



HAL
open science

Suivi hydrologique et sédimentaire des petits bassins versants miniers : guide méthodologique

Nicolle Mathys, Nicolas Caze, Didier Richard

► To cite this version:

Nicolle Mathys, Nicolas Caze, Didier Richard. Suivi hydrologique et sédimentaire des petits bassins versants miniers : guide méthodologique. CNRT Nickel et son environnement. 65 p., 2015, Programme FPBVM. [Tome Nickel et Environnement]. Guide environnement, 10.34928/pxb1-5m85 . ird-02153078

HAL Id: ird-02153078

<https://ird.hal.science/ird-02153078>

Submitted on 12 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



GUIDE Environnement

CNRT
NICKEL
& son environnement



GUIDE METHODOLOGIQUE
Suivi hydrologique et sédimentaire
des petits bassins versants miniers
de Nouvelle-Calédonie

Edition 2015

Guide méthodologique 2015

SUIVI HYDROLOGIQUE ET SEDIMENTAIRE DES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERES



*Guide issu des programmes de recherche financés par
le CNRT « Nickel & son environnement »*

Décembre 2015

CNRT
NICKEL
& son environnement



« Suivi hydrologique et sédimentaire des petits bassins versants miniers »

Guide méthodologique

Décembre 2015

Ouvrage collectif coordonné par Nicolle MATHYS (IRSTEA)

Réalisé dans le cadre du projet CNRT "Fonctionnement des petits bassins versants miniers" 2010-2014 (consortium scientifique UNC, IRSTEA, Météo-France, IRD, Université de la Réunion, A2EP)

AUTEURS :

Nicolle MATHYS (IRSTEA, Unité de Recherche érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères)

Nicolas CAZE (A2EP, BP 8176, 14 Edouard Glasser, 98807 Nouméa , Nouvelle-Calédonie),

Didier RICHARD (IRSTEA, Unité de Recherche érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38 402 Saint-Martin-d'Hères, France)

REVISION/RELECTURE :

Geoffroy WOTLING (DAVAR, Nouméa, Nouvelle-Calédonie)

Nous remercions particulièrement le Service de l'Eau de la DAVAR pour son implication constante et sa participation dans les programmes successifs de recherche appliquée en matière d'hydrologie minière, notamment sur le site de PORO.

Mots clés : bassin versant minier, hydrologie, érosion, transport solide, MES, sédiments, hydrométrie

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

N. Mathys, N. Caze, D. Richard (2015) – *Suivi Hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers, guide méthodologique*. Programme « Fonctionnement des petits bassins versants miniers ». CNRT « Nickel & son environnement. 66 pages.

SOMMAIRE

1. Introduction	8
2. Objectifs et enjeux des suivis hydrosédimentaires des petits bassins versants	9
2.1. Contexte réglementaire.....	9
2.2. Objectifs des suivis.....	9
2.3. Enjeux et contraintes associées.....	9
3. Rappels sur l'hydrologie des petits bassins versants.....	11
3.1. Relation pluie-ruissellement.....	11
3.2. Erosion et transport solide.....	14
4. Définition des stratégies d'observation - rappel des fondamentaux de l'hydrométrie.....	15
4.1. Nombre et situation des stations, durée d'observation	15
4.1.1. Stations de mesure des précipitations	15
4.1.2. Stations de mesure des débits.....	16
4.1.3. Stations de mesure des transports solides	17
4.2. Présentation de la station type	17
4.2.1. Station de mesure des pluies.....	17
4.2.2. Station de mesure des débits	18
4.2.3. Station de mesure des transports solides.....	22
4.2.4. Station de mesure type	23
4.3. Définition des procédures de gestion et de suivi.....	25
4.3.1. Jaugeages	25
4.3.2. Stratégies d'échantillonnage	26
4.3.3. Suivi des sites de mesure	29
4.3.4. Eléments sur la sensibilité des mesures et les incertitudes.....	31
5. Gestion et bancarisation des données recueillies.....	33
5.1. Contrôle, validation et traitement des données acquises.....	33
5.2. Description d'un réseau de mesure : organisation des données, objets de référence.....	36
5.3. Réseau de mesure : données "minimales" pour le suivi	38
5.3.1. Enregistrement des données	38
5.3.2. Réseau de mesure, organisation et nomenclature des fichiers	38
5.3.3. Schémas de données type	39
5.3.4. Fiches de terrain : Schéma de données type	41
5.4. Dictionnaires.....	41
5.4.1. Dictionnaires proposés	41
5.4.2. Nature des capteurs.....	42
5.4.3. Type de capteurs	42
5.4.4. Interventions/Évènements	43
6. Interprétation, diffusion et communication	45
7. Conclusion et perspectives.....	47
8. Annexes	48
8.1. Annexe 1 : Références utiles.....	48
8.2. Annexe 2 : Dispositifs de mesure	50
8.3. Annexe 3 : Exemple de fiches	54
8.4. Annexe 4 : exemples d'analyses issus du projet Hydromine	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique du cycle de l'eau.....	11
Figure 2 : Ecoulements sur mine (Poro, 8/3/2011).....	11
Figure 3 : Graphe pluie-débit et représentation des temps caractéristiques.....	12
Figure 4 : Exemple de détermination de la fin du ruissellement rapide sur deux graphes du même épisode montrant l'intérêt d'utiliser les coordonnées logarithmiques (à droite) – Poro aval.....	13
Figure 5 : Erosion et transport solide en domaine minier (Poro).....	14
Figure 6 : Exemples de stations pluviographiques.....	18
Figure 7 : Schémas de canaux jaugeurs.....	19
Figure 8 : Section à fond oblique permettant d'augmenter la hauteur d'écoulement pour les faibles débits.....	20
Figure 9 : Abris pour les équipements de stations de mesure des débits et transports solides	22
Figure 10 Mise en place des crépines d'aspiration des préleveurs.....	23
Figure 11 : Schéma d'une station de mesure type (exemple inspiré de Poro Aval).....	24
Figure 12 : Exemples de stations du projet CNRT	24
Figure 13 : Hydrogramme de crue, stratégie d'échantillonnage et conséquences sur la description des variations des concentrations en MES (en bleu, débit, en rouge/orangé concentration).....	28
Figure 14 : Exemple d'outils de gestion des données brutes.....	33
Figure 15 : Exemple de recalage à partir des notes de la fiche de terrain	34
Figure 16 : Exemple de recalage avec des relevés de niveau à l'échelle.....	35
Figure 17 : Exemple d'organisation des données descriptives d'un réseau de mesure	37

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : schéma de données type « réseau » (exemple : contenu de la table BD1_RESEAU_MESURE d'HYDRAS®)	39
Tableau 2 : schéma de données type « station » (exemple : contenu de la table BD2_STATIONS d'HYDRAS®).....	40
Tableau 3 : Schéma de données type « capteur » (exemple : contenu de la table BD3_CAPTEURS d'HYDRAS®).....	40
Tableau 4 : Schéma de données type « fiches de terrain » (exemple : contenu de la table BD4_MESURES_ET_INTERVENTIONS d'HYDRAS®)	41
Tableau 5 : Exemple de dictionnaire des natures de capteurs	42
Tableau 6 : Exemple de dictionnaire des capteurs référents indispensables	42
Tableau 7 : Exemple de dictionnaire des capteurs dédiés aux enregistrements en continu	43
Tableau 8 : Exemple de dictionnaire des capteurs virtuels dont les valeurs sont calculées à partir des données enregistrées.....	43
Tableau 9 : Exemple de dictionnaire des types d'interventions	44

LISTE DES SIGLES & ABREVIATIONS

A2EP	Agence pour l'Eau et l'Environnement dans le Pacifique
CNRT	Centre National de Recherche Technologique
DAVAR	Direction des Affaires vétérinaires, Alimentaires et Rurales
DIMENC	Direction des Mines et de l'Energie de Nouvelle-Calédonie
IRSTEA	Institut National de Recherche Scientifique et Technique pour l'Environnement et l'Agriculture
ISO	International Organization for Standardization
KNS	Koniambo Nickel Sas
MES	Matières En Suspension
NGNC	Nivellement Général de Nouvelle-Calédonie
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
RGNC	Référentiel Géodésique de Nouvelle-Calédonie
Scal-Air	Association de Surveillance Calédonienne de Qualité de l'Air
SLN	Société Le Nickel (groupe ERAMET)

1. INTRODUCTION

Le CNRT "Nickel et son environnement", conscient que les milieux naturels calédoniens subissent, du fait de l'activité minière, de fortes dégradations liées à une mauvaise gestion du ruissellement sur les surfaces dénudées, a financé un projet intitulé "**Fonctionnement des petits bassins versants miniers**" qui s'est déroulé sur la période 2010-2014.

Ce projet a permis une amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydrologique et sédimentaire des bassins versants miniers, grâce aux travaux conduits sur le site pilote de Poro mais également sur différents bassins versants étudiés dans le cadre de collaborations avec les compagnies minières partenaires du projet (KNS, SLN, VALE). Ce projet a également permis de tester in situ les dispositifs, matériels et protocoles de mesure les mieux adaptés pour réaliser les suivis hydrologiques et sédimentaires sur les petits bassins versants miniers.

Dans ce projet multipartenaires coordonné par l'Université de la Nouvelle Calédonie (UNC), IRSTEA a assuré la coordination de la mise en place des suivis et du recueil des données ainsi que l'exploitation scientifique des données recueillies. Ce travail a donné lieu à un rapport scientifique dont la diffusion est assurée par le CNRT. Le bureau d'études A2EP s'est, lui, vu confier l'élaboration d'une note méthodologique sur l'acquisition et la bancarisation des mesures de terrain (hydrologie, qualité des eaux, transport solide). Ce document a permis de préciser l'organisation des données souhaitable pour un réseau de mesure ainsi que les méthodes et procédures de suivi adaptées au contexte de la Nouvelle-Calédonie.

Au terme de ce projet, le CNRT a demandé que les rapports rendant compte du projet global soient complétés par un guide méthodologique destiné aux professionnels qui sont tenus de mettre en place des suivis hydrologiques et sédimentaires dans le cadre des autorisations d'exploiter.

Le présent document a donc pour objectif de rassembler les éléments techniques permettant de mettre en place les dispositifs de mesure et d'assurer la production de données de qualité qui permettront à la fois de mesurer les impacts des rejets actuels sur les milieux situés en aval et de poursuivre l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement des bassins versants miniers indispensable à l'amélioration de la conception et du dimensionnement des dispositifs de réduction des impacts.

Ce document s'appuie sur les rapports fournis par IRSTEA et A2EP, complétés par les formations assurées par IRSTEA au cours du projet ainsi que par les éléments rassemblés par le groupe "instrumentation" du projet. Il a fait l'objet d'échanges avec les services techniques de la DAVAR et de la DIMENC et est diffusé sous l'égide du CNRT.

2. OBJECTIFS ET ENJEUX DES SUIVIS HYDROSEDIMENTAIRES DES PETITS BASSINS VERSANTS MINIERS

2.1. CONTEXTE REGLEMENTAIRE

Depuis l'adoption en 2009 du nouveau Code minier de la Nouvelle-Calédonie, les exploitations en cours ont dû faire l'objet d'autorisations conformes aux dispositions de ce Code. Ces autorisations imposent aux compagnies minières un certain nombre de règles techniques parmi lesquelles des obligations de suivi du fonctionnement des ouvrages de gestion des eaux et des rejets dans les milieux naturels situés en aval. Ceci se traduit par l'exigence de mise en place d'un contrôle des matières en suspension (MES) constitué d'un échantillonnage automatique des MES associé à une mesure du débit et de la turbidité, en un ou plusieurs points du site minier objet de l'autorisation.

2.2. OBJECTIFS DES SUIVIS

Les suivis hydrologiques et sédimentaires ont plusieurs objectifs complémentaires ce qui impose un choix judicieux des sites de mesure et des dispositifs ainsi qu'une gestion rigoureuse des données produites. Pour les objectifs principaux, on peut citer :

- le contrôle de la quantité et de la qualité des rejets, tant en volume liquide et débit de pointe qu'en concentration et masse de MES exportées. Ce contrôle doit permettre de valider l'étude d'impact antérieure à l'autorisation ;
- le contrôle de l'efficacité du Plan de Gestion des Eaux et, si nécessaire, l'identification des pistes d'amélioration ;
- l'amélioration des connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers, notamment pour les périodes de fortes précipitations et les plus hautes eaux, les événements extrêmes en général. Ceci permettra d'alimenter les travaux de recherche et développement sur ce thème et, à terme, d'améliorer la conception et le dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux, en les adaptant aux différents contextes des bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie sur la base de mesures in-situ ;
- l'obtention de données hydrologiques quantitatives pour la réalisation des études d'impact à produire pour de nouvelles demandes d'autorisation d'exploiter.

2.3. ENJEUX ET CONTRAINTES ASSOCIEES

Les dispositifs de suivi à mettre en place devront donc être adaptés aux objectifs recherchés. Un même dispositif pourra répondre à plusieurs objectifs mais il conviendra alors d'adapter protocoles et stratégies d'observation pour répondre aux différentes contraintes.

Connaître et quantifier les flux et leur variabilité impose des suivis automatisés et des protocoles adaptés à la dynamique des écoulements : les petits bassins versants miniers sont des systèmes qui réagissent très rapidement et les dispositifs doivent être en mesure d'enregistrer les phénomènes brefs et intenses qui occasionnent l'essentiel des impacts à l'aval. Les installations doivent être suffisamment robustes pour résister aux événements paroxysmiques (tempêtes tropicales, cyclones).

Les mesures destinées à assurer des alertes (protection de captages, niveaux de rejets, ...) seront moins exigeantes sur le plan quantitatif : des données relatives, turbidités exprimées en NTU par exemple pour les suspensions, pourront suffire. S'il s'agit de quantifier des flux, de faire des bilans sédimentaires, les mesures de turbidité devront être complétées par des mesures de concentration (prélèvements d'échantillons et détermination des concentrations au laboratoire) associées à des mesures de débit¹. La fréquence d'acquisition des données de débit et de concentration devra être suffisamment élevée pour enregistrer les variations brutales des valeurs à mesurer.

Une attention particulière devra être accordée à la précision des mesures. Le débit est estimé de manière indirecte. On mesure des hauteurs d'eau qui seront converties en débit par le biais d'une courbe de tarage (autrement dit d'une courbe d'étalonnage). Une précision de 1 cm sur la hauteur d'eau pourra se traduire par une grande incertitude sur le débit si la section de mesure est large. Les flux liquides et solides pourront alors être entachés d'une très grande incertitude (cf. 4.3). La fiabilité de la courbe de tarage est liée au nombre et à la qualité des jaugeages, notamment pour les fortes hauteurs d'eau. Pour des sections non calibrées, la fiabilité de la courbe de tarage sera directement fonction du nombre et de la qualité des jaugeages. L'incertitude sur les plus hautes eaux pourra également être conséquente du fait de l'absence de jaugeages en crue.

Les facteurs qui influencent les réponses hydrologiques et sédimentaires sont nombreux : quantité, intensité et énergie cinétique des précipitations, états de surface des sols, chemins de l'eau et pentes des écoulements, érodabilité des sols et disponibilité des matériaux mobilisables, etc... Pour améliorer les connaissances sur le fonctionnement hydro-sédimentaire des petits bassins versants miniers, il est indispensable de disposer de mesures dans les différents contextes géo-morpho-climatique de Nouvelle-Calédonie. Les réseaux de mesure que les industriels doivent mettre en place constituent une opportunité pour couvrir la variabilité de ces contextes. Mais cela nécessite une homogénéisation des stratégies d'observation, des méthodes de validation et de bancarisation des données. C'est à ce prix que l'effort matériel, financier et surtout humain consacré à ces tâches sera valorisé.

¹ « débit » utilisé sans plus de précision est à comprendre comme « débit liquide » dans ce document

3. RAPPELS SUR L'HYDROLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS

3.1. RELATION PLUIE-RUISSELLEMENT

La Figure 1 résume le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant. On trouvera dans les ouvrages d'hydrologie appliquée cités en Annexe 1 une explicitation des différents termes de ce cycle de l'eau. En domaine minier, les aménagements modifient la couverture végétale, les conditions d'infiltration et les chemins de l'eau et influencent fortement la réponse d'un bassin versant à un épisode pluvieux.

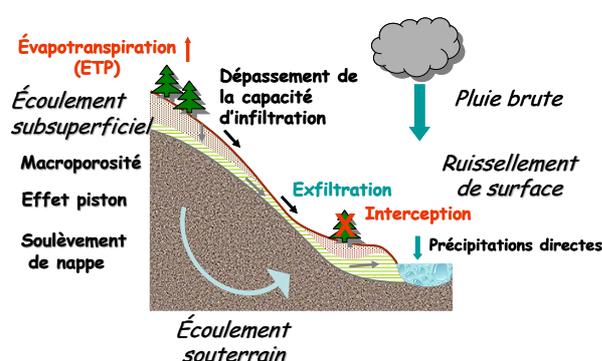


Figure 1 : Représentation schématique du cycle de l'eau



Figure 2 : Ecoulements sur mine (Poro, 8/3/2011)

En Nouvelle-Calédonie et en domaine minier, la délimitation d'un bassin versant est rendue délicate par le contexte géomorphologique et industriel :

- les écoulements souterrains peuvent être importants, on parle souvent de "pseudo-karst" ;
- terrassements, voirie et ouvrages (fossés, revers d'eau, cassis, buses) modifient fortement les chemins de l'eau.

De ce fait, la superficie du bassin versant réel est souvent différente de la superficie du bassin dont les limites seraient déduites de la carte topographique. De plus ces limites peuvent varier rapidement au cours du temps du fait des terrassements liés à l'exploitation. Enfin, les débordements de fossés ou d'ouvrages sont fréquents en crue pouvant entraîner des dérivations des eaux hors du bassin versant habituel (Figure 2). Les connectivités évoluent au cours du temps avec d'**importants effets de seuil**.

Le Plan de Gestion des Eaux, régulièrement actualisé, est un bon outil pour affiner la délimitation du bassin versant. Les données Lidar sont précieuses pour affiner la connaissance du relief et des chemins de l'eau.

Les petits bassins versants miniers sont des systèmes qui répondent rapidement à un épisode pluvieux, du fait de la modification des états de surface et des pentes généralement fortes. Les écoulements souterrains peuvent également y tenir une part importante, notamment dans les massifs fortement karstifiés. Ces écoulements relèvent de

l'hydrogéologie qui ne sera pas traitée dans ce guide. Nous nous intéresserons ici à la formation du ruissellement de surface et des écoulements rapides de crue.

Lors d'un épisode pluvieux, une partie des précipitations s'infiltré tandis que l'autre partie ruisselle à la surface du sol, puis se concentre et s'écoule dans les fossés et les cours d'eau. C'est ce qu'on appelle généralement le ruissellement. Mais l'eau qui s'est infiltrée peut également participer à l'écoulement de crue par transfert de subsurface ou gonflement de nappe, on parle parfois d'effet "piston" (Figure 1). A l'exutoire d'un petit bassin versant, l'écoulement résultant de l'épisode pluvieux est donc généralement dû à la combinaison de ces différents processus.

Dans le domaine de l'hydrologie appliquée aux petits bassins versants miniers, on peut identifier quelques variables clés pour décrire la réponse du bassin versant à un épisode pluvieux : le temps de concentration, le débit de pointe, le volume de crue, le coefficient d'écoulement et le coefficient de ruissellement.

Le temps de concentration (T_c) est défini de manière théorique par le temps que met une goutte d'eau tombant sur la partie du bassin la plus éloignée pour parvenir à l'exutoire. C'est le cumul du temps de ruissellement sur les versants et du temps d'écoulement dans le réseau hydrographique. On estime généralement T_c par la durée entre la fin de la pluie efficace et la fin du ruissellement. Dans le contexte des petits bassins versants miniers, on définira plutôt le T_c en calculant le délai entre le centre de gravité du hyétogramme de pluie efficace (graphe des pluies) et le centre de gravité de l'hydrogramme même si ce temps est plutôt assimilable au temps de réponse (Figure 3). Ce temps de concentration est notamment exploité dans la "formule rationnelle", modèle qui lie le débit de pointe de période de retour donnée (par exemple 10 ans) à l'intensité de la pluie de même période de retour et ayant pour durée le temps de concentration du bassin versant. Plus le temps de concentration sera faible, plus l'intensité de pluie prise en compte sera élevée pour une même période de retour.

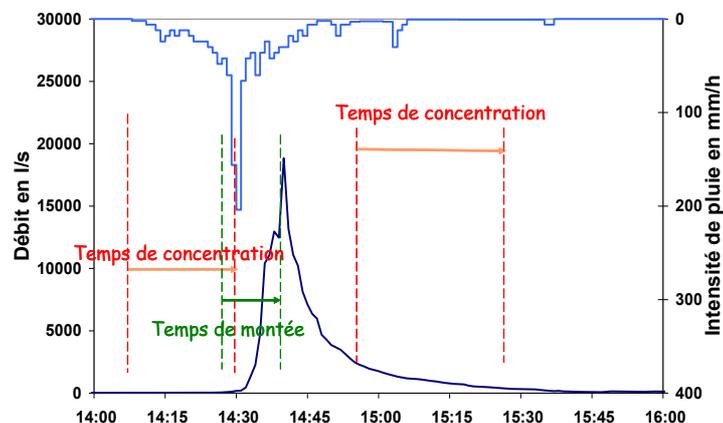


Figure 3 : Graphe pluie-débit et représentation des temps caractéristiques

Il faut noter que l'estimation de T_c en début et fin d'épisode (Figure 3) est mieux adaptée aux grands bassins versants. En effet sur les petits bassins versants les vitesses de transfert sont très dépendantes des débits de pointe. Dans ce cas, T_c devrait être de préférence évalué lorsque les écoulements dans le réseau hydrographique sont bien établis. La méthode du décalage des centres de gravité des hyétogrammes et hydrogrammes apparaît donc comme la mieux adaptée.

Les résultats obtenus sur le bassin versant de Poro sont résumés en Annexe 4 et confirment que les formules de la littérature, fréquemment utilisés par les bureaux d'étude sont inadéquates. On trouvera également en Annexe 4 deux méthodes de calcul mieux adaptées au contexte des bassins versants miniers.

Le calcul du volume de crue, puis du coefficient d'écoulement ou de ruissellement, pose la question délicate de la détermination du début et de la fin de l'écoulement de crue. Dans les petits bassins versants miniers à réponse rapide (et souvent à écoulement nul en dehors les épisodes pluvieux), le début de l'épisode est facile à identifier. Pour identifier la fin de la crue, il est souvent utile de tracer l'hydrogramme en coordonnées logarithmiques permettant de localiser une rupture de pente dans la courbe de décrue (Figure 4). Le volume de crue correspond à la surface entre l'hydrogramme et l'axe des temps, c'est-à-dire l'intégrale de la courbe. Il faudrait théoriquement soustraire l'écoulement de base et l'écoulement retardé mais dans le cas des petits bassins versants miniers, il est souvent nul ou très faible et peut-être négligé. Dans le cas représenté ci-dessous, issu des données de Poro, le débit de base au début de l'épisode est nul et le volume correspondant à l'écoulement retardé ne représente que 0.3 mm soit 5 % du volume de la crue.

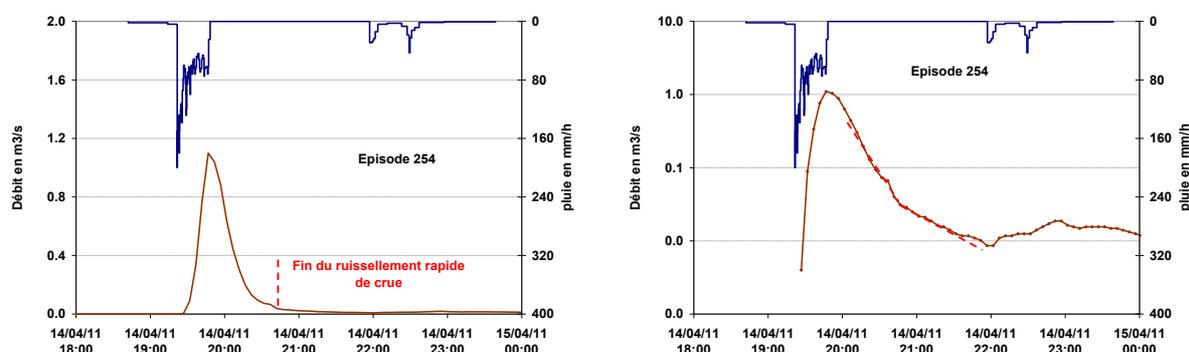


Figure 4 : Exemple de détermination de la fin du ruissellement rapide sur deux graphes du même épisode montrant l'intérêt d'utiliser les coordonnées logarithmiques (à droite) – Poro aval

Le coefficient d'écoulement est le rapport entre le volume écoulé et le volume de pluie ayant provoqué la crue (exprimés dans les mêmes unités). On distingue généralement **le coefficient de ruissellement** qui prend en compte le seul volume ruisselé en surface et le coefficient d'écoulement qui prend en compte la totalité du volume écoulé, pouvant donc prendre en compte les volumes d'écoulement hypodermique ou de soulèvement de nappe. En reprenant la méthode de délimitation décrite à la Figure 4, le coefficient d'écoulement prend en compte la partie d'écoulement rapide de crue. En domaine minier, il est proche du coefficient de ruissellement proprement dit. Cet écoulement rapide de crue est responsable de l'essentiel du transport solide en suspension lors des épisodes pluvieux.

3.2. EROSION ET TRANSPORT SOLIDE

Lors d'un épisode pluvieux, l'impact des gouttes de pluie détache les particules fines mobilisables à la surface du sol. Ces particules sont ensuite transportées par le ruissellement de surface, sur les versants puis dans les fossés et les cours d'eau. Ce transport en suspension est à l'origine du phénomène des eaux rouges qui pose des problèmes environnementaux aux milieux situés en aval (Figure 5, droite). Dans les drains, les écoulements sont également susceptibles de transporter par charriage² les matériaux plus grossiers qui sont disponibles. Des ouvrages de gestion des eaux sur mine (décanteurs, bassins de sédimentation) permettent de piéger tout ou partie des matériaux transportés. Pour rester efficaces et assurer la fonction qui leur est dévolue, ces ouvrages doivent être régulièrement curés des sédiments qui s'y sont déposés et qui comprennent des matériaux transportés en suspension et des matériaux transportés en charriage. Les curages fréquents permettent en outre de limiter la remobilisation des matériaux en cas de fortes crues avec des temps de transfert très courts dans les bassins de rétention.

Sur les sites miniers, les matériaux grossiers de décapage et de criblage sont désormais mis en verses stabilisées et ne sont en principe plus rejetés dans les creeks à l'aval. Néanmoins, il reste sur de nombreux sites des séquelles des modes d'exploitation passés et des stations de mesure situées aux exutoires de la mine peuvent être concernées par des transports solides importants par charriage de matériaux grossiers présents dans les lits ou sur les versants connectés à ces lits (Figure 5, gauche).



Écoulement sur mine et entraînement de matériaux

Baie de Poro après une pluie

Figure 5 : Erosion et transport solide en domaine minier (Poro)

² On se référera si nécessaire aux ouvrages d'hydraulique et de transport solide (voir Annexe 1) pour ces définitions

4. DEFINITION DES STRATEGIES D'OBSERVATION - RAPPEL DES FONDAMENTAUX DE L'HYDROMETRIE

4.1. NOMBRE ET SITUATION DES STATIONS, DUREE D'OBSERVATION

Le nombre de stations et leur situation seront fonction des objectifs des suivis. En Nouvelle-Calédonie, la variabilité interannuelle des précipitations est très importante. De plus, les phénomènes les plus dommageables interviennent pour les épisodes forts à extrêmes dont l'occurrence est très aléatoire. Les suivis hydro-sédimentaires doivent donc être réalisés sur des périodes longues, visant à couvrir toute l'hétérogénéité des situations hydrologiques (années sèches, années humides, saison cyclonique,...).

Dans un objectif de suivi réglementaire, les stations seront en principe pérennes. Dans un objectif de meilleure connaissance du fonctionnement hydrologique ou de meilleure conception des ouvrages, un suivi plus limité dans le temps pourra être envisagé (quelques années) dès lors qu'il aura permis d'observer quelques épisodes suffisamment significatifs pour rendre compte des effets de seuil et de saturation.

4.1.1. STATIONS DE MESURE DES PRECIPITATIONS

La variabilité spatiale des précipitations peut être importante, surtout en zone côtière et en zone de relief. Le nombre de postes pluviométriques à installer sera fonction de la taille de la zone instrumentée et de la variabilité des expositions aux flux perturbés dominants. Un minimum de deux pluviographes pour les sites de faible taille (quelques hectares à quelques kilomètres carrés) est indispensable. Disposer d'au moins deux postes permet en outre d'assurer un minimum de données en cas de défaillance d'un poste. Mais sur un site plus étendu, avec un relief marqué par des vallées ou des masques, un nombre plus important de postes devra être installé. La consultation de cartes des précipitations élaborées ces dernières années par la DAVAR (à partir des données du réseau et de la carte du relief) ou par Météo-France (à partir des données radar) pourra apporter de précieux éléments sur la variabilité locale des précipitations et guider le choix du nombre et de l'implantation des stations.

Sur un massif de faible extension où on ne placera que deux postes, il conviendra de les placer en pied et en sommet de massif. Le texte de l'OMM (cf. annexe 1) détaille les conditions d'implantation des pluviomètres (pluviomètres enregistreurs dits aussi pluviographes). L'effet du vent sur la captation par le cône du pluviomètre, et donc sur la représentativité de la mesure, est le premier facteur à prendre en compte. Le sommet de la surface réceptrice doit être horizontal et la hauteur des obstacles environnants (arbres, bâtiments) "au-dessus de la collerette devrait être au moins égale à la moitié de la distance qui les sépare de l'appareil (pour assurer une protection efficace contre le vent), mais ne devrait pas être plus grande que cette distance (pour éviter l'interception d'une partie des précipitations qui doivent atteindre le pluviomètre). L'idéal est que l'angle formé avec l'horizontale par une ligne joignant le dessus de la collerette au sommet des obstacles qui entourent l'appareil soit compris entre 30° et 45° (...).Lorsqu'il n'est pas possible d'assurer une protection adéquate contre les effets du vent, il est préférable de supprimer tout obstacle isolé situé à une distance de l'appareil inférieure à quatre fois leur hauteur " (OMM).

De même, l'OMM recommande de placer "l'ouverture du pluviomètre à une hauteur aussi peu élevée que possible (la vitesse du vent augmentant avec la hauteur), mais suffisante pour éviter que les éclaboussures sur le sol n'atteignent l'intérieur du pluviomètre". Une hauteur standard de 30 cm est pratiquée dans de nombreux pays. En métropole et en Nouvelle-Calédonie, une hauteur standard de 1 mètre est généralement préconisée.

En domaine minier, le risque d'obstruction du cône par les poussières implique une surveillance et un entretien soigné. De même, pour que les chroniques soient exploitables, un poste pluviométrique ne doit pas être déplacé et il convient donc de choisir l'emplacement en concertation avec les responsables de la production et d'éviter tout déplacement de l'appareil.

Enfin, la surveillance et l'entretien réguliers des appareils étant fondamentaux pour la qualité des mesures, les conditions d'accès doivent également être prises en compte lors du choix de l'emplacement, de même que la vulnérabilité aux actes de vandalisme.

4.1.2. STATIONS DE MESURE DES DEBITS

Dans un objectif de contrôle des rejets à l'aval, les stations de mesure de débit sur un site doivent se situer à proximité de la sortie du domaine minier. Des contrôles, et donc des mesures, à des niveaux intermédiaires peuvent être demandés par les services de contrôle dans le cadre de l'autorisation d'exploiter. Enfin, dans un objectif de compréhension du fonctionnement hydrologique du site, des stations supplémentaires peuvent être prévues en différents points du réseau hydrographique : amont-aval de bassins de sédimentation, confluences importantes, points du réseau liés à un changement fort de topographie ou d'occupation du sol, etc... Dans tous les cas, la localisation de la station sera un compromis entre le lieu idéal pour la connaissance du bassin versant, le lieu favorable pour l'obtention de bonnes conditions hydrauliques et le lieu permettant un accès aisé en toutes situations.

La dénomination de "station de mesure des débits" est en quelque sorte un abus de langage. Il conviendrait de dire "station limnigraphique" ou "station de mesure des hauteurs d'eau". En effet, dans la majorité des cas, on mesure et on enregistre les hauteurs d'eau dans une section de contrôle et ces hauteurs d'eau sont ensuite converties en débit au moyen de la relation hauteur/débit appelée courbe de tarage (cf 4.3.1). Il faut donc se placer dans les meilleures conditions possibles sur le plan hydraulique afin d'obtenir une relation univoque entre hauteur et débit. Obtenir le passage en régime critique³ au droit de la station est un bon moyen d'y parvenir. Une chute d'eau à l'aval supérieure ou égale à un tiers de la lame déversante est généralement recommandée. Les conditions d'approche à l'amont de la station doivent également être le plus rectilignes possible avec un rétrécissement progressif si la largeur de l'écoulement est réduite au passage de la station. Des recommandations plus détaillées sur la construction des stations seront données au paragraphe 4.2.2.

³ On se référera si nécessaire aux ouvrages d'hydraulique (voir Annexe 1) pour ces définitions

4.1.3. STATIONS DE MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES

Pour les problématiques actuelles de gestion des transports solides en site minier, il s'agit essentiellement de mesurer les transports solides en suspension (MES). Il convient de déterminer non seulement les concentrations des écoulements en MES mais d'évaluer les flux de matériaux transportés. C'est pourquoi les stations de mesure des concentrations doivent être associées aux stations de mesure des débits. Les concentrations sont extrêmement variables au cours du temps, il faut donc doter les stations de moyens de mesure permettant d'évaluer ces variations des concentrations au cours du temps. La méthode de référence est la mise en place de préleveurs automatiques d'échantillons programmés de façon adaptée à la dynamique des crues (cf. 4.3.2). Les turbidimètres présentent l'avantage de permettre une mesure en continu mais ils présentent deux inconvénients :

- la relation turbidité/concentration n'est ni univoque ni stable ;
- les gammes de mesure de la plupart des turbidimètres du commerce ne couvrent pas les fortes concentrations qui peuvent être rencontrées (quelques grammes, voire quelques dizaines de grammes par litre). Or ces pics de concentration sont responsables de la plus grande proportion des flux exportés.

Pour ces raisons, il est souhaitable de mettre en place dans la même station de mesure un ensemble constitué d'un turbidimètre et d'un préleveur d'échantillons.

4.2. PRESENTATION DE LA STATION TYPE

4.2.1. STATION DE MESURE DES PLUIES

L'appareil de référence est le pluviographe à augets basculeurs équipé d'une centrale d'acquisition. Le type d'appareil à utiliser est décrit en **Annexe 2**. Le rapport entre la surface horizontale du cône et le poids de basculement de l'auget détermine la précision de l'appareil : ainsi des augets de 20 g associés à un cône de 400 cm² basculent pour une pluie de 0.5 mm.

Il est utile d'y associer un moyen de contrôle des enregistrements, comme par exemple un "contrôle au seau", c'est-à-dire un bidon étanche raccordé au réceptacle du pluviographe qui permet de collecter et de connaître la quantité totale de liquide qui a traversé le dispositif. Une autre solution, adoptée par la DAVAR sur son propre réseau, est la mise en place d'un pluviomètre totalisateur : il s'agit d'un cylindre vertical de même section horizontale que le pluviographe dans lequel l'eau s'accumule entre deux passages de l'opérateur (Figure 6). Une fine couche d'huile évite l'évaporation et l'opérateur mesure dans le cylindre la hauteur d'eau accumulée depuis son précédent passage. Le dispositif doit être vidé manuellement quand il est plein (il faut notamment veiller à pouvoir y stocker un épisode exceptionnel, c'est-à-dire que la revanche doit être d'au moins 80 cm).

D'autres matériels permettent de mesurer les précipitations (spectropluviomètre ou disdromètre, pluviographe à pesée, impactomètre) mais ils sont plus coûteux et d'une utilisation plus délicate.

Lorsque cela est possible, mettre en place une transmission GSM des données de la centrale associée au pluviomètre est très utile et améliore la qualité et la fiabilité des données.



Poró amont : pluviographe DAVAR équipé d'une transmission GSM (à droite) et pluviomètre totalisateur (à gauche)

Pluviographe équipé d'un contrôle « au seau »

Figure 6 : Exemples de stations pluviographiques

4.2.2. STATION DE MESURE DES DEBITS

La **station limnigraphique** associe une section de contrôle à un **enregistrement en continu des hauteurs d'eau**.

4.2.2.1. Section de contrôle

La section de contrôle est dans la plupart des cas en domaine minier, une section artificielle aménagée sur un fossé, un cours d'eau (creek), un exutoire d'ouvrage. La difficulté principale est d'aménager une section qui permette de mesurer la totalité de la gamme des débits transitant par la station. En effet, les déversoirs en V qui permettent d'obtenir une bonne précision sur les faibles débits ne sont pas adaptés à la mesure des débits de crue importants. A l'inverse, une section de grande largeur apte à évacuer des débits importants introduit une forte incertitude sur la mesure des débits faibles et moyens : une faible variation de la hauteur d'eau (de l'ordre du centimètre, précision de la majorité des capteurs) peut correspondre à une forte variation de débit. Si l'objectif est de mesurer à la fois les faibles et les forts débits, une section composite peut être une solution (seuil rectangulaire avec une échancrure en V) ou deux sections de mesure successives. Dans ce dernier cas, il faut veiller à ce que la perturbation de l'écoulement par la section située à l'amont ne modifie pas les conditions d'approche de la station située à l'aval.

Ainsi, les points clés pour le choix de la section, qu'il s'agisse d'une section naturelle ou d'une section aménagée sont :

- Les dimensions disponibles pour la section de mesure, qui doivent être adaptées à la gamme de débit visée (plage de valeurs, sensibilité)

- La section de contrôle (imposant la condition aux limites aval) doit être stable dans le temps et dans l'espace

Certains types de section de contrôle ont été normalisés pour permettre d'utiliser une relation théorique entre la hauteur d'écoulement et le débit. C'est le cas des déversoirs triangulaires en mince paroi (Norme ISO1438 :2008) mais ils sont réservés aux débits faibles et moyens. De plus, si le transport solide est important, la hauteur de pelle⁴, indispensable à l'amont du seuil pour satisfaire les conditions de mesure, est rapidement comblée. Ils ne sont donc pas adaptés aux mesures de débit dans les cours d'eau à fort transport solide, ce qui est généralement le cas en domaine minier.

Différents types de canaux (souvent dénommés "flumes") étalonnés sont mieux adaptés aux écoulements avec transport solide. Dans les canaux Venturi une restriction accélère l'écoulement et occasionne un passage un régime critique qui rend univoque la relation hauteur/débit. Parmi ces canaux, le canal Parshall, ou "canal auto-jaugeur à ressaut", version modifiée d'un canal Venturi, est particulièrement bien adapté et peut être considéré comme "auto-dégravant". D'autres configurations peuvent être utilisées : canaux Venturi à fond plat (ISO 4359), H-Flume, etc (Figure 7)... mais ils sont plus sensibles aux dépôts que le canal Parshall.

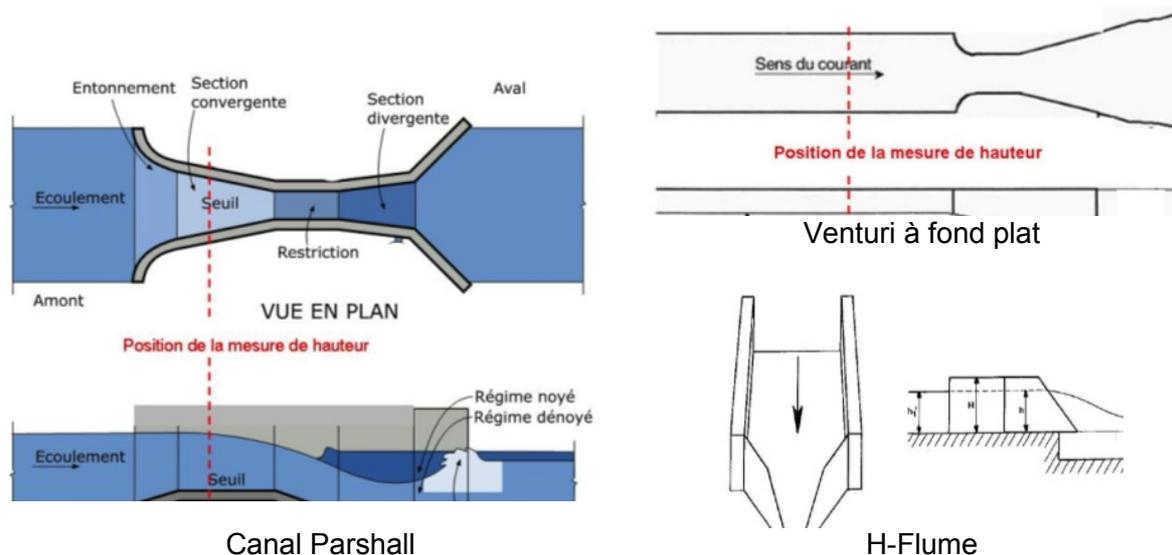


Figure 7 : Schémas de canaux jaugeurs

Enfin, des canaux de section trapézoïdale, du type de ceux mis en place sur le site de Poro, permettent de disposer d'une section de contrôle stable et facile à étalonner au moyen d'un modèle hydraulique. Si le canal est correctement dimensionné, il permet grâce à sa forme une précision correcte sur les moyens débits et une capacité importante pour les forts débits de crue. La précision reste médiocre pour les très faibles hauteurs d'eau.

⁴ Distance entre le fond du chenal d'amenée en amont et la cote de début de déversement, autrement dit entre la pointe du V et le fond du lit en amont.

Une solution est celle d'un canal de section composite (avec une cunette par exemple), ou avec un fond incliné (en dévers vers une rive) permettant de concentrer les faibles débits et d'avoir ainsi une plus grande hauteur d'eau en étiage

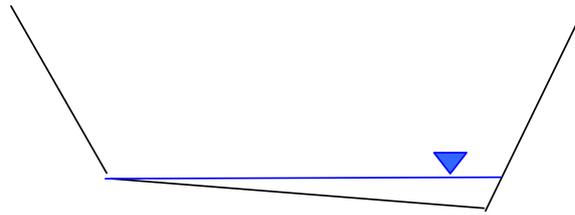


Figure 8 : Section à fond oblique permettant d'augmenter la hauteur d'écoulement pour les faibles débits

Dans tous les cas, même si les normes ou les modèles hydrauliques fournissent **des courbes de tarage théoriques** pour ces canaux, il convient de vérifier ou modifier ces courbes à l'aide de **jaugages in situ** (cf 4.3.1).

Points à retenir :

- Section de mesure : la sensibilité doit être adaptée à la gamme de débit visée
- Section de contrôle naturelle : la section imposant la condition aux limites aval doit être stable (dans le temps et l'espace) et assurer un passage en régime d'écoulement critique
- Section de contrôle artificielle : à défaut d'une section naturelle stable ou de conditions hydrauliques adaptées, un aménagement de la section (forme hydraulique adaptée) sera créée pour assurer une relation hauteur-débit stable. La partie finale de la section doit se terminer par un passage en régime d'écoulement critique (chute ou accélération suffisante).

4.2.2.2. Mesure de hauteur d'eau

La **mesure des hauteurs d'eau** est réalisée au moyen de différents **capteurs** couplés à un enregistreur également appelé centrale de mesure ou **data-logger**. Différents types de capteurs sont présentés en Annexe 2.

Les **limnigraphes à flotteur**, capteurs fiables et robustes ne sont généralement pas adaptés dans les cours d'eau à fort transport solide car ils nécessitent un puits de tranquillisation qui est souvent colmaté par les dépôts de sédiments.

Les **capteurs de pression**, souvent utilisés car d'installation simple, présentent également l'inconvénient d'être sensibles aux dépôts et nécessitent de ce fait un entretien assez contraignant. Les sondes doivent impérativement être ventilées et les capteurs bulle à bulle ne peuvent être utilisés car trop sensibles au bouchage par des sédiments fins.

Les capteurs sans contact avec l'écoulement comme les **capteurs radars** ou les **capteurs Ultra-sons** sont particulièrement bien adaptés à la mesure des écoulements chargés. Ils présentent l'inconvénient de devoir être installés au dessus de la section de mesure et sont de ce fait plus exposés au vandalisme.

Enfin, ces dernières années ont vu le développement de **stations intégrées** comprenant une mesure de **hauteur d'eau** et une mesure de vitesse de l'écoulement par effet **doppler**.

Connaissant la géométrie de la section de mesure, ces systèmes fournissent directement le débit traversant cette section. A notre connaissance, ils n'ont pas encore été utilisés en routine en domaine minier, la mesure de vitesse peut être perturbée par les suspensions et ils requièrent une certaine technicité des équipes chargées du suivi. Un tel dispositif a été testé pendant quelques périodes à Poro (module 750 ISCO, cf. rapport Hydromine) et le capteur doppler de vitesse a donné des résultats cohérents avec les autres mesures de vitesse. Il présente néanmoins l'inconvénient d'être sensible à l'insolation s'il n'est pas immergé.

Différents types de **centrales d'acquisition** sont disponibles. Certains capteurs de niveaux sont dotés d'une centrale d'acquisition intégrée (exemple Level-Troll[®] de la marque In-situ[®]). Les centrales d'acquisition autonomes et multivoies sont utiles car elles permettent de connecter plusieurs capteurs. Le nombre de voies, la fréquence d'acquisition, la capacité mémoire de la centrale, la facilité de la programmation et du relevé des données sont les critères principaux de choix du matériel. Dans la mesure du possible, la télétransmission des données (GSM ou radio) est un avantage certain.

Points à retenir :

- © **Le type de capteur sera déterminé par les contraintes de pose. Les capteurs de pression ventilés constituent le choix souvent le mieux adapté en raison de la fiabilité, simplicité de pose et robustesse. Les capteurs sans contact ne seront pas sensibles aux sédiments mais seront utilisables uniquement s'il est possible de les positionner au-dessus de la section.**

4.2.2.3. Eléments complémentaires de la station de mesure

Une échelle à lecture directe ou échelle limnigraphique est indispensable dans chaque station. Cette échelle doit être lue à chaque passage d'un opérateur et les mesures de niveau du capteur seront toujours rattachées à la hauteur à l'échelle. Elle doit permettre la mesure de la totalité de la gamme des hauteurs d'eau (avec éventuellement plusieurs éléments si la géométrie de la section de mesure l'impose) et être solidement fixée pour résister au courant lors des crues, mais ne pas être intrusive dans l'écoulement pour ne pas perturber la relation hauteur - débit. Dans toute la mesure du possible, son niveau de référence sera rattaché par un levé topographique au repère RGNC. Installé à proximité de la station, mais dans un lieu qui ne peut être impacté par les débordements en crue, un repère fixe pour rattacher cette échelle est une précaution utile.

L'alimentation en énergie doit également être prévue. Les capteurs et centrales de fabrication récente sont en général peu gourmands en énergie et leur alimentation autonome peut être envisagée. Néanmoins, certains équipements nécessitent une alimentation par le réseau ou par un ensemble "**batterie et panneau solaire**". Cette alimentation sera de toute façon nécessaire pour les stations de mesure des transports solides (cf. § 4.2.3).

Capteurs de vitesse : il est particulièrement difficile de réaliser des jaugeages en crue sur les stations de mesure en site minier, pour des difficultés d'accès en période pluvieuse mais surtout parce que les crues sont très rapides et ne permettent généralement pas d'être sur place au bon moment. Pour cette raison, il est particulièrement intéressant de disposer de mesures en continu de la vitesse de l'eau. Différentes solutions sont possibles, comme la mise en place de capteurs doppler (mesure de vitesse dans la section) ou radar (mesure de la vitesse de surface). Certains constructeurs proposent ce type de capteur associé au préleveur automatique d'échantillons.

Boitiers et abri de mesure : à l'exception des capteurs immergés équipés d'une centrale d'acquisition autonome, la plupart des équipements nécessitent la mise en place d'un boîtier étanche pour la centrale d'acquisition et certaines connectiques. Il est également souvent nécessaire de protéger les équipements du vandalisme et des intempéries. A cet égard, la mise en place d'un abri permettant de regrouper les équipements (y compris le préleveur d'échantillons) est une solution idéale. La Figure 9 présente deux types d'abris utilisés en domaine minier. L'abri de Poum (SLN) présente l'avantage de pouvoir travailler à l'intérieur en cas d'intempéries, par exemple pour relever le préleveur d'échantillons en cours d'épisode s'il est plein.



Abri DAVAR contenant préleveur, batterie et centrale (Poro)

Abri "cabane" (Poum)

Figure 9 : Abris pour les équipements de stations de mesure des débits et transports solides

Points à retenir :

- ⊙ **Une échelle de référence à lecture directe est indispensable**
- ⊙ **Les équipements annexes (batterie, centrale d'acquisition, etc.) doivent être protégés du vandalisme**

4.2.3. STATION DE MESURE DES TRANSPORTS SOLIDES

Comme indiqué précédemment, la mesure des concentrations en MES doit être associée à une mesure de débit. Les instruments permettant cette mesure seront donc généralement installés dans la station limnigraphique ou à proximité immédiate de celle-ci.

L'équipement de base est un préleveur automatique d'échantillons. Différents types sont disponibles sur le marché (cf. Annexe 2).

Les modèles à pompe péristaltique sont les plus courants et les plus fiables. Une crépine d'aspiration est placée dans l'écoulement et reliée par un tuyau à l'appareil qui doit être placé sur la berge, à l'abri des plus hautes eaux. Les hauteurs maximales d'aspiration sont fournies par le constructeur. Des tests en laboratoire ont montré la bonne capacité de ces appareils à prélever toute l'étendue granulométrique des suspensions. Il reste à choisir le bon emplacement pour la crépine qui doit être disposée en un point où l'agitation est suffisante pour assurer une homogénéité des concentrations. Les tests réalisés in situ à Poro ont montré que la variabilité des concentrations sur la verticale était faible. Dans les

stations de Poro, la crépine est placée près du fond mais le tuyau reste libre sur quelques dizaines de centimètres ce qui permet à la crépine d'être au sein de l'écoulement pendant la crue. Sur d'autres sites, la crépine est placée dans une goulotte qui plonge en amont du seuil de mesure.



Crépine libre dans l'écoulement (Poro aval) Crépine protégée par une goulotte (Poum)

Figure 10 Mise en place des crépines d'aspiration des préleveurs

La stratégie de prélèvement est fondamentale pour une quantification satisfaisante des flux solides et sera exposée au paragraphe 4.3.

La même précaution de représentativité dans l'écoulement, mais également de protection contre les courants violents en crue, prévaut pour le choix de l'implantation du capteur du turbidimètre (cf. 4.1.3). Si on soupçonne une stratification verticale des concentrations, la mise en place de deux ou plusieurs sondes sur une verticale est une bonne solution. Des prélèvements manuels in situ en situation de crue sont souhaitables pour analyser la situation. Ces configurations se trouvent notamment en sortie d'ouvrage de décantation. Des exemples de capteurs sont présentés en Annexe 2. Leur consommation en énergie et leur gamme de mesure doivent guider le choix du matériel.

4.2.4. STATION DE MESURE TYPE

La Figure 11 résume, très schématiquement, les différentes composantes d'une station de mesure des débits et des transports en suspension. Elle est inspirée de la station de Poro aval (mais qui, elle, ne comporte pas de capteur de niveau sans contact).

Des exemples de station de mesure mises en place, suivies ou modifiées dans le cadre du projet CNRT sont donnés dans la Figure 12. Aucune de ces stations ne constitue un cas idéal et la conception de nouvelles stations devrait s'inspirer des retours d'expérience sur ces équipements.

Par exemple, la station de Poro Amont a été réalisée avec des dimensions inférieures au schéma du projet élaboré par la DAVAR à l'issue d'une étude hydraulique. Elle fonctionne donc en débordement pour les crues moyennes et fortes et l'incertitude sur la courbe de tarage y devient importante. Fort heureusement, les débits en débordement sont contenus dans une section connue et bien délimitée, de sorte que l'extrapolation pour les fortes hauteurs d'eau reste satisfaisante. La station de Poum présente l'inconvénient d'être largement dimensionnée pour les fortes crues et donc d'offrir une faible lame déversante pour les crues faibles et moyennes entraînant une forte incertitude sur les débits déduits des

hauteurs d'eau dans cette gamme. La station SW34 de Koniambo est également sous-dimensionnée. De plus, sur cette image, elle ne comportait pas d'échelle à lecture directe (installée depuis). Une section de débordement en prolongement des ailes du canal (flume) et un aménagement de l'entonnement ont également été réalisés. On voit sur la photo que le canal est sujet aux dépôts de matériaux. Là encore, l'aménagement du lit en amont a permis d'améliorer la situation.

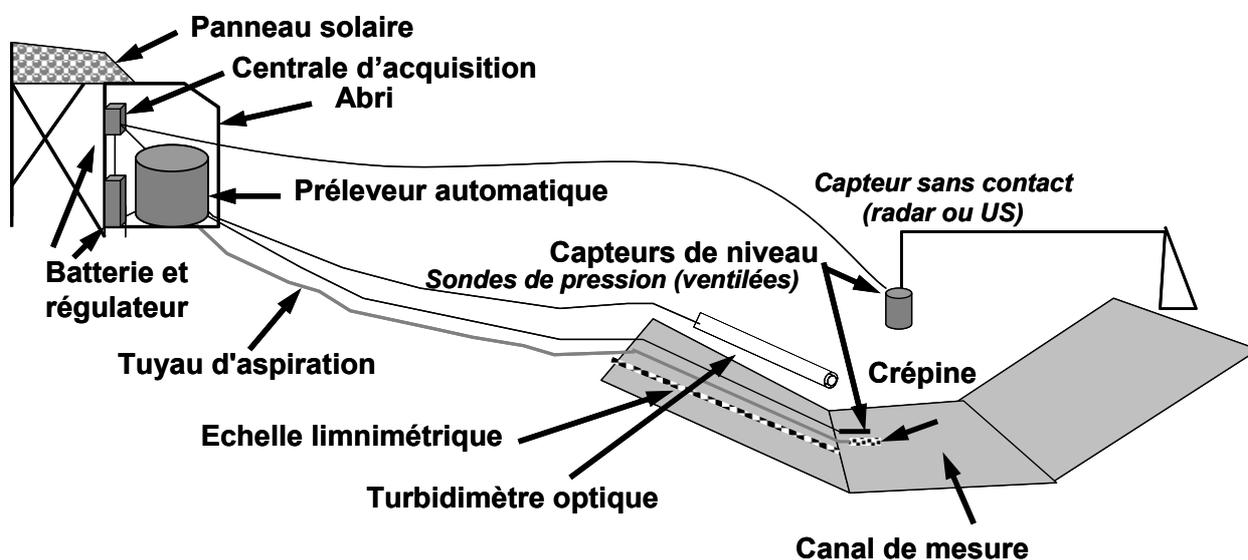


Figure 11 : Schéma d'une station de mesure type (exemple inspiré de Poro Aval)



Station de Poro aval



Station de Poro amont



Station de Povio (Poum SLN)



Station SW34 (Koniambo, KNS)

Figure 12 : Exemples de stations du projet CNRT

4.3. DEFINITION DES PROCEDURES DE GESTION ET DE SUIVI

Une première partie de ce chapitre sera consacrée aux besoins et méthodes de jaugeage des stations de mesure de débits. Seront ensuite abordées les stratégies d'échantillonnage. Enfin, les procédures pour la gestion des sites et le recueil de données seront détaillées.

4.3.1. JAUGEAGES

Comme indiqué ci-dessus, des mesures in-situ sont nécessaires pour établir la correspondance entre hauteur d'eau dans la section de mesure et débit, dite courbe de tarage. Même pour les sections calibrées disposant d'une courbe de tarage théorique, des jaugeages sont nécessaires pour vérifier cette courbe car les conditions de terrain sont rarement strictement fidèles aux conditions normalisées. Si la section de mesure est fixe (ce qui est hautement recommandé) et si les conditions amont-aval ne sont pas modifiées, une série de jaugeages après l'installation pourra être suffisante si elle couvre de manière satisfaisante l'étendue des hauteurs d'eau observables. Néanmoins, notamment pour des raisons de sécurité, les fortes hauteurs d'eau ne pourront pas toujours être jaugées et il sera en général nécessaire d'avoir recours à des méthodes d'extrapolation. Les principales méthodes de jaugeage sont évoquées ci-dessous et on se référera aux ouvrages et sites spécialisés cités en annexe 1.

4.3.1.1. Méthode d'exploration du champ de vitesse (NF EN ISO 748 2007)

C'est la méthode de référence et son principe est simple. Le débit est égal au produit de la vitesse moyenne de l'écoulement par la surface de la section mouillée mais la vitesse de l'écoulement n'est pas uniforme sur la section transversale d'un cours d'eau. Il est donc nécessaire d'explorer le champ des vitesses en réalisant des mesures en plusieurs points de la section. L'exploration des vitesses peut se faire avec différents appareils :

- Courantomètres mécaniques (moulinets)
- Courantomètres électro-magnétiques
- Courantomètres acoustiques à effet Doppler

Les courantomètres sont des appareils de précision conçus pour introduire dans la mesure de la vitesse des erreurs négligeables lorsqu'ils sont en bon état et utilisés correctement. Ce matériel doit donc être manipulé avec soin, aussi bien au cours des mesures que pendant le transport et des précautions doivent également être prises pour le stockage. Il est nécessaire de vérifier régulièrement la calibration et l'étalonnage des instruments. Un exemple de fiche de terrain spécifique au jaugeage est présenté en annexe 3.

