



Caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent

Site atelier de la baie du Robert

2007-2009

**Unité de Recherche « Agriculture et
espace insulaire »**

Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique
Quartier Petit Morne – BP 214 – 97 285 Lamentin Cedex 2

Titre du projet : « CARACTERISATION DU TRANSPORT SOLIDE EN RAVINE ET COURS D'EAU PERMANENT »

Nom du responsable scientifique du projet : Anne-Claire NIVET, Cemagref – UR Aema

Equipe du projet : Albert ARIMONE, Julie GRESSER, Sabrina EDMOND, Pierre MARIE, Kevin PINTE, Nicolas ROCLE, François-Xavier DE LA FOYE, Damien DEVAULT

Partenaires financiers : MEDAAT - DIREN Martinique – Office de l'eau de la Martinique (ODE) Convention du 24/01/2008

Partenaires scientifiques et institutionnels : Ifremer, UAG, DIREN (Direction Régionale de l'Environnement), ODE (Office de l'Eau de la Martinique), Ville du Robert, Impact Mer, Cirad-PRAM, Ird-PRAM.

Calendrier : Janvier 2007 à juin 2009

Autres documents liés à la présente étude :

- Un « **recueil des données** » rassemblant les principaux jeux de données relatifs aux concentrations en pesticides, aux concentrations en matières en suspension (MES) et aux mesures hydrologiques sur les quatre stations (115 pages) complète le rapport d'étude.
- Un **rapport intermédiaire** rédigé en janvier 2008 décrit les stations de mesure avec de nombreuses photographies. C'est pourquoi peu d'illustrations seront données dans le présent rapport.
- **Cinq autres études** complètent celle-ci : La première, réalisée en partenariat avec l'antenne de l'Ifremer en Martinique, est relative à la contamination de la faune halieutique par la **Chlordécone**, la deuxième caractérise les **transferts de pesticide** dans la ravine et les deux cours d'eau étudiés, la troisième étudie les méthodes de construction des **courbes de tarage**, la quatrième aborde la **sociologie de l'eau** sur le site de la baie du Robert. Enfin le rapport de stage de DESS de Daniel René-Corail, élève de l'Université de Caen, présente un essai de **Micro-barrages filtrants en bananeraie**.

Remerciements

Nous tenons à remercier pour leur aide précieuse, leurs conseils avisés et leur soutien,

Pascal MARRAS et **Jean-Guillaume LACAS** de la DIREN Martinique, **Renaud SAINT CYR** du Conseil Général de la Martinique, **Pierre MARCHAND** et **Alain LARAQUE** de l'Ird-PRAM, **Magalie JANNOYER** du Cirad-PRAM et tout spécialement **Monsieur Christian VERNEUIL** élu de la Ville du Robert impliqué à l'interface entre la recherche et l'aménagement du territoire dans une démarche partenariale de Gestion Intégrée de la Zone Côtière.



Station Gashette, illustration du transport solide en crue
Photographie Anne-Claire NIVET et Julie GRESSER



Résumé (En français)

L'envasement de la baie du Robert trouve sa principale origine dans l'apport massif d'éléments terrigènes en provenance du territoire qui l'entoure. Il est pertinent de mesurer les événements hydrologiques des cours d'eau et les matières en suspension (MES) qu'ils transportent, car le transport solide révèle les mécanismes d'érosion des bassins versants associés.

C'est pourquoi le Cemagref-PRAM, UR Aema, en partenariat avec la ville du Robert, l'Ifremer, la DIREN et l'Office de l'eau de la Martinique a entrepris un programme d'évaluation du transport solide depuis la partie terrestre de la baie du Robert, constituée de versants montagneux de petite dimension, vers la baie.

Nous présentons d'abord les protocoles de mesure mis en œuvre et les difficultés rencontrées, pour finalement confronter nos mesures expérimentales avec une formule simplifiée du transport solide.

L'originalité de l'étude est de s'intéresser à des cours d'eau intermittents et à des petites rivières dont les réponses hydrologiques ont été peu appréhendées jusqu'à présent.

Mots clés

Erosion, envasement, bassin versant, climat tropical, Baie du Robert, Martinique

Abstract (In English)

Robert bay silting up comes from sizeable soil erosion of area all around. It is pertinent to measure hydrological events occurring in a stream and alluvium contents which flow in, as rivers and gutters bring to light erosion which take place on the related watershed.

That's why the Cemagref research unit of Martinique (AEMA), works in partnership with ville du Robert, Ifremer, DIREN and ODE to determine suspended load as well as bed load from Robert bay occupied areas, which generally are small mountain catchments, to coastal zone.

Firstly we describe experimental procedure and difficulties we met, finally we compare experimental data with a practical hydraulic formula.

The novelty is to study occasional gutters and small rivers which were not specially designed as far as hydrological response is concerned.

Key words

Erosion, silting up, watershed, tropical climate, Robert bay, Martinique

TABLE DES MATIERES

Remerciements	2
RÉSUMÉ, MOTS CLÉS	4
TABLE DES MATIERES	5
REMARQUE LIMINAIRE.....	7
INTRODUCTION.....	7
1 OBJECTIFS – ETAT DE L’ART	8
11 OBJECTIFS DE L’ETUDE.....	8
12 ETAT DE L’ART ET DES CONNAISSANCES	8
2 CONTEXTE ET MODES OPERATOIRES	16
21 PRESENTATION GENERALE DE LA BAIE DU ROBERT, TERRITOIRE A ENJEUX.....	16
22 PRESENTATION DES STATIONS DE MESURE	17
23 RECUEIL DES DONNEES DE TERRAIN	18
231 <i>Utilisation des Turbidimètres, suivi en continu</i>	19
232 <i>Prélèvements ponctuels des matières en suspension (MES)</i>	22
233 <i>Pièges à sédiment</i>	25
Récolte des données	26
234 <i>Approche géomorphologique</i>	27
24 TRAVAUX EN LABORATOIRE : DOSAGE DES MES	29
25 DONNEES DISPONIBLES, ESTIMATION DES VALEURS MANQUANTES	33
251 <i>Bilan des données disponibles ou absentes</i>	33
2511 Suivi de la turbidité en continu	33
2512 Matières en suspension en continu et en crue	34
2513 Données disponibles Charriage	34
2514 Profil en long, pente.....	35
252 <i>Estimation des valeurs manquantes</i>	35
26 INCERTITUDES SUR LES DONNEES POUR L’INTERPRETATION DES RESULTATS	35
3. RESULTATS.....	36
31 LE CHARRIAGE EST INFLUENCE PAR L’ALTERNANCE DES SAISONS	36
32 LA GRANULOMETRIE NE CARACTERISE PAS L’ORIGINE DES MATERIAUX	37
33 LES RELATIONS ENTRE LES CONCENTRATIONS EN MES ET LES DEBITS CARACTERISENT L’INTERACTION ENTRE L’ALEA ET LA VULNERABILITE	38
330 - <i>Paragraphe liminaire, quelques définitions</i>	38
331 <i>Crue du 31/07/2008, Station Voltaire</i>	39
332 <i>Crue du 11/10/2008, station Voltaire</i>	42
333 <i>Crue du 29/08/2008, Station Gashette</i>	47
334 <i>Crue du 19/09/2008, Station Gashette</i>	49
335 <i>Crue du 31/07/2008, station Mansarde aval</i>	55
3350 <i>Paragraphe liminaire, débits critiques</i>	55
3351 <i>La crue du 31/07/2008, station Mansarde aval</i>	56
336 <i>Crue du 29/08/2008, station Mansarde aval</i>	58
337 <i>Crue du 01/12/2008, station Mansarde aval</i>	60
3371 <i>Analyse de la crue du 01/12/2008, station Mansarde aval</i>	60
3372 <i>Etude comparative des ajustements</i>	64
34 CHRONIQUE ANNUELLE DU TRANSPORT SOLIDE	66
341 <i>De la manière de poser le problème</i>	66
342 <i>De la manière de définir un régime critique de début de transport</i>	68
343 <i>De la manière d’estimer le transport solide en suspension</i>	69
3431 <i>Conduite des calculs</i>	69
3432 <i>Quelques commentaires</i>	71
3433 <i>Estimation d’un ordre de grandeur du transport solide annuel</i>	72
35 APPLICABILITE D’UN MODELE HYDRAULIQUE SIMPLIFIE	74

