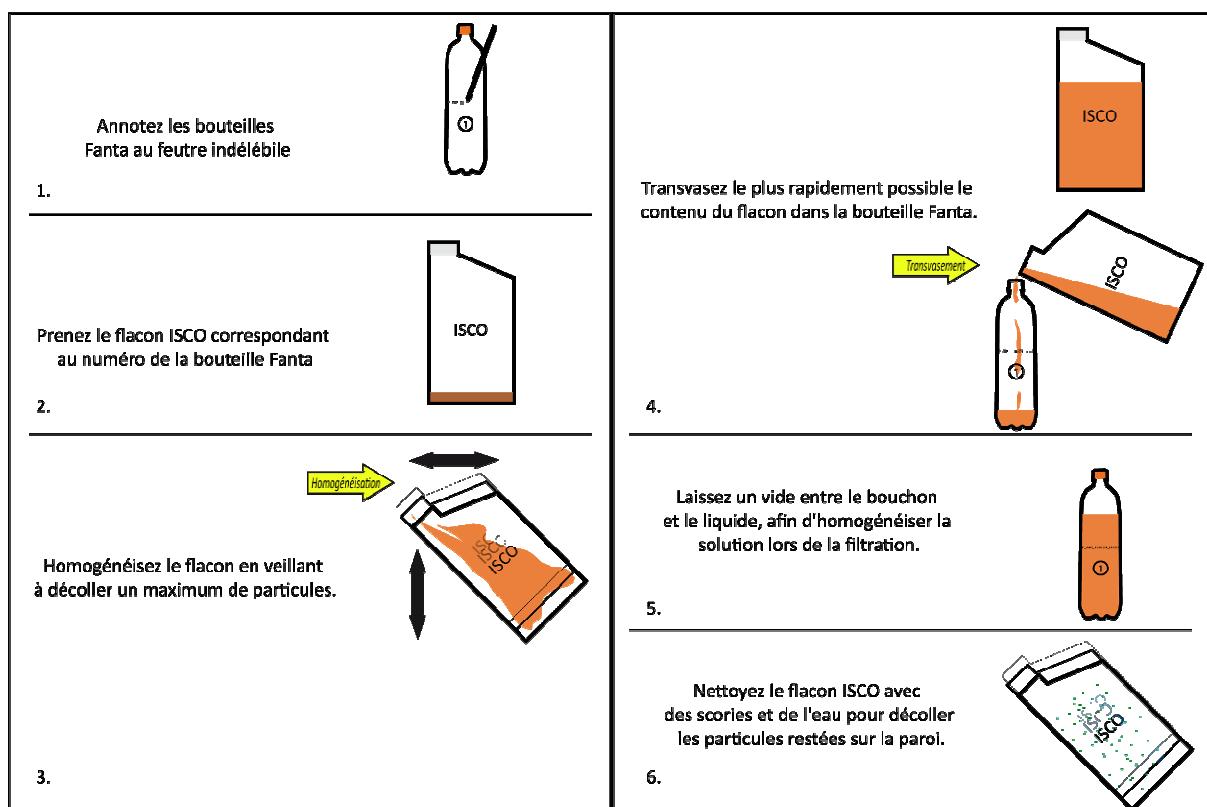
En cas de pluie, qui risquerait d'endommager l'ordinateur portable, le téléchargement du rapport journal s'effectue à l'aide du boîtier RTD de la même manière que l'ordinateur.

Pour pouvoir récupérer les échantillons après avoir transféré le fichier journal de l'ISCO, il suffit de suivre les instructions de la Figure 12. Les flacons ISCO se situent dans le compartiment inférieur de l'appareil.

Les flacons ISCO sont transvidés dans des bouteilles en plastique ("Fanta") de 600 ml. Pour ce faire, il est nécessaire de prendre un nombre de bouteilles équivalent au nombre de flacons ISCO échantillonnés.

Les bouteilles sont notées de la façon suivante :

- Pour l'aval : « P_AV_aammjj_ISCO1_N° de la série dans la journée et N° flacon ISCO »;
- Pour l'amont : « P_AV_aammjj_ISCO1_N° de la série dans la journée et N° du flacon ISCO », ce dernier est entouré.



**Figure 12 : Planche photos illustrant la manipulation pour extraire les échantillons
(Pour l'étape 4 l'utilisation d'un entonnoir permet un transvasement plus rapide)**

La Figure 13 illustre la méthode utilisée pour récupérer les échantillons. Lorsque le prélèvement est fini, les flacons sont replacés dans leur compartiment, l'anneau de protection et les élastiques sont remis, puis le cerveau de l'appareil est repositionné en veillant à ne pas coincer les tuyaux. L'ISCO est désormais prêt à être rallumé.



Figure 13 : Schéma des étapes à suivre lors du prélèvement des échantillons

1.3.2 Entretien des seuils de mesures

Les seuils doivent être régulièrement nettoyés des dépôts qui ont pu s'y accumuler, surtout après chaque grosse crue. Les tranchées doivent être vidées des sédiments et les sondes nettoyées à l'aide d'un pinceau et d'eau claire (Figure 14).

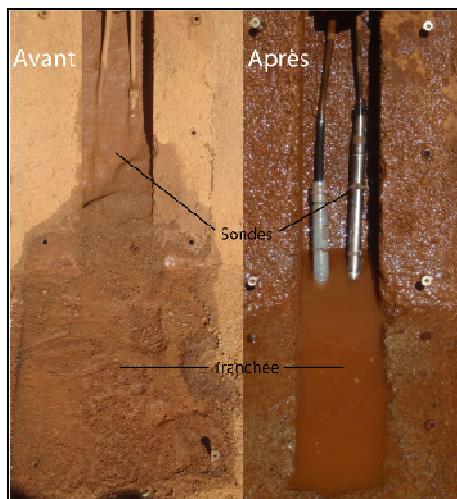


Figure 14 : Photos de la tranchée du seuil amont avant et après nettoyage

1.3.3 Jaugeages

1.3.3.1 Jaugeages au moulinet

Afin de déterminer la relation hauteur-débit, des mesures ponctuelles de la vitesse du courant sont effectuées au niveau de chacun des seuils.

Les jaugeages sont effectués selon la méthode d'exploration du champ de vitesse au moyen d'un moulinet hydrométrique. Le débit est calculé en effectuant l'intégrale de toutes les mesures de vitesse sur la section mouillée.

Le matériel nécessaire comprend :

- Caisse de jaugeage : moulinet, 3 hélices, compteur d'impulsions, perche graduée de diamètre 10 ou 20 mm ;
- Décamètre ;
- Montre ;
- Fiche de jaugeage

Le moulinet hydrométrique est un appareil muni d'un rotor dont la vitesse de rotation est fonction de la vitesse locale du fluide dans lequel il est immergé.

Une hélice est caractérisée par son diamètre et son pas. Les diamètres des hélices utilisés sont de 50 mm. On distingue le pas nominal, caractéristique donnée par le constructeur et le pas réel, déterminé par étalonnage après usinage de l'hélice. Les pas nominaux utilisés sont: 0,05; 0,10; 0,25 mètre. Le choix du pas de l'hélice pour exécuter une mesure sera déterminé en fonction de la vitesse du courant. Pour une vitesse moyenne d'écoulement donnée, on préférera une hélice à pas faible, qui aura donc une plus grande sensibilité, mais qui générera un grand nombre d'impulsions sur le compteur. Il faut chercher à rester dans l'intervalle 1 à 10 tour/s.

Le moulinet se trouve placé plus ou moins haut par rapport à la semelle du détecteur de fond. Il importe de connaître avec précision cette distance appelée constante de perche, pour corriger les profondeurs en conséquence. Ici, la constante de perche égale à 0,03 mètre pour la perche de Ø 20mm, nulle pour la perche de Ø 10mm.

Le jaugeage au moulinet hydrométrique (Figure 16) mesure la vitesse de l'écoulement en un point. La méthode permet de calculer le débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du creek. La méthode n'est utilisable que dans des sections de profondeur inférieure à 1 m et des vitesses d'écoulement faibles (<1 m/s).

- Si $H < 0,070$ m : la mesure se fait au centre de la section ;
- Si $0,070 < H < 0,250$ m : la mesure se fait au fond et au milieu de la verticale (2 pts/verticale) ;
- Si $H > 0,250$ m : la mesure est prise au milieu de la verticale, au fond de la section et en surface (3 pts/verticale), (Figure 15).

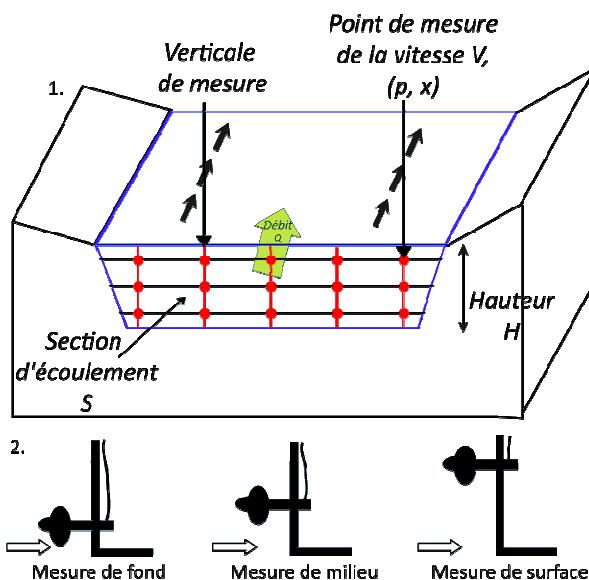


Figure 15 : 1. Débit et champ de vitesses à travers une section ; 2. Positon de l'hélice en fonction de la hauteur d'eau de la section

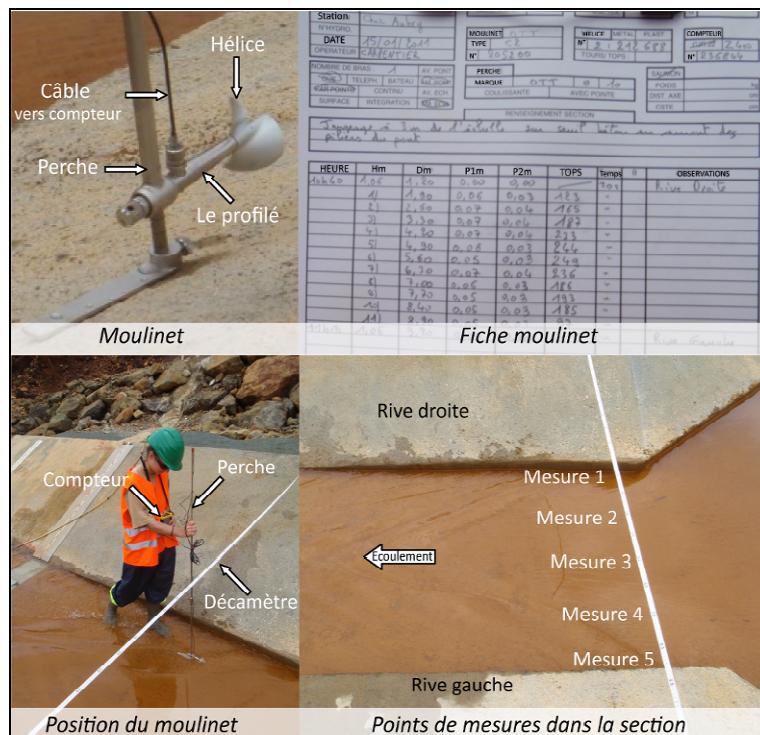


Figure 16 : Méthode du jaugeage au moulinet

Les mesures se font à gué. L'opérateur se place le long de la section de jaugeage et tient directement à la main le moulinet monté sur perche (Figure 16).

La position des points de mesure est repérée en ordonnée à l'aide des graduations portées sur la perche, et en abscisse (distance de la berge=Dm) sur un double décimètre tendu en travers du seuil. L'opérateur doit se tenir relativement éloigné de façon à ne pas perturber l'écoulement, le dispositif doit être tenu devant l'opérateur et face au courant.

Pour commencer, le choix de l'hélice est fonction de la vitesse du courant. Pour cela, l'hélice est immergée pendant 30 secondes. Si le compteur indique un nombre de tours d'hélice supérieur à 300, l'hélice du pas supérieur sera nécessaire pour effectuer le jaugeage.

La vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps) mesure la vitesse d'écoulement en chacun des points. La fonction $v=f(n)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de longueur L se fait par intégration des vitesses vi définies en chacun des points de la section de profondeur pi (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale P) et d'abscisse xi (variant pour chaque verticale de 0 à L) (Echo2, 2001).

$$Q = \int_S V \cdot dS = \int_0^P \int_0^x v_i \cdot dp \cdot dx$$

1.3.3.2 Jaugeages au flotteur

Il s'agit lorsque la vitesse de l'eau ne peut pas être mesurée au moulinet en raison d'une hauteur d'eau insuffisante ou lorsqu'au contraire un trop fort courant rend trop dangereuse la mesure classique, de mesurer la vitesse d'écoulement de surface par la vitesse de déplacement d'un objet flottant à la surface de l'eau.

Les flotteurs peuvent être soit artificiels soit naturels. Ici, il a été choisi des tiges de roseaux. Plusieurs mesures de vitesses du flotteur doivent être effectuées et il est souhaitable pour

obtenir la vitesse moyenne de surface de faire une moyenne à partir de plusieurs lancers à différentes distances des rives.

Les tiges de roseaux servent de flotteurs, le chronomètre mesure le temps de parcours, le mètre mesure la hauteur d'eau dans la section et la fiche flotteurs sert à inscrire les durées de chaque flotteur (Figure 17).

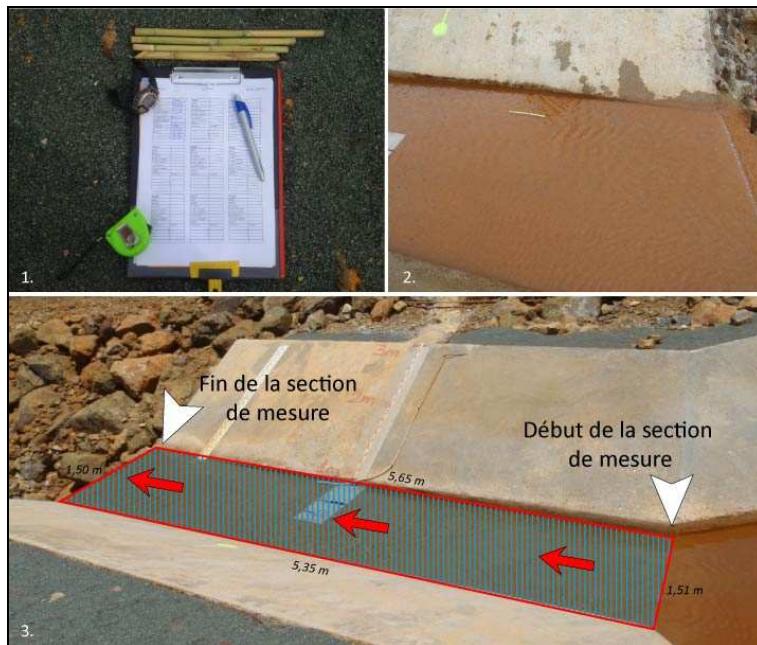


Figure 17 : 1. Matériels nécessaires ; 2. Position du flotteur dans l'eau ; 3. Parcours du flotteur dans la section de mesure du seuil aval

Le calcul de la vitesse de surface correspond au quotient de la longueur de la section (en mètre) par la moyenne des temps de parcours (en seconde). Le débit correspond au produit de la surface d'écoulement par la vitesse de la surface affectée d'un coefficient approprié pour tenir compte du rapport entre vitesse de surface et vitesse moyenne. Ce coefficient est en général déduit des jaugeages complets au moulinet.

1.3.4 Mesure au laboratoire de la concentration en MES des échantillons

Objectif

La mesure des concentrations en MES s'effectue grâce au procédé de filtration sous vide qui consiste à filtrer un volume de liquide donné et d'en déterminer par pesée différentielle le poids de matières retenues par le filtre. Les échantillons ainsi recueillis sur le terrain sont filtrés selon un protocole établi.

Matériels et procédé

- Balance de précision à 0,0001g Sartorius ;
- Bécher de 500ml ;
- Chronomètre ;
- Bécher quelconque ;
- Seringue de 60ml ;
- Pince plastique ;
- Filtres GF/C Whatman 47 mm ;
- Boîtes de Pétri ;
- Fiole à vide ;
- Trompe à eau;
- Dispositif Büchner;
- Pince métallique ;
- Agitateur magnétique ;
- Barreau ;
- Cahier de laboratoire ;
- Fiche échantillons ;
- Marqueur indélébile ;
- Papier à essuyer ;
- Etuve Memmert ;

La méthode par filtration des échantillons permet de séparer les particules du liquide. Le filtre utilisé permet de retenir les particules de la solution.

Il s'agit d'un filtre en microfibres de verre de marque Whatman. Il est recommandé dans les processus standards de dosage des MES. Ses caractéristiques sont citées ci-dessous :

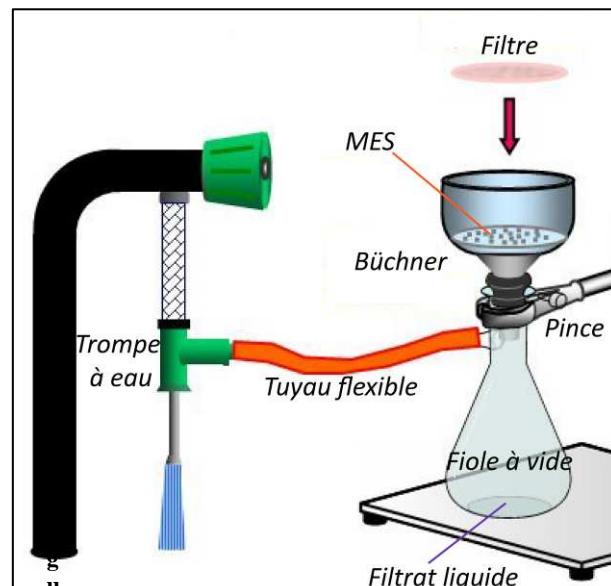
- Diamètre : 47 mm ;
- Porosité : 1,2 µm ;
- Epaisseur papier : 260 µm ;
- Temps de filtration : 6,7 s ;
- Grammage:53 g/

Mode opératoire

Tout d'abord, il est nécessaire de peser les filtres. Pour ce faire, les filtres sont stockés à l'étuve pendant 48 heures à 60°C. Ceux-ci sont alors pesés grâce à la balance électronique de précision (au 1/10000 de g) de marque Sartorius. Une boîte de Pétri est dédiée à chacun des filtres. Sur le dessus des boîtes, les références du filtre sont inscrites. Il existe une nomenclature pour nommer les filtres : « II_FRN_N°filtre » pour les échantillons du seuil amont et « II_DNS_N°filtre » pour les échantillons du seuil aval.

Préparation du dispositif

Le dispositif (Figure 18) doit se trouver à proximité d'une source d'eau. Il est alors primordial que l'embout du robinet soit compatible avec la trompe à eau. La trompe à eau est installée au robinet, le tuyau flexible est fixé entre la trompe à eau et la fiole à vide. Le dispositif Büchner est placé sur la fiole à vide, le filtre installé sur la membrane. La pince métallique rend l'ensemble hermétique.



reFigure 18 Schéma du dispositif de filtration sous vide

La filtration sous vide

Le filtre en fibre de verre est placé sur le dispositif. Après avoir homogénéisé la solution à filtrer, 60 ml de celle-ci est versée sur le filtre. Une fois le filtre essoré, il faut le sécher à l'étuve à 60°C pendant 48 heures. Puis, il est pesé sur la balance de précision. La teneur en MES (g/l) de l'eau est donnée par l'expression :

$$C = (M_1 - M_0)/V$$

M_0 : masse du filtre sec avant utilisation ;

M_1 : masse du filtre sec après utilisation ;

V : volume d'eau filtré.

Les planches photographiques en Annexe 3 expliquent les différentes étapes à suivre pour réaliser la filtration sous vide et la pesée.

1.3.5 Analyse granulométrique laser

Afin de caractériser les matériaux en suspension, il est nécessaire de connaître la distribution granulométrique des particules transportées. Compte tenu de la faible taille de ces particules, le granulomètre laser Mastersizer 2000 du PPME est utilisé (Figure 19).

Le granulomètre laser est conçu pour l'étude des poudres, des émulsions et des suspensions entre 0.02 µm et 2 mm. Il utilise une large gamme d'accessoires pour petit et grand volume d'échantillon ainsi qu'un passeur automatique.

Il existe deux modes de dispersion. Un mode de dispersion par voie sèche et un mode de dispersion par voie liquide. Le type de dispersion du préparateur d'échantillon Hydro S est liquide et a une contenance de 50 à 200 ml. Son mécanisme de dispersion fonctionne grâce à une pompe et à un agitateur à arbre unique et à variation continue. Sa sonde à ultrasons fonctionne à variation continue. L'appareil est commandé soit de façon automatique à l'aide des SOPs (procédures opératoires standardisées), soit de façon manuelle par boîte de dialogue à l'écran de l'ordinateur.

L'appareil permet une reproductibilité assurée par les SOPs créées sur le logiciel par l'opérateur. La particularité de cette fonction est d'éliminer la variation des résultats due aux manipulations de l'opérateur et de permettre des transferts de méthodes globales. Il s'agit d'incorporer automatiquement tous les paramètres de mesure aux fichiers de résultats (d'après Mastersizer 2000, 2011).

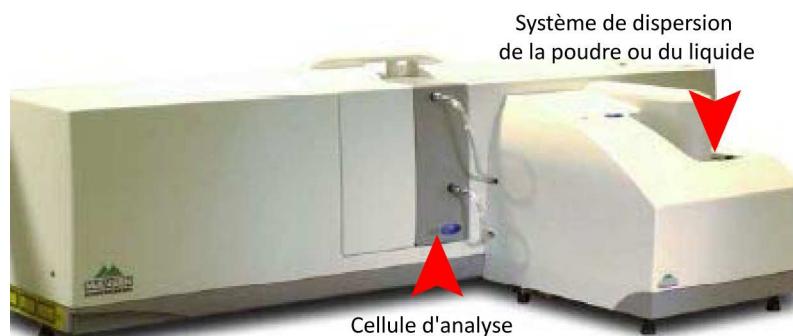


Figure 19 Granulomètre laser Malvern Mastersizer 2000

Le principe de l'appareil est basé sur l'envoi d'un rayon laser sur le milieu contenant des particules. Chaque particule diffracte la lumière selon un angle qui est fonction de sa taille, les plus petites particules dispersant davantage la lumière que les grosses. La lumière diffractée traverse la lentille et elle est recueillie par un récepteur photosensible. Le résultat obtenu est une figure de diffraction annulaire d'Airy qui est transformée à l'aide d'algorithmes de traitement d'image, convertissant le signal en informations granulométriques. Cette méthode s'appuie sur la théorie de la dispersion de la lumière appelée théorie de Mie (d'après Mastersizer 2000, 2011). Le résultat, illustré sous forme de courbe semi-logarithmique, est une distribution de particules en volume (diamètre d'une sphère de volume équivalent) (d'après Laboratoire Eric Beucher, 2011).

Préparation de l'échantillon

L'échantillon est transvasé dans un bécher et homogénéisé à l'aide d'un agitateur magnétique. La solution sera prélevée à l'aide d'une seringue ou d'une pipette. Trois doses seront prélevées pour une meilleure approche des résultats.

Préparation de la manipulation

Avant toute manipulation la cuve du dispositif Malvern doit être remplie. Une vingtaine de minutes sont nécessaires pour que le laser se stabilise et s'aligne. Lorsque le bruit de fond devient raisonnable, la manipulation peut commencer. Une fois la SOP démarrée, à l'aide d'une seringue ou d'une pipette il suffit de verser la solution homogénéisée à analyser dans la cuve en veillant à ce que l'obscuration laser soit comprise entre 10 et 20%. L'opération sera alors renouvelée 3 fois pour un même échantillon. La manipulation terminée, la cuve doit être nettoyée au moins 3 fois lorsque le liquide est fortement concentré

L'Annexe 4 présente en détail la démarche de la manipulation.

2 Observations, mesures et résultats de la campagne 2011

2.1 Jaugeages et mesures de vitesse pour améliorer la courbe de tarage

La vitesse de l'écoulement a été mesurée par des jaugeages au moulinet et aux flotteurs. Au cours de la campagne 2011, 8 jaugeages au moulinet et 13 jaugeages aux flotteurs ont été réalisées au cours des épisodes pluvieux. Les vitesses obtenues ont ensuite été transférées à la DAVAR qui les utilise pour vérifier et améliorer la relation Hauteur/Débit ou courbe de tarage. La précision des mesures des débits dépend de la méthode utilisée, de la rigueur apportée lors des mesures, de l'analyse des données et de l'aspect du terrain.

Une seconde méthode a été testée pendant la période 2011. Il s'agit de la méthode de Doppler. L'appareil est un module 750 relié au préleveur automatique ISCO, il est fixé au fond du seuil (Figure 20) et mesure la vitesse de l'écoulement à l'aide du décalage de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie par les particules. Cette méthode n'est pas encore tout à fait au point, le dispositif ayant un capot de protection est soumis aux obstacles éventuels (branches, feuilles, vent etc.) (.Figure 20.1) venant perturber les mesures. Ce capot a été retiré (.Figure 20.2) pour éviter ce genre d'obturation. Or, l'appareil est extrêmement fragile et blanchit quand il est exposé trop longtemps au soleil (Figure 20.3).