4.3.1.2. Estimation des vitesses de surface par flotteurs.

Cette méthode s'appuie sur une estimation de la vitesse moyenne à l'aide de flotteurs se déplaçant en surface de l'écoulement. En effet, on observe généralement que la vitesse moyenne d'un écoulement est égale à la vitesse de surface multipliée par un coefficient K, compris entre 0,4 et 0,9. Cette méthode n'est pas idéale, mais elle sera mise en œuvre lorsqu'il est impossible d'employer un instrument de mesure intrusif sans mettre en péril la sécurité des opérateurs ou du matériel (vitesses ou profondeurs excessives, corps flottants, lit de la rivière en mouvement ; c'est souvent le cas pendant les crues) ; lorsque les vitesses

et/ou profondeurs sont trop faibles ; lorsque l'on veut obtenir une estimation rapide du débit ; lorsque le matériel utilisé classiquement est en panne ou indisponible.

4.3.1.3. Méthode par dilution (NF ISO 9555)

La méthode de jaugeage par dilution consiste à injecter en un point du cours d'eau un traceur en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au niveau d'une section située à l'aval. Un traceur simple est le sel (chlorure de sodium) dont on peut suivre facilement l'évolution de la concentration à l'aide d'un conductimètre. Deux méthodes sont pratiquées, l'injection à débit constant d'une solution de concentration connue ou l'injection instantanée d'une quantité connue de sel. Cette méthode est bien adaptée aux cours d'eau torrentiels ou à faible tirant d'eau pour des débits modérés (quelques centaines de l/s à quelques m³/s).

4.3.1.4. Méthode par capacité

Cette méthode, aussi appelée « méthode au seau », est réservée à l'estimation des très faibles débits. Elle consiste à mesurer le temps de remplissage (partiel ou total) d'un réservoir de volume connu. Quand les conditions de sa mise en œuvre sont remplies, la méthode par capacité doit être employée en priorité car elle est la plus simple, la plus rapide et la moins coûteuse. De plus les incertitudes obtenues sont généralement réduites.

4.3.2. STRATEGIES D'ECHANTILLONNAGE

La concentration en MES peut évoluer rapidement au cours d'une crue. On constate fréquemment en début de crue un effet de "chasse" des matériaux fins déposés dans les lits à proximité de la station. Ce phénomène (dit aussi "first flush") entraîne de fortes concentrations (quelques grammes voire quelques dizaines de grammes par litre) mais ces concentrations sont généralement associées à de faibles débits et produisent donc des exportations faibles en masse totale. A l'inverse, des concentrations modérées associées à de forts débits peuvent exporter des quantités considérables de MES. Il convient donc de programmer les préleveurs de manière à échantillonner correctement les pointes de crue.

Les préleveurs disponibles sur le marché proposent différents types de programmation.

- **Programmation sur un seuil de déclenchement puis sur un intervalle de prélèvement en temps.** C'est la programmation la plus simple mais elle a l'inconvénient de ne pas être très pertinente pour couvrir tout l'hydrogramme. Un délai long risque de ne pas permettre de suivre une montée rapide des eaux. Un délai court risque de remplir les 24 flacons disponibles sur le seul début de la crue et de manquer les séquences intéressantes. Si une telle programmation est adoptée, il est nécessaire d'examiner un certain nombre d'hydrogrammes afin de choisir des délais adaptés à la dynamique des crues du site.
- **Programmation sur des seuils de niveau.** C'est la programmation adoptée à Poro avec des préleveurs ISCO. Elle permet de fixer des consignes de prélèvement adaptées à la gamme des hauteurs atteintes par les crues. Il est possible de fixer des seuils différents en montée ou en descente. A Poro, une partition des flacons a été retenue et 6 flacons sur les 24 sont réservés aux fortes hauteurs d'eau. Ainsi, si les 18 flacons de la partition "ordinaire" ont été remplis avant la pointe de crue, la survenue de fortes hauteurs peut être couverte par les six flacons en réserve dans la seconde partition.

- **Programmation sur des seuils de turbidité** : si un turbidimètre est associé au préleveur et connecté à ce dernier, il est possible d'envisager un déclenchement sur des valeurs de turbidité. A condition de connaître la gamme de concentrations possibles dans la station, cette programmation permet d'éviter de trop nombreux prélèvements sans intérêt pour le calcul du flux solide mais de bien échantillonner les séquences de fort transport solide.

Il est également possible de programmer les prélèvements non plus sur des valeurs absolues de niveau et de concentration mais sur des critères de variation. Un seuil absolu de déclenchement du premier prélèvement est fixé. Quand ce seuil est dépassé, le prélèvement suivant est réalisé quand le niveau (ou la turbidité) a varié d'un seuil choisi (et défini après analyse de séquences observées). On peut combiner des seuils de variation avec des délais. Si au bout d'un certain laps de temps, la variation n'a pas dépassé le seuil choisi, on peut déclencher le prélèvement sur un seuil de délai. Cette stratégie n'est actuellement pas possible avec les centrales de préleveurs. Mais elle peut être programmée sur une centrale autonome qui déclenche les prélèvements par fermeture de contact.

Les points de mesure ainsi obtenus sur un hydrogramme donnent une mesure discontinue de la concentration. De plus, leur nombre est limité par le nombre de flacons (généralement 24, éventuellement 48 si on installe deux préleveurs). Pour obtenir des valeurs de concentration sur la totalité d'un épisode, il est nécessaire d'interpoler voire d'extrapoler (au-delà du dernier prélèvement) les valeurs de concentration. Des données de turbidité sont alors très utiles.

Dans l'exemple présenté à la Figure 13, l'hydrogramme (A) illustre les variations des concentrations en MES aux cours d'une crue. On observe que le pic de concentration intervient avant le pic de crue.

- L'hydrogramme (B) présente une situation où le nombre d'échantillons est insuffisant pour décrire correctement l'évolution des concentrations en MES ;
- L'hydrogramme (C) présente une situation où la répartition des échantillons prélevés pendant la crue ne permet pas de décrire l'intégralité des variations des concentrations en MES ;
- L'hydrogramme (D) présente une situation où la répartition des échantillons prélevés pendant la crue permet une description satisfaisante des variations des concentrations en MES ;
- Dans les trois cas de figure, on peut améliorer la description des variations des concentrations en MES en utilisant la turbidité de l'eau. Une liste non exhaustive des capteurs de turbidité utilisés en rivière est présentée en Annexe 2.

L'hydrogramme (E) présente une situation idéale où des échantillons prélevés pendant la crue sont suffisants et un turbidimètre a permis d'enregistrer les variations de la turbidité. Dans cet exemple il existe une relation univoque entre la concentration en MES et la turbidité (graphique F). Cette relation est alors utilisée pour préciser la description des variations des concentrations en MES au cours de la crue.

La définition d'une stratégie d'échantillonnage est une étape difficile dans la mise en place de mesures pertinentes de transport solide en suspension. C'est l'analyse des crues échantillonnées qui permettra d'adapter le programme de prélèvements pour obtenir la meilleure connaissance possible des flux de MES compte-tenu de la gamme des hauteurs d'eau et des concentrations.

Cette stratégie est un compromis entre la description fine des variations de concentration et la nécessité de limiter le nombre d'échantillons pour ne pas alourdir les charges de gestion du matériel (relevé des flacons) et d'analyse. Sous certaines conditions (relation

concentration turbidité/stable, répartition temporelle peu pertinente ou redondante, par exemple) il est possible de ne pas analyser tous les échantillons prélevés. Néanmoins, cette décision d'une économie de frais d'analyse nécessite une critique préalable de la qualité et de la pertinence de l'échantillonnage.

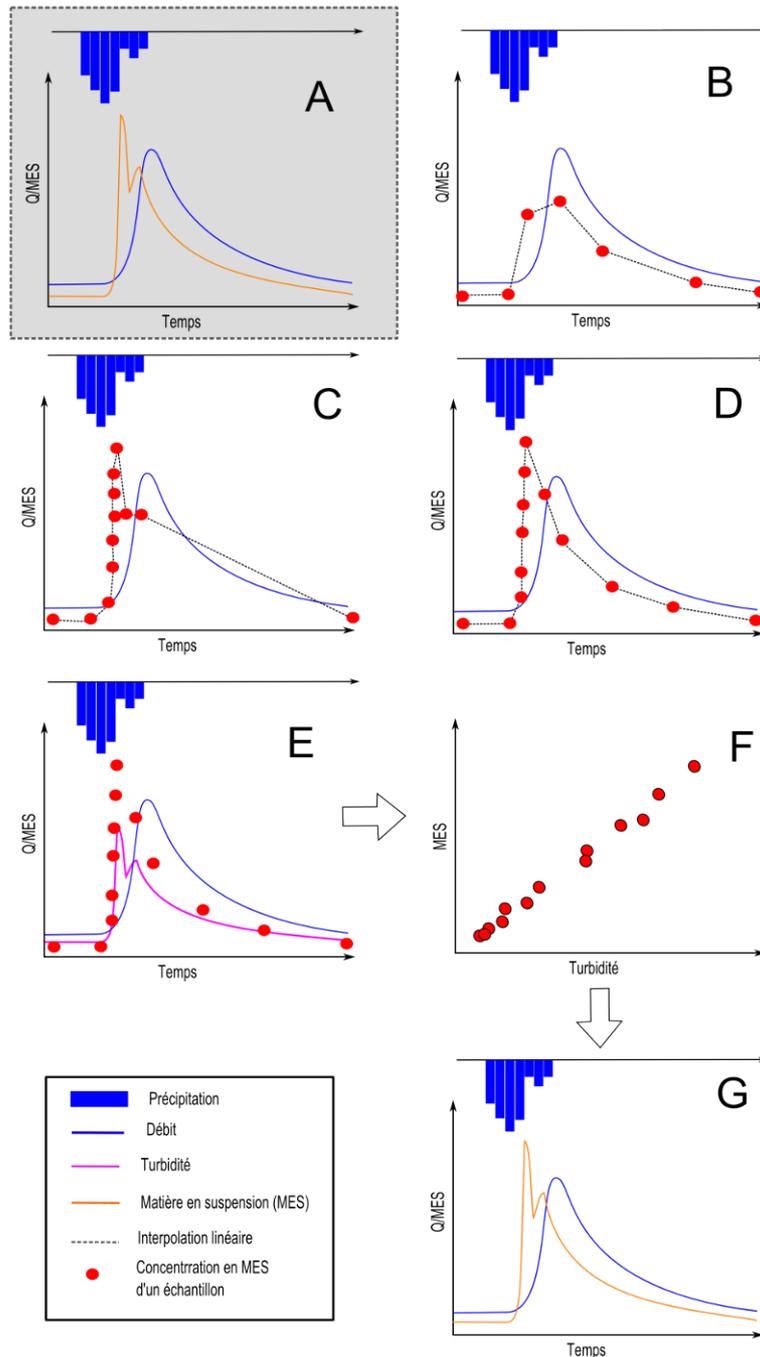


Figure 13 : Hydrogramme de crue, stratégie d'échantillonnage et conséquences sur la description des variations des concentrations en MES (en bleu, débit, en rouge/orangé concentration)

4.3.3. SUIVI DES SITES DE MESURE

4.3.3.1. Fiche d'installation et dossier de station

Pour chaque station, il est nécessaire de réaliser lors de l'installation une fiche descriptive de la station. Cette fiche doit regrouper tous les éléments constitutifs de la station, par exemple pour une station hydrométrique :

- Coordonnées
- Plan d'accès
- Nature et dimension de la section de contrôle
- Rattachement RGNC de l'échelle
- Plans de l'ouvrage
- Photos
- Capteurs installés

Cette description est complétée par une "fiche de vie" où sont consignées avec leurs dates les modifications intervenues sur la station : changement de capteurs, incidents (par exemple dégradation par une crue), modifications de la géométrie ou des situations amont/aval, etc...

4.3.3.2. Visites sur site

La fréquence des visites sur les stations est fonction de la durée pendant laquelle les appareils peuvent fonctionner sans nécessiter d'intervention de maintenance (remplacement des batteries, nettoyage et calibration des capteurs, téléchargement des données, remplacement du flaconnage pour les prélèvements automatiques). Un compromis doit être trouvé entre la qualité des données souhaitées et la fréquence des visites. Plus les visites sont fréquentes et plus la probabilité de perte de données est faible.

La télétransmission des données permet d'optimiser la fréquence des visites et de limiter les pertes de données. Même en cas de télétransmission, des visites régulières restent nécessaires (pour l'entretien et les jaugeages par exemple) mais l'examen des données télétransmises permet de détecter plus rapidement des anomalies et de programmer des interventions.

Les visites sont l'occasion d'acquérir des données manuellement (hauteur d'eau, mesure physicochimique, prélèvement d'eau) afin d'apporter des corrections nécessaires sur les données enregistrées. Les visites en période de crue permettent de réaliser les jaugeages indispensables à l'étalonnage de la station. Il est aussi important de prendre des photos et noter les changements constatés (en particulier après un épisode de crue). Toutes ces observations doivent être enregistrées dans le dossier de la station.

Pour chaque station, des instructions écrites communiquées aux intervenants préciseront clairement les interventions à prévoir lors de chaque visite.

Ces instructions pourront préciser les opérations de routine à réaliser sur les instruments (nettoyage, contrôle des batteries...), les actions à mettre en place quand un instrument a été endommagé, une procédure pour enregistrer les observations (hauteur d'eau, tension des batteries, synchronisation des horloges, nombre d'échantillons prélevés, date et heure des prélèvements, mesures physicochimiques,...). Ces instructions sont aussi données oralement par un superviseur avant chaque visite ou à défaut le plus régulièrement possible.

4.3.3.3. Fiche de terrain ou fiche de visite, Rapport d'activité sur la station

Chaque visite sur le site, régulière ou exceptionnelle, doit faire l'objet d'une fiche de terrain (ou fiche de visite) où sont consignées les informations nécessaires à la gestion du site et à la critique ultérieure des données. Un exemple de fiche de terrain est donné en annexe 3. Disposer sur le site d'une fiche pré-imprimée sert en outre d'aide-mémoire et permet de ne pas omettre les différents contrôles à réaliser. Parmi les informations indispensables, citons (liste non exhaustive) :

Pour toutes les stations

- date et heure du passage
- noms des opérateurs
- conditions météo
- interventions sur la station (nettoyage, changements de capteur, etc...)

Pour les stations pluviographiques

- état du cône
- hauteur dans le pluviomètre totalisateur ou volume dans le seau
- nombre de basculements enregistrés depuis le dernier relevé (en général fourni par la centrale lors du déchargement)
- interventions (nettoyage du cône, vidange du seau, etc...)

Pour les stations limnigraphiques et MES

- hauteur à l'échelle
- hauteur lue par le capteur
- état du capteur et de la section de mesure (dépôts éventuels, etc...)
- nombre de flacons dans le préleveur
- interventions (nettoyage des dépôts, relevé et remplacement des flacons, etc...)

Ces données sont capitales, elles doivent être archivées et accessibles dans la base de données.

4.3.3.4. Dysfonctionnement

Le dysfonctionnement d'un instrument de mesure est généralement constaté au moment de l'intégration des données. Les dysfonctionnements entraînent alors des pertes de données.

Pour prévenir les risques de dysfonctionnement, il faut effectuer une maintenance préventive. Pour les équipements autonomes il faut suivre régulièrement le niveau des batteries et de la mémoire. En produisant des alertes de dysfonctionnement (batterie faible, valeur anormale, mémoire saturée) la télétransmission est un bon moyen de corriger rapidement les dysfonctionnements ou de planifier la maintenance.

Quand les éléments du système d'acquisition sont dissociables, il est plus simple et souvent moins coûteux de maintenir le système en remplaçant uniquement les éléments défectueux. A l'occasion des visites, les techniciens connaissent les procédures de maintenance et ont à leur disposition les pièces et les capteurs de remplacement prévus en cas de dysfonctionnement.

Quand un dysfonctionnement est détecté, l'information doit être diffusée et les opérations de maintenance ou de correction planifiées. Le cas échéant, la check-list du matériel de terrain est modifiée.

L'absence de données ou l'acquisition de données erronées par suite d'un dysfonctionnement doit faire l'objet d'un traitement (cf. 5.1) Dans tous les cas les anomalies ou dysfonctionnements seront enregistrés et bancarisés afin que ces informations soient facilement disponibles au moment du traitement des données acquises.

Le coût des enregistreurs devient suffisamment faible par rapport au cout du suivi et du traitement pour que le doublement des capteurs (sonde redondante de secours ou "Backup") puisse être rapidement considéré comme "rentable". Mais ce doublement ne doit pas dispenser d'assurer un suivi et une maintenance suffisants.

4.3.4. ELEMENTS SUR LA SENSIBILITE DES MESURES ET LES INCERTITUDES

A chaque étape du processus de mesure, les méthodes et les instruments utilisés sont plus ou moins sensibles et précis et les données sont entachées d'incertitude. Ces questions de sensibilité et de précision doivent être prises en compte lors de la conception des stations et du choix des capteurs, mais également lors de l'analyse des résultats du fait des incertitudes sur les données chiffrées produites.

Une des questions principales lors de la conception de la station est l'association de la largeur d'écoulement et de la capacité de discrimination verticale du capteur. On peut généralement considérer que les capteurs de niveau ont une précision de l'ordre du centimètre. Compte-tenu de la largeur de la section et des conditions hydrauliques, il faut donc calculer à quelle variation de débit correspond cette variation de hauteur de 1 cm. L'erreur relative sera généralement très forte pour les faibles hauteurs d'eau enregistrées. Ceci conduit souvent à installer deux sections de mesure ou une section composite (cf. 4.1.2).

L'incertitude sur les flux de sédiments à l'échelle d'un épisode est le résultat d'une série d'incertitudes aux différentes étapes de la mesure et du calcul de ces flux. Parmi ces sources d'incertitude, on peut citer :

- la précision sur les mesures de hauteur d'eau
- l'incertitude sur les données de débit liées aux hauteurs d'eau et à la courbe de tarage
- la précision des manipulations des échantillons prélevés lors de l'analyse des concentrations
- la représentativité spatiale des échantillons (dans le cas d'une non homogénéité des concentrations dans la section)
- l'incertitude sur les méthodes de calcul de flux par interpolation / extrapolation
- la variabilité des concentrations et des débits et de la relation entre concentration et débit
- l'adéquation de la stratégie d'échantillonnage à la dynamique des crues
- les lacunes et défaillances

L'incertitude sur les flux à l'échelle annuelle doit de plus inclure, s'il y a lieu, l'incertitude sur l'estimation des flux des crues non échantillonnées.

Dans le cadre du projet Hydromine, l'analyse des incertitudes sur l'évaluation des sédiments a été détaillée à toutes les étapes du processus de calcul (Freydier, 2013). Les étapes introduisant les erreurs les plus fortes sont celles des calculs de débit (incertitudes sur les

hauteurs d'eau et sur les courbes de tarage) et celles des interpolations pour calculer les flux de sédiments sur la totalité de l'hydrogramme. Ainsi, les erreurs sur le flux annuel calculé peuvent atteindre 60 % à Poro amont et 35 % à Poro aval.

5. GESTION ET BANCARISATION DES DONNEES RECUEILLIES

5.1. CONTROLE, VALIDATION ET TRAITEMENT DES DONNEES ACQUISES

Les **données brutes** doivent être archivées telles qu'elles sont produites par les centrales, de préférence sous un format texte. Lorsque les données extraites des centrales sont sous un format propriétaire (par exemple pour les centrales pluie Danaé[®]), il convient de faire un export au format texte pour l'archivage des données avant traitement.

Les données doivent ensuite subir un certain nombre de contrôles et de traitements pour produire des **données validées**. Ce contrôle et ce traitement doivent être réalisés le plus tôt possible après le relevé des données et se déroulent en plusieurs étapes :

Etape 1, récupération des données brutes : vérifier que toutes les données « brutes » acquises (manuelles et automatiques) ont été bancarisées. Pour réaliser cette opération, des outils ont été intégrés aux logiciels de gestion des bases de données hydrométriques (exemple Figure 14 ci-dessous). Ces outils permettent d'avoir une vision synthétique du contenu de la base de données.

The screenshot shows a software interface for managing data. At the top, there are tabs for 'Liste', 'Aître', and 'Vue d'ensemble de base de données', along with an 'Actualiser' button. Below this, there are filters for 'Période' (set to '180d'), 'Afficher les discontinuités' (checkbox), and 'Discontinuité maximale' (set to '1 h'). There are also checkboxes for 'Afficher les valeurs invalides'. The main area displays a list of data points grouped by station: [Santal], [0_baro], [0_SD1], [0_SD2], [1_SD1], [1_SD2], [maree noumea], and [station-meteo-noumea]. Each data point is represented by a horizontal bar with a green segment (OK) and a red segment (Discontinuité or Manque). To the right of each bar, the date, time, and a numerical value in brackets are shown. For example, under [0_baro], there are three entries: '0100_Pression Enregistrée' (04/04/2014 08:02:00 [38d]), '0102_Température' (04/04/2014 08:02:00 [38d]), and '0106_Pression enregistrée (cm H2O)' (04/04/2014 08:02:00 [38d]).

Figure 14 : Exemple d'outils de gestion des données brutes

Etape 2, mise à l'échelle : confirmer (ou recalibrer) les unités et compenser les données enregistrées pour qu'elles soient exprimées en références absolues (par exemple m NGNC, ou en m d'eau par rapport à un repère).

Etape 3, cohérence du signal : contrôler la vraisemblance du signal (ordres de grandeur acceptables de valeurs physiques), et corriger le signal (décalage) en tenant compte de la continuité des mesures (suppression des décrochements) et des observations notées sur le terrain (exemple Figure 15).

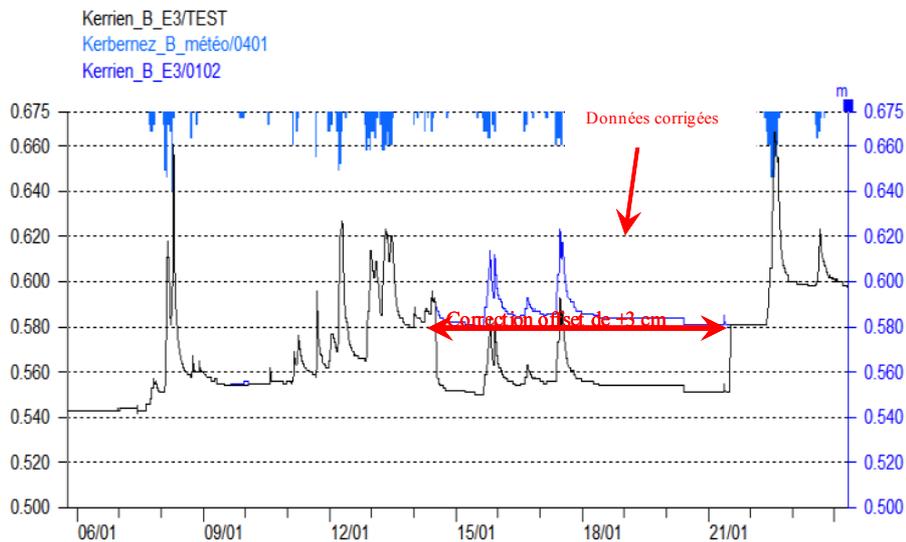
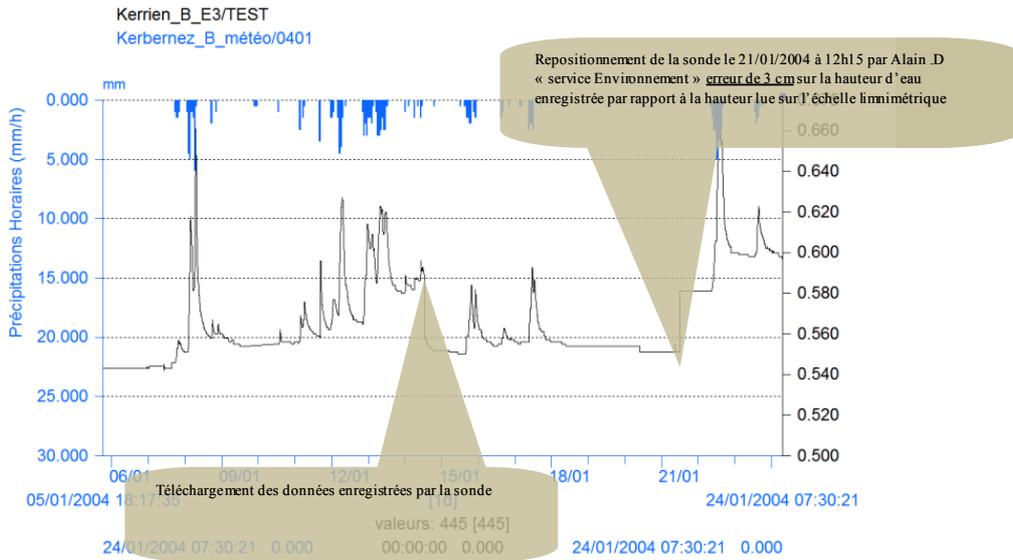


Figure 15 : Exemple de recalage à partir des notes de la fiche de terrain

Etape 4, recalage des données enregistrées sur les mesures manuelles réalisées sur le terrain. Les mesures manuelles sont comparées aux données enregistrées par la sonde et le cas échéant, les données automatiques sont recalées sur les données manuelles (exemple illustré dans les deux graphiques Figure 16).

Etape 5, validation : contrôler la vraisemblance des données de débit calculées par rapport aux jaugeages réalisés (prise en compte de détarages éventuels pour les sections naturelles ou mobiles, mise à jour éventuelle de la courbe de tarage appliquée)

Etape 6, validation inter-postes : contrôler la cohérence des données entre elles (par exemple entre la pluie et la hauteur d'eau dans la station ou entre deux stations voisines). Le graphique présenté ci-après présente des réactions cohérentes entre le niveau d'eau dans la rivière et les précipitations.

Les données manquantes liées à un dysfonctionnement doivent être identifiées par un code (par exemple -99999) qui sera interprété comme "données manquantes". Les données erronées acquises sont corrigées. Quand il n'est pas possible de corriger ces données, elles sont qualifiées avec un niveau de confiance faible et dans la mesure du possible elles sont

invalidées et extraites de la chronique et remplacées par le code "données manquantes". Il ne faut pas utiliser la valeur "0" en remplacement des données manquantes.

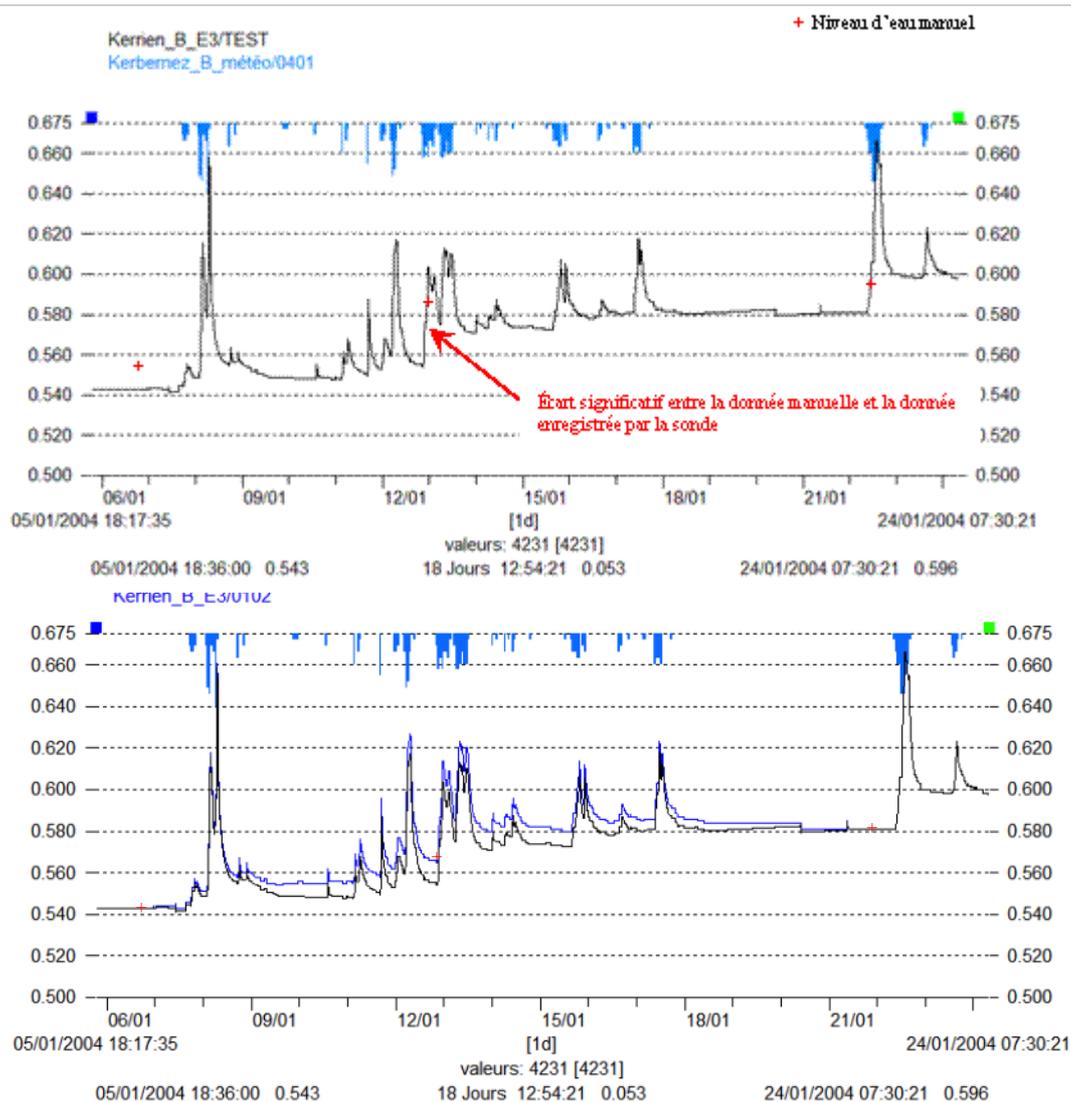


Figure 16 : Exemple de recalage avec des relevés de niveau à l'échelle

Etape 7, reconstitution de périodes manquantes : pour reconstituer des données manquantes uniquement en dehors des périodes pluvieuses et des crues, on peut faire une interpolation linéaire entre deux mesures valides. Pour les charges en MES, on pourra s'appuyer sur la corrélation avec d'autres mesures (turbidité). Il ne s'agit plus ici de données validées mais de données reconstituées ou interpolées qui doivent être clairement distinguées des données mesurées et corrigées.

Dans le cas où les discontinuités sont trop importantes, différentes méthodes existent pour reconstituer des données manquantes, en particulier la modélisation hydrologique (modèles à réservoirs type GARDENIA – BRGM ou GR4J – IRSTEA, voire modèles pluie/débit ou hydrauliques plus élaborés). Cette méthode nécessite une connaissance précise du fonctionnement hydrologique et des données fiables pour le calage du modèle. Dans tous les cas, un code dans la série de données doit préciser explicitement qu'il s'agit de valeurs reconstituées et non de valeurs mesurées.

5.2. DESCRIPTION D'UN RESEAU DE MESURE : ORGANISATION DES DONNEES, OBJETS DE REFERENCE.

La suite du document présente un exemple d'organisation de données, ce qui permet de lister les données indispensables pour le suivi d'un réseau de mesure. D'autres modèles de données sont bien sûr envisageables, les points essentiels étant de ne pas omettre de données clés, et d'être le plus stable possible dans cette organisation des données au cours du temps, ce qui facilite l'analyse ou la vérification de séries longues.

Dans la suite du document, trois références (purement conventionnelles) sont utilisées, correspondant aux objets qui composent un réseau de mesure : réseaux, stations, capteurs

- **Réseau** : ensemble de stations opérées par un gestionnaire, avec des objectifs précis (établissement d'un état de référence, suivi réglementaire, étude d'un bassin versant, dimensionnement d'un ouvrage, etc.)
- **Station** : site d'extension géographique limitée (localisable par un point) appartenant à un réseau, comportant un ou plusieurs capteurs
- **Capteur** ou type de mesure : objet permettant l'obtention de valeurs mesurées ou calculées représentatives de l'état d'un objet physique (niveau ou débit d'un cours d'eau, niveau de nappe, ...). Un capteur peut être réel (capteur physique, section de mesure) ou virtuel (résultat de calculs sur un ensemble de données physiques ou de données issues d'autres capteurs). Les valeurs attachées à un capteur ont une unité (m, m³/s, m NGNC, ...) et une fréquence d'acquisition (apériodique ou périodique) données.

Les relations entre objets sont les suivantes : **Réseau=>Stations=>Capteurs**

Des « événements » permettent de suivre l'évolution et l'activité du réseau de mesure. Par définition, un événement est associé à un ou plusieurs objets du réseau de mesure et à une date donnée. Les « événements » correspondent généralement à une visite sur site, lors de laquelle différentes opérations sont réalisées (installation ou remplacement de capteurs, observation d'anomalies de fonctionnement, maintenance, relève de données enregistrées, etc.). La succession d'événements permet de reconstituer toute la vie du réseau de mesure (installation, démantèlement, opérations de maintenance) et d'identifier les données qui sont associées à ce réseau (mesures). Une fiche de terrain est établie pour chaque visite et l'ensemble des opérations effectuées y sont enregistrées.

Le schéma de la figure 17 résume les liens entre ces « objets » de référence.

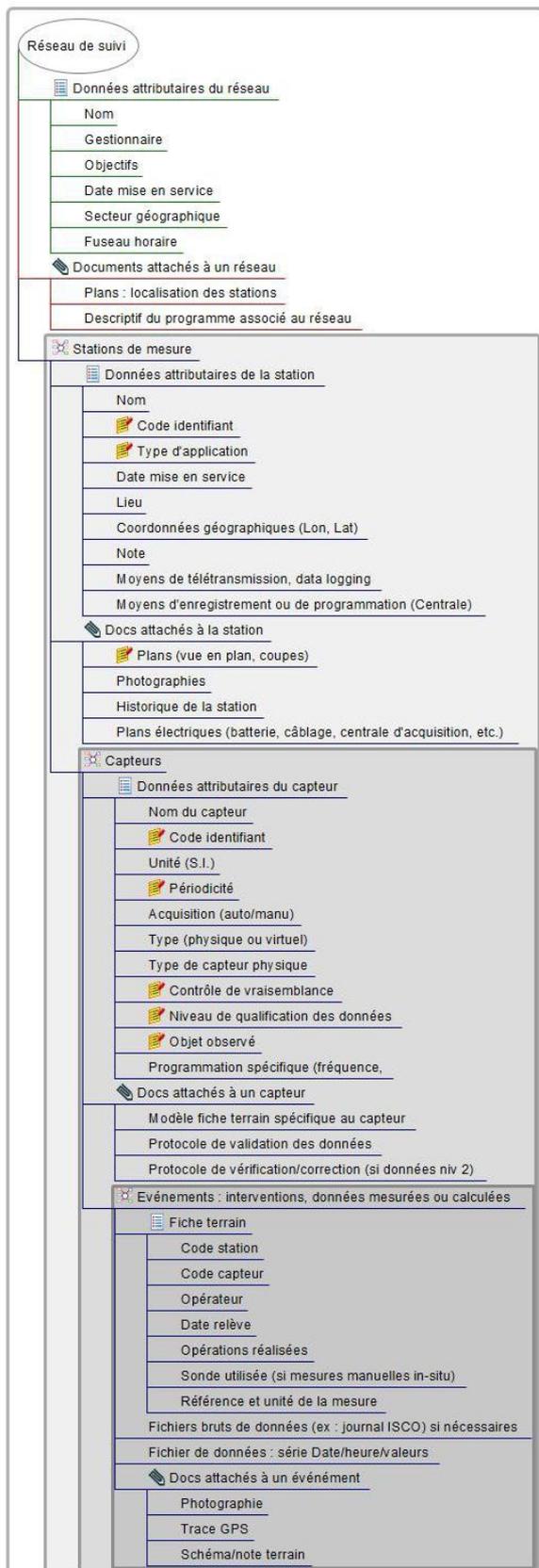


Figure 17 : Exemple d'organisation des données descriptives d'un réseau de mesure

5.3. RESEAU DE MESURE : DONNEES "MINIMALES" POUR LE SUIVI

5.3.1. ENREGISTREMENT DES DONNEES

Les données de description et de suivi d'un réseau de mesure pourront être enregistrées et stockées sous différentes formes :

- fiches (papier ou documents au format .doc,.pdf ou équivalent)
- fichiers bruts au format .TXT
- tableaux (au format .xls ou équivalent)
- images, photos, plans,...
- bases de données génériques (base Access[®], MySQL ou similaire)
- base de données adaptée à la bancarisation de mesures environnementales (logiciel HYDRAS3[®] ou similaire).

Par ailleurs, des documents particuliers (pas nécessairement adaptés à un référencement de type base de données) pourront être attachés à un dossier de station.

Le format et les modalités de stockage peuvent être variables d'un réseau à l'autre mais ils doivent être précisément définis et ensuite **être le plus stables possible dans le temps**. La structure doit être adaptée aux types de mesures de façon à n'omettre aucune information nécessaire à l'interprétation et à la valorisation des données.

Lors des évolutions, inéluctables, du format et des modalités de stockage, il conviendra d'assurer le portage des données anciennes dans le nouveau système adopté.

L'objet des paragraphes qui suivent est de préciser l'organisation des informations et les données attributaires minimales permettant de décrire chaque composante d'un réseau de mesure (réseau, station, capteur, évènement).

5.3.2. RESEAU DE MESURE, ORGANISATION ET NOMENCLATURE DES FICHIERS

Au cours de la vie d'un réseau, un grand nombre d'informations sont enregistrées, statiques (description du réseau, plans, etc.) ou dynamiques (interventions réalisées, relevé des situations de terrain, données brutes acquises, etc.).

Comme déjà mentionné, le format importe peu : fichiers ou base de données. Cependant, dans la majorité des cas, les informations seront produites initialement sous forme de fichiers.

Une organisation et une nomenclature stricte des fichiers doit impérativement être établie au démarrage d'un programme de suivi, de manière à pouvoir à tout moment retrouver les informations pour vérification ou référence.

5.3.2.1. Organisation des fichiers

Selon l'importance du réseau, il est conseillé de ranger les fichiers par nature, et dans des sous-répertoires à une échelle adaptée (zone géographique, station de mesure).

Une organisation possible des sous-répertoires pour les documents attachés à une station est :

- Dossier installation
- Cartes
- Données brutes
- Analyses de laboratoire
- Photos
- Fiches terrain
- Données topographiques
- Autres

5.3.2.2. Nomenclature des fichiers

Il peut s'avérer difficile de retrouver une information particulière une fois accumulés plusieurs centaines de fichiers. La nomenclature déterminée (noms donnés aux fichiers) facilite cette recherche. Un exemple de nomenclature utilisée de manière opérationnelle est :

TagStation-AAAAMMJJ-TypeDoc-AutreRef.EXT, avec :

- TagStation (exemple : SW012) : référence de la station de mesure
- AAAAMMJJ (exemple : 20140430) : date représentative des informations contenues dans le fichier, par exemple date de récupération des valeurs pour un fichier de données, date de l'intervention pour une fiche terrain, date de prise de vue pour une photo, etc.
- TypeDoc : nature du document enregistré, avec codification préétablie en 3 lettres (faisant référence en particulier au type de fiche de terrain utilisé)
- AutreRef (facultatif) : référence complémentaire, par exemple rattachement à un capteur spécifique ou indice pour une série de photo sur un même site et un même jour
- EXT : extension du fichier, permettant de retrouver le type d'information enregistrée (PDF = document scanné, XLS=tableau de données, WSL ou TXT = fichier de données brutes, etc.)

5.3.3. SCHEMAS DE DONNEES TYPE

Ce chapitre présente à titre d'exemple des schémas de données (réseau, station, etc...). Il ne s'agit bien là que d'exemples, s'inspirant largement de l'organisation d'HYDRAS[®], et qui pourront être librement adaptés et enrichis en fonction de la solution logicielle adoptée par le gestionnaire du réseau.

5.3.3.1. Schéma de données type pour un réseau de mesure

Le tableau ci-dessous fournit un exemple d'organisation des données.

Tableau 1 : schéma de données type « réseau » (exemple : contenu de la table BD1_RESEAU_MESURE d'HYDRAS[®])

Nom du champ	Type	Contenu
ID	NumAuto	Clé de la table des réseaux de mesure
CODE	Texte	Code interne à l'organisme gestionnaire
GESTIONNAIRE	Texte	Nom de l'organisme responsable de l'installation des sites et du suivi
DATE_MISE_EN_SERVICE	Date/Heure	

DATE_FERMETURE	Date/Heure	
OBJECTIFS	Texte	Choix possibles : réseau réglementaire ; Suivi volontaire ; Etat initial ; Divers
SECTEUR	Texte	Zone géographique concernée (bassin versant, concession, zone d'exploitation minière, ...)
FUSEAU_HORAIRE	Texte	Code du fuseau (GMT+11 pour la Nouvelle-Calédonie) – à vérifier dans la programmation des instruments, les outils de récupération de données (Pocket PC, ordinateurs portables, ...) et les bases de données
LIEN_DOC_ATTACHES	Lien hypertexte	Lien vers répertoire avec doc descriptifs (par exemple Programme de mesure, Plan de suivi de l'environnement, Arrêté spécifiant les mesures à réaliser, etc.)

5.3.3.2. Schéma de données type pour une station de mesure

Tableau 2 : schéma de données type « station » (exemple : contenu de la table BD2_STATIONS d'HYDRAS®)

Nom du champ	Type	Contenu
ID	NumAuto	Clé de la table des stations
CODE	Texte	Tag / code identifiant unique propre au propriétaire de la station (ex : SW01, ...)
FK_RESEAU_MESURE	Numérique	Lien vers le réseau de mesure auquel se rattache la station (par exemple, référence à ID dans la table BD1_RESEAU)
DATE_CREATION	Date/Heure	
DATE_MAJ	Date/Heure	
APPLICATION	Texte	Type d'application : Météorologie ; Eau de surface ; Transport solide ; Eau souterraine,
Objet_Observé	Texte	Nom de l'objet observé (cours d'eau, nappe, source, localité, ...)
X_RGNC	Numérique	X – Longitude (m, Lambert RGNC)
Y_RGNC	Numérique	Y – Latitude (m, Lambert RGNC)
Z_RGNC	Numérique	
NOTES	Texte	Informations générales sur la station
LIEN_DOC_ATTACHES	Lien hypertexte	Emplacement répertoire pour données associées (photos, plans, ...)

Un exemple de fiche « Station », utilisant ce schéma de données, est présenté en annexe 3.

5.3.3.3. Schéma de données type pour un capteur

Tableau 3 : Schéma de données type « capteur » (exemple : contenu de la table BD3_CAPTEURS d'HYDRAS®)

Nom du champ	Type	Contenu
ID	NumAuto	Clé de la table des capteurs
CODE	Numérique	Nomenclature en 4 chiffres (0100, 0210, ...) propre au gestionnaire, par exemple selon le type de capteur, le niveau de validation, ...
FK_STATION	Numérique	Lien vers la table « STATIONS », station à laquelle se rattache le « capteur »
DATE_CREATION	Date/Heure	
DATE_MAJ	Date/Heure	
NATURE_CAPTEUR	Texte	En référence à un dictionnaire « NATURE CAPTEUR » – catégorie générale (instrument, observation manuelle, section de mesure, capteur calculé, ...)
TYPE_CAPTEUR	Texte	En référence à un dictionnaire « TYPE CAPTEUR » – différents types possible pour une même nature du capteur (ex : Section de mesure => Seuil en V, Seuil crête mince, Plage de dépôts, ...)
TYPE_INSTRUMENT	Texte	En référence à un dictionnaire « TYPE INSTRUMENT » – Choix parmi une liste d'instruments (marques commerciales) utilisés en Nouvelle-Calédonie
PERIODE	Texte	Périodicité d'acquisition (enregistreur), fréquence de relève (manuel) ou période de cumul (capteurs calculés)

Unité	Texte	Unité du capteur (S.I.)
FORMULE	Texte	Lien avec les valeurs d'autres capteurs (cas des capteurs calculés : formule, courbe de tarage, table, ...)
LIEN_DOC_ATTACHES	Lien hypertexte	Emplacement répertoire pour données associées (photos, plans, courbe de tarage, ...)

5.3.4. FICHES DE TERRAIN : SCHEMA DE DONNEES TYPE

Des exemples de fiches de terrain, utilisant ce schéma de données, pour différents types d'interventions sont donnés en annexe 3.

Tableau 4 : Schéma de données type « fiches de terrain » (exemple : contenu de la table BD4_MESURES_ET_INTERVENTIONS d'HYDRAS®)

Nom du champ	Type	Contenu
ID	NumAuto	Clé de la table des interventions
FK_CAPTEUR	Numérique	Lien avec table « CAPTEURS » – rattachement de la mesure à un capteur physique ou virtuel (section de mesure, ...)
NO_SERIE_INSTRUMENT	Texte	N° de série de l'appareil de mesure, de la sonde ou du préleveur
TYPE_INTERVENTION	Texte	Voir dictionnaire des types d'interventions
DATE_INTERVENTION	Date/Heure	Date et heure de l'opération de maintenance ou de la relève
OPERATEUR	Texte	Initiale de l'opérateur ayant réalisé l'intervention
X	Numérique	Longitude (m) – permet un contrôle et une validation de la station concernée
Y	Numérique	Latitude (m)
REFERENTIEL_GEO	Texte	Référence pour X-Y : UTM58-WGS84 (GPS) ou Lambert-RGNC
CONDITIONS_METEO	Texte	Temps clair / Couvert / Pluie fine / Pluies fortes / Pluies très fortes
REFERENCE_MESURE	Texte	Point de référence (Echelle limni, V du seuil, crête du seuil, haut du tube du piézomètre, ...)
SENS_MESURE	Texte	Paramétrage de la mesure (pour les hauteurs d'eau) : Profondeur de la sonde (Depth), Distance à l'eau (DTW), Hauteur par rapport à une référence (Level)
MESURE_MANUELLE	Numérique	Mesure manuelle ou observation de référence
NOM_FICHER	Texte	Nom du fichier déchargé de l'instrument
OBSERVATIONS	Texte	Notes prises lors de la relève
LIEN_DOC_ATTACHES	Lien hypertexte	Emplacement répertoire pour données associées (photos, plans, courbe de tarage, ...)

5.4. DICTIONNAIRES

5.4.1. DICTIONNAIRES PROPOSES

Cinq exemples de dictionnaires (ensemble de valeurs « valides ») sont présentés dans la suite de ce chapitre (source HYDRAS®) :

- DI1, NATURE_CAPTEUR : grande catégorie de capteur (physique ou virtuel)
- DI2, TYPE_CAPTEUR : liste des types de capteurs les plus courants (sous-ensemble selon la nature du capteur)
- DI3, INSTRUMENTS : liste de nom commercial des capteurs et fournisseurs
- DI4, CENTRALES : liste de nom commercial de centrales d'acquisition et d'enregistrement
- DI5, INTERVENTIONS : liste des opérations les plus courantes

5.4.2. NATURE DES CAPTEURS

Le tableau suivant liste les natures de « capteurs », au sens du présent document (voir 5.2).

Tableau 5 : Exemple de dictionnaire des natures de capteurs

D11_NATURE_CAPTEUR	
NATURE_CAPTEUR	Description
INSTRUMENT	Capteur « réel », valeurs directement issues d'un instrument installé sur site et enregistrant les valeurs mesurées (par exemple : pression, niveau d'eau, pH, conductivité)
EQUIPEMENT	Capteur « réel », valeurs obtenues indirectement à partir d'un équipement élaboré ou via une transformation effectuée par l'instrument (par exemple : débit dans un canal venturi, directement calculé par la centrale d'acquisition)
OBSERVATION MANUELLE	Capteur « réel », valeurs mesurées sur le terrain par l'opérateur
DONNEE CALCULEE	Capteur « virtuel », fournissant des valeurs à partir des valeurs d'autres capteurs (par exemple : débit calculé à partir des hauteurs d'eau et d'une courbe de tarage, volume déduit de débits cumulés,)
DONNEE CORRIGEE	Capteur « virtuel » contenant des valeurs d'un capteur « réel » corrigées ou complétées par différentes méthodes (ajustement sur des observations, interpolation, correction manuelle, ...)

5.4.3. TYPE DE CAPTEURS

Les tableaux suivants proposent des listes des types de capteurs (au sens du présent document : réels ou virtuels) les plus couramment utilisés dans le cadre des programmes de suivi hydrosédimentaire sur site minier.

Le Tableau 6 liste les capteurs dont les valeurs correspondent aux seules valeurs de référence. Ces données sont toutes acquises sur le terrain par des opérateurs (à l'exception du pluviomètre) et servent de base au traitement du signal.

La Tableau 7 liste, de manière non exhaustive, les capteurs dont les valeurs sont acquises par des appareils et peuvent être soumises à un traitement. Ces capteurs peuvent contenir seulement des données brutes ou seulement des données traitées. Ce sont ces capteurs qui permettent d'établir automatiquement un journal de traitement, de correction et d'édition des données. Ces capteurs permettent à l'utilisateur de la base de données de vérifier les corrections, les métadonnées, les notes et remarques concernant les données qui composent les séries temporelles. C'est l'outil qui permet de savoir rapidement qui a fait quoi, quand et pourquoi. Distinguer les données brutes et les données traitées permet aussi de restreindre les procédures d'approbation des données et d'attribuer des cotations (codes qualité) aux différentes données constituant les séries temporelles.

Tableau 6 : Exemple de dictionnaire des capteurs référents indispensables

D12_TYPE_CAPTEUR		
NATURE_CAPTEUR	TYPE_CAPTEUR	VARIABLE_MESUREE
INSTRUMENT	Échantillonneur automatique	Concentration en MES (analyse laboratoire)
INSTRUMENT	Pluviomètre	Précipitation instantanée avec une résolution de 0,2 à 0,5mm
OBSERVATION MANUELLE	Échelle à sédiment	Hauteur de sédiments (dans un bassin de décantation)
OBSERVATION MANUELLE	Échelle limnimétrique	Échelle graduée pour la mesure de la hauteur d'eau
OBSERVATION MANUELLE	Jaugeage manuel	Mesure du débit par exploration du champ de vitesse
OBSERVATION MANUELLE	Turbidimètre	Mesure de la turbidité

DI2_TYPE_CAPTEUR		
NATURE_CAPTEUR	TYPE_CAPTEUR	VARIABLE_MESUREE
OBSERVATION MANUELLE	Échantillon manuel	Concentration en MES (analyse laboratoire)

Tableau 7 : Exemple de dictionnaire des capteurs dédiés aux enregistrements en continu

DI2_TYPE_CAPTEUR		
NATURE_CAPTEUR	TYPE_CAPTEUR	VARIABLE_MESUREE
INSTRUMENT	Capteur de pression	Hauteur d'eau
INSTRUMENT	Radar	Hauteur d'eau
INSTRUMENT	Doppler	Vitesse de l'eau
INSTRUMENT	Turbidimètre	Mesure la turbidité

Le tableau 8 présente une liste non exhaustive des capteurs utilisés pour effectuer les calculs et assurer la production des données dans les unités appropriées. Cette dernière liste contient des variables calculées pour la mise en perspective des données.

Ces capteurs permettent par exemple d'enregistrer et d'utiliser des courbes de tarage pour calculer directement un débit.

Les valeurs synthétiques obtenues seront exploitables pour présenter des bilans qui alimenteront les rapports d'activité du réseau de suivi, ou pour générer des statistiques exploitables pour caractériser la réponse hydrosédimentaire du bassin versant (temps de concentration, coefficient de ruissellement observé, etc.).

Tableau 8 : Exemple de dictionnaire des capteurs virtuels dont les valeurs sont calculées à partir des données enregistrées

DI2_TYPE_CAPTEUR		
NATURE_CAPTEUR	TYPE_DONNE_SOURCE	VARIABLE_MESUREE
DONNEE CALCULEE	Hauteur sur Seuil V	Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau (loi hydraulique)
DONNEE CALCULEE	Hauteur sur Seuil rectangulaire	Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau (loi hydraulique)
DONNEE CALCULEE	Hauteur dans Canal Venturi	Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau (loi hydraulique)
DONNEE CALCULEE	Niveau dans Piège à sédiment	Cumul du volume de sédiments déposés (déduit de la lecture d'une échelle à sédiment et de courbes hauteurs/volumes)
DONNEE CALCULEE	Hauteur d'eau échelle en section naturelle	Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau (courbe de tarage)
DONNEE CALCULEE	Nombre de basculement d'un auget	Intensité des précipitations (déduite de la fréquence de basculement des augets)
DONNEE CALCULEE	Débit d'eau instantané (mesure direct ou résultat de calcul)	Calcul du cumul de débit sur une période définie
DONNEE CALCULEE	Débit cumulé sur différents cours d'eau	Débit spécifique déduit du cumul et de la surface de bassin versant (mm/h, mm/j, mm/an)
DONNEE CALCULEE	Volume de sédiments cumulé (résultat de calcul)	Flux spécifique de sédiment, déduit du cumul et de la surface de bassin versant d'apport (Kg/h/m ² , T/an/ha)

5.4.4. INTERVENTIONS/EVENEMENTS

La récupération régulière des données, l'entretien et la calibration des équipements de mesure, sont des conditions essentielles pour l'acquisition de données valides, fiables et vérifiables. Les interventions réalisées doivent donc être systématiquement tracées pour permettre le suivi, le contrôle qualité ou l'audit des données ou pour appuyer le processus de

validation et correction des données en permettant d'associer des anomalies constatées sur les données à des interventions sur le site (relève ou changement de capteur, etc.).

Tableau 9 : Exemple de dictionnaire des types d'interventions

DIS_INTERVENTIONS	
OPERATION	DESCRIPTION
RELEVÉ MESURES	Déchargement de données (enregistreur), récupération d'échantillons (préleveur) et/ou mesures manuelles. A préciser : valeur et unité pour une observation, référence échantillon pour un prélèvement
INSTALLATION	Mise en place d'un instrument sur site. A préciser : n°série ou référence instrument
DEPLACEMENT	Changement de position ou de référence d'un instrument. A préciser : nouvelle référence/repère
REMPACEMENT	Remplacement d'un instrument ou d'un composant d'un instrument (ex capteur ou électrode). A préciser : référence/n° de pièce remplacé
NETTOYAGE	Vérification et nettoyage sur site d'un instrument. A préciser : éléments nettoyés,
CALIBRATION	Vérification des paramètres mesurés par un instrument (basé sur normes ou recommandations du fabricant). A préciser : paramètre calibré, méthode, résultat ou valeurs des coefficients mis à jour
ETALONNAGE	Modification des valeurs d'étalonnage d'un instrument (réalisé à partir de solution étalon pour les électrodes ou capteurs physicochimiques). A préciser : paramètres, méthode, résultat
ENERGIE	Contrôle du niveau des batteries ou de la source d'alimentation externe (panneau solaire, batterie auxiliaire)
PROGRAMMATION	Programmation d'une sonde enregistreuse ou d'une voie d'une centrale d'acquisition (associée à un instrument) – à préciser : Matériel concerné ou voie sur la centrale d'acquisition, Logique de programmation, fréquence de prélèvement, seuils de déclenchement

6. INTERPRÉTATION, DIFFUSION ET COMMUNICATION

Les chapitres précédents ont détaillé les méthodes pour obtenir et archiver des données de bonne qualité. Dans un premier temps, les informations fournies par ces données permettent de réaliser un contrôle du fonctionnement hydrosédimentaire du site et peuvent servir d'alerte pour les gestionnaires. Mais l'intérêt de ces données est bien plus large et il est nécessaire de les valoriser. De plus, une interprétation régulière des résultats obtenus permet d'adapter la stratégie de mesure aux questions à résoudre.

C'est pourquoi il est important de réaliser régulièrement (au moins une fois par an, ou mieux tous les semestres ou trimestres) une analyse critique des données obtenues sur le réseau. Cette analyse devra prendre en compte les incertitudes de mesure pour établir une quantification des flux et des bilans. Une attention particulière doit être portée aux événements forts ou extrêmes qui auront pu se produire au cours de la période analysée.

Une première étape consiste à une présentation synthétique des données validées et des données élaborées. L'échelle temporelle de base est l'échelle de l'épisode mais les calculs de flux seront également réalisés à l'échelle annuelle. Pour ce faire, il sera nécessaire de combler les données en lacune. Une bonne connaissance des épisodes correctement mesurés permet de réaliser de manière pertinente cette complémentation de données. Les méthodes utilisées dans le projet Hydromine constituent un exemple des méthodes d'analyse pertinentes (cf. annexe 1 et annexe 4).

Les représentations graphiques sont des outils indispensables pour ces analyses.

A l'échelle de l'évènement, les étapes de l'analyse peuvent être les suivantes :

- détermination de la date de début et de la date de fin ;
- représentation du graphe pluie-débit ;
- calcul de la lame précipitée, de la lame écoulée et du coefficient d'écoulement ;
- relevé et calcul des paramètres descriptifs de l'évènement pluie-débit :
 - intensités maximales (horaire et pour différentes durées inférieures à une heure)
 - débit maximal
 - temps de réponse
 - etc...
- positionnement des différents prélèvements sur l'hydrogramme ;
- étude de la relation turbidité concentration si un turbidimètre est disponible ;
- analyse de la relation concentration-débit (sens de la courbe d'hystérésis s'il y a lieu) ;
- interpolation des concentrations pour tous les points de l'hydrogramme ;
- calcul du flux de MES pour l'épisode ;
- détermination de quelques paramètres caractéristiques : concentration maximale, moyenne, etc...

A l'échelle de la saison ou de l'année

- Analyse des liens entre caractéristiques des épisodes : coefficient d'écoulement, débits de pointe, flux de sédiments en relation avec cumul et intensité de pluie, conditions antérieures, activité minière, etc... ;

- Comblement des lacunes s'il y a lieu ;
- Calcul des précipitations et lames écoulées cumulées, des coefficients d'écoulement (prendre en compte les incertitudes, notamment sur les basses eaux et les fortes crues) ;
- Calcul des flux de MES ;
- Comparaison aux volumes stockés dans les décanteurs ;
- Etc...

A l'échelle pluriannuelle

- Comparaison forçage (pluie) et réponse (écoulement et érosion) en fonction de différents critères explicatifs : climat, activité minière, etc.. ;
- Part des événements extrêmes dans la production interannuelle d'érosion ;
- Synthèse sur un certain nombre de paramètres : relation volume liquide/volume solide, concentrations maximales, relation concentration/turbidité ;
- Si la durée d'observation le permet (> 5ans), une analyse en fréquence devient possible.

Généralement, la durée d'observation est trop courte pour des analyses statistiques en fréquence robustes. On se réfèrera alors aux résultats fournis par les études DAVAR ou Météo France dans la région pour situer en fréquence les événements majeurs observés ou les années.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le suivi hydro-sédimentaire des bassins versants miniers est devenu indispensable sur les sites miniers calédoniens, obligatoire dans le cadre des autorisations d'exploiter mais aussi nécessaire et bénéfique pour améliorer la gestion des eaux sur mines et diminuer les impacts environnementaux et les désordres à l'aval.

Les questions soulevées par cette nécessité portent souvent sur les équipements nécessaires à ces suivis et ce guide s'est efforcé de fournir des bases techniques pour la conception des stations et le choix des équipements.

Mais l'équipement initial s'il est indispensable n'est pas suffisant. On a trop vu par le passé des équipements coûteux délaissés ou inefficaces. Le besoin en fonctionnement est important et il requiert des compétences spécifiques à chaque étape du processus, de l'acquisition à la valorisation des données. Il est indispensable que l'effort minimal de gestion soit constant afin d'assurer la continuité des séries de données obtenues. En effet, trop de lacunes rendent inexploitable les données et inutile l'effort d'investissement.

Il est indispensable de capitaliser, contrôler, critiquer et même de valoriser rapidement les données. Ceci permet de détecter les anomalies de fonctionnement mais aussi, grâce à l'interprétation, d'adapter les protocoles aux objectifs des mesures. Le contrôle doit être réalisé dans les jours qui suivent le relevé, la critique dans les semaines (au maximum le mois) qui suit le recueil, l'interprétation doit être conduite, au moins partiellement, plusieurs fois par an. Un bilan final annuel permettra d'évaluer les résultats de la gestion des eaux sur le site. La comparaison inter-sites, en collaboration avec les équipes hydrologiques des différentes compagnies minières permettrait d'améliorer l'interprétation.

La mutualisation des données entre les différents sites miniers calédoniens est en effet la perspective la plus intéressante. Ceci permettrait d'obtenir la réduction de coûts, l'amélioration de la qualité des données, la capitalisation des expériences et des compétences. Le fonctionnement du groupe Instrumentation pendant le projet CNRT "fonctionnement des petits bassins versants miniers" a ainsi montré l'intérêt de la mise en commun des compétences. La présence pendant quelques mois sur le territoire d'un ingénieur dédié à la coordination des suivis hydro-sédimentaire en milieu minier, préfigurateur de ce qu'apporterait un hydrologue recruté sur un poste mutualisé pour la profession, a démontré l'intérêt de cette démarche. Malheureusement, à ce jour, le poste d'hydrologue qui a été un temps envisagé n'a pu encore être créé. Dans un premier temps, il conviendrait au minimum de relancer le groupe "Instrumentation", de réfléchir au meilleur moyen d'en pérenniser le fonctionnement et d'assurer la coordination entre les différents sites. A terme, on pourrait imaginer la création d'un observatoire sur l'eau poursuivant les mêmes objectifs que celui existant déjà sur l'air « SCAL-Air ».

8. ANNEXES

8.1. ANNEXE 1 : REFERENCES UTILES

⊙ **Ouvrages d'Hydrologie**

- Musy A. et Higy C., 2004, Hydrologie 1 : Une science de la nature, Presse polytechnique et universitaire romande, 302 p.
- Hingray B., Picouet C., Musy A., 2009, Hydrologie 2 : Une science pour l'ingénieur, Presse polytechnique et universitaire romande, 600 p.
- Cosandey C. et Robinson M., 2012, Hydrologie Continentale, Armand Colin, Paris, 360 p.

⊙ **Généralités sur la mesure hydrologique**

- André, A., Audinet, M., Mazeran, G., Richer, C., 1976. Hydrométrie pratique des cours d'eau. Eyrolles, Paris.
- Cours de l'EPFL : <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/chapitre7.html>
- Cours de l'Université de Montpellier :
- <http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php?url=L2h5ZHJvbWV0cmllLnBkZg%3D%3D&cidReset=true&cidReq=FLST403>
- <http://www.hydrosociences.fr/sierem/produits/biblio/nouvelotBVRE.pdf>

⊙ **Références nationales et internationales**

- http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/charte_hydro.pdf
- http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_fr.php
- <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/>

⊙ **Site de la DAVAR en Nouvelle-Calédonie**

La DAVAR met à disposition différents documents pour un cahier des charges en hydrométrie.

- CDC_Hydrométrie sur le site Ftp: de la DAVAR : [//ftp.gouv.nc/DAVAR/Guides_CDC/](ftp://ftp.gouv.nc/DAVAR/Guides_CDC/)

⊙ **Documents techniques**

Jaugeage par dilution

- http://www.meteo.fr/cic/meetings/2012/journees_hydrometrie/pres/Jaugeage_par_dilution_de_traceur.pdf

Mesures des charges en MES et incertitudes

- Moatar, F. et al., 2008. Evaluation des flux de MES à partir des suivis discrets: Méthodes de calcul et incertitudes. La Houille Blanche, 4, 64-71

Ouvrages d'hydraulique, transport solide

- Graf, W. H., and Altinakar, M., 2000, Hydraulique Fluviale, Traité de Génie Civil de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, vol. 16, Presses polytechniques et universitaires romandes, 627 p.
- Recking A., Richard D., Degoutte G. (coord.), 2013, Torrents et rivières de montagne, dynamique et aménagement, éditions Quae, 336 p.
- Malavoi J.-R, Garnier C.-C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011, Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière, Onema, 216 p.

◉ **Projet Hydromine et CNRT "fonctionnement des petits bassins versants miniers"**

Rapports de stage

- Aksoy M., 2014. Modélisation des transferts hydro-sédimentaires des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage Université Joseph Fourier Grenoble -IRSTEA, 125 p.
- Alloin PE., 2011. Recueil et analyse de données géologiques, géographiques et hydrologiques sur les bassins versants équipés dans le cadre du projet CNRT, IRSTEA/UNC, 129 p
- Carpentier L., 2011. Mesure et analyse des flux d'eau et de sédiments sur le site de Poro [Nouvelle-Calédonie], IRSTEA/UNC, 178 p.
- Chillou A., 2012. Etude de gestion des flux sédimentaires par bassin de décantation en contexte minier : cas de la Nouvelle-Calédonie, IRSTEA, 100 p.
- Freydier P., 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. Rapport de stage ENGEES-Université de Strasbourg-UNC-IRSTEA, 94 p.
- Guyonneau A., 2012. Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires des petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage ENGEES-Université de Strasbourg-UNC-IRSTEA, 89 p.
- Motto A., 2013. Analyse comparative des réponses hydro-sédimentaires de petits bassins versants miniers de Nouvelle-Calédonie. Rapport de stage ENGEES-Université de Strasbourg-UNC-IRSTEA, 94 p.
- Navarrot L., 2012. Caractérisation et modélisation des flux d'eau et de MES sur le site de la mine de Poro (projet Hydromine). Rapport de stage ENGEES-Université de Strasbourg-UNC-IRSTEA, 94 p.

Ces rapports sont disponibles sur le site dédié du portail de l'UNC :

- <http://portail-scientifique.univ-nc.nc/> Contacter l'UNC pour les codes d'accès

Rapport final du projet « HYDROMINE » (DAVAR)

- UNC, 2012. Convention HYDROMINE. Rapport de Synthèse 2009-2012. Convention DAVAR, UNC, CFTMC. Rapport 99p et 15 annexes
ftp://ftp.gouv.nc/DAVAR/Etudes_GP/Hydraulique/Hydromine/Rapport_Hydromine_synthese_2009_2012.pdf

Rapport du projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers, volet hydrologie minière » (CNRT)

- Mathys et al., 2014. Contribution de l'IRSTEA. Rapports thématiques du projet « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » Tome II, chapitre 2. Projet CNRT 2010-2014 - Rapport final IRSTEA. 86 p. + Annexes.

8.2. ANNEXE 2 : DISPOSITIFS DE MESURE

Station de suivi hydro-sédimentaire - Type 1, optimal (d'après A. Guyonneau, 2014)

Equipement	Rôle	Prix approximatif	Illustration
<i>Seuil</i>	<ul style="list-style-type: none"> Section de relation $Q = f(h)$ connue 	Selon type de seuil et entreprise	
<i>ISCO 6712</i>	<ul style="list-style-type: none"> Prélèvement d'échantillons Centrale d'acquisition et de programmation 	5000 €	
<i>Module 720</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mesures de hauteur d'eau Asservissement de l'ISCO 6712 	3000 €	
<i>Module 750</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mesures de débit Asservissement de l'ISCO 6712 Ajustement de la courbe de tarage 	4000 €	
<i>InSitu LT 500</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mesure de hauteur d'eau principale ou secondaire (contrôle) 	2000 €	
<i>Turbidimètre (WTW, Actéon, Odéon...)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Mesure de la turbidité en continu 		
<i>Passerelle de jaugeage</i>	<ul style="list-style-type: none"> Réalisation de jaugeages au moulinet, saumon, SVR, ADCP, flotteurs... 		

Station de suivi hydro-sédimentaire - Type 2, préleveur commandé à partir de la centrale de mesure (asservi sur hauteur ou turbidité).

Equipement	Rôle	Prix approximatif	Illustration
<i>Seuil</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Section de relation $Q = f(h)$ connue 	Selon type de seuil et entreprise	
<i>ISCO 6712</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Prélèvement d'échantillons • Centrale d'acquisition et de programmation 	5000 €	
<i>Module 720</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures de hauteur d'eau • Asservissement de l'ISCO 6712 	3000 €	
<i>Module 750</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesures de débit • Asservissement de l'ISCO 6712 • Ajustement de la courbe de tarage 	4000 €	
<i>InSitu LT 500</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de hauteur d'eau principale ou secondaire (contrôle) 	2000 €	
<i>Turbidimètre (WTW, Actéon, Odéon...)</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Mesure de la turbidité en continu 		
<i>Passerelle de jaugeage</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Réalisation de jaugeages au moulinet, saumon, SVR, ADCP, flotteurs... 		

Instruments

Le tableau ci-dessous liste les instruments les plus couramment utilisés en Nouvelle-Calédonie pour l'acquisition de données hydrosédimentaires. Ces instruments sont robustes, adaptés à la mesure sur site, et disponibles auprès de distributeurs locaux, australiens ou métropolitains selon les cas.

DI3_INSTRUMENT					
FABRICANT	MARQUE	TYPE	MESURES	PLAGE_MESURE	NOTES
INSITU	Level Troll 500	Capteur/enregistreur de niveau d'eau	Pression/niveau d'eau, température	de 0-10m à 0-300m	avec mise à l'air – requiert un câble de connexion
INSITU	Aquatroll 200	Capteur/enregistreur de niveau et conductivité	Pression/niveau d'eau, conductivité, température	de 0-10 m à 0-300m	avec mise à l'air
INSITU	Troll 9500	Sonde multiparamètres enregistreuse	Pression/ niveau d'eau, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox, NH3	selon capteurs	Capteurs à la demande
INSITU	Rugged Troll 100	Capteur/enregistreur de pression	pression, hauteur d'eau, profondeur, température	de 0-10m à 0-60m	sans mise à l'air (requiert référence atmosphérique)
SCHLUMBERGER	Diver 500	Capteur/enregistreur de pression	pression, hauteur d'eau, profondeur, température	de 0-10m à 0-100m	sans mise à l'air (requiert référence atmosphérique)
ISCO	ISCO 6712	Préleveur automatique	peut être associé à différents capteurs via modules optionnels (ISCO série 700)	701 : pH/T° 720 : débit 730 : débit bulle à bulle 750 : débit Doppler 780 : entrée 4-20 mA	24 x 1 l ou 24 x 350 ml ou 12 x 1 l 8 x 2 l ou 4 x 4 l (verre ou plastique)
ISCO	3700 ISCO	Préleveur automatique	peut être piloté par un contact sec (entrée TOR)		24 x 1 l ou 4 x 4 l (verre ou plastique)
WTW	ViSolid 700IQ	Sonde de turbidité	Turbidité		
PONCEL	ODEON	Sonde de turbidité	Turbidité		
PONCEL	ACTEON	Sonde de turbidité	Turbidité		
YSI	6920 V2	Sonde multiparamètres enregistreuse	pression, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox	selon capteurs	Capteurs à la demande
YSI	6820 V2	Sonde multiparamètres enregistreuse	pression, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox	selon capteurs	Capteurs à la demande
Hydrolab	MS5	Sonde multiparamètres enregistreuse	pression, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox	selon capteurs	Capteurs à la demande
Hydrolab	DS5	Sonde multiparamètres enregistreuse	pression, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox	selon capteurs	Capteurs à la demande
Hydrolab	DS5X	Sonde multiparamètres enregistreuse	pression, conductivité, turbidité, pH, O2 dissous, Redox	selon capteurs	Capteurs à la demande
Précis-mécanique	3029 ou 303X	Pluviomètre	Lame d'eau de pluie	Basculement augets	Résolution 0.1 à 0.5mm

Centrales d'acquisition – liste non exhaustive

La majorité des sondes de mesure ont des capacités propres d'enregistrement (mémoire interne) et de programmation (déclenchement ou changement de fréquences d'acquisition sur seuil).

Cependant, pour la centralisation de données acquises (plusieurs capteurs sur un même site) ou pour disposer de programmations plus élaborées (par exemple séquences de prélèvements pilotées à distance), il peut être utile d'installer des centrales d'acquisition autonomes et/ou programmables à distance (type Campbell : <http://www.campbellsci.com/products>) ou directement associées à un préleveur (ISCO : <http://www.isco.com/>). Le tableau suivant présente les centrales d'acquisition déjà installées sur différentes stations de mesure en Nouvelle-Calédonie.

DI4_CENTRALES_ACQUISITION		
MARQUE	TYPE	CARACTERISTIQUES
Campbell CR200X	Centrale programmable	5 voies (SE1-SE5) configurables entrées analogiques ou entrées/sorties binaires, 2 entrées/sorties binaires ou compteur d'impulsion C1-C2, mémoire 500 ko (125 000 valeurs). Programmation avec logiciels PC200W (programmation de base), PC400 (logiques complexes avec CRBASIC), RTDAQ (industriel), LoggerNet (gestion d'un réseau de capteurs)
Campbell CR800	Centrale programmable	6 entrées analogiques SE1-SE6, 2 compteurs impulsion P1-P2, 2 sorties analogiques VX1-VX2, 4 entrées/sorties binaires C1-C4, mémoire 4 Mo (10 ⁶ valeurs)
ISCO 3700	Préleveur automatique programmable	Programmation basique (3 programmes), 24 x 1l
ISCO 6712	Préleveur automatique programmable	24 x 1l, mémoire 512 ko, modules de mesure associés (débit, sonde multiparamètre), logiciel FlowLink
ALCYR	Danae	Compteur d'impulsions pour pluviomètre, logiciel ALPLUIE
InSitu	Logger intégré aux sondes	Logiciel WinSitu
Diver	Logger intégré aux sondes	Logiciel Diver Office

8.3. ANNEXE 3 : EXEMPLE DE FICHES

Exemple de fiche descriptive STATION

FICHE STATION 

ID	CODE STATION	DATE_CREATION	DATE_MAJ
<input type="text" value="1"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
CODE RESEAU MESURE	APPLICATION		
<input type="text"/>	<input type="text"/>		
Objet_Observé			
<input type="text"/>			
X_RGNC	Y_RGNC	Z_NGNC	
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
Emplacement_Doc_Attachés			
<input type="text"/>			
Notes:			
<input type="text"/>			

Exemple de fiche de terrain (relevé de données)

FICHE TERRAIN		MESURES OU INTERVENTION			
ID:	<input type="text" value="1"/>				
TYPE_INTERVENTION:	<input type="text"/>	OPERATEUR:	<input type="text"/>		
FK_CAPTEUR:	<input type="text" value="1"/>	DATE_MESURE:	<input type="text"/>		
NO_SERIE_INSTRUMENT:	<input type="text" value="nnn"/>	X:	<input type="text"/>		
CONDITIONS_METEO:	<input type="text"/>	Y:	<input type="text"/>		
REFERENCE_MESURE:	<input type="text"/>	REFERENTIEL GEO:	<input type="text"/>		
MESURE_MANUELLE:	<input type="text"/>				
SENS_MESURE:	<input type="text"/>				
NOM_FICHER:	<input type="text"/>				
OBSERVATIONS:	<input type="text"/>				

Check-list de terrain, à adapter selon la tournée concernée et les capteurs rencontrés

CL_TERRAIN	
ITEM	POINT_VERIF
Liste des sites à visiter (coordonnées GPS / carte)	Préalable à la préparation de la relève
Liste des contacts	Annuaire des contacts sur site, appel préalable si accès au site soumis à autorisation
Fiches terrain	Fiches adaptées à la tournée et aux mesures réalisées
Ordinateur portable terrain chargé	Ordinateur chargé, chargeur, logiciels et câbles requis pour la tournée
Appareil photo numérique	Carte vierge, piles chargées
GPS	Piles chargées, référentiel UTM ou RGNC, Enregistrement trace ON
Instructions de maintenance	adaptées à la tournée
EPI	Casque, chaussures de sécurité, pantalon, vêtement manches longues réfléchissant, crème solaire, eau potable, etc... (respect des consignes sécurité des entreprises)
Véhicule	Inspection visuelle des points de sécurité (pneus, niveaux, ...), confirmation des accès, conformité avec règles d'accès
Radio	chargée, fonctionnelle
Clés et outillage	Outillage adaptée aux sites et aux équipements de la tournée
Décamètre	
Flacons d'échantillonnage	Quantité et volumes adaptés à la tournée, bouteilles propres
Moulinet	Inspection visuelle, accessoires (hélice, compteur, perche)
Sonde multiparamètres + câble	Inspection visuelle, charge OK, calibration OK
Chronomètre	
Marqueurs indélébiles	
Glacière	achat glaçons pour conservation échantillon
Balai ou pelle	pour nettoyage d'un seuil (si pas présent dans abri local)
Multimètre	pour test des batteries, panneaux, etc...
Jumelles	pour relève d'échelles distantes
Chiffon propre	pour nettoyage panneaux solaires
Bidon d'eau 20 l + sel	pour jaugeage au sel ou nettoyage

Exemple d'une fiche de terrain utilisée pour les mesures de débit par exploration du champ des vitesses au moulinet (source ONEMA «Contrôle des débits réglementaires»)

Jaugeage par exploration du champ des vitesses au moulinet				
Nom du cours d'eau :		Date : / /		
Heure UTC début :		Heure UTC fin :		
Hauteur échelle début : m		Hauteur échelle fin : m		
Largeur de la section : m				
Origine de la mesure RD <input type="checkbox"/> RG <input type="checkbox"/>				
Abscisse d'origine : cm		Abscisse de fin : cm		
Profondeur rive d'origine : cm		Profondeur rive de fin : cm		
Matériel de mesure :		N° Hélice / Diamètre : /		
Opérateurs :		Moyenne :		
N° Verticale	Distance à la rive (cm)	Profondeur (cm)	Position du capteur (cm)	Vitesse (m/s)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
Observations / Variations de hauteur pendant le jaugeage				
N° Archivage :				Page .../...

Exemple d'une fiche de terrain utilisée pour les mesures de débit par traçage avec une solution saline (source ONEMA "Contrôle des débits réglementaires")

Jaugeage par traçage avec une solution saline				
Nom du cours d'eau :		Date : / /		
Heure UTC début :		Heure UTC fin :		
Hauteur échelle début :		Hauteur échelle fin :		
Type d'injection :	Traceur :			
Distance d'injection : m	Masse de traceur :		g	
	Conductivité de la solution injectée :		μS/cm	
	Volume de la solution injectée :		mL	
	Conductivité de l'eau de la rivière en mouvement :		μS/cm	
	Conductivité de l'eau de la rivière au repos :		μS/cm	
Matériel de mesure :				
Etalonnage sur site :		oui non		
Solution étalon standard :		oui non		
gamme étalon de terrain :		oui non		
Opérateurs :				
Observations :				
Gamme étalon de terrain				
Concentration en sel		Conductivité		
Injection N°	Nom de fichier	Temps d'injection	Temps de début de passage du traceur	Temps de fin de passage du traceur
N° Archivage :				Page .../...

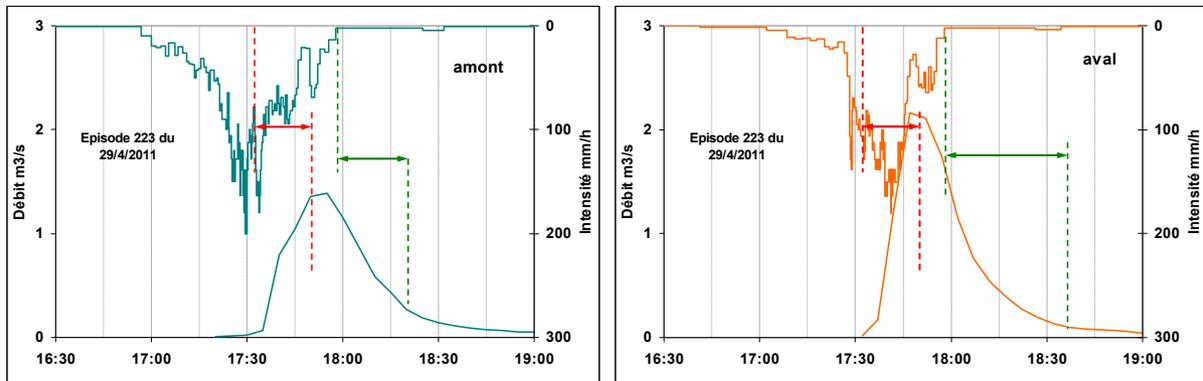
Exemple d'une fiche de terrain utilisée pour les mesures de débit par des méthodes hydrauliques (source ONEMA «Contrôle des débits réglementaires»)

Méthodes hydrauliques	
Nom du cours d'eau :	Date : / /
Heure UTC début :	Heure UTC fin :
Hauteur échelle début : m	Hauteur échelle fin : m
Matériel de mesure :	Opérateurs :
Croquis détaillé et côtes de l'ouvrage	
Prendre le maximum de côtes sur l'ouvrage (hauteur de pelle, épaisseur du déversoir, dimensions) Relever les hauteurs d'eau et indiquer les sur le croquis (en amont et en aval de l'ouvrage). Préciser les unités	
	
Observations	
N° Archivage :	Page .../...

8.4. ANNEXE 4 : EXEMPLES D'ANALYSES ISSUS DU PROJET HYDROMINE

Sur la relation pluie débit

Pour tous les épisodes notables, le tracé du couple averse-crue permet d'analyser la réponse du bassin versant, de déterminer le début et la fin du ruissellement rapide de crue, de calculer la lame écoulee et le coefficient d'écoulement.



Exemple de tracés de couples averse/crue et de détermination graphique du temps de concentration

Ces analyses montrent que les temps de concentration sont très courts (9 à 16 min à Poro amont et 12 à 21 min à Poro aval) et que les formules de la littérature couramment sont inadaptées. Les méthodes de calcul proposées par IRSTEA pour les bassins de montagne ou par la Davar pour les bassins à forte pente fournissent, elles, des résultats dans le même ordre de grandeur.

Calcul du temps de concentration avec la méthode DAVAR

Cette méthode, dite méthode des temps de transfert, considère une vitesse suivant le drain hydraulique le plus long. On retient 2 m/s si la pente du drain est entre 5 et 15% (dans les vallées) 4 m/s au-delà (sur les versants) et 1 m/s si la pente est inférieure (dans les plaines).

Calcul du temps de concentration avec la formule Meunier-Mathys (Irstea) :

La formule est la suivante :

$$T_c = K \cdot S^{0.312} \cdot I^{-0.625}$$

Avec :

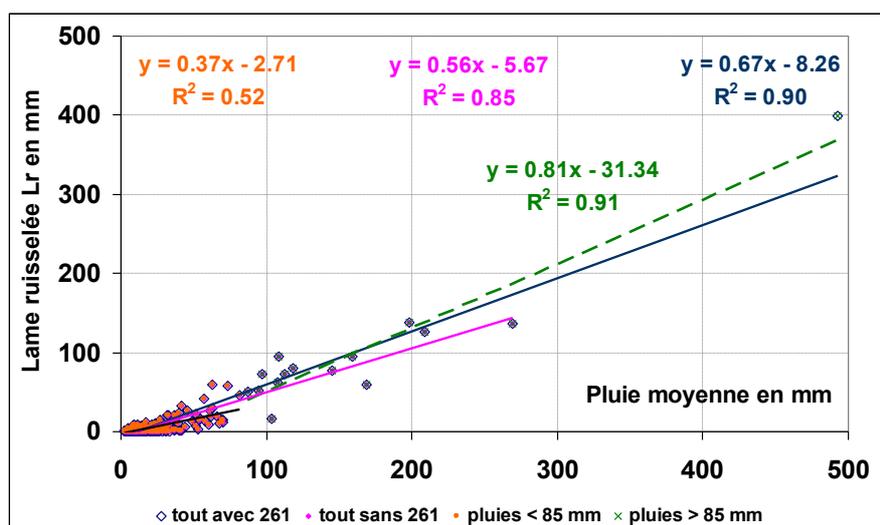
- T_c : Temps de concentration (min)
- S : Surface du bassin versant (km²)
- I : Pente du bassin versant (%)
- K : Coefficient fonction de l'état de dégradation du bassin versant. Il varie entre 145 pour un bassin dégradé et 331 pour un bassin végétalisé.

Les variables descriptives de l'épisode sont également analysées, notamment le débit de pointe et le volume de crue. A Poro, entre 2008 et 2014, les débits maximums observés sont de 3.6 m³/s à l'amont et de 9.2 m³/s à l'aval soit respectivement 41 et 30 m³/s/km².

Pour chaque épisode, le volume écoulé est calculé en intégrant le débit entre le début et la fin de la crue générée. La lame écoulée est obtenue en divisant ce volume par la superficie drainée (en projection horizontale). Ce choix de calcul permet de comparer dans les mêmes unités pluie incidente et lame écoulée. On reporte ensuite sur un graphe les lames écoulées

en fonction de la pluie de chaque épisode. On admet généralement que la pente de la droite ajustée sur le nuage de points est une approximation du coefficient d'écoulement moyen.

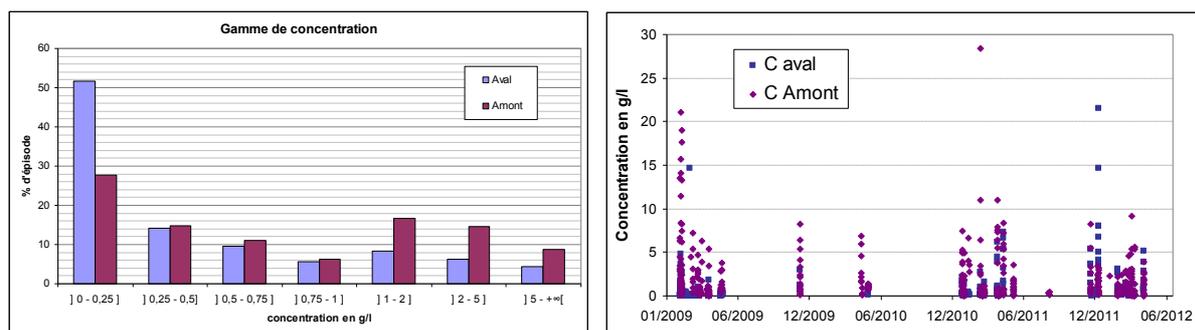
Dans l'exemple de la figure ci-dessous, on a fait des catégories de points en fonction de la pluie incidente et on constate que le coefficient d'écoulement est de 0.67, tous épisodes confondus, mais qu'il dépasse 0.8 si on ne retient que les épisodes de plus de 85 mm de pluie.



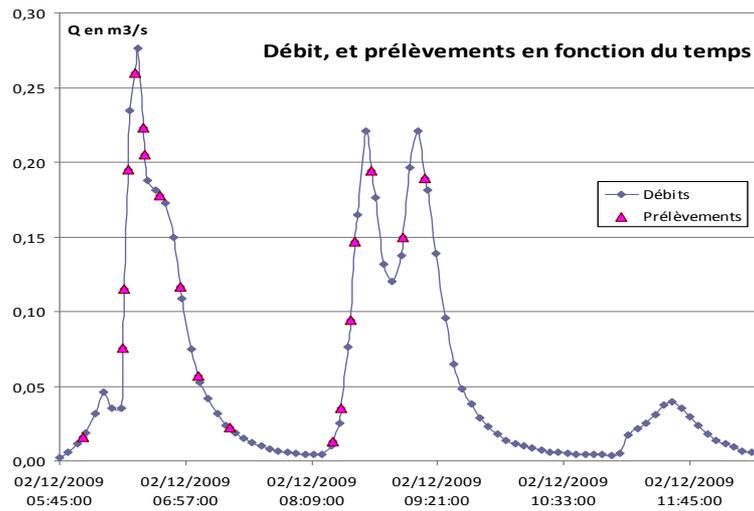
Relation lame ruisselée / pluie à Poro amont

Sur les transports solides en suspension

La première étape consiste bien sûr à analyser la gamme des concentrations observées et la répartition temporelle des prélèvements au cours des crues. Ceci permet notamment d'adapter la stratégie d'échantillonnage et d'analyse des concentrations en suspension.

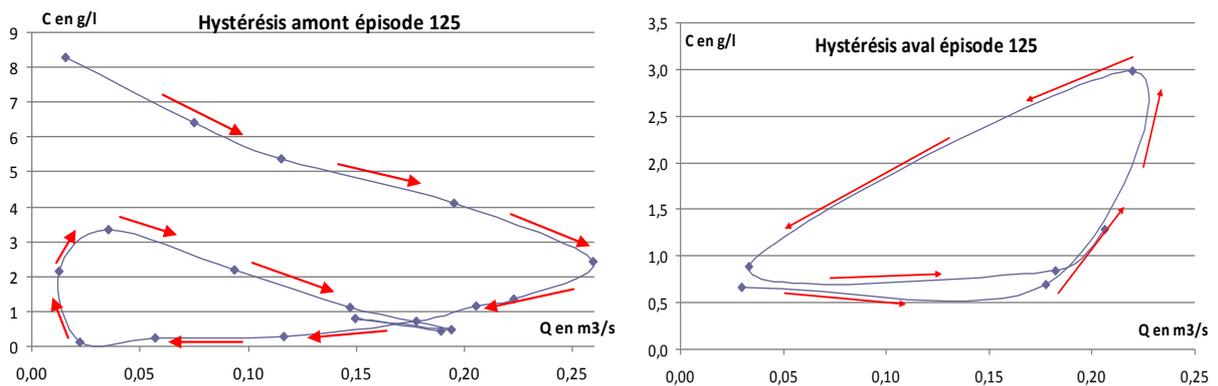


Concentrations observées pour 71 crues et 1004 échantillons



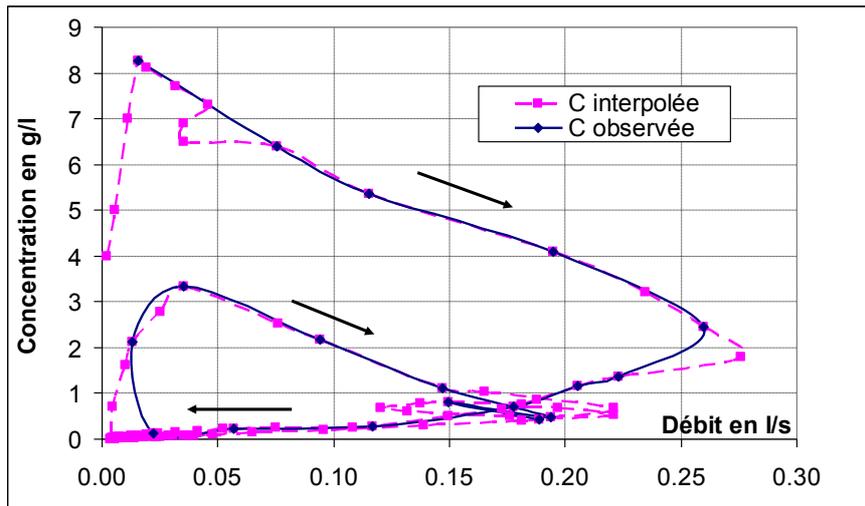
Exemple de graph positionnant les prélèvements

Pour chaque crue échantillonnée, il est indispensable de tracer la relation entre la concentration et le débit. Elle permet de voir s'il y a ou non phénomène d'hystérésis et d'analyser le fonctionnement de la crue ("first flush" ou pic de lessivage en début d'épisode, dilution par les forts débits ou au contraire pics de concentration avec les périodes de pointe, etc...)



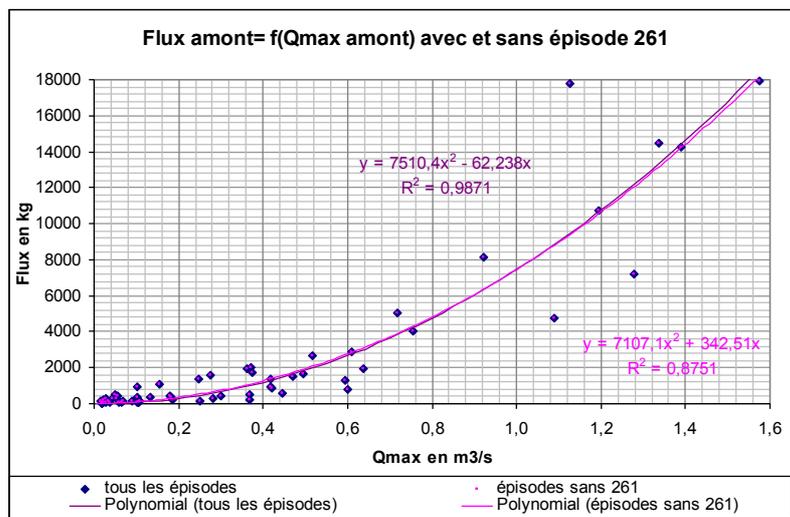
Hystérésis dans la relation concentration-débit

On utilise également ces courbes pour interpoler les concentrations en tout point de l'hydrogramme. Ceci permet ensuite de calculer à chaque instant le débit solide et en l'intégrant sur l'épisode le flux de sédiments ayant transité par la station.



Exemple d'interpolation et extrapolation de la relation Concentration-débit pour l'épisode 125 (Poro amont)

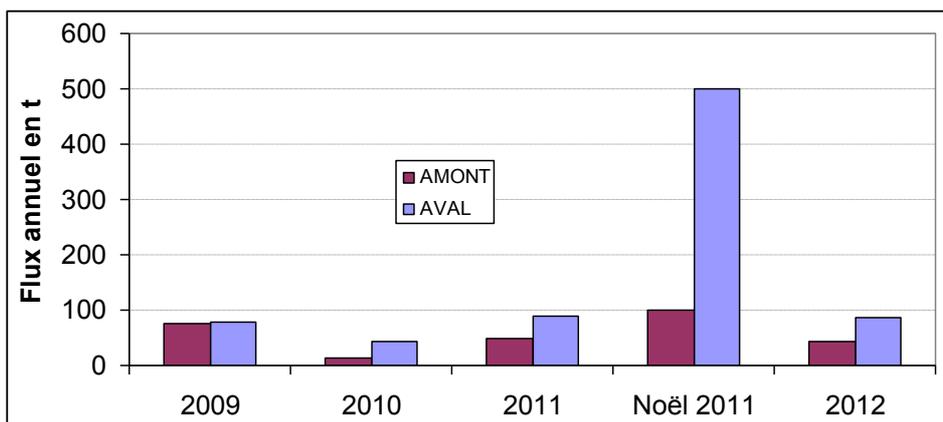
On peut ensuite analyser l'importance de ces flux en fonction des caractéristiques de l'épisode : cumul et intensité des pluies, débit de pointe, activité minière et état du bassin avant l'épisode, etc... On a pu montrer à Poro que le débit maximum de la crue est un bon indicateur de la charge solide globale d'un épisode. L'association avec la fraction intense des précipitations améliore encore la prédiction. Ceci permet notamment d'estimer le flux exporté pendant les crues qui n'ont pu être échantillonnées.



Estimation du flux à partir du débit de pointe à Poro amont

Une analyse granulométrique d'un certain nombre d'échantillons des suspensions recueillies est également riche d'enseignements.

Il est enfin nécessaire de calculer les flux à différentes échelles de temps (la saison et l'année) et de situer les épisodes les plus forts dans la chronique. En effet, ils représentent souvent l'essentiel des exportations de sédiments fins. Sur l'exemple ci-dessous, on voit par exemple la contribution dominante de l'épisode de Noël 2011.



Flux annuels de matières en suspension à Poro

Ces éléments ne sont donnés qu'à titre d'illustration. On se reportera aux rapports des programmes « Hydromine » (DAVAR) et « Fonctionnement des petits bassins versants miniers » (CNRT) pour des analyses détaillées des données hydro-sédimentaires obtenues sur les bassins versants miniers ces dernières années.

© *Crédits photos et figures*

- Figure 1 D. Richard
- Figure 2 P.E. Alloin
- Figure 3 N. Mathys
- Figure 4 N. Mathys
- Figure 5 A. Motto et P.E. Alloin
- Figure 6 DAVAR et Irstea
- Figure 7 N. Caze et N. Mathys adapté de Wikipedia, André et al. (1976), Bamo (site internet)
- Figure 8 DAVAR
- Figure 9 A. Guyonneau
- Figure 10 A. Motto et N. Mathys
- Figure 11 N. Mathys
- Figure 12 A. Guyonneau, S. Klotz et D. Richard
- Figure 13 A2EP
- Figure 14 A2EP
- Figure 15 A2EP
- Figure 16 A2EP
- Figure 17 A2EP

GUIDE

Environnement

CNRT 
NICKEL
& son environnement