

2013

RENDU

Mémoire d'Ingénieur ENGEES
Programme « Fonctionnement des
petits bassins versants miniers »
Année 3 : Juillet 2012- septembre
2013

AXE NICKEL & ENVIRONNEMENT
NATUREL

Auteur : Perrine FREYDIER
Pour le consortium CEMAGREF,
METEO- FRANCE (DIRNC), IRD,
UNIVERSITE DE LA REUNION, A2EP
et UNIVERSITE DE LA NOUVELLE-
CALEDONIE
juin 2013

LIVRABLE 3 (ANNEXE 3 au rapport rédigé par M. ALLENBACH)

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES – FREYDIER Perrine, 06/2013. « Analyse des transferts hydro-sédimentaires du petit bassin versant minier de Poro, Nouvelle Calédonie pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie»



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

Analyse des transferts hydro-sédimentaires du petit bassin versant minier de Poro, Nouvelle Calédonie

Pour la compréhension du fonctionnement hydrologique des petits bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie

Du 02/01/13 au 15/05/13 : Université de Nouvelle Calédonie

Du 16/05/13 au 29/06/13 : Irstea Grenoble



1 quai Koch 67000
Strasbourg



Rue Blessig, 67000
Strasbourg



PPME, campus de Nouville



Rue de la papeterie,
38402 St Martin-d'Herès



Perrine FREYDIER

Promotion Hérault



Poro, janvier 2013

Maitre de stage Irstea : Nicolle MATHYS

Maitre de stage UNC : Michel ALLENBACH

Mémoire rédigé en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg et pour l'obtention du diplôme du master Ingénierie et Sciences de l'Environnement de l'Université de Strasbourg.

Présenté et soutenu devant le jury composé de :

- M. Sylvain WEILL
- M. Jean Marc STRAUSS
- M. Damien LEMARCHAND

Juin 2013

Remerciements

Mes remerciements se portent tout d'abord vers Nicolle Mathys mon maitre de stage IRSTEA. D'abord parce qu'elle m'a permis d'effectuer ce stage, en me conférant une grande autonomie vis-à-vis des périodes de terrain, mais aussi par le suivi de mon travail et la lecture de mon rapport. Ses qualités d'expertise en hydrologie, son expérience, son dynamisme m'ont permis d'effectuer un travail intéressant.

Je tiens à remercier Michel Allenbach, mon maitre de stage de l'université de Nouvelle Calédonie, grâce à qui j'ai pu effectuer mon stage dans d'excellentes conditions et qui m'a permis de découvrir la Nouvelle Calédonie. Je le remercie aussi d'assister à ma soutenance à Strasbourg.

Je remercie la Davar pour l'aide qu'elle m'a fournie. Merci à Goeffroy Wotling qui a répondu à mes questions et qui m'a guidé dans certaines analyses. Merci à Nordan Bernast, qui m'a formé au travail de terrain.

Je voudrais remercier aussi Dominique Cluzel avec qui j'ai pu aller sur le terrain. Je le remercie également pour les sorties en mer, qui m'ont fait découvrir la beauté sous-marine du lagon calédonien.

Je remercie le CFTMC, plus particulièrement l'ensemble du personnel de terrain. Merci à Marie-France pour son aide.

Je tiens à remercier aussi l'ensemble du personnel Irstea de Grenoble, et de l'université de Nouvelle Calédonie pour leur accueil et leur aide lors de ce stage. Merci à Thierry Hoibian pour ses conseils et à Monika Le Mestre pour son aide précieuse au laboratoire.

Je remercie également mon collègue stagiaire de l'ENGEES, Alexandre Motto mais aussi Aurélie, Stéphanie, Jérémy, Nicolas et Pierre Nico.

RESUME :

Analyse des transferts hydro-sédimentaires du bassin versant minier de Poro, Nouvelle Calédonie

Les techniques d'exploitation minière à ciel ouvert en Nouvelle Calédonie mettent à nu de vastes surfaces. L'érosion sur les terrains dénudés est forte, et les sédiments se retrouvent transportés en suspension vers les rivières et le lagon. Le projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » mené par le groupement d'intérêt public le CNRT « Nickel et son environnement » a pour objectif de comprendre le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie, et de quantifier les transferts sédimentaires dans le but de leur réduction. Un bassin versant instrumenté, et suivi depuis 2009 sur la mine de Poro fait l'objet de l'étude « Hydromine » dont je suis la stagiaire pour le volet 2013. Les méthodologies mises en œuvres sur le site pilote de Poro seront applicables sur les autres sites miniers.

Le bassin versant de Poro a un temps de concentration court, une pente moyenne forte, et un taux de couvert végétal faible. La gestion des eaux de ruissellement est faite au moyen d'ouvrages de détournement tels que des cassis ou fossés, et au moyen d'ouvrages de rétention tels que des décanteurs et bassins de sédimentation. L'activité minière sur le bassin versant est permanente (zones de stockage, roulage). L'ensemble des données recueillies et analysées ont permis de quantifier le transport solide par suspension, et de discuter ses incertitudes. L'épisode du 24 décembre 2011 d'une lame d'eau précipitée de 500 mm a été analysé à part. Lors de forts épisodes pluvieux, les ouvrages de détournements des eaux ne jouent pas complètement leurs rôles, complexifiant l'hydrologie du bassin versant. Un modèle pluie-débit a été testé à Poro avec le logiciel HEC HMS. La difficulté à la mise en place d'un tel model est due à la particularité des évènements et à la complexité du bassin versant aval. L'amélioration d'un tel modèle permettra de modéliser la production de matière en suspension.

ABSTRACT :

Hydro-sedimentary transferts analysis of Poro watershed, New Caledonia

In New Caledonia, the weather is tropical, and rainfall events are intense. Watershed in mining area in New Calédonia are facing an erosion problem. The aim of the CNRT's project « small mining watershed » is to understand the hydrological functioning of these watersheds in order to reduce suspended sediment yield.

The purpose of this study is to analyse hydrology and to quantify sediment discharge in a small instrumented mining watershed, Poro.

Poro watershed has a steep slope, a short time of concentration. Furthermore it is almost completely bare, increasing his capacity to erode itself.

The sediment yield has been quantified, thanks to all the collected and analysed data since 2009. A detail of uncertainty in the quantification of the solid material fluxes is developed. The exceptional event of 2011, December 24th shows that it is likely that, when an important rainfall event happens, the real drained area is smaller than the theoretical drained area. A rainfall-runoff modeling has been attempted and need to be improved to predict sediment discharge.

SOMMAIRE

Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Sigles et abréviations	8
1. Introduction	9
2. Le contexte du projet hydromine	11
2.1 Présentation de la Nouvelle Calédonie	11
2.1.1 Généralité	11
2.1.2 Climat	11
2.1.3 Géologie	12
2.1.1 Ressources minières en nickel	14
2.1.2 Environnement	14
2.1.3 Conclusion : l'apport de l'étude	14
2.2 Le projet Hydromine	15
2.2.1 Le projet	15
2.2.2 Les acteurs du projet Hydromine	15
2.2.3 Le rôle des stagiaires	15
2.3 Matériel et méthode	16
2.3.1 Présentation des bassins versants	16
2.3.2 Critique des données et prétraitement	24
2.3.3 Paramètres hydrologiques calculés	26
3. Résultats sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Poro	28
3.1 Résultats sur les coefficients de ruissellement de tous les épisodes	28
3.2 Episodes les plus forts en lame d'eau précipitée	30
3.2.1 Choix des épisodes les plus forts	30
3.2.2 Temps de concentration des épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée	30
3.2.3 Coefficient d'écoulement des épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée	32
3.3 Episodes les plus forts en transport de matières en suspension	34
3.4 Episode exceptionnel : crue du 24 décembre 2011	35
3.4.1 Description de l'évènement	35
3.4.2 Record à Houaïlou	35
3.4.3 Situation à Poro	35
3.4.4 Analyse du comportement du bassin versant de Poro pendant la crue	36
4. Les flux de sédiments sur le bassin versant de Poro : résultats et discussion sur les incertitudes	38
4.1 Introduction	38
4.2 Méthode d'interpolation des concentrations pour déterminer les flux de sédiments à Poro	39
4.3 Résultat généraux sur les flux de MES	40
4.3.1 Evolution de la charge en suspension transportée en fonction du débit	40

4.3.2	Evolution de la concentration en fonction du débit : phénomène d'hystérésis	41
4.4	Résultat : synthèse des calculs de flux à Poro	42
4.5	Discussion : calcul d'incertitude sur les Flux de matières en suspension	44
4.5.1	Introduction	44
4.5.2	Les incertitudes relatives à la précision des manipulations pour l'analyse des concentrations	44
4.5.3	Les incertitudes relatives à la mesure des débits	46
4.5.4	Les erreurs liées à la représentativité spatiale de l'échantillon	49
4.5.5	Les erreurs liées à la variation temporelle des concentrations et des débits	49
4.5.6	Les erreurs liées à la stratégie d'échantillonnage	51
4.5.7	Erreurs liées aux méthodes d'interpolation	53
4.6	Conclusions et recommandations	54
5.	Modélisation Pluie-Débit du bassin versant de Poro par le logiciel HEC-HMS	56
5.1	Introduction	56
5.2	Description du modèle HEC HMS	56
5.2.1	Choix de la fonction de production : la méthode du SCS - CN	56
5.2.2	Choix de la fonction de transfert	57
5.3	Calages	57
5.3.1	Méthode	57
5.3.2	Choix des épisodes	57
5.4	Episodes de validation	57
5.5	Modélisation du bassin versant de Poro	58
5.6	Résultats du calage et de la validation	58
5.7	Conclusion	60
6.	Conclusion générale	61
	Bibliographie	63
	Tables des annexes	67
	Annexes	68

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : carte de la Nouvelle Calédonie.....	11
Figure 2 : situation géographique de la Nouvelle Calédonie	11
Figure 3 : carte géologique de la Nouvelle Calédonie, d'après Dominique CLUZEL	13
Figure 4 : profil d'altération à Poro, 02/04/2013	13
Figure 5 : profil d'altération de la péridotite en Nouvelle Calédonie, d'après Robineau-CNRT Nickel.	13
Figure 6 : mine de Thiébaghi, © Merion	14
Figure 7 : bassin versant de Poro sur fond de l'orthophoto représentant une partie du massif minier et le village de Poro. Limite de bassin versant d'après MOTTO, 2013.....	16
Figure 8 : bassin versant de Poro, représentation des directions des écoulements	17
Figure 9 : occupation du sol du bassin versant de Poro, sur fond de carte de l'orthophoto.....	18
Figure 10 : pluviométrie à Poro en mm, par année, par saison et par pluviomètre.....	19
Figure 11 : variation mensuelle des précipitations sur le pluviomètre de Poro amont.....	19
Figure 12 : pluviomètre et totaliseur de Poro aval, 17/02/2013	20
Figure 13 : photographies des sections de contrôles de Poro amont à gauche et Poro aval à droite..	21
Figure 14 : SVR.....	23
Figure 15 : récupération du fichier journal de l'Isco	24
Figure 16 : coefficient de ruissellement amont en fonction de la lame d'eau précipitée amont.....	28
Figure 17 : lame d'eau ruisselée à l'amont en fonction de la lame d'eau précipitée à l'amont	28
Figure 18 : lame d'eau ruisselée à l'amont en fonction de la lame d'eau précipitée à l'amont	29
Figure 19 : lame d'eau ruisselée à l'aval en fonction de la lame d'eau précipitée à l'aval.....	29
Figure 20 : hydrogramme et hyetogramme de l'épisode 320 à Poro amont.....	31
Figure 21 : coefficient de ruissellement amont en fonction de la lame d'eau précipitée amont pour les 15 épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée	33
Figure 22 : coefficient de ruissellement aval en fonction de la lame d'eau précipitée aval pour les 15 épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée	33
Figure 23 : dépression tropicale Fina entre les cotes australiennes et la Nouvelle Calédonie au 25/12/2011 à 01h00 UTC (midi heure calédonienne), d'après Météo-France.....	35
Figure 24 : bassin versant de Poro (rouge) sur fond de carte de l'orthophoto.	36
Figure 25 : dysfonctionnement des ouvrages de gestion des eaux sur le bassin versant de Poro lors de la crue du 24 décembre 2011, 25/01/2013.....	37
Figure 26 : schéma présentant la méthode suivie pour le calcul du flux de sédiments	39
Figure 27 : exemple de l'interpolation des concentrations pour l'estimation du flux sur l'épisode 320 à l'aval.	40
Figure 28 : concentration de chaque prélèvement sur les années 2009 2012 en fonction du débit liquide associé, à Poro aval	41
Figure 29 : concentration de chaque prélèvement sur les années 2009 2012 en fonction du débit liquide associé, à Poro amont	41
Figure 30 : hauteur d'eau en fonction du temps et pas de temps des mesures de hauteur d'eau.....	50
Figure 31 : Hydrogramme de l'épisode 303 à Poro amont avec les points de prélèvements automatiques de l'Isco.	50
Figure 32 : présentation de plusieurs stratégies d'échantillonnages à Poro.	52
Figure 33 : graphique représentant le débit et la concentration de l'épisode 315 à l'amont en fonction du temps.	53
Figure 34 : représentation du bassin versant de Poro avec HEC MMS.....	58
Figure 35 : résultats de modélisation de l'épisode 230 par HEC HMS à l'exutoire aval.....	59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : caractéristiques des bassins versant de Poro, d’après GUYONNEAU, 2012	16
Tableau 2 : occupation du sol des bassins versants de Poro	18
Tableau 3 : distance séparant deux à deux les pluviomètres et les sections de contrôle de Poro.....	20
Tableau 4 : nombre de débordements aux sections de contrôle amont et aval entre le 01 janvier 2009 et le 02 janvier 2013.....	21
Tableau 5 : paramètres pour l'application de la loi de Gumbel à Poro, d'après ROMIEUX, 2011	26
Tableau 6 : top 15 des épisodes pluvieux les plus forts,	30
Tableau 7 : temps de concentration calculés par la méthode présentée au 3.2.2.3 et présenté au 3.2.2.4 pour Poro amont.....	32
Tableau 8 : temps de concentrations des bassins versants de Poro.....	32
Tableau 9 : Bilan annuel des apports solides de Poro aval et contribution des crues, de janvier 2009 à décembre 2012	34
Tableau 10 : caractéristiques pluviométriques de l’épisode du 24 décembre 2011 à Poro	35
Tableau 11 : caractéristiques hydrologiques de l’épisode du 24 décembre 2011 à Poro	36
Tableau 12 : liste non exhaustive des relations d’hystérésis dans les relations concentration en MES – débits, et leurs interprétations	42
Tableau 13 : bilan annuel du flux solide à Poro amont.....	43
Tableau 14 : bilan annuel du flux solide à Poro aval.....	43
Tableau 15 : erreur sur les concentrations en fonction du panel de concentration en considérant l’imprécision de la seringue lors du prélèvement et l’utilisation de flacons Isco mal nettoyés avant le prélèvement automatique	45
Tableau 16 : erreur faite sur le débit en fonction de la gamme de débit uniquement en tenant compte de l’imprécision de la mesure de niveau d’eau à Poro amont	46
Tableau 17 : erreur appliquée au débit pour tester leur sensibilité sur le calcul du flux solide.....	48
Tableau 18 : concentration d’échantillons prélevés à Poro à différents endroits de la section mouillée	49
Tableau 19 : erreur sur le résultat du flux de matière en suspension des épisodes interpolés de l’année 2012 en fonction des erreurs (1, 2, 3, 4, 5, ou 6). La numérotation des erreurs est en référence au paragraphe 4.5.1.....	54
Tableau 20 : présentation des épisodes de calage.....	57
Tableau 21 : présentation des épisodes de validation.....	58
Tableau 22 : paramètres appliqués aux bassins versants de la modélisation HEC HMS	58
Tableau 23 : performances du calage et validation des épisodes dits secs	59
Tableau 24 : performances du calage et validation des épisodes dits humides.....	59
Tableau 25 : performances du calage et validation des épisodes dits très humides.....	60

SIGLES ET ABREVIATIONS

AM : amont

AV : aval

C : Concentration

Cdg : centre de gravité

CE : Coefficient d'écoulement

CFTMC : Centre de Formation aux
Techniques de la Mine et des Carrières

Cmax : Concentration maximale

CNRT : Centre National de la Recherche
Technologique

DAVAR : Direction des Affaires
Vétérinaires, Alimentaires et Rurales

Dc : durée de crue

DIMENC : Direction de l'Industrie, des
Mines et de l'Energie de Nouvelle-
Calédonie

ETNA : Erosion Torrentielle, Neige et
Avalanches

Exp : Exponentielle

Htot n : fraction intense des précipitations
supérieures au seuil n mm/h

I : Pente

Imax : Intensité maximale

Imaxn : Intensité maximale sur n minutes

IRD : Institut de Recherche pour le
Développement

IRSTEA : Institut national de Recherche
en Sciences et Technologie pour
l'Environnement et l'Agriculture

Lr : Lame d'eau ruisselée

MES : Matière En Suspension

P : Prélèvement

Pn : Quantité de pluie tombée pendant le temps
n précédent le début de l'épisode

PPME : Pôle pluridisciplinaire de la
Matière et de l'Environnement

PQ : Pluie débit

Q : Débit

Qmax : Débit maximal

S : Surface

SLN : Société Le Nickel

SVR : Surface Velocity Radar

T : Période de retour

Tc : Temps de concentration

Ts : Temps sec depuis le dernier épisode
ruisselant

ts : Temps sec depuis le dernier épisode pluvieux

UNC : Université de Nouvelle-Calédonie

Unesco : Organisation des Nations Unies pour
l'éducation, la science et la culture

1. Introduction

En Nouvelle Calédonie, environ 15% du territoire est occupé par des mines de nickel à ciel ouvert, exploitant les couches de péridotite altérée, à savoir la saprolite et la latérite. L'exploitation à ciel ouvert entraîne la mise à nu de grandes surfaces. Situés dans des massifs montagneux, les bassins versants miniers ont des pentes importantes. De plus la Nouvelle Calédonie est aussi un pays tropical humide, aux précipitations intenses. Après chaque épisode pluvieux la mer et les rivières en aval des massifs miniers se colorent de rouge, c'est le phénomène « d'eaux rouges » expliqué par l'érosion des terrains et le transport en suspension des sédiments latéritiques. ROOSE et LELONG [1976], montrent que sur sols ferrallitiques c'est l'agressivité de la pluie qui explique les phénomènes d'érosion et que parmi les facteurs pouvant la modifier, le couvert végétal a le rôle le plus important. Lorsque le sol est totalement nu, les pertes en terres peuvent être multipliées jusqu'à 1000 et le ruissellement jusqu' à 50. Ensuite la pente est le second facteur, l'érosion de la pluie augmente lorsque la pente augmente. En effet lorsque la pente augmente c'est le ruissellement qui devient lui-même plus abrasif que la pluie (WOODRUFF, 1948), ces résultats étant confirmés par de nombreux auteurs plus récemment (BRYAN, 1979 ; POESEN, 1984 ; KINNEL 1990 ; HUANG, 1995). Enfin l'état hydrique du sol est aussi un facteur important dans le potentiel d'érosion. En effet le coefficient de ruissellement (rapport entre le volume d'eau précipité et le volume ruisselé) de bassins versants laissés à l'état humide avant un épisode pluvieux est plus important que ceux dont l'état était sec (LEBISSONNAIS, 2000).

La quantification des flux sédimentaires dans le but de leur maîtrise est un enjeu important de l'hydrologie sur terrain minier en Nouvelle Calédonie tant du point de vue environnemental, qu'économique et social. En effet, la présence de sédiments fins dans le lagon met potentiellement en danger la biodiversité des sites calédoniens. Les sédiments s'accumulent dans les embouchures des rivières, augmentent la turbidité de l'eau du lagon et limitent l'ensoleillement des fonds dans lesquelles vivent des coraux et une biodiversité d'espèce marine parmi les plus diversifiées du monde. Si la biodiversité venait à diminuer, ce serait le tourisme qui serait fortement touché et par conséquent une partie de l'économie du territoire. De plus ce serait une mise à mal de la reconversion économique possible du territoire. Enfin, des populations locales en aval des sites miniers utilisent l'eau pour l'alimentation en eau potable mais aussi pour la pêche. La pollution de cette ressource est alors génératrice de conflits.

La réflexion sur la maîtrise du transport sédimentaire sur bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie s'inscrit dans le cadre du projet « fonctionnement des petits bassins versants miniers » mené par le groupement d'intérêt public « CNRT Nickel et son environnement ». Ce Groupement a pour objectifs la mise en commun et la gestion de moyens pour réaliser des programmes de recherche ou de développement technologique compatible avec l'exploitation durable des ressources minières de la Nouvelle-Calédonie.

Dans ce cadre s'inscrit le projet Hydromine visant à quantifier les flux de sédiments sur les bassins versants de la mine de Poro en Nouvelle Calédonie. Poro joue le rôle de site pilote en Nouvelle Calédonie puisqu'il est instrumenté, entretenu et suivi depuis 2009. C'est un petit bassin versant de 30,4 ha, de pente moyenne forte (30%), et en grande partie dénudé (20% de couvert végétal). En décembre 2011 le site de Poro a connu un épisode pluvieux provoquant 500 mm de pluie en 24 et en janvier 2013, il est tombé plus de 400 mm en 24h. Les épisodes intenses comme ceux-ci, ou les épisodes moins forts mais plus fréquents provoquent le transport par suspension vers l'aval de sédiments.

La présente étude effectuée au sein d'Irstea Grenoble et du Pôle Pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement (PPME) de l'université de Nouvelle Calédonie fait partie du projet Hydromine. L'étude a pour objet d'améliorer la compréhension hydrologique des bassins versants de Poro et la quantification des flux sédimentaires transportés vers l'aval.

Après avoir précisé le contexte dans lequel s'inscrit l'étude, une présentation des bassins versants étudiés, de la méthode d'acquisition des données, et des paramètres hydrologiques en jeu introduisent la description du travail réalisé. La valorisation et l'alimentation de la base de données permet l'étude du fonctionnement hydrologique des bassins versants de Poro. Ensuite l'étude du transport de matières en suspension sera présentée ainsi que la quantification des flux de matières en suspension. Notons que l'étude s'attache à quantifier le transport des matériaux uniquement par suspension. Ensuite le calcul d'incertitudes sur les flux solides à partir des sources pouvant amener des erreurs sur leur quantification permet de comprendre quelles sont les étapes importantes dans l'acquisition des données et celles qui doivent être améliorées. Enfin la présentation d'un modèle pluie-débit applicable aux bassins versant de Poro, et les résultats de simulations seront présentés.

2. Le contexte du projet hydromine

2.1 Présentation de la Nouvelle Calédonie

2.1.1 Généralité

La Nouvelle Calédonie est un ensemble d'îles de l'Océan Pacifique situé à environ 1500 km à l'Est de la côte australienne, entre les 18^e et 23^e parallèles juste au Sud du tropique du Capricorne, dans la mer de corail. Elle est constituée de la grande terre avec les îles Belep au Nord et l'île des Pins au Sud, et des îles Loyauté à l'Est. D'une superficie de 16 000 km² la grande terre est environ 30 fois plus petite que la France métropolitaine. La figure 1 présente une carte de l'archipel calédonien. La grande terre est peuplée de 250 000 habitants, dont 70% vivent à Nouméa et les communes limitrophes. La grande terre est traversée dans la longueur par une chaîne de montagne appelée la Chaîne centrale, dont le sommet situé au niveau de Hienghène culmine à 1618m. L'annexe 1 présente la topographie de la Nouvelle Calédonie. La Nouvelle Calédonie possède depuis 2003 le statut de Pays d'outre-mer (POM) qui lui confère une certaine autonomie.



Figure 1 : carte de la Nouvelle Calédonie

2.1.2 Climat

2.1.2.1 Zone de convergence Intertropicale (ZCIT)

La ZCIT matérialise l'équateur météorologique. Elle correspond à la zone de convergence des alizés des deux hémisphères. L'air y est humide et instable, ce qui favorise le développement des cumulonimbus : c'est une zone de fortes pluies souvent orageuses. De mi-novembre à mi-avril des perturbations créées par les ondulations de la ZCIT peuvent évoluer sous forme de dépressions. Elles se forment toujours entre 5° et 15° Sud dans 3 régions particulières (au Sud de la Papouasie Nouvelle Guinée, au Sud des îles Salomon, au Nord de Fidji) et peut donc venir intéresser notre région d'étude qu'est la Nouvelle Calédonie, comme nous pouvons le voir sur la figure 2.



Figure 2 : situation géographique de la Nouvelle Calédonie

2.1.2.2 Phénomène ENSO

Le climat en Nouvelle Calédonie est fortement dépendant du phénomène ENSO (El Nino Southern Oscillation). Il désigne les variations climatiques australes appelées « Oscillation Australe » et dont l'origine est le mouvement des eaux chaudes dans la bande équatoriale du Pacifique Ouest. Les phases chaudes sont appelées El Nino et les phases neutres ou froides sont appelées La Nina. Une phase La Nina se traduit par un renforcement des précipitations dans l'ouest de la bande équatoriale. Durant cette phase et durant l'été austral, la Nouvelle Calédonie est située dans la zone de précipitations plus fortes que la normale.

2.1.2.3 Saisons

Le découpage des saisons se fait en deux parties : la saison chaude ou cyclonique de novembre à avril et la saison fraîche de mai à octobre. Durant la saison chaude les périodes de pluie sont souvent dues à des bandes orageuses s'entourant autour des dépressions tropicales (de la dépression tropicale faible au cyclone). En fin de saison chaude la circulation de latitudes tempérées engendre des pluies orageuses. Enfin, l'air chaud et souvent humide peut déclencher des averses sur la Chaîne. Durant la saison fraîche, quelques épisodes isolés mais souvent intenses touchent l'ensemble du pays.

2.1.2.4 Précipitations

La côte Est au vent est beaucoup plus arrosée que la côte Ouest qui est sous le vent. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées sur la côte Est sont de 1750 mm à 4000 mm. Les principaux massifs montagneux enregistrent plus de 4000 mm de précipitation par an. Les précipitations moyennes annuelles enregistrées sur la côte Ouest sont comprises entre 800 mm et 1200mm (CAUDMONT et al, 2007) .

Les phénomènes cycloniques ou de dépressions peuvent entraîner des précipitations très fortes. En décembre 2011, une bande nuageuse due à une dépression tropicale a provoqué des précipitations record à Houaïlou (cf figure 1 pour situer Houaïlou) d'environ 500 mm en 24 h. Cependant la répartition géographique des précipitations peut être très variable d'une région à l'autre au niveau des moyennes annuelles comme nous pouvons le voir en annexe 2, mais aussi des épisodes. L'épisode du 24 décembre 2011 n'a pas donné de précipitations sur la partie Nord, Nord-Est de l'île.

2.1.3 Géologie

La nouvelle Calédonie est issue d'un morceau de plaque australienne détaché du super continent le Gondwana au crétacé (85 millions d'années) qui a subi plusieurs plissements. Le dernier plissement qui s'est produit entre 65 et 26 millions d'années a créé l'île actuelle. Ce plissement est marqué par l'obduction (passage d'éléments d'une plaque au-dessus d'une autre) de la plaque pacifique sur la plaque australienne (PICARD, 1999). Un vaste feuillet du manteau constitué de roches ultrabasiqes de la plaque pacifique a été poussé par-dessus la plaque australienne. Ces roches ultrabasiqes sont constituées de péridotites et péridotites serpentinisées (serpentinite). Elles contiennent principalement du silicate de magnésium et du fer c'est pourquoi elles sont aussi appelées roches ultramafiques. Elles contiennent aussi du nickel, du cobalt et du chrome. Sur la figure nous pouvons constater l'étendue de la couche de roche ultrabasiqes (unité des péridotites en vert) en Nouvelle Calédonie.

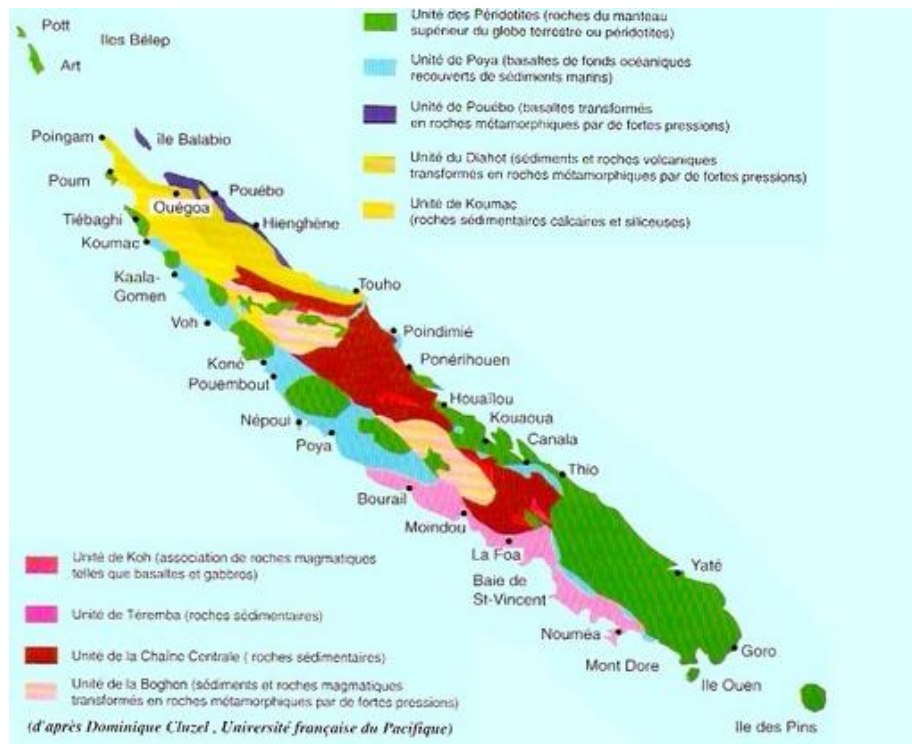


Figure 3 : carte géologique de la Nouvelle Calédonie, d'après Dominique CLUZEL, Université de Nouvelle Calédonie

Marquées par l'érosion du climat tropical humide, ces péridotites se transforment en roches d'altération (altérites) aux couleurs orangées. Au premier stade de l'altération elles se transforment en saprolites (appelées garniérites en Nouvelle Calédonie en hommage à l'ingénieur Jules Garnier qui les a découvertes en 1864). Le nickel se concentre dans la partie altérée de la saprolite. Puis soumise à l'altération et au climat tropical humide, la roche mère s'altère en latérite. Le processus d'altération due aux phénomènes climatiques engendre une disparition des éléments légers du sol, notamment le calcium et magnésium. Il reste alors dans le sol les éléments lourds comme le nickel qui se concentre dans le terrain. Sur le profil d'altération à Poro (voir les figures 4 et 5), le phénomène est bien visible.



Figure 4 : profil d'altération à Poro, 02/04/2013

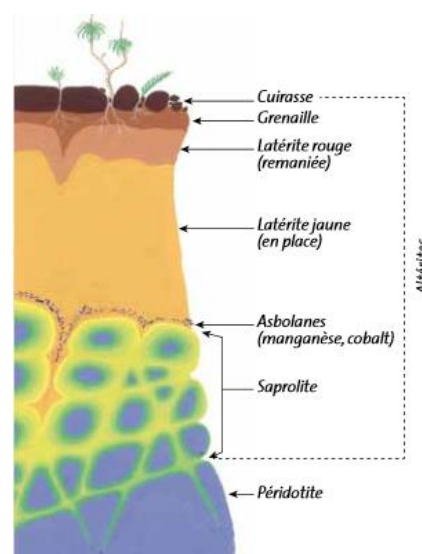


Figure 5 : profil d'altération de la péridotite en Nouvelle Calédonie, d'après Robineau-CNRT Nickel

2.1.1 Ressources minières en nickel

2.1.1.1 La ressource

La Nouvelle-Calédonie possède environ 25 % des ressources mondiales de nickel, et détient 9 % des réserves planétaires recensées par l'USGS, elle est le troisième producteur mondial de nickel derrière le Canada et la Russie. En Nouvelle-Calédonie le Nickel est présent dans les minerais oxydés, qui s'exploitent par le biais de mines à ciel ouvert. Le nickel se trouve dans les latérites avec des teneurs faibles (en moyenne 1,5%) mais les étendues de latérites sont suffisamment importantes pour qu'elles soient exploitées, et même considérées comme l'avenir de l'industrie du nickel (PITOISET, 2008). Le nickel se trouve aussi dans les roches appelées garniérites sous la forme de filon vert. La garniérite est issue de la décomposition de la péridotite et possède des teneurs de Nickel entre 2,5 et 3%. A Poro, la saprolite et la latérite sont exploitées.

Le domaine minier de l'ensemble de la Grande Terre et des îles Belep, comprend environ 250 000 hectares de concessions éparpillées (ROBINEAU, 2011) soit 15 % de la superficie de la Grande Terre.

2.1.1.2 L'exploitation du Nickel

L'exploitation du nickel a commencé en 1873, l'extraction était entièrement manuelle. De nos jours et depuis les années 1920 l'exploitation du Nickel se fait entièrement par l'exploitation de mines à ciel ouvert. Les stériles (matériaux ne contenant pas assez de nickel pour être exploités) sont mis en verse. Une verse doit être stabilisée afin de limiter l'érosion. La figure 6 donne un exemple de verse stabilisée. L'exploitation du nickel entraîne la dénudation de grandes surfaces et une activité intense sur celles-ci (roulage d'engins, remodelage permanent du réseau routier, stockage et déstockage de matériaux).



Figure 6 : mine de Thiébaghi, © Merion

2.1.2 Environnement

Le récif calédonien représente la seconde plus grande barrière de corail après l'Australie. Dans le lagon calédonien se trouve une diversité exceptionnelle d'espèces de coraux et de poissons, ainsi qu'un continuum d'habitats allant des mangroves aux herbiers et caractérisé par des structures récifales parmi les plus diversifiées de la planète (cf annexe 3). Il offre un habitat pour plusieurs espèces marines emblématiques ou en danger, comme les tortues, les baleines, les requins ou les dugongs. C'est pourquoi en 2008, 1,57 millions d'hectares du lagon calédonien ont été inscrits au patrimoine mondial de l'Unesco.

2.1.3 Conclusion : l'apport de l'étude

L'activité minière implique une mise à nu de vastes surfaces. Le transport de sédiments dû à l'érosion sur terrain minier impacte le milieu en aval, par l'engorgement des rivières et l'augmentation de la turbidité du lagon. Pour maîtriser l'érosion il faut envisager une bonne gestion des eaux de ruissellement et un dimensionnement approprié des bassins de sédimentation. Et pour avoir une bonne gestion des eaux de ruissellement il faut aussi avoir une bonne connaissance du fonctionnement hydrologique des bassins versants miniers. Voilà pourquoi l'enjeu du projet Hydromine est l'analyse hydrologique des bassins versants miniers, et la quantification de la production de matières en suspension.

2.2 Le projet Hydromine

2.2.1 Le projet

Le projet Hydromine s'inscrit dans le cadre plus général du projet « fonctionnement des petit bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie » du CNRT.

Le projet Hydromine vise à expliquer le fonctionnement hydrologique des bassins versants miniers de Poro et de quantifier les flux sédimentaires, dans le but d'améliorer la compréhension du transfert hydro sédimentaires des bassins versant miniers de Nouvelle Calédonie. L'objectif est de quantifier les flux de sédiments de façon à les minimiser pour réduire l'impact de ces transferts en aval. A terme, l'objectif est l'applicabilité des méthodes de travail sur Poro aux autres bassins versants de Nouvelle-Calédonie.