Figure 20 : Module 750 1. Obturation de l'appareil ; 2. Module 750 sans capot ; 3. Blanchiment du module

Les jaugeages réalisés ont permis de conforter la courbe de tarage théorique du seuil amont et de rectifier la courbe de tarage du seuil aval. La Figure 21 et la Figure 22 permettent de visualiser les jaugeages sur les courbes de tarage.

Les périodes d'installation du capteur Doppler ont montré que pour des hauteurs d'eau suffisantes, les mesures données par le capteur étaient cohérentes avec les vitesses attendues de la courbe théorique et avec les vitesses déduites des jaugeages (Figure 23)

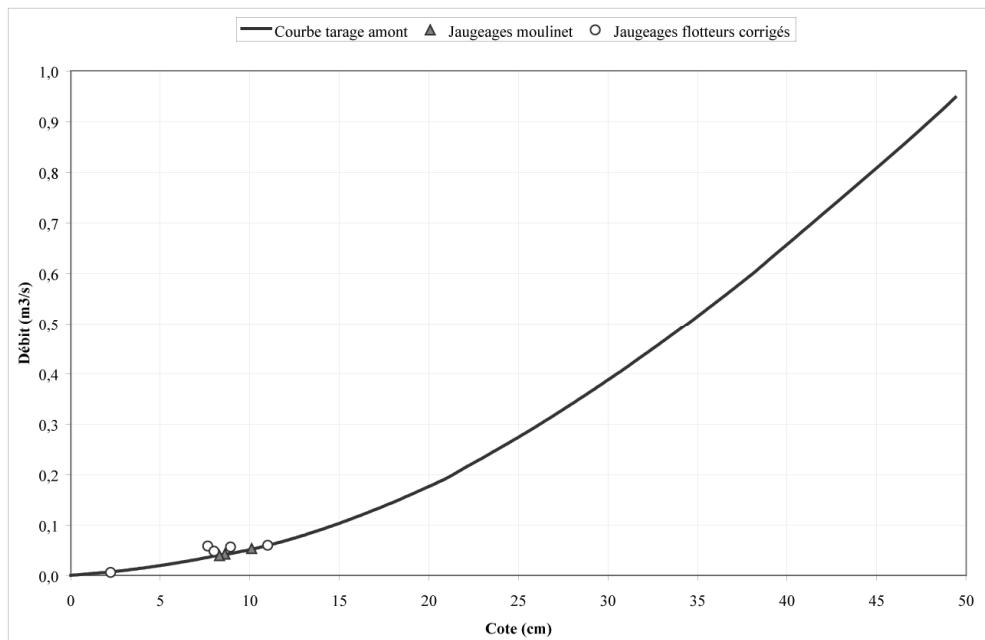


Figure 21 : Courbe de tarage amont

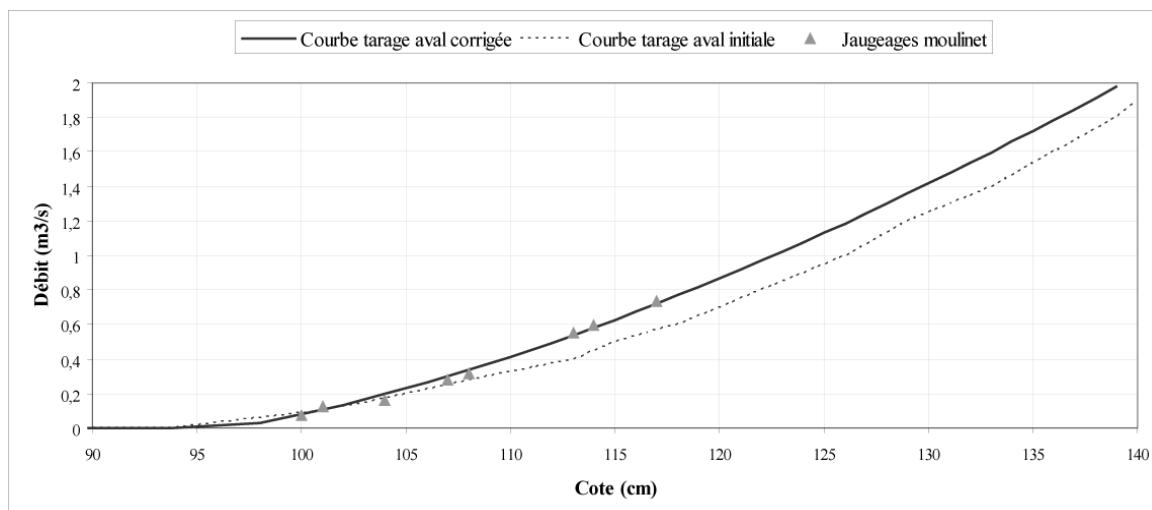


Figure 22 : Courbe de tarage aval

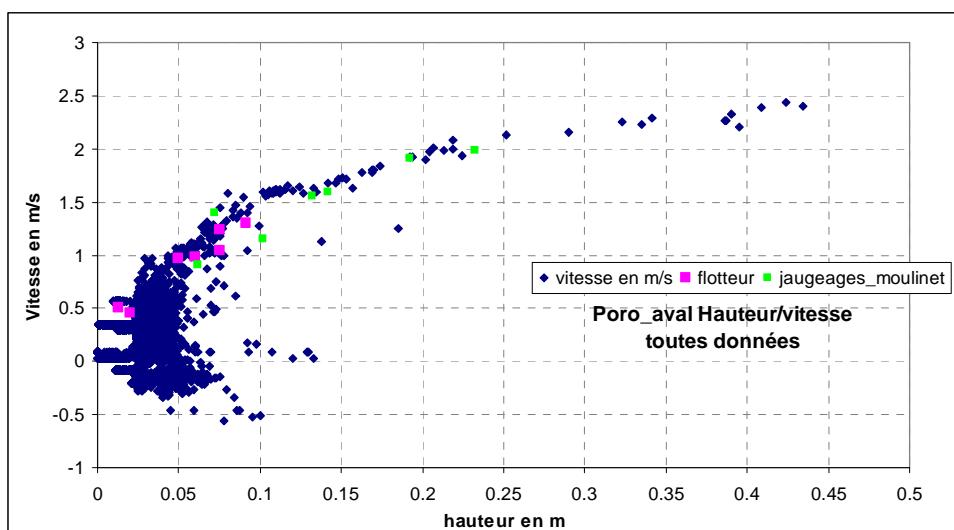


Figure 23 : mesures de vitesses du capteur Doppler comparées à celle des jaugeages.

2.2 Mesure des concentrations des échantillons prélevés

Pour la saison 2011 (de janvier à mai 2011), 58 épisodes pluvieux de plus de 5 mm de pluie ont été répertoriés. 19 crues ont fait l'objet de prélèvements de MES, ce qui représente 299 échantillons analysés au laboratoire. Les résultats de ces analyses ainsi que les données des consignes ayant donné lieu aux prélèvements sont regroupés en Annexe 5.

Les concentrations mesurées en 2011 s'échelonnent de quelques centièmes de g/l à 28,4 g/l à l'amont et quelques millièmes de g/l à 7,3 g/l à l'aval. Les gammes des concentrations pour les deux seuils sont présentées dans la Figure 24.

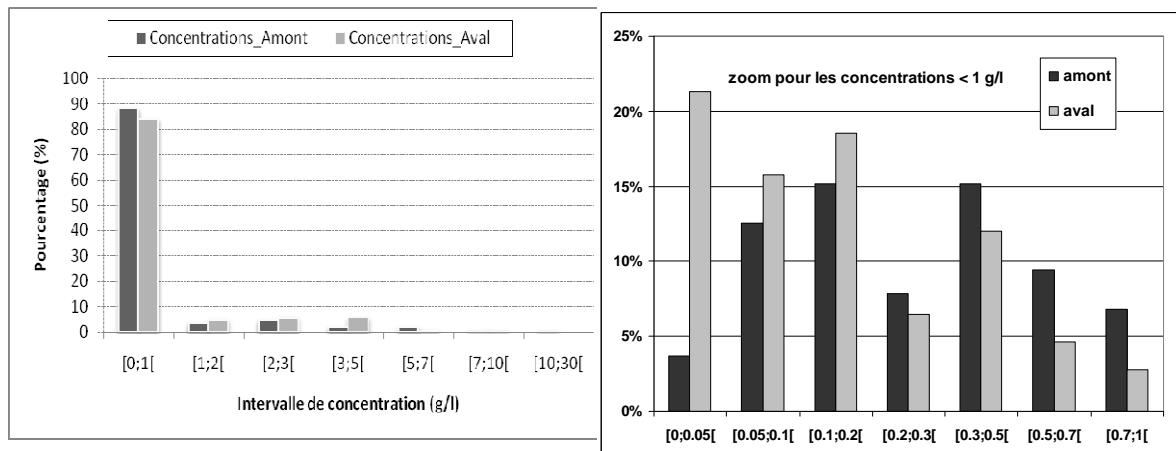
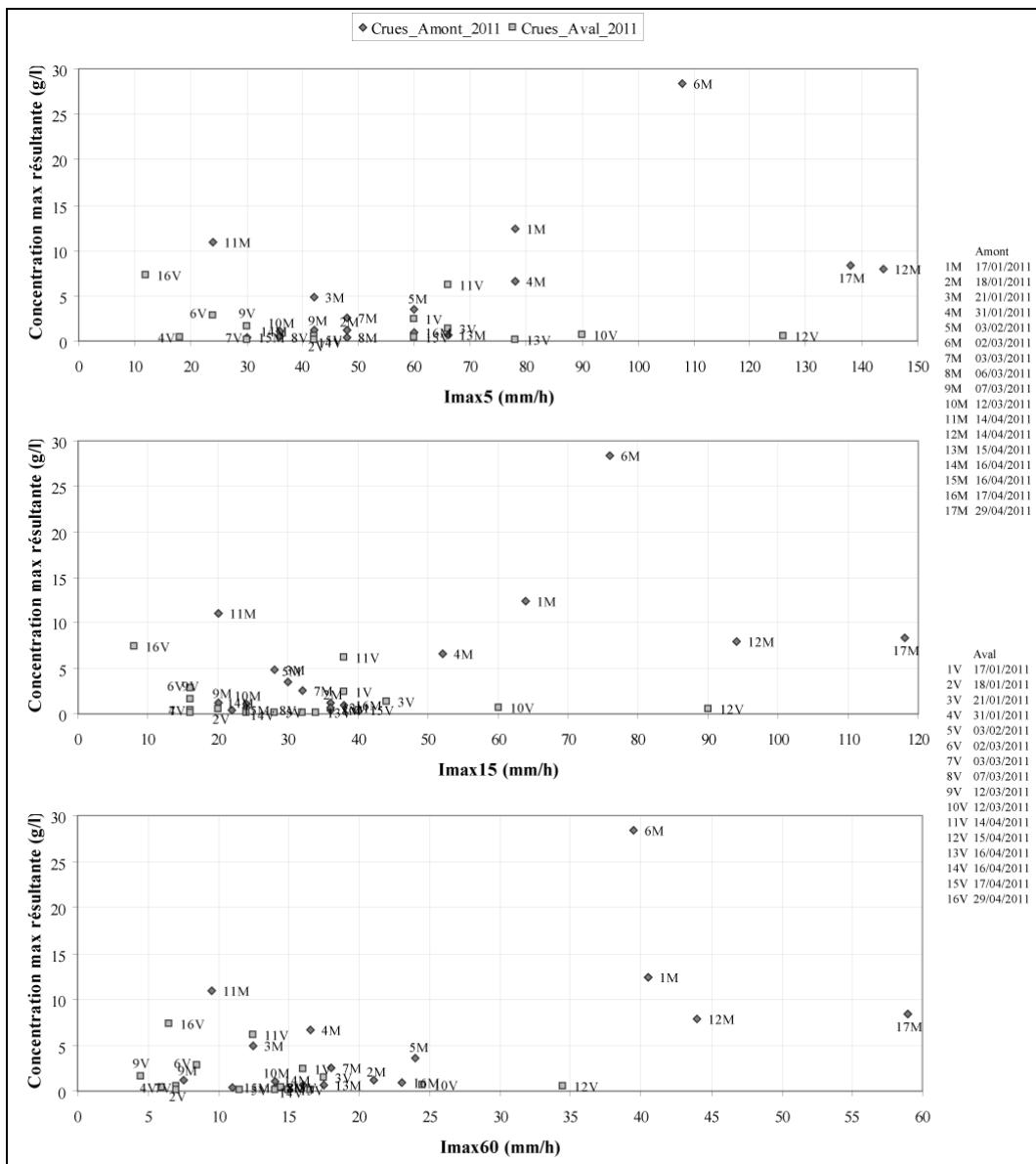


Figure 24 : Gamme des concentrations 2011 pour les seuils amont et aval

La plus forte concentration de 2011 (et des 3 années) a été mesurée au seuil amont le 02/03/11 et elle est égale à 28 g/l. Cette crue d'une durée de 20 :15 :00 pour une durée d'averse de 02 :22 :52 a reçu 49,5 mm de pluie et a produit 1 875 kg de MES pour un volume d'eau écoulée de 1 977 m³. L'intensité maximale sur 5 minutes est l'une des plus fortes de la saison 2011 (Imax5=108 mm/h). La veille et le jour même de la crue 2 100 tonnes de minerai ont été brassés sur les fronts de taille et sur les aires de stockages réparties autour du seuil amont (source : CFTMC). La concentration maximale a été mesurée au début de la montée de la crue, révélant le rôle certain de l'environnement minier sur le bassin amont.

La Figure 25 met en regard les concentrations maximales observées au cours des crues de 2011 et les intensités maximales observées au cours des averses qui les ont générées. Ce graphe met en évidence une grande variabilité de la réponse en concentration aux intensités des précipitations. Une analyse plus détaillée des relations entre concentration et paramètres descriptifs des crues sera conduite dans la troisième partie de ce rapport, sur la totalité de la période 2009-2011.

Les concentrations moyennes des crues sont comprises entre 0,12 g/l (le 07/03/11) et 2,96 g/l (le 14/04/11) à l'amont et 0,057 g/l (le 03/03/11) et 4,20 g/l (le 14/04/11) à l'aval.



plus générale l'évolution sur plusieurs crues au cours de la saison des pluies. Les mesures de granulométrie ne sont donc pas réalisées systématiquement. La plupart du temps, les échantillons mesurés sont sélectionnés en fonction de leur position au sein de la crue (montée de crue, maximum de crue et décrue).

2.3.1 Taille des particules à différents niveaux dans la section d'écoulement

Dans l'objectif de déterminer s'il y avait ou non ségrégation des particules sur une même verticale, plusieurs prélèvements manuels ont été réalisés sur une tranche d'eau pendant la crue du 15/04/11. Trois échantillons ont été prélevés, à 50 mm du fond du canal (AMONT_ISCO2_1), à 120 mm du fond (AMONT_ISCO2_2) et à 200 mm du fond (AMONT_ISCO2_3).

L'examen de la Figure 26 a permis de conclure qu'il y avait peu de différence sur la verticale pour les D10 et D50 ($D10=1,504 \mu\text{m}$; $D50=5,012 \mu\text{m}$). Le D90 est plus variable et compris dans une plage de 22,909 à 34,674 μm . Cette grandeur est très influencée par quelques grosses particules supérieures à 0.2 mm (second mode de la distribution).

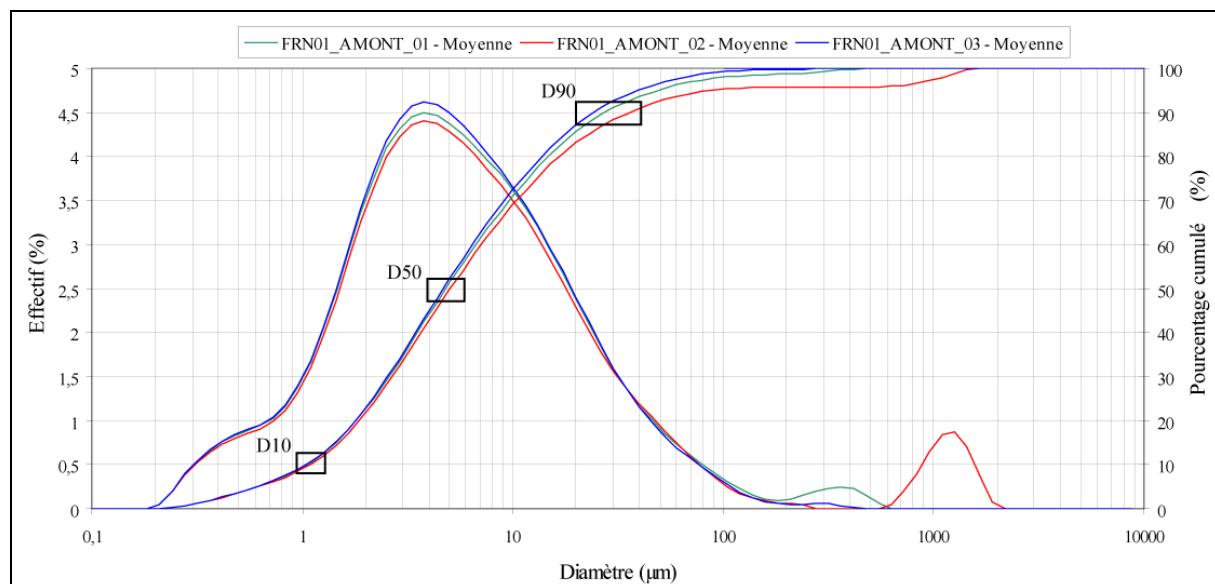


Figure 26 : Distribution granulométrique sur une même verticale, crue du 15/04/11

La taille des matériaux est faible avec un D50 de l'ordre de 5 μm et 70 % des particules inférieures à 10 μm . On note que la ségrégation des particules en fonction de la tranche d'eau est infime. Cependant, on remarque qu'au milieu de la tranche d'eau la taille des particules est légèrement plus grossière notamment pour le D90 (Mais pour ce dernier cas on peut éventuellement incriminer le bruit de fond de l'appareil). A la surface de la tranche d'eau la taille des particules est légèrement plus fine.

2.3.2 Granulométrie entre prélèvement automatique et manuel

On peut se demander si la pompe péristaltique du préleveur ISCO ou la géométrie et la position de la crête d'entraîne pas une ségrégation des particules au cours de prélèvement, c'est-à-dire une sélection des particules qui fausserait l'estimation de la taille des grains dans les suspensions.

Deux échantillons « P_AV_110303_ISCO1_6 » et « P_AV_Manuel_110302_1 » ont été prélevés en même temps le 02/03/11 à 15h51. Le premier est échantillonné par le préleveur automatique et le second de façon manuelle par l'opérateur à l'aplomb du préleveur et au

milieu de la tranche d'eau. Cette manipulation permet de se renseigner sur la variation de concentration et de distribution granulométrique entre les échantillons ainsi obtenus.

Les concentrations calculées, 1,033 g/l pour l'échantillon automatique et 1,193 g/l pour l'échantillon manuel montrent une différence de 13% entre les deux échantillons. Ce résultat reste satisfaisant compte tenu des incertitudes créées lors de l'échantillonnage, de la pesée des filtres et de la filtration.

La Figure 27 renseigne sur la distribution granulométrique des deux échantillons. Pour chacun des flacons prélevés, trois sous-échantillons ont été traités au granulomètre Malvern. Les résultats en pointillé concernent l'échantillon manuel et les résultats en trait continu l'échantillon du préleveur ISCO. Pour chaque échantillon placé dans le granulomètre, l'appareil fait plusieurs mesures successives puis calcule la moyenne. C'est cette dernière donnée qui figure sur le graphe, en distribution par diamètre et en distribution cumulée.

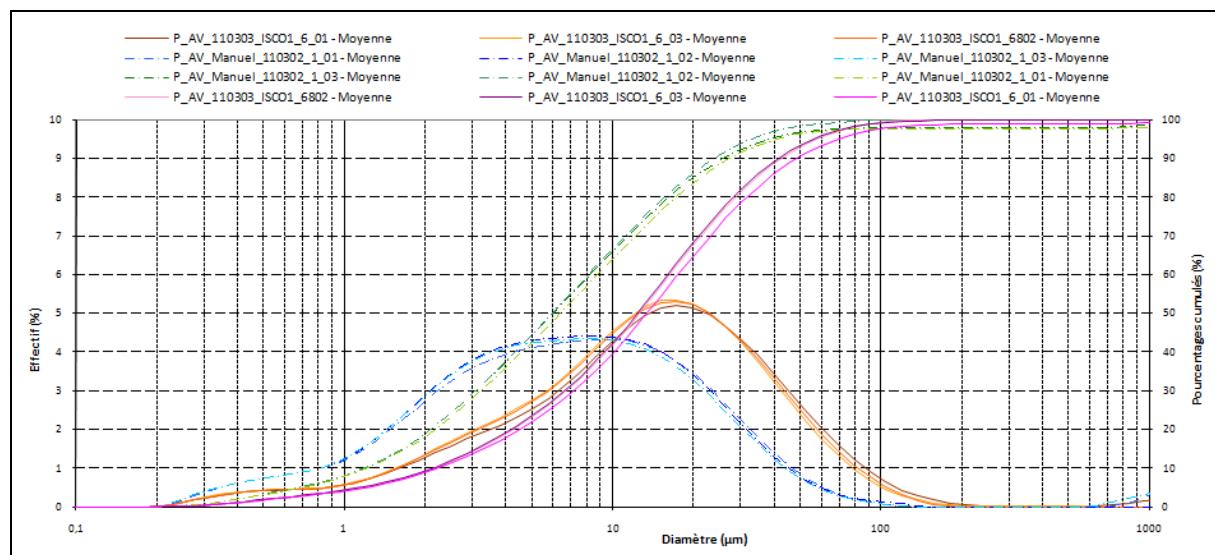


Figure 27 : Distribution granulométrique des MES de la crue du 02/03/11 pour deux prélèvements, automatique et manuel

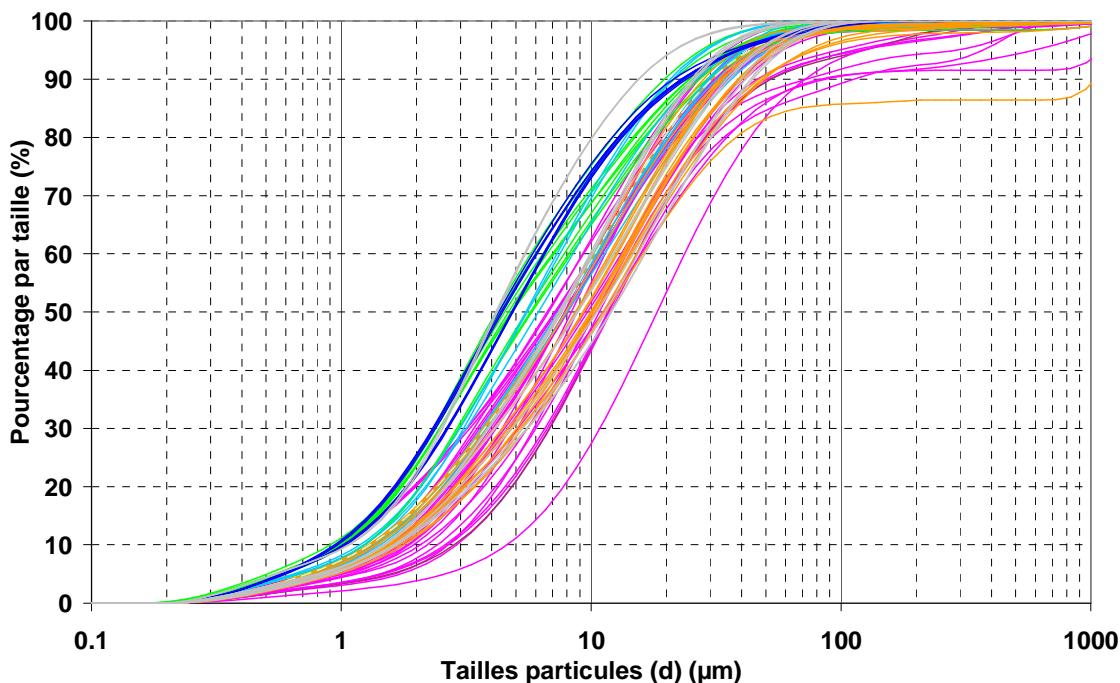
La distribution granulométrique montre un décalage marquant entre les deux échantillons. La gamme pour laquelle les diamètres sont compris est quasiment divisée par deux pour l'échantillon prélevé manuellement. L'échantillon prélevé manuellement présente une distribution granulométrique plus fine que l'échantillon automatique, alors que les prélèvements ont été effectués simultanément à l'aplomb du préleveur. Il en résulte que la crête a prélevé les échantillons au bas de la colonne d'eau. Il y a donc pour cette crue, une ségrégation du diamètre des particules au sein de la colonne d'eau. Les plus grosses particules se trouvant vers le fond et les plus petites vers la surface. Or, les concentrations sont approximativement les mêmes entre les deux prélèvements. En conclusion, la décrue du 02/03/11 montre une ségrégation en fonction de la taille des particules de MES et une concentration relativement constante au sein de la colonne d'eau. Ces observations mériteraient d'être corroborées par d'autres échantillonnages du même type au cours des saisons prochaines.