4 ANALYSE DES RESULTATS	78
41 SYNTHESE DES PRINCIPAUX RESULTATS	78
411 <i>Les résultats méthodologiques</i>	78
412 <i>Les résultats heuristiques</i>	80
412 <i>Difficultés rencontrées</i>	81
42 ANALYSE CRITIQUE SUR L' ATTEINTE DES OBJECTIFS DE L' ETUDE	81
CONCLUSION	81
Bibliographie.....	82
Annexes	
1- Etalonnage du turbidimètre	
2 - Relevés topographique, traitement des données	
3 - Données brutes, pesées	
4- Le transport solide mesure la vulnérabilité à l'érosion du bassin versant	
5- Analyse de risque : aléa et vulnérabilité mesurés par le transport solide	
6- "Surface intégrée au point de mesure" et "effet de surface"	
7- Application de la distribution des accélérations flash du débit à la comparaison de deux bassins versants	
8 - Hommage aux élèves ingénieurs stagiaires	

Remarque liminaire

Cette étude intitulée « **Caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent** » est conjointe à l' « **Etude des transferts de pesticides sur le site atelier de la baie du Robert** ». Les sites de mesure sont les mêmes : quatre stations de mesure ont été installées en 2007 sur trois cours d'eau. C'est la raison pour laquelle, certaines parties du présent document renvoient directement aux paragraphes correspondants de la première étude.

Introduction

L'envasement de la baie du Robert et les panaches turbides observés lors d'évènements orageux témoignent des transports de terre en provenance des zones occupées sur le pourtour de la baie vers le milieu marin. Depuis 2005, plusieurs études qualitatives ont montré que l'organisation spatiale des activités humaines qui prennent place sur les 23 km² du bassin versant avait tendance à accroître ces transferts préoccupants. Par contre, aucune donnée quantitative précise n'avait alors été trouvée.

En 2007, Il a été décidé de valoriser les quatre stations de mesure hydrologique installées sur trois sous-bassins versants pour conduire une première estimation des flux et confronter les résultats obtenus aux équations du transport solide. Ce sont les résultats de ces mesures que nous présentons dans le présent rapport.

Le transport solide est un concept introduit assez tôt en hydraulique fluviale et qui, pour les besoins de la gestion des risques, a été adapté à l'hydraulique torrentielle. Les cours d'eau que nous avons instrumentés sont atypiques dans ce champ d'étude, car leur dimension est petite et des méthodes hydrauliques trop complexes auraient probablement généré davantage de questions qu'elles auraient apporté de réponses. Nous nous sommes donc appuyés sur des notions simplifiées de l'hydraulique torrentielle et sur les mesures hydrologiques usuelles.

Malgré cela, les protocoles envisagés n'ont pas pu être suivis strictement, contrariés par des circonstances que nous n'avons pas toujours contrôlées. Toutefois, les estimations quantitatives visées ont pu aboutir et confirment l'importance des phénomènes érosifs qui alimentent le transport solide en cours d'eau dans cette zone. Un essai modeste de barrages filtrants en bananeraie a été conduit parallèlement et a fait l'objet d'un rapport séparé.

Dans une première partie, nous rappelons les objectifs de l'étude et dressons un rapide état de l'art. Dans une deuxième partie, nous décrivons les modes opératoires. Dans une troisième partie, nous présentons les résultats. Enfin nous revenons avec un regard critique dans une quatrième partie qui ferme le rapport.

1 OBJECTIFS – ETAT DE L'ART

Dans cette partie, les objectifs du cahier des charges sont rappelés et une synthèse bibliographique dresse un rapide état de l'art, les principales questions de recherche sont soulevées.

11 Objectifs de l'étude

Par convention entre le Cemagref, UR Aema, la Diren de la Martinique et l'Office de l'eau de la Martinique, un programme de mesure appliqué au transport solide par charriage et en suspension fut conduit dans trois situations : Deux cours d'eau permanents (rivières Gashette et Voltaire) et un cours d'eau intermittent (ravine Mansarde).

- La mesure des matières en suspension (MES) en continu a été envisagée au moyen de turbidimètres étalonnés grâce à des mesures ponctuelles par prélèvement direct.
- La mesure du charriage a été envisagée par la pose de pièges à sédiments sur la ravine Mansarde, partiellement occupée par 2,40 ha de bananeraies.
- Dans le même temps, les mesures des pluies et débits sont poursuivies aux exutoires.

L'objectif méthodologique est le suivant : Adapter les protocoles du suivi de la turbidité et du transport solide aux cours d'eau tropicaux.

Les objectifs heuristiques sont les suivants :

- Etudier l'influence du facteur occupation du sol sur le transport solide
- Etudier les chroniques du transport solide à partir des événements des cours d'eau
- Etudier certaines actions préventives
- Consolider l'étude des transferts de la Chlordécone

L'objectif méthodologique n'est que partiellement atteint ; par contre l'apport de connaissances nouvelles est substantiel. Par surcroît, la confrontation des mesures expérimentales avec les formules du transport solide ouvre des perspectives de généralisation.

12 Etat de l'art et des connaissances

L'état de l'art prépare la présentation des résultats qui sera faite en troisième partie.

L'érosion et le transport solide.

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

Toutefois, trois origines des matériaux transportés sont en général distinguées : 1-Les particules érodées à partir des versants, 2-Les particules arrachées aux berges du cours d'eau et 3-Les éléments soulevés à partir du lit, nous parlons alors de reprise de matériaux antérieurement déposés. L'analyse granulométrique des particules déplacées par le cours d'eau vise à identifier l'origine des matériaux. Nous appelons transport solide d'un cours d'eau, l'ensemble des particules déplacées dont le diamètre est supérieur à 0,45 microns (μm). Les principaux paramètres du transport solide sont présentés en annexe 4.

Les deux composantes du transport solide

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

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

- la charge en suspension (suspended load) est constituée de matériaux dont la taille et la densité leur permettent, dans des conditions d'écoulement déterminées, de se déplacer sans toucher le fond du lit. Il s'agit essentiellement des argiles et des colloïdes.
- la charge de fond (bed load) est formée de matériaux trop denses pour être mis en suspension relativement à la vitesse du courant. Certains auteurs distinguent un transport par saltation qui correspond approximativement à un déplacement par bonds successifs.

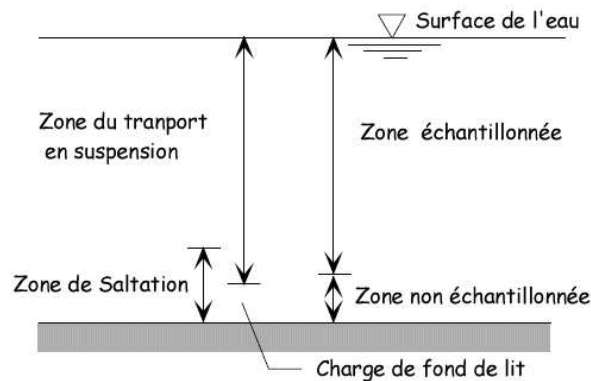


Figure 1 : Classification du transport solide
(d'après Wen Shen, & Julien, 1992).

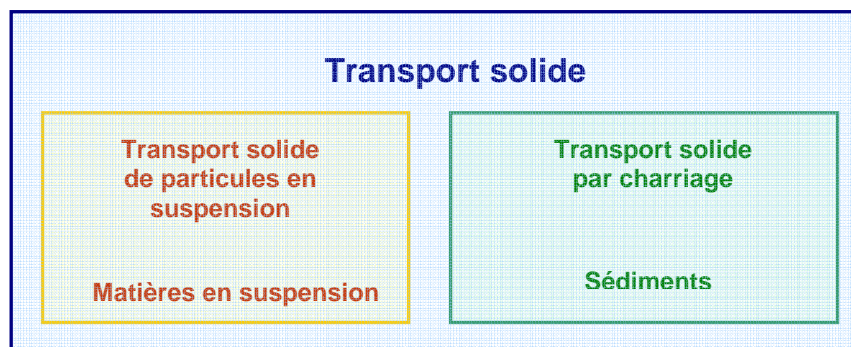


Figure 2 : les deux composantes du transport solide

Analyse de risque

L'érosion n'est pas à proprement parler un risque, sauf dans les cas particuliers des laves torrentielles et des coulées boueuses ; mais aborder le transport solide demande un cadre d'analyse. Nous avons retenu un cadre simple et efficace, parce qu'il est couramment utilisé en analyse de risque : nous distinguons l'aléa et la vulnérabilité.

- L'aléa : il s'agit de **la pluie** qui génère la principale érosion des sols dans notre contexte local. En regard des cycles de l'érosion, les pluies présentent un caractère davantage permanent et prévisible qu'un caractère aléatoire, même si la saison des pluies est très différenciée. Contrairement à l'idée préconçue d'une érosion liée aux événements climatiques rares, en Martinique l'érosion hydrique fonctionne une grande partie l'année avec une efficacité remarquable, conséquence de la fréquence élevée des pluies et de leur intensité plutôt forte qui génère l'arrachage des particules par « effet splash » et leur mise en mouvement grâce à un ruissellement important.
- La vulnérabilité : A l'échelle de l'année, si nous identifions assez justement l'« aléa-pluie » à une « voiture-balai », **les matériaux disponibles** qu'elle peut emporter dans son écoulement représentent la vulnérabilité. L'interaction de l'aléa et de la vulnérabilité fonde l'analyse de risque.

Nous distinguons deux types de vulnérabilité :

- La vulnérabilité structurelle : Un site, parce qu'il est pentu, doté de sols érodibles, exposé aux houles, situé à un exutoire, etc... peut présenter une vulnérabilité structurelle. En s'inspirant des méthodes d'Yves Lebissonais (INRA-Université de Montpellier), Kevin Pinte en 2006 (Cemagref-PRAM, UR Aema), a cartographié sur le pourtour de la baie un indicateur de risque structurel à l'érosion à partir de six paramètres physiques. Mais cela ne doit pas faire oublier la vulnérabilité conjoncturelle, tout aussi déterminante.
- La vulnérabilité conjoncturelle : Défrichements, labours, affouillements, augmentent la vulnérabilité fortement liée aux usages qui modifient l'état du sol. Mais les cisaillements de terrains après de fortes pluies sont reconnus comme les principaux agents de déstabilisation des sols.

Les occupations du sol, plus ou moins structurelles ou conjoncturelles, amèneront toujours les questionnements sémantiques qui n'enlèvent rien à la pertinence de cette représentation : elle met en évidence la **difficulté à prévoir le transport solide, essentiellement événementiel**. Par surcroît, nous ne disposons d'aucune antériorité de mesure en transport solide sur la zone étudiée. Une illustration de ce cadre d'analyse est donnée en annexe 5.

Cours d'eau et bassin versant associé, crues

La mesure des événements du cours d'eau est donc un moyen indirect de quantifier les phénomènes érosifs survenant à la surface du bassin versant associé, assimilé à un impluvium. **Il a été observé que l'essentiel du transport en suspension survient en événement de crue.** (Jean-Paul Branvard et François Petit – « *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial* », Armand Colin éditions, 1997, pages 66 et suiv.). En dehors de ces événements, les cours d'eau permanents répondent au régime hydraulique d'eau claire.

Structuration du temps

Le temps peut être structuré par les événements du cours d'eau, singulièrement les crues. Mais les crues « flash » des rivières de la Martinique n'épousent pas sans une certaine approximation les modèles hydrologiques classiques. Les définitions des événements du cours d'eau sont conventionnelles et chaque auteur arrête ses propres critères. Le temps peut être plus simplement structuré par le calendrier des mois et des années.

Approches hydrauliques simplifiées

L'étude du transport solide en cours d'eau, s'il emprunte à l'hydrologie, fait d'abord appel aux formalismes de l'hydraulique fluviale adaptée à l'hydraulique torrentielle. Les équations appliquées par ces disciplines sont pour partie empiriques et pour partie issues des lois d'écoulement en régime permanent uniforme. Cette approche distingue « débit liquide » et « débit solide ».

Les concepts fondamentaux sont ceux de « régime critique » et d'« équilibre dynamique » : L'écoulement est en équilibre dynamique, lorsque sa vitesse atteint une valeur constante sous le double effet de la pesanteur qui tend à l'augmenter et d'une force contraire de frottement du lit qui croît avec la vitesse d'écoulement. On cherche alors à caractériser le débit liquide correspondant à un régime critique de transport. En particulier, le « **débit critique de plein transport** » est supposé correspondre à la charge en suspension maximum. Les petites rivières permanentes de la Martinique sont susceptibles de répondre en partie à cette représentation pour des crues dont les durées sont suffisantes. Si ces approches correspondent bien à l'hydraulique fluviale caractérisée par des nombres de Froude (*) inférieurs à 1, elles demandent des précautions en hydraulique torrentielle caractérisée par des nombres de Froude supérieurs à 1, même si cette distinction fondée sur le nombre de Froude ne correspond pas toujours aux mesures expérimentales réalisées dans les torrents.

(*) Le nombre de Froude est adimensionnel et caractérise l'effet de petites perturbations par un rapport de quantités d'accélération ou de vitesses : en régime fluvial, des perturbations peuvent remonter vers l'amont, tandis qu'en régime torrentiel, par l'effet de la pente et de la vitesse, de tels retours ne se produisent pas. Le nombre de Froude exprime ces différences.

Un deuxième régime critique est caractérisé par le « **débit critique de début de transport** ». Les formules qui calculent un débit critique intègrent la granulométrie des éléments transportés, leur masse volumique, la pente du cours d'eau et l'accélération de la pesanteur. **Il est à noter que les paramètres de telles formules sont mesurés expérimentalement pour chaque cours d'eau.**

Les relations fonctionnelles entre la largeur du cours d'eau et les débits critiques sont également mesurées expérimentalement et les débits critiques sont alors exprimés par unité de largeur. Il apparaît que ces relations sont relativement constantes pour des cours d'eau de dimensions comparables.

Les biefs, tronçons des cours d'eau étudiés, sont approchés par des « canaux à fond rugueux équivalents » auxquels les lois des écoulements permanents uniformes sont appliquées.

Maurice Meunier, « Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique », Editions Cemagref, 1999, page 301 et suivantes, propose des **formules de transport solide simplifiées** notamment :

$$Q_s/Q_{cr} = B \times I^A$$

Avec

Qs : Débit solide critique de plein transport

Qcr : Débit liquide critique de plein transport

I : Pente – Domaine de validité : pente de 0,03 à 0,20 (3 à 20 %)

A et B caractérisent le cours d'eau et son bassin versant.

Cette formule suppose la réalisation de trois conditions :

- un rapport des masses volumiques (μ matériau/ μ eau) constant, en général 2,65 (terme adimensionnel). Cela signifie : si 1 m³ d'eau pèse 1 tonne, 1 m³ de sédiment transporté pèse 2,65 tonnes. En réalité, les valeurs de ce rapport peuvent varier de 1,25 à 4,00. En expérimentation, il est usuellement mesuré pour chaque cours d'eau. Pour les petits cours d'eau qui drainent en suspension des matériaux fins de diamètre inférieur à 60 μ , la valeur retenue peut être 1,60.
- Un débit critique de plein transport 5 fois supérieur au débit critique de début de transport.
- Une étendue granulométrique caractérisée par un rapport d₉₀/d₃₀ de l'ordre de 10 à 20 (d₉₀ et d₃₀ désignent les quantiles des classes granulométriques).

Maurice Meunier (ouvrage déjà cité, page 301) reproduit les coefficients A et B mesurés par différents auteurs :

Auteur	Date	A	B
Mizuyama	1981	5,5	2,0
Smart et Jaeggi	1983	2,5	1,6
Meunier	1989	6,3	2,0
Rickenmann	1990	6,4	2,1

Tableau 1 – Coefficients des formules simplifiées du transport solide

« Tout naturellement, les valeurs de A et B varient selon les auteurs en fonction de leurs expérimentations et de leurs interprétations, mais restent très proches et traduisent d'une certaine manière la variabilité du transport solide. » Meunier, 1999, déjà cité.

Nous observons qu'une régression puissance peut être ajustée dès lors que suffisamment de versants sont mesurés. Une évaluation des 22 sous-bassins du pourtour de la baie du Robert pourrait être confrontée à cette approche simplifiée du transport solide et ses conditions de validité contrôlées. Dans cette situation, un modèle de transport solide pourrait être validé pour l'ensemble du pourtour de la baie.

Charriage

Maurice Meunier note encore (ouvrage déjà cité, page 302) qu'il ne faut appliquer la lourde formule de Meyer-Peter d'évaluation du **charriage**, la plus connue en hydraulique fluviale, au domaine torrentiel qu'avec précaution. Cette formule suppose la mesure expérimentale des paramètres hydrauliques qu'elle intègre.

Mesure expérimentale des débits liquide et solide

Pour la mesure des flux de sédiments fins au cours d'épisodes de crue, on détermine à chaque pas de temps, la concentration de l'écoulement en MES, soit à l'aide d'un échantillonnage manuel, soit à l'aide des données enregistrées en continu par un turbidimètre.

Plusieurs techniques sont traditionnellement utilisées pour calculer les flux annuels transportés dans les cours d'eau (Dickinson, 1981 ; Balland, 1983 ; Meybeck et al., 1996 a,b). Elles sont toutes basées sur des séries de mesures à la fois du débit et des concentrations relatives à des cycles annuels complets et sur l'équation simple :

$$Q_s = Q_l \times C \times (1/\mu)$$

Où **Q_s** est le débit solide instantané, **Q_l** le débit liquide instantané, **C** la concentration instantanée en MES, et **μ** la masse volumique du matériau en suspension. En l'absence de mesure, les auteurs retiennent généralement des valeurs comprises entre 1600 et 2650 g/l.

Pour être précis ce calcul nécessite sur la période de temps considérée de disposer du plus grand nombre possible de couples d'observations simultanées (Débit liquide, Concentration en MES), et d'avoir mesuré expérimentalement les régimes critiques du transport solide.

Relation concentration / débit à l'échelle de l'évènement de crue

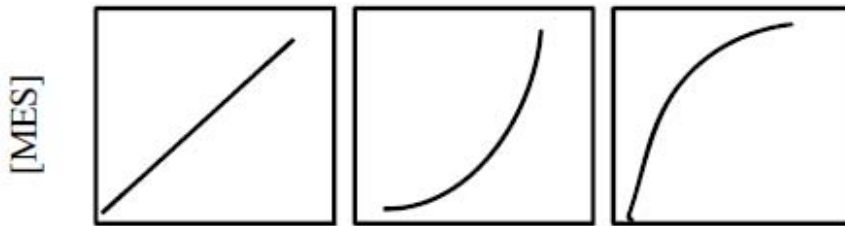
Deux types de représentations sont usuelles : D'une part les courbes concentration/débit et d'autre part la chronique reconstituée des concentrations instantanées appelée « sédimentogramme ».

Si on ne peut observer de relation univoque entre la concentration en MES et le débit, une forme d'hystérésis est le plus généralement constatée (Borges, 1993 ; Mathys et al., 1989, William, 1989).

Ainsi, Williams, en 1989, propose une typologie des crues selon l'allure de la courbe traduisant les variations des concentrations en fonction des débits pendant la crue. On a souvent cherché à utiliser le sens de ces courbes pour expliquer les conditions de fonctionnement du transport solide dans le bassin versant.

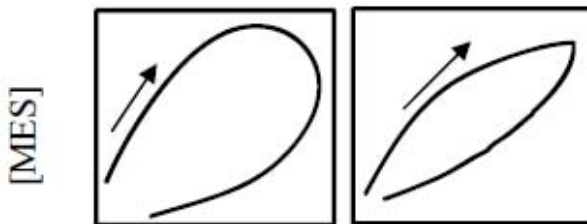
On distingue principalement :

- Les crues univoques



- Les crues à hystérésis horaire

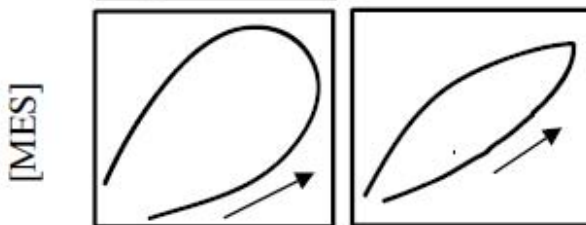
Dans ce cas, les concentrations sont plus élevées à la montée de crue



Ces courbes sont associées à des mobilisations rapides de matériaux disponibles au déclenchement de la crue

- Les crues à hystérésis antihoraire

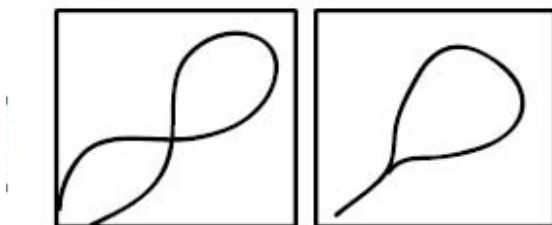
Dans ce cas, les concentrations augmentent en décrue



Ces courbes sont attribuées à des ruptures de versants, complétées par des processus actifs divers et répartis sur le bassin à des distances variables.

- Les crues complexes

On peut également observer des courbes en 8, ou des courbes en boucle.



Ces courbes sont en général expliquées par la reprise de matériaux en abondance dans les lits et déposés par les crues précédentes. S'il n'y a pas de limitation de l'alimentation du cours d'eau en MES, on observe une relation quasi constante entre concentration et débit.

Les courbes concentration/débit en crue ont deux principales applications :

- 1- Elles peuvent servir à interpoler la valeur de la concentration en chaque point de l'hydrogramme pour obtenir le sédimentogramme (méthode par rating curve - Mathys, 2006).
- 2- Elles offrent une première représentation des phases de la crue. Selon les cas, l'hydrogramme pourra être découpé en 1, 2 ou 4 phases, correspondant à autant d'ajustements.

Une régression linéaire des concentrations entre deux mesures connues reste assez conseillée pour les concentrations en MES lorsque la méthode par « rating curve » n'est pas applicable (Tonderski et al., 1995, Meybeck et al., 1996).

Relation concentration/débit à l'échelle d'une chronique annuelle

Jean-Paul Bravard et François Petit (« *Les cours d'eau, dynamique du système fluvial* », Armand Colin éditions, 1997, page 68) notent que les relations liant la concentration de la charge en suspension au débit se présentent généralement sous la forme suivante :

$C = b Q^a$	ou C est la concentration en MES, et Q le débit
-------------	---

Nous retiendrons cette hypothèse, bien que nos échelles d'observation ne soient pas exactement celles auxquelles les auteurs font référence.

Production de matériau mobilisable

La production des matériaux déplacés est principalement due aux processus mécaniques. Le mode d'altération prépondérant et les quantités produites sont très dépendants du substrat concerné. Pour nos sols argileux, le processus mécanique dominant est l'hydroclastie. Ce dernier correspond aux effets de gonflements et rétractations lors des alternances humectation dessiccation. Des estimations des énergies potentielles mises en jeu par ces processus montrent que l'énergie développée par la rétractation des argiles est supérieure de deux ordres de grandeur à l'énergie cinétique des précipitations.

Ruissellement

Le transport des sédiments est dans la plupart des cas contrôlé par la formation du ruissellement à l'échelle du versant.

Puigdefabregas et al. (1998) identifient deux modes de formation du ruissellement :

- 1- Un ruissellement par **dépassement de la capacité d'infiltration** peut apparaître après une saturation de la couche superficielle (5 cm).
- 2- Sous conditions de précipitations plus longues et plus abondantes, on peut observer une **saturation de la couche de sub-surface** (15 cm) qui conduira à un ruissellement plus durable et plus étendu.

Dans un premier temps, l'eau va s'écouler en nappe et entraîne les particules fines détachées des agrégats par effet splash alors que les particules grossières restent sur place : il s'agit d'une érosion diffuse qui passe souvent inaperçue (Robert, 1996). C'est progressivement que de simples griffures, puis des rigoles décimétriques pouvant évoluer en ravines métriques apparaissent (Duchaufour, 2001).

Des études ont montré une augmentation du ruissellement avec la rugosité du micro-relief : les espaces entre les bosses agissent comme des micro-chenaux qui véhiculent rapidement le ruissellement. Dans le même temps, l'érosion va densifier le chevelu hydrographique et par cette voie améliorer l'efficacité des écoulements : l'érosion peut donc être vue comme la réponse adaptative du versant à la nécessité d'évacuer l'eau qu'il reçoit. Cependant, selon Mathys, le transport est davantage conditionné par la disponibilité des matériaux que par la capacité de transport.

Processus érosifs

A l'échelle du versant, les processus d'arrachement par l'écoulement sont les processus dominants, ils recouvrent l'action du ruissellement en nappe et l'action du ruissellement concentré (Borgès, 1993 pp 9-10). En fait, le ruissellement en nappe proprement dit s'observe peu, et pour peu que l'échelle d'observation soit assez fine, on assiste plutôt à une érosion par les filets d'eau influencés par le microrelief (Sole-Benet et al., 1997). Sur les fortes pentes rigoles et ravines sont les formes les plus fréquentes résultant du ruissellement concentré.

Mobilisation de matériaux

La saison de l'altération maximale (le carême) et la saison de l'érosion maximale (hivernage) alternent leurs effets. Les précipitations éparses et modérées du carême suivies d'un fort et long ensoleillement favorisent l'altération des argiles, tandis que les pluies fréquentes et intenses de l'hivernage entraînent plus facilement les argiles rendues disponibles. Ainsi, les échelles de temps retenues pour l'observation influencent la perception des processus de transport solide.

Dépôt-reprise, origine des MES

Les matériaux altérés puis arrachés seront transportés par bonds en suivant le rythme des événements pluvieux et plus rarement l'action du vent. Ainsi, au moment où une crue est observée, le transport solide ne reflète qu'en partie l'érosion du versant et des berges. La désynchronisation des deux phénomènes est relative à l'échelle de temps retenue pour l'observation : si le transport solide en crue n'est pas synchrone avec l'érosion, les chroniques annuelles des deux phénomènes offrent un ajustement satisfaisant. La discrimination souvent recherchée des origines du transport solide ajoute à la difficulté. Les analyses granulométriques sont en général utilisées pour distinguer les différentes origines : versants, berges, lit. La mesure de la susceptibilité magnétique des roches, ou des traceurs ont parfois été utilisés, mais l'efficacité de ces techniques peut être contingentée par les propriétés du milieu naturel.

Les principales notions utilisées en transport solide ont ainsi été présentées.

2 CONTEXTE ET MODES OPERATOIRES

21 Présentation générale de la baie du Robert, territoire à enjeux

La présentation de la baie est développée dans l'« étude des transferts de pesticides » pages 9 à 15, le lecteur pourra s'y reporter.

22 Présentation des stations de mesure

Les stations de mesure sont décrites en 5 paragraphes dans l'« étude des transferts de pesticides » pages 19 à 28 : (231) géo-références, (232) choix des sites en fonction des objectifs de l'étude, (233) géographie physique des trois bassins versants étudiés, (234) occupation du sol dans l'environnement des stations de mesure, et (235) les équipements station par station. **Le lecteur se reportera utilement au texte complet, notamment pour le calcul des pentes et l'occupation du sol que nous résumons :**

Surfaces en ha	Voltaire	Mansarde amont	Mansarde aval	Gashette
Canne à sucre	0,00	0,00	0,00	29,82
Banane	0,50	0,00	2,45	0,00
Habitat diffus	19,12	0,42	0,42	11,50
Bois	46,88	0,83	0,83	26,20
Totaux :	66,50	1,25	3,70	67,52

Tableau 1 – Occupation du sol sur les surfaces intégrées par les points de mesure

A partir de ce tableau, nous pouvons déjà apercevoir les facteurs qui pourront être étudiés : facteur occupation du sol, et facteur d'échelle.

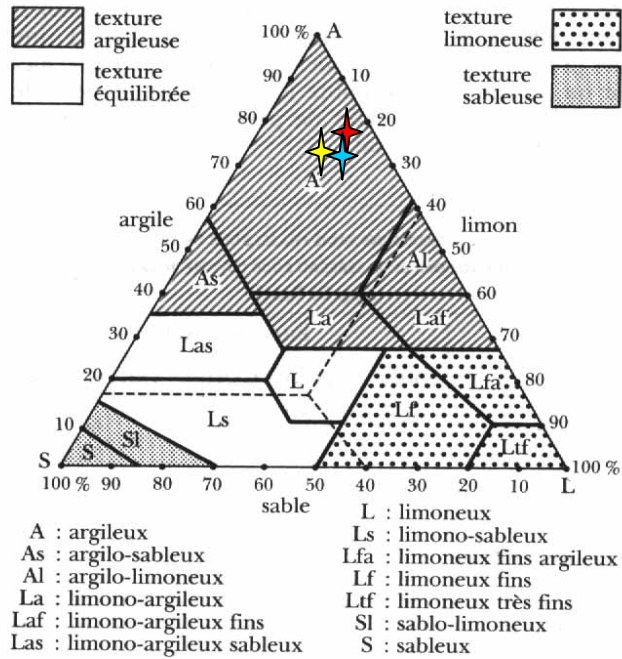
Les sols

(Cette présentation des sols de Petite Mansarde est empruntée à Nicolas ROCLE, 2009)

Les sols, de type brun rouge à montmorillonite, constituent la principale source du transport solide : Ils sont argileux, riches en matière organique et en général homogènes sur l'horizon de labour. Les cartes pédologiques de la Martinique au 1/20 000ème (Colmet-Daage, 1969 réactualisée) indiquent que le sous-bassin de Mansarde est situé sur une zone de sols bruns ou rouges à montmorillonite de type Id. Ces sols dérivent de tufs volcaniques déposés en mer. Ils sont susceptibles de présenter de minces strates d'argiles fossiles lentement réhydratables. Ces sols renferment une importante quantité de montmorillonite, souvent instable, dont la proportion décroît plus ou moins fortement de la profondeur vers la surface du profil.

La teneur en éléments grossiers est l'élément qui varie le plus : on observe beaucoup plus de pierres (andésite) en surface sur la partie amont que sur la partie aval. Un « horizon de cailloux » est également présent à environ 70cm de profondeur sur une partie des bananeraies. Il est difficile de déterminer l'origine de cet horizon (on est en droit de se demander s'il est exogène : en effet, un chemin de fer passait à ce niveau il y a quelques décennies).

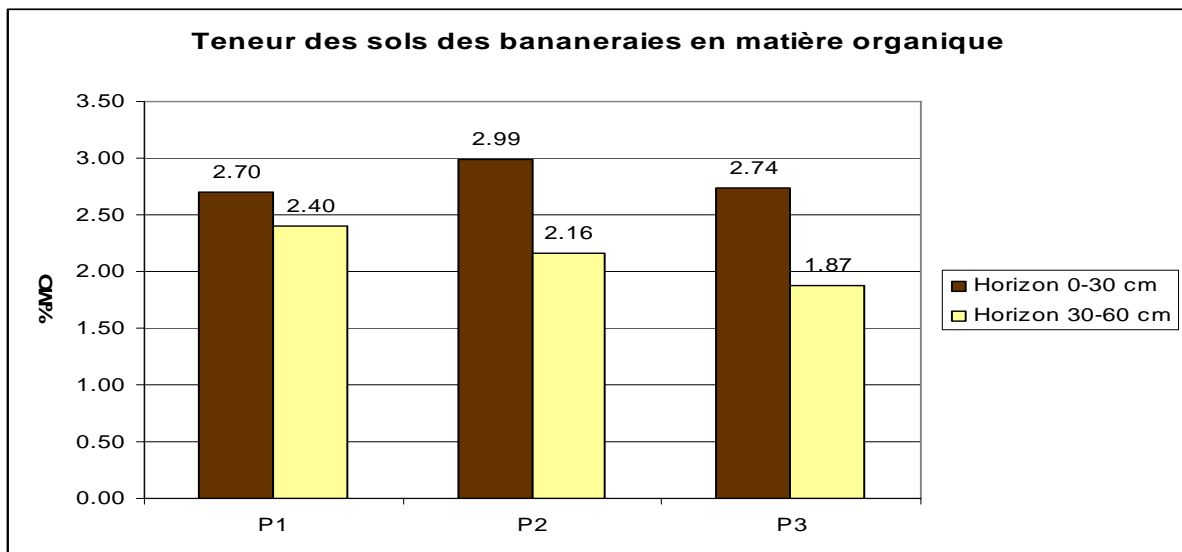
D'après les analyses granulométriques menées au laboratoire d'analyses pédologiques du PRAM sur des échantillons composites des horizons superficiels (0-30 cm) des sols des 3 bananeraies, les sols de Mansarde sont très riches en éléments fins (argiles, taille <2µm). D'après la classification proposée par l'US Department of Agriculture, les sols des bananeraies sont argileux. Les trois parcelles sont représentées ci-dessous par des étoiles :



TRIANGLE DES TEXTURES
(d'après U.S. département of agriculture)

	P1 (jaune)	P2 (rouge)	P3 (bleu)
Argile %	71	75	71
Limon %	16	17	19
Sable %	13	8	11

**Figure 3 : Positionnement des sols
des trois parcelles de Mansarde
sur le triangle des textures USDA**



**Figure 4 : Teneurs des sols en matière organique. Cemagref-PRAM. Mansarde
aval, juillet 2008**

23 Recueil des données de terrain

Le recueil des **données hydrologiques** est spécifiquement détaillé dans l'« étude des transferts de pesticides » pages 29 à 35.

Le recueil des données du transport solide est présenté ci après. Paragraphes 231 : utilisation des turbidimètres, 232 : Prélèvements ponctuels des matières en suspension et 233 : pièges à sédiments.

231 Utilisation des Turbidimètres, suivi en continu

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

La concentration en MES est donc mesurée par l'intermédiaire de la turbidité au pas de temps de la minute en synchronisation avec le débit et la température du cours d'eau. Pour convertir les impulsions électriques renvoyées par l'appareil en concentrations, la relation fonctionnelle entre la turbidité et la concentration en MES est établie en laboratoire et contrôlée par des prélèvements ponctuels en cours d'eau. L'incertitude de la mesure est alors calculée. Les mesures directes des concentrations par prélèvement et pesée doivent être réalisées régulièrement. (Bertrand-Krajewski, 2004; Bertrand-Krajewski *et al.*, 2007).

Les mesures du turbidimètre sont optiques et fondées sur l'analyse d'un faisceau lumineux traversant le milieu à analyser. Les particules peuvent être détectées par la mesure de l'absorption d'un faisceau incident (mes-mètre) ou par diffusion de la lumière (turbidimètre à mesure néphélométrique). La valeur du paramètre optique analysé va dépendre des caractéristiques de la suspension analysée.

Voltaire	Mansarde aval	Gaschette
1 MES-mètre acheté en 2006 et jamais installé	1 MES-mètre acheté en 2006 et jamais installé	1 turbidimètre installé par la DIREN en décembre 2006

Tableau 2 : inventaire des capteurs à notre disposition
avant le 04/05/2009



Le turbidimètre (Gashette) est un Turbimax W CUS 31, dont les domaines d'application sont principalement les phases de traitement de l'eau potable et la surveillance en sortie des stations d'épuration. Il convient pour des eaux très peu chargées en particules. Sa gamme de mesure est de 0 g/l à 3 g/l

Turbimix W CUS 31

Principe de la mesure néphélométrique : la mesure de la turbidité s'appuie sur le principe de la diffusion de la lumière à 90°, avec une longueur d'onde proche de l'infrarouge (880 nm). Le rayonnement d'excitation d'un transmetteur infrarouge (4) vient heurter le produit avec un angle défini. Les différentes réfractions de la lumière entre la fenêtre d'émission et le milieu mesuré sont prises en compte. Les particules présentes dans le milieu (5) diffusent sous un angle défini une certaine quantité de lumière reçue par deux photodiodes (2 ; 3). La mesure dans le milieu est en permanence comparée avec les valeurs d'un récepteur de référence (1).

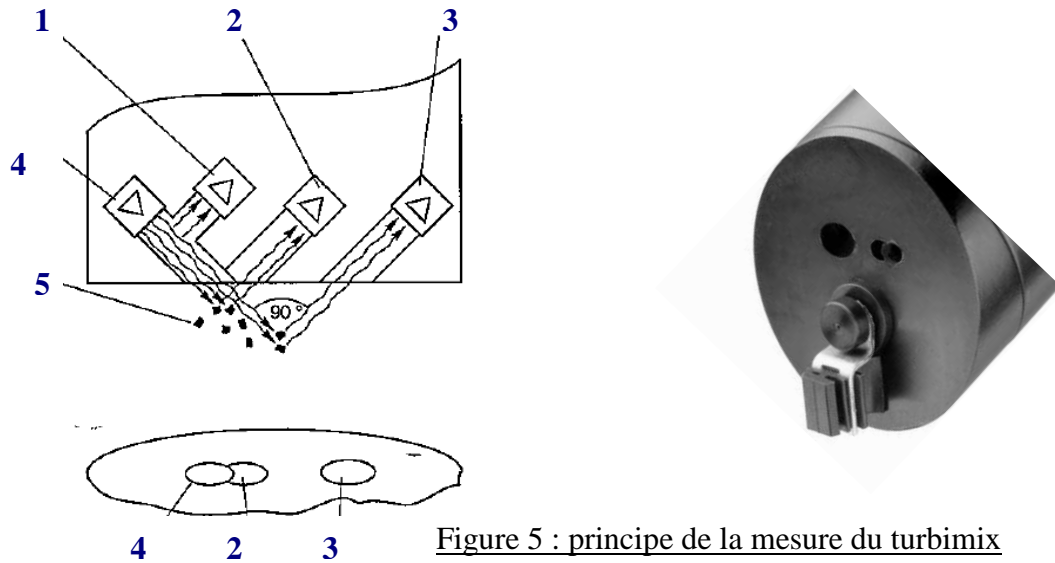


Figure 5 : principe de la mesure du turbimix

MES-mètre de marque Poncel, le « Poncir » (Voltaire et Mansarde)

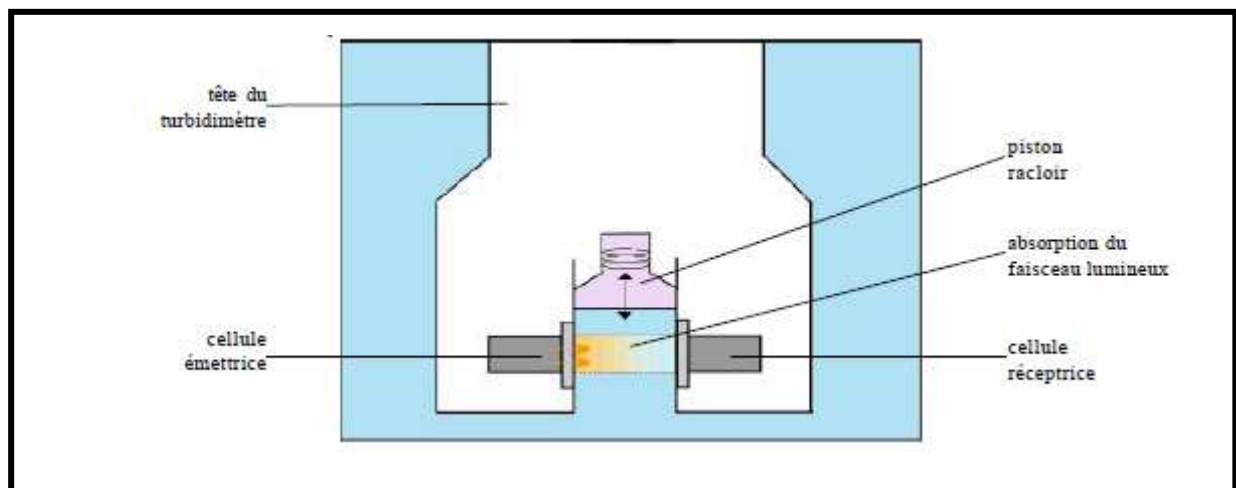


Figure 6 : principe de la mesure du Poncir

Le MES-mètre est du type PONCIR-MES10-NA-S10 de Ponsel®. Il est muni d'un capteur optique Infrarouge pour la mesure de MES dans la gamme de mesure : 0 -10 g/l.

La mesure est obtenue par transmission et atténuation dans l'eau d'un signal lumineux à un système optique placé derrière un verre régulièrement nettoyé par un racloir automatique. Ce piston racleur permet de limiter son encrassement par adsorption de particules fines ou développement de microalgues. La fréquence de nettoyage du racleur est de 15 minutes. Les mesures s'effectuent toutes les minutes.

De telles présentations trouveraient davantage leur place en annexe, mais nous les avons introduites ici pour mettre en avant la fragilité de ces équipements de mesure en relation avec les difficultés que nous avons rencontrées.

Trois difficultés ont été rencontrées avec le Turbimix à la station Gashette :

1- Sous dimensionnement de l'appareil : le Turbimix est un turbidimètre dont la gamme de mesure est de 0 g/l à 3 g/l, destiné aux stations d'épuration dont les eaux sont faiblement chargées en MES. Or les concentrations supérieures à 10 g/l en crue ne correspondent pas aux possibilités de l'appareil.

2- Non discrimination de l'origine des flux



GASHETTE

Les rejets de la route, canalisés par une rigole, se déversent en amont des capteurs, produisant alors une traînée opaque passant sur l'ensemble des capteurs.

La mesure de l'opacité au moyen du turbidimètre ne rend pas compte de la turbidité provenant du bassin versant.

Photo 1 Station Gashette : Les rejets de la route viennent perturber les mesures de turbidité.

3- Arrachage de l'appareil par une forte crue. A cette occasion, le turbidimètre et la sonde de pression, probablement arrachés par un branchage, ont été perdus. Au vu des analyses ponctuelles, la gamme de mesure de l'appareil de remplacement devrait être **0 à 50 g/l**.

Difficultés rencontrées avec les MES-mètres Poncel aux stations Mansarde et Voltaire

1- Sur Mansarde, le temps passé hors de l'eau dans la ravine à écoulement intermittent a détérioré les mécanismes de l'appareil : les joints fissurés ont entraîné la pénétration de l'eau dans l'appareil et le grippage des racleurs. Par surcroît, les racleurs s'effritent du fait de la chaleur. Effectivement, les MES-mètres ne doivent pas rester hors de l'eau.

2- Une semaine après le premier étalonnage des MES-mètres, les écrans ne s'allumaient plus. Effectivement, l'appareil demande une puissance électrique supérieure à celle prévue par les batteries des stations d'acquisition : Le branchement d'une batterie de 12 volts au système d'acquisition (SNA) en appoint des batteries d'origine et des panneaux solaires a suffi à solutionner cette petite difficulté. Le système de nettoyage consomme l'énergie électrique qui faisait défaut.

3- Les appareils ont été arrachés et ont disparu dans l'évènement du 04/05/2009.



VOLTAIRE

Le capteur est placé le long du U en béton, directement dans le lit de la rivière.

Il est protégé par un « jambonneau » en plastique fixé sur le U, tandis que le capteur est juste emboîté dans le jambonneau afin de pouvoir le manipuler facilement, notamment lors du nettoyage des optiques ou lors de l'étalonnage différé.

Photo 2 : Station Voltaire, la station et les sondes



MANSARDE AVAL

Il aurait fallu un débit important pour obtenir l'immersion permanente du capteur ; si bien que le capteur est placé à l'aval sous la chute du seuil, de telle sorte que sa tête soit immergée en permanence. Mais il convient de s'assurer que les concentrations mesurées sont représentatives de la masse d'eau.

Photo 3 : Mansarde aval, le flux d'eau intermittent met en danger l'appareil qui doit rester immergé.

Devant ces difficultés récurrentes, les mesures ponctuelles par prélèvement ont été accentuées en continu et en crue.

Les opérations d'étalonnage des appareils sont décrites à l'annexe 1.

232 Prélèvements ponctuels des matières en suspension (MES)

Les crues étant imprévisibles, tous le matériel terrain doit être préparé à l'avance pour être opérationnel dès qu'une pluie qui pourrait déclencher une crue devient probable.

Le matériel comprend :

- les bouteilles en plastique
- Une montre pour relever l'heure exacte des prélèvements
- Un cahier terrain et les fiches normalisées de relevé
- Des gants

Vérification de la météo

Pour anticiper un événement pluvieux et être sur le terrain pour suivre la crue autant que possible dans sa totalité, la météo est suivie chaque matin. Plusieurs sites sont consultés :

- **Météo France (www.meteo.fr)**

Pour s'informer sur les masses nuageuses et sur l'humidité de l'air :

- **National hurricane Center (www.nhc.noaa.gov)**

Pour s'informer sur les phénomènes cycloniques dans les Antilles :

- **Windguru (www.windguru.com)**

Pour s'informer sur la direction du vent, les prévisions de pluie, les couvertures nuageuses :

- **Météo Tropicale (www.meteotropicale.com)**

Réalisation des prélèvements ponctuels

Un bocal au goulot large (bocal couramment utilisé pour les compotes) est utilisé pour réaliser le prélèvement en rivière. Grâce à cet orifice large, le prélèvement est effectué en un seul passage dans l'eau. Cela permet de ne pas concentrer les particules et de ne pas fausser la mesure de la concentration en MES en l'augmentant (communication personnelle Nicole Mathys). Un entonnoir permettra de transvaser le prélèvement sans difficulté et sans engendrer de perte d'eau.

Le prélèvement s'effectue le plus au centre de la rivière, en faisant toutefois attention de ne pas trop s'en approcher pour éviter d'être emporté par le courant. Il devra être réalisé en amont de l'agent afin de limiter les perturbations occasionnées par ce dernier notamment par la remise en suspension de la matière.

Au moment du prélèvement, le bocal est plongé d'un trait dans la rivière avec le goulot face au courant. L'ensemble est transvasé directement dans la bouteille en plastique à l'aide d'un entonnoir. Il faut pour cela vider le bocal au 3/4 dans la bouteille et remettre en suspension les particules qui auraient pu commencer à sédimenter au fond du bocal. Une fois ce mélange agité, transvaser ce qui reste dans la bouteille. Une fois la bouteille fermée, le numéro du prélèvement est noté sur le bouchon en plastique avec un marqueur indélébile.



Photo 4 : Mansarde aval, prélèvement
d'échantillons d'une eau chargée

Tous les échantillons collectés sont entreposés dans une salle à l'abri de la chaleur et du soleil jusqu'à filtration. Ils sont numérotés de la façon suivante

$$C_x G_y$$

C : diminutif de « Crue »

X : Numéro de la crue suivie

G : Fait référence à la station où a été fait le prélèvement

G : Gaschette

V : Voltaire

Mv : Mansarde aval

Mt : Mansarde amont

Y : numéro de l'échantillon

Se pose la question de la **représentation de la section mouillée** (verticale et horizontale) par les prélèvements opérés. On admet, trop fréquemment que la concentration est uniforme au sein d'une section d'écoulement à un instant donné (Hubert, 1988). De nombreuses études, dont celles réalisées par l'Orstom en Afrique, ont en effet montré que les concentrations en matières en suspension se distribuent dans la section de jaugeage de façon non uniforme et avaient tendance à augmenter avec la profondeur (Colombani, 1967 ; Moukolo et al., 1990).

Toutefois, les mesures sont généralement simplifiées et l'on a réduit dans cette étude le nombre de points à 1 échantillon de surface.

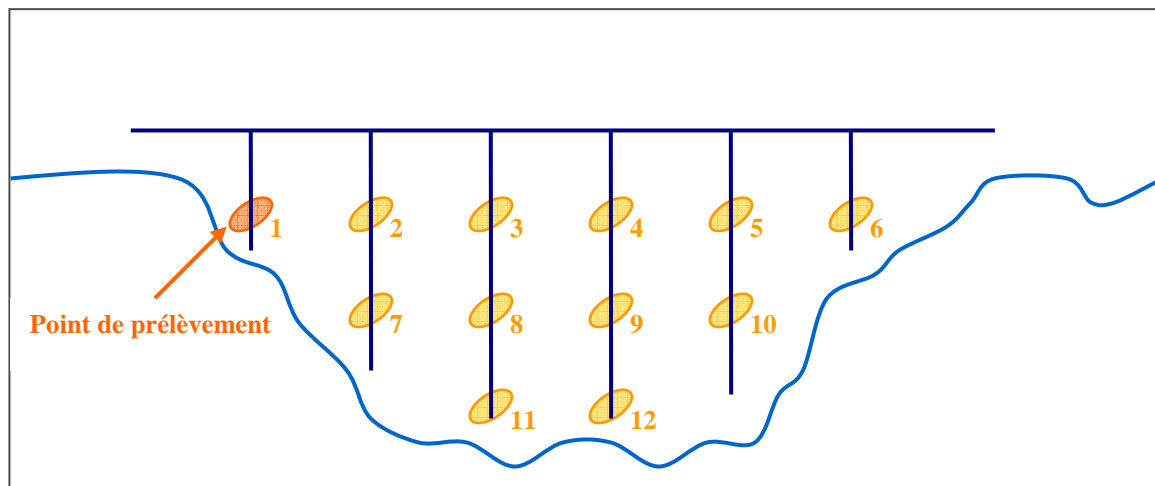


Figure 7 : La section mouillée et son point de prélèvement

L'étude des jaugeages réalisés de 1990 à 1996 (233 jaugeages) sur les différentes stations du réseau de Banankoro à Diré a permis d'évaluer l'erreur commise en simplifiant les mesures et d'appréhender la variabilité verticale et horizontale de la section de mesure. Sur l'ensemble des jaugeages et pour toutes les stations, la variabilité d'un point à un autre peut être très grande : les coefficients de variations (rapport entre écart type et moyenne sur les différents prélèvements du jaugeage, exprimé en %) **varient de 5 % à plus de 170 %.**

La tendance générale observée montre une amélioration de la mesure avec l'augmentation de la concentration moyenne en MES dans la section, en partie due à un meilleur mélange des eaux lors de la crue, même si pour les débits élevés, les coefficients de variation demeurent proches de 20 à 30 %.

Toutefois les éléments de la classe granulométrique des argiles présentes dans nos sols de Martinique sont moins sujets à ces variations. Plus généralement, la répartition des particules dont le diamètre est inférieur à 60 microns est supposée homogène dans la masse d'eau (Jean-Paul Bravard et François Petit, 1997).

233 Pièges à sédiment

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



Fosse naturelle avant installation des pièges à sédiment

Photo 5 : Mansarde aval, localisation du piège à sédiment

Initialement, il avait été envisagé de mettre à profit une sorte de fosse naturelle située en amont de la section de mesure. Le risque d'une fosse de ce type est de provoquer un ralentissement trop fort de l'écoulement et de piéger trop de suspension car elle introduit un élargissement important du profil en travers. Dans le cadre de sa thèse, Freddy Rey a installé, un grand nombre de pièges sur des ravines partiellement végétalisées sous forme de simple caisses en plastique qui étaient vidées après chaque crue.

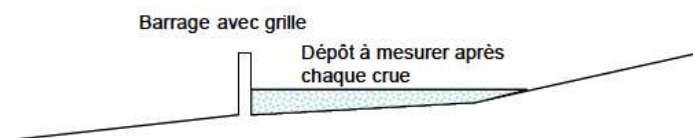