2.2.2 Les acteurs du projet Hydromine

Ce projet associe les partenaires suivants :

- Le CNRT : Centre National de Recherche Technologique. Le CNRT finance le projet hydromine pour le volet 2013.
- La Davar : Direction des Affaires Vétérinaires Alimentaires et Rurales, partenaire du projet Hydromine en sa qualité d'expert hydrologue.
- La DIMENC : Direction de l'Industrie, des Mines et de l'Energie de la Nouvelle-Calédonie.
- Le PPME : Pôle pluridisciplinaire de la Matière et de l'Environnement, laboratoire de l'université de nouvelle Calédonie (UNC) apporte sa contribution pluridisciplinaire scientifique.
- Irstea : Institut National de Recherche en Sciences et Technologies sur l'Environnement et l'Agriculture. Intervient dans le projet pour l'interprétation des données et l'encadrement des stages.
- Le CFTMC : Centre technique de Formation à la Mine et aux Carrières. Le CFTMC exploite le nickel de la mine de Poro, tout en étant un centre de formation aux métiers de la mine. Il permet aux acteurs de terrain du projet Hydromine des bonnes conditions d'accès sur mine jusqu'aux stations de mesures, fournit les données nécessaires et facilite le travail de terrain en s'assurant du logement et de la nourriture.
- L'Université de la réunion pour son expertise en hydrogéologie.

Le CNRT, la Davar, la DIMENC, l'UNC et Irstea font partie du comité de pilotage scientifique du projet CNRT, tandis que les autres acteurs en sont des partenaires, mais pour le projet Hydromine, Irstea est considérée comme sous-traitant de l'Université de Nouvelle- Calédonie.

2.2.3 Le rôle des stagiaires

Je suis la stagiaire Hydromine pour le volet 2013. Je dois surveiller la météo et me rendre à Poro (environ 3h30 de route de Nouméa) lorsqu'il pleut. Je suis accompagnée sur le terrain d'un stagiaire CNRT, Alexandre Motto. L'idéal est d'arriver avant la pluie afin de vérifier le bon fonctionnement des appareils. Pendant la pluie nous pouvons effectuer des manipulations tels que des jaugeages et des prélèvements manuels d'eau chargée en matière en suspension, mais aussi observer les écoulements afin de vérifier les limites réelles du bassin versant en tenant compte des aménagements de piste et des débordements en crue, en repérant des connectivités ou des détournements des eaux. Les données obtenues doivent être analysées afin d'estimer les paramètres caractéristiques des épisodes observés, d'analyser les couples averse-crue, de quantifier les flux de sédiments à l'échelle

de l'épisode et de la saison 2013. Ces éléments sont ensuite utilisés pour réaliser une synthèse et une analyse détaillée de la période 2009-2013. Depuis 2009, 8 stagiaires CNRT-Hydromine se sont succédés.

2.3 Matériel et méthode

2.3.1 Présentation des bassins versants

2.3.1.1 Caractéristiques

2.3.1.1.1 Généralité

Les bassins versants du projet Hydromine sont situés sur le site minier de Poro, sur la côte Est de la Nouvelle Calédonie à environ 10 km au sud de Houaïlou. La figure 7 représente les bassins versants de Poro. Le bassin versant aval est défini par son exutoire qui est la station de mesure aval, et qui draine toute les eaux de la zone représentée en rouge sur la figure . Le bassin versant amont, emboîté dans le bassin versant aval, est défini par son exutoire qui est la station de mesure amont et qui draine toute les eaux de la zone représentée en jaune. L'altitude du bassin versant aval varie entre 366 et 197 mètres. L'eau parcourt une distance d'environ 1200 mètres de l'exutoire du bassin versant aval jusqu'au lagon.



Figure 7 : bassin versant de Poro sur fond de l'orthophoto représentant une partie du massif minier et le village de Poro. Limite de bassin versant d'après MOTTO, 2013

Le tableau 1 présente les caractéristiques des deux bassins versant de Poro.

	Poro amont	Poro aval
Surface (ha)	9	30,4
Périmètre (m)	1518	6341
Longueur (m)	612	3072
Largeur (m)	147	99
Altitude maximale	366	
Altitude minimale	295	197
Altitude moyenne	321	286
Pente maximale (%)	147	166
Pente moyenne (%)	32	36
Longueur du plus grand creek permanent (m)		597
Distance de l'exutoire au centre de gravité		492
Surface végétalisée (%)	0	20

Tableau 1 : caractéristiques des bassins versant de Poro, d'après GUYONNEAU, 2012

Les bassins versant sont considérés comme petits au vu de leurs surfaces. Cette classification faisant référence à une surface comprise entre 0.001 km² et 10 km² (GAUME E, 2006).

La pente du bassin versant est forte, or de nombreux auteurs confirment que l'augmentation de la pente entraîne une augmentation de l'érosion (BRYAN, 1979 ; POESEN, 1984 ; KINNEL, 1990 ; HUANG, 1995). WOODRUFF [1948] montre que sur une pente supérieure à 15% l'énergie du ruissellement et sa capacité à éroder dépasse celle de la pluie. En effet pour des versants de pentes faibles à moyennes, c'est l'énergie des gouttes de pluie qui déclenche le processus de destruction des agrégats du sol tandis que le ruissellement n'assure que le transport. Cependant lorsque la pente augmente le ruissellement devient lui-même abrasif.

Une étude de ROOSE et al [1976] menée sur plusieurs bassins versant cultivés sur sols ferrallitiques et ferrugineux d'Afrique équatoriale montre que l'érosion est due à l'agressivité des pluies tropicales plutôt qu'à la composition du sol, et que parmi les facteurs pouvant influencer l'agressivité climatique le couvert végétal a de loin le rôle principal, puis vient la pente et enfin le type de sol. Le faible taux de couvert végétal des bassins versants de Poro et la forte intensité des pluies observées indique donc un potentiel érodible important.

2.3.1.1.2 Hydrologie

Les eaux de ruissellement du bassin versant amont atteignent à l'exutoire la station amont. Le bassin versant amont est considéré comme sec car l'écoulement vers l'exutoire n'est pas permanent, mais uniquement lié aux épisodes pluvieux. Le ruissellement est l'unique générateur de débit à la station de mesure amont.

La station de mesure aval draine le réseau hydrographique permanent du bassin versant provenant des sources naturelles du massif, mais aussi les eaux de ruissellement de tout le bassin versant. Le débit de base du réseau hydrographique est faible (quelques litres par seconde), et est parfois temporairement nul.



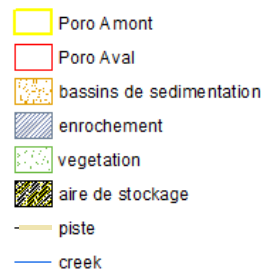
Figure 8 : bassin versant de Poro, représentation des directions des écoulements : à gauche la direction des écoulements sur fond de carte de l'orthophoto centrée sur Poro amont à droite sur Poro aval.

En fonctionnement normal du bassin versant, toutes les eaux du bassin versant amont, sont dirigées vers le décanteur FRND1 d'une capacité de 5000 m³ (voir figure 8 à gauche). Puis la vidange de ce décanteur est détournée vers le réseau hydrographique naturel. Enfin le talweg passe dans une buse sous la piste principale (voir figure 8 à droite). La buse est dimensionnée pour un débit maximum de 10 m³/s. Un cassis appelé cassis aval détourne les eaux provenant du versant rive gauche du talweg

vers l'exutoire aval. Le fonctionnement normal du bassin versant représente le fonctionnement lorsque tous les ouvrages de gestion des eaux (buses, cassis, fossés) remplissent leurs rôles. Il est nécessaire que le réseau de drainage soit apte à drainer sans débordement de façon à maîtriser les superficies drainées.

2.3.1.1.3 Occupation du sol

La végétation recouvre 20 % de la surface du bassin versant aval. Elle est de type maquis minier : il s'agit de formations arbustives plus ou moins buissonnantes ou ligno-herbacées. La croissance des espèces est lente. On recense 944 espèces reconnues dans le maquis minier, 93% d'entre elles sont endémiques (MORAT et al, 1986). La figure 9 et le tableau 2 présentent l'occupation du sol de Poro.



	Amont	Aval
végétation	0 %	20 %
Pistes	14 %	14 %
Remblais	1 %	7 %
Aire stockage latérite/saprolite	15 %	6 %
Zones dénudées péridotite/latérite/saprolite	66 %	13 %

Figure 9 : occupation du sol du bassin versant de Poro, sur fond de carte de l'orthophoto

Tableau 2 : occupation du sol des bassins versants de Poro

2.3.1.1.4 Données sur la pluviométrie

L'année hydrologique N est prise du 1^{er} décembre de l'année N-1 au 31 novembre de l'année N de façon à inclure une saison des pluies et une saison sèche par année.

La figure 10 représente le cumul des pluies enregistrées au pluviomètre amont et aval pour les années hydrologiques complètes de 2009 à 2012.

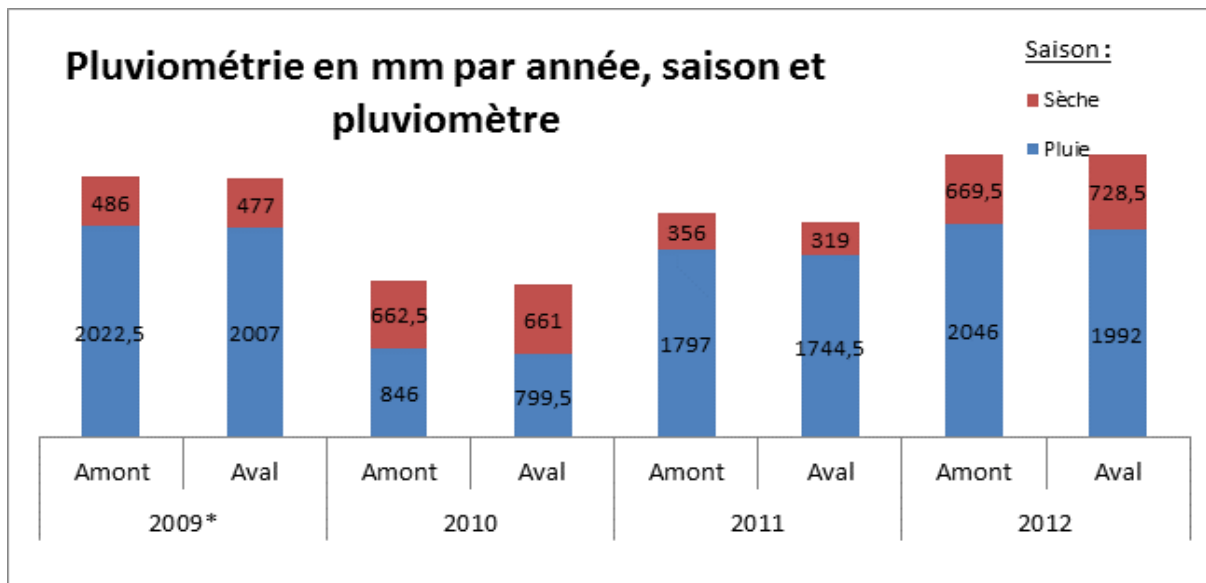


Figure 10 : pluviométrie à Poro en mm, par année, par saison et par pluviomètre. * : pas de données sur décembre 2008

Les deux pluviomètres donnent une pluviométrie similaire. L'année 2010 a été particulièrement sèche avec très peu d'épisodes pluvieux.

Quelques gros épisodes pluvieux modifient fortement la pluviométrie du mois et nous pouvons donc voir sur la figure 11 de fortes disparités entre les mois pour une même année, mais aussi entre années au cours des mêmes mois.

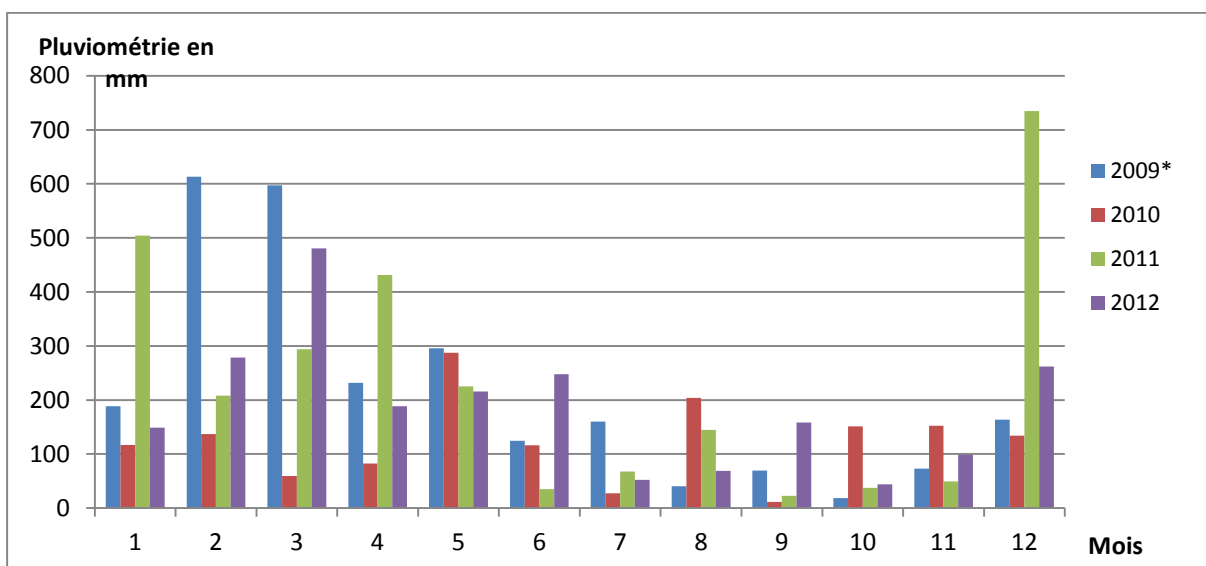


Figure 11 : variation mensuelle des précipitations sur le pluviomètre de Poro amont. * : pas de données sur décembre 2008

2.3.1.2 Instrumentation et recueil des données

2.3.1.2.1 Pluviométrie

Le bassin versant de Poro est équipé de 2 pluviomètres enregistreurs à augets basculants. Le pluviomètre amont est situé à 847 mètres de la station de mesure amont. Le pluviomètre aval est situé à 86 mètres de la station de mesure aval. Le tableau 3 présente les distances séparant les stations de mesures.

Distance (m)	pluviomètre amont	pluviomètre aval	section amont	section aval
Pluviomètre amont		1559	847	1486
Pluviomètre aval			721	86
Section amont				646
Altitude (mNGF)	455	199	296	199

Tableau 3 : distance séparant deux à deux les pluviomètres et les sections de contrôle de Poro

Chaque basculement du pluviomètre représente une lame d'eau précipitée de 0,5 mm. A côté de chaque pluviomètre est installé un totalisateur (cf figure 12). C'est un tube cylindrique qui récupère l'eau de pluie par une surface d'ouverture strictement égale à celle du pluviomètre avec une pellicule d'huile à la surface afin de limiter l'évaporation. Il est possible d'interroger à distance les pluviomètres avec le logiciel Alpluie. La Davar se charge de l'entretien du matériel et de la validation des données recueillies. Une fois par mois les opérateurs de la Davar passent contrôler les pluviomètres, téléchargent les données et vérifient que le cumul donné par le pluviomètre est égal au cumul récupéré par le totalisateur. Ils vident les totalisateurs si nécessaire, en faisant attention à ce qu'il reste toujours une pellicule d'huile à la surface.



Figure 12 : pluviomètre et totalisateur de Poro aval, 17/02/2013

2.3.1.2.2 Sections de contrôle

A Poro les exutoires du bassin versant amont et aval sont aménagés de façon à optimiser les mesures qui y sont faites (cf figure 13). Les deux sections de contrôle ont été dimensionnées de façon à observer une lame d'eau minimale de 50 cm en régime fluvial pour la crue biennale et pouvoir encaisser sans débordement la crue décennale (FRYSOU, 2007). Ainsi les deux sections de contrôle sont des canaux bétonnés, l'entrée de l'écoulement dans la section de contrôle est dirigée par un rétrécissement du canal et la forme de la section en travers est trapézoïdale. Le canal aval est long de 8,5 m, avec une largeur au fond 1,5 m et une largeur en haut de 6 m. Le canal amont est long de 5,5 m, avec une largeur au fond 0,5 m et une largeur en haut de 2 m. La section de contrôle amont permet de comprendre le fonctionnement hydrologique au cœur d'une zone complètement dénudée et travaillée en permanence par les engins, tandis que la section de contrôle aval permet d'estimer la production de MES sortante du bassin versant. Les deux sections de contrôle sont aussi en série afin de doubler les jeux de données pour un même évènement pluvieux et d'avoir toujours un jeu de données en cas de dysfonctionnement des installations de l'une des sections.



Figure 13 : photographies des sections de contrôles de Poro amont à gauche et Poro aval à droite

Une courbe de tarage traduisant la relation hauteur débit a été établie grâce au logiciel de modélisation HEC RAS pour chaque section de contrôle (FRYSOU , 2007).

Cependant les sections de contrôles ont été construites avec des défauts, le seuil amont est surélevé et se retrouve sous dimensionné. Le seuil aval a été construit avec une margelle d'environ 7 cm qui n'était pas prévue et qui modifie les lois de l'écoulement (cf figure 13 en bas à droite).

Le tableau 4 présente le nombre d'épisodes ayant généré des écoulements qui ont débordé de la section de mesure. On remarque qu'à l'aval les écoulements ne débordent pas, sauf pour l'épisode exceptionnel du 24 décembre 2012. En revanche à l'amont les écoulements débordent de la section de contrôle en moyenne 3 fois par an.

	Débit de débordement (m3/s)	Nombre de débordements	P moy (mm) des épisodes	P max (mm) des épisodes	P min (mm) des épisodes
Amont	0,97	12	165	510	42
Aval	3,9	1	476	/	/

Tableau 4 : nombre de débordements aux sections de contrôle amont et aval entre le 01 janvier 2009 et le 02 janvier 2013

Chaque section de contrôle est équipée d'un Isco 6710, d'une batterie, d'un panneau solaire, d'une échelle limnométrique à lecture directe et de deux sondes de niveau d'eau. L'Isco et la batterie sont protégés par une guérite fermée.

L'Isco est un appareil programmable doté d'une pompe et d'un tuyau d'aspiration, d'un jeu de 24 bouteilles, et d'un bras articulé qui se positionne en face de la bouteille suivante à chaque prélèvement. La crépine est positionnée dans la zone de l'écoulement. L'annexe 4 présente un Isco.

Les deux sondes de niveau d'eau sont des capteurs de pression.

Une sonde de niveau d'eau est dite « In Situ », les données sont enregistrées sur une mémoire interne et téléchargeable sur le terrain par une connexion directe à la sonde. L'autre sonde de niveau d'eau est reliée à l'Isco (module 720), les données sont téléchargeables lors de la connexion d'un ordinateur à l'Isco. La section de contrôle aval a été équipée d'un turbidimètre en avril 2013 (voir annexe 5) et d'une centrale Campbell pour l'acquisition des données du turbidimètre. Elle a aussi été momentanément équipée d'un capteur à effet doppler situé dans l'écoulement afin de compléter la courbe de tarage.

Au fond du canal, du côté de la guérite une tranchée perpendiculaire à l'écoulement permet le support des sondes de mesure de niveau d'eau. Cette tranchée a tendance à s'obstruer de fines après les crues et il faut la nettoyer régulièrement (cf figure &3 en bas à gauche).

2.3.1.2.3 Débitmétrie

La transformation de la hauteur d'eau mesurée par la sonde en débit est faite par l'intermédiaire de la courbe de tarage propre à chaque section. Le débit n'est donc pas mesuré directement mais par l'intermédiaire de la mesure du niveau d'eau. La courbe de tarage théorique calculée par la modélisation du réseau hydraulique de Poro par le logiciel HEC RAS doit être affinée par des mesures manuelles appelées jaugeages. A partir de la courbe de tarage obtenue, les hauteurs d'eau mesurées peuvent être converties en débit.

2.3.1.2.4 Jaugeages

2.3.1.2.4.1 Méthode d'exploration du champ de vitesse

A Poro les jaugeages sont effectués par méthode d'exploration du champ de vitesse par un moulinet. Cette méthode consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section transversale à l'écoulement tout en mesurant la surface de la section mouillée. Le débit est calculé par combinaison de la connaissance de la géométrie et de la vitesse sur la section. Comme la vitesse n'est pas uniforme dans la section transversale, il faut explorer le champ de vitesse en un certain nombre d'endroits situés sur des verticales, réparties le long de la largeur. L'emplacement de la section ne doit pas être sous l'influence d'obstacle amont ou aval. A Poro le seuil bétonné permet des jaugeages dans de bonnes conditions. Il convient de choisir l'hélice du moulinet en fonction de la vitesse à mesurer (les limites sont indiquées par le constructeur puisque les hélices ont été étalonnées en laboratoire). Le moulinet doit être bien entretenu, notamment en remplaçant l'huile utilisée par de l'huile neuve régulièrement après l'utilisation. L'hélice n'est pas accrochée au moulinet et elle peut facilement s'en aller avec l'écoulement si le moulinet est positionné vers l'aval.

Théoriquement les verticales doivent être suffisantes pour minimiser l'incertitude, et les deux verticales extrêmes doivent être suffisamment proches du bord pour pouvoir mesurer les vitesses près des deux rives (FORRAY, 1998).

A Poro la variation de hauteur d'eau lors d'une crue est trop rapide pour pouvoir permettre à l'opérateur d'avoir le temps de suivre ce protocole.

La verticale mesurée est prise au milieu de la largeur. Le premier jaugeage est fait à la surface libre. Au début du jaugeage et à la fin du jaugeage la hauteur d'eau dans la section est notée. Si elle n'a pas

changé alors le deuxième jaugeage est effectué toujours sur la même verticale mais au milieu de celle-ci. Si elle a changé alors l'opérateur refait un nouveau jaugeage.

2.3.1.2.4.2 Méthode de mesure de la vitesse de surface par velocimètre radar à effet Doppler (SVR)

Un signal est envoyé par le radar à une fréquence connue, et selon la vitesse du fluide en écoulement, l'onde renvoyée aura une fréquence donnée, elle est analysée par l'appareil et transformée en vitesse. L'appareil (figure 14) effectue 1 mesure par seconde pendant 10 secondes, affiche les 10 valeurs et calcule et affiche la moyenne. Il est nécessaire de noter les 10 valeurs afin d'étudier la variabilité de la mesure (coup de vent par exemple) et de valider les données. Ses résultats sont valables dans la gamme de vitesse de 30 cm/s à 9m/s. Afin de l'utiliser il faut préciser à l'appareil avant de faire la mesure quelle est l'angle fait dans le plan vertical entre la direction du signal envoyé et la surface libre, et quel est l'angle fait dans le plan horizontal entre la direction du signal et la direction de l'écoulement. Ensuite le passage de la vitesse de surface en vitesse moyenne dans la verticale se fait par multiplication avec un coefficient compris entre 0,84 et 0,9. Une étude (ESTEVE, 2013) sur la mesure des débits d'une crue de l'Arc (Bassin versant de la Durance) par jaugeage au moulinet et en utilisant le SVR montre que le SVR est fiable sur les mesures de vitesses de surfaces, et que l'estimation du débit est bonne avec une erreur de 9%. De plus le SVR est pratique d'utilisation et relativement rapide. Les opérateurs en charge du jaugeage au moulinet ont pu faire 2 jaugeages pendant que l'opérateur en charge du pistolet SVR a pu en faire 11. Les conditions de l'expérience sont l'utilisation d'un tripode pour caler le pistolet à un angle de 45° avec la surface libre et une mesure vers l'amont avec un angle entre le pistolet et le sens de l'écoulement de 0°. Ce qui signifie que l'opérateur est sur un pont au-dessus de l'écoulement. A Poro aval il n'a pas de passerelle sur les sections de contrôle et il paraît trop dangereux de se mettre dans l'écoulement pour pouvoir être face à l'écoulement lors des fortes crues. Il faut donc faire la visée depuis la berge et augmenter l'erreur sur la mesure. Tenir le pistolet à la main au lieu de le caler avec un pied engendrera aussi des incertitudes en plus.



Figure 14 : SVR

Finalement le pistolet SVR permet une facilité de mise en place non négligeable. En revanche cette technique ne permet pas de mesurer la géométrie de la section. Elle est donc exclusivement réservée aux sections de géométrie connues, comme les sections de contrôle construites.

2.3.1.2.5 *Prélèvements et récupération du fichier journal de l'Isco*

Les prélèvements d'eaux chargées en matières en suspension sont effectués automatiquement par un système Isco asservi sur la hauteur d'eau (voir la programmation en annexe 6). Le seuil de déclenchement de l'Isco est faible mais ainsi il permet d'échantillonner le début de l'écoulement qui a souvent des fortes concentrations à cause de l'effet de chasse d'eau que l'on observe bien souvent à Poro amont (first flush). Sur les 24 flacons disponibles, 18 sont asservis sur des hauteurs d'eau moyennes et 6 sur des fortes hauteurs d'eau de façon à avoir des flacons disponibles lorsque que le pic de crue se présente. Une telle programmation d'Isco a des inconvénients, lorsque le niveau d'eau batille autour d'une valeur seuil, alors plusieurs prélèvements sont effectués et remplissent les flacons Isco, au risque de ne pas pouvoir échantillonner les pics suivants. Lorsque l'opérateur Hydromine est sur place pendant la crue, il doit aussi prélever des échantillons à la main. Sur chaque échantillon manuel il doit être renseigné le lieu de prélèvement, la date, l'heure, la hauteur d'eau, la position du prélèvement (surface, fond...). C'est à partir de ces prélèvements que le calcul du flux total de matières en suspension pendant l'averse est réalisé.

Après chaque crue il faut récupérer le fichier journal de l'Isco ainsi que les données de mesure de hauteur d'eau.



Figure 15 : récupération du fichier journal de l'Isco

Pour cela il faut connecter l'ordinateur à l'Isco (cf figure 15) et utiliser l'interface du logiciel Flowlink pour télécharger le rapport journal. Une fois le rapport journal téléchargé, les données de hauteur d'eau à partir du dernier passage de l'opérateur sont consultables, il faut les enregistrer avant de se reconnecter à l'Isco sinon elles seront effacées. Si la programmation de l'Isco est relancée manuellement par l'opérateur, le rapport journal de l'Isco est effacé. Il faut donc télécharger le rapport journal avant de relancer la programmation.

Après avoir récupéré le fichier journal, l'Isco peut être arrêté, et ouvert afin de récupérer les flacons. Les flacons Isco sont numérotés en fonction de leur position dans le boîtier. Si l'opérateur possède 2 ou 3 jeux de flacons il peut récupérer directement le flacon de l'Isco en le numérotant au marqueur indélébile, et le remplacer par un jeu de flacon propre dont les inscriptions au marqueur des relevés précédents auront été effacées. Sinon, comme c'est le cas à Poro, les flacons de l'Isco sont transvasés dans des bouteilles en plastique propres. Dans tous les cas la numérotation des bouteilles récupérées est importante pour pouvoir reproduire l'évolution des concentrations. Elle doit suivre le modèle Lieux_Nom de l'isco_AAAAMMJJ_Numéro du flacon Isco, par exemple Poroaval_ISCO1_20130402_5. Cette numérotation a été définie en 2009 et est utilisée en permanence depuis.

Lorsqu'une crue est en cours à Poro les conditions de récupération du fichier journal sont détériorées. Il peut donc être utile de construire une guérite afin de protéger l'ordinateur et les branchements lors de la pluie. De plus, la question de la récupération des échantillons pendant une crue se pose. Si l'Isco est presque plein pendant la crue, l'opérateur peut le laisser continuer les prélèvements au risque qu'il se sature, ou récupérer les échantillons et le fichier journal, au risque d'avoir éteint l'Isco pendant le pic de crue.

2.3.2 Critique des données et prétraitement

2.3.2.1 Données pluies – débits

La Davar s'assure de la correction des données de pluie et de débit et fournit les données validées. A partir des données brutes du pluviomètre elle s'assure d'éliminer les basculements irréels, correspondant par exemple au passage d'un opérateur qui touche l'auget pour s'assurer qu'il fonctionne. La Davar sépare les événements pluvieux lorsque plus de 2h sépare 2 basculements, elle définit des débuts d'averses, à partir de l'heure du premier basculement et du temps séparant le premier basculement et le second et elle note les périodes de lacunes. A partir des données de hauteurs d'eau la Davar choisit la sonde de hauteur d'eau la plus cohérente et en déduit les débits, il y a aussi des aberrations à éliminer et des corrections sur les débits à faire.

Ensuite, à partir de ces données il faut réaliser un catalogue pluie-débit. Un extrait de ce catalogue est disponible en annexe 7. Je recense les évènements pluvieux qui ont touché le bassin versant. Or les pluies sont hétérogènes, les deux pluviomètres amont et aval ne donnent pas exactement la même chose. Il faut donc parfois regrouper plusieurs évènements espacés de plus de 2 heures à l'amont pour que les dates de début et de fin correspondent à celles de la même averse à l'aval, et vice versa. De même, il faut parfois scinder ce qui a été considéré comme un seul évènement pluvieux par la Davar en plusieurs averses.

Ensuite, pour chaque évènement pluvieux il faut déterminer si il a ruisselé ou pas, en regardant les valeurs de débit fournies par la Davar.

A l'amont le seuil est sec en temps sec, et en théorie le ruissellement est constaté dès qu'une valeur de débit est fournie. Mais en pratique il se peut que la valeur de hauteur d'eau enregistrée par la sonde ne soit due qu'au ruissellement sur le béton du seuil, et pas du bassin versant. Il faut donc être attentif, surtout pour les petits épisodes pluvieux, car la Davar transforme toutes les hauteurs d'eau mesurées en débits, sans tenir compte de l'effet du ruissellement du seuil en béton.

A l'aval le seuil est en eau, la détermination du début et de la fin du ruissellement est alors plus délicate. Le début du ruissellement est déterminée par le début de la montée de l'hydrogramme. La fin de ruissellement est déterminée à Poro par une rupture de pente, nettement plus visible en passant l'axe des débits en échelle logarithmique. L'annexe 8 en donne un exemple.

Certains épisodes restent cependant incohérents. Par exemple l'épisode 22, du 12 février 2009 a une lame d'eau précipitée à l'amont de 2,5 mm, et une lame d'eau ruisselée de 2,3 mm. Or le temps sec de cet épisode est de plusieurs jours. La pluviométrie à l'aval est de 47,5 mm. Il est probable que l'averse sur le bassin versant ait été très localisée à l'aval et sur le seuil amont, mais pas jusqu'au pluviomètre amont. Il est donc incorrect de faire des analyses avec cet épisode en considérant une pluie de 2,3 mm. Nous pourrions donc l'éliminer du catalogue, ou alors la garder mais lui attribuer un code de qualité mauvais. De même l'épisode 327 du 29/06/2012 a une lame d'eau précipitée de 12 mm et un coefficient de ruissellement de 0,7 après un temps sec de plus de 10 jours. Cela paraît incohérent qu'une pluie de 12 mm provoque une lame d'eau ruisselée de 9 mm après 10 jours de temps sec. D'autant qu'à Poro la pluie d'interception (qui ne génère pas de ruissellement) est souvent située autour de 12 mm. En regardant l'hydrogramme de cet épisode (voir annexe 9) nous nous apercevons qu'il y a sûrement eu un problème au niveau de la sonde de mesure.

D'autres épisodes sont a priori incohérents mais sont pourtant à prendre en compte. En août 2012 (épisode 330) nous observons une averse de 49,5 mm en 24 h à l'amont ne provoquant aucune réponse en débit. La durée de temps sec précédent cet épisode est de plus de 10 jours. Ce type d'épisodes met en évidence que les pertes initiales de pluie peuvent être importantes en cas de sécheresse.

2.3.2.2 Données sur les MES

Le contenu des flacons Isco est récupéré sur le terrain dans des bouteilles propres numérotées du lieu, du nom de l'Isco, du jour, et du nom du flacon de l'Isco avec lequel elles seront respectivement remplies sous le modèle Lieux_Nom_AAMMJJ_Numéro. Chaque bouteille est ensuite rapportée au laboratoire. La concentration en MES est obtenue par filtration, séchage et pesée, le protocole est disponible en annexe 10. Les concentrations en MES prélevées ponctuellement servent à reconstituer en continu les concentrations au cours de la crue par interpolation. Plus il y a eu de

prélèvements aux moments opportuns de la crue (début, montée, pic, descente) plus l'interpolation sera précise. En fonction de la qualité de l'échantillonnage de la crue nous attribuons un code qualité à l'épisode. Par exemple pour une crue très bien échantillonnée nous pouvons attribuer le code 1. Pour une crue moins bien échantillonnée mais qui donne une information intéressante sur le comportement des concentrations durant la montée, le pic ou la descente, le code 2, et enfin le code 3 pour les crues mal ou pas échantillonnées. Enfin un graphique représentant l'hydrogramme, le hyetogramme et les concentrations pourra être tracé pour chaque crue très bien échantillonnée, et répertorié dans un catalogue afin de constituer un catalogue de référence par bassin versant.

2.3.3 Paramètres hydrologiques calculés

2.3.3.1 Période de retour

La Davar a réalisé une étude portant sur la spatialisation des pluies en Nouvelle Calédonie dans le but d'établir des coefficients régionalisés de Gumbel pour déterminer les pluies de période de retour donnée. La carte de spatialisation des paramètres des Gumbel sur une durée de 24h est en annexe 11.

La fonction de distribution de la loi de Gumbel est :

$$F(x) = \exp^{-\exp\left(-\left(\frac{X_0 - P_0}{Gd}\right)\right)}$$

Avec X_0 le cumul de pluie maximum de l'évènement sur la période calculée, Gd le gradex en mm et le P_0 paramètre de position en mm

La période de retour se déduit par $T(x) = \frac{1}{1-F(x)}$

A Poro les paramètres de la loi de Gumbel qui s'appliquent sont présentés dans le tableau 5.

durée	24h	2h	1h	15 min
Gd (mm)	64,4	20,49	13,56	4,96
P ₀ (mm)	165	69	49,5	21,75

Tableau 5 : paramètres pour l'application de la loi de Gumbel à Poro, d'après ROMIEUX, 2011

2.3.3.2 Coefficient d'écoulement

Le coefficient d'écoulement est le rapport du volume effectivement ruisselé sur le volume d'eau tombé lors de l'averse. Il est compris entre 0 et 1 plus il s'approche de 1 et plus le sol est ruisselant, plus il s'approche de 0 et plus le sol facilite l'infiltration de l'eau précipitée. Il est influencé par l'état initial du sol (humide ou sec), la pente, la végétalisation. Il participe au calcul du dimensionnement des bassins de sédimentation.

2.3.3.3 Intensité

L'intensité de la pluie est la hauteur d'eau précipitée par unité de temps. Le calcul de l'intensité maximum sur différents pas de temps a été effectué à partir des horaires de basculement d'augets validés par la Davar. A partir des dates de basculement d'auget avec la hauteur d'eau précipitée correspondante, il faut mettre en forme un changement de pas de temps pour avoir la pluie au pas de temps fixe 1 minute. Puis il faut effectuer le cumul sur un pas de temps donné, n minutes. Enfin il faut déterminer le cumul maxi sur n minutes et le diviser par (n/60) heures pour avoir l'intensité maximum sur n minutes, en mm/h, notée $I_{max n}$.

2.3.3.4 Durée de temps sec

La durée de temps sec est soit la durée séparant l'épisode pluvieux étudié de la fin de la pluie précédente, elle est alors notée t_s , soit la durée séparant l'épisode pluvieux étudié la fin de la pluie précédente qui a provoqué un ruissellement, elle est alors notée par exemple T_s .

La durée de temps sec est un paramètre important puisque qu'il reflète l'état hydrique du sol avant l'évènement pluvieux. N'ayant pas trouvé de référence sur l'influence de la durée de temps secs sur sols latéritiques et ferrallitiques tropicaux, l'étude suivant présente des sols cultivés de région tempérée. LE BISSONNAIS et al [2000] ont étudié le comportement de cinq sols du Nord de la France de textures variées soumis à des pluies simulées dans trois états hydriques différents. Les résultats montrent que le coefficient de ruissellement est plus important pour les sols laissés à l'état humide que pour les sols séchés avant la pluie, qu'ils soient ou non humectés par capillarité avant la pluie. Cependant, il existe une variabilité importante du comportement des sols selon leurs caractéristiques, les 2 sols les plus argileux contrairement aux 3 sols argileux limoneux ruissent encore moins après séchage et humectation qu'après séchage sans humectation.

2.3.3.5 Volume ruisselé

A l'amont le seuil est sec en temps sec, donc le début et la fin du ruissellement correspondent au début et à la fin des enregistrements de hauteur d'eau. Il est possible aussi que de faibles variations des hauteurs d'eau mesurées correspondent au ruissellement du seuil en béton, et pas à un apport du bassin versant.

Sur les seuils en eau en permanence comme à Poro aval, BIDIN et GREER [1997] calculent le volume ruisselé en traçant une droite oblique entre le point de début de crue et le point de fin de crue. Le volume en dessous de cette droite est le débit de base. Le volume au-dessus de cette droite est le volume ruisselé qui nous intéresse.

A Poro nous considérons que le débit de base est faible et nous voulons aussi éviter de sous-estimer le coefficient de ruissellement, donc le débit de base n'est pas retiré du calcul du volume ruisselé.

Le début du ruissellement est le moment de la montée de l'hydrogramme. La fin du ruissellement correspond au moment où il y a une rupture de pente dans l'hydrogramme (visible en échelle logarithmique).

Tout le volume écoulé entre le début et la fin du ruissellement sera utilisé pour le calcul du coefficient d'écoulement en tant que volume ruisselé.

2.3.3.6 Pluie moyenne

A Poro, pour connaître la pluie sur l'ensemble du bassin versant nous faisons la moyenne arithmétique entre les deux pluviomètres. A Poro cette méthode est pertinente car il y a très peu de variations entre les deux pluviomètres. L'annexe 12 présente la pluie enregistrée à l'amont en fonction de la pluie enregistrée à l'aval, et nous pouvons constater qu'il y a peu de différence et que les épisodes pluvieux sont bien répartis autour de la 1^{ère} bissectrice.

3. Résultats sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant de Poro

3.1 Résultats sur les coefficients de ruissellement de tous les épisodes

La figure 16 présente les coefficients d'écoulement en fonction de la pluie précipitée à l'amont.

Nous constatons qu'à partir d'une pluie supérieure à 85 mm (épisode dits fort d'après NAVARROT, 2012) le coefficient de ruissellement est supérieur à 0.5, sauf pour deux épisodes qui ont des durées de temps sec supérieures à 10 jours. Tous les épisodes qui ont une durée de temps sec supérieure à 10 jours ont des coefficients de ruisselllements inférieurs à 0.4. Les épisodes les plus forts en pluviométrie n'ont pas forcément les coefficients d'écoulements les plus importants. Mais tous les coefficients d'écoulement les plus importants sont ceux d'épisodes de très faibles temps sec.

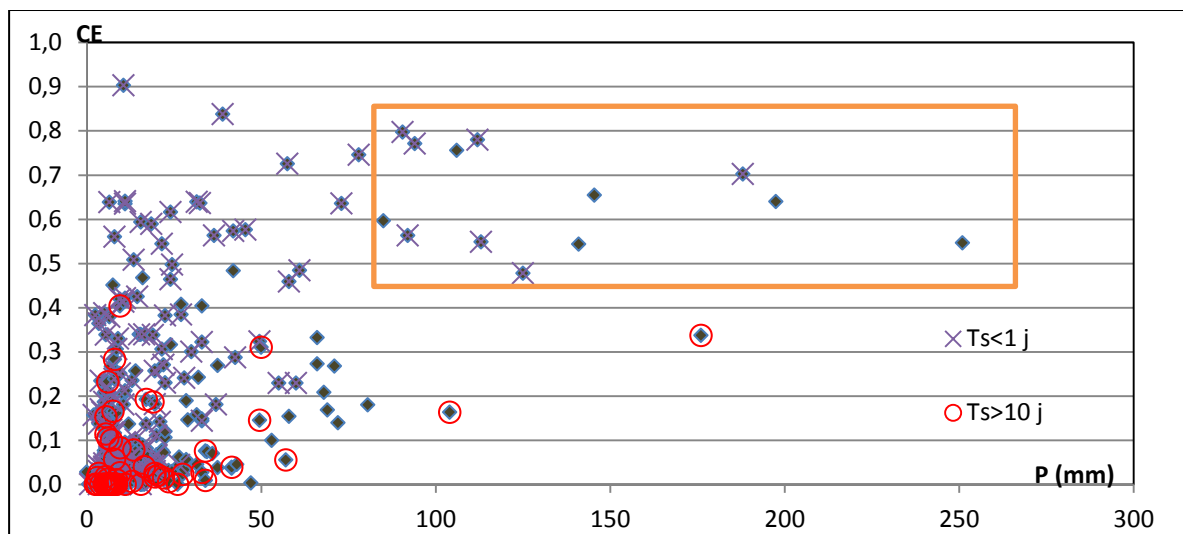


Figure 16 : coefficient de ruissellement amont en fonction de la lame d'eau précipitée amont, sans considérer l'épisode Freda du 02 janvier 2013 et l'épisode du 24 décembre 2011

Lorsqu'on exprime la lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie à l'amont (cf figure 17), on remarque que les précipitations peuvent être séparées en deux parties, car la tendance des forts épisodes ne suit pas la même pente que celle des épisodes plus faibles.

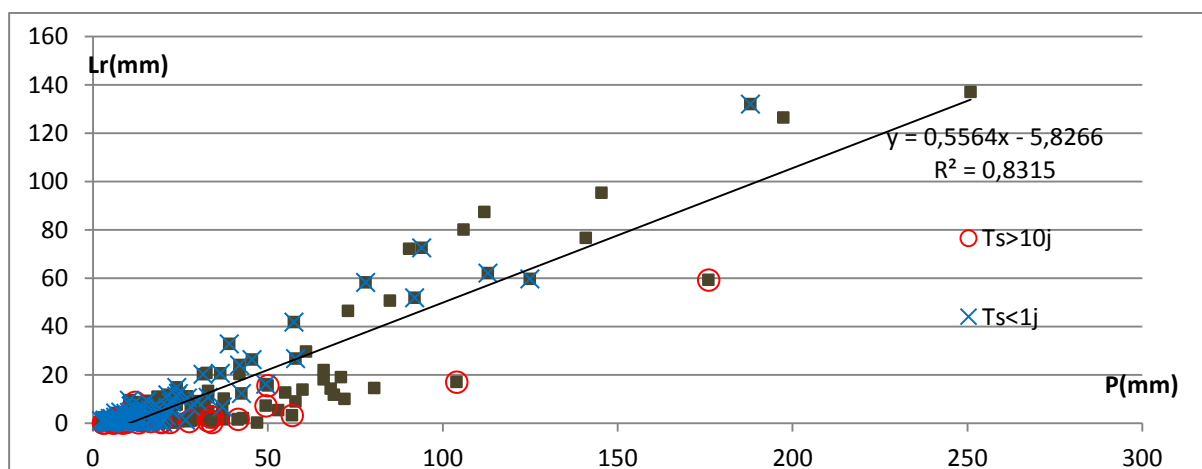


Figure 17 : lame d'eau ruisselée à l'amont en fonction de la lame d'eau précipitée à l'amont sans l'épisode du 02 janvier 2013 et l'épisode du 24 décembre 2011

D'une part, les pluies supérieures à 85mm semblent suivre une tendance différente. D'autre part les pluies précédées d'un temps sec supérieur à 10 jours ont tendance à provoquer un ruissellement

toujours au-dessous de la tendance, à l'amont comme à l'aval (cf figures 18 et 19). Dans le cas d'un temps sec inférieur à 1 jour, la lame d'eau ruisselée peut être largement supérieure à la tendance, mais jamais très inférieure.

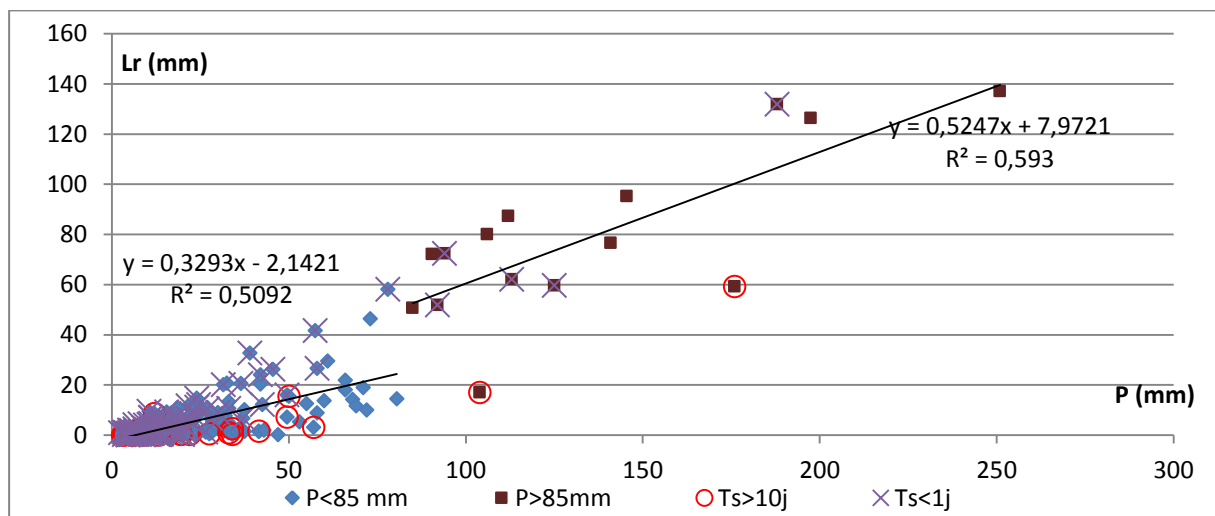


Figure 18 : lame d'eau ruisselée à l'amont en fonction de la lame d'eau précipitée à l'amont sans l'épisode du 02 janvier 2013 et l'épisode du 24 décembre 2011

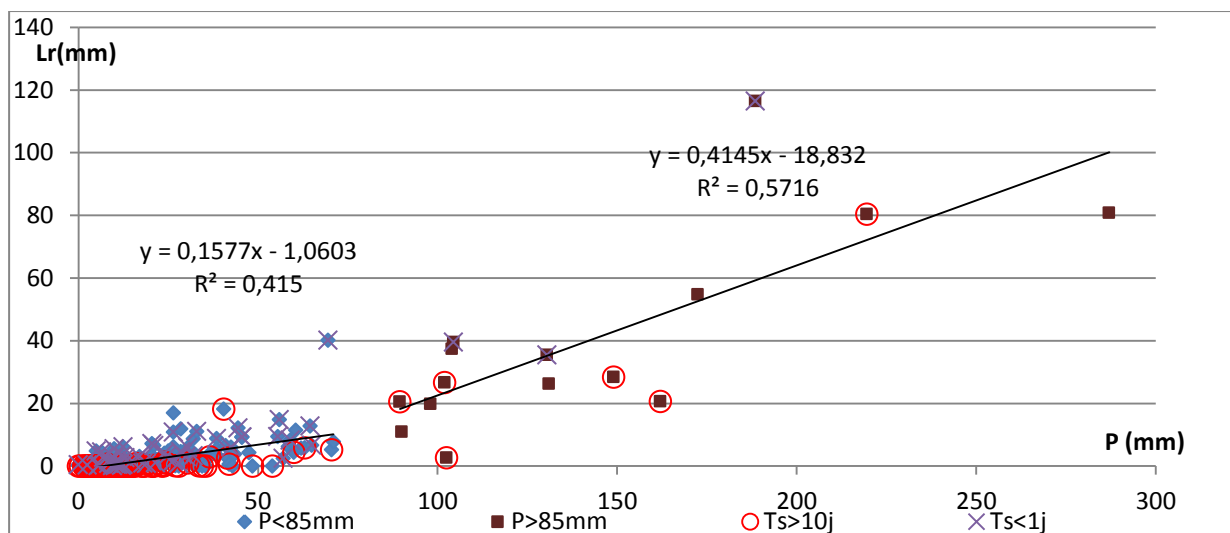


Figure 19 : lame d'eau ruisselée à l'aval en fonction de la lame d'eau précipitée à l'aval sans l'épisode du 02 janvier 2013 et l'épisode du 24 décembre 2011

L'ajout des épisodes de 2012 diminue le coefficient de corrélation par rapport aux données présentées dans le rapport concernant 2009-2011 (NAVARROT, 2012) de 0,66 à 0,59 à l'amont. L'hypothèse que l'eau en cas de crue s'échappe du bassin versant lors de forts épisodes pluvieux à cause de dysfonctionnements des ouvrages de gestion des eaux pourrait en partie expliquer ce manque de corrélation. D'autres éléments expliquent la dispersion des points comme la durée de l'épisode pluvieux, l'intensité de la pluie, la durée de temps sec. Enfin des réseaux pseudo-karstiques qui relieraient souterrainement plusieurs bassins versants et provoqueraient des phénomènes de vidange de l'eau dans les décanteurs pourraient aussi expliquer parfois les faibles coefficients de ruissellement. Une étude hydrogéologique est actuellement en projet sur le site de Poro donc aucun résultat confirmant ce phénomène hydro-géologique n'est actuellement disponible.

3.2 *Episodes les plus forts en lame d'eau précipitée*

3.2.1 *Choix des épisodes les plus forts*

Ici nous prendrons les 15 événements les plus forts en précipitation. Tous ces événements ont une lame d'eau précipitée supérieure à 95 mm et sont donc considérés comme forts. Le tableau 6 détaille les épisodes du top 15.

Nom de l'épisode	Date	Pluie moyenne (mm)	Durée moyenne (h)	Q max amont (m ³ /s)	Q max aval (m ³ /s)
15	03/02/2009	269	47	1,3 *	1,4 *
19	08/02/2009	97	14	1,1 *	2,5 *
23	17/02/2009	119	19	1,0 *	0,8
43	23/03/2009	188	45	0,8 *	1,0
66	21/05/2009	108	26	0,3	0,4
126	22/05/2010	145	21	0,7	0,8
137	13/08/2010	169	20	0,6	1,0
175	17/01/2011	112	6	1,6 *	1,9 *
223	29/04/2011	108	8	1,4 *	2,2 *
230	24/05/2011	95	15	1,1 *	1,3 *
241	21/08/2011	103	43	0,05	0,06
261	24/12/2011	493	26	3,7 *	9,2 *
320	05/05/2012	209	27	0,8 *	1,1 *
325	10/06/2012	159	25	1,4 *	3,6 *
361	01/01/2013	432	26	1,3 *	2,2 *

Tableau 6 : top 15 des épisodes pluvieux les plus forts, * fait aussi partie du top 15 des débits les plus forts

3.2.2 *Temps de concentration des épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée*

Le temps de concentration est défini comme étant le temps que met un volume élémentaire ruisselé pour parvenir à l'exutoire à partir du point le plus éloigné dans le temps du bassin versant (ROCHE, 1986).

Le temps de concentration est un paramètre important pour analyser le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant minier. Il est utilisé par les compagnies minières et les bureaux d'études de Nouvelle Calédonie pour calculer des débits de projet par la méthode rationnelle notamment.

Plus le temps de concentration est court et plus le transfert de flux chargé en matière en suspension sera rapide.

Les compagnies minières calculent le temps de concentration à partir des formules de Kirpich et de Johnstone et Cross (voir formules en annexe 13). Cependant ces formules ne sont pas adaptées aux bassins versant de Poro puisqu'elles surestiment le temps de concentration (NAVARROT, 2012). Ces formules ne sont pas adaptées ni aux bassins versant miniers de Nouvelle Calédonie ni plus généralement aux petits bassins versants à forte pente (MATHYS, 2006).

Le but de cette analyse est d'estimer graphiquement le temps de concentration pour les épisodes les plus forts en lame d'eau ruisselée. On estime que ces épisodes offriront des conditions plus nettes qui permettront de déterminer une méthode commune à appliquer à tous les épisodes. Différentes méthodes d'estimation sont proposées dans la littérature.

3.2.2.1 Durée séparant la fin de la pluie de la fin du ruissellement

Cette méthode est difficilement applicable puisque l'imprécision sur la date de fin d'écoulement mais aussi sur la date de l'arrêt des précipitations empêche une bonne estimation des temps de concentration, d'autant que les temps de concentrations à estimer sont plutôt faibles.

3.2.2.2 Durée séparant le début de la pluie nette et le début du ruissellement

Pour les mêmes raisons que précédemment cette méthode n'est pas assez précise.

3.2.2.3 Durée séparant le centre de gravité de la pluie nette, du pic de débit

Avec cette méthode, le temps de concentration moyen sur les épisodes est de 13 min à l'amont et 15 minutes à l'aval. Cependant les résultats par cette méthode peuvent parfois être très hétérogènes. Par exemple pour l'épisode 320 à l'amont (cf figure 20), si l'on se place sur le premier pic, le temps de concentration est de 10 min, tandis que sur le pic principal, il est de 2 min.

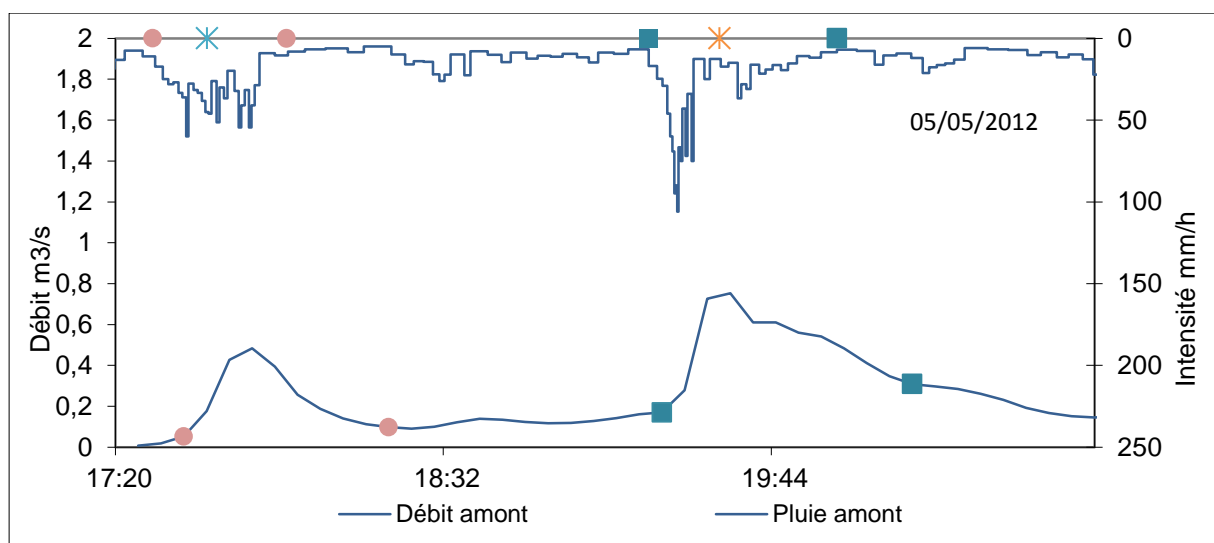


Figure 20 : hydrogramme et hyetogramme de l'épisode 320 à Poro amont

3.2.2.4 Durée séparant le centre de gravité de la pluie nette du centre de gravité de l'hydrogramme

Cette méthode consiste à calculer le temps séparant le centre de gravité du hyetogramme et le centre de gravité de l'hydrogramme.

3.2.2.5 Comparaison de la méthode 3.2.2.3 et 3.2.2.4

Sur tous les épisodes du top 15, 6 épisodes à l'amont ont été analysés plusieurs fois pour le temps de concentration.

- Pour 2 épisodes le temps de concentration a été calculé deux fois sur le même pic mais en changeant les bornes de début et de fin de pluie.
- Pour 3 épisodes le temps de concentration a été calculé sur 2 pics de crue différents. Par exemple pour l'épisode 320 de la figure 20, le temps de concentration a été calculé sur le premier et le deuxième pic, il est respectivement de 13 et 14 minutes.
- Pour 1 épisode le temps de concentration a été calculé sur deux pics différents, et pour un des pics avec des bornes différentes.

Les résultats sont présentés dans le tableau 7.

Nom	Tc 4.2.2.4	Tc 4.2.2.3
15 1er pic	18	15
15 pic principal	17	12
23 pic 1	14	18
23 pic 2	13	5
23 pic 2 changement de bornes	14	12
126 pic 1	12	15
126 pic 2	11	9
320 1er pic	14	10
320 pic principal	14	2
325 changement de borne	13	13
325 changement de bornes	15	26
361 changement de borne	18	-21
361 changement de borne	13	5
Moyenne des écarts	1	10

Tableau 7 : temps de concentration calculés par la méthode présentée au 3.2.2.3 et présenté au 3.2.2.4 pour Poro amont

Ces résultats amènent 8 calculs d'écarts. La moyenne des écarts entre les temps de concentrations calculés par la méthode 3.2.2.4 est d'un peu plus de 1 minute, tandis qu'il est de plus de 10 minutes avec la méthode 3.2.2.3. A l'aval la même analyse a été faite et les conclusions sont identiques. Donc lorsqu'un épisode présente plusieurs pics de crue, ou un seul pic pouvant être interprété de différentes façons, le temps de concentration, calculé sur les différents pics et différentes bornes varie moins avec la méthode 3.2.2.4 qu'avec la méthode 3.2.2.3.

3.2.2.6 Conclusion

La méthode la plus fiable pour calculer les temps de concentrations consiste à faire la différence entre le centre de gravité du hyétogramme et le centre de gravité de l'hydrogramme après avoir sélectionné visuellement la partie du hyétogramme et de l'hydrogramme correspondantes au pic. Avec cette méthode, le temps de concentration est de 17 minutes à l'amont et de 23 minutes à l'aval.

Les résultats sont présentés dans le tableau 8.

	Tc amont (min)	Tc aval (min)
moyenne	17	23
écart type	5	12
1er quartile	13	16
3eme quartile	19	26

Tableau 8 : temps de concentrations des bassins versants de Poro

3.2.3 Coefficient d'écoulement des épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée

A Poro les coefficients d'écoulement du bassin versant amont des 15 épisodes les plus forts en précipitation sont compris entre 0,14 et 0,99 comme le montre la figure 21. Pour deux épisodes le coefficient d'écoulement est inférieur à 0,4. Ces deux épisodes ont une durée de temps sec précédant l'épisode importante. Ce sont les deux seuls épisodes du top 15 qui ont une durée de temps sec supérieure à 10 jours. Les épisodes qui ont une pluviométrie égale à ces deux épisodes

mais une durée de temps sec inférieure à 1 jour ont des coefficients d'écoulement plus importants, supérieurs à 0,5.

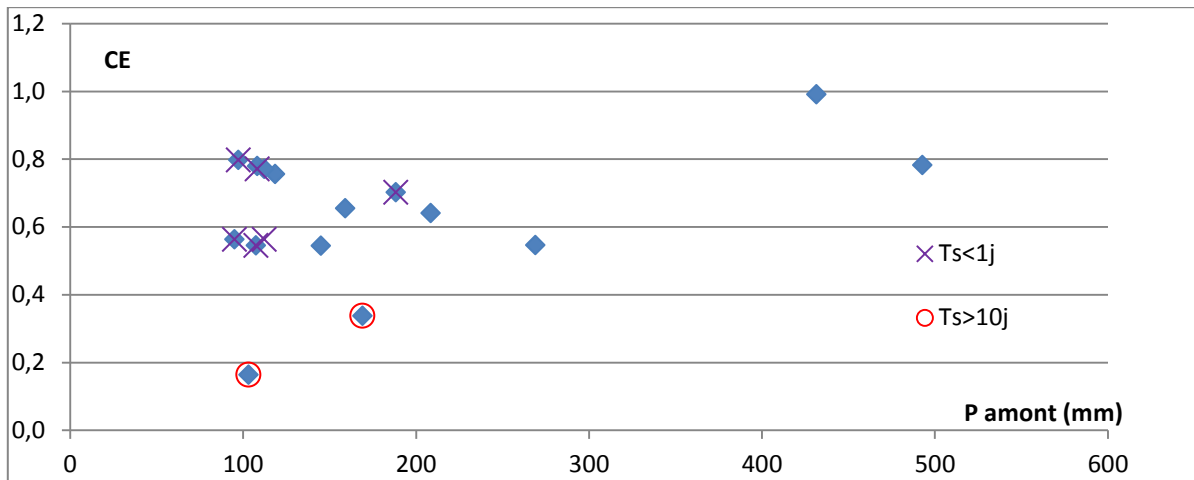


Figure 21 : coefficient de ruissellement amont en fonction de la lame d'eau précipitée amont pour les 15 épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée

Sur le bassin versant de Poro aval les coefficients d'écoulement sont compris entre 0 et 0,6 (cf figure 22). De même qu'à l'amont, les deux mêmes épisodes ont aussi un faible coefficient d'écoulement (inférieur à 0,2). Les deux épisodes qui ont des coefficients de ruissellement inférieurs à 0,2, sont les mêmes qui à l'amont ont des coefficients d'écoulement inférieurs à 0,4. Ils ont par rapport au bassin versant aval une durée de temps sec supérieure à 68 jours.

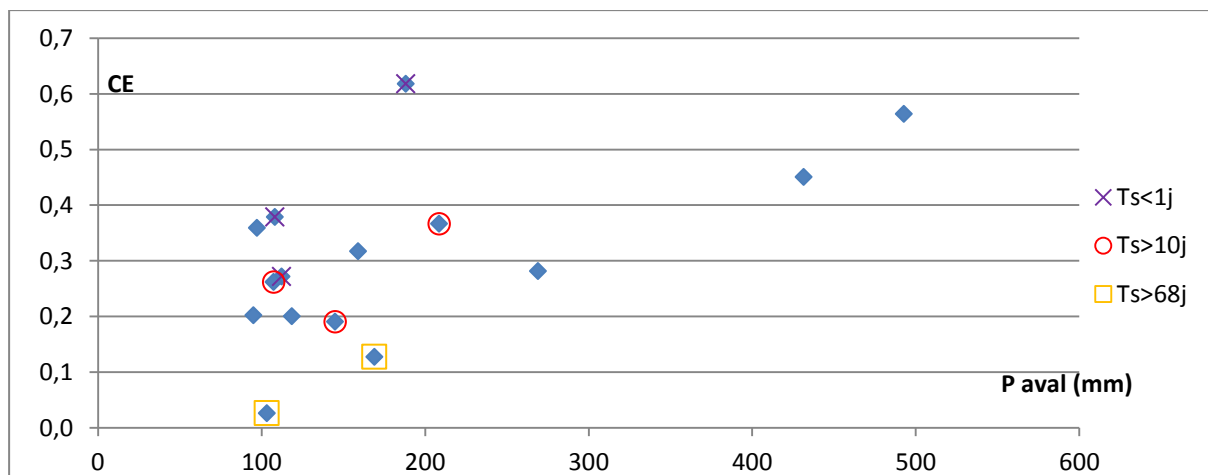


Figure 22 : coefficient de ruissellement aval en fonction de la lame d'eau précipitée aval pour les 15 épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée

Globalement les coefficients d'écoulement en considérant le bassin versant aval sont plus faibles. A priori cela paraît logique car d'une part le bassin versant aval est plus végétalisé que le bassin versant amont. Ensuite le décanteur qui est situé à l'amont de la station aval peut retenir 5000 m³ d'eau (CHILLOU A., 2012) qui ne contribuent donc pas au ruissellement aval et ne seront pas comptabilisés dans le calcul du coefficient de ruissellement aval en tant que volume ruisselé. Cela correspond à une lame d'eau ruisselée de 16 mm sur le bassin versant amont. En revanche pour les épisodes les plus forts en lame d'eau précipitée, les décanteurs sont pleins et le sol humide. Les coefficients de ruissellement aval dans ce cas devraient alors se rapprocher des coefficients de ruissellement amont. Si nous rajoutons 16 mm de lame d'eau ruisselée à tous les épisodes présentés à l'aval, le coefficient de ruissellement augmente en moyenne de 0,1 mais reste toujours bien inférieur au

coefficient de ruissellement amont. Donc cela corrobore l'hypothèse qu'une partie de l'eau qui précipite sur le bassin versant et qui ruisselle sur le bassin versant ne prend pas la direction de l'exutoire aval.

3.3 *Episodes les plus forts en transport de matières en suspension*

Durant une année, c'est durant les épisodes de crue que les apports solides sont très significatifs. Les crues choisies pour ce tableau correspondent aux deux épisodes ayant généré le plus de flux solide par an. Le tableau 9 montre que pour chaque année, le flux de matières solides transportées en suspension par 2 crues à l'aval constitue plus de la moitié du flux annuel, sauf pour l'année 2010. Une crue a eu lieu la durant la saison fraîche au mois de juin et toute les autres durant la saison chaude de décembre à mai. Le tableau présenté en annexe 14 montre que seuls deux évènements ne font pas partie des 15 plus forts évènements en précipitations, ce sont cependant des épisodes classés comme moyen par NAVARROT [2012] et ils sont supérieurs en pluviométrie à la moyenne de l'ensemble des pluies dites moyennes. Cela paraît cohérent puisque pour déplacer une grande quantité de matière il faut un débit élevé, donc à la fois une forte précipitation et une forte lame d'eau ruisselée. Seul l'épisode 123 présenté dans le tableau de l'annexe 14 a une faible lame d'eau ruisselée, mais c'est un épisode de 2010, année particulièrement sèche pour laquelle il n'y a eu que 2 petites crues.

année hydrologique	Apport solides aval			Charge moyenne annuelle des eaux de crue (g/l)	Charge moyenne des 2 crues les plus importantes (g/l)
	Total (t)	2 crues (t)	contr (%)		
2009**	67	33,5	50	0,86	0,96
2010	43	13,1	30	1,3	1,24
2011	73	46,2	63	0,85	2,5
2012	543	493	91	1,2	5,4
2012 sans 24 déc. 2011	90	63	70	0,8	1,9
moyenne *	182	146	81	1,1	2,5
moyenne	68	39	57	1,0	1,6

Tableau 9 : Bilan annuel des apports solides de Poro aval et contribution des crues, de janvier 2009 à décembre 2012, moyennes* : effectuées à partir des données en considérant l'épisode exceptionnel du 24 déc. 2011. Les crues choisies correspondent aux 2 épisodes générant le plus fort flux solide de matière en suspension par an. ** : pas de données sur décembre 2008

Les concentrations moyennes des épisodes choisis sont supérieures aux concentrations moyennes annuelles de tous les épisodes (tableau 9). L'épisode 123 de l'année 2010 à l'aval a provoqué un transport de matière en suspension fortement concentré. Donc malgré la faible lame d'eau ruisselée, il a quand même transporté 40 % de sédiments en plus que l'épisode 126 de l'année 2010 qui a pourtant une lame d'eau ruisselée 4 fois supérieure mais des faibles concentrations de MES.

Finalement, peu d'évènements suffisent à transporter la quasi-totalité des sédiments. Pour générer une forte production en MES il faut une forte lame d'eau ruisselée et donc une forte lame d'eau précipitée mais aussi un fort potentiel de transport en MES de façon à avoir des concentrations élevées.

3.4 Episode exceptionnel : crue du 24 décembre 2011

3.4.1 Description de l'évènement

Suite au passage de l'ex dépression tropicale Fina au sud-ouest de la Nouvelle Calédonie, un phénomène de blocage et d'accumulation des nuages s'est produit sur la côte Est (cf figure 23) donnant des précipitations exceptionnelles.



Figure 23 : dépression tropicale Fina entre les cotes australiennes et la Nouvelle Calédonie au 25/12/2011 à 01h00 UTC (midi heure calédonienne), d'après Météo-France

Le 24 décembre 2011 à 17 heures locales, la dépression tropicale Fina se trouve à environ 900 km à l'Ouest de Nouméa (995 hPa, 22,2°S et 157,5°E). Elle s'accompagne alors d'une vaste zone pluvio-orageuse qui descend sur la Nouvelle-Calédonie et qui s'enroule autour de la dépression.

Le dimanche 25 à 11h heures locales, le centre de la dépression s'est déplacé de 240 km en direction du Sud Sud-Est, alors que la masse nuageuse stagne sur la Nouvelle-Calédonie. En conséquence, de fortes averses se sont déversées toute la nuit et une partie de la journée de Noël sur le relief et la façade Est. Ces pluies ont touché l'ensemble du pays mais ont été particulièrement intenses de Houaïlou à l'extrême Sud.

3.4.2 Record à Houaïlou

A Houaïlou, cet épisode constitue un record avec 530 mm du samedi 24 après midi, au jour de Noël en soirée. Jamais un épisode aussi important n'a été mesuré à Houaïlou depuis le début des mesures en 1952. En 24 heures, il est tombé l'équivalent de plus de 3 fois la quantité de pluies qui tombent habituellement au cours du mois de décembre, ou encore l'équivalent de plus d'un quart de la quantité annuelle moyenne de précipitations à Houaïlou .

3.4.3 Situation à Poro

Le site minier de Poro étant situé à quelques kilomètres au Sud de Houaïlou a été particulièrement touché par les précipitations intenses de l'ex-dépression tropicale Fina.

Le tableau 10 présente la pluviométrie à Poro de cet épisode.

	Poro amont	Poro aval
Début averse	24/12/2011 13:33:58	24/12/2011 12:50:21
Fin averse	26/12/2011 02:59:26	26/12/2011 03:02:50
Durée de l'averse	30 h 42 min	31 h56 min
Cumul en mm	531,5	491,0
Précipitations du mois de décembre (mm) (part de l'épisode du 24 décembre en %)	736,5 (72%)	702 (70%)

Tableau 10 : caractéristiques pluviométriques de l'épisode du 24 décembre 2011 à Poro

Le tableau 11 présente les paramètres hydrologiques calculés pour l'épisode du 24 décembre 2011. Nous pouvons constater que la période de retour est estimée à environ 200 ans à Poro amont.

Le coefficient de ruissellement à l'aval est anormalement plus faible qu'à l'amont. Le volume précipité a été comptabilisé dans le calcul du coefficient de ruissellement aval, pas mais pas tout le volume ruisselé réel n'aurait été pris en compte, car de l'eau ruisselée aurait été détournée de la station de mesure aval. Ainsi le coefficient de ruissellement de 0,58 serait sous-estimé.

	Poro amont	Poro aval
Tc (min)	11	14
I max 05 min (mm/h)	192	198
I max 24h (mm/h)	20	20
Période de retour de la pluie sur 24 h	198	115
Pluie d'interception	2,5	17
Volume ruisselé (m3)	36 000	82 000
Ce	0,81	0,58
Q max spécifique (m3/s/km ²)	41	30
Flux de MES transporté (t)	90	450

Tableau 11 : caractéristiques hydrologiques de l'épisode du 24 décembre 2011 à Poro

L'hydrogramme et le hétérogramme de cet épisode sont disponibles en annexe 15 pour Poro amont et aval.

3.4.4 Analyse du comportement du bassin versant de Poro pendant la crue

En fonctionnement normal :

- D'une part, l'eau provenant de la zone hachurée en gris sur la figure 24 circule dans le fossé au bord de la piste principale (voir figure 25). Le cassis amont doit détourner l'eau qui ruisselle sur la piste principale vers le fossé. Puis le fossé amène l'eau vers la buse, dimensionné pour 10m³/s, qui alimente la station de mesure aval.

- D'autre part, l'eau provenant du versant rive gauche (zone hachurée en jaune sur la figure 27) est drainée par un fossé en bord de piste puis est ensuite détournée vers l'exutoire aval au moyen du cassis aval.

En revanche après l'épisode pluvieux, plusieurs signes de dysfonctionnements ont été constatés par le personnel du CFTMC notamment une rupture de merlon (cf figure 25) et une forte dégradation des pistes qui indiqueraient que l'eau a emprunté les pistes. De plus, lors de notre présence sur le terrain durant la crue du 02 avril 2013 (correspondante à une lame d'eau précipitée d'environ 70 mm) nous avons pu constater le dysfonctionnement de cassis. Les annexes 16 et 17 montrent que les cassis amont et aval (voir figure 25 pour les situer) ne détournent pas complètement l'eau.



Figure 24 : bassin versant de Poro (rouge) sur fond de carte de l'orthophoto.

Finalement, pendant la crue du 24 décembre 2011, l'eau provenant de l'amont a pris la direction de la route, d'une part car le fossé au bord de la piste principale était plein, d'autre part à cause d'une rupture de merlon et enfin à cause du dysfonctionnement des cassis.

Le cassis amont n'a pas pu retenir l'eau, qui a donc pris la direction de la piste principale sans passer par la station de mesure aval. De plus, le cassis aval n'a lui non plus pas totalement fonctionné et une partie l'eau du versant de la rive gauche du talweg a pris la direction de la piste, et n'a pas été rabattue vers la station aval. Une partie du bassin versant (hachurée en gris et jaune sur la figure 24) n'a donc pas totalement contribué à l'alimentation de la station aval à cause du dysfonctionnement des deux cassis, le coefficient de ruissellement aval est donc sous-estimé. Ces parties représentent respectivement 20 % et 7% du bassin versant total soit 6 ha et 2 ha. En considérant une pluviométrie de 511 mm, le volume précipité sur ces zones est respectivement de de 31 000 m³ et 10 000m³.

La buse a bien fonctionné, aucune trace de bouchage, ni de débordement n'a été constatée par le personnel du CFTMC. Ce qui signifie que toute l'eau ayant transité par le décanteur FRN01 a bien été récupérée par la station aval. De plus si la buse avait été bouchée, on observerait la présence d'un seuil sur l'hydrogramme aval, au-delà duquel nous observerions une stagnation jusqu'à la décrue. Le débit maximum enregistré à l'aval est inférieur à 10 m³/s, donc la buse aurait été dans son état normal de fonctionnement selon les hypothèses de sa débitance théorique.

En estimant que le volume qui n'a pas été détourné par les cassis et qui n'a donc pas contribué au débit du bassin versant est de 50v% du volume précipité sur les zones hachurées en jaune et gris, soit 20 000 m³, le nouveau coefficient de ruissellement aval serait de 0,7. En estimant maintenant que 80 % de ce qui a précipité n'a pas ruisselé vers l'exutoire du bassin versant alors le coefficient de ruissellement aval serait de 0,8. Ainsi le coefficient de ruissellement aval serait bien dans le même ordre de grandeur qu'à l'amont. Ce qui justifie l'hypothèse que plus de 50% de ce qui a précipité sur les zones hachurées en gris et jaune (figure 24) n'a pas contribué à l'alimentation du bassin versant.



Figure 25 : dysfonctionnement des ouvrages de gestion des eaux sur le bassin versant de Poro lors de la crue du 24 décembre 2011, 25/01/2013

4. Les flux de sédiments sur le bassin versant de Poro : résultats et discussion sur les incertitudes

Dans cette partie les résultats sur l'étude des flux solides de Poro sera présentée suivie d'une discussion sur la détermination des incertitudes impactant la quantification des flux de matières en suspension.

4.1 Introduction

En théorie, le flux solide entre le début et la fin du ruissellement d'un épisode pluvieux est défini par :

$$\text{Flux} = \int_{t_1}^{t_2} \int_S C(x, y, t) * v(x, y, t) * S dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_s(t) dt \quad (*)$$

Avec

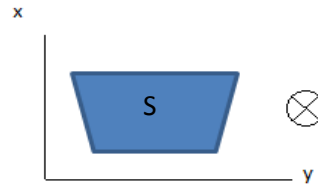
Q_s : le débit solide (g/s)

v : vitesse du fluide (m/s)

S : surface mouillée (m²)

C : concentration (g/L)

t_1 et t_2 : respectivement la date de début et de fin de ruissellement



Il n'est pas possible de connaître la concentration du fluide en tout point de l'espace, en chaque instant. Donc une première approximation faite est de considérer que la concentration prélevée est représentative de la concentration de la section mouillée. De plus, la fonction $v(x,y,t)$ n'est pas connue en tout point de la section à chaque instant.

Alors le flux devient :

$$\text{Flux} = \int_{t_1}^{t_2} C(t) * v(t) * S dt = \int_{t_1}^{t_2} C(t) * Q(t) dt \quad (**)$$

avec Q le débit liquide en m³/s mesuré à Poro par l'intermédiaire d'un capteur de niveau et d'une courbe de tarage.

Ici $C(t)$ représente la concentration sur la section S à l'instant t . En réalité l'échantillon est prélevé en un point particulier, et c'est la concentration de l'échantillon qui est prise pour le calcul. Ici on émet donc l'hypothèse que la concentration est uniforme dans toute la section.

Enfin nous disposons des mesures de débits et de concentrations à intervalles discrets. Pour calculer le flux il faut donc estimer que le flux est constant sur chaque intervalle. Donc des incertitudes sont aussi liées au passage du calcul continu (intégral) au calcul discret (somme).

$$\text{Flux} = \Delta t * \sum C_i Q_i \quad (***)$$

Q_i pourra être en fait être remplacé par $\frac{Q_{i+1} + Q_{i-1}}{2}$ (méthode du point milieu) de façon à approcher au mieux la courbe polynomiale du débit en fonction du temps.

Mais si le débit est estimé toutes les 5 minutes à Poro, les mesures de concentrations pour des raisons techniques sont moins fréquentes. Il faut donc pour chaque pas de temps de mesure de débit associer une concentration par interpolation afin de pouvoir utiliser la formule précédente. Parfois une crue n'a pas été échantillonnée, alors il faut estimer la totalité des valeurs de concentration (cf figure 26) par une méthode d'estimation globale.

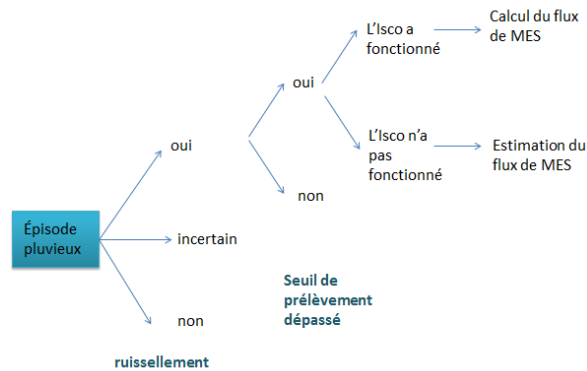


Figure 26 : schéma présentant la méthode suivie pour le calcul du flux de sédiments

4.2 Méthode d'interpolation des concentrations pour déterminer les flux de sédiments à Poro

Après avoir analysé au laboratoire les échantillons prélevés, nous disposons pour une crue donnée de la concentration en fonction du temps de manière ponctuelle. L'objectif est d'avoir cette relation du début à la fin du ruissellement de façon continue. Entre chaque point de concentration mesuré il faut donc interpoler la concentration. Après le dernier prélèvement et avant le premier prélèvement il faut extrapoler des valeurs. Plusieurs méthodes sont possibles :

- une interpolation proportionnelle au débit :

$$C_i = C_{mes1} + \frac{C_{mes1} - C_{mes2}}{Q_1 - Q_2} * (Q_i - Q_1)$$

- une interpolation proportionnelle au temps :

$$C_i = C_{mes1} + \frac{t_i - t_1}{t_2 - t_1} * (C_{mes2} - C_{mes1})$$

Avec :

C_i : la concentration recherchée au temps i

Q_i : le débit correspondants à la date de la concentration recherchée C_i

t_i : la date pour laquelle la concentration C_i est recherchée

C_{mes1} : la concentration connue, à une date donnée inférieure à i , la plus proche de i

t_1 (ou 2) : la date correspondante à la concentration C_{mes1} (ou 2)

C_{mes2} : la concentration connue mesurée sur le terrain, à une date donnée supérieur à i , la plus proche de i

Q_1 (ou 2) : le débit correspondant à la date à laquelle C_{mes1} (ou 2) a été mesurée.

- Une interpolation manuelle

Pour certains épisodes, la montée en débit, le pic, ou la descente de la crue n'ont pas été échantillonnés. Il faut donc estimer une concentration sans avoir de mesure. Après avoir étudié les résultats d'épisodes dont la crue a été bien échantillonnée, nous pouvons estimer le comportement de la concentration d'un épisode mal échantillonné. Par exemple pour l'épisode 320 (figure 27) l'échantillonnage s'est arrêté avant le deuxième pic. Or l'épisode 300 disponible dans le catalogue des épisodes bien échantillonnés à Poro aval (cf annexe 18) qui est dans le même ordre de débit montre que le deuxième pic de débit même s'il est plus important que le premier ne provoque pas forcément de pic de concentration plus élevé. La valeur de concentration correspondante au

deuxième pic a donc été choisie manuellement. La dernière valeur de concentration a été choisie proche de zéro, et une interpolation proportionnelle au débit a été effectuée entre le deuxième pic et la dernière valeur.

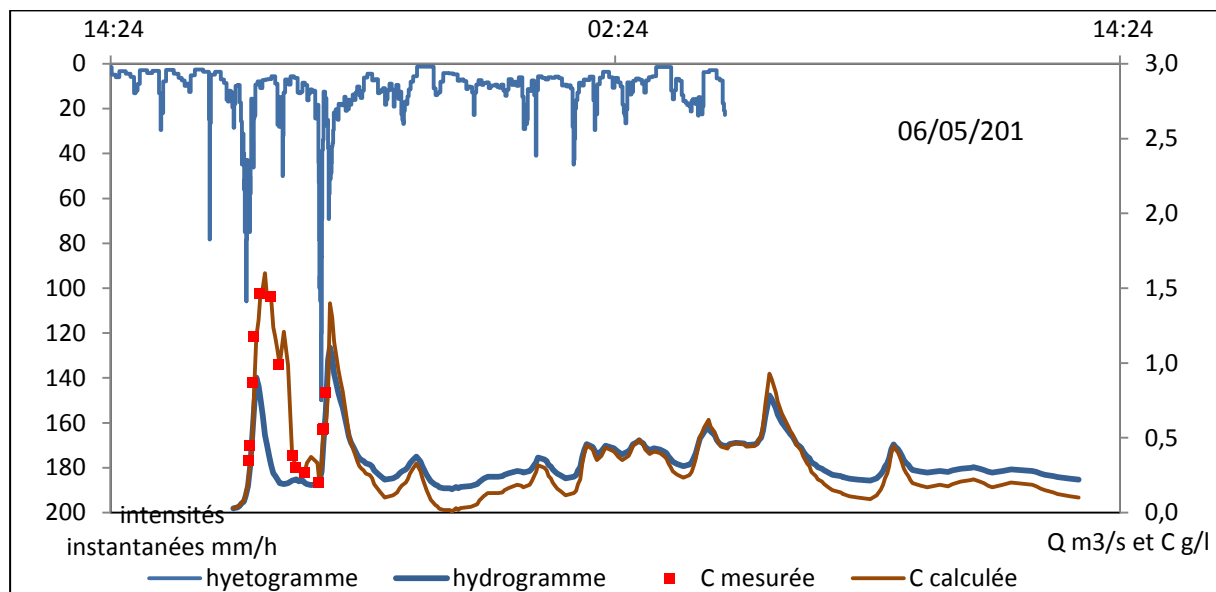


Figure 27 : exemple de l'interpolation des concentrations pour l'estimation du flux sur l'épisode 320 à l'aval. C mesurée représente la concentration estimée par filtration, séchage et pesée des échantillons prélevés.

4.3 Résultats généraux sur les flux de MES

4.3.1 Evolution de la charge en suspension transportée en fonction du débit

La charge de MES est généralement liée au débit liquide par une relation puissance (RAYMOND 2011, MEGNOUNIF et al 2004, AVOINE 1985). A Poro aval la relation entre la concentration et le débit liquide donne $C \text{ (g/l)} = 1,06 * Q \text{ (m}^3\text{/s)}^{0,91}$ avec un coefficient de corrélation de 0,85. La relation est proche d'une relation linéaire avec un exposant proche de 1. Ce qui signifie que les flux croissent plus vite que les débits mais leur variabilité n'est que légèrement supérieure.

La dispersion des points autour de la courbe de tendance, figure 28, peut être expliquée par la particularité des événements. Par exemple, les événements ruisselant qui sont précédés d'une durée de temps sec supérieure à 10 jours (6 événements) et à 50 jours (2 événements) sont en majorité situés au-dessus de la courbe de tendance. Un des points qui possède une concentration largement supérieure à la courbe de tendance correspond à un first flush, phénomène très peu fréquent à l'aval. En revanche l'ensemble des points ayant une concentration inférieure à la tendance ne s'expliquent pas par le fait qu'il y a eu une averse ruisselante moins d'un jour avant. La variabilité peut s'expliquer ensuite par des variations saisonnières. La variabilité s'explique aussi par les activités minières : si des talus de latérite ont été remaniés juste avant un épisode pluvieux cela va influencer ponctuellement sur le transport sédimentaire de l'épisode d'une part par le roulage que cela va entraîner et aussi par l'apport de terres érodibles.

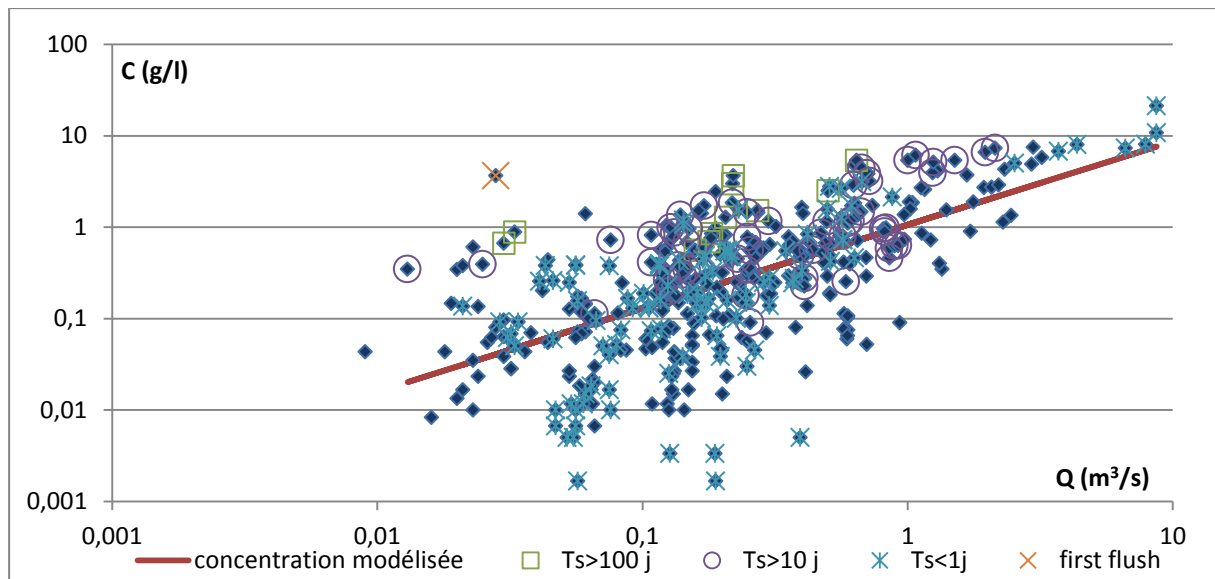


Figure 28 : concentration de chaque prélèvement sur les années 2009 2012 en fonction du débit liquide associé, à Poro aval

A Poro amont une relation puissance entre le débit liquide et la concentration n'est pas applicable. En effet le nuage de point est trop dispersé (cf figure 29), et une telle relation donnerait un coefficient de corrélation proche de zéro ($R^2 = -0,04$). D'ailleurs, SIBARI et al [2001] et ALEXANDROV et al [2003] montrent que relation puissance entre le débit et la concentration d'un cours d'eau à écoulement temporaire n'est pas bonne. Même après regroupement des événements par groupe en fonction du mois de l'année comme le suggère ELHACENE et al [2009] pour s'affranchir des variations saisonnières il n'y a pas de tendance qui se dégage. 2 ordres de grandeurs séparent les concentrations.

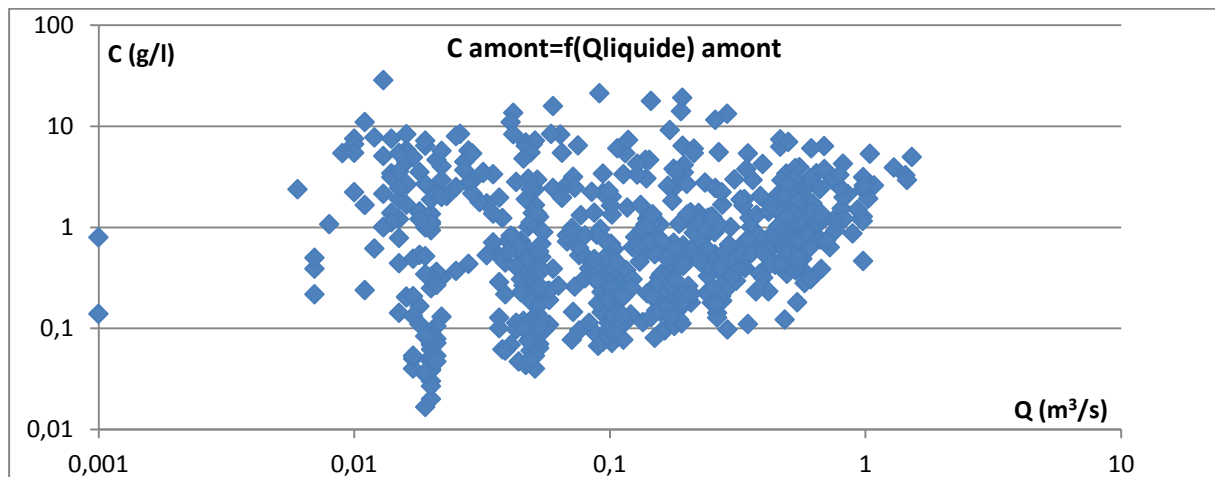


Figure 29 : concentration de chaque prélèvement sur les années 2009 2012 en fonction du débit liquide associé, à Poro amont

4.3.2 Evolution de la concentration en fonction du débit : phénomène d'hystérésis

Tracer le graphique de la concentration en fonction du débit permet d'expliquer le fonctionnement du transport solide lors de la crue, et de déterminer les concentrations pour les pas de temps où elles ne sont pas disponibles. Il existe plusieurs types de relations entre la concentration et le débit (cf tableau 12) :

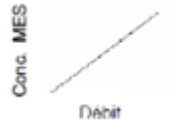



relation	illustration	interprétation
relation bi-univoque rectiligne (non observée à Poro)		Matériaux désolidarisés des berges et déjà érodés remobilisés (LENZI et LORENZO, 2000)
relation en huit (non observée à Poro)		Dépend de la disponibilité en MES, et des débits (WILIAM, 1989)
horaire orthograde		Présence de matériaux mobilisable près de l'exutoire (SOLER et al, 2006)
anti-horaire rétrograde		Sources éloignées (GARCIA RUIZ et al, 2000)

Tableau 12 : liste non exhaustive des relations d'hystérésis dans les relations concentration en MES – débits, et leurs interprétations

On observe à l'amont des relations concentration débit non-univoques de sens horaire. Cette orientation s'explique par le phénomène de first flush que l'on observe souvent à Poro Amont (SOLER et al 2006). La présence de matériaux mobilisables près de l'exutoire du bassin versant amont et dans le lit de l'écoulement temporaire permet leur remise en suspension avec l'apport d'énergie de la crue. Ainsi, l'effet de chasse des matériaux provoque des premières valeurs de concentration très fortes et par la suite une diminution de ces concentrations lors de la montée de crue. Sur les 17 hystérésis répertoriées en amont (cf annexe 19) une seule relation est anti horaire.

On observe souvent à l'aval des relations concentration débit non-univoques de sens anti horaire. Les concentrations les plus fortes arrivent après le pic de débit, mettant en évidence un apport de sédiment provenant d'une source plus éloignée (GARCIA RUIZ et al, 2000.) Sur les 13 hystérésis répertoriées en aval, deux relations sont horaires.

Ensuite les hystérésis sont différentes par leurs formes ouvertes (épisodes 64 et 65 à l'aval en annexe 19) ou serrées (épisodes 215 et 216 en aval en annexe 19). Pour le reste des crues l'hystérésis n'est pas observable par manque de point. On s'approche parfois de relation bi-univoque entre la concentration et débit.

4.4 Résultat : synthèse des calculs de flux à Poro

A Poro l'ensemble des flux des épisodes qui ont été échantillonnés ont été estimés par les méthodes d'interpolation présentées en 4.2. Mais certains épisodes qui auraient dû être échantillonnés ne l'ont pas été du fait d'un problème technique. D'autres épisodes n'ont pas été assez importants pour dépasser le seuil de prélèvement. Or la contribution de ces épisodes aux flux annuels peut ne pas être négligeable. En conséquence il est nécessaire de les estimer. L'analyse statistique des épisodes échantillonnés a permis d'élaborer des modèles de prédiction à partir des variables de l'épisode (NAVARROT, 2012).

Ces modèles sont élaborés pour estimer les flux de tous les épisodes qui n'ont pas été échantillonnés. L'annexe 20 présente, pour l'amont et l'aval, le flux des épisodes échantillonnés

calculés par interpolation en fonction du flux estimé par les différents modèles, ainsi que les coefficients de corrélation entre le flux estimé et le flux calculé.

A l'aval, que ce soit pour les épisodes ayant généré une production de matières en suspension supérieure ou inférieure à 10 t, c'est le modèle numéro 7 qui est le meilleur. Son équation est présentée en annexe 21.

A l'amont nous pouvons constater que c'est le modèle numéro 2 qui représente le mieux les flux calculés. Ce modèle puissance relie le flux avec le débit maximum et H_{tot} 15 (fraction intense des précipitations au-dessus de 15 mm/h) par la formule présentée en annexe 22. On constate une bonne répartition des épisodes autour de la 1^{ère} bissectrice avec ce modèle.

Les tableaux 13 et 14 présentent les résultats des flux annuels calculés et estimés. Les flux à l'amont sont estimés par le modèle 2, et les flux à l'aval par le modèle 7. Dans la colonne du flux total le pourcentage exprime la part des flux des épisodes qui ont été échantillonnés sur le total des flux annuels. On remarque que les flux des épisodes échantillonnés représentent plus de la moitié du flux total. Le tableau 14 présente la production de sédiments du bassin versant aval, c'est la quantité de matière en suspension qui a été transportée vers l'aval, en direction du lagon. Le flux spécifique du bassin versant aval est plus faible que celui du bassin versant amont sauf pour l'année 2012 pour laquelle l'épisode du 24 décembre 2011 a provoqué un transport de plus de 450 tonnes de matériaux en suspension à l'aval alors qu'il a déplacé un peu moins de 100 tonnes à l'amont. La contribution moyenne des épisodes échantillonnés sur le flux total est de 70 % à l'aval et de plus de 80 % à l'amont. Depuis 2009, 725 tonnes de matériaux en suspension ont été exportés vers l'aval, dont 450 tonnes par l'épisode exceptionnel du 24 décembre 2011.

Année hydrologique	Flux solide amont (t)						Flux total	Flux spécifique annuel (t/km ²)
	épisodes échantillonnés		épisodes estimés Q _{max} >Q seuil		Episodes estimés Q<Qseuil			
	Nombre	Flux	Nombre	Flux modèle 2	Nombre	Flux modèle 2		
2009	15	59	31	17	31	< 0,1	76 (78%)	844
2010	3	9,3	8	5	35	< 0,1	14 (66%)	155
2011	24	42	7	1	39	< 0,1	43 (97%)	479
2012	19	118	12	1	47	< 0,1	119 (99%)	1321
2012 sans 24 déc. 2011		28	12	1	47	< 0,1	28 (97%)	322

Tableau 13 : bilan annuel du flux solide à Poro amont

Année hydrologique	Flux solide aval (t)						Flux total	Flux spécifique annuel (t/km ²)
	épisodes échantillonnés		épisodes estimés Q _{max} >Q seuil		Episodes estimés Q<Qseuil			
	Nombre	Flux	Nombre	Flux modèle 7	Nombre	Flux modèle 7		
2009	13	47,3	13	20	14	0,5	67 (70%)	222
2010	4	15	3	27	14	0,5	43 (35%)	140
2011	20	61	5	11	38	3	73 (84%)	239
2012	15	537	10	6	9	0,2	543 (99%)	1785
2012 sans 24 déc. 2011	14	84	10	6	9	0,2	90 (93%)	297

Tableau 14 : bilan annuel du flux solide à Poro aval

4.5 Discussion : calcul d'incertitude sur les Flux de matières en suspension

4.5.1 Introduction

Le but est de répertorier et d'estimer toutes les erreurs qui s'ajoutent le long du chemin de la donnée de MES, depuis le prélèvement jusqu'au résultat de l'interpolation des concentrations. En effet la quantification des flux ne peut pas être un calcul exact. Le problème de la quantification des flux est lié à la réponse temporelle complexe des concentrations en fonction du temps, de l'événement hydrologique, des caractéristiques d'occupation du sol et des actions anthropiques (RAYMOND, 2011).

Ces estimations de flux contiennent des erreurs provenant de diverses sources :

- la précision sur les données de débit (1)
- la précision des manipulations lors de l'analyse des concentrations (2)
- la représentativité spatiale de l'échantillon (l'échantillon là où il a été prélevé n'est pas forcément représentatif de l'ensemble de la section mouillée) (3)
- l'incertitude sur les méthodes de calcul de flux par interpolation (4)
- la variabilité des concentrations et des débits (5)
- la stratégie d'échantillonnage (6)

Pour chacune de ses sources d'erreurs nous allons estimer l'incertitude engendrée sur les flux de MES afin de savoir quelles sont celles qui sont le plus impactantes. Pour cela le flux de l'année légale 2012 des épisodes échantillonnés et qui a donc été calculé par interpolation sera recalculé en considérant ces sources d'erreur. Ainsi la sensibilité des sources d'erreurs sera appréciée sur le résultat du calcul du flux de matières en suspension pour les épisodes échantillonnés.

4.5.2 Les incertitudes relatives à la précision des manipulations pour l'analyse des concentrations

Les prélèvements d'eau chargée en matière en suspensions se font dans un flacon Isco, qui n'est pas toujours nettoyé après chaque prélèvement. J'ai donc pris 3 flacons Isco vides au hasard, que j'ai lavé avec de l'eau claire, j'ai récupéré l'eau et je l'ai filtrée. Ainsi la masse des résidus présent dans les flacons Isco représente une erreur sur la masse des MES prélevées.

Ensuite, une fois l'échantillon prélevé, il est agité dans un bécher, et 60 mL sont prélevés avec une seringue. Or le volume réel de la seringue, est compris entre 59,4 et 63,9 mL selon les opérateurs la manipulant et selon la seringue. Soit une erreur sur la concentration comprise entre -1 % ou + 6,1%.

Se pose aussi la question de la reproductibilité de la manipulation. Le prélèvement avec la seringue n'est pas forcément homogène. J'ai donc fait sur deux échantillons 5 filtrations d'affilée et sur un autre échantillon 10 filtrations d'affilée. Le résultat montre que la manipulation est reproductible puisque aucun résultat n'est différent de la moyenne des résultats de plus de 2%.

Ensuite, lors de la pesée les échantillons les plus chargés prennent très rapidement l'humidité dès la sortie de l'étuve ou du dessiccateur. Pour 1 gramme de MES telles que celles que nous mesurons à Poro, ce qui correspondrait à une concentration de 17 g/l l'augmentation de la masse est de 0,02% en 50 secondes après la sortie du dessiccateur. Soit une augmentation de l'ordre du millième de

gramme. Pour les échantillons couramment mesurés, cette augmentation n'est pas visible, ou visible dans les limites de sensibilité de la balance (ordre du dix-millième de gramme). Donc cette erreur est négligeable. Il faudra tout de même faire attention lorsqu'il faut peser les échantillons à les peser directement après la sortie du dessiccateur.

Conclusion :

La concentration mesurée, peut être en réalité surestimée à hauteur de la masse de MES déjà présente dans l'Isco avant le prélèvement, et elle est ou bien encore surestimée ou bien sous-estimée par le volume prélevé par la seringue.

$$C \text{ réelle} = C \text{ mesurée} - \text{Erreur prélèvement Isco} \pm \text{erreur seringue} \pm \text{reproductibilité}$$

L'erreur liée aux flacons d'Isco mal nettoyés avant le prélèvement est présentée ci-dessous dans le tableau 15. Pour une concentration comprise entre 0,017 et 0,050, l'erreur est de 90%, c'est-à-dire que la concentration mesurée sera en réalité surestimée de 90%, mais seulement 2 % des concentrations à l'amont et 10% à l'aval sont dans cette gamme. On remarque que 65 % des concentrations à l'amont et 55% des concentrations à l'aval sont surestimées avec une erreur de moins de 3%.

panel de concentration (g/l)	Erreur % concernant un volume de 60mL	Nombre de mesures AMONT des concentrations (% du total amont)	Nombre de mesures AVAL des concentrations (% du total aval)
<0,017	269	74 (9,5)	66 (16)
0,017 - 0,050	90	17 (2)	41 (10)
0,050 - 0,058	77	6 (1)	6 (1,5)
0,058 - 0,067	67	9 (1)	12 (3)
0,067 - 0,083	54	17 (2)	17 (4)
0,083 - 0,133	34	61 (8)	22 (5)
0,133 - 0,167	27	20 (3)	22 (5)
0,167 - 0,250	18	59 (8)	37 (9)
0,250 - 1,667	3	330 (42)	141 (34)
1,667 - 2,5	2	57 (7)	11(3)
2,5 - 8,3	1	114 (15)	36 (9)
>8,3	<1	15 (2)	2 (0,5)

Tableau 15 : erreur sur les concentrations en fonction du panel de concentration en considérant l'imprécision de la seringue lors du prélèvement et l'utilisation de flacons Isco mal nettoyés avant le prélèvement automatique

Pour l'année 2012, le flux de MES des épisodes échantillonnés a été calculé avec les concentrations telles quelles ont été mesurées, puis avec les valeurs de concentrations dans le cas le plus pénalisant. C'est-à-dire que chaque concentration, selon la gamme à laquelle elle appartient a été recalculée en la diminuant de l'erreur faite à cause de la seringue et de l'erreur faite à cause des flacons Isco mal nettoyés. Puis l'interpolation des flux a été recalculée à partir de ces nouvelles valeurs de concentration.

En 2012 (année légale) le flux calculé des épisodes échantillonnés est au maximum surestimé de 7% à l'amont et de 8% à l'aval.

4.5.3 Les incertitudes relatives à la mesure des débits

Les chroniques de débit utilisées résultent de la transformation des mesures de hauteur d'eau par une relation hauteur-débit appelé courbe de tarage ou courbe d'étalonnage. Cette courbe de tarage doit être estimée à Poro amont et à Poro aval à partir des lois hydrauliques régissant la relation hauteur-débit dans la section de mesure et à partir de mesures ponctuelles manuelles de hauteur-débit appelées jaugeage.

4.5.3.1 La mesure du niveau de l'eau

La première incertitude réside dans la mesure de la hauteur d'eau. A Poro la sonde a une précision de l'ordre du centimètre. Une variation d'un centimètre provoque des erreurs sur les débits d'autant plus importantes que le niveau d'eau est bas. En effet, dans le cas de faibles eaux, la difficulté pour établir une courbe de tarage est la forme de la section de contrôle : elle sera large avec de faibles hauteurs d'eau et la mesure des hauteurs d'eau sera dans le même ordre de grandeur que l'incertitude de la sonde de mesure.

Le tableau 16 représente l'erreur sur les débits en fonction de la gamme de débit au seuil amont. Par exemple, pour un débit compris entre 0,160 et 0,253 m³/s, ce qui est le cas de 19 % des débits mesurés lors de prélèvements, l'erreur est de +/- 9%. On peut voir que l'erreur faite sur environ 50% des débits est inférieure à 10%. On voit que l'erreur faite sur les débits compris entre 0,03 et 0,25 m³/s, soit 50% des mesures, est comprise entre 9 et 18 %. En recalculant les flux de MES à l'amont pour chaque crue échantillonnée, après avoir modifié les débits en jeu de +/- l'erreur en fonction de leur gamme, le flux solide amont calculé est différent du flux de solide initial de +/- 9% .

gamme de débit mesurée m ³ /s		Erreur %	Nombre de débits mesurés lors d'échantillonnages	% des mesures de débits sur le total des mesures
0,000	0,006	73	3	0,4
0,006	0,01	52	9	1
0,010	0,014	40	15	2
0,014	0,019	32	44	7
0,019	0,031	25	55	8
0,031	0,059	18	122	18
0,059	0,16	12	99	15
0,160	0,253	9	124	19
0,253	0,387	7	61	9
0,387	0,488	5,8	35	5
0,488	0,597	5,1	54	8
0,597	0,684	4,5	17	2,5
0,684	0,806	4,1	12	2
0,806	0,968	3,7	7	1
0,968	2,000	3,5	13	2
2,000	4	3	0	0

Tableau 16 : erreur faite sur le débit en fonction de la gamme de débit uniquement en tenant compte de l'imprécision de la mesure de niveau d'eau à Poro amont

Le même tableau pour le seuil aval est présenté en annexe 23. Il montre que l'erreur faite sur les débits compris entre 0,032 et 0,26 soit 60% des mesures de débits est comprise entre 17 et 46%.

4.5.3.2 Le taux de MES

La sonde de niveau d'eau est basée sur la mesure de la pression. Elle mesure la pression provoquée par la présence de la colonne d'eau au-dessus d'elle qu'elle transforme en hauteur d'eau par la connaissance de la masse volumique de l'eau. Or la densité de l'eau supposée égale à 1 peut être augmentée par la présence de MES. Pour avoir une variation significative de la densité du mélange (de 1 à 2%), en prenant une masse volumique de MES de 2,6 il faudrait avoir des concentrations de l'ordre de 40g/l, ce qui n'est pas le cas à Poro. De plus, pour de faibles concentrations on peut considérer que les particules sont dispersées dans l'eau et que la sonde mesure bien la pression de l'eau. Donc cette erreur peut être négligée. En revanche si lors d'un jaugeage l'opérateur remarque que la concentration est très forte il doit prélever un échantillon d'eau chargée en MES afin de vérifier sa concentration.

4.5.3.3 Le jaugeage

Le moulinet donne une mesure de la vitesse de l'écoulement en un point. FARRAY [1998] propose un diagramme de courbe enveloppe du nombre de verticales à adopter en fonction de la largeur de la section de mesure (annexe 24). Il préconise d'effectuer entre 4 et 6 verticales pour des sections de largeur inférieure à 2 m. En effet en réduisant l'espace entre les verticales on représente mieux les variations latérales et verticales des vitesses. A Poro la variation du niveau d'eau est très rapide et trop importante d'une mesure à l'autre pour pouvoir faire au cours d'un même jaugeage plusieurs mesures avec les mêmes hauteurs d'eau. Souvent la mesure est faite sur une seule verticale au milieu du canal. La norme ISO 748-2007 propose un protocole de mesure avec des calculs d'incertitudes associées, et conclut à des incertitudes d'au moins 4%.

4.5.3.4 La courbe de tarage

Une source d'erreur importante sur les débits réside dans la fiabilité de la courbe de tarage. A Poro elle a été établie théoriquement avec le logiciel HEC-RAS par la Davar. Afin de l'améliorer, il faut réaliser des jaugeages.

Dans le cas de crue, les jaugeages sont peu nombreux du fait de la difficulté pour l'opérateur d'être présent sur le site au moment de la crue (fiabilité de la météo, temps de trajet, nuit et week end) et de la difficulté d'effectuer la mesure sans se mettre en danger. La courbe de tarage est imprécise à cause du manque de points, mais aussi à cause de phénomènes hydrauliques complexes qui peuvent se produire en crue (hystérésis de la relation hauteur-débit, débordement du lit, dépôts modifiant la géométrie de la section de mesure comme nous pouvons le voir sur l'annexe 25).

A Poro amont il est possible de jauger au moulinet les hautes eaux dans la limite où le niveau d'eau ne déborde pas du canal bétonné car la largeur du canal est assez faible pour pouvoir mettre un pied sur chaque paroi et jauger avec le moulinet sans mettre de pied dans l'écoulement. A l'aval par contre il n'est pas possible de jauger sans se tenir debout dans l'écoulement, cela est donc trop dangereux de jauger au moulinet les forts débits.

Depuis 2009 à Poro, 8 jaugeages à l'amont et 9 à l'aval ont été effectués pour compléter la courbe théorique de tarage (voir annexe 26).

La gamme de débit la plus jaugée est celle des faibles eaux. Sur cette gamme-là, la précision est plutôt bonne. Les hautes eaux n'ont presque pas été jaugées, mais la courbe d'étalonnage utilisée est celle qui a été établie à partir de modélisation hydraulique HEC RAS (FRYSOU, 2007).

Une étude menée en métropole sur 10 stations hydrométriques (LANG , et al, 2006) montre que l'incertitude résultante sur les extrapolations de courbe de tarage issues de modèles hydrauliques est de l'ordre de 30 %, elle est de l'ordre de 60% lorsqu'il n'existe aucun jaugeage, et peut atteindre 100% lorsque la configuration du site est complexe (présence de piles de pont, ressaut hydraulique...)

Le tableau 17 présente les erreurs qui ont été appliquées aux débits pour tester la sensibilité du calcul de la production de matière en suspension à Poro.

Incertitude sur le niveau d'eau		
Poro amont	Poro aval	
Entre 3 et 70 %	Entre 3 et 350 %	
Incertitude du jaugeage		
4 %		
Incertitude de la courbe de tarage		
	Poro amont	
Gamme de débit (m ³ /s)	[0 ; 0,5]	>0,5
Nombre de jaugeages valides effectués	7	1
précision	10 %	30 %
	Poro aval	
Gamme de débit (m ³ /s)	[0, 0,7]	>0,7
Nombre de jaugeages valides effectués	9	0
précision	10 %	30 %

Tableau 17 : erreur appliquée au débit pour tester leur sensibilité sur le calcul du flux solide

Nous remplaçons pour chaque crue la valeur des débits par :

- La valeur des débits + 4% + l'erreur sur le niveau d'eau + l'erreur sur le tarage (en fonction de leur gamme).
- La valeur des débits - 4% - l'erreur sur le niveau d'eau - l'erreur de tarage (en fonction de leur gamme).

Nous obtenons finalement deux flux de MES que l'on compare au flux de MES initialement calculés. L'erreur calculée par

$$e(\%) = \frac{\text{Flux majoré ou minoré} - \text{Flux observé}}{\text{Flux observé}} * 100 \text{ nous indique que :}$$

Le flux de MES à l'amont est sous-estimé jusqu'à 29% ou sur estimé jusqu'à 26%.

Le flux de MES à l'aval est sous-estimé ou sur estimé jusqu'à 10%.

Nous concluons en disant que l'erreur sur la mesure des débits dans notre cas influe sur la quantification du flux de MES de l'année 2012 de l'ordre de 30 % à l'amont et 10% à l'aval.

4.5.3.5 Conclusion

Les incertitudes sur les forts débits liés à la courbe de tarage peuvent atteindre 100 % selon les configurations. Pourtant avec une incertitude de 30% on atteint déjà une imprécision de 30% sur la production de matières en suspension du bassin versant amont. Une réduction importante des incertitudes sur les débits de crue est possible par les jaugeages en crue, pour réduire la partie extrapolée des courbes de tarage. LANG et al [2006] montre que l'exploitation de 2 jaugeages de débits décennaux peuvent réduire l'incertitude de 100 % à 30 %.

L'utilisation d'un capteur de vitesse à effet Doppler pourrait améliorer la précision. Il est installé dans l'écoulement, face à l'écoulement, le plus souvent sur le radier. Il envoie une onde dans un volume d'eau correspondant à un angle plus ou moins large. Le capteur à effet doppler mesure la surface mouillée en connaissance de la hauteur d'eau et de la géométrie de la section. Il est nécessaire d'établir une corrélation entre la vitesse mesurée par le capteur et la vitesse moyenne qui est utilisée pour le calcul du débit. Pour cela il faut effectuer des tests en comparant la vitesse donnée par le capteur et la vitesse moyenne donnée par une exploration du champ de vitesse au moyen de jaugeage au moulinet par exemple. A Poro, un capteur à effet Doppler optique a été installé pendant une courte durée pour pouvoir compléter la courbe de tarage. De plus ce capteur a permis l'analyse des valeurs de hauteur d'eau et du débit durant une crue, et il n'apparaît pas de relation d'hystérésis.

4.5.4 Les erreurs liées à la représentativité spatiale de l'échantillon

Les échantillons prélevés par l'Isco au niveau de la crépine sont prélevés en un point de la section mouillée. Or la concentration peut varier dans la section. Le 02 avril 2013 lors d'une crue à Poro, 2 échantillons ont été prélevés manuellement dans la section de mesure en même temps, l'un à la surface, l'autre au fond. Il faut faire particulièrement attention à sortir de l'écoulement sans attendre la bouteille avec laquelle on prélève dès qu'elle est pleine, pour ne pas concentrer les MES.

Ce test a été effectué une fois dans la section de mesure amont et une fois dans la section de mesure aval et les concentrations obtenues sont présentées dans le tableau 18.

échantillon	concentration
Amont surface 02/04/2013 13 :25	0,947
Amont fond 02/04/2013 13 :25	1,258
Aval surface 02/04/2013 14 :00	1,425
Aval fond 02/04/2013 14 :00	1,55
Aval Fond 02/03/11 15 :51*	1,033
Aval milieu 02/03/11 15 :51*	1,19

Tableau 18 : concentration d'échantillons prélevés à Poro à différents endroits de la section mouillée* test réalisé par Laureen Carpentier (CARPENTIER, 2011)

Pour savoir si ce test est représentatif et reproductible, il aurait fallu le faire avec d'autres gammes de concentration. Mais la faible pluviométrie du début d'année 2013 ne nous l'a pas permis. Par ailleurs, des prélèvements manuels effectués sur une verticale au cours de plusieurs crues du bassin versant instrumenté de Nahal Eshtemona en Israël montrent qu'il n'y a pas de différences significative entre la moyenne des concentration de tous les prélèvement d'une verticale et la valeur de la concentration du prélèvement concomitant effectué par le préleveur automatique au fond du lit. De plus, dans le bassin versant instrumenté de Draix (Alpes de Haute Provence) l'hétérogénéité des concentrations dans la section n'a pas été observée (MATHYS, 2006)

4.5.5 Les erreurs liées à la variation temporelle des concentrations et des débits

Pour utiliser la formule (***) du calcul du flux de MES (cf p 38) on estime que les débits et les concentrations ne varient pas entre chaque pas de temps de 5 minutes sur lesquels ils sont estimés.

A Poro les Isco sont programmés pour donner une mesure de hauteur d'eau toutes les 5 minutes, les débits sont donc calculés à des pas de temps de 5 minutes. Les concentrations sont calculées à

chaque prélèvement, à pas de temps variables et à des résolutions temporelles plutôt faibles (de plusieurs minutes à plusieurs dizaines de minutes entre chaque prélèvement).

4.5.5.1 Variation des débits

Pour chaque mesure de débit une valeur de concentration est attribuée par méthode d'interpolation. Sur la figure 30 la forme d'un limnigramme est représentée, avec chaque point de mesure de hauteur d'eau à intervalle régulier (5 minutes à Poro). Lorsque la hauteur d'eau dépasse un seuil de prélèvement la sonde provoque un prélèvement au maximum 5 minute après. Moins la hauteur d'eau varie en 5 minutes au plus ces deux valeurs de débits seront proches.

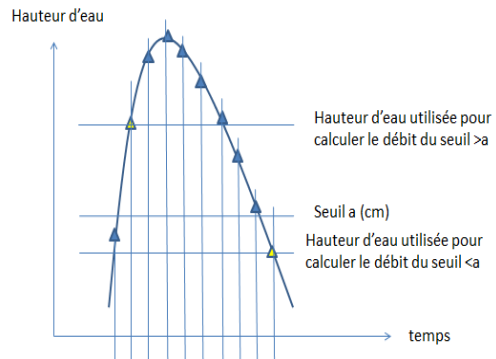


Figure 30 : hauteur d'eau en fonction du temps et pas de temps des mesures de hauteur d'eau

Par exemple sur l'épisode 303 (cf figure 31) le troisième point de prélèvement a été prélevé par dépassement du seuil 10 cm, le quatrième point de prélèvement a été prélevé par franchissement vers le bas du seuil 10 cm. Or, à l'instant de ces deux prélèvements, les hauteurs d'eau effectives dans les chroniques enregistrées sont différentes de 10 cm avec un écart entre les deux prélèvements de 4 cm. Par conséquent les débits correspondant à l'instant de ces deux prélèvements sont différents.

Par conséquent, on constate une variabilité des résultats en fonction de la cadence des mesures de hauteur d'eau. Les hauteurs d'eau varient suffisamment en 5 minutes pour faire varier les débits. Il serait plus judicieux d'utiliser un pas de temps plus petit que 5 minutes pour mesurer les hauteurs d'eau et estimer les débits. Attention toutefois il faut que le pas de temps soit supérieur au temps mis par l'Isco pour prélever un échantillon soit environ 1 minute.

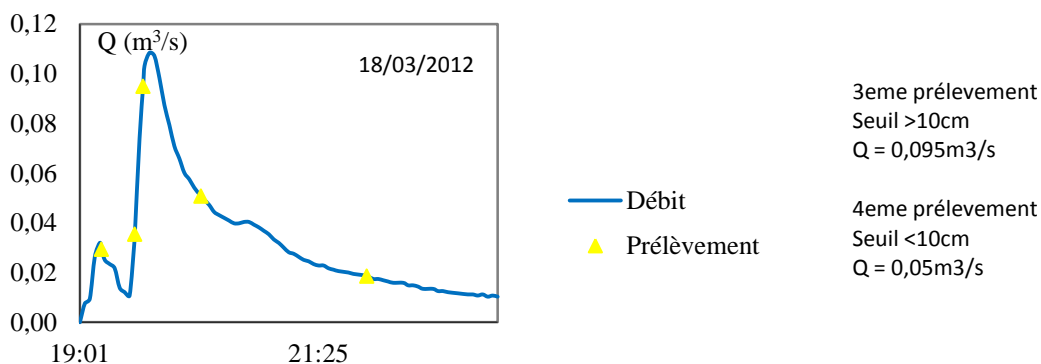


Figure 31 : Hydrogramme de l'épisode 303 à Poro amont avec les points de prélèvements automatiques de l'Isco.

4.5.5.2 Variation sur les concentrations

En utilisant la formule (***) pour calculer les flux, on surestime ou sous-estime potentiellement la concentration entre chaque pas de temps, alors qu'elle peut en réalité varier beaucoup. En effet La grande variabilité temporelle de la concentration MES est connue comme étant un problème majeur dans l'estimation du flux solides puisqu'elle a déjà été mis en évidence dans de nombreuses études

(MEYBECK et al, 1994 ; RAYMOND, 2011). Pour s'affranchir de cette erreur il faudrait être capable de mesurer la concentration en continu, ou à des pas de temps plus courts, ce qui est difficile.

Un turbidimètre pourrait permettre de mesurer la concentration dans l'écoulement. A Poro un turbidimètre constitué d'un capteur optique mesurant l'intensité de rétrodiffusion renvoyée par les particules a été installé début 2013. Cette intensité est un indicateur des concentrations en MES de l'écoulement. Cependant la conversion de l'intensité vers la concentration en matières en suspension nécessite d'avoir un nombre important d'échantillonnages pour comparer les valeurs du turbidimètre et les concentrations des échantillons prélevés (ROTARU et al, 2006). Or le faible nombre de crue du début d'année 2013 ne nous a pas permis de le calibrer.

4.5.5.3 Conclusion

La hauteur d'eau et par conséquent le débit ainsi que la concentration varient suffisamment en 5 minutes pour considérer que l'utilisation de la formule (***) sur des pas de temps de 5 minutes génère des incertitudes. Il est donc recommandé d'utiliser des sondes qui mesurent des hauteurs d'eau sur des pas de temps plus courts et vérifier que la programmation des Isco autorise des prélèvements espacés de moins de 5 minutes.

4.5.6 Les erreurs liées à la stratégie d'échantillonnage

A Poro, les Isco sont asservis sur la hauteur d'eau : un prélèvement est effectué à chaque passage de la hauteur d'eau de l'écoulement sur un seuil prédéfini. Dans un bon échantillonnage il faut échantillonner la montée, le pic et la descente de la crue, ainsi que les autres pics de crue si un évènement pluvieux en provoque plusieurs. Une des difficultés est de ne pas sur-représenter les basses eaux tout en étant en mesure d'échantillonner le first flush. Si le niveau d'eau batille autour d'une valeur seuil, alors plusieurs échantillons vont être prélevés, et utiliser la place des flacons disponibles dans l'Isco.

Pour 3 épisodes de l'année 2012, une stratégie d'échantillonnage basée sur un déclenchement à partir d'un seuil de hauteur d'eau, puis 1 prélèvement à pas de temps fixe a été testée (figure 32).

Pour l'épisode pluvieux du 02/01/13 (voir figure 32), la hauteur d'eau a batillé autour d'un seuil et plusieurs prélèvements sans intérêt ont été effectués, laissant le deuxième pic de crue sans échantillonnage car tous les 18 flacons étaient pleins, et la hauteur d'eau n'a pas été suffisamment importante pour activer la partie B. Pour cet épisode une stratégie d'échantillonnage basée sur un prélèvement toutes les 40 minutes aurait bien fonctionné, mais une stratégie basée sur un prélèvement toutes les 15 min n'aurait rien apporté par rapport à la stratégie déjà en place.

Pour l'épisode suivant, la stratégie d'échantillonnage à Poro aval a été satisfaisante, mais pour avoir une stratégie d'échantillonnage mixte qui soit efficace, en prenant des échantillons sur le pic de crue, il faudrait faire un prélèvement toute les 15 minutes.

Pour le dernier épisode, le temps de crue est très court, avec des fortes concentrations dès le début avec un premier prélèvement à 7g/l, puis une diminution des concentrations. Une stratégie d'échantillonnage à 15 minutes est moins efficace pour appréhender la concentration que la stratégie déjà en place.

Stratégie d'échantillonnage en place à poro, asservie uniquement sur la hauteur d'eau.

Stratégie d'échantillonnage basée sur un prélèvement déclenché sur une hauteur d'eau fixe, puis un échantillonnage à pas de temps fixe (40 et 15 min).

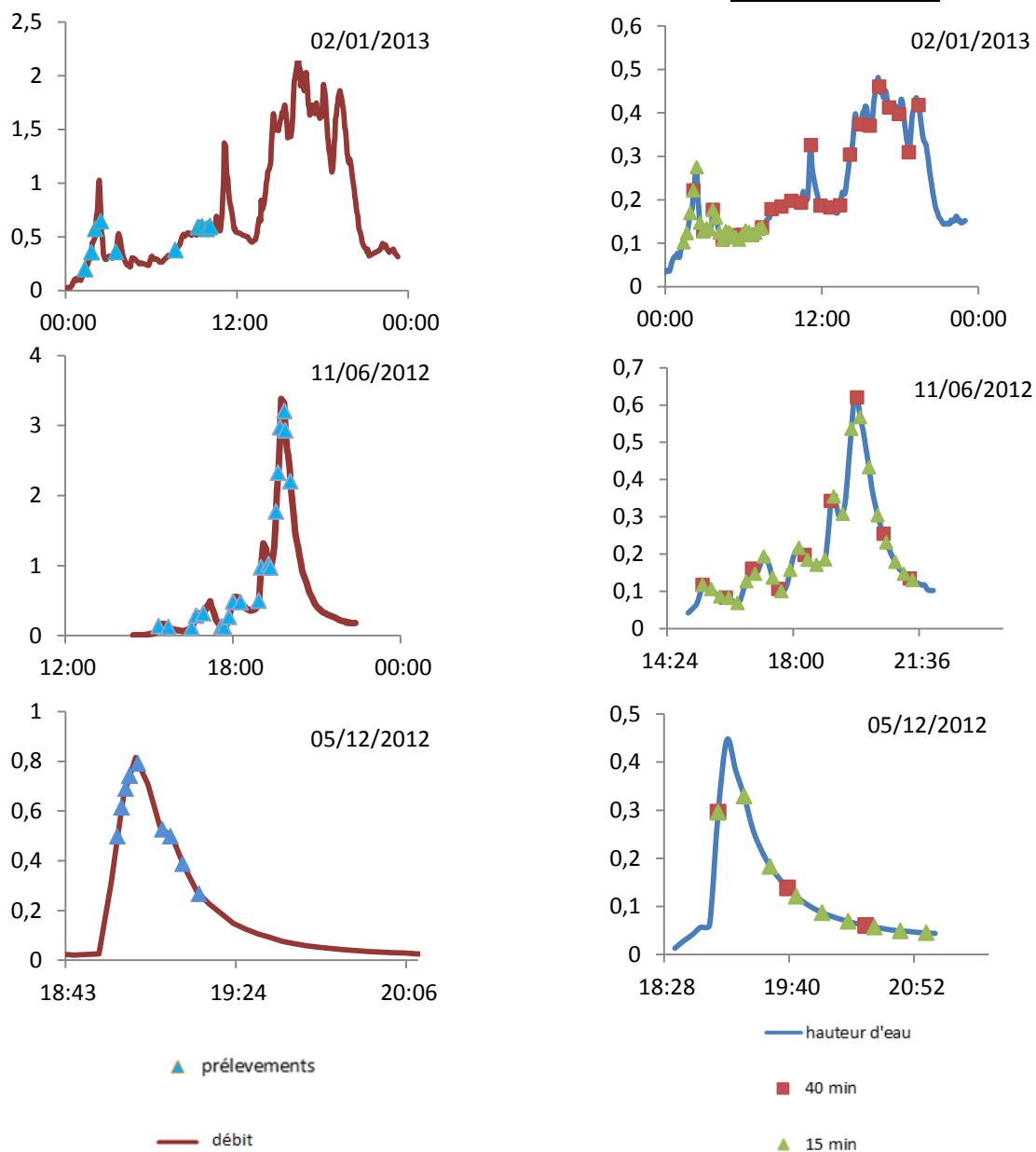


Figure 32 : présentation de plusieurs stratégies d'échantillonnages à Poro. En haut : Poro aval, crue du 02/01/2013, au milieu : Poro aval crue du 11 :06/2012, en bas Poro Amont crue du 05/12/2012.

Finalement à Poro la stratégie d'échantillonnage déjà en place paraît performante, d'autant qu'elle permet d'échantillonner le first flush comme nous pouvons le constater sur l'épisode du 05/12/12 de la figure 35. Cependant elle a des failles. Lorsque la hauteur d'eau dans la section de mesure oscille autour d'une valeur seuil, alors l'Isco déclenche des prélèvements à chaque passage au-dessus et en dessous de la valeur et remplit ses flacons inutilement, comme pour le cas de la crue du cyclone Freda à l'aval le 02/01/2013 (cf figure 32 en haut à gauche). La stratégie de prélèvement d'un

échantillon toutes les 15 minutes paraît tout de même intéressante à l'aval, puisque nous n'observons presque jamais de first flush.

La stratégie d'échantillonnage peut aussi se faire sur un asservissement sur la turbidité. Dans la configuration actuelle à Poro elle ne pourrait pas être testée, mais on pourrait envisager de brancher la station Campbell à l'Isco afin que l'Isco prenne en compte les variations de turbidité. Cette stratégie pourrait permettre de prélever pendant les pics de concentration indépendamment du volume mais ne permettrait pas d'échantillonner des épisodes faibles qui n'auraient pas généré de volume ruisselant suffisant pour déclencher des prélèvements, puisque le capteur est installé à 10 cm du fond du canal pour des raisons de contraintes techniques d'utilisation. Cette hauteur entre capteur et le fond du canal nous empêcherait aussi d'observer le first flush.

Enfin l'asservissement pourrait se faire sur des variations de hauteurs d'eau. A partir d'un seuil de prélèvement suffisamment faible pour échantillonner le first flush, le prochain prélèvement est déclenché lorsqu'une certaine variation de hauteur d'eau est enregistrée. Ainsi nous éviterions le risque de battillage autour d'un niveau seuil. La variation de niveau d'eau pourra être fonction du niveau d'eau de façon à ce qu'avec 24 flacons nous puissions échantillonner des faibles aux très forts débits. Cette stratégie est utilisée sur les petits bassins versants à forte pentes de Draix (Alpes de Haute Provence) et s'avère efficace (MATHYS, 2006).

4.5.7 Erreurs liées aux méthodes d'interpolation

Même les épisodes échantillonnés laissent place à l'interprétation lors de l'interpolation. En effet, le pic de débit n'a pas forcément été échantillonné, or une faible variation de la valeur de la concentration durant un pic de débit va beaucoup faire varier le flux de matière. De même, la présence d'un first flush a un impact sur la quantité finale de matière en suspension ayant transité dans le seuil pendant l'épisode pluvieux. Par exemple pour l'épisode 315 (figure 33), l'interpolation initiale donne un flux total de 9600 kg.

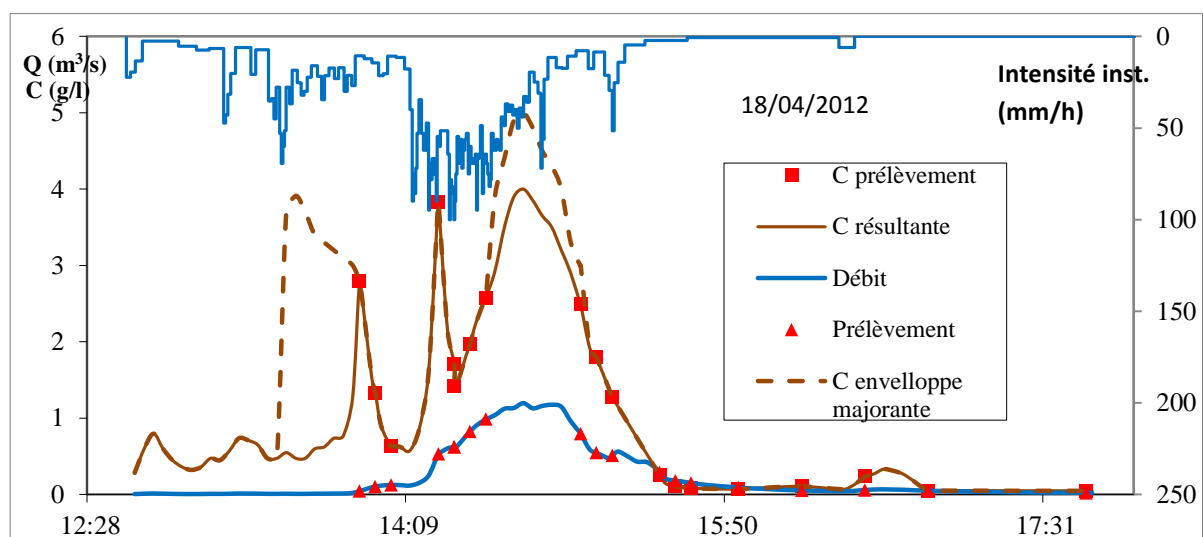


Figure 33 : graphique représentant le débit et la concentration de l'épisode 315 à l'amont en fonction du temps. C résultante représente la concentration déduite de l'interpolation des concentrations prélevées.

Si nous rajoutons la présence d'un first flush au niveau du premier pic d'intensité, ce qui est probable au regard des autres épisodes qui ont été bien échantillonnés à l'amont, nous rajoutons 40 kg de MES seulement car le débit est très faible. En revanche si nous augmentons la concentration au

niveau du pic de débit de 1 g/l, nous rajoutons un peu plus de 1600 kg de MES, soit 17% de la quantité de MES initialement calculée.

Pour chaque épisode qui a été échantillonné et qui laisse place à une part d'interprétation il faut calculer le flux de matière en suspension dans le cas le plus pénalisant. C'est-à-dire en augmentant la concentration du pic si le pic de débit est situé entre deux prélèvements sans avoir été prélevé lui-même, ou en créant un first flush pour les épisodes qui n'ont pas eu de prélèvement au niveau des premiers pics d'intensité. Pour savoir dans quelles mesures augmenter les concentrations, il faut analyser les épisodes du même bassin versant qui ont été bien échantillonnés.

En recalculant les flux de l'année 2012 avec l'interpolation la plus pénalisante, tout en restant cohérent avec ce qui est probable lors de l'analyse des épisodes bien échantillonnés, l'augmentation du flux à l'amont est de 26 %, elle est de 13 % à l'aval.

4.6 Conclusions et recommandations

Il n'est pas possible d'estimer de façon exacte une production de MES car les données nécessaires sont-elles même entachées d'incertitude.

La sensibilité de l'estimation de la production de MES a été testée en mettant en évidence les différentes sources d'erreur possibles.

Le flux de matières en suspension a été recalculé en considérant les sources d'erreur.

Le tableau 19 présente la variabilité du résultat sur le flux de MES de tous les épisodes échantillonnés de l'année 2012 (année légale) en fonction des différentes erreurs considérées.

	Erreur incertitude (1) %	Erreur incertitude (2) %	Erreur incertitude (4) %	Erreur incertitude (3), (5) et (6)
amont	+/- 30	-7	+ 27	Non quantifiées
aval	+/- 10	-8	+ 14	
recommandations	-faire des jaugeages -installer une sonde de niveau d'eau capable d'enregistrer des variations rapides		-présenter plusieurs interpolations possibles -utiliser un catalogue de référence des épisodes bien échantillonnés	-calibrer un turbidimètre -programmer l'Isco et son module 720 -tester plusieurs stratégies -faire des prélèvements manuels sur la section mouillée lors de crues

Tableau 19 : erreur sur le résultat du flux de matière en suspension des épisodes interpolés de l'année 2012 en fonction des erreurs (1, 2, 3, 4, 5, ou 6). La numérotation des erreurs est en référence au paragraphe 4.5.1

Il est important d'établir sur la section de mesure des débits une bonne courbe de tarage. Cette courbe de tarage doit être initialement issue d'une modélisation hydraulique qui prend en compte la topographie de la section de mesure mais il faut l'améliorer en effectuant des jaugeages manuellement pendant les crues. Pour cela la section doit être adaptée à la pratique de jaugeage par la présence d'une passerelle par exemple, de façon à pouvoir jauger au moulinet en sécurité et sans

gêner l'écoulement. Sinon l'utilisation d'un SVR pour jauger peut être utile dans le cas où il n'y a pas de passerelle.

La sonde de mesure de hauteur d'eau dans le canal doit être fiable il est donc recommandé d'en utiliser une deuxième pour comparer les valeurs en cas de valeurs aberrantes ou de déviation. Pour vérifier que la sonde de hauteur d'eau fonctionne bien sans déviation, il est utile de filmer l'échelle limnigraphique du canal avec une caméra étanche pendant une crue, ce qui a été fait à Poro lors de la crue du 02 avril 2013 et de comparer les valeurs filmées aux valeurs de la sonde.

La qualité de l'interpolation est importante, donc lorsqu'une crue est particulièrement bien échantillonnée (montée de crue, pic et descente), il faut la classer dans un catalogue qui servira de référence pour tous les épisodes ayant lieu sur le même bassin versant, ou lui attribuer un code qualité maximum afin de pouvoir repérer cet épisode dans les données. Ces épisodes bien échantillonnés serviront à l'interpolation des épisodes moins bien échantillonnés. De plus lorsque le flux d'un épisode est calculé par interpolation, il faut présenter le résultat sous la forme d'une courbe enveloppe présentant l'interpolation probable minimum et maximum pour savoir dans quelle gamme de flux l'épisode se situe.

Enfin lors de l'analyse des échantillons l'usage d'une seringue pour prélever les 60mL de liquide à filtrer est intéressant car elle permet un prélèvement homogène dans le bécher. C'est un bon compromis entre sa précision et sa facilité à prélever de façon homogène. Dans le laboratoire dans lequel j'ai fait les manipulations, la balance de précision était précise de façon optimum pour des masses supérieures à 0,1 g. Donc lorsque que les échantillons étaient faiblement concentrés (de couleur très claire) je filtrais autant de mL qu'il était nécessaire pour me rapprocher des 0,1 g lors de la pesée. Souvent le volume de la seringue suffit, mais parfois il faut le doubler ou le tripler. Les erreurs occasionnées par les manipulations sont dépendantes de l'opérateur et du matériel utilisé mais sont inévitables. Les flacons de l'Isco doivent être propres avant le prélèvement. Il faut donc au moins les rincer à l'eau claire après chaque prélèvement.

La stratégie d'échantillonnage basée sur un asservissement sur la hauteur d'eau n'est pas toujours satisfaisante à Poro. La stratégie basée sur des variations de niveau d'eau paraît intéressante à tester. Une stratégie doit être adaptée à chaque bassin versant.

5. Modélisation Pluie-Débit du bassin versant de Poro par le logiciel HEC-HMS

5.1 Introduction

Une modélisation pluie-débit à Poro permettra de reproduire l'hydrogramme des épisodes pour lesquels il n'y a pas de données sur les débits. De plus HEC HMS possède un modèle de modélisation des flux de matières en suspension. Ce modèle aussi à terme de modéliser l'évolution de la concentration en fonction de l'hydrogramme pour chaque épisode, et de reconstituer les flux des épisodes qui n'ont pas été échantillonnés.

Après avoir traité les données reçues de la Davar, et analysé les caractéristiques du bassin versant de Poro, nous avons cherché à établir grâce au logiciel HEC HMS un modèle en pluie débit du bassin versant. En effet, puisque qu'il est impossible de connaître tous les paramètres qui influent le ruissellement du bassin versant il était nécessaire de disposer d'un modèle avec une structure simple qui nécessite peu de données d'entrées et disposant d'une bonne précision (SHARIFI et al, 2004). HEC HMS remplit tous ces critères à la fois et a été utilisé avec réussite dans de nombreuses études correspondant à des bassins versant variés (GARCIA et al, 2008, ; AREKHI et al, 2011 ; AZARGRA, 1998). La réponse hydrologique du bassin versant est alors décrite par le biais de deux fonctions, l'une relative à la production, c'est-à-dire la transformation de la pluie brute en pluie nette qui va pouvoir ruisseler, et l'autre relative au transfert de la pluie nette jusqu'à l'exutoire du bassin. Le but recherché est de trouver quelle transformation il faut appliquer au hyétogramme mesuré sur le bassin pour obtenir l'hydrogramme de crue observé à l'exutoire, sans chercher à reproduire en détail les processus physiques.

5.2 Description du modèle HEC HMS

HEC HMS est un modèle événementiel, il simule un seul épisode pluvieux, qui peut durer de quelques heures à quelques jours. C'est un modèle global car les variations spatiales sont moyennées ou ignorées et déterministe. HEC HMS propose des méthodes à la fois empiriques et conceptuelles. : HEC-HMS permet à la fois l'entrée de paramètres que l'on peut physiquement mesurer sur le terrain ou déduire par des méthodes basées sur des mesures et de paramètres que l'on ne peut pas connaître et que l'on doit trouver en calant le modèle avec les valeurs connues d'entrées et de sorties.

5.2.1 Choix de la fonction de production : la méthode du SCS - CN

Cette méthode du SCS (Soils Conservation Service) est retenue en raison de sa robustesse à reproduire la relation pluie-débit dans plusieurs contextes (TYAGI et al, 2008 ; MARY J MACH, 1995) sous réserve d'un ajustement du CN (Curve Number), au contexte local. La méthode est applicable sur des bassins versants allant de 0.25 ha à 100 km² (SCS, 1972). De plus ce modèle est adapté pour rendre compte des conditions initiales d'humidité des bassins versant à l'échelle événementielle.

La méthode du SCS est une fonction de production basée sur une méthode empirique qui détermine la lame d'eau ruisselée en fonction de la pluie précipitée par une formule qui permet de prendre en compte la décroissance de la capacité d'infiltration au cours de l'épisode :

$$Q = \frac{(P-ia)^2}{p-ia+S} \quad \text{avec } S = \left(\frac{1000}{CN} - 10\right) * 25,4$$

Où P est le volume total d'eau précipitée (mm) ; Q est la pluie efficace cumulée (mm) ; Ia est la perte en eau initiale via les phénomènes d'interception, d'infiltration et de stockage de surface (mm) et S la rétention maximale potentielle (mm).

Le Curve Number varie entre 0 et 100. Plus le Curve Number est élevé, plus le ruissellement est important. Il est déterminé par croisement de l'occupation du sol et des caractéristiques pédologiques du sol selon des tables établies par l'USDA (United States Department of Agriculture, 1986). Tous les sols sont classés selon leur capacité à drainer l'eau verticalement. Les classes évoluent de A à D, du plus drainant au plus imperméable selon la texture des sols.

5.2.2 Choix de la fonction de transfert

Le logiciel HEC-HMS dispose de plusieurs fonctions de transfert : hydrogrammes unitaires de Clark, Snyder et SCS, hydrogrammes définis par l'utilisateur, transformation de ModClark et onde cinématique. Parmi ces méthodes, l'hydrogramme unitaire de Clark est fréquemment utilisé pour une modélisation événementielle.

La méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark représente 2 processus ; la translation et l'atténuation. La translation est basée sur un histogramme synthétique temps-surface avec un temps de concentration. L'histogramme représente la superficie du bassin qui contribue à l'écoulement à l'exutoire en fonction du temps. L'atténuation est modélisée par un réservoir linéaire.

5.3 Calages

5.3.1 Méthode

La calibration est un processus systématique d'ajustement des paramètres du modèle jusqu'à ce qu'il reproduise fidèlement les données observées. KLEMES [1986] a proposé un cadre conceptuel pour l'essai de modèles hydrologiques basé sur entre autres une prémisse : les critères sont calculés en comparant les estimations du modèle avec les observations.

5.3.2 Choix des épisodes

Les épisodes ont des réactions différentes selon l'état hydrique du bassin versant avant l'épisode. Nous avons donc 3 épisodes de calage classés selon la quantité de pluie tombée précédemment. Avec une pluie de 311 mm 3 jours avant l'épisode 19, cet épisode est classé comme très humide. L'épisode 230 suit environ 30 jours sans épisodes pluvieux importants, le bassin versant est sec et les décanteurs vident avant cet événement, il donc classé comme sec. Le tableau 21 présente les 3 épisodes de calage, avec la pluie précipitée, 48 h, 1 semaine et 1 mois avant.

	Nom épisode	Pluie (mm)	P 48h (mm)	P 1 semaine (mm)	P 1 mois (mm)	CE am	CE av	Date
Très humide	19	97	37	311	414	0,8	0,36	08/02/09
Humide	175	112	54	64	198	0,77	0,27	17/01/11
Sec	230	95	12	29	186	0,56	0,20	24/05/11

Tableau 20 : présentation des épisodes de calage

5.4 Episodes de validation

L'épisode 66 qui a une forte pluie précipitée dans la semaine précédente permet de valider la condition dite « très humide » avec laquelle les paramètres du modèle ont été ajustés pour caler

l'épisode 19. De même l'épisode 43 avec l'épisode de calage 175 et l'épisode 15 avec l'épisode de calage 230.

	Nom épisode	Pluie (mm)	CE am	CE av	P 48h (mm)	P 1 semaine (mm)	Date
Très humide	66	108	0,78	0,38	88	145	21/05/2009
Humide	43	188	0,70	0,62	70	91	23/03/09
Sec	15	269	0,77	0,27	3,5	3,5	05/02/09

Tableau 21 : présentation des épisodes de validation

5.5 Modélisation du bassin versant de Poro

A Poro nous disposons des mesures de débits du bassin versant amont mesurées à l'exutoire amont et des mesures de débit du bassin versant aval mesurées à l'exutoire aval. Le bassin versant complémentaire représente la différence entre le bassin versant amont et aval.

Avec cette modélisation par sous bassins versants (figure 34), le débit du bassin versant aval est considéré comme la somme du débit du bassin versant amont et du bassin versant complémentaire.

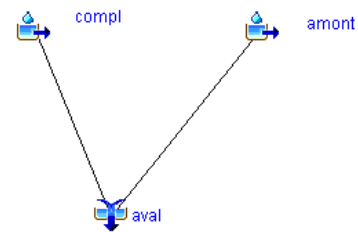


Figure 34 : représentation du bassin versant de Poro avec HEC HMS

5.6 Résultats du calage et de la validation

Les données d'entrées du modèle sont la pluie du bassin versant amont, la pluie du bassin versant complémentaire et les paramètres du modèle présentés dans le tableau 22.

	amont	complément
Surface (km ²)	0,09	0,204
Impervious (%)	0	0
Tc (hr)	0,25	0,3
Storage coefficient (hr)	0,125	0,15

Tableau 22 : paramètres appliqués aux bassins versants de la modélisation HEC HMS

Pour chaque épisode l'erreur sur le volume ruisselé simulé est calculée par

$$e (\%) = \frac{|Volume\ observé - Volume\ simulé|}{Volume\ observé} * 100$$

L'erreur sur les débits maximum est calculée par :

$$e (\%) = \frac{|Q_{max\ observé} - Q_{max\ simulé}|}{Q_{max\ observé}} * 100$$

Nous constatons lors du calage que pour modéliser un épisode dit très humide il faut augmenter le CN du bassin versant complémentaire jusqu'à 60, alors que pour l'épisode 175 dits humide, l'augmentation du CN doit être moins importante.

Nous proposons de modifier les paramètres CN et la du modèle, en fonction de la classification sec, humide ou très humide de l'épisode.

Les tableaux 23, 24 et 25 présentent les résultats des calages et des validations.

Le tableau 23 présente les résultats pour les épisodes dits sec. L'épisode 230 est calé avec un CN amont de 90, un CN du bassin versant complémentaire de 15 et une pluie d'interception commune de 15 mm. Les résultats de la modélisation sont bons. Le modèle estime bien le volume ruisselé à l'amont et à l'aval, et il reproduit aussi correctement la forme de l'hydrogramme (cf figure 35). Nous constatons que l'épisode 15 valide les paramètres choisis avec l'épisode de calage 230. Le volume amont est sur estimé de plus de 40 %, mais comme nous pouvons le voir en annexe 27, le modèle reproduit bien les pics de débits principaux.

Episodes dit sec CN am = 90 ; CN comp = 15 la am = la av = 15	Erreur (%) sur le :			
	Volume aval	Volume amont	Q max aval	Q max amont
230 (calage)	5,3	9,8	10,6	9,1
15 (validation)	4,3	44	12	10

Tableau 23 : performances du calage et validation des épisodes dits secs

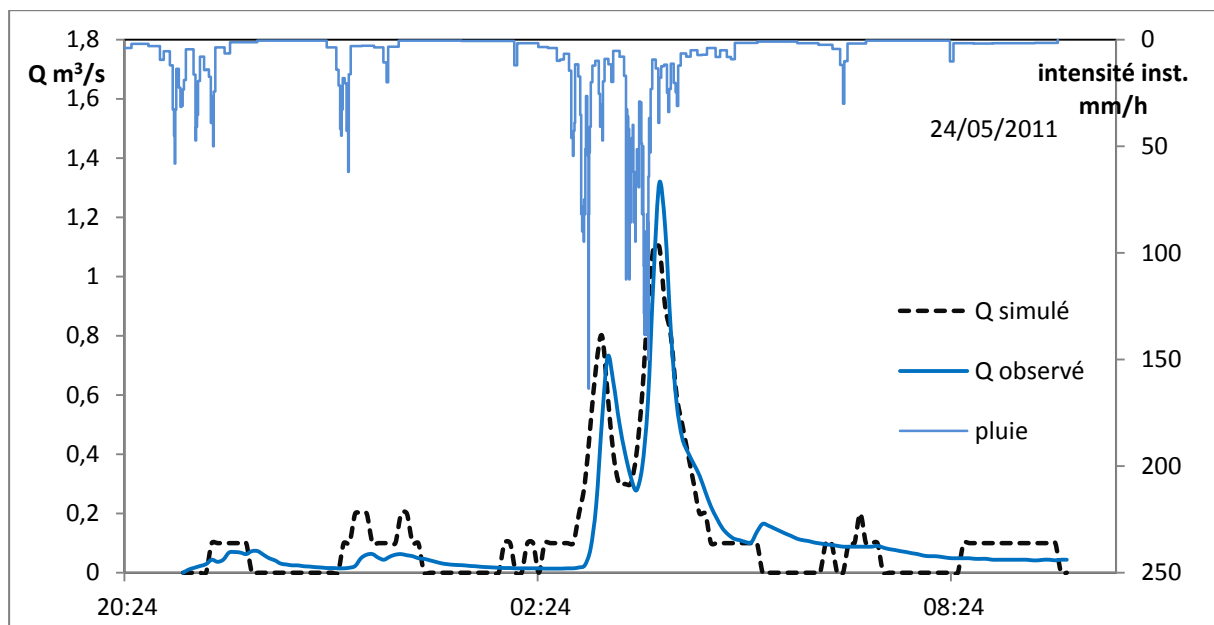


Figure 35 : résultats de modélisation de l'épisode 230 par HEC HMS à l'exutoire aval

Le tableau 24 présente les résultats des simulations pour les épisodes dits humides. Les paramètres choisis sont pertinents pour caler correctement l'épisode 175 à l'aval. A l'amont le modèle sous-estime le volume et le débit de pointe, mais la forme de l'hydrogramme modélisé (cf annexe 28) est satisfaisante. En revanche l'épisode 43 est sous-estimé par le modèle à l'aval. Pour cet épisode il y avait un fort débit de base à l'aval (plus de 200 l/s), or le débit de base n'est pas pris en compte dans la constitution du modèle qui démarre l'hydrogramme à zéro. En modélisant un débit de base, le modèle estime le volume ruisselé avec une erreur de seulement 6 % par rapport au volume observé, mais surestime les débits de pointes.

Episodes humides CN am = 90 ; CN comp = 30 la am = la comp = 10	Erreur (%) sur le :			
	Volume aval	Volume amont	Q max aval	Q max amont
175 (calage)	2	13,6	26,5	17
43 (validation)	60	16	12	5

Tableau 24 : performances du calage et validation des épisodes dits humides

Le tableau 25 présente les résultats des simulations pour les épisodes dits très humides. Les paramètres choisis sont pertinents pour caler correctement l'épisode 19 à l'amont et à l'aval. L'épisode 66 est bien modélisé à l'amont, même si le pic de débit est surestimé par le modèle la forme de l'hydrogramme est correcte. En revanche le modèle surestime largement le volume ruisselé aval.

Episodes très humides CN am=95 CNcomp=60 la am = la comp =10	Erreur (%) sur le :			
	Volume aval	Volume amont	Q max aval	Q max amont
19 (calage)	8,8	5	4,8	11,5
66 (validation)	32	3,1	78	50

Tableau 25 : performances du calage et validation des épisodes dits très humides

5.7 Conclusion

La modélisation mise en place est capable de modéliser correctement un événement pluie-débit, mais l'application des paramètres de calage pour modéliser d'autres épisodes à priori similaires est difficile.

Le modèle est plus efficace sur la modélisation du bassin versant amont que du bassin versant total aval. Le bassin versant amont étant un bassin versant homogène et petit, la modélisation est plus précise. En revanche la complexité du bassin versant aval rend la modélisation moins bonne. Le bassin versant aval est hétérogène, avec une partie végétalisée représentant 20% de la superficie totale et le reste complètement dénudé. Il est en partie alimenté par des sources dont on ne connaît pas la dynamique, et il est fortement probable, comme c'est le cas dans d'autres massifs miniers que des phénomènes pseudo-karstiques mettent en jeu des écoulements souterrains complexes. De plus, le bassin versant aval est perturbé par des dysfonctionnements d'ouvrages de gestion des eaux. Le débit observé à l'exutoire aval n'est donc pas forcément l'exacte représentation de la réalité.

D'une part la particularité des événements rend la modélisation difficile. D'autre part c'est la complexité du bassin versant aval qui est difficile à reproduire.

Il faudrait envisager de changer de fonction de production et/ou de transfert qui s'adapterait mieux à la complexité du bassin versant aval. La fonction de transfert de l'onde cinématique paraît intéressante. Il faudra peut-être séparer les épisodes en plusieurs catégories comme cela a été fait (de sec à très humide) mais en ajoutant d'autres conditions, par exemple sur l'intensité maximale de la pluie, le débit de pointe, la durée de la crue, la saisonnalité.

6. Conclusion générale

La volonté d'une exploitation plus durable des mines de nickel en Nouvelle Calédonie impose de maîtriser les flux de matériaux en suspension, afin qu'ils n'impactent pas les milieux aval.

Les fortes pentes des bassins versants miniers, le faible taux de couvert végétal, l'activité permanente de la mine et les précipitations intenses d'un milieu tropical humide font du petit bassin versant minier calédonien un milieu très réactif, et prédisposé à une forte érosion.

Dans le cadre du projet CNRT « fonctionnement des petits bassins versants miniers », le projet Hydromine, vise à expliquer le fonctionnement hydro-sédimentaire du bassin versant instrumenté de Poro. D'une part, la compréhension du fonctionnement hydrologique permettra l'amélioration de la gestion des eaux sur mines. D'autre part, afin de maîtriser les flux de matériaux solides transportés par suspension vers l'aval, leur quantification est étudiée.

Le bassin versant de Poro est instrumenté depuis 2009. Les données recueillies et traitées sont au préalable validées et critiquées. Les épisodes ruisselants ont fait l'objet d'analyses afin de mieux comprendre la réponse hydrologique du bassin versant et de quantifier le flux de matières en suspension exporté par le bassin versant.

Les épisodes les plus forts en précipitations n'ont pas forcément les coefficients de ruissellement les plus forts, mais tous les coefficients de ruissellement les plus forts sont ceux pour lesquels le temps sec de l'épisode pluvieux était très faible. A l'aval, les coefficients d'écoulement sont plus faibles qu'à l'amont, et le fait que le bassin versant aval soit plus végétalisé et qu'il existe des bassins de rétention entre l'exutoire amont et l'exutoire aval n'expliquent pas totalement cette différence. Nous avons pu constater sur le terrain des dysfonctionnements d'ouvrages de gestion des eaux, deux cassis ne détournent pas la totalité des eaux de ruissellement pour un épisode pluvieux pourtant moyen. Cette perte en eau de ruissellement pourrait expliquer en partie les coefficients de ruissellement plus faibles à l'aval. L'étude de l'épisode exceptionnel du 24 décembre 2011, qui a provoqué une lame d'eau précipitée de 500 mm en 24h à Poro montre qu'il est probable que les zones drainées par les deux cassis en question ont été en partie seulement dirigées vers l'exutoire aval durant la crue, le reste ayant pris la direction des pistes en dehors du bassin versant.

La méthode d'interpolation des concentrations est utilisée pour calculer le flux des crues échantillonnées. Un modèle de prédiction des flux est utilisé pour estimer les flux des épisodes qui n'ont pas été échantillonnés. A l'exutoire aval, les flux des épisodes qui ont été échantillonnés représente en moyenne 70 % du flux total.

Ainsi, depuis le début des mesures, jusqu'en 2012, environ 730 tonnes de matières en suspension ont été transportées vers l'aval, dont plus de 450 tonnes par l'épisode exceptionnel du 24 décembre 2011.

Cependant des incertitudes pèsent sur la quantification des flux des crues échantillonnées. Afin de les minimiser il faut effectuer des jaugeages en crue pour avoir une courbe de tarage la plus précise possible. L'estimation des flux de matières en suspension des crues échantillonnées doit être inspirée des épisodes bien échantillonnés du même bassin versant afin d'être le plus précis possible. Les stratégies d'échantillonnages des Isco doivent être étudiées et appropriées au site. A Poro il serait judicieux de tester une stratégie basée une variation de niveau d'eau, plutôt que sur un seuil de niveau d'eau.

Un modèle pluie-débit a été testé afin de modéliser l'hydrogramme amont et aval d'un épisode pluvieux important. Le logiciel utilisé est HEC HMS avec comme fonction de production la méthode du SCS-CN et comme fonction de transfert la méthode de l'hydrogramme unitaire de Clark.

La complexité du bassin versant aval tant du point de vue de son hétérogénéité, des perturbations sur la gestion de ses eaux de ruissellement et de son alimentation par des sources naturelles rend difficile la modélisation de son débit par le logiciel HEC HMS. Le modèle mis en place a besoin d'être amélioré, afin que, à terme, nous puissions envisager une modélisation du transport de matières en suspension.

BIBLIOGRAPHIE

Ouvrages et articles

ALEXANDROV Y., LARONNE J.B. **Suspended sediment transport in flash floods of the semiarid northern Negev, Israel.** IAHS Publ. 2003, p. 346-352

AREKHI S., ROSTAMIZAD G., et ROSTAMI N., **Evaluation of HEC-HMS Methods in Surface Runoff Simulation , Kan Watershed, Iran.** Advances in Environmental Biology, 2011, p 132 -137.

AZAGRA E. **Rainfall-Runoff in the Guadalupe River basin,** CE 397 GIS in water resource, 1998 p. 5-7.

BIDIN K., GREER T. **A spreadsheet-based technique (Lotus 1-2-3) for separating tropical forest storm hydrographs using Hewlett and Hibbert's slope.** Earth Surface Processes and Landforms, 1997, 237p.

BRYAN, R.B. **The influence of slope angle on soil entrainment by sheetwash and rainsplash.** Earth Surface Processes and Landforms, 1979, vol. 4, p. 43-58.

CAUDMONT S. et MAITREPIERRE L. **Atlas Climatique de la Nouvelle Calédonie,** Météo-France, 2007, 127p. ISBN 978-229527921

ELAHCENE O., REMINE B. **Corrélation Entre la Concentration en Matières en Suspension et le Débit Liquide Dans le Bassin Versant de Oued Bellah (Algérie).** European Journal of Scientific Research, 2009, Vol.26, n°1 , p.139-146

FORRAY N. **Chartre qualité de l'hydrométrie, code des bonnes pratiques.** Banque Hydro, 1998, 50 p.

GARCIA RUIZ. J.M., MARTI, C., ARMAEZ J., BERGUERIA S., LORENTE, A., SEEGER M. **Las cuencas experimentales de Arnás y San Salvador en el Pirineo central español: escorrentía y transporte de sedimento.** Cuadernos de Investigación Geográfica, 2000, p. 23-40.

GARCIA A., SAINZ A., REVILLA J. et ALVAREZ C. **Surface water resources assessment in scarcely gauged basins in the north of Spain.** Journal of Hydrology, 2008, p. 312-326.

HUANG, C. **Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas.** Soil Science Society of America Journal, 1995, n° 59, p. 982-990.

KINNELL, P.I.A. **Modelling erosion by rain-impacted flow.** Catena suplement, 1990, n° 17, p. 55-66.

KLEMES V. **Operational testing of hydrological simulation models.** Hydrological Sciences Journal 31, 1986, p. 13-24.

LANG M., Perret C., RENOUF E., SAUQUET E., PAQUIER A, **Incertitudes sur les débits de crue.** Archive ouverte d'Irstea, 2006, p 33-41

LE BISSONNAIS Y. **Analyse expérimentale des mécanismes d'érosion :la dégradation structurale superficielle et le détachement des particules des sols cultivés.** Ingénieries, 2000,n° 22, p. 27-36

LENZI M.A., et LORENZO, M. **Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy).** Catena, 2000, n° 39, p. 367-282

MARY J MACK, **Hydrologic evaluation of runoff; the soil conservation service curve number technique as an interactive computer model.** Computers & Geosciences, 1995, vol. 21, n°8, p.929-935

MEGNOUNIF A., TERFOUS A., GHENAIM A., POULET J., **Rôle des crues dans la production de sédiments transportés en suspension dans un cours d'eau des bassins versants méditerranéens.** VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier, 2004, 7 p.

MEYBECK M., PASCO A., RAGU A. **Evaluation des flux polluants dans les rivières. Pourquoi, comment et à quel prix.** 1994, 64 p.

MORAT P., JAFFRÉ T., VEILLON J M., MACKEE H. **Affinités floristiques et considérations sur l'origine des maquis miniers de la Nouvelle-Calédonie.** Bull. Mus. nat. Hist. nat, 1986, section B, n° 2 p. 133-182.

PICARD M., **L'archipel Néo calédonien 300 millions d'années pour assembler les pièces d'un puzzle géologique.** Centre de documentation pédagogique Nouvelle Calédonie, 1999, ISBN 2-913090-23-0

PITOISET A. **Le nickel en Nouvelle Calédonie, Maison de la Nouvelle Calédonie,** 2008, 17 p.

POESEN, J. **The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume.** Geomorph, Suppl.-Bd., 1984, n° 49, p. 117- 131

ROBINEAU B., Berthault L., Christmann P. **Nouvelle Calédonie terre de Nickel, Géosciences,** 2011 numéro 14, p. 50-59

ROCHE M.F., **dictionnaire français d'hydrologie de surface.** 1986, 288p. ISBN : 2-225-80739-6

ROMIEUX N. **Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de la Nouvelle Calédonie,** DAVAR-SESER-ORE, 2011, 82p.

ROOSE E.J. et LELONG F. **Les facteurs de l'érosion hydrique en Afrique tropicale.** Revue de géographie et de géologie dynamique, 1976, VOL 18, fasc. 4, p. 365-374

ROTARU E., LECOZ J., DROBOT R., ADLER M.J., DRAMAIS G. **ADCP measurements of suspended sediment fluxes in Banat rivers. Romania. Balwois, Ohrid, Macedonia.** 2006, p. 23-26

SHARIFI F., SAFAPOOR, S. et AYOOBZADE, S. **Evaluation of AWBM 2002 model in simulation of hydrological processes some of watersheds in Iran.** Journal of Research and Constructional, 2004, p. 35-42

SIBARI H., HAIDI S., AITFORA A. **Typologie des crues et érosion mécanique dans un bassin versant de zone semi-aride : bassin versant de l'Inaouène, Maroc.** Sciences et changements planétaires, 2001, p. 187-193.

Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Section4, Hydrology, Washington, 1972.

SOLER M., LATRON J. **Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountain Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees).** Institute of Earth Sciences, 2006.

TYAGI J.V., MISHRA, S.K., SING, R., Singh, V.P. , **SCS - CN based time - distributed sediment yield model**. Journal of Hydrology, 2008, p.388–403.

WILLIAM G.P. **Sediment concentrations versus suspended matter discharge during hydrologic events in rivers**. Journal of Hydrology 1989; p. 89–106.

WOODRUFF C.M. 1948 **Erosion in relation to rainfall, crop cover and slope on a greenhouse plot**. Soil Sc., 1948, p.475.

Thèses et mémoires de fin d'étude

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, Master/ENGEES, Université de Strasbourg, 2012, 100p.

GAUME E. **Elément d'analyse sur les crues éclairs**. Thèse de doctorat, de l'Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 2006, Paris, 376p.

GUYONNEAU A. **Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie**. Mémoire de fin d'étude, Master/ENGEES, Université de Strasbourg, 2012, 86p.

MATHYS N. **Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes-de-Haute-Provence)**. Thèse de Doctorat, Hydrologie, INP Grenoble, 2007, 346 p.

MOTTO A. **Analyse comparative du fonctionnement hydro sédimentaire de petits bassins versants miniers de Nouvelle Calédonie**. Mémoire de fin d'étude, Master/ENGEES, Université de Strasbourg, 93p.

NAVARROT L., **Analyse des flux solides et liquides du bassin versant minier de Poro en Nouvelle Calédonie pour la compréhension du fonctionnement des petits bassins versants miniers**, Mémoire de fin d'étude ,ENGEES , Université de Strasbourg, 2012, 100p.

RAYMOND S. **Incertitudes des flux transportés par les rivières (Matière en suspension, nutriments, sels dissous) Vers un système expert d'optimisation des méthodes de calcul**. Thèse de doctorat, Sciences de la Terre, Université François Rabelais de Tours, 2011, 292 p.

Colloque et séminaire

AVOINE J. **Evaluation des apports fluviaux dans l'estuaire de la Seine. La Baie de Seine**. Colloque National du CNRS, Paris, 24-26 avril 1985.

ESTEVE M., **Estimation des débits à partir des mesures de vitesses de surface**, Séminaire GIS Draix-Bléone, 11 juin 2013, communication orale.

Note technique

FRYSOU O. Hydromine, état initial. Diagnostic du réseau de drainage. Proposition d'aménagements des sections de mesure. Note Technique, DAVAR-SESER-ORE, 2007, 63 p.

Ressources internet

<http://www.cnrt.nc>

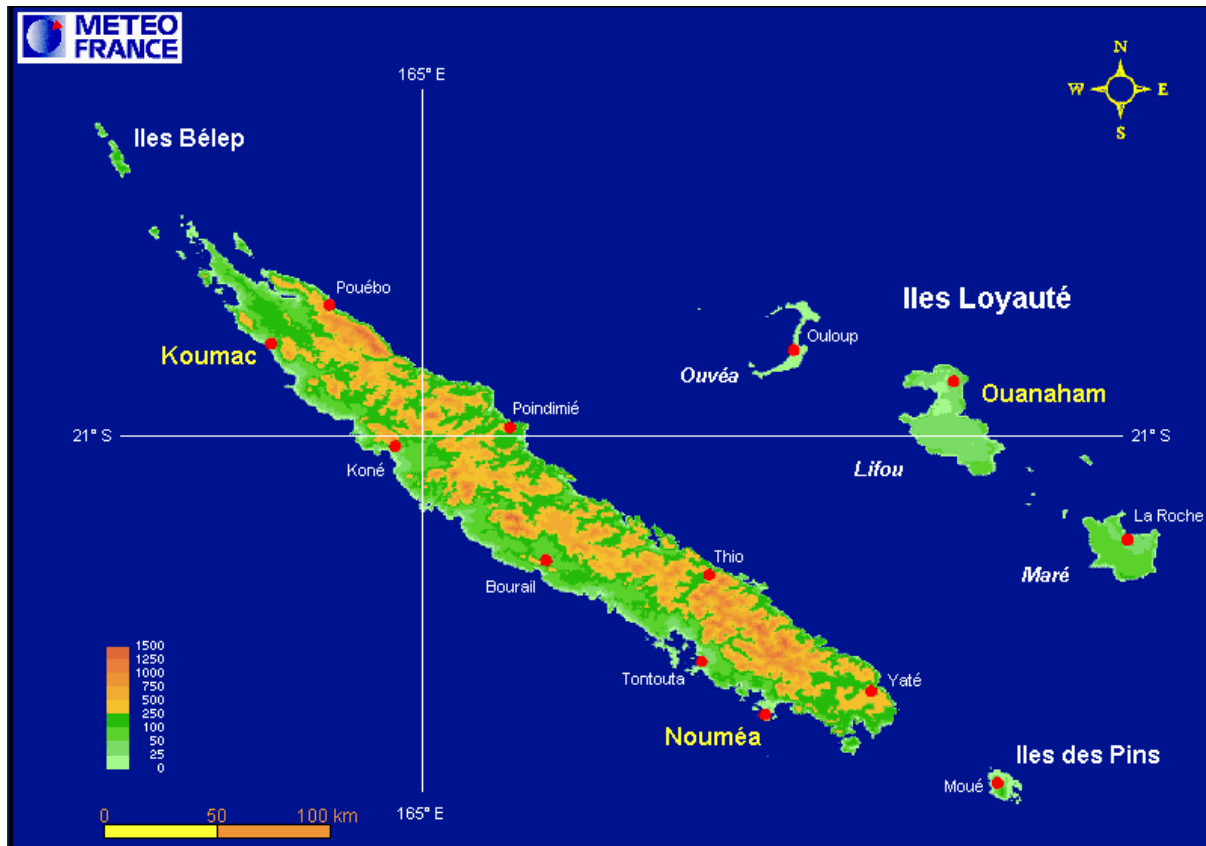
<http://www.meteofrance.com>

LISTE DES ANNEXES

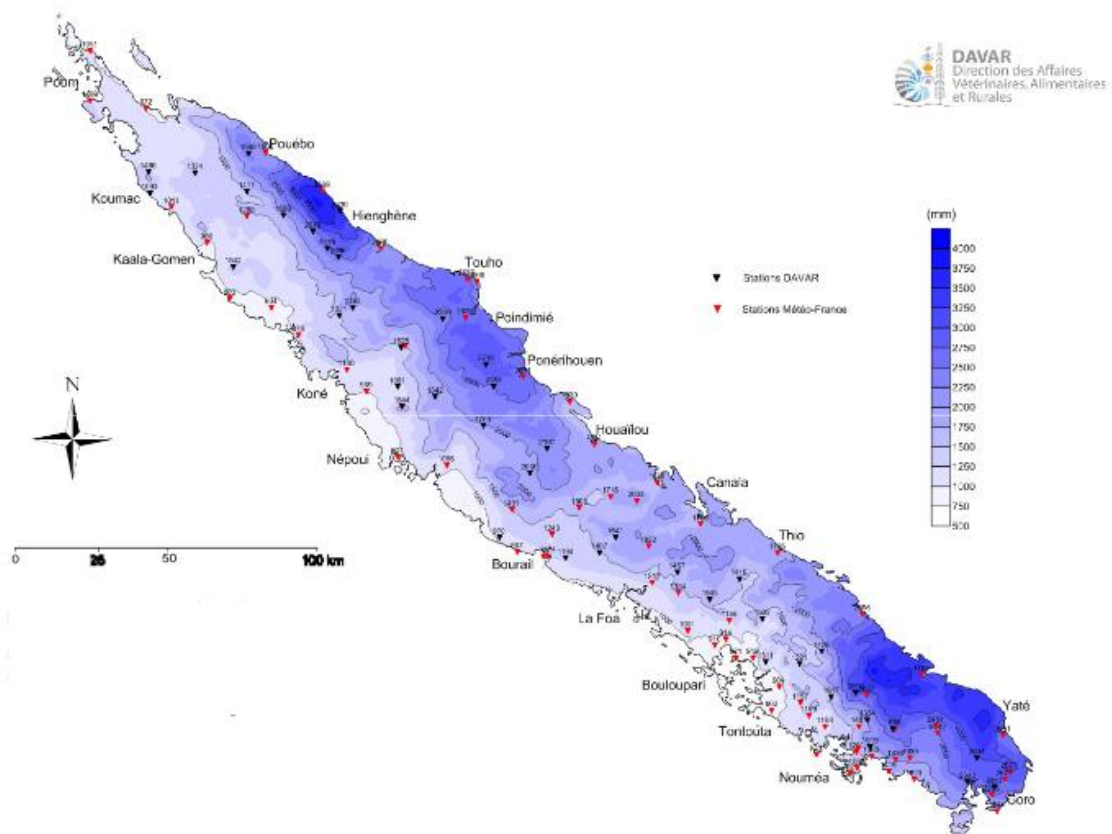
Annexe 1 : Carte topographique de la nouvelle Calédonie, (d'après Météo-France).....	68
Annexe 2 : Précipitation interannuelle moyenne sur la période 1990 – 2000, (d'après Davar).....	69
Annexe 3 : Quelques images de la biodiversité Calédonienne	70
Annexe 4 : Numérotation des flacons Isco dans leur boîtier. Bras articulé. Isco et boîtier de commande. Crépine et tuyau d'aspiration.....	71
Annexe 5 : Installation du turbidimètre à Poro aval	71
Annexe 6 : Programmation des Isco à Poro	72
Annexe 7 : Extrait du catalogue PQ.....	73
Annexe 8 : Détermination du début et de la fin du ruissellement.....	74
Annexe 9 : Anomalie dans l'hydrogramme de crue à Poro amont	74
Annexe 10 : Méthodologie pour l'analyse des concentrations, protocole de filtration.....	75
Annexe 11 : Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de Nouvelle Calédonie, d'après ROMIEUX, 2011, Davar, observatoire de la ressource en eau	76
Annexe 12 : Pluie enregistrée au pluviomètre aval en fonction de la pluie enregistrée au pluviomètre amont	77
Annexe 13 : Formules de de Kirpich et de Johnstone et Cross	77
Annexe 14 : Récapitulatif détaillé des 2 épisodes de crue les plus importants par an en production de MES. * fait aussi partie des 15 épisodes les plus forts en précipitations. ** pas de données sur décembre 2008.	78
Annexe 15 : Hydrogramme et hétérogramme de l'épisode du 24 décembre 2011 à Poro, à l'amont, l'aval et zoom sur le pic principal de l'amont et de l'aval	79
Annexe 16 : Cassis amont ne jouant pas son rôle lors de la crue du 02 avril 2013	81
Annexe 17 : Cassis aval ne jouant pas son rôle lors de la crue du 02 avril 2013.....	81
Annexe 18 : Episode 300 à Poro Aval. Exemple d'un épisode bien échantillonné.	82
Annexe 19 : Évolution de la concentration en fonction du débit à Poro amont et aval, cycle d'hystérésis	83
Annexe 20 : Flux des épisodes échantillonnés calculés par interpolation en fonction du flux estimé par les différents modèles à Poro aval et Poro amont et coefficients de corrélation	87
Annexe 21 : Présentation du modèle numéro 7 appliqué à Poro aval	89
Annexe 22 : Présentation du modèle numéro 2 appliqué à Poro amont	89
Annexe 23 : Tableau représentant l'erreur faite sur le débit en fonction de la gamme de débit uniquement en tenant compte de l'imprécision de la mesure de niveau d'eau	90
Annexe 24 : Graphique présentant le nombre de verticales à adopter lors d'un jaugeage au moulinet selon la largeur de la section. D'après FARRAY et al, 1998.	90
Annexe 25 : Dépôt de sédiments à l'entrée de la section de mesure à Poro Aval	91
Annexe 26 : Courbe de tarage et dispersion des jaugeages à Poro amont et aval	92
Annexe 27 : Résultats de simulation de l'épisode 15 amont par HEC HMS.....	94
Annexe 28 : Résultats de simulation de l'épisode 175 amont par HEC HMS.....	94

ANNEXES

Annexe 1 : Carte topographique de la nouvelle Calédonie, d'après Météo-France



Annexe 2 : Précipitation interannuelle moyenne sur la période 1990 – 2000, d'après Davar



Annexe 3 : Quelques images de la biodiversité Calédonienne



Mangrove de Nouvelle Calédonie. IRD
COSTE E.



Maquis minier, réserve botanique du barrage
de yaté, Nouvelle Calédonie



Fond marin de Nouvelle Calédonie
IRD, MELLIN C.



Lagon calédonien IRD, SERET B.

Annexe 4 : Numérotation des flacons Isco dans leur boîtier. Bras articulé. Isco et boîtier de commande. Crépine et tuyau d'aspiration



Annexe 5 : Installation du turbidimètre à Poro aval



- Poro amont

PARTIE 'A':

CONDITIONS EVENMT:

EVENMT01: HAUT. >0.050 m
EVENMT02: HAUT. >0.100 m
EVENMT03: HAUT. >0.150 m
EVENMT04: HAUT. >0.200 m
EVENMT05: HAUT. >0.250 m
EVENMT06: HAUT. >0.300 m
EVENMT07: HAUT. >0.350 m
EVENMT08: HAUT. <0.350 m
EVENMT09: HAUT. <0.300 m
EVENMT10: HAUT. <0.250 m
EVENMT11: HAUT. <0.200 m
EVENMT12: HAUT. <0.150 m
EVENMT13: HAUT. <0.100 m
EVENMT14: HAUT. <0.050 m

PARTIE 'B':

CONDITIONS EVENMT:

EVENMT01: HAUT. >0.360 m
EVENMT02: HAUT. >0.400 m
EVENMT03: HAUT. >0.500 m
EVENMT04: HAUT. >0.600 m
EVENMT05: HAUT. >0.700 m
EVENMT06: HAUT. >0.800 m
EVENMT07: HAUT. >0.900 m
EVENMT08: HAUT. <0.900 m
EVENMT09: HAUT. <0.800 m
EVENMT10: HAUT. <0.700 m
EVENMT11: HAUT. <0.600 m
EVENMT12: HAUT. <0.500 m
EVENMT13: HAUT. <0.400 m
EVENMT14: HAUT. <0.360 m

- Poro aval

PARTIE 'A':

CONDITIONS EVENMT:

EVENMT01: HAUT. >0.070 m
EVENMT02: HAUT. >0.100 m
EVENMT03: HAUT. >0.150 m
EVENMT04: HAUT. >0.200 m
EVENMT05: HAUT. >0.300 m
EVENMT06: HAUT. >0.450 m
EVENMT07: HAUT. >0.550 m
EVENMT08: HAUT. <0.570 m
EVENMT09: HAUT. <0.470 m
EVENMT10: HAUT. <0.400 m
EVENMT11: HAUT. <0.300 m
EVENMT12: HAUT. <0.200 m
EVENMT13: HAUT. <0.100 m

PARTIE 'B':

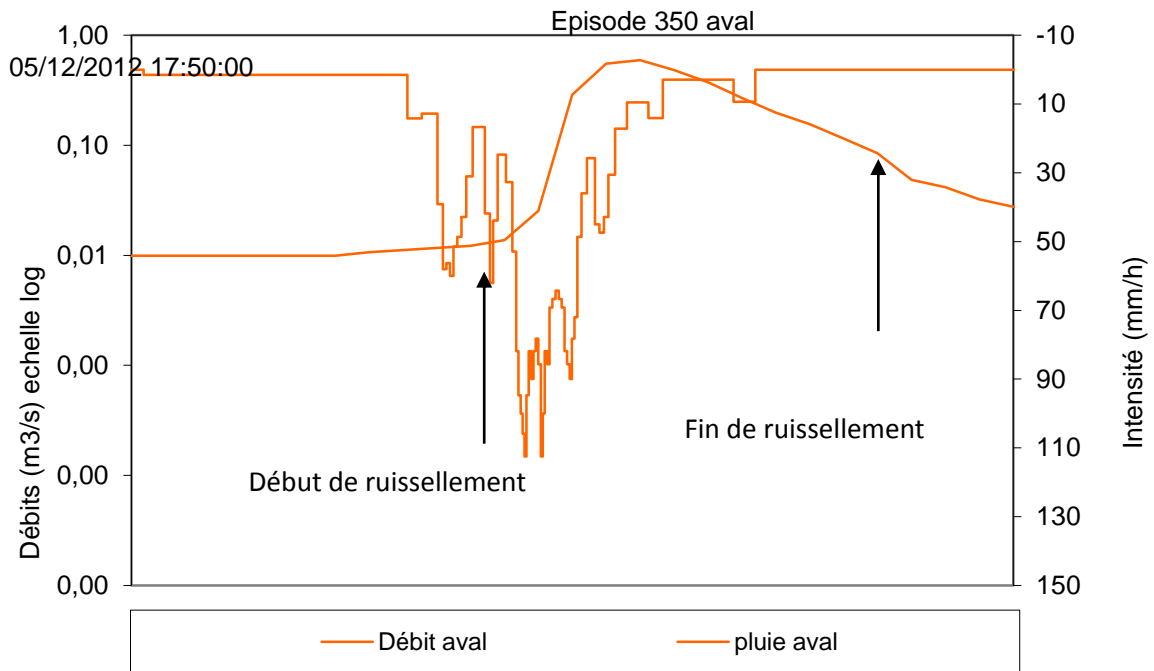
CONDITIONS EVENMT:

EVENMT01: HAUT. >0.600 m
EVENMT02: HAUT. >0.700 m
EVENMT03: HAUT. >0.800 m
EVENMT04: HAUT. >1.000 m
EVENMT05: HAUT. >1.200 m
EVENMT06: HAUT. >1.400 m
EVENMT07: HAUT. >1.600 m
EVENMT08: HAUT. <1.600 m
EVENMT09: HAUT. <1.400 m
EVENMT10: HAUT. <1.200 m
EVENMT11: HAUT. <1.000 m
EVENMT12: HAUT. <0.800 m
EVENMT13: HAUT. <0.700 m
EVENMT14: HAUT. <0.600 m

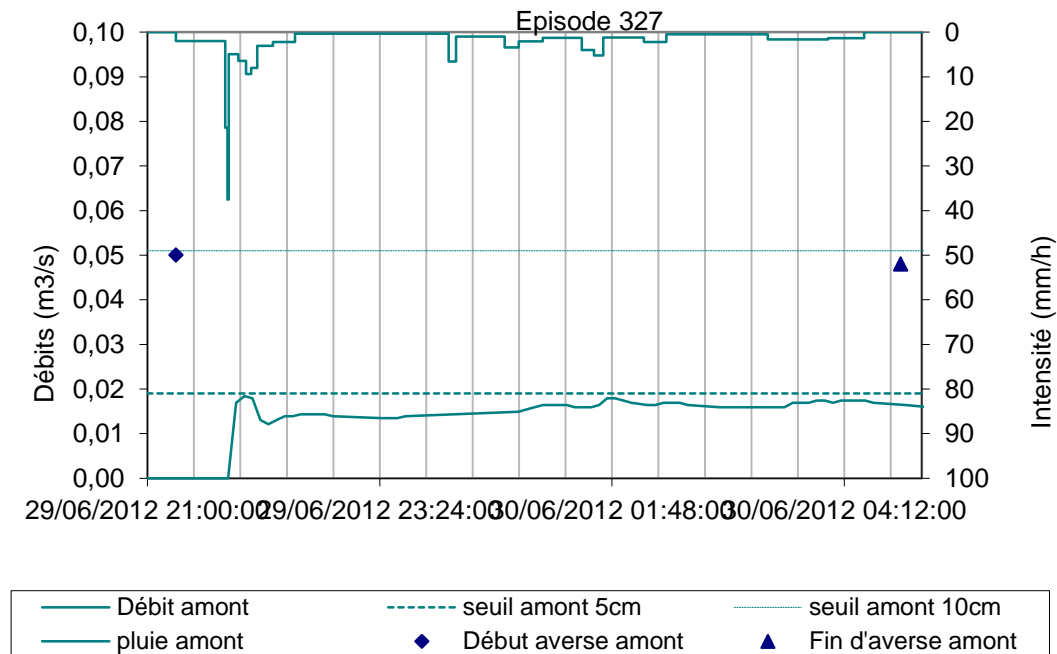
Annexe 7 : Extrait du catalogue PQ

Numéro épisode	Amont					AVAL				
	Début averse	Fin averse	Début ruiss	Fin ruiss	P	Début averse	Fin averse	Début averse	Fin averse	P
313	10/04/2012 04:29:22	10/04/2012 14:44:22	10/04/2012 07:34:51	10/04/2012 16:49:51	0	10/04/2012 04:48:29	10/04/2012 14:48:50			0
314	17/04/2012 17:15:29	18/04/2012 07:53:28	17/04/2012 17:19:51	18/04/2012 08:25:51	0	17/04/2012 17:16:48	18/04/2012 07:33:33			0
315	18/04/2012 11:44:14	18/04/2012 16:31:40	18/04/2012 12:43:51	18/04/2012 17:46:51	1	18/04/2012 12:36:55	18/04/2012 16:35:21	18/04/2012 13:15:00	18/04/2012 17:42:42	1
316	18/04/2012 18:14:49	18/04/2012 20:49:31	18/04/2012 20:01:51	18/04/2012 22:10:51	1	18/04/2012 19:42:00	18/04/2012 21:08:34	18/04/2012 20:12:42	18/04/2012 22:21:42	1
317	19/04/2012 04:50:43	19/04/2012 09:21:56	19/04/2012 04:55:51	19/04/2012 07:13:51	0	19/04/2012 04:49:34	19/04/2012 09:22:00	19/04/2012 04:36:42	19/04/2012 10:42:42	0
318	21/04/2012 00:48:33	21/04/2012 02:49:00	21/04/2012 00:46:51	21/04/2012 03:10:51	0	20/04/2012 23:03:54	21/04/2012 02:52:41	21/04/2012 02:39:44	21/04/2012 03:39:44	0
319	03/05/2012 22:45:00	04/05/2012 02:20:07	04/05/2012 02:15:00	04/05/2012 02:40:00	0	03/05/2012 22:01:59	04/05/2012 02:32:32			0
320	05/05/2012 10:14:27	06/05/2012 12:00:45	05/05/2012 17:25:00	06/05/2012 13:52:51	0	05/05/2012 10:16:19	06/05/2012 14:04:15	05/05/2012 17:18:58	06/05/2012 13:24:59	0
321	02/06/2012 12:51:26	02/06/2012 20:39:17			0	02/06/2012 12:45:22	02/06/2012 20:40:20			0
322	03/06/2012 17:34:13	03/06/2012 18:01:13	03/06/2012 17:40:51	03/06/2012 18:22:51	0	03/06/2012 17:14:12	03/06/2012 18:03:18			0
323	05/06/2012 15:18:53	06/06/2012 07:44:46	05/06/2012 18:16:51	06/06/2012 07:22:51	0	05/06/2012 15:25:22	06/06/2012 06:58:15	05/06/2012 21:46:28	06/06/2012 12:54:11	0
324	06/06/2012 16:47:39	06/06/2012 22:45:40			0	06/06/2012 16:48:35	06/06/2012 21:25:17			0
325	10/06/2012 19:29:22	11/06/2012 20:13:26	11/06/2012 06:20:00	12/06/2012 02:55:00	1	10/06/2012 19:21:56	11/06/2012 20:14:19	11/06/2012 11:17:11	11/06/2012 21:38:11	1
326	12/06/2012 13:53:27	12/06/2012 15:11:25			0	12/06/2012 13:10:55	12/06/2012 14:10:55			0
327	29/06/2012 21:17:40	30/06/2012 04:47:00	29/06/2012 21:55:00	30/06/2012 14:55:00	0	29/06/2012 21:19:11	30/06/2012 04:01:04			0
328	19/07/2012 23:18:35	20/07/2012 07:49:52	20/07/2012 00:29:43	20/07/2012 10:05:43	0	19/07/2012 23:14:29	20/07/12 08:01:44	18/09/2012 17:35:00	19/09/2012 05:50:00	0
329	20/07/2012 13:55:56	20/07/2012 14:48:54	20/07/2012 12:17:43	20/07/2012 18:50:43	0	20/07/2012 11:54:27	20/07/2012 15:52:50	20/07/2012 14:17:15	20/07/2012 15:20:37	0

Annexe 8 : Determination du début et de la fin du ruissellement



Annexe 9 : Anomalie dans l'hydrogramme de crue à Poro amont



Annexe 10 : Méthodologie pour l'analyse des concentrations protocole de filtration

Récupérer les échantillons de l'isco dans des bouteilles propres sur lesquelles sont mentionnés la date, le lieu et le numéro du flacon Isco correspondant

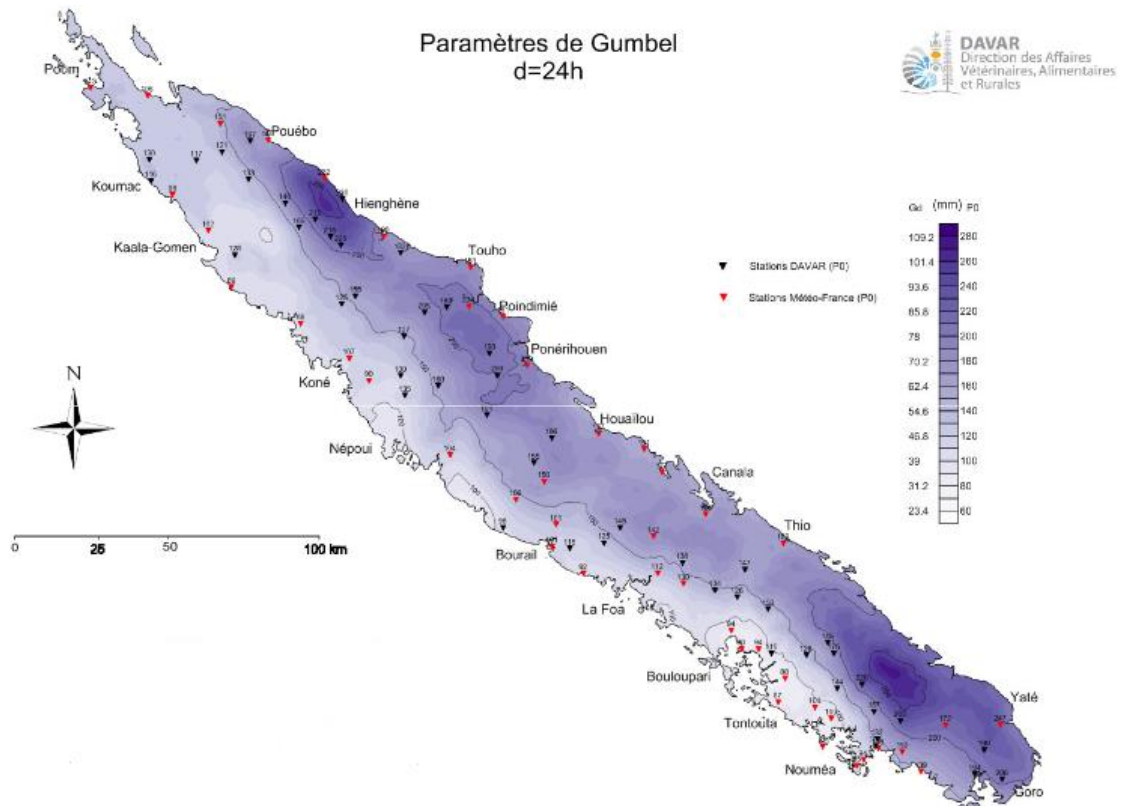
Matériels :

- grande quantité de bouteilles en plastique propres
- bêcher Kartell[®] de 500mL ou de 1L
- seringue de 60mL
- grande quantité de filtres Whatman[®] cat No1822-047 en microfibre de verre
- dispositif de filtration (pompe à eau ou pompe à vide) avec son entonnoir
- 1 étuve, 1 évier

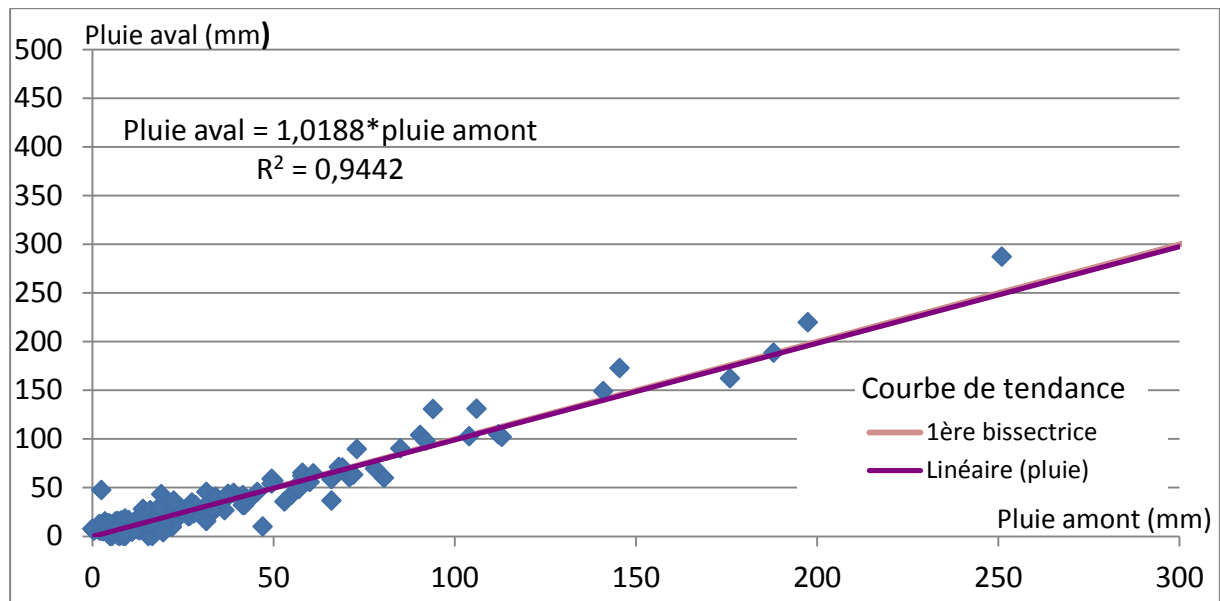
Méthode :

- mettre à l'étuve (60°C pendant 48h) des filtres vierges numérotés dans leur boîte de pétri, les mettre dans le dessiccateur, les peser directement après la sortie du dessiccateur.
- agiter la bouteille fortement pour homogénéiser le fluide
- la verser dans une bêcher d'au moins 500 mL agité avec un agitateur magnétique
- prélever de façon homogène 60 mL avec une seringue (prélever n fois 60mL si l'échantillon est faiblement concentré)
- verser le contenu de la seringue dans l'entonnoir du système de filtration, attendre que tout soit filtré, rincer l'entonnoir avec de l'eau claire à l'aide d'une pissette pour décoller les MES.
- récupérer délicatement le filtre avec une pince, et le mettre dans une boîte de pétri au préalablement numérotée.
- mettre le filtre dans sa boîte à l'étuve, à 60C° pendant 48 heures (si la boîte de pétri est en plastique, elle ne supportera pas plus de 60C°)
- mettre les filtres dans le dessiccateur pour qu'ils refroidissent sans prendre l'humidité (quelques minutes)
- peser le filtre directement à la sortie du dessiccateur avec la balance de précision

Annexe 11 : Synthèse et régionalisation des données pluviométriques de Nouvelle Calédonie, d'après ROMIEUX, 2011, Davar, observatoire de la ressource en eau



Annexe 12 : Pluie enregistrée au pluviomètre aval en fonction de la pluie enregistrée au pluviomètre amont, par épisode entre le 01 janvier 2009 et le 01 janvier 2012 sans l'épisode du 24 décembre 2011, sans l'épisode du 02 janvier 2013



Annexe 13 : Formules de de Kirpich et de Johnstone et Cross

- Formule de Kirpich (1940)
 $T_c = 3,97 * L^{0,77} * I^{-0,385}$
 T_c le temps de concentration en min
 I : la pente en %
 L : la longueur du plus long chemin d'écoulement (m)

- Formule de Johnstone et Cross
 $T_c = 5,66 * \left(\frac{L}{I}\right)^{0,5}$
 T_c le temps de concentration en heure
 I : la pente en m/m
 L : la longueur du plus long chemin d'écoulement (m)

Annexe 14 : Récapitulatif détaillé des 2 épisodes de crue les plus importants par an en production de MES.

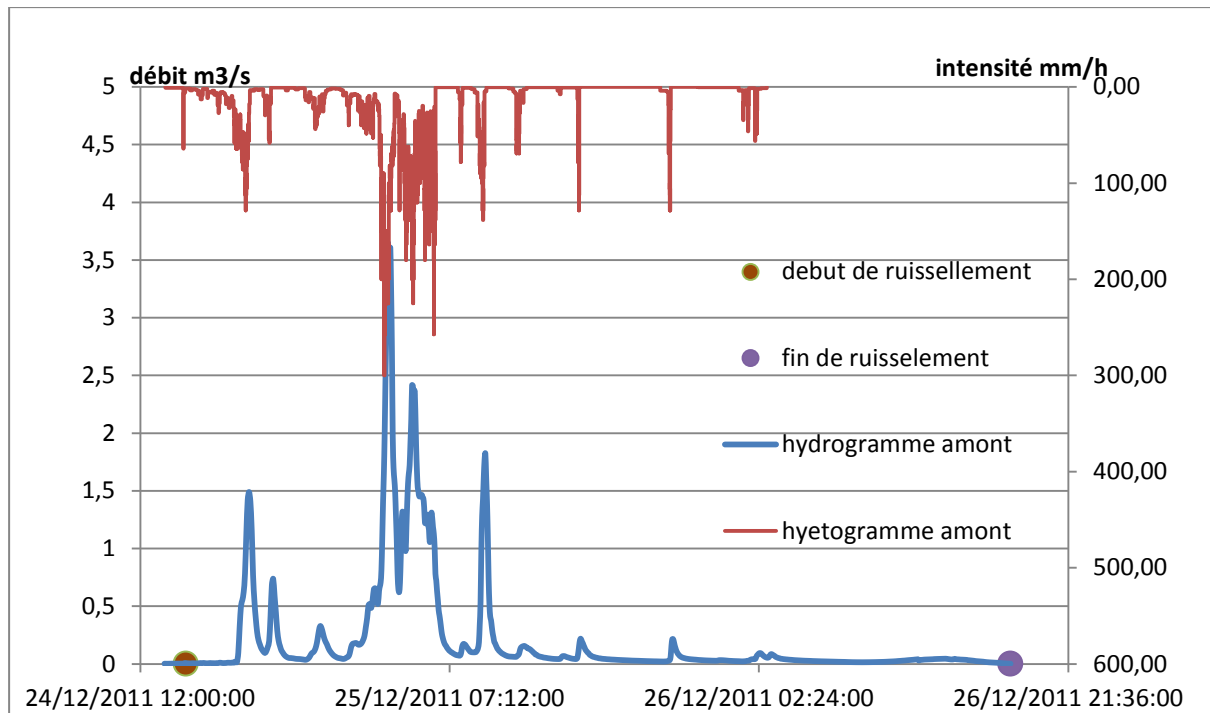
* fait aussi partie des 15 épisodes les plus forts en précipitations.

** pas de données sur décembre 2008.

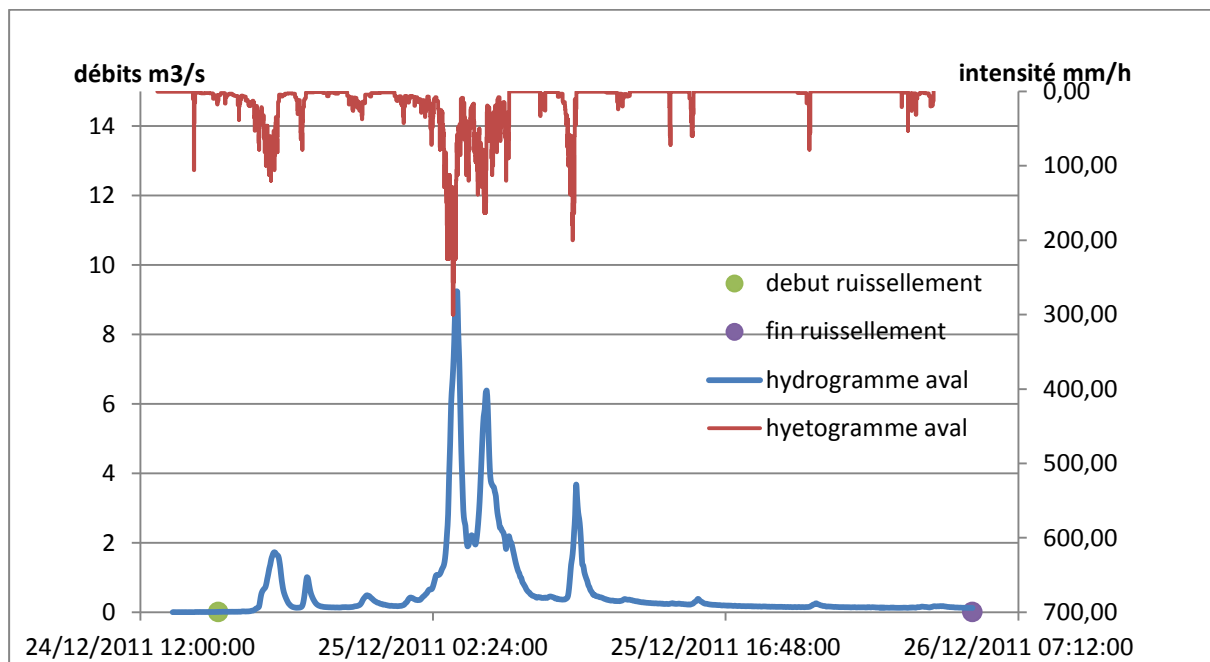
			amont						aval					
	Episode	date	Flux (t)	Pluie (mm)	Lr (mm)	Ts (jours)	C max (g/l)	C moy (g/l)	Flux (t)	Pluie (mm)	Lr (mm)	Ts (jours)	C max (g/l)	C moy (g/l)
2009**	15 *	fév.	14,5	251	137,1	7	21,04	1,17	18,5	287	80,8	9	4,8	0,8
	19*	fév.	18	90,5	72,2	0	19,06	0,74	15	104	37,3	1	2,9	1,3
2010	123	mai	2,7	68	14,2	2	6,88	2,09	7,5	71	7,8	2	14,4	3,2
	126*	mai	5	141	76,6	2	1,4	0,73	5,6	149	28,4	15	1,6	0,7
2011	175*	déc.	18	94	72,5	0,5	7,46	2,74	19	130	35,4	0,5	2,8	1,8
	223*	avr.	14,2	113	62	0	8,3	2,6	27	102	26,7	12	7,3	3,4
2012	261*	déc.	90	509,5	398,6	4	8,11	2,79	453	476	268,5	3	21,5	6,2
	315	avr.	11	73	46,4	0,2	4	0,26	23	89,5	20,6	23	5,8	3,7
	325*	juin	6	145,5	95,2	4	3,6	0,27	40	172,5	54,7	4	7,43	1,17
moyenne			11,9	165,1	108,3	2,2	8,9	1,5	73,4	175,7	62,2	7,7	7,6	2,5

Annexe 15 : Hydrogramme et hietogramme de l'épisode du 24 décembre 2011 à Poro, à l'amont, l'aval et zoom sur le pic principal de l'amont et de l'aval

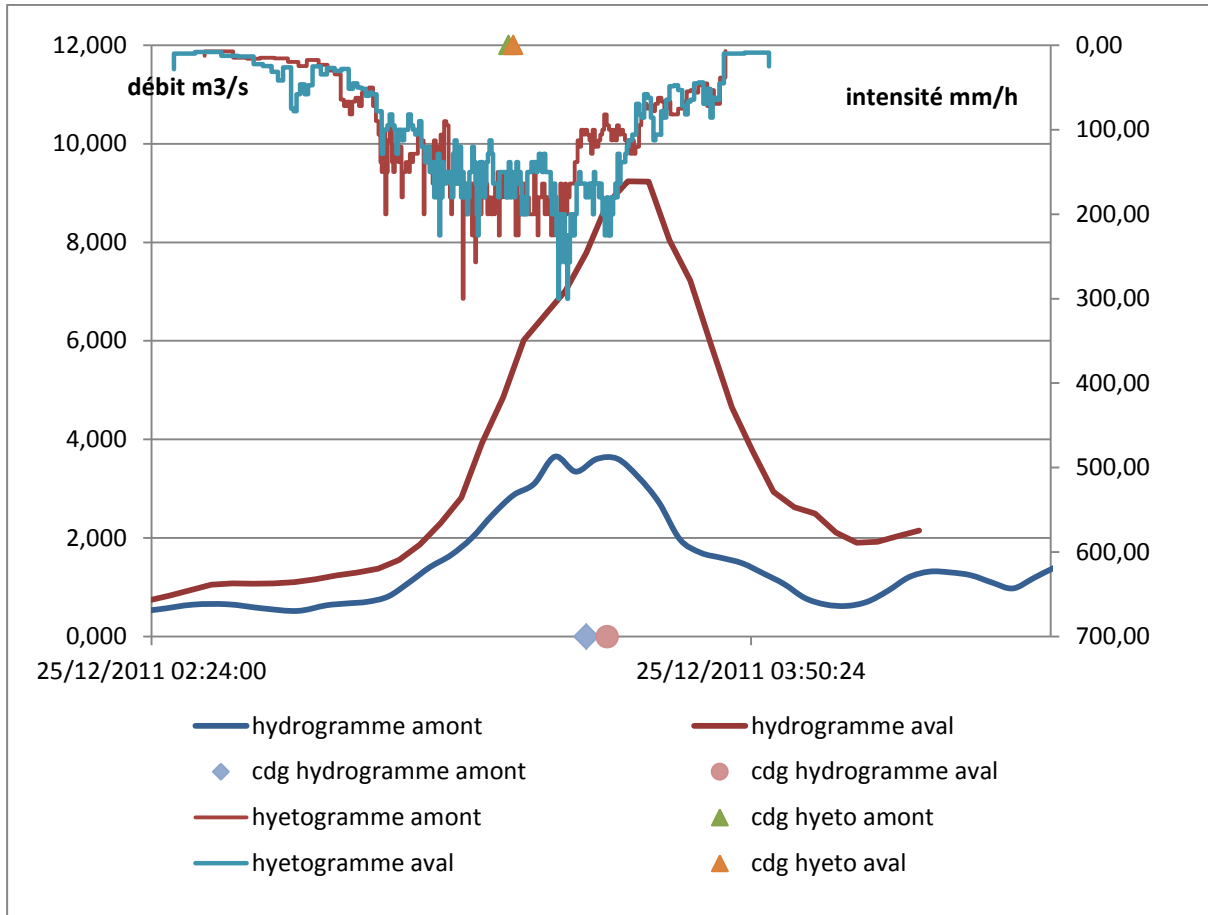
- Amont



- Aval



- Amont et aval, pic principal



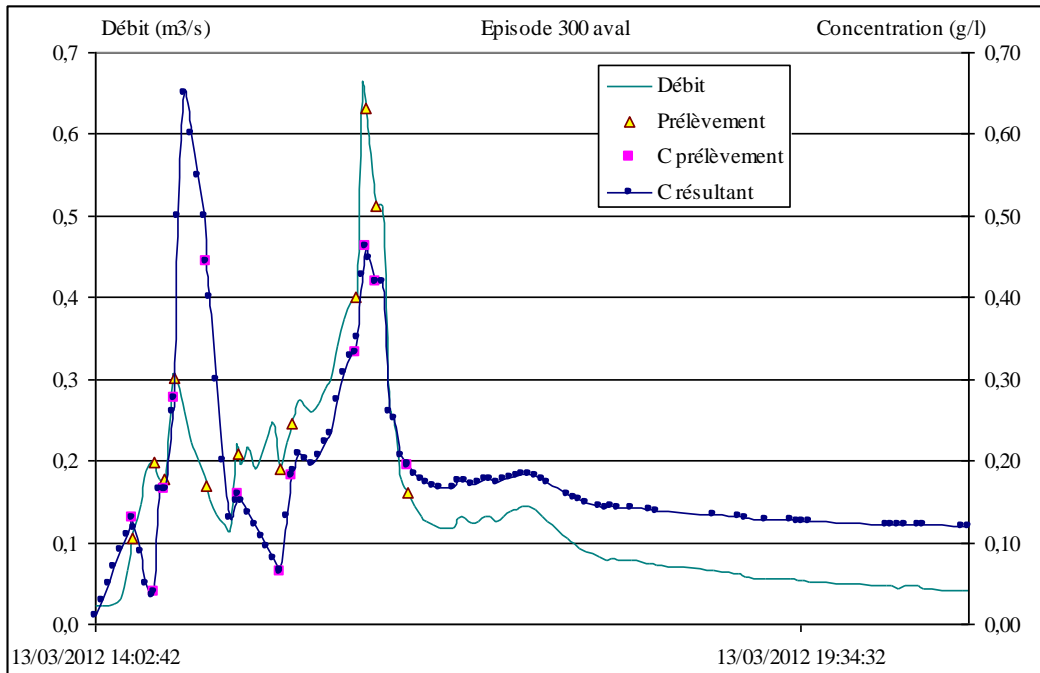
Annexe 16 : Cassis amont ne jouant pas son rôle lors de la crue du 02 avril 2013



Annexe 17 : Cassis aval ne jouant pas son rôle lors de la crue du 02 avril 2013

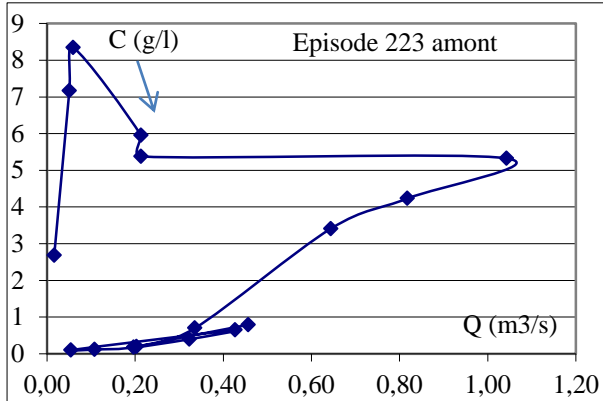


Annexe 18 : Episode 300 à Poro Aval. Exemple d'un épisode bien échantillonné.

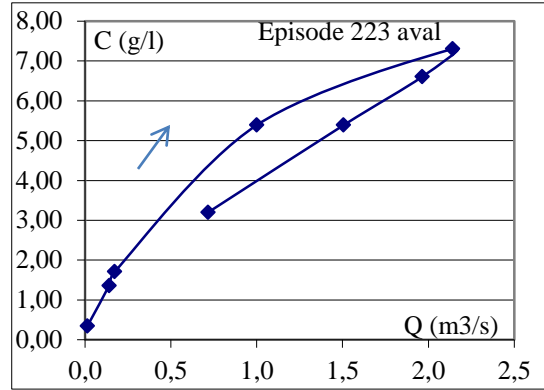


Annexe 19 : Évolution de la concentration en fonction du débit à Poro amont et aval, cycle d'hystérésis

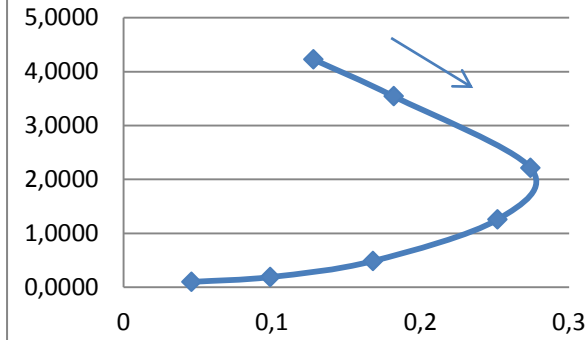
amont



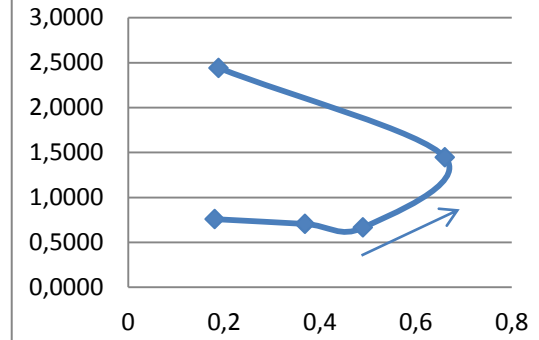
aval



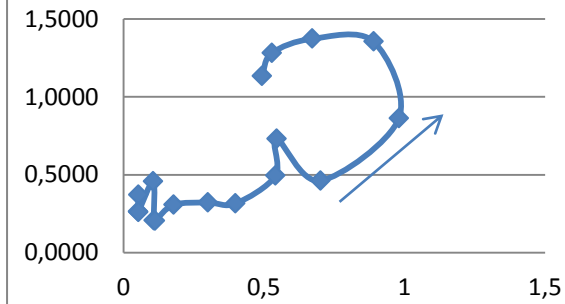
épisode 360 amont



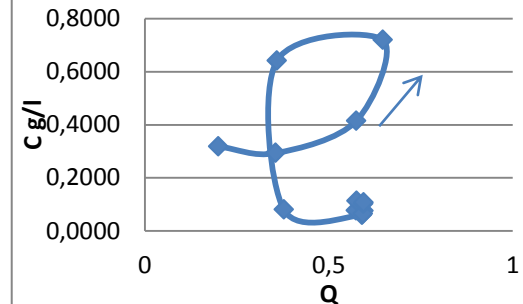
épisode 360 aval



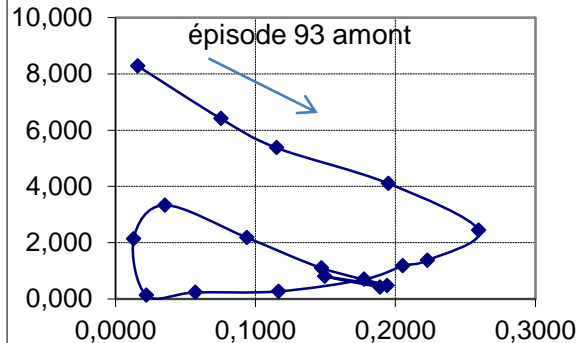
épisode 361 amont



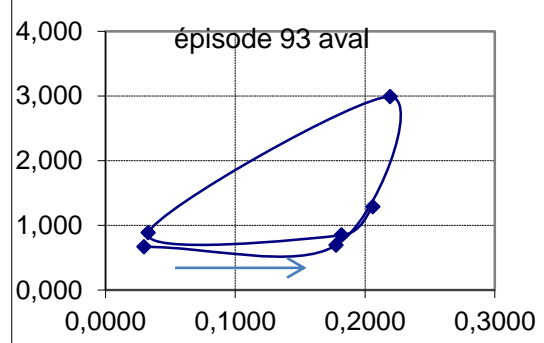
épisode 361 aval

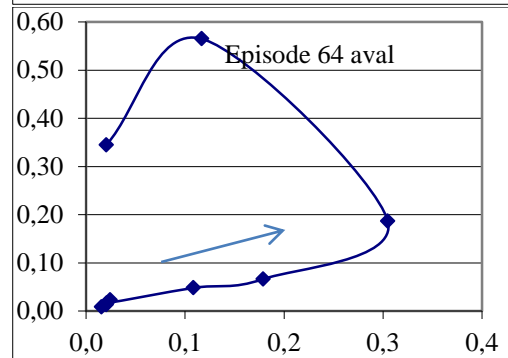
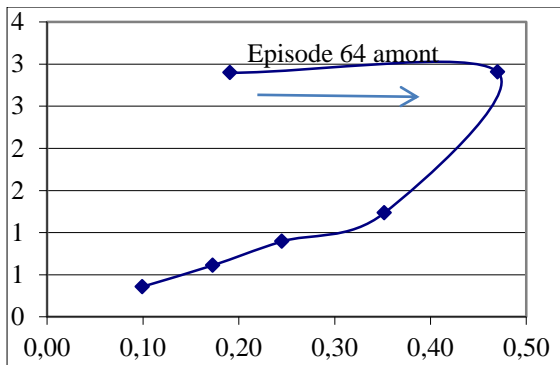
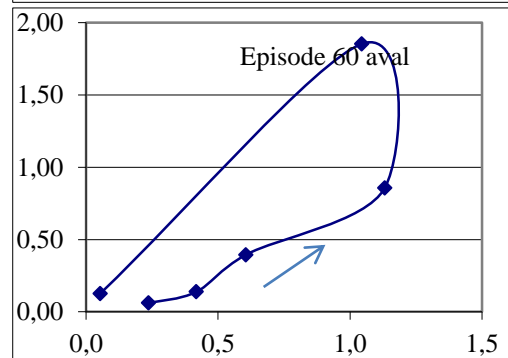
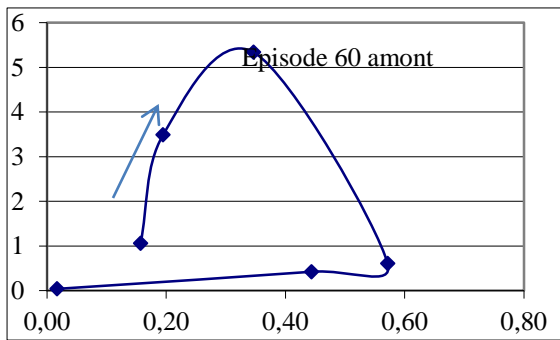
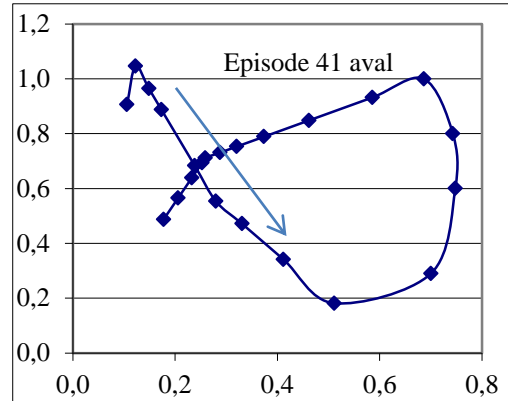
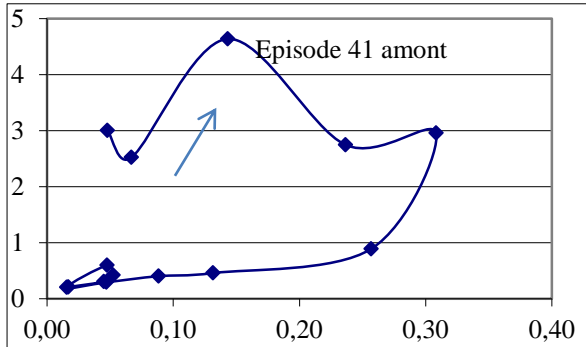
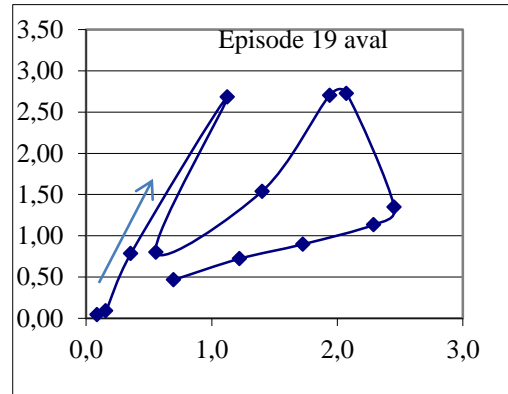
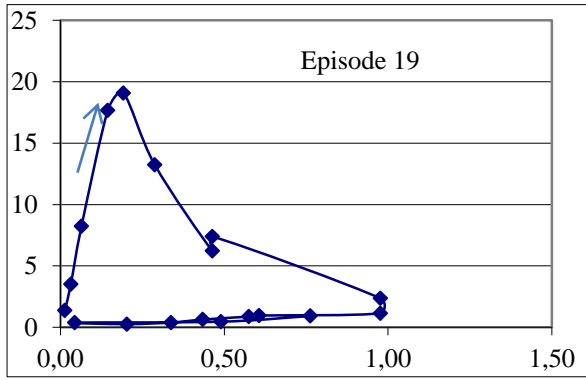


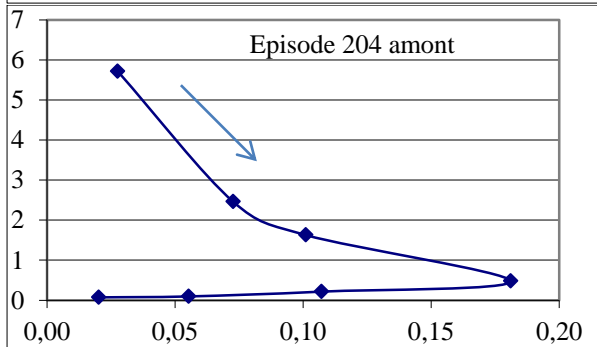
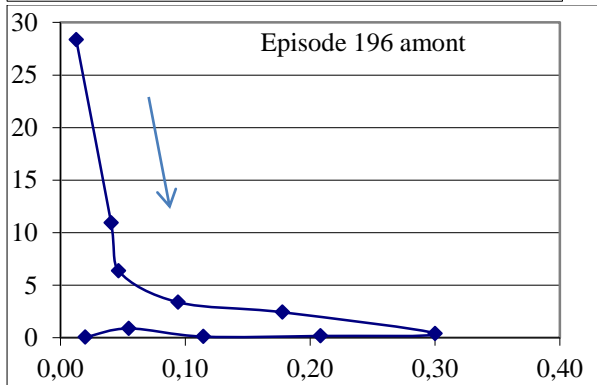
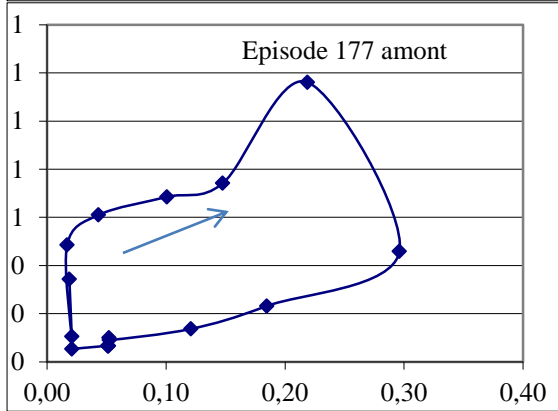
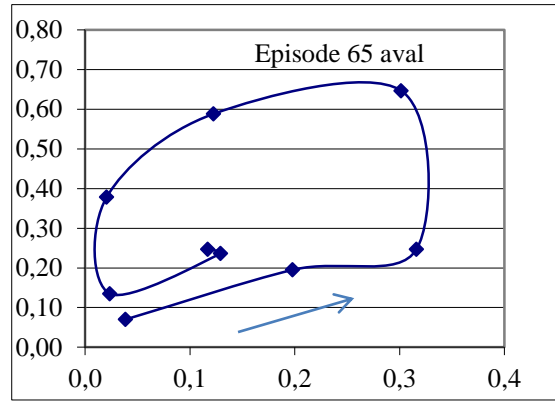
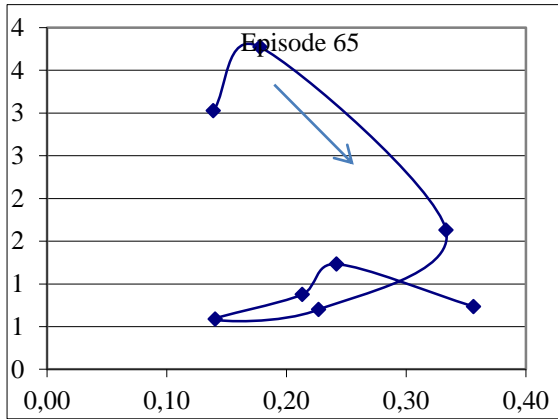
épisode 93 amont

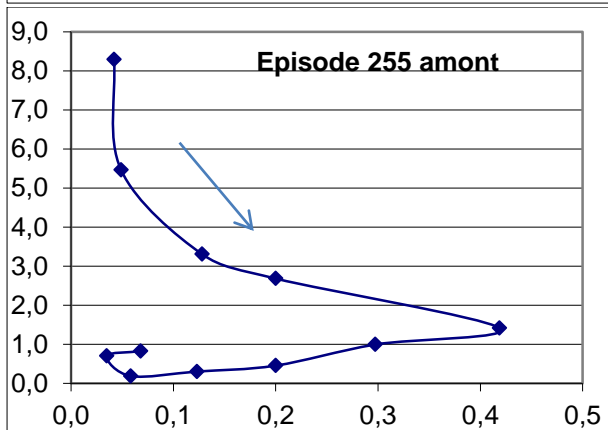
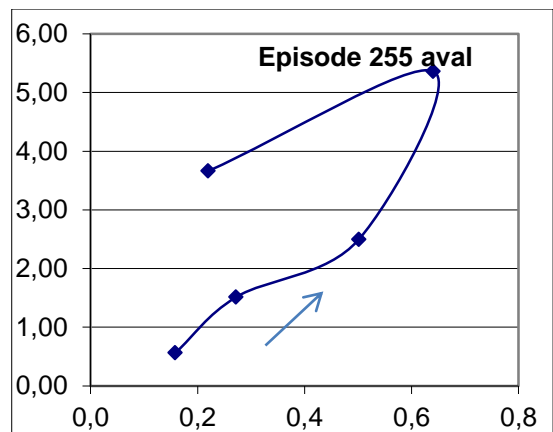
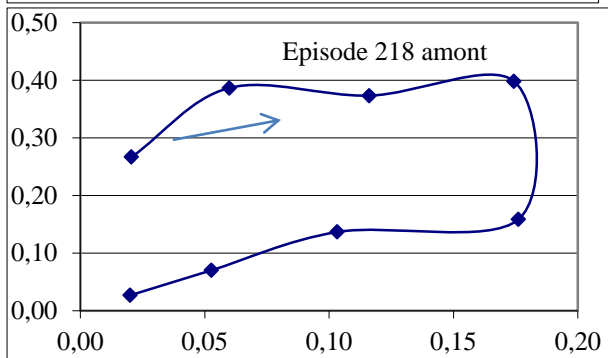
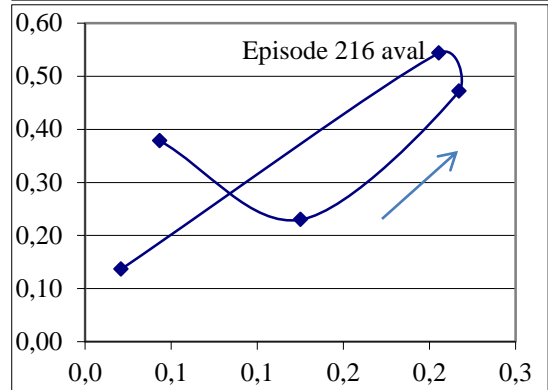
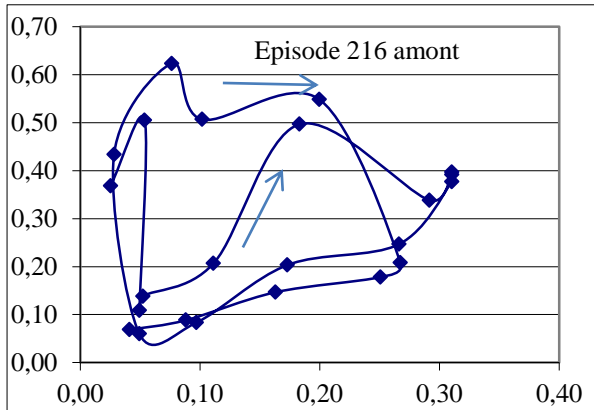
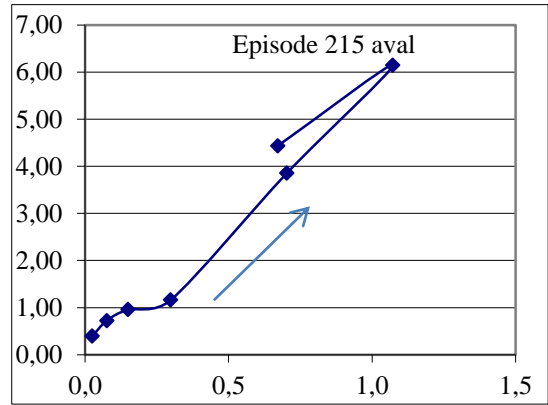
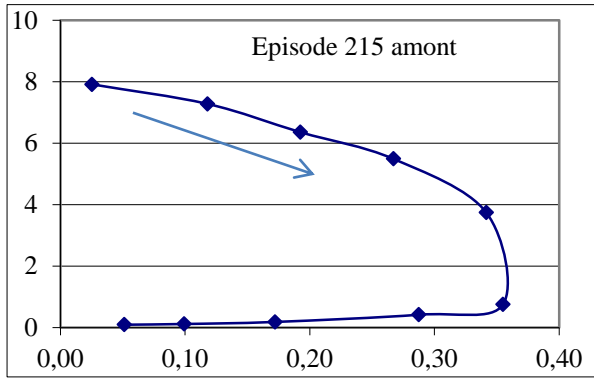


épisode 93 aval





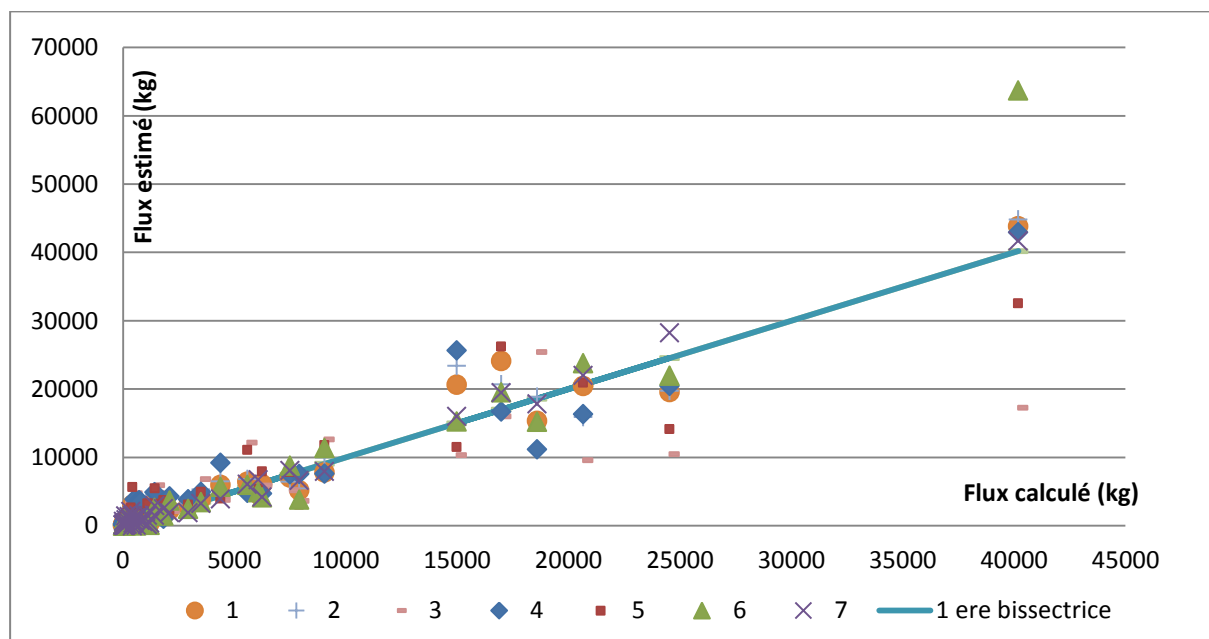




Annexe 20 : Flux de MES des épisodes échantillonnés calculés par interpolation en fonction du flux estimé par les différents modèles à Poro aval et Poro amont et coefficients de corrélation

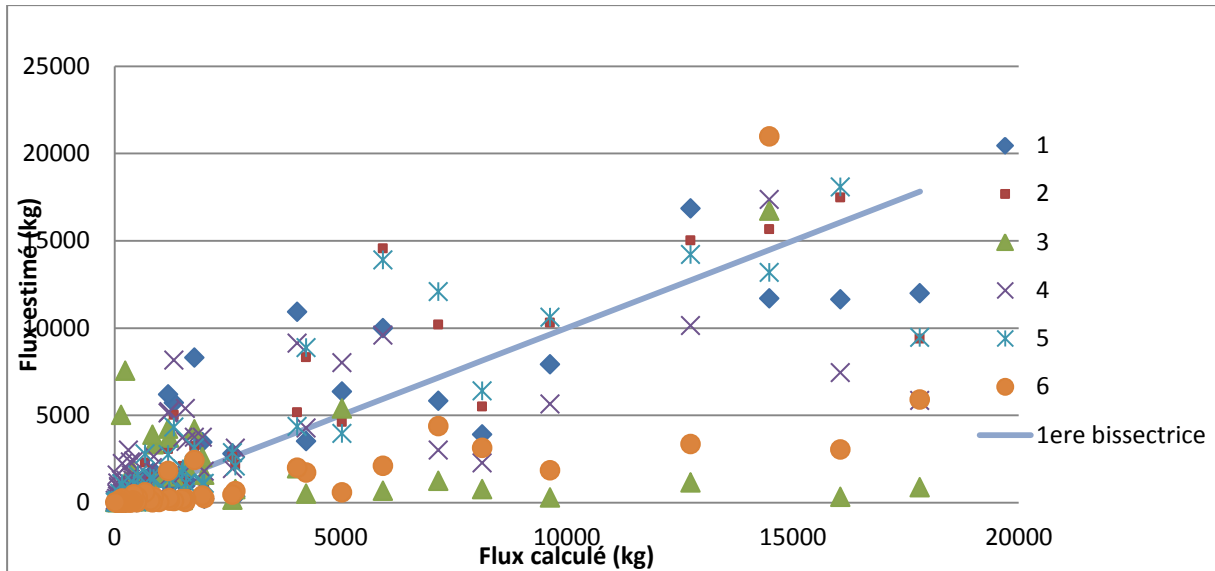
Les modèles sont appelés par des numéros de 1 à 6 à l'amont et de 1 à 7 à l'aval.

- AVAL

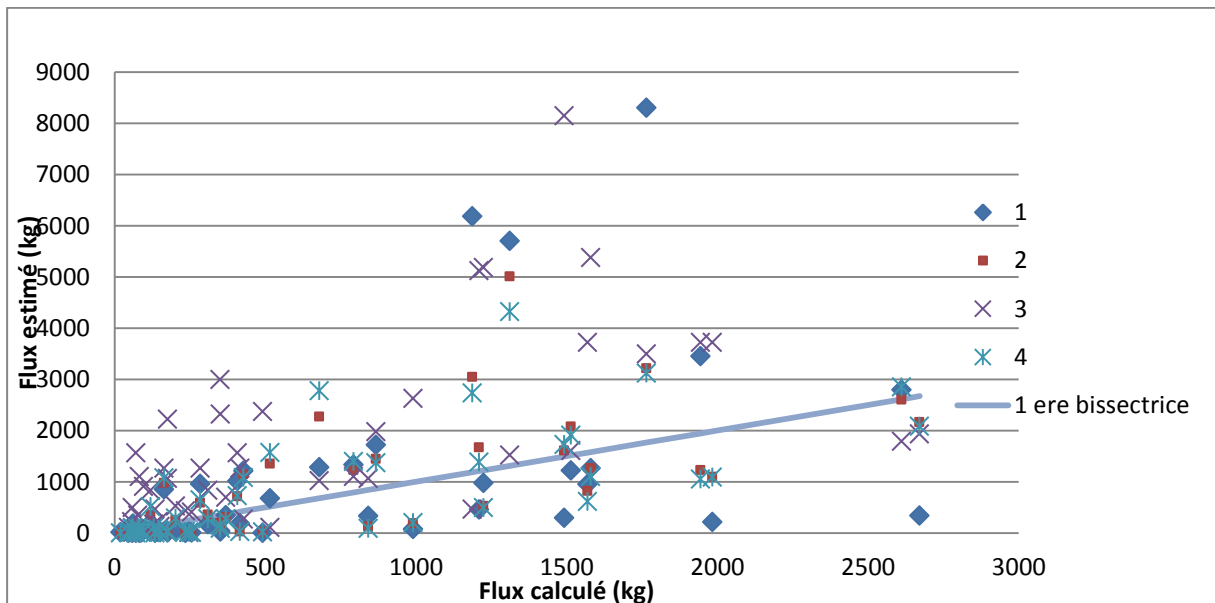


	R ² 1 AV	R ² 2 AV	R ² 3 AV	R ² 4 AV	R ² 5 AV	R ² 6 AV	R ² 7 AV
tous	0,98	0,97	0,81	0,95	0,93	0,96	0,99
>10 t	0,88	0,86	0,11	0,82	0,69	0,96	0,99
<10 t	0,92	0,91	0,75	0,86	0,83	0,92	0,95

- AMONT : flux des épisodes échantillonnés calculés par interpolation en fonction du flux estimé par les différents modèles



- Amont, zoom sur les épisodes qui ont un flux de matière en suspension de moins de 3 tonnes



	R ² F1AM	R ² F2AM	R ² F3AM	R ² F4AM	R ² F5AM	R ² F6AM
tous	0,86	0,9	0,32	0,72	0,9	0,49
>10 t	0,27	0,12	0,07	0,03	0,14	0,22
<10 t	0,71	0,85	0,17	0,61	0,86	0,84

Annexe 21 : Présentation du modèle numéro 7 appliqué à Poro aval

$$\text{Flux} = 2,578 * Q_{\text{max}}^{0,909} * I_{\text{max}15}^{0,909} * \text{Pluie}^{1,121} * \text{CE}^{0,091} * I_{\text{max}120}^{0,23} * L_r^{-0,135} * d_c^{-0,173} * T_s^{0,076}$$

Avec le flux en kg, le débit de pointe en m³/s, la pluie précipitée en mm, la lame d'eau ruisselée en mm, la durée de crue en minute, le temps sec en heure.

Annexe 22 : Présentation du modèle numéro 2 appliqué à Poro amont

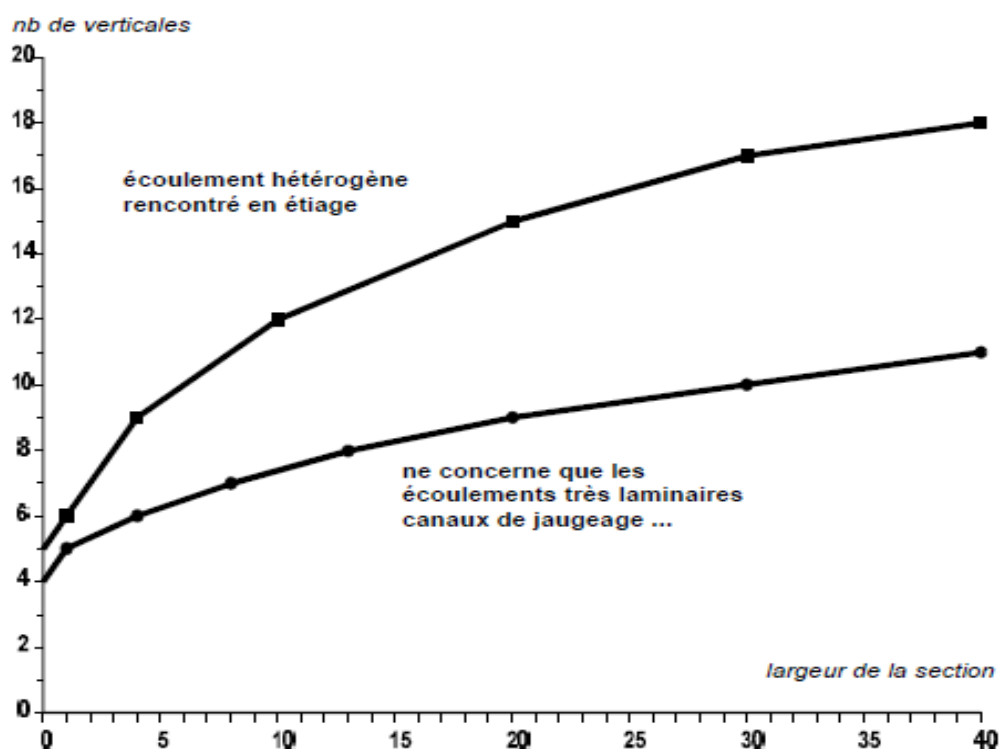
L'équation est la suivante : $\text{Flux} = 2299 * Q_{\text{max}}^{1,718} * H_{\text{tot}15}^{-0,289}$

Avec le flux en kg, le débit de pointe en m³/s, et Htot15 en mm.

Annexe 23 : Tableau représentant l'erreur faite sur le débit en fonction de la gamme de débit uniquement en tenant compte de l'imprécision de la mesure de niveau d'eau à Poro aval

gamme de débit mesurée m ³ /s		erreur %	Nombre de débits mesurés lors d'échantillonnages	% des mesures de débits sur le total des mesures
0,000	0,002	350	0	0
0,002	0,009	136	2	0,5
0,009	0,017	62	7	2
0,017	0,025	36	14	4
0,025	0,032	54	14	4
0,032	0,08	46	60	15
0,080	0,135	27	66	17
0,135	0,263	16,8	103	26
0,263	0,583	9,7	60	15
0,583	1,242	5,6	38	10
1,242	3	6,1	19	5
3,000	10,000	2,9	7	2

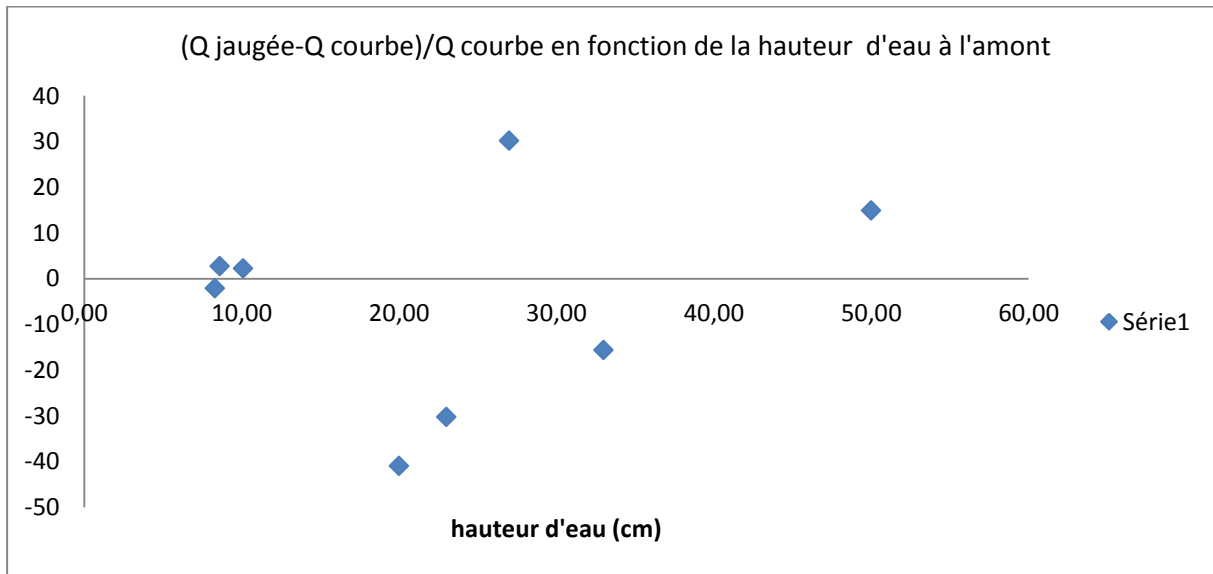
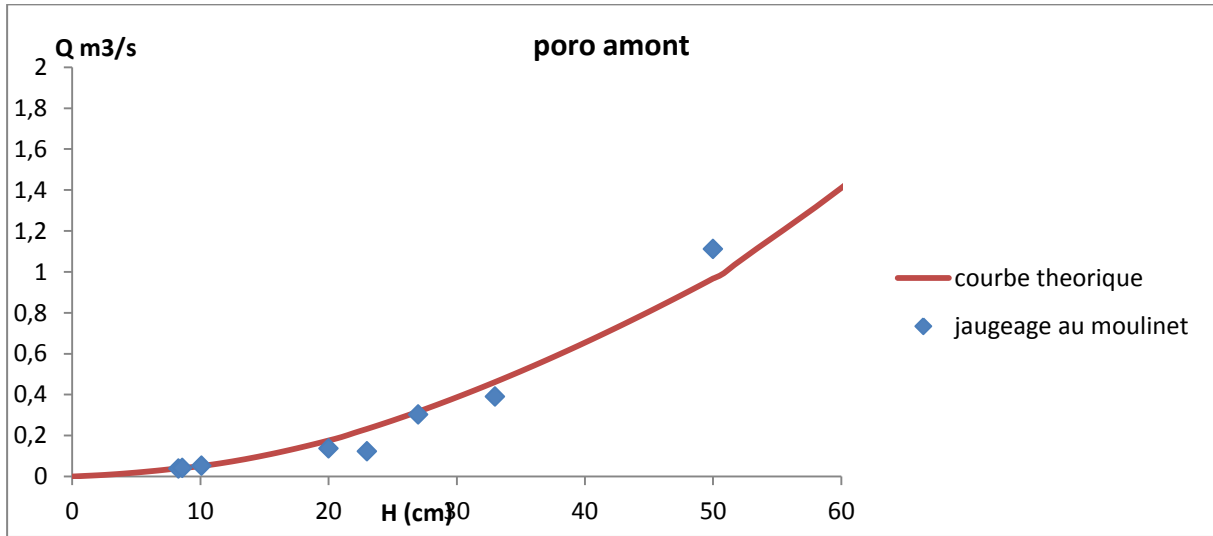
Annexe 24 : Graphique présentant le nombre de verticales à adopter lors d'un jaugeage au moulinet selon la largeur de la section. D'après FARRAY et al, 1998.

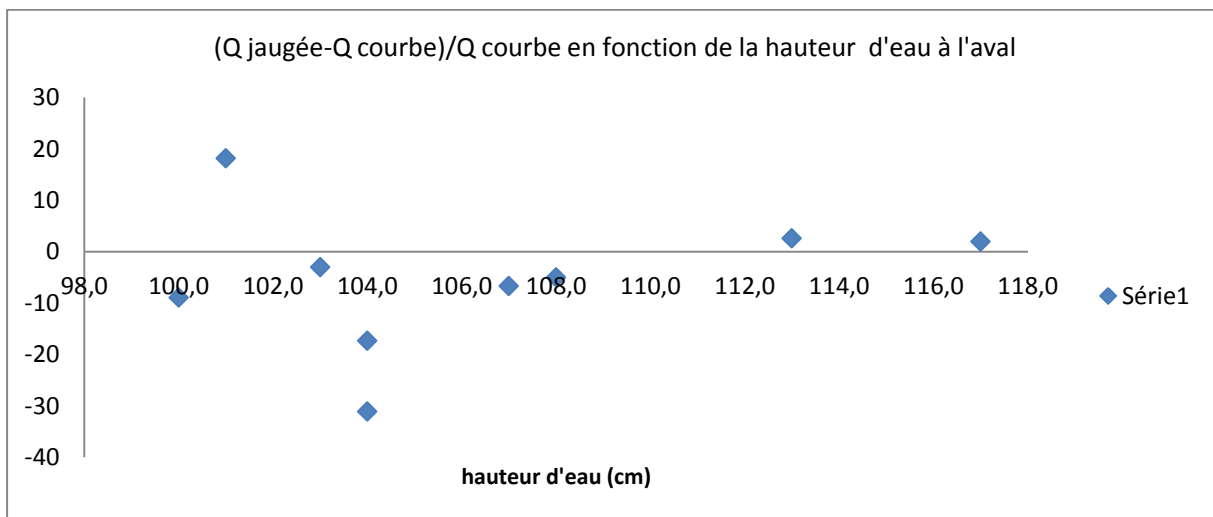
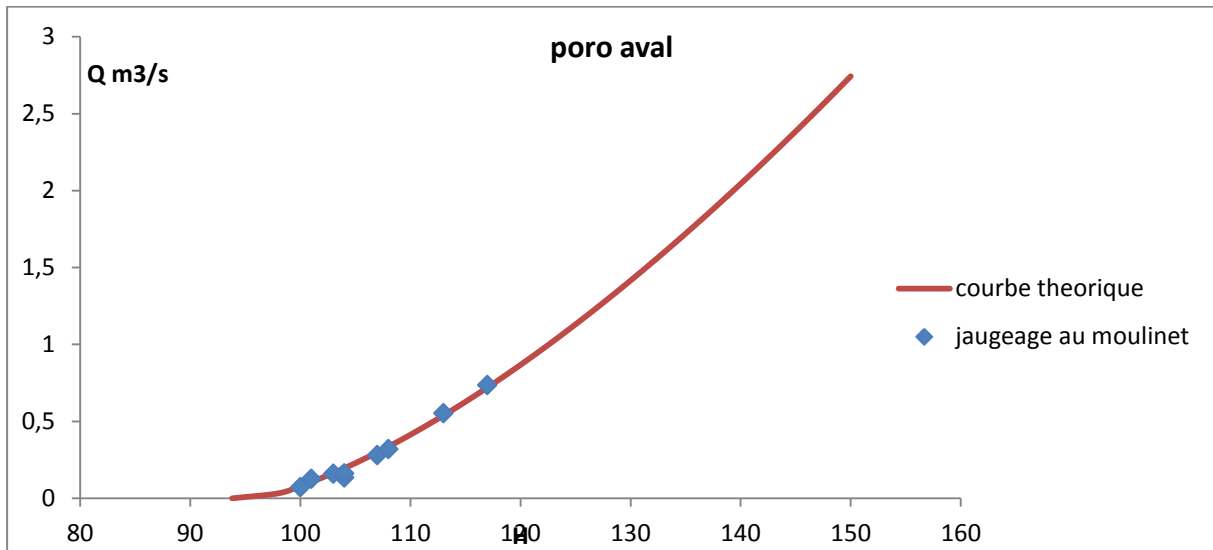


Annexe 25 : Dépôt de sédiments à l'entrée de la section de mesure à Poro Aval



Annexe 26 : Courbe de tarage et dispersion des jaugeages à Poro amont et aval

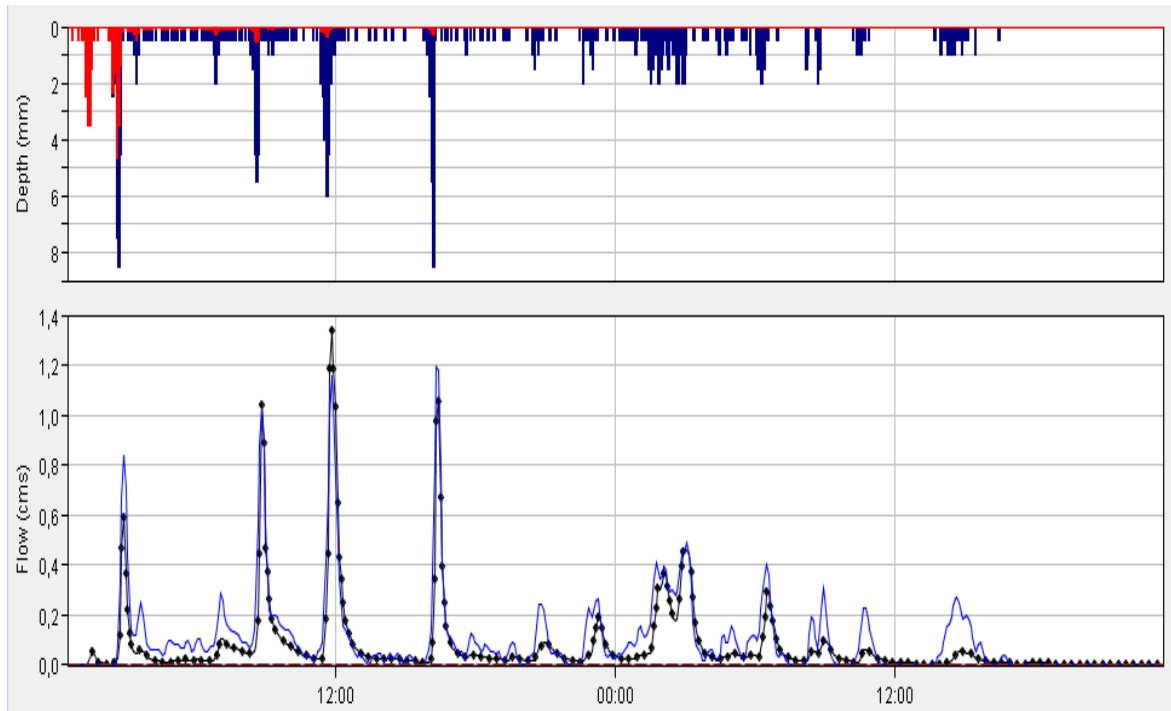




Annexe 27 : Résultats de simulation de l'épisode 15 amont par HEC HMS

Sur le hyetogramme : en rouge la pluie qui ne contribue pas au ruissellement

Sur l'hydrogramme : en noir le débit observé à Poro amont, en bleu le débit simulé par HEC HMS.



Annexe 28 : Résultats de simulation de l'épisode 175 amont par HEC HMS

Sur le hyetogramme : en rouge la pluie qui ne contribue pas au ruissellement

Sur l'hydrogramme : en noir le débit observé à Poro amont, en bleu le débit simulé par HEC HMS