2.3.3 Evolution granulométrique sur plusieurs crues

A l'amont, 7 crues ont été analysées avec 26 échantillons. Chaque échantillon est ensuite passé en trois sous-échantillons dans le granulomètre laser, ce qui représente un total de 78 opérations. A l'aval, 6 crues ont été analysées avec 18 échantillons, soit 54 opérations. Ce

qui représente un total de 2 060 résultats de granulométrie à dépouiller, traiter et interpréter pour l'année 2011.

La Figure 28 permet d'observer que les courbes cumulées ont un profil d'ensemble relativement homogène. Néanmoins, une certaine dispersion s'observe au niveau des forts diamètres. A l'amont, les faisceaux granulométriques sont peu dispersés. Les D10 sont compris dans la gamme [0,95 ; 2,9], les D50 varient dans la gamme [4,36 ; 13,18] et les D90 sont compris dans la gamme [15,13 ; 89,56] et peuvent parfois dépasser les 1000 µm. A l'aval les faisceaux granulométriques sont plus dispersés. Deux familles se distinguent clairement. Une première famille avec des D50 compris entre 9 et 20 µm et une seconde famille avec des D50 variant entre 26,3 et 45,7 µm. L'ensemble des D90 sont compris entre 34,67 et 104,71 µm (malgré de forts diamètres dépassant les 182 µm et atteignant même les 1259 µm pour quelques échantillons). Les D10 varient dans la gamme 1,45 et 15,14 µm



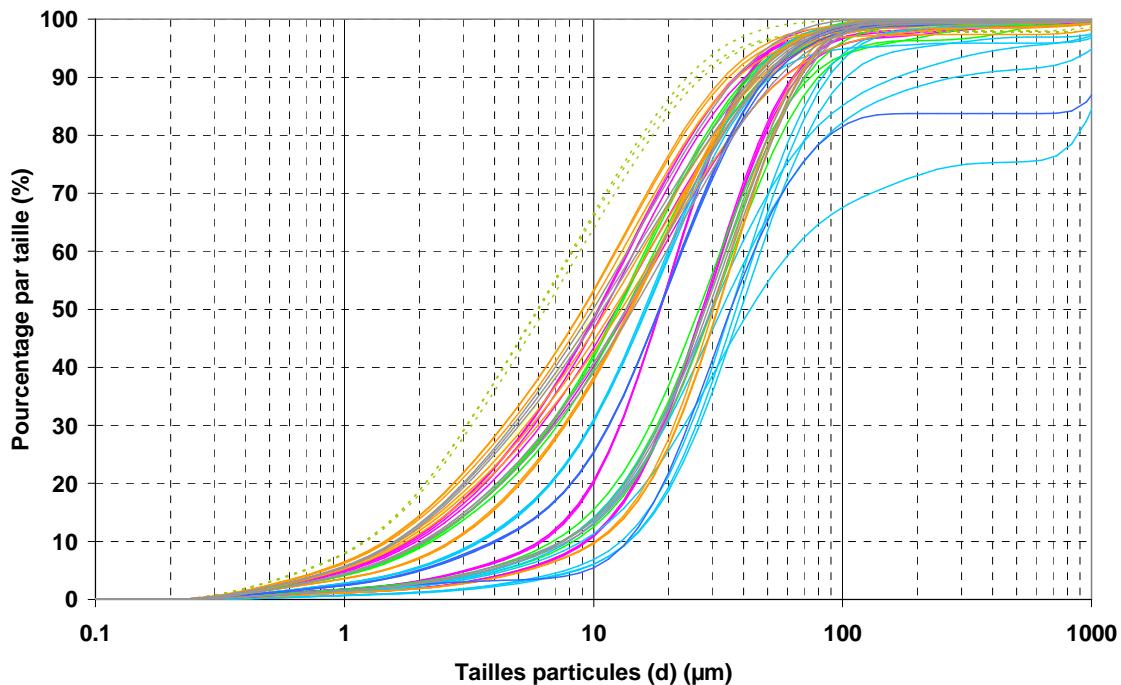


Figure 28 : Distribution granulométrique des échantillons amont (en haut) et aval (en bas) sur l'ensemble des crues

A l'aval la granulométrie mesurée n'est pas la même selon où se place l'échantillon dans la crue. Par exemple la crue du 12/03/11 représentée par les échantillons « P_AV_110314_4, 8 et 12 » (faisceaux bleus clairs), ont des D₅₀ très différent. Or si on regarde leur positionnement dans la crue, on remarque que les échantillons 4 et 8 correspondent à des montées de crue et ont des D₅₀ élevés, alors que l'échantillon 12 repéré en début de décrue présente un D₅₀ moyen. La crue du 17/01/11 est représentée par trois échantillons (faisceaux roses). Le premier prélèvement correspond au premier gonflement de l'eau avec un faible débit, son D₅₀ est dans une gamme moyenne. Le deuxième échantillon correspond au prélèvement de l'eau à la montée de la première crue et présente un D₅₀ grossier. Le dernier échantillon correspond au début de la montée de la seconde crue et le débit de l'eau est relativement fort. Le D₅₀ de ce dernier est fin. Le seuil aval ne présente pas une évolution granulométrique entre les crues mais préférentiellement au sein de ses crues.

A l'inverse du seuil aval, le seuil amont présente une évolution granulométrique sur plusieurs crues échantillonnées. Deux familles se dégagent, une famille dont le D₅₀ est compris entre 4,36 et 6,6 µm. Et une seconde famille dont le D₅₀ varie entre 6,6 et 11,5 µm. La première famille comprend les crues du 16/04/11 (faisceaux bleus foncés), 02/03/11 (faisceaux verts clairs) et 12/03/11 (faisceaux bleus clairs). La seconde famille correspond aux crues du 17/01/11 (faisceaux roses), 14/04/11 (faisceaux orange) et 29/04/11 (faisceaux gris). On remarque que la seconde famille ayant des particules plus grossières, correspond aux crues ayant fourni les flux de sédiments les plus importants de la saison 2011.

La Figure 29 représente la relation entre taille des particules transportées et concentration. On observe à l'amont que la taille des particules augmente avec la concentration, à l'exception de l'échantillon le plus chargé qui est fin. A l'aval, on observe une forte dispersion des diamètres pour les faibles concentrations et des particules plus fines aux fortes concentrations. Ces résultats restent difficiles à interpréter en terme de processus et il est nécessaire d'étudier également l'évolution de la granulométrie au cours d'une crue.

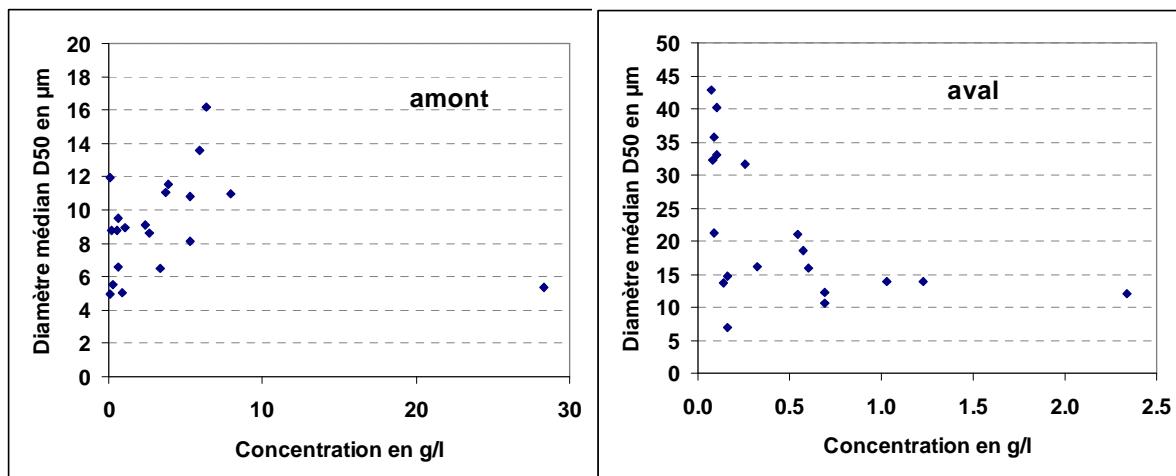


Figure 29 : Relation concentration diamètre D50 des particules de MES

2.3.4 Evolution granulométrique au cours d'une crue

Il apparaît une évolution granulométrique certaine au cours des crues observées en 2011. L'examen des faisceaux granulométriques et des hydrogrammes pour les 6 crues analysées met en évidence une variation temporelle granulométrique.

A l'amont, on observe une relation synthétique entre le débit et le D50 (Figure 30, en haut). En effet, en début de crue la taille des particules est fine, en montée de crue celle-ci devient grossière alors qu'à la décrue les particules redeviennent relativement fines à intermédiaires.

A l'inverse, l'aval présente plutôt une relation antithétique entre débit et D50 (Figure 30, en bas). En début de crue la taille des particules est grossière alors qu'en montée de crue et en décrue, la taille devient fine.

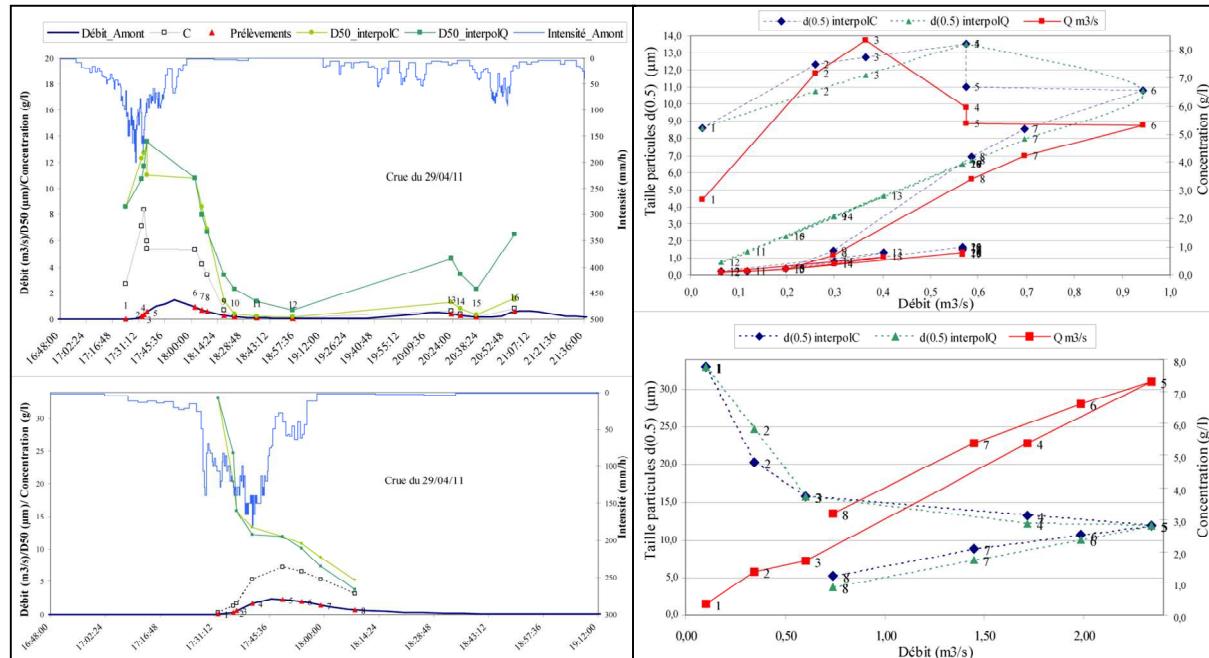


Figure 30 : Relation débit-granulométrie au cours de la crue du 29/04/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)

Les distributions granulométriques des crues du 29/04/11 (Figure 31) et 17/01/11 (Figure 32) l'évolution granulométrique au cours d'une crue et d'un seuil à l'autre.

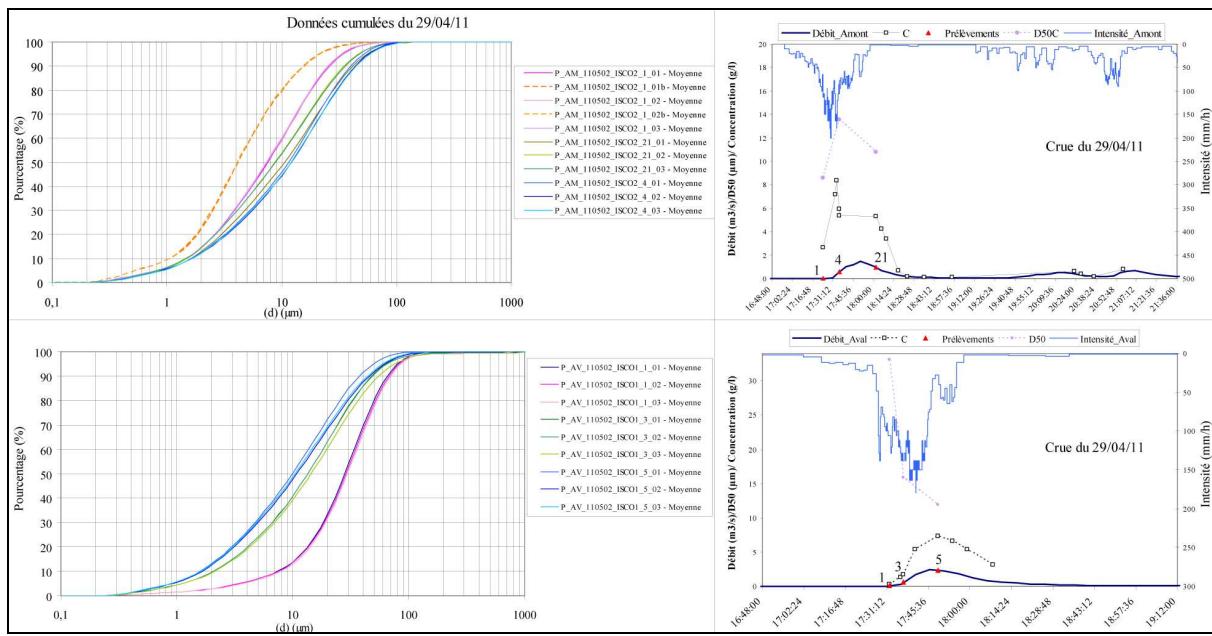


Figure 31 : Evolution granulométrique au cours de la crue du 29/01/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)

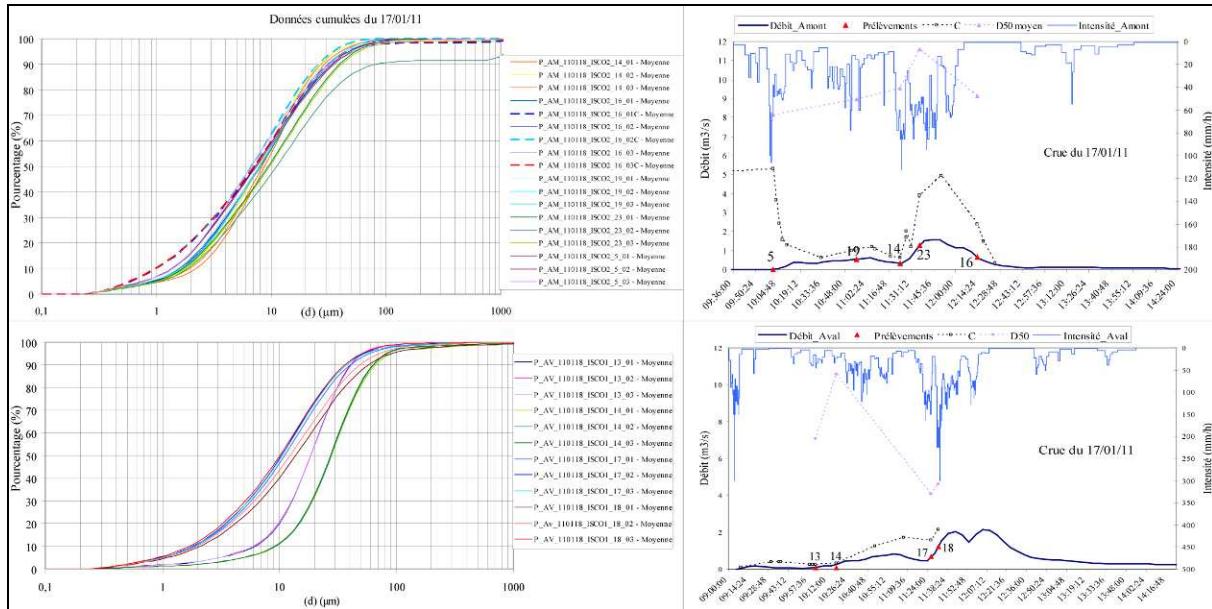


Figure 32 : Evolution granulométrique au cours de la crue du 17/01/11 à l'amont (en haut) et à l'aval (en bas)

Ces premiers résultats montrent que les suspensions en provenance des zones minières ont une granulométrie très fine avec un D50 compris entre 5 et 15 µm mais plusieurs points restent encore à tester avec de nouvelles données, notamment l'existence ou non d'un profil vertical de taille des grains (cette question est liée à celle d'un profil vertical de concentration qui serait à explorer en priorité). L'évolution de la taille des grains au cours d'une crue et d'une crue à l'autre, est susceptible de fournir des informations sur les processus d'arrachement, de transport, de sédimentation. Ils demanderont à être analysés plus en détail et éventuellement éclaircis par d'autres mesures.

2.4 Suivi du fonctionnement des décanteurs

2.4.1 Présentation des décanteurs

Décanteur FRN01

Le bassin versant du décanteur FRN01 a une superficie de 14.1 ha (soit 0,141 km²). La surface du décanteur représente 0,7% de la surface du sous bassin et est égale à 949 m². Le volume est estimé à 1485 m³ .soit une profondeur moyenne de l'ordre de 1.5m et une capacité de rétention à vide équivalente à 10.5 mm de lame ruisselée à l'échelle du bassin versant (capacité de rétention = volume/superficie drainée) Ce décanteur draine les eaux du bassin amont. Le décanteur est équipé de deux échelles à sédiments de 3 mètres. Le relevé journalier des échelles est difficile lorsque le décanteur est rempli d'eau, car les échelles sont noyées sous l'eau (Figure 33).



Figure 33 : Décanteur FRN01 ; 1. Décanteur vide ; 2 : Décanteur déversant

Le décanteur est curé une fois par an au mois de novembre, juste avant la saison pluvieuse. Le dernier curage de FRN01 remonte au 18/11/10 pour 240 m³ de sédiments qui ont été stockés sur la verve B. La topographie est relevée après chaque curage. Trois arrivées d'eau alimentent le bassin de sédimentation (Figure 34). Deux au nord et un au sud du décanteur, seule une entrée au nord est contrôlée par le seuil amont.



Figure 34 : Entrées et exutoire de FRN01

Décanteur FRN18

Le décanteur FRN18 se situe à l'aval de FRN01. Son sous bassin versant correspondant à une superficie de 15.1 ha (soit 0,151 km²). Le décanteur représente 0,12% du sous bassin avec une surface de 175 m². Il est alimenté grâce à une entrée à l'ouest et se vide par déversement au nord et peut contenir un volume d'environ 340 m³ soit une profondeur moyenne de 1.94m et capacité de rétention à vide de l'ordre de 2 mm.

La date de curage et le volume curé du décanteur ne sont pas connus car il s'agit d'un décanteur hors exploitation dit ouvrage périphérique qui est à la charge de la SLN. De plus, sa faible capacité limite fortement son efficacité.

2.4.2 Volumes déposés

Le volume de sédiments déposés entre la période du 01/01/11 et le 12/05/11 dans le décanteur FRN01 correspond à une hauteur de 138 mm soit un volume de 131 m³ (Figure 35). Le décanteur FRN18 a reçu quant à lui une hauteur de sédiments de 120 mm équivalant à 21 m³



Figure 35 : Mesure du niveau des dépôts sur les perches dans FRN01

Pendant la saison des pluies, il a été possible de prélever un échantillon de sédiments au décanteur FRN01 lors d'une période sèche où celui-ci était vide. Le bloc a été prélevé à une dizaine de centimètres de l'échelle sédimentaire amont de FRN01 (Figure 36). Le bloc sédimentaire présente plusieurs horizons à granulométrie variée. On peut tenter de faire correspondre ces niveaux à la succession des épisodes pluvieux (Figure 37).

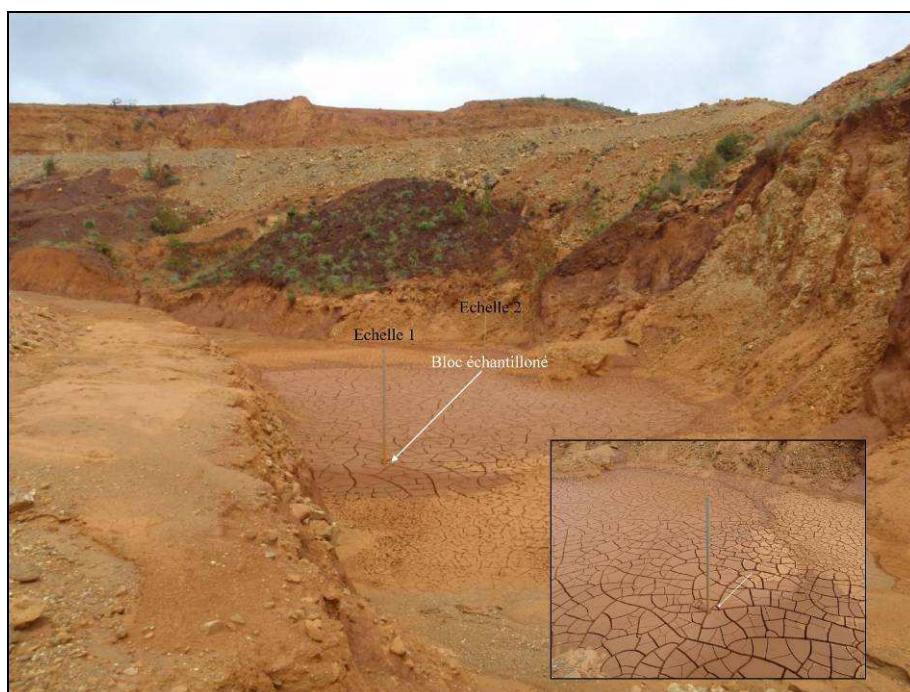
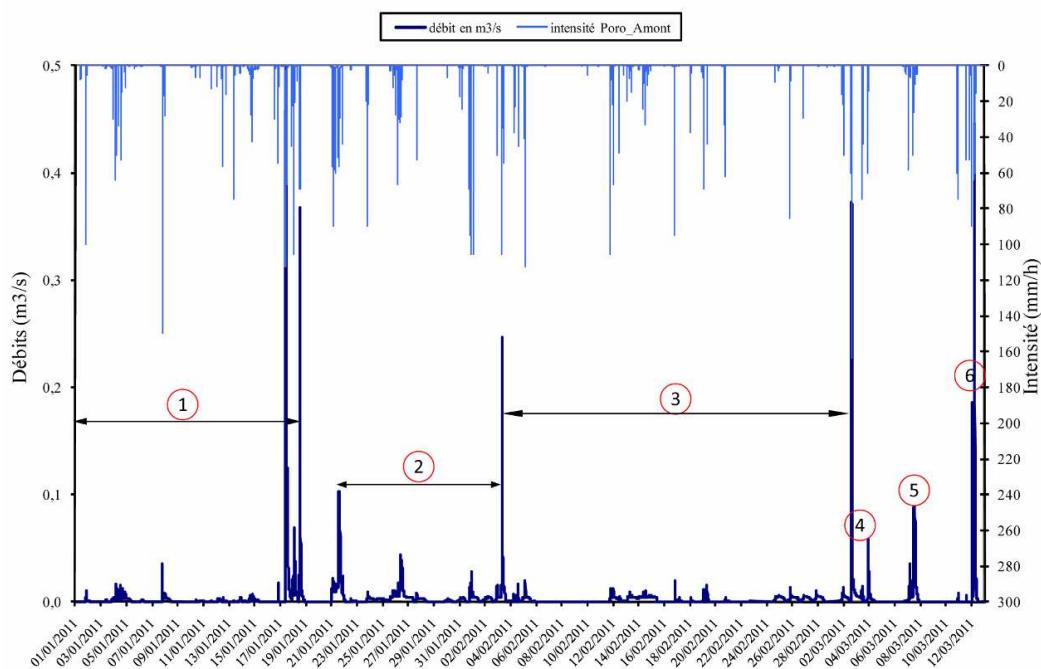


Figure 36 : Localisation du bloc de sédiments échantillonné au fond du décanteur FRN01**Figure 37 : Interprétation sédimentologique : correspondance épisodes pluvieux/dépôts de sédiments****Tableau 2 : Correspondance épaisseurs déposées-crues et poids exportés mesurés à la station amont**

N°	Période	Poids exporté calculé (tonnes)	Pourcentage du poids total	Hauteur déposée mesurée (m)	Volume déposé calculé (m³)	Pourcentage du volume total déposé	Poids déposé estimé (tonnes) Densité apparente 1.8
1	01/01-18/01/11	18,180	76 %	< 0,030	≈ 28,5	33 %	51
2	21/01-02/02/11	2,090	9 %	≈ 0,011	≈ 10,4	12 %	19
3	03/02-01/03/11	0,930	4 %	≈ 0,015	≈ 14,2	16 %	26
4	02/03-04/03/11	1,950	8 %	≈ 0,023	≈ 21,8	25 %	39
5	06/03-08/03/11	0,210	1 %	≈ 0,003	≈ 2,8	3 %	5
6	12/03-03/04/11	0,610	2 %	≈ 0,010	≈ 9,5	11 %	17

Une première tentative de correspondance est proposée sur la Figure 37. Les données de volumes transportés et déposés sont regroupées dans le Tableau 2. Selon cette répartition, la première séquence qui exporte 76 % des flux mesurés à l'amont, ne représente que 33 % des volumes stockés, ce qui signifierait qu'au cours de cette période une forte proportion des matériaux transportés n'a fait que transiter par le décanteur sans s'y déposer. Cependant, les données converties en tonnages de matériaux sont surprenantes car les tonnages déposés sont supérieurs aux tonnages transités dans la station amont. Nous n'avons aucun moyen de dater les lames déposées. Il conviendra donc de reprendre la séquence totale de l'année 2011, d'évaluer les tonnages transportés à la station amont y compris pour les épisodes non échantillonnés, d'estimer les apports du bassin versant complémentaire non contrôlé par la station amont, de tester différentes affectations des lames de la carotte. Enfin, il convient de vérifier la proportion des dépôts correspondant à des matériaux transportés par charriage plutôt qu'en suspension. L'analyse granulométrique des dépôts fournira quelques éléments de discussion.

2.4.3 Granulométrie des dépôts

Le bloc sédimentaire récupéré dans le décanteur FRN01, a été soumis au granulomètre laser pour connaître la taille des particules déposées.

Chaque horizon est échantillonné. Chaque échantillon est passé deux fois au granulomètre. Une première fois sans ultrasons et une seconde avec ultrasons. Après examen de la Figure 38, on observe que les courbes correspondantes aux échantillons avec ultrasons ont des D50 plus fins que les échantillons sans ultrasons.

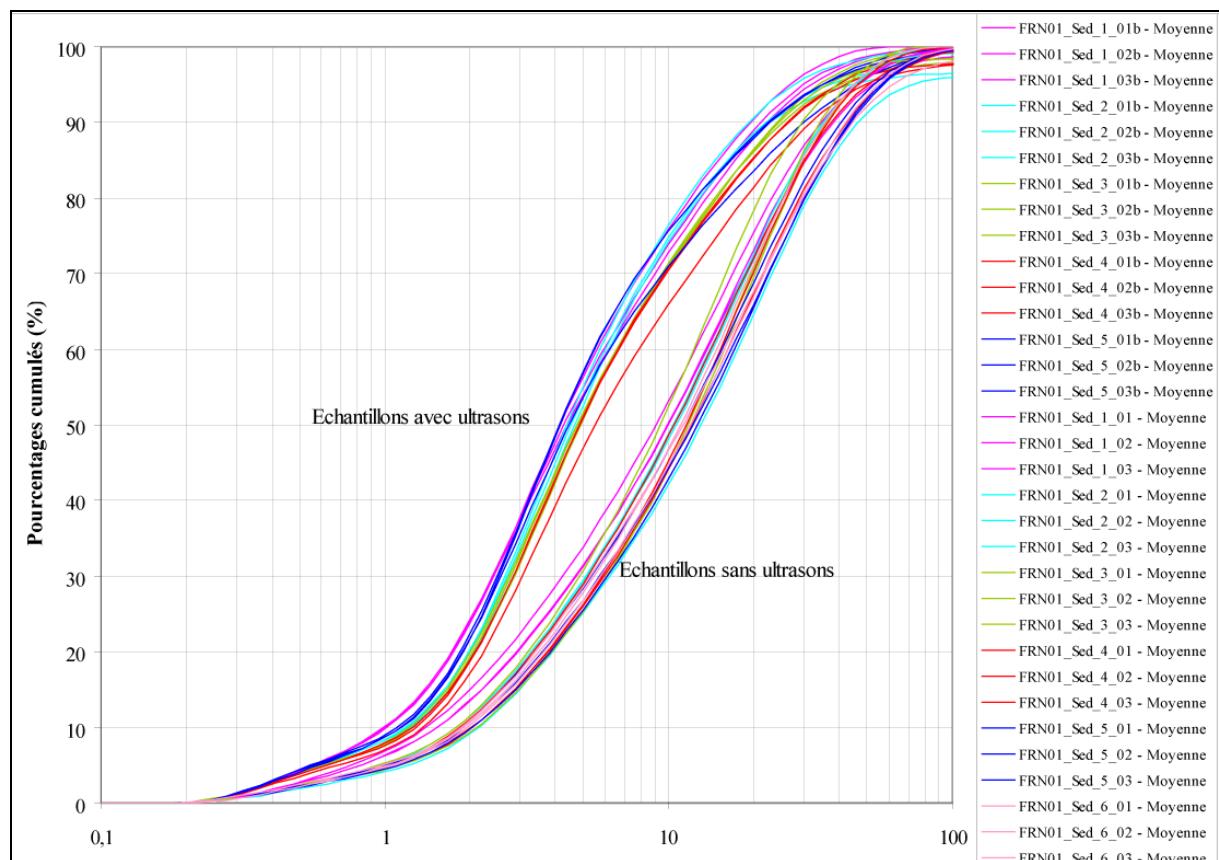


Figure 38 : Distributions granulométriques avec et sans ultrasons des horizons sédimentaires du bloc

Le D50 avec ultrasons est compris entre 4,3 et 5,3 µm alors que les D50 sans ultrasons sont plus grossiers, compris entre 9,5 et 11,6 µm (Tableau 3). Cette différence notable entre les D50 des deux manipulations indique qu'il y a agglomération dans le dépôt entre les

particules sédimentaires. L'effet des ultrasons cassent les liaisons entre les particules agglomérées et les détachent. Ces diamètres sont très proches des valeurs mesurées dans les suspensions de la station amont. Ce sont donc bien les matériaux transportés en suspension que l'on a prélevé dans cette carotte. Des prélèvements répartis dans l'ouvrage lors du curage permettrait de préciser la granulométrie de l'ensemble des dépôts et notamment de repérer d'éventuels cônes de déjection de matériaux chargés à proximité des arrivées d'eau dans la retenue.

Tableau 3 : Diamètres médians des différents horizons du bloc de dépôt

Période	Horizons	D50 avec ultrasons (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

2.4.4 Concentration et granulométrie des suspensions en entrée et sortie des décanteurs

Au cours d'une crue ayant déversé à l'aval de FRN01, des prélèvements manuels ont été faits aux entrées et sorties des décanteurs. Concentration et granulométrie de ces échantillons ont été traitées.

Les résultats concernant les concentrations en MES sont résumés dans le Tableau 4. La concentration en MES est nettement plus élevée à l'amont qu'à l'aval. Sur les trois échantillons mesurés, il y a en moyenne une différence de 0,228 g/l entre l'amont et l'aval.

Tableau 4 : Concentrations en MES de l'eau prélevée à l'amont et à l'aval du décanteur FRN01

	FRN01_AMONT	FRN01_Amont	FRN01_AVAL	FRN01_Aval	FRN01_AMONT_CASCADE	FRN01_AVAL_CASCADE
DATE	15/04/11 07 :50	15/04/11 08 :50	15/04/11 07 :50	15/04/11 08 :50	16/04/11 09 :11	16/04/11 09 :14
Teneur (g/l)	0,252	0,203	0,053	0,028	0,053	0,022

Les faisceaux granulométriques des échantillons sont représentés sur la Figure 39.

Les prélèvements d'eau à l'amont (Figure 39, en haut) du décanteur FRN01 présentent une granulométrie plus grossière qu'à l'aval (Figure 39, en bas). Les D50 mesurés à l'amont sont compris entre 5 et 13 µm tandis qu'à l'aval les D50 varient de 4 à 9 µm (Tableau 5). On peut donc considérer que les plus grosses particules ont sédimenté dans le décanteur mais les écarts restent modérés.

Tableau 5 : Diamètres caractéristiques en entrée et sortie du décanteur

	FRN01_AMONT	FRN01_Amont	FRN01_AVAL	FRN01_Aval	FRN01_AMONT_CASCADE	FRN01_AVAL_CASCADE
DATE	15/04/11 07 :50	15/04/11 08 :50	15/04/11 07 :50	15/04/11 08 :50	16/04/11 09 :11	16/04/11 09 :14
D50 µm	5	6,5 - 13	4 - 9	6 - 7	5,5 - 10	4 - 6

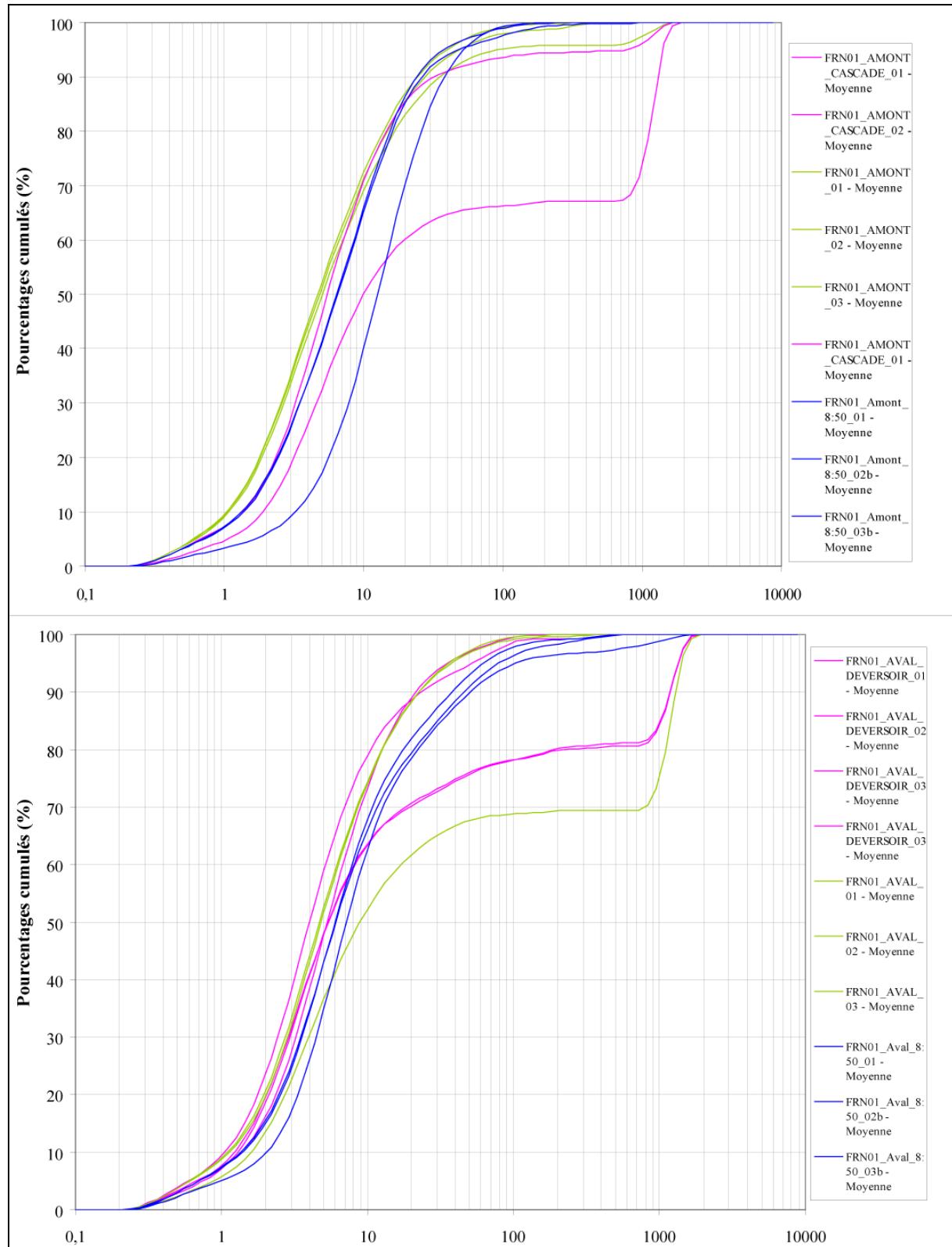


Figure 39 : Distributions granulométriques des prélèvements d'eau à l'amont et à laval du décanteur FRN01 pendant déversement

2.4.5 Bilan des observations 2011 sur les décanteurs

Ces ouvrages ont pour objectif de piéger les particules grossières plus denses que l'eau. Leur rendement dépendra de la vitesse de décantation des MES. En 2010, le décanteur FRN01 a été curé d'un volume de 240 m³ de sédiments (source CFTMC) correspondant à

une hauteur de dépôt de 0,253 m soit une vitesse de sédimentation de 0,023 m/mois. Le 03/04/11 la hauteur déposée de sédiments au fond de celui-ci était de 0,092 m soit une vitesse de 0,031 m/mois. Du 03/04/11 au 12/05/11, il s'est déposé 0,046 m de sédiments, soit environ 44 m³ de matériaux (78,6 tonnes pour une densité apparente de 1,8). Pendant le même temps, on a mesuré à la station amont un poids exporté total de 19 500 kg (19,5 t).

Ainsi, pour la saison 2011, une hauteur totale de 0,138 m soit un volume de sédiments de 131 m³ a été retenu par le décanteur FRN01 et une vitesse de sédimentation de 0,035 m/mois. Le décanteur FRN18 a quant à lui retenu 21 m³ de sédiments. Ainsi, le volume déposé dans chacun des décanteurs est proportionnel à leur superficie et à leur volume. Il n'y donc pas de décanteur plus efficace que l'autre.

Les prélèvements amont-aval lors d'une crue ont montré une certaine réduction du diamètre des particules de MES (34%) entre l'amont et l'aval du décanteur FRN01. De plus, la concentration en MES de l'eau baisse en moyenne d'un quart entre l'amont et l'aval. Néanmoins, un seul épisode déversant a pu être ainsi échantillonné et il faudrait disposer de mesures amont-aval pour des épisodes de fort débit où le temps de séjour dans les décanteurs devient très court.

Malgré le peu de prélèvements des décanteurs en période de crue, ces différents résultats amènent à conclure que les décanteurs peuvent être efficaces, dans certaines conditions. Mais leur faible capacité de rétention limite leur efficacité pour les forts épisodes. La synthèse des mesures faites sur la période 2009-2011 et l'estimation des flux transitant annuellement dans la station amont permettront d'affiner ces analyses.

Le fonctionnement de ces décanteurs devra être approfondi mais le mode de suivi actuel avec de simples perches ne permet pas de fournir suffisamment d'informations pour une compréhension de leur fonctionnement et l'évaluation de leur efficacité.

3 Analyse des résultats 2009-2011

3.1 Catalogue des épisodes Pluie/Débit

Afin de procéder à l'analyse des données Pluie-Débit-MES obtenues depuis 2009, il est nécessaire de réaliser un inventaire des épisodes Pluie/Débit observés, appelé catalogue PQ par la suite. Ce catalogue doit comporter tous les épisodes significatifs aux stations amont et aval. Les Episodes doivent être numérotés. Un Episode X comporte un épisode de pluie amont, un épisode de pluie aval et, normalement, un épisode de débit amont et aval.

Pour plus de clarté, dans le catalogue, les épisodes de pluie sont appelés averses et les épisodes de débit ruissellement. Dans ce catalogue seront présents l'ensemble des paramètres calculés tels que les temps de concentration, les débits maximaux, les intensités maximales de pluies, les durées de pluie et de crue. Il a donc fallu définir la notion d'« Episodes » mais aussi celle d'« Episodes significatifs ».

Le projet Hydromine s'intéresse aux ruissellements par temps de pluie. Le but est de recenser les épisodes pluvieux ayant engendré un débit au niveau d'au moins un des deux seuils de mesure. En observant la chronique des pluies et des débits, il est constaté que les pluies inférieures à 5 mm n'engendent presque jamais de ruissellement.

De ce fait, et pour ne pas encombrer le catalogue avec les très faibles averses, un premier seuil de 5 mm est retenu. De plus, pour être cohérent avec le critère d'indépendance des épisodes pluviométriques utilisé pour la définition des IDF par la DAVAR, un intervalle de 2 h entre deux épisodes pluvieux doit être conservé dès que cela est possible..

L'annexe 7 permet d'avoir un aperçu du catalogue PQ avant le renseignement des caractéristiques, c'est-à-dire juste avec les dates de début et de fin des épisodes de pluie et de débit et les numéros.

Pour pouvoir renseigner ce catalogue PQ, il faut définir les averses et les ruissellements. Ce travail consiste en plusieurs étapes :

1. Récupération de la donnée traitée par la DAVAR la plus récente. La DAVAR définit des débuts d'averses.
2. Vérification de la donnée de la DAVAR
3. Détermination d'une fin d'averse : on retient en général le dernier basculement avant le prochain début d'averse défini par la DAVAR, à l'exception des basculements isolés.
4. Calcul de la quantité de pluie par averse
5. Construction d'un graphique synthétisant les intensités de pluie et les débits en fonction du temps. Sur ce graphique les débuts d'averses de la DAVAR et les fins d'averses définies à l'étape 3 sont également rajoutés.
6. Observation graphique de chaque averse pour voir s'il y a eu ruissellement ou non, et si l'averse fait plus de 5 mm ou non. Plusieurs options alors :
 - a. Averse inférieure à 5 mm et pas de ruissellement : pas d'inscription dans le catalogue
 - b. Averse supérieure à 5 mm et pas de ruissellement : Etape 7. Fin
 - c. Averse donnant un ruissellement : Etape 7-8. Fin
 - d. Un ruissellement correspond à plusieurs averses : Etape 9
 - e. Les averses amont/aval ne concordent pas du tout : Etape 9
7. Renseignement dans le catalogue du début de l'averse et de la fin de l'averse ainsi que de la pluie associée

8. Renseignement dans le catalogue du début du ruissellement et de la fin du ruissellement
9. Travail d'harmonisation de façon à découper les averses et les débits pour pouvoir les inscrire au catalogue.
10. Inscription au catalogue des averses et ruissellements redéfinis

Deux grosses difficultés dans ce travail ont été rencontrées :

- Réussir à harmoniser l'amont et l'aval
- Réussir à définir le début et la fin des ruissellements.

Harmoniser l'amont et l'aval consiste à résoudre des conflits temporels entre les deux chroniques. En effet, lorsqu'on retient les débuts d'averse définis par la DAVAR pour les deux pluviographes, on peut observer des recouvrements ou des disjonctions sur les deux chroniques. On s'est alors organisé pour que les début et fin d'épisodes incluent toute la séquence pluvieuse à la fois au pluviographe amont et au pluviographe aval.

La définition d'un début et d'une fin de ruissellement est rendue difficile par l'imprécision des sondes de hauteur d'eau pour les faibles hauteurs d'eau, donc pour les faibles débits. Sur la station amont, l'absence d'écoulement hors des épisodes pluvieux simplifie cette opération tandis qu'à l'aval, la présence d'un écoulement permanent rend plus difficile le choix de la fin du ruissellement rapide de crue. Si pour fin de ruissellement, il est pris l'heure de retour à l'état initial, le volume écoulé calculé peut devenir très important et nettement supérieur au volume d'écoulement rapide de crue qui est la variable pertinente de cette étude.

La fin du ruissellement a été définie dans la majorité des cas comme le moment où il y a une rupture de pente sur la courbe de récession, comme le montre l'exemple de la Figure 40. Cette définition est classique en hydrologie et on utilise parfois un axe de débits en échelle logarithmique pour repérer plus facilement cette cassure. La lame ruisselée est le volume écoulé entre le début et la fin du ruissellement, sans que soit déduit une lame correspondant à l'écoulement de base.

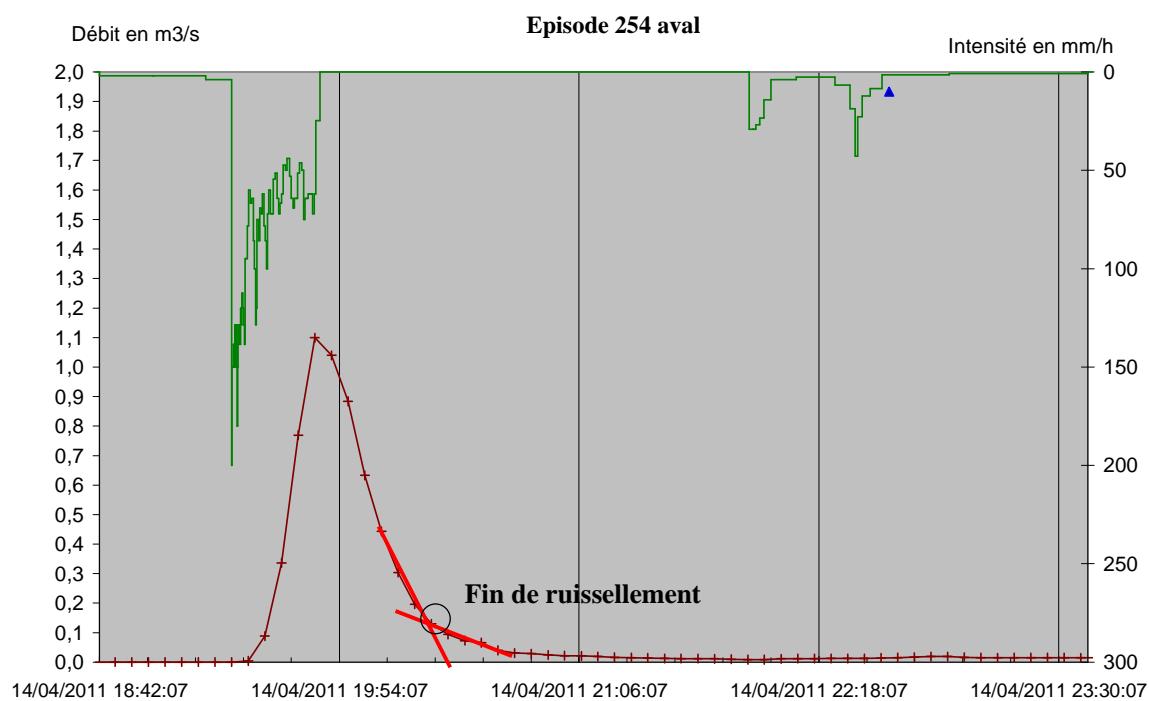


Figure 40 : Détermination de la fin de ruissellement

Pour les plus fortes pluies, il y a toujours un ruissellement mais pour les pluies plus faibles, le ruissellement peut être nul ou très faible. À l'aval, étant donné qu'il y a un écoulement d'eau même hors temps de pluie, il est parfois plus difficile de discerner une réaction nette du bassin versant ou certains hydrogrammes sont décrits par trop peu de points. Un critère de ruissellement a été affecté à chaque averse inscrite dans le catalogue qui se voit attribuer la note de 0, 1 ou 2 selon qu'elle n'a pas provoqué un ruissellement, qu'elle a provoqué un ruissellement net ou un ruissellement incertain ou mal défini. Dans l'extrait du catalogue en Annexe 8, ce critère est visible et l'Annexe 9 montre un exemple de chaque type de ruissellement.

Le catalogue est composé pour l'instant de 267 épisodes. Il ne prend en compte que les épisodes de 2009 à mai 2011. Les épisodes de mai 2011 à mai 2012 sont en cours de traitement et seront traités dans le rapport Hydromine 2012.

3.2 Etude de la pluviométrie

Du fait de la faible superficie des bassins versants, l'hétérogénéité spatiale des pluies est négligeable (Gaume E. ; 2002) tant que l'exposition au vent dominant reste équivalente. Cependant comme deux pluviomètres sont installés sur le site, une comparaison entre leurs données permet de le vérifier. Le Tableau 6 donne la distance entre les appareils de mesure ainsi que leurs altitudes.

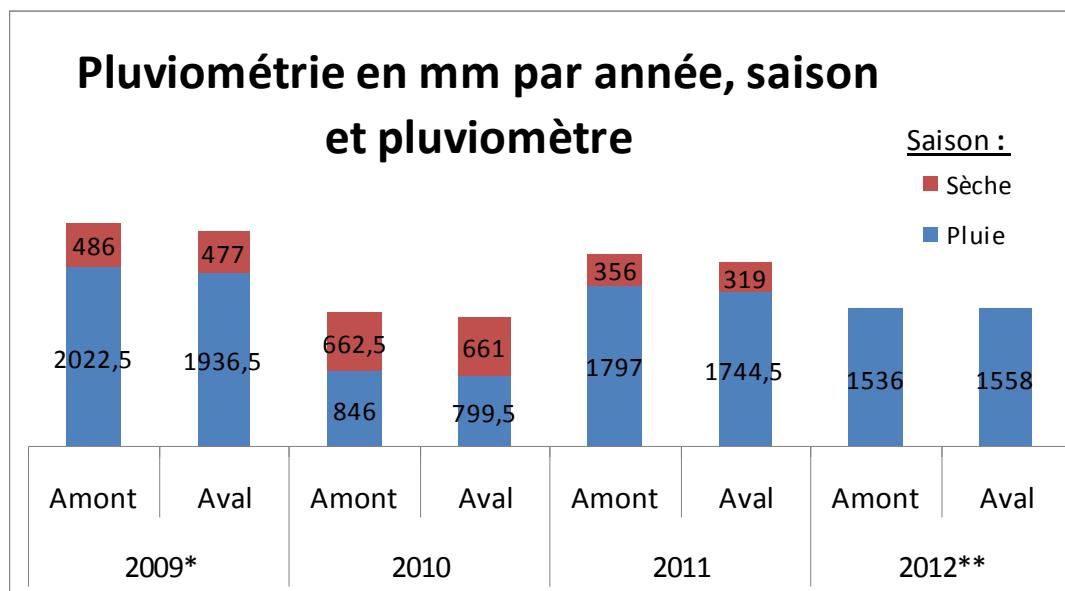
Tableau 6 : Altitude et distance deux à deux des pluviomètres et stations de mesure

Distance (m)	Pluvio amont	Pluvio aval	Station amont	Station aval
Pluvio amont		1559	847	1486
Pluvio aval			721	86
Station amont				646
Altitude (mNGF)	455	199	296	199

La distance entre deux appareils ne dépasse jamais 2 km. Le pluviomètre amont est situé plus en altitude, ce qui peut jouer légèrement sur la hauteur des pluies de certains épisodes mais les deux appareils sont soumis à la même exposition, aucun relief ou crête notable ne les sépare.

L'étude porte sur un nombre d'années restreint : 3 ans et certaines années ne sont pas complètes. Pour compléter les données et pour comparer à l'échelle mensuelle le pluviomètre d'Houaïlou est utilisé. Houaïlou est situé à environ 8 km, à vol d'oiseau, de Poro. Le pluviomètre installé là-bas date de 1971. Ainsi, la moyenne à long terme des précipitations est plus significative que celle sur Poro. L'éloignement de la station ne permet pas de comparer la pluie par épisode mais mensuellement la pluviométrie est semblable.

La Figure 41 présente la pluviométrie par année et par pluviomètre en mettant en évidence la part de la pluie pendant la saison sèche et celle pendant la saison des pluies.



* Il manque 17 jours de donnée correspondant aux 17 premiers jours de décembre 2008 où les pluviomètres n'étaient pas en service. Ces 17 jours ont été complétés par les pluies de Houaïlou

** Année 2012 : Il manque les données des mois d'avril et mai

Figure 41 : Pluviométrie annuelle et saisonnière par pluviomètre
(La saison des pluies pour l'année X s'étend de décembre de l'année X-1 à mai de l'année X.
La saison sèche s'étend de juin à novembre compris de l'année X)

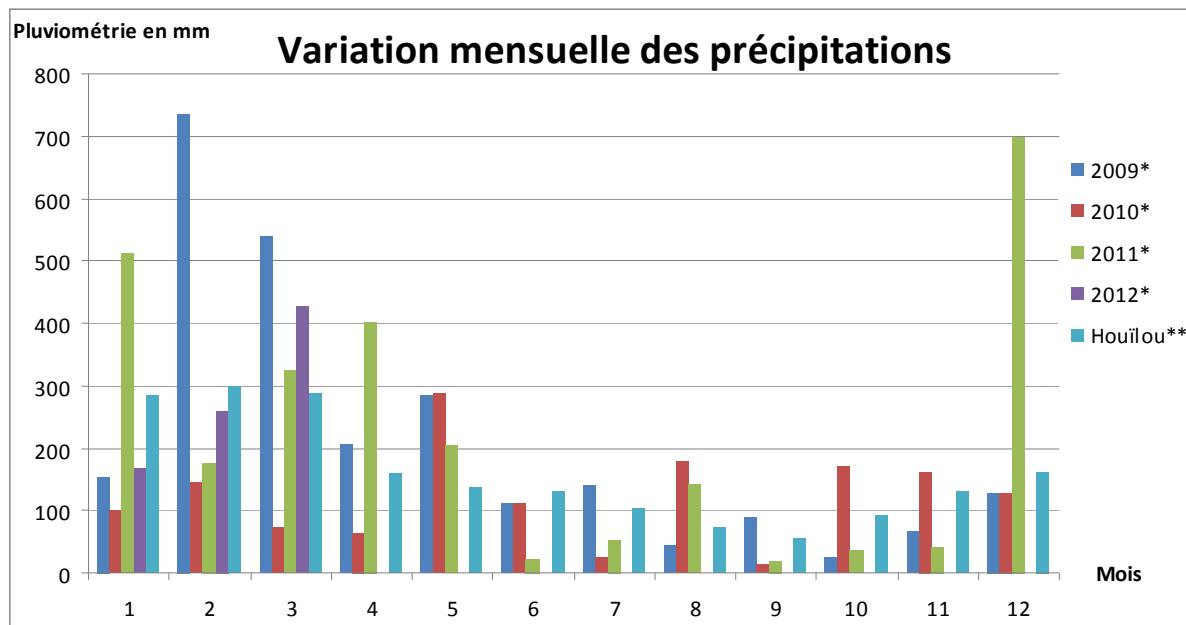
Sur les trois années de mesure la pluviométrie à l'amont et à l'aval est très proche ce qui confirme l'hypothèse d'homogénéité. Pour les années 2009 et 2011 les précipitations en saison des pluies sont nettement supérieures à celles en saison sèche. Pour l'année 2010 la pluviométrie est faible mais plus importante en saison sèche. Pour cette année, le nombre d'épisodes dans le catalogue des pluies est faible. La pluviométrie pour la saison des pluies de 2012 comprend les 500 mm en 24 h de l'épisode centennal.

Sur Houaïlou la pluviométrie annuelle moyenne est de 1906,6 mm. La pluviométrie pour 2009 et 2011, sur Poro est plus élevée que cette moyenne. Comme partout en Nouvelle Calédonie (CV = 30 %), la pluie annuelle à Poro fluctue énormément d'une année à l'autre, mais elle est similaire sur les deux pluviomètres.

La Figure 42 représente la pluviométrie à l'échelle mensuelle pour Poro amont, permet d'observer la distribution des précipitations au fil des mois et leur variabilité sur les quatre années de mesure. Cette répartition mensuelle est mise en regard de la répartition moyenne mensuelle à Houaïlou pour la période 1971-2000.

Excepté le mois de mai qui possède une pluviométrie semblable pour les trois années, la pluviométrie sur un même mois est très variable en fonction des années. Cette forte variabilité peut s'expliquer par la survenue au cours du mois d'un ou deux gros épisodes qui vont modifier très fortement le cumul mensuel.

Les mois de juin à novembre sont nettement moins pluvieux que les autres, avec une moyenne sur les trois années inférieure à 100 mm (à l'exception d'août avec 130 mm). L'allure de ce graphe confirme la pertinence du découpage de l'année en deux saisons, une saison pluvieuse de décembre à mai et une saison sèche de juin à novembre.



* Données pluviométriques de Poro Amont ** Moyenne réalisée par Météo France de 1971 à 2000

Figure 42: Variation mensuelle de la pluviométrie sur Poro Amont et Houailou

Chaque épisode comprend une averse amont et une averse aval, qui peuvent être de durée légèrement différente, et leur hauteur d'eau associée. La Figure 43 présente la comparaison des deux pluviomètres à l'échelle de l'épisode.

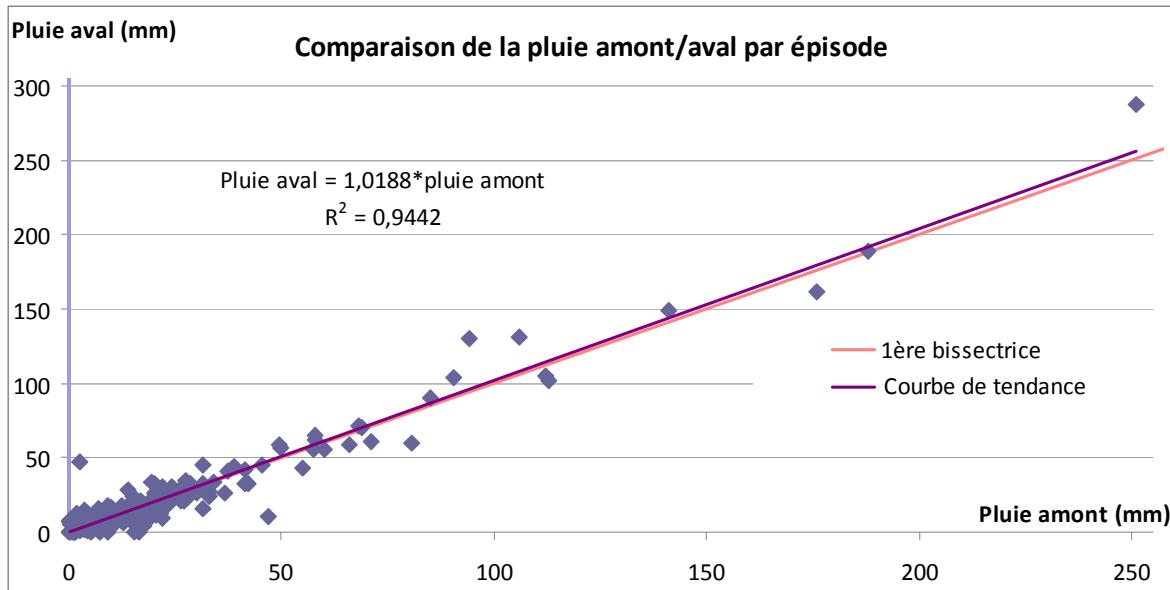


Figure 43 : Comparaison de la pluie amont et aval par épisode

Pour la suite de cette étude, en prenant en compte les remarques précédentes, une pluie moyenne, entre le pluviomètre amont et le pluviomètre aval, sera calculée.

3.3 Caractéristiques diverses des épisodes

3.3.1 Définition des paramètres étudiés en prétraitement :

Plusieurs paramètres sont calculés pour tous les épisodes recensés dans le catalogue PQ. Ces paramètres doivent permettre de mieux appréhender le fonctionnement des petits bassins versants miniers.

Les paramètres calculés sont divisés en trois catégories :

- Paramètres propres à la pluie
- Paramètres propres au débit
- Paramètres mixtes

Le Tableau 7 répartit les paramètres calculés et analysés lors du prétraitement des données en fonction des catégories précédentes et les explicite.

Tableau 7 : Paramètres traités lors de la phase de prétraitement (définitions selon ROCHE M.F., 1986)

Catégorie	Paramètre	Abréviation	Unité	Définition
Pluie	Durée	Dp	min	Temps séparant le début de la fin de la pluie
	Temps sec	ts	h	Temps séparant le début de la pluie de l'épisode de la fin de la pluie de l'épisode précédent
	Intensité maximale	I _{max}	mm/h	Quantité maximale de pluie tombée dans l'intervalle de temps considéré
Ruisseaulement	Durée	Dq	min	Temps séparant le début de la fin du ruissellement
	Temps initial	t ₀	min	Temps séparant le début de l'averse du début du ruissellement
	Lame d'eau ruisselée	L _r	mm	Volume écoulé entre le début et la fin du ruissellement, exprimé en hauteur d'eau répartie également sur la surface du bassin versant, en projection horizontale
Mixte	Débit maximum	Q _{max}	m ³ /s	Débit maximum durant l'épisode de ruissellement
	Prélèvements	P		Code binaire indiquant si au moins un prélèvement a eu lieu durant la durée de ruissellement
Mixte	Temps sec	T _s	min	Temps séparant le début de la pluie de l'épisode de la fin de la pluie de l'épisode précédent ayant généré un ruissellement

3.3.2 Caractéristiques générales des paramètres étudiés en prétraitement

Connaître les caractéristiques statistiques de base des paramètres en fonction de la classe de pluie permet d'avoir une première idée du comportement du bassin versant lors d'un épisode pluvieux. Le Tableau 8 présente ces caractéristiques.

Les effectifs des paramètres de pluies sont plus importants que ceux des paramètres de débits. Cela vient du fait que toutes les pluies ne ruissent pas, phénomène plus important à l'aval.

La faible variabilité de la durée de la pluie entre l'amont et l'aval confirme l'homogénéité des pluies et le choix d'utiliser la pluie moyenne par la suite. A l'amont la durée de pluie est similaire à la durée de ruissellement tandis que pour l'aval elle est supérieure sauf pour les petites pluies. Les bassins versants étudiés sont des petits bassins versants, il y a une forte interaction entre la pluie et le ruissellement.

Tableau 8 : Statistiques sur les paramètres étudiés en prétraitement (Q1 : quantile 25%, Q3 : quantile 75 %)

Paramètre	Pluie moyenne (mm)	Effectif	AMONT						Effectif	aval					
			Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max		Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max
Pluie (mm)	< 20	199	0	4	7	8	12	22	199	0	4	7	7	11	25
	[20-85]	57	3	24	29	35	42	81	57	10	24	30	35	45	71
	> 85	10	85	97	113	136	167	251	10	90	104	131	145	159	287
	Tout	266	0	5	9	19	20	251	266	0	5	9	18	19	287
Dp (min)	< 20	199	4	66	145	200	265	888	199	3	65	133	193	267	912
	[20-85]	57	37	205	489	496	656	1277	57	39	217	424	493	651	1349
	> 85	10	355	858	1220	1375	1553	2879	10	316	863	1116	1306	1474	2750
	Tout	266	4	82	198	307	392	2879	266	3	86	188	299	391	2750
Dq (min)	< 20		0	70	160	249	319	1985	57	0	75	120	197	238	975
	[20-85]	57	40	210	390	408	570	1300	50	35	116	218	292	354	1340
	> 85	10	320	772	1180	1111	1237	2755	10	380	468	827	974	1197	2320
	Tout	67	0	85	215	316	415	2755	117	0	91	170	303	374	2320
Lr (mm)	< 20	173	0	0,2	0,5	1,1	1,1	11,7	57	0	0,2	0,4	1,0	0,9	7,1
	[20-85]	57	0,1	1,3	4,7	8,9	14,5	41,7	50	0,1	0,8	3,9	4,6	6,6	17,0
	> 85	10	50,8	71,3	77,5	81,2	85,5	137,1	10	11,0	26,3	31,9	42,2	39,0	116,5
	Tout	240	0	0,3	0,8	6,3	3,0	137,1	117	0	0,3	0,9	6,0	5,7	116,5
Qmax (l/s)	< 20	173	0	5	9	21	15	409	57	0	16	26	65	73	397
	[20-85]	57	4	22	78	198	282	1279	50	9	65	172	322	354	1367
	> 85	10	331	636	877	943	1285	1659	10	447	809	1003	1254	1771	2521
	Tout	240	0	7	13	100	41	1659	117	0	24	74	277	316	2512
Qs (l/s/ha)	< 20	173	0	0,6	1,0	2,3	1,7	45,4	57	0	0,5	0,9	2,1	2,4	13,1
	[20-85]	57	0	2	9	22	31	142	50	0	2	6	11	12	45
	> 85	10	37	71	97	105	143	184	10	27	33	41	58	83	
	Tout	240	0	1	1	11	5	184	117	0	1	2	9	10	83

Le débit maximal aval est beaucoup plus important que celui amont, ce qui s'explique par la différence de superficie des deux bassins versant. Par contre, le débit spécifique est supérieur à l'amont. Pour les forts épisodes, il y a un facteur deux entre le débit spécifique amont et aval. La lame d'eau ruisselée est également plus forte à l'amont.

Plus la pluie est importante, plus sa durée, la durée du ruissellement, la lame d'eau ruisselée et le débit sont importants. Pour le débit, cette augmentation a un palier entre les pluies inférieures à 85 mm et celles qui sont supérieures. En moyenne les pluies entre 20 et 85 mm engendrent un débit médian de 78 l/s contre 877 l/s pour les pluies de plus de 85 mm.

3.3.3 Etudes des intensités

Pour chaque épisode les intensités instantanées sont calculées sur les horaires de basculement d'auget et ce sont elles qui figurent sur les graphiques pluie/débit. Les intensités maximales à différents pas de temps ont également été calculées. Les différents pas de temps sont 1, 5, 6, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 240, 360, 720 et 1440 min. Les caractéristiques statistiques des principaux paliers figurent dans le

Tableau 9.

Les valeurs d'Imax1440 sont très faibles du fait de la courte durée des pluies (en moyenne de 300min, donnée issue du Tableau 8). Sur tous les pas de temps, l'intensité croît avec la hauteur de pluie de l'épisode. Les intensités sont très proches entre l'amont et l'aval. Cela confirme le choix d'utiliser une pluie moyenne des deux postes par la suite. Un coefficient 2 sépare les pluies supérieures à 85 mm et les autres, quel que soit le pas de temps à l'amont et à l'aval.

Tableau 9 : Statistiques sur les Imax6, 15, 60, 120 et 1440min

Imax (mm/h)	Pluie (mm)	AMONT						aval					
		Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max	Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max
Imax6	< 20 mm	0	5	15	21	30	95	0	5	15	19	25	90
	[20-85]	5	30	45	49	65	130	5	30	45	52	70	125
	> 85 mm	40	63	80	87	116	135	40	53	90	89	115	140
	Tout	0	10	25	29	40	135	0	10	20	28	40	140
Imax15	< 20 mm	0	6	10	13	18	52	0	4	8	12	16	60
	[20-85]	4	20	32	36	42	94	8	20	30	38	46	90
	> 85 mm	24	44	61	65	81	118	26	40	72	70	89	122
	Tout	0	6	14	20	26	118	0	6	12	20	26	122
Imax60	< 20 mm	0	3	5	5	7	22	0	2	4	5	7	25
	[20-85]	3	10	14	17	22	45	3	10	15	18	23	49
	> 85 mm	15	27	30	34	39	59	15	29	34	36	45	61
	Tout	0	3	6	9	11	59	0	3	6	9	11	61
Imax120	< 20 mm	0	2	3	3	5	11	0	1	3	3	4	12
	[20-85]	1	7	9	11	13	24	3	7	10	11	15	29
	> 85 mm	12	18	21	24	30	47	12	18	25	26	29	48
	Tout	0	2	4	6	7	47	0	2	4	6	7	48
Imax1440	< 20 mm	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
	[20-85]	0	1	1	1	2	3	0	1	1	1	2	3
	> 85 mm	4	4	5	5	6	7	4	4	5	5	6	8
	Tout	0	0	0	1	1	7	0	0	0	1	1	8

3.3.4 Lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie

Une des hypothèses du comportement des petits bassins versants miniers est qu'à partir d'une certaine lame d'eau précipitée, la lame d'eau ruisselée ne dépendrait plus que de celle-ci. La Figure 44 de la lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie montre un changement de comportement au seuil de 85mm de pluie.

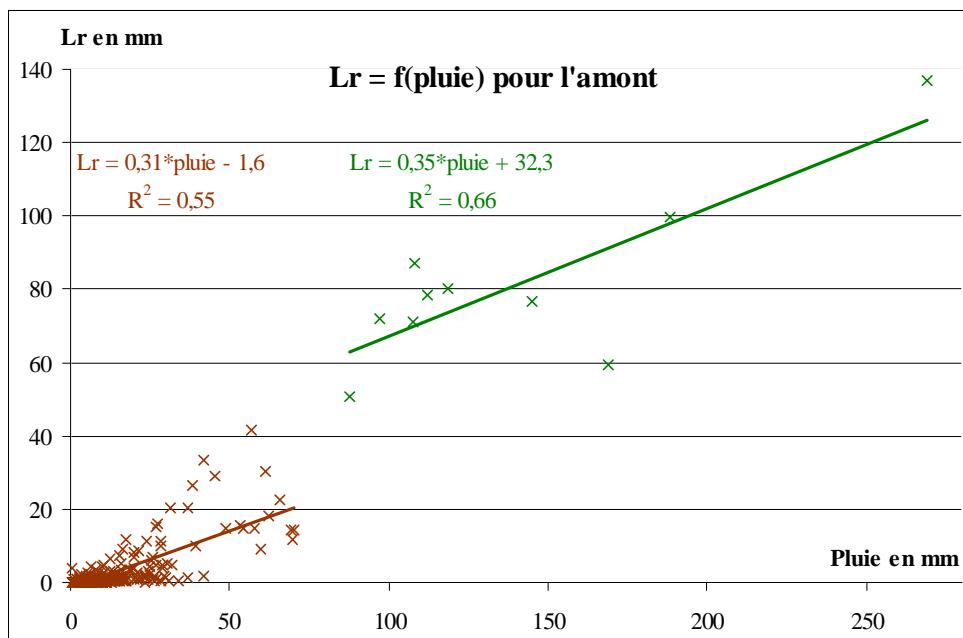


Figure 44 : Lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie

Cependant, la portion de graphe au-delà de 85 mm de pluie comporte un nombre faible de points. De plus, la formulation ajustée sur cette partie du nuage n'assure pas une cohérence hydrologique satisfaisante (la présence d'un coefficient constant positif n'a guère de sens

hydrologique). Il semble donc préférable, dans l'état actuel du jeu de données d'adopter une seule relation pour le nuage de points (Figure 45, gauche). La formulation retenue établirait une interception initiale de 8 mm et un coefficient d'écoulement de 0,52. Si on ne retient que les épisodes moyens et forts (pluie supérieure à 20 mm), on obtient une droite de pente plus raide ($C = 0,6$) et une interception initiale plus forte (17,4 mm), (Figure 45, droite).

Ces résultats méritent d'être confortés sur l'ensemble de la période d'observation et seront approfondis dans la synthèse finale.

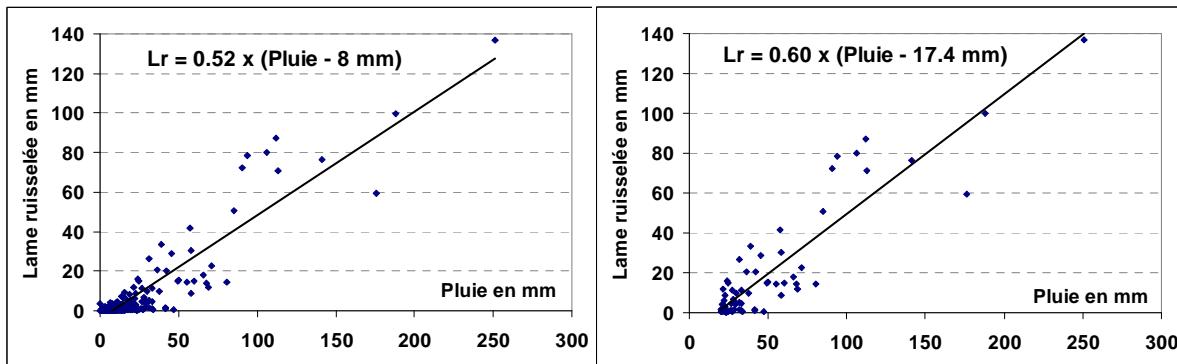


Figure 45 : Lame ruisselée en fonction de la Pluie pour Poro amont, tous épisodes 2009-2011

3.4 Critères de séparation des épisodes faibles, moyens et intenses

Le projet Hydromine s'intéresse principalement à la caractérisation des épisodes extrêmes ; il faut donc définir ce qu'est un épisode fort. Pour établir le catalogue PQ, il a été défini un premier seuil de pluie (5 mm) pour lequel les pluies étaient considérées comme très faibles et non intéressantes pour l'analyse et ne figurant pas dans le catalogue. Maintenant il s'agit de découper les épisodes figurant au catalogue en trois catégories : faible, moyen et intense.

Les épisodes faibles ne sont pas analysés en détail. Par contre, les épisodes moyens et intenses feront l'objet d'une analyse plus poussée et notamment d'une quantification des flux de matière en suspension. Il est nécessaire de séparer les épisodes moyens et forts afin de mettre en évidence une éventuelle différence de comportement des bassins dans ces deux types de situation.

La pluie servira de critère de définition entre les catégories d'épisodes car la pluie est un paramètre simple, accessible à tous que ce soit avec les pluviomètres de Météo France, ceux de la DAVAR ou ceux installés par les compagnies minières. Les limites de catégorie à l'aide du critère doivent permettre de conserver pour l'analyse les épisodes ayant ruisselé et plus particulièrement les épisodes ayant fait l'objet de prélèvements sur au moins un des deux bassins versants.

3.4.1 Séparation faible/moyen

Dans ce but, le Tableau 10 et le Tableau 11 donnent les caractéristiques statistiques des pluies de l'épisode en fonction de la catégorie de ruissellement engendré, du dépassement ou non du seuil de prélèvement, de la réalisation effective des prélèvements attendus. Ainsi, les niveaux 1 et 2 apparaissent sur trois lignes :

- Evènement ayant fait l'objet de prélèvement
- Evènement qui aurait du être échantillonné
- Evènement inférieur au seuil d'échantillonnage

Tableau 10 : Caractéristiques des pluies amont par catégorie de ruissellement pour l'amont

Catégorie ruissellement	Qmax>seuil de prélèvement	Prélèvement	Effectif	%	en mm					
					Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max
0	NON	NON	17	6%	0,5	3	4,5	4,9	5	9,8
1	OUI	OUI	30	11%	19,5	28,3	47,5	62,4	70,3	269
		NON	53	20%	3,5	13	19,5	28,7	28,5	176
	NON		100	38%	1,5	5,9	8,5	11	13,6	41,5
2	OUI	NON	3	1%	6	11,3	16,5	16,3	21,5	26,5
	NON		63	24%	0	2,3	5	5,3	6,3	26

Tableau 11: Caractéristiques des pluies aval par catégorie de ruissellement pour l'aval

Catégorie ruissellement	Qmax>seuil de prélèvement	Prélèvement	Effectif	%	en mm					
					Min	Q1	Médiane	Moyenne	Q3	Max
0	NON	NON	149	56%	0	3	6,5	7,2	10	34,5
1	OUI	OUI	30	11%	19	31	51,5	65,7	69,5	287
		NON	17	6%	0,5	17	30,5	51,2	62	188,5
	NON		52	20%	0	7,9	12,3	14,4	18,4	41
2	OUI	OUI	3	1%	15,5	21	26,5	23,5	27,5	28,5
		NON	10	4%	4	5,6	7,8	13,3	22,9	28,5
	NON		5	2%	3,5	4	7	9,3	15,5	16,5

Pour n'inclure dans les épisodes moyens et forts du catalogue aucun épisode n'ayant pas ruisselé (catégorie ruissellement 0), il faudrait retenir un seuil de pluie de 10 mm à l'amont et 35 mm à l'aval. A l'amont ce seuil de 10 mm n'exclurait aucun épisode avec prélèvement mais il exclurait certains épisodes qui ont dépassé ce seuil théorique de prélèvements. A l'aval, le seuil de 35 mm exclurait beaucoup d'épisodes ayant ruisselé et ayant été prélevés. De plus, nous souhaitons retenir un seuil commun sur les précipitations pour les deux stations.

Le seuil finalement choisi de 20 mm est un bon compromis et seuls deux événements de catégorie 2 dépassent ce seuil. Ce seuil permet de conserver plus de 75% des événements ayant été prélevés.

3.4.2 Bilan

Malgré la faible hétérogénéité des pluies généralement observées, certains épisodes se classent dans des catégories différentes selon les deux pluviomètres. Le choix a été de travailler avec une pluie moyenne. Avec celle-ci, 67 épisodes sont conservés. Parmi eux, 4 épisodes amont (dont un à 2,5 mm) et 5 épisodes aval (dont un de 10 mm) sont inférieurs au seuil de 20 mm.

Il a été mis en évidence (Figure 44) une différence du comportement de ruissellement pour un seuil de 85 mm. Ce seuil sera retenu pour séparer les épisodes moyens et forts. Au final, les seuils retenus seront 20 et 85 mm. La répartition des épisodes est donc la suivante :

- Pluie comprise dans l'intervalle [0 ; 20 mm [: 199 épisodes
- Pluie comprise dans l'intervalle [20 ; 85 mm [: 57 épisodes
- Pluie comprise dans l'intervalle [85 mm ; + ∞ [: 10 épisodes

Soit 67 épisodes à étudier en détail. Dans ces 67 épisodes la répartition entre les années de mesures serait la suivante :

- 2009 : 29 épisodes (23 de janvier à mai compris)
- 2010 : 14 épisodes (7 de janvier à mai compris)
- 2011 (jusqu'en mai compris) : 24 épisodes

L'année 2010 a été une année sèche d'où le faible nombre d'épisodes recensés.

3.5 Analyse du fonctionnement des bassins versants lors d'un épisode pluvieux

Durant cette phase d'analyse seuls les épisodes ayant une pluie supérieure à 20mm seront étudiés.

3.5.1 Période de retour des épisodes pluvieux

La période de retour, T, est une moyenne à long terme du temps séparant un évènement de grandeur donnée d'un second d'une grandeur supérieure ou égale. Les périodes de retour permettent de caractériser l'aléa pluviométrique.

Avec une série longue d'observations, les fréquences empiriques, donc les périodes de retour, des éléments de la série peuvent être calculées en classant les valeurs. La plus fortes périodes de retour est de l'ordre de grandeur de la durée des observations. Or, des évènements rares ont pu se produire au cours de la période d'observation. Il est donc nécessaire de référer à des séries de données plus longues.

Une synthèse régionale des précipitations a été réalisée en Nouvelle-Calédonie. Pour évaluer le risque pluviométrique, une régionalisation des paramètres de Gumbel pour des durées de 15 min, 1 h, 2 h et 24 h y est proposée. C'est avec les paramètres locaux de cette loi de Gumbel que les périodes de retour, des évènements observés, ont été estimées. Les paramètres de Gumbel P0 et Gd à Poro sont les suivants :

Tableau 12 : Paramètre de Gumbel pour le site de Poro (ROMIEUX N. ; 2011)

Durée (h)	24	2	1	0,25
Gd (mm)	64,4	20,49	13,56	4,96
P0 (mm)	165	69	49,5	21,75

Pour chaque épisode la période de retour a été calculée sur les différentes durées. Le nombre d'épisodes en fonction de la période de retour est donné dans le Tableau 13

Tableau 13 : Nombre d'épisode par classe de périodes de retour pour l'amont et l'aval

T en année	Amont				Aval			
	15min	1h	2h	24h	15min	1h	2h	24h
≤ 1	54	58	62	58	52	55	57	57
] 1; 2 [11	8	4	9	14	11	8	9
≥ 2	2	1	1	0	1	1	2	1

Le nombre d'épisode dans chacune des classes de période de retour n'est pas identique à l'amont et à l'aval. Par exemple, à l'amont pour l'épisode 212, la pluie sur 2 h à une période de retour de 1,5 ans tandis que pour la même durée elle est de 4,1 ans, à l'aval.

À l'échelle de l'épisode les cumuls de pluies amont et aval sont bien corrélés. Les intensités des séquences pluvieuses à l'intérieur de l'épisode ne sont pas homologues. Cependant si un épisode possède des périodes de retour supérieures à 2 ans pour l'amont, les périodes de retour pour l'aval ne sont jamais inférieures à l'année et vice-versa.

La plus forte période de retour est de 6,4 ans pour l'aval (5,3 pour l'amont) et a eu lieu durant l'épisode 262, sur 15 min. Sur la période d'1 h la plus forte période de retour, amont aval confondu, est de 2,9 ans, 4,1 ans pour 2 h et 2 ans pour 24 h. Les épisodes dans le catalogue s'arrêtent à fin mai 2011

Les épisodes, ayant des périodes de retour supérieures à 2 ans, peu importe le pas de temps, font partie des gros épisodes, de plus de 85 mm. Par contre certains épisodes de pluie supérieure à 85 mm n'ont pas forcément des intensités de fortes périodes de retour. 24 des 67 épisodes ont, sur au moins un pas de temps, une période de retour supérieur à 1 an. Seuls les épisodes de plus 85 mm ont des périodes de retour dépassant l'année sur une durée de 24 h.

3.5.2 Analyse des temps de concentration

3.5.2.1 Contexte

Le temps de concentration est défini comme le temps que met un volume élémentaire ruisseau pour parvenir à l'exutoire du point le plus éloigné dans le temps (ROCHE M.F., 1986).

Le temps de concentration est un paramètre important du fonctionnement des bassins versants miniers. Il sert à décrire le fonctionnement du bassin versant, notamment la rapidité des écoulements et du transfert des flux de matières en suspension. Il est classiquement utilisé pour l'évaluation des débits de projet (par exemple par la méthode rationnelle). Pour l'application de cette méthode, les compagnies minières, ou les bureaux d'études utilisent des formules de la littérature qui ne sont généralement pas adaptées à ce type de bassin versant.

Dans le cadre du projet Hydromine, la détermination des temps de concentration pour l'amont et pour l'aval de chaque épisode était donc capitale. Les résultats obtenus sont comparés aux résultats des méthodes utilisées par les compagnies minières ce qui permettra de critiquer les différentes méthodes utilisées.

3.5.2.2 Méthode graphique d'estimation du temps de concentration

Disposant des couples averses crues pour chaque épisode recensé dans le catalogue PQ, une méthode graphique est utilisée pour évaluer le temps de concentration du bassin versant sur le graphique précipitation-débit de chaque épisode dans le cadre du projet Hydromine. Le temps de concentration est défini comme le temps séparant le centre de gravité des pluies et celui des débits, généralement proche de la pointe de crue.

Ainsi, 67 couples sont passés en revue et pour chacun une fourchette de temps de concentration est donnée. Une valeur à l'intérieur de cette fourchette est également présentée comme la valeur estimée être la plus proche de la réalité. L'Annexe 10 donne les temps de concentration estimés graphiquement pour chaque épisode.

Le temps de concentration retenu est de 16 min pour l'amont et 21 min pour l'aval. Cela correspond au temps de concentration moyen calculés sur les 67 temps de concentrations du milieu de la fourchette. Ces temps de concentration sont dans l'ordre de grandeur de ceux attendus. Toutefois, certains épisodes ont des temps de concentration beaucoup plus

faibles de l'ordre de 4 min et d'autres beaucoup plus long jusqu'à 64 min amont aval confondus.

Les forts temps de concentration peuvent être dus à plusieurs facteurs indépendants ou combinés tel que le temps sec, l'intensité de la pluie, ou la durée de l'évènement. Par exemple, l'épisode 41 qui a un temps de concentration de 55 min malgré un faible temps sec : 11 h insuffisant pour avoir une baisse notable du niveau d'eau dans les décanteurs. Cependant l'épisode est d'assez longue durée et les intensités sont faibles ce qui réduit les vitesses d'écoulement. Par contre l'épisode 176, faisant partie des plus gros épisodes a aussi un temps de concentration fort à l'amont : 48 min mais des intensités fortes. Le temps sec précédent cet épisode est de 5.5 jours, ce qui a pu permettre une forte baisse du niveau des décanteurs et donc ce qui peut expliquer le fort temps de concentration.

Les temps de concentrations courts se produisent pour des épisodes ayant des temps secs, Ts faibles, donc des épisodes où les pertes initiales sont faibles car les latérites présentent un taux d'humidité initial et les décanteurs sont déjà remplis ou quasiment remplis ou pour des épisodes ayant des temps sec plus grands mais des intensités de pluies importantes.

Pour certains épisodes, le temps de concentration calculé à l'amont est moyen ou faible tandis qu'il est très fort pour l'aval. L'état initial relativement sec du bassin versant joue un rôle particulièrement important pour ces épisodes.

3.5.2.3 Utilisation des formules de la littérature

Les temps de concentration sur les bassins versant amont et aval ont été calculés à partir de trois formules de la littérature utilisées par les mineurs. L'une d'entre elles a été développée par la SLN. Le Tableau 14 recense les résultats trouvés en fonction des formules utilisées, données en Annexe 11.

Tableau 14 : Temps de concentration calculé avec les formules utilisées par les mineurs

Nom de la formule ou de son auteur	SLN	Kirpitch	Johnstone et Cross	Meunier Mathys	DAVAR
Tc amont (min)	29	161	158	8	
Tc aval (min)	37	280	220	15	

Les formules de Kirpitch et Johnstone et Cross donnent des résultats non réalistes sur ce type de bassin versant. La formule de la SLN donne des résultats plus proches de la réalité mais plus forts que ceux obtenus durant le projet Hydromine. Souvent les temps de concentrations que les mineurs utilisent pour leur demande d'exploitation sont soit aberrants soit supérieurs à la moyenne de ceux déterminé graphiquement.

Irstea de Grenoble a développé, il y a quelques années, en simplifiant la méthode de Zeller, une formule de calcul de temps de concentration pour les bassins versants naturels en montagne qui prend en compte la dégradation du bassin (MEUNIER et MATHYS N., 1989). Le bassin versant amont est considéré comme totalement dégradé car il n'y a plus aucun couvert végétal, pour l'aval il a été pris en compte que le couvert végétal est faiblement présent. Le détail du calcul est présenté en Annexe 11. Avec cette formule le temps de concentration pour l'amont est de 8 min et de 15 min pour l'aval. Ces temps sont plus faibles que ceux déterminés graphiquement mais ils sont du même ordre de grandeur que ceux des épisodes ayant un faible temps de concentration.

La DAVAR a proposé une méthode de calcul, dite méthode des temps de transfert, qui considère une vitesse de transfert de 2 à 4 m/s suivant le drain hydraulique le plus long et

en déduit le Tc. On retient 2m/s si la pente du drain est entre 5 et 15% (dans les vallées) 4m/s au-delà (sur les versant) et 1 m/s si la pente est inférieure (dans les plaines). Cette méthode est déjà largement utilisée par les bureaux d'étude calédoniens.

3.5.3 Analyse des coefficients d'écoulement

Le coefficient d'écoulement est défini comme le rapport du volume total écoulé à l'exutoire d'un bassin, au volume précipité sur ce bassin, pour un épisode pluie/débit donné.

La fin du ruissellement a été définie plus haut comme la fin du ruissellement rapide de crue. Le coefficient d'écoulement utilisé dans cette étude est donc le coefficient d'écoulement rapide de crue qui ne tient compte de la réponse en retard du bassin versant (écoulement de base, ressuyage des nappes temporaires...).

Dans le dimensionnement des décanteurs, le coefficient d'écoulement est utilisé. Actuellement, la règle adoptée par la charte des bonnes pratiques minières est de le prendre égal à 1. Mais cela correspond en réalité à un coefficient d'écoulement équivalent de l'ordre de 0.7 puisque l'on admet un taux de remplissage du bassin par les sédiments avant curage de l'ordre de 30% qui réduit d'autant la capacité de stockage de l'eau.

Sur le site de Poro et pour les 67 épisodes, le coefficient d'écoulement réel a été calculé pour l'amont et pour l'aval. Les résultats obtenus devraient permettre d'optimiser la taille théorique des décanteurs. Le terme théorique est employé car les décanteurs actuels ont des volumes réels beaucoup plus faibles que les volumes théoriques requis. La Figure 46 présente les résultats des coefficients d'écoulement en fonction de la pluie, pour la station de Poro amont. Le graphe pour la station aval est donné en Annexe 11b.

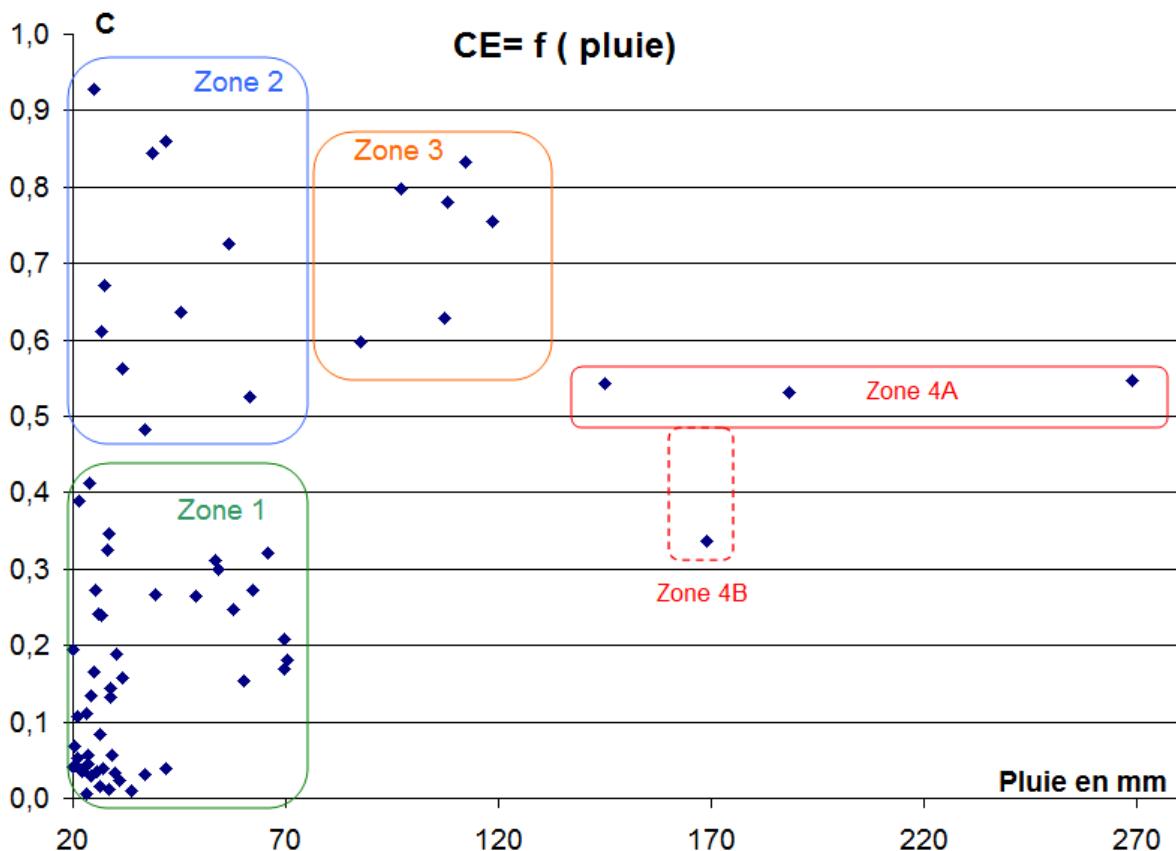


Figure 46: Coefficient d'écoulement zoné en fonction de la pluie pour la station de Poro amont

Les épisodes sont répartis en 4 zones en fonction de leur coefficient d'écoulement et de leur pluie :

- Zone 1 : CE < 0.45 et Pluie < 85 mm
- Zone 2 : CE > 0.45 et Pluie < 85 mm
- Zone 3 : CE > 0.55 et 85 mm < Pluie < 140 mm
- Zone 4A : CE > 0.50 et Pluie > 140 mm
- Zone 4B : CE < 0.40 et Pluie > 140 mm

Les pluies entre 20 mm et 85 mm ont des coefficients d'écoulement associés très variables. Ceux-ci sont répartis en deux zones. Une de ces deux zones a des CE similaires aux pluies plus fortes.

Les zones 1 et 2 ont des caractéristiques différentes. Ainsi, les débits maximums de la zone 2 sont essentiellement supérieurs à ceux du groupe 1. Les intensités sont en moyennes plus élevées pour la zone 2 mais le temps sec, Ts est relativement faible. L'intensité, quel que soit son pas de temps de calcul, le débit maximal et le temps sec sont les trois paramètres qui permettent de séparer les événements des zones 1 et 2.

Les zones 2 et 3 ont des caractéristiques similaires sur les trois paramètres cités précédemment. Cependant la zone 3 concerne des événements avec des lames d'eau précipitée plus importantes. Les intensités pour ces épisodes en début de période sont en général très faibles.

Les épisodes de la zone 4 ont un coefficient d'écoulement qui tend à se stabiliser vers 0.55. L'évènement de la zone 4B, dont l'intensité est plus forte, mais le débit maximal plus faible a un coefficient d'écoulement plus faible que les événements de la zone 4A. Le faible nombre d'épisodes composant le groupe 4 ne permet pas de conclure si le coefficient d'écoulement des épisodes de pluies extrêmes (lame d'eau précipitée supérieure à 140 mm) tend vers 0.55 et que l'épisode 4B est une exception, une autre zone à part entière ou c'est un hasard que 3 des 4 événements aient un coefficient d'écoulement qui tend vers 0.55. Il faudra avec les futurs événements de 2012 et 2013 affiner ces résultats.

Les coefficients d'écoulements des crues les plus fortes en débit de pointe ne correspondent pas aux CE les plus importants. Il serait intéressant de calculer l'indice des pluies antérieures de façon à savoir si le comportement du coefficient d'écoulement est lié à la pluie précédente.

3.5.4 Fonctionnement des décanteurs

Le suivi des décanteurs au cours de la campagne 2011 a été présenté dans la partie 2.

Le critère de dimensionnement des décanteurs est la pluie de durée 2h et de période de retour 2ans (dite 2h/2ans). Cette pluie est de 76,5 mm à Poro. La charte des bonnes pratiques impose de dimensionner les décanteurs avec un coefficient de 1 qui correspond en réalité à un coefficient d'écoulement équivalent de l'ordre de 0.7 si l'on tient compte de la réduction de capacité liée aux dépôts solides : on admet un taux de remplissage avant le curage de l'ordre de 30%.

Le décanteur FRN01, draine une surface de 0,141 km² et le décanteur FRN18 une surface de 0,151 km² mais il est en série à la suite de FRN01. Les volumes théoriques des décanteurs pour différentes hypothèses de coefficients d'écoulement utilisés sont dans le Tableau 15. Pour le décanteur FRN18, seule la surface supplémentaire drainée par ce décanteur (soit 0.01 km²) est prise en compte pour calculer sa capacité théorique.

Il reste des incertitudes sur le volume réel de stockage de ces deux décanteurs car les surfaces et volumes varient selon les sources d'information. Une première estimation (Carpentier, 2011) donne des volumes de 1485 m³ et 340 m³ respectivement pour FNR01 et FRN18. Les surfaces mesurées sur le SIG seraient de 1250 et 300 m² soit des volumes plus élevés (pour une profondeur moyenne de 1.5 m) : 1875 et 400 m³. Des levés topographiques réalisés en 2010 devraient permettre un calcul plus précis mais il restent à exploiter faute de la connaissance exacte des cotes de déversement.

Selon les critères de la charte, les décanteurs sont actuellement fortement sous dimensionnés. Une des raisons de ce sous dimensionnement est le manque de place pour l'implantation de ces décanteurs.

Tableau 15: Volume théorique des décanteurs en fonction du coefficient d'écoulement

	Volume théorique en m ³		
	CE=1	CE=0,6	CE=0,3
FRN01	10787	6472	3236
FRN18	765	459	230

Pour obtenir une capacité de rétention suffisante au niveau du bassin versant, il serait nécessaire d'approfondir les ouvrages existants jusqu'à une profondeur moyenne de 2.5 m, mais surtout de multiplier les ouvrages au plus près des sources de pollution ou à défaut de trouver des méthodes compensatoires telles que la revégétalisation au fur et à mesure de l'exploitation, la couverture temporaire des surfaces sensibles au moyen de géotextiles, le revêtement des voies de roulage...

3.5.5 Facteurs explicatifs de la réponse des bassins aux précipitations : analyses en composantes principales

3.5.5.1 Restriction du nombre de variables

Un grand nombre de variables a été calculé et testé pour tenter de déterminer quels sont les principaux facteurs explicatifs de la relation pluie-débit sur ces petits bassins versants. Mais beaucoup de ces variables sont proches ou redondantes.

La première analyse en composante principale réalisée a pour but de déterminer des liens statistiques entre les variables et de permettre de réduire le nombre de variable. Les analyses statistiques de ce rapport ont été réalisées avec le logiciel Statistica.

Les ACP aident à la mise en évidence des relations moyennes entre les variables à l'origine des crues mais elles ne permettent pas de comprendre le déroulement des crues ni de discriminer les crues entre elles (GRAFF B., 2004).

Les variables utilisées lors de l'ACP sont redondantes et dépendantes, une première ACP avec l'ensemble des variables permet par observations des groupements de variables, sur les principaux axes de réduire le nombre de variables (Figure 47). Le graphique suivant présente la répartition graphique des variables et leurs séparations en groupes.

Outre les variables définies dans le Tableau 7, on trouvera sur cette ACP les variables suivantes :

- T1h, T2h, T24h : période de retour de la pluie maximale en 1h, 2h et 24h de l'épisode
- htot10, htot20... htot80 : cumul de précipitation de l'épisode tombé avec une intensité instantanée supérieure à 10, 20, ... 80 mm/h
- ej00 : énergie cinétique des précipitations (calculée par la formule de Wishmeier)

- $eJ10$, $eJ20$, ..., $eJ80$: énergie cinétique calculée sur les séquences d'intensité supérieur à 10, 20, ... 80 mm/h
 - T_c : temps de concentration
 - CE : coefficient d'écoulement

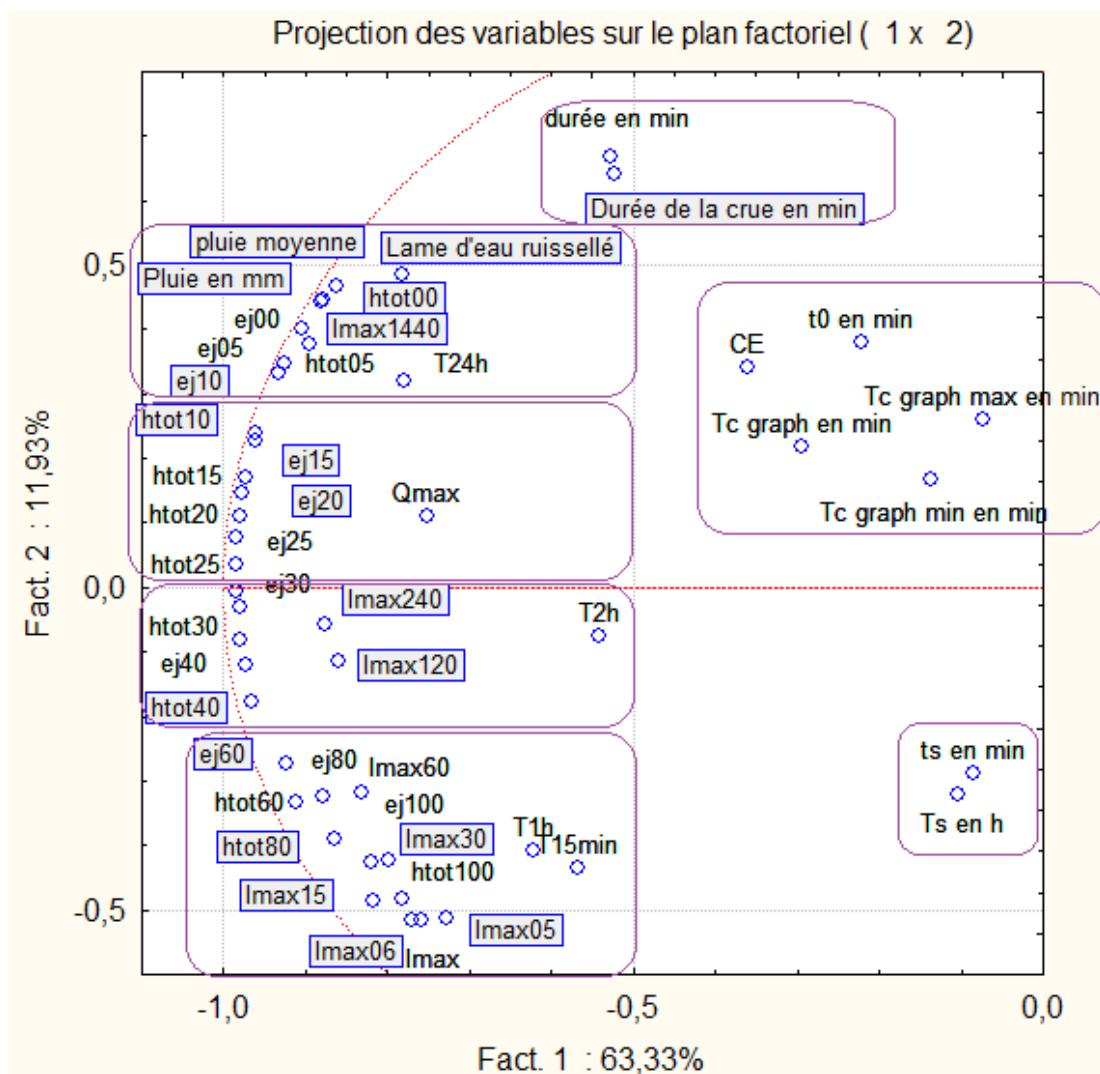


Figure 47: Projection des variables de l'ACP sur les plans 1 et 2
 (remarque, les cadres bleus n'ont pas de signification particulière, ils sont placés automatiquement par Stasistica)

Les variables retenues à l'issue de cette première ACP sont :

- la durée de la crue
 - le coefficient d'écoulement
 - le temps sec, Ts (ts si Ts non disponible)
 - la Pluie moyenne (pluie au pluviomètre choisi si non disponible)
 - le débit maximal
 - l'intensité maximale sur 15min (sur 5, 6 ou 30 min si non disponible)
 - l'énergie cinétique des précipitation pour les séquences d'intensité instantanée supérieure à 40mm/h, ej40 (Imax120 si non disponible)

Ces jeux de variables sont identiques pour l'amont et pour l'aval. Le choix des variables a été fait de façon à avoir des variables facilement calculables. Normalement ces variables peuvent être obtenues par tout service environnemental des compagnies minières disposant d'un suivi à un endroit x, des débits et d'au moins un pluviomètre.

3.5.5.2 Résultats

Une deuxième ACP est réalisée avec en entrée les 7 variables retenues précédemment. Les 5 premiers axes sont interprétés, les graphiques des valeurs propres et des principaux axes ainsi que la matrice de corrélations sont en Annexe 12. Pour chaque axe, les variables prises en compte sont dans le Tableau 16.

Tableau 16: tableau des variables explicatives de chaque axe

Axe	Pmoy	Ts	Imax15	CE	Qmax	Ej40	Dq
1	-		-	-	-	-	-
2		-	-	+			
3	+		-		-		+
4		-		-			
5			-	-	+		

Les signes « + » et « - » du tableau correspondent à la position des projections des variables sur les différents axes.

Le premier axe principal met en évidence deux types d'épisodes :

- ceux ayant une pluie importante et intense et une infiltration faible provoquant un ruissellement long au débit maximal élevé
- ceux ayant une pluie faible et peu intense et une forte infiltration provoquant un ruissellement court au débit maximal peu élevé

En comparaison avec les groupes faits durant l'étude du coefficient d'écoulement cela correspond à l'opposition des groupes 3 et 4 au groupe 1.

Le second axe met en évidence que les épisodes ayant un faible temps sec provoquent un fort ruissellement même s'ils ont une pluie peu intense. Au contraire, les épisodes ayant des pluies intenses mais un temps sec élevé ont un coefficient d'écoulement faible. Si le bassin est saturé, le ruissellement (la réponse à une pluie) est plus important que s'il ne l'est pas.

Le troisième axe met en avant que des épisodes ayant des pluies moyennes à fortes, peu intenses, engendrant un ruissellement long, provoquent un plus faible débit que des épisodes ayant une pluie moyenne mais intense engendrant un ruissellement plus court.

Sur le quatrième axe la durée du temps sec fait partie des variables à forte contribution. Deux types d'épisodes s'opposent :

- ceux ayant un temps sec faible et un coefficient d'écoulement faible ou l'inverse (Ts fort et CE fort)
- ceux ayant un temps sec faible et un coefficient d'écoulement fort ou l'inverse (Ts fort et CE faible)

Les épisodes qui ont un temps sec important signifient que le temps séparant l'épisode et le dernier ruissellement est long mais cela ne signifie pas qu'il n'a pas plu, les décanteurs et le

sol ayant pu absorber certaines pluies. Il faudrait travailler avec l'indice des pluies antérieures. Pour ces épisodes le sol est déjà saturé en eau et l'infiltration est faible.

Le dernier axe interprété pour cette étude sépare les épisodes en deux catégories :

- Ceux ayant des pluies intenses qui ruissellent beaucoup ce qui provoque un fort débit ou l'inverse (Pluie faible, infiltration importante et faible débit)
- Ceux ayant donné des débits moyens soit avec une forte pluie qui s'infiltra beaucoup, soit avec une faible pluie qui ruisselle beaucoup.

Il n'y a pas de regroupements visibles des épisodes dans les plans principaux issus de l'ACP.

3.5.6 Flux de matières en suspension pendant les crues

3.5.6.1 Contexte et étapes de travail

Un des buts majeurs du projet Hydromine est de déterminer les flux de matière en suspension.

Les résultats permettront tout d'abord à l'échelle de l'épisode de déterminer si un lien entre les caractéristiques des flux de MES et certains paramètres explicatifs (par commodité on nommera le flux calculé à l'échelle de l'épisode "flux épisodique"). Ensuite en travaillant sur des échelles temporelles plus longues telles que la saison où l'année cela permettra de quantifier plus précisément la pollution engendrée.

Sur les 67 épisodes considérés comme pertinents pour l'étude, seules 30 crues à l'amont et autant à l'aval ont des résultats de concentration en MES permettant de reconstituer un flux. Seuls 23 épisodes ont à la fois été analysés pour l'amont et l'aval.

Le travail se décompose en plusieurs étapes qui sont :

A : Détermination des flux de MES pour les épisodes avec analyses de MES.

Détail pour un épisode :

1. Récupération de la chronique de débit pour l'épisode en question
2. Récupération des valeurs de concentration concernant l'épisode, l'heure et le débit associés
3. Tracé du graphique du débit avec les prélèvements en fonction du temps (Figure 48)
4. Analyse de la répartition des prélèvements au cours de la crue
5. Tracé du graphique du débit et des concentrations en fonction du temps (Figure 49)
6. Analyse de l'allure de la courbe des concentrations par rapport à celle du débit
7. Tracé du graphique des concentrations en fonction du débit (hystérésis) (Figure 22)
8. Analyse de l'allure de l'hystérésis et de son sens de rotation
9. Interpolation pour chaque pas de temps de débit (5 min) de la concentration associée
 - ⇒ Interpolation proportionnelle au débit (linéaire ou non)
 - ⇒ Interpolation linéaire proportionnelle au temps
 - ⇒ Interpolation manuelle fonction de l'allure du graphique et du comportement général
10. Calcul du flux de l'épisode et de la concentration maximums et moyenne

B : Reconstitution des flux pour les épisodes n'ayant pas d'analyses de MES

1. Choix de la méthode
2. Choix du modèle
3. Application du modèle
4. Analyse des résultats
 - ⇒ Si corrects : étape 5
 - ⇒ Sinon étape 2 voire 1
5. Récupération des flux pour les épisodes manquants

C : Calcul des flux saisonnier et annuel

D : Interprétation des valeurs de flux obtenues

3.5.6.2 Exemple de détermination des flux épisodiques appliqué à l'épisode 125

L'épisode 125 du 2/12/2009 servira d'exemple pour la détermination d'un flux épisodique.

Etape A1 à A8 comprise :

Après avoir récupéré les données, les Figure 48, Figure 49, Figure 50 correspondant aux étapes A3, 5 et 7 sont réalisées et interprétées.

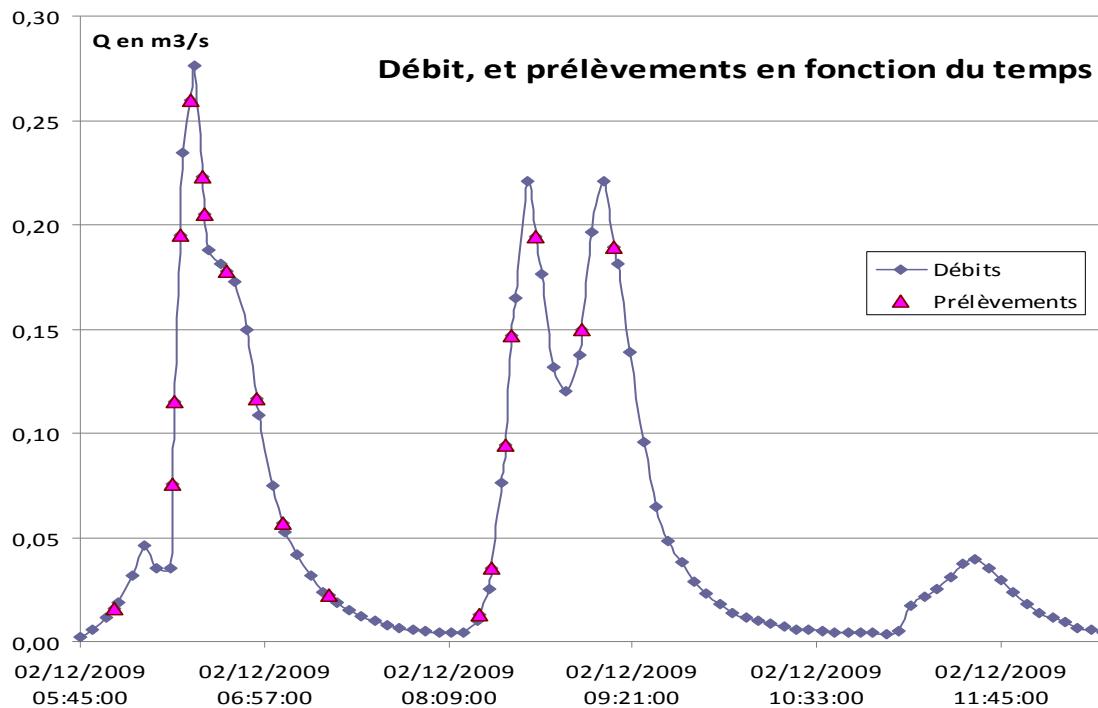


Figure 48: Débits et prélèvements en fonction du temps, exemple pour l'épisode 125 à l'amont

Pour cet épisode, les prélèvements ont commencé dès le début de l'épisode et les trois premiers pics de crues sont échantillonnés. La décrue du troisième pic et le quatrième petit pic n'ont pas été prélevés car les 18 flacons disponibles étaient pleins et le niveau d'eau atteint n'était pas suffisant pour utiliser les flacons des grandes hauteurs.

Les concentrations associées aux trois dernières heures de la crue seront plus difficiles à déterminer. Pour certains épisodes les pics n'ont pas été prélevés.

Au début du ruissellement, la concentration est très importante, c'est l'effet « first flush ». Par la suite bien que le débit augmente la concentration diminue. Pour certains épisodes le « first flush » est moins accentué et la concentration continue à augmenter avec le premier pic de crue jusqu'à environ la moitié du temps de montée puis elle décroît.

Pour l'ensemble des épisodes complexes (à plusieurs pointes successives), lors de la montée de débit du deuxième pic de crue, la concentration croît de nouveau mais atteint rarement les concentrations du premier pic de crue. Cette concentration croît jusqu'à la moitié du temps de montée. Pour chaque nouveau pic ce phénomène se retrouve mais avec des intensités de plus en plus faibles.

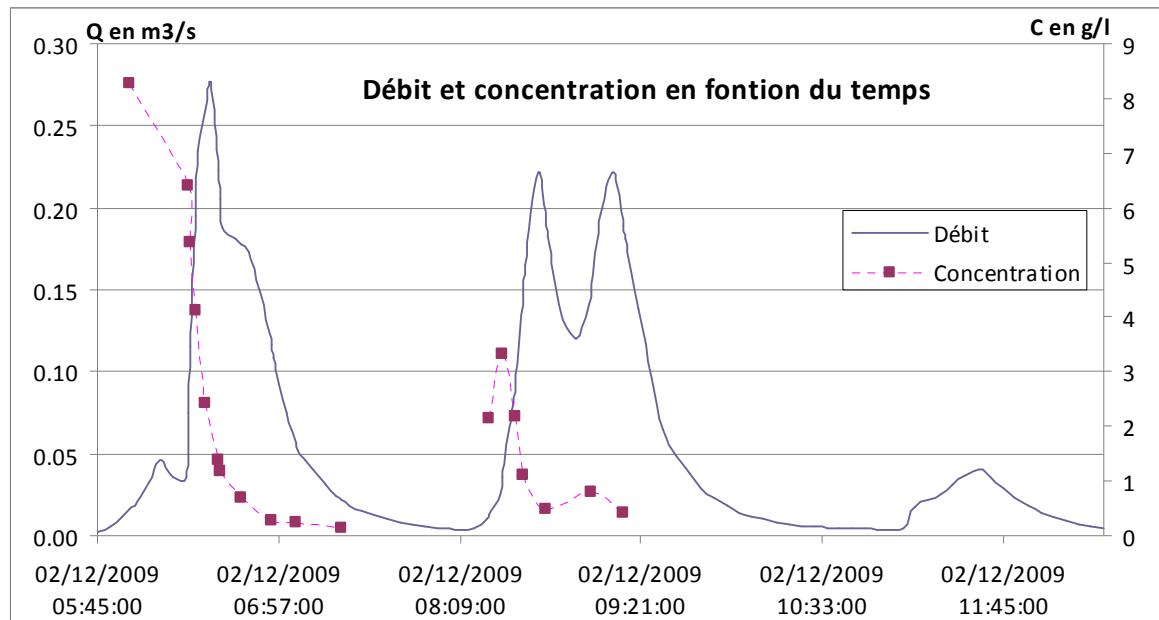


Figure 49: Débit et concentration en fonction du temps exemple, pour l'épisode 125 à l'amont

A l'aval, la concentration suit plus l'évolution du débit. Tant que le débit croît la concentration croît. Les graphiques représentant l'évolution du débit et de la concentration et des prélèvements pour l'épisode 125 à l'aval sont en Annexe 13.

Observer le comportement de la concentration face au débit permet de mieux comprendre le fonctionnement de l'épisode et de mieux déterminer les concentrations pour les pas de temps manquants. La Figure 50 présente la concentration en fonction du débit pour le seuil amont et pour le seuil aval.

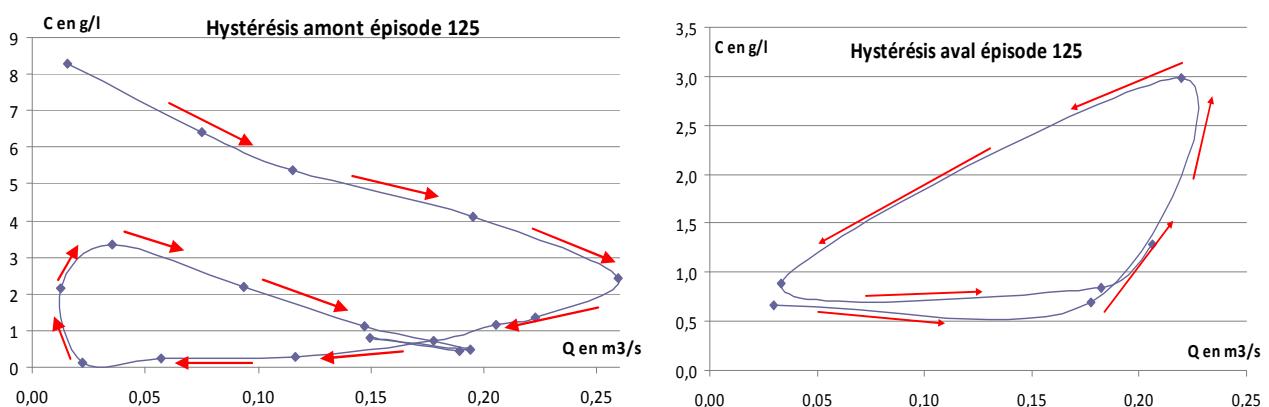


Figure 50: Hystérésis amont et aval de l'épisode 125

Ces courbes permettent de mettre en avant le lien univoque ou non, entre la concentration et le débit. De manière classique (ALEXANDROV et al, 2003), on retrouve sur ces graphes un phénomène d'hystérésis : la concentration dans l'écoulement est, pour une même valeur du débit, différente à la montée en crue et à la décrue. Les deux graphiques précédents présentent pour l'épisode 125, l'hystérésis amont et l'aval. La première remarque faite sur

l'ensemble des épisodes analysés est le sens de rotation. L'hystérésis tourne dans le sens horaire à l'amont et dans le sens anti-horaire à l'aval. Cela vient du comportement de la concentration décrit précédemment.

Etape A9 et A10 :

La détermination des concentrations aux pas de temps non échantillonnés sera principalement proportionnelle au débit ou au temps et principalement linéaire entre deux points successifs.

Pour les pics non échantillonnés ou mal échantillonnés (pas de mesure à la montée), les rapports concentration/débit, sur un autre pic de crue échantillonnée, sont calculés. Si le pic de crue non échantillonné précède le pic de crue échantillonné les rapports concentration/débit seront majorés, sinon ils seront minorés.

Ces analyses sont faites sur les 30 épisodes amont et les 30 épisodes aval échantillonnés. Ainsi, pour chaque pas de temps de débit (5 min) un flux est calculé. La somme des flux par pas de temps représente le flux de l'épisode. Pour l'épisode 125, le flux est de 1570 kg pour l'amont et de 1730 kg pour l'aval. Les flux obtenus pour les épisodes échantillonnés sont en Annexe 14.

3.5.6.3 Reconstitution des flux épisodiques manquants

Plus de la moitié des épisodes ne sont pas échantillonnées, donc plus de la moitié des épisodes n'ont pas de flux MES associés. Il faut donc estimer ces flux. Pour cela plusieurs méthodes ont été essayées telles que des interpolations linéaires, des classifications, des interpolations, des modèles.

Pour cette étude, le choix a été fait de comparer les résultats obtenus à partir d'un modèle non linéaire généralisé (GLZ) prenant en compte plusieurs variables explicatives et une approche graphique ne prenant en compte qu'une seule variable explicative.

Modèle non linéaire généralisé :

Ce type de modèle à l'avantage de pouvoir prendre en compte plusieurs variables. Les variables choisies en entrée sont celles qui sont mises en avant durant l'ACP. Les variables peuvent être discrètes ou continues. Cela est important dans la mesure où par la suite l'activité minière sera prise en compte, sous la forme d'une variable codée.

Le modèle linéaire (régression multiple) était inadapté à l'étude car l'effet des prédicteurs sur le flux n'est pas linéaire. Par contre le modèle non linéaire généralisé peut être utilisé pour prévoir la réponse du flux suivant des distributions liées de façon non linéaire aux prédicteurs.

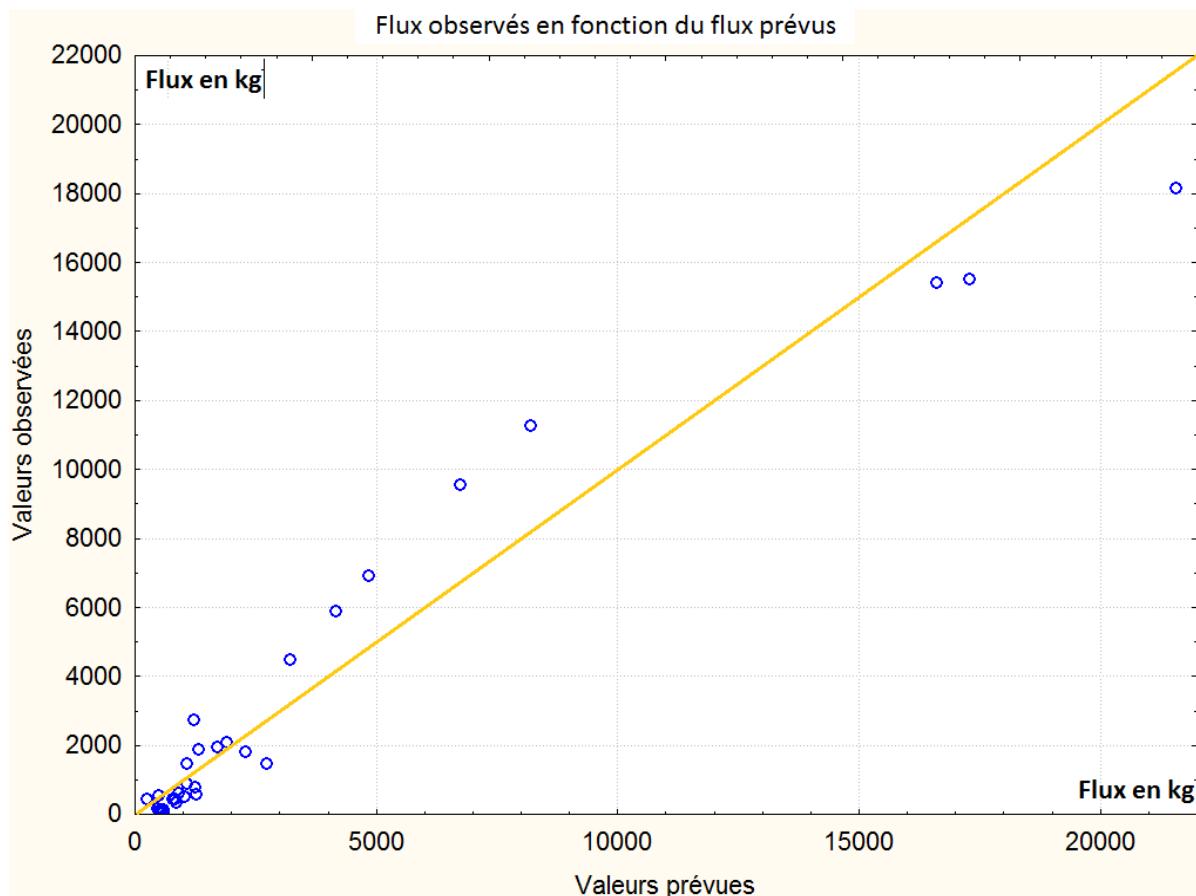
Dans le GLZ la relation est de type :

$$Y = g(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k) + e$$

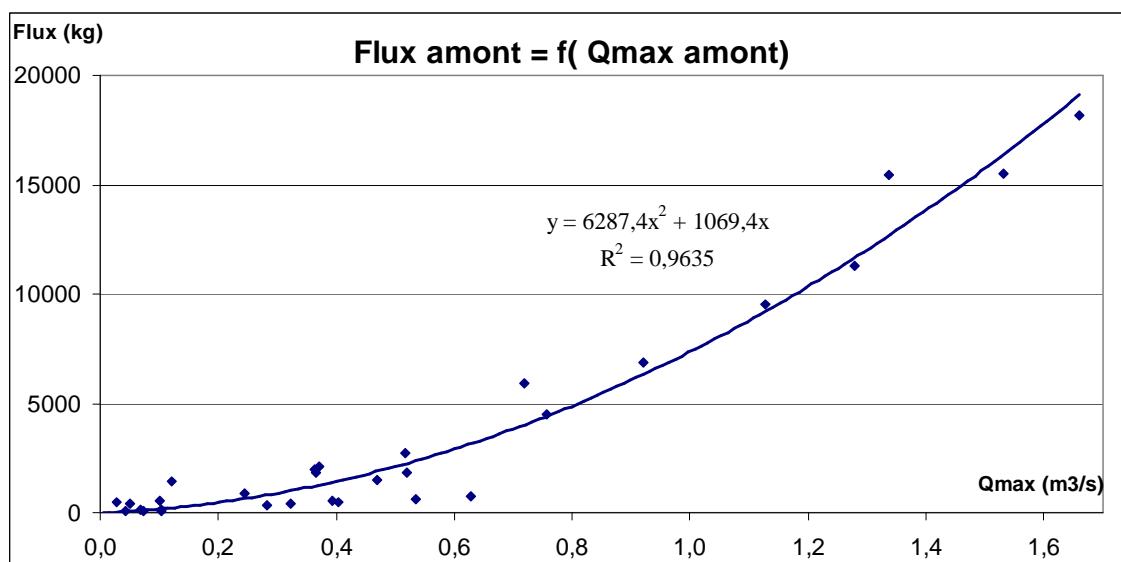
Où e représente l'erreur, et g est une fonction dont l'inverse est la fonction log pour cette étude.

La Figure 51 présente les valeurs observées en fonction des valeurs prévues.

Les petits flux, inférieurs à 3 tonnes, sont assez bien répartis autour de la première bissectrice. La majorité des épisodes restant à échantillonner devraient avoir un flux inférieur à 3 tonnes. Pour les flux observés entre 3 et 10 tonnes les flux prévus sont inférieurs aux flux observés puis dès 15 tonnes les flux prévus sont supérieurs aux observés.

**Figure 51:** Flux observés en fonction du flux prévus**Modèle non linéaire à une variable :**

Les graphiques de flux en fonction de différentes variables ont été réalisés sous Excel et les fonctionnalités d'Excel ont été utilisées pour ajuster une courbe de tendance non linéaire. Le flux est bien corrélé avec le débit maximal, mieux qu'avec la lame d'eau ruisselée ou précipitée. La Figure 52 et la Figure 53 présentent ce lien.

**Figure 52:** Flux en fonction du débit maximal pour l'amont

A l'amont une relation polynomiale, donnée sur le graphique corrèle très bien le flux et le débit maximal. La répartition des flux autour de cette courbe est homogène pour tous les débits.

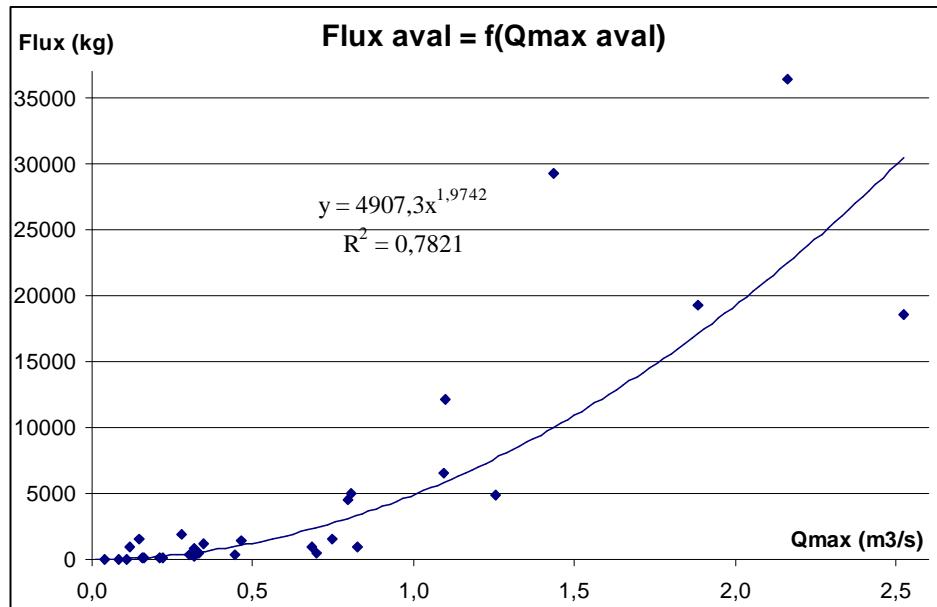


Figure 53: Flux en fonction du débit maximal pour l'aval

A l'aval, le flux et le débit maximal sont liés par une relation puissance donnée sur le graphique. La répartition des flux pour les débits inférieurs à $1 \text{ m}^3/\text{s}$ est homogène. Pour des débits plus grands les flux auront tendance à être sous estimés.

Comparaison des résultats issus des deux modèles :

Les résultats des flux avec les deux méthodes précédentes sont donnés Annexe 16 La Figure 54 comparent les résultats obtenus par le modèle et par la méthode graphique à l'amont.

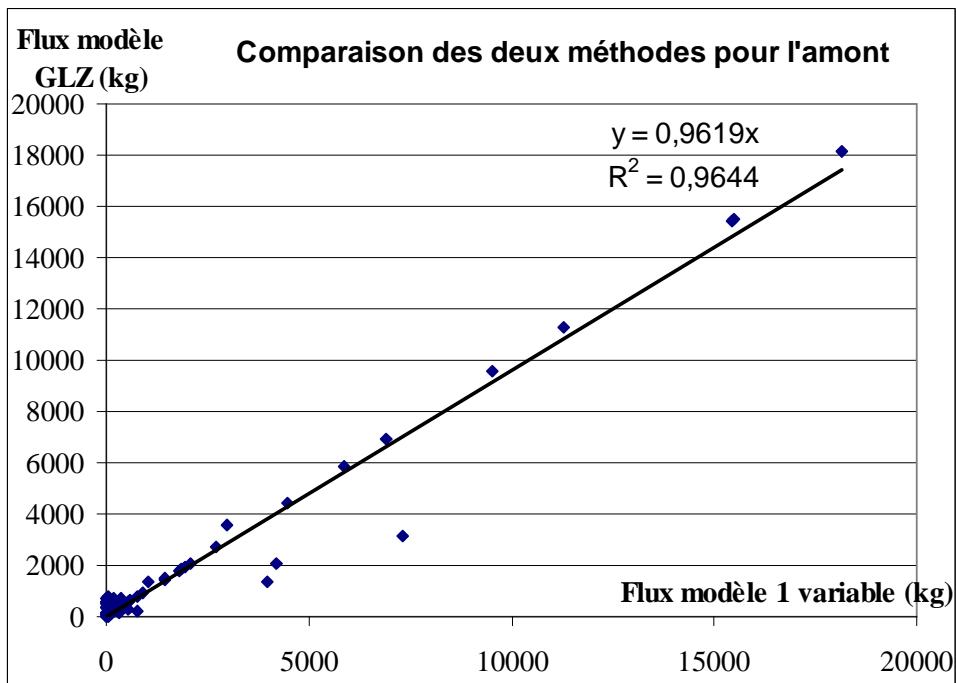


Figure 54: Comparaison des résultats des flux amont obtenus par les deux méthodes

Les flux obtenus par les deux méthodes sont très bien corrélés et donc quasi équivalents pour les flux > 2 tonnes sauf pour 3 épisodes..

Il n'y a pas de résultat meilleur d'une méthode à l'autre. Par contre le modèle à une variable est beaucoup plus simple, seul le débit de pointe intervient, cette méthode est donc plus facilement reproductible et plus robuste.

3.5.6.4 Flux annuel

Pour calculer les flux mensuels et annuels, on attribue à chaque crue de la période soit le flux calculé sur les prélèvements lorsqu'il est disponible, soit le flux reconstitué pour les épisodes sans prélèvements. Les résultats sont donnés sur la Figure 55.

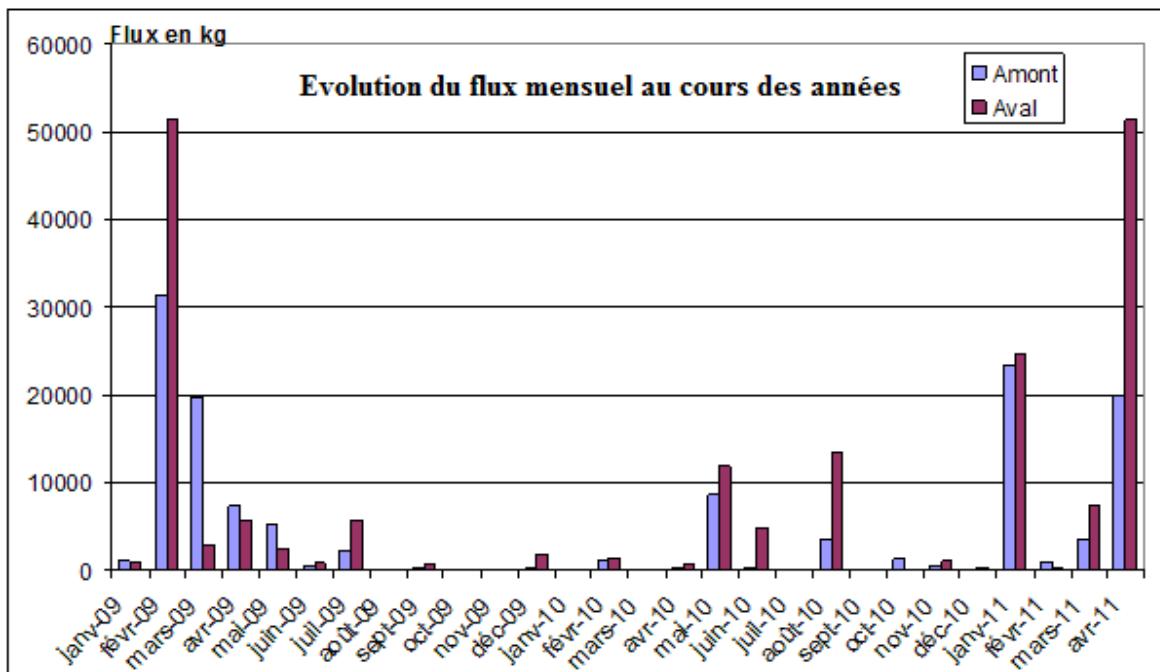


Figure 55: Evolution du flux mensuel de MES au cours des années

Il n'y a pas une répartition homogène des flux au cours du temps. Ils varient tout au long de l'année et entre les années. Tout comme pour les lames d'eau précipitées, c'est un ou deux gros événements dans un mois qui constituent l'essentiel du flux mensuel. D'une année à l'autre, ce n'est pas le même mois dans l'année qui produit le flux le plus important. En 2009, le mois le plus productif est le mois de février tandis qu'en 2011, il s'agit du mois d'avril pour l'aval et du mois de janvier pour l'amont. Le Tableau 17 donne les flux annuels de MES calculé à partir du modèle GLZ et le donne les flux annuel de MES calculés à partir du modèle à une variable.

Tableau 17 : Flux annuel en MES calculés à partir des résultats du modèle GLZ(*jusqu'en mai pour 2011)

Année	Flux de MES (t)		Flux spécifique de MES (t/ha)	
	Amont	Aval	Amont	Aval
2009	68,2	72,2	7,6	2,4
2010	15,6	33,8	1,7	1,1
2011*	47,7	83,5	5,3	2,8
TOTAL	131,5	189,5	14,6	6,3

Le flux de MES des épisodes ayant été prélevés représente 80% du flux total à l'amont (106/130 t) et à l'aval (150/185 t).

A l'échelle de la période janvier 2009 à mai 2011 les résultats de flux obtenus par les deux méthodes sont semblables. Pour l'année 2010, l'écart de flux entre les deux méthodes est plus important que pour 2009 et 2011 mais cela vient du faible nombre d'épisodes enregistrés sur cette période.

Les flux aval sont plus importants que les flux amont, cependant ramené à la superficie, le flux amont est nettement plus important. Une partie des flux amont est interceptée par les décanteurs, notamment les décanteurs FRN01 et FRN18.

Il est intéressant de noter que ces flux sont tout à fait comparables à ceux établis par Wotling et Bouvier (2002) suivant un protocole identique et dans un contexte directement comparable. En effet, ils avaient estimés un flux de 7t/ha/an sur bassin de 85ha sur terrain latéritique soumis à des travaux de terrassement et recevant approximativement 2000 mm de pluie par an.

Les flux aval vont entièrement dans le milieu naturel. Il n'y a plus aucun ouvrage de sédimentation à l'aval du seuil. Les photos de la Figure 56 illustrent le phénomène d'eaux rouges après un épisode pluvieux sur la mine de Poro.



Figure 56: Illustration du phénomène d'« eaux rouges »

Les photos 1 et 2 montrent le creek, après la station de mesure de Poro aval respectivement pendant un épisode pluvieux et avant un épisode pluvieux. Les photos 3 et 4 présentent la baie de Poro lors d'un évènement pluvieux.

Le Tableau 18 donne la contribution en flux des épisodes en fonction de la classe des pluies ayant engendré ces crues.

Les 10 gros épisodes pluvieux, de plus de 85 mm, représentent 60% du flux total à l'amont et 66% à l'aval sur la période de janvier 2009 à mai 2011. Ce pourcentage varie selon les années entre 53% et 71% pour l'amont et entre 55% et 70% pour l'aval.

Les 19 plus gros épisodes en cumul de pluie produisent 80% du flux total aval, sur la période d'étude. Mais les plus gros flux ne s'observent pas toujours pour les plus fortes pluies. Cependant, 80% du flux total aval, sur la période d'étude, est obtenu par les 11

épisodes ayant les flux les plus importants. Le flux d'un seul de ces 11 épisodes a été calculé avec le modèle et ce n'est pas un des plus gros contributeurs. Ceci signifie que le chiffre de 80 % est fiable puisqu'il est basé sur des mesures pour 10 sur 11 des évènements.

Ces résultats sont également directement comparables à ceux établis par Wottling (2000) qui montre que la quasi-totalité de la charge annuelle est rejetée sur une période de 30 à 40 jours et 30 à 50% du flux sur une période de 1 à 12 jours, d'où un effet de choc sur le milieu récepteur plus qu'un effet chronique.

Tableau 18: Répartition des flux en fonction des pluies et des années

Pluie	Année	AMONT			aval		
		Nombre d'épisode	Flux amont (kg)	%	Nombre d'épisode	Flux aval (kg)	%
[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	

3.6 Proposition d'amélioration des méthodes de suivi

Pour la suite du projet, des améliorations des stations de mesure seraient nécessaires à la fois au niveau de l'instrumentation en place mais aussi des conditions de travail sur le terrain :

- Des passerelles au dessus des seuils pour jauger sans gêner l'écoulement et en toute sécurité.
- Un appui technique local, qui pourrait être du CFTMC, communiquant le niveau des décanteurs au personnel de Nouméa, ce qui éviterait des déplacements inutiles sur site.
- Un abri au dessus des cabanes des préleveurs pour protéger l'ordinateur pour les relevés en temps de pluie.
- Deux autres jeux de flacons du préleveur pour éviter le transvasement des prélèvements. A chaque transvasement, il y a un risque de mauvaise homogénéisation et donc un risque de fausser les mesures de concentrations en MES et la granulométrie.

Un turbidimètre adapté aux fortes concentrations (Vi-Solid de WTW) pour obtenir la valeur de la turbidité en continu a été acquis par la DAVAR. La mise en parallèle de la mesure de la turbidité et des prélèvements permettra d'avoir des chroniques plus complètes de charge en suspension. Néanmoins, il restera nécessaire de faire des prélèvements afin d'étudier la relation turbidité concentration et sa variabilité.

Une Webcam ou vidéo au niveau des décanteurs FNR01 et FRN18 permettrait également de suivre le niveau des décanteurs pour mieux comprendre les mécanismes de remplissage et de vidanges. La mise en place du GSM au minimum sur la station amont permettrait de suivre depuis Nouméa le remplissage des flacons du préleveur.

Lors de la poursuite des analyses il faudra également réfléchir à la possibilité de réaliser un programme de prélèvement en trois parties qui permettrait de limiter les prélèvements pour

les faibles débits afin de pouvoir échantillonner l'ensemble des pics de crue. Un asservissement sur la turbidité pourrait aussi être envisagé.

Conclusion

Les compagnies minières doivent mettre en place de nouvelles techniques d'exploitation, de prospection et de sondage plus respectueuses de l'environnement qui tiennent compte des enjeux environnementaux et des contraintes réglementaires.

Malgré des améliorations récentes, le phénomène d'« eaux rouges » continue lors des épisodes pluvieux. Les acteurs administratifs de la gestion des eaux sur mine ont mis en place le projet Hydromine qui se voulait être un site pilote précurseur du programme spécifique du CNRT dont l'objet est de mieux comprendre le fonctionnement des petits bassins versants miniers lors d'un épisode pluvieux. Instrumentés, les deux petits bassins versants de Poro sont suivis depuis fin 2008. 267 épisodes pluvieux supérieurs à 5 mm ont été recensés dans un catalogue. Ils sont découpés en trois groupes :

- Les faibles : pluie entre 5 et 20 mm (199 épisodes)
- Les moyens : pluie entre 20 et 85 mm (57 épisodes)
- Les forts : pluie supérieure à 85 mm (10 épisodes)

Les 67 épisodes moyens et forts ont fait l'objet d'analyses graphiques et statistiques détaillées qui permettent de mieux identifier les facteurs influençant la réponse hydrologique des petits bassins versants miniers et de quantifier les exports de matières en suspension dans les creeks et le lagon.

Le ruissellement dépend principalement de la quantité de pluie qui est tombée, de l'intensité de cette pluie et des conditions initiales du bassin versant. Fortement pentus ces petits bassins versants sont très réactifs. La faible couverture végétale accentue ce phénomène. Les temps de concentration sont courts voire très courts (quelques minutes) dans le cas où le bassin versant est humide et les décanteurs pleins. Les débits spécifiques sont plus forts sur Poro amont qui est plus pentu et dont le sol est à nu. Les coefficients d'écoulement sont très variables d'un épisode à un autre. Sur la période d'observation, on obtient; de manière surprenante, des valeurs plus élevées (parfois proche de 1) pour des pluies moyennes que pour les fortes pluies (de l'ordre de 0,55)

Chaque ruissellement engendre un flux plus ou moins important de matières en suspension. Les plus fortes pluies engendrent les plus forts flux. Parmi les 67 épisodes moyens à forts, sur la période janvier 2009-mai 2011, les 10 plus gros épisodes contribuent à 60% du flux total à l'amont et 66% à l'aval. A l'aval, 19 épisodes (sur les 67) représentent 80% du flux de la période. Les flux amont n'arrivent pas toujours à l'exutoire. Les décanteurs et l'infiltration coupent la connectivité entre les deux bassins versants sur certains épisodes. Depuis 2009, 190 tonnes de matière en suspension sont allées dans le milieu naturel. Les décanteurs limitent faiblement ces flux car ils sont fortement sous dimensionnés. Le flux spécifique amont (14 t/ha sur la période) est supérieur aux flux aval (6 t/ha sur la période).

L'étude granulométrique révèle des MeS extrêmement fines avec un D50 de l'ordre 5 à 10 µm, ce qui explique les difficultés de piégeage avec des ouvrages de décantation.

Ces premiers résultats seront complétés et affinés dans la synthèse générale prévue à l'issue de la campagne 2011-2012. Ils devront également être confrontés aux observations et résultats des sites expérimentaux du programme CNRT « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » et il est essentiel au-delà de ces deux programmes de pérenniser l'acquisition des séries en cours sur le site-pilote de Poro.

Liste des annexes

- Annexe 1 : Etat du bassin versant
- Annexe 2 : transfert du rapport Journal
- Annexe 3 : Etapes de la filtration sous vide
- Annexe 4 : La granulométrie laser
- Annexe 5 : Base de données sédimentologiques 2011
- Annexe 6 : Evolution de la concentration au cours d'une crue
- Annexe 7 : Planches photographiques
- Annexe 8 : Extrait du catalogue PQ
- Annexe 9 : Exemples de codes de ruissellement par critère de ruissellement
- Annexe 10 : Temps de concentration calculé pour les 67 épisodes moyens et forts
- Annexe 11 : Formules de la littérature pour le temps de concentration et coefficients de la station aval (11b)
- Annexe 12 : ACP réduite, vecteurs propres et graphiques
- Annexe 13 : Débits, prélèvements et concentrations de l'épisode 125 aval
- Annexe 14 : Flux et concentrations maximales en MES par épisode
- Annexe 15 : Flux observés et reconstitués
- Annexe 16 : Comparaison des flux calculés par les deux méthodes

Bibliographie

- ALEXANDROV Y., LARONNE J.B., REID I, Suspended sediment concentration and its variation with water discharge in a dryland ephemeral channel, northern Negev, Israel. Journal of Arid Environments, 2003. p. 73-84
- ANQUETIN S., DUCROCQ V., SAULNIER G.M., RICARD D., DELRIEU G., Simulation à haute résolution des épisodes convectifs et impacts hydrologiques sur la région Cévennes Vivarais. Colloque SHF « variations climatiques et hydrologie », Paris, 2001
- BERTHAULT L. CHRISTMANN P. ROBINEAU B. Nouvelle-Calédonie, terre de nickel. Géosciences, 2011, n°14, p.50-59
- CARPENTIER L. Mesure et analyse des flux d'eau et de sédiments sur le site de Poro. Mémoire de fin d'étude pour le titre d'ingénieur géologue, 2011, 174p.
- CHILLOU A. Etude de la gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie, Mémoire de fin d'étude pour le master de la faculté de géographie et d'aménagement de Strasbourg, 2012, 100p.
- CNRT NICKEL ET SON ENVIRONNEMENT. Appels à projets 2009. CNRT Nickel et son environnement, 2009, 18 p.
- CROIX DU SUD. Le pays minier [en ligne] [consulté le 12/05/2012] Croix du sud < <http://croixdusud.info/economie/mines.php> >
- ENNOUR S., Guide pratique : techniques et ouvrages hydrauliques. SLN, 2005. 24p.
- GALLART F., SOLER F., Suspended sediment yield and hysteretic loops in two small basins (Vallcebre, Eastern Pyrenees). UNESCO Technical documents in Hydrology, 2005
- GAUME E., Elément d'analyse sur les crues éclairis. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 2006, Paris, 376p.
- GRAFF B., Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels. Thèse de docteur de l'université de Montpellier II sciences et techniques du Languedoc, 2004, Montpellier, 373p.
- GUYONNEAU A. Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie. Mémoire de fin d'étude pour le master de la faculté de géographie et d'aménagement de Strasbourg et le diplôme d'ingénieur de l'ENGEES, 2012, 86p.
- HINGRAY B., PICOUET C., MUSY A. Hydrologie, 2 Une science pour l'ingénieur. Edition presses polytechniques et universitaires romandes, 2009. 600p. ISBN : 978-2-88074-798-5
- KONIAMBO NICKEL S.A.. Glossaire GDE 2009. KNS, 2009. Chapitre 2, Les retenues d'eau.
- L'HUILLIER L., JAFFRE T., WULFF A. Mines et Environnement en Nouvelle-Calédonie : les milieux sur substrats ultramafiques et leur restauration. IAC, 2010. 412p. ISBN : 978-2-9523950-8-3
- LE MONITEUR. Construction et risques torrentiel ; Le Moniteur, 2012, n°5652, p.8-10
- LE SERVICE PUBLIC DE LA DIFFUSION DU DROIT. Accord sur la Nouvelle-Calédonie signé à Nouméa le 5 mai 1998. [en ligne] Le service public de la diffusion du droit [consulté le 25/05/2012] < <http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000555817> >
- LE SERVICE PUBLIC DE LA DIFFUSION DU DROIT. Code minier, 2011 [en ligne] Le service public de la diffusion du droit [Consulté le 29/05/2012] < <http://www.legifrance.gouv.fr/affichCode.do?cidTexte=LEGITEXT000006071785> >

- LENZI M.A., MARCHI L., Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (north-eastern Italy). CATENA, 2000. p.262-282
- MATHYS N., MEUNIER M. Etude comparative sommaire des débits de crue des zones urbanisées et des bassins versants naturels en montagne. CEMAGREF, 1989. 15p.
- METEO FRANCE. Atlas climatique de la Nouvelle Calédonie. Météo France, 2007. 127p. ISBN : 978-2-9527921
- MINISTERE DES OUTRE- MER. L'organisation administrative. [en ligne] Ministère des outre-mer [consulté le 15/03/2012] < <http://www.outre-mer.gouv.fr/?-nouvelle-caledonie-.html> >
- MOUSSA R., Modélisation hydrologique spatialisée et système d'information géographique. La Houille Blanche, n°5, p.293-301
- PELLETIER B. Le nickel en Nouvelle-Calédonie de la prospection à la mine. DUCOS, 1990. 47p.
- PIERRE Y., River mechanics. Cambridges university Press, 2002. 435p. ISBN 521-56284-8
- ROBINEAU B. Un œil sur l'érosion. L'œil magazine, 2011, n°2, p.3
- ROBINEAU B. Vers une meilleure gestion des eaux et des sédiments sur mine. L'œil magazine, 2011, n°2, p.5
- ROCHE M.F., dictionnaire français d'hydrologie de surface. MASSON, 1986. 288p. ISBN : 2-225-80739-6
- ROMIEUX N. Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle-Calédonie. Rapport de la DAVAR, 2011, Nouvelle-Calédonie, 83p.
- VALADAS B., Géomorphologie dynamique. Armand Colin, 2009. 192p. ISBN 978-2-200-26460-7
- WOTLING G., BOUVIER Ch., Impact of urbanization on suspended sediment and organic matter fluxes from small catchments in Tahiti Hydrol. Process. 16, 1745–1756 (2002)
- WOTLING G. Caractérisation et modélisation de l'aléa hydrologique à Tahiti. Thèse de doctorat Université Montpellier II, Ed. ISTEEM; 2000, 309p+ annexes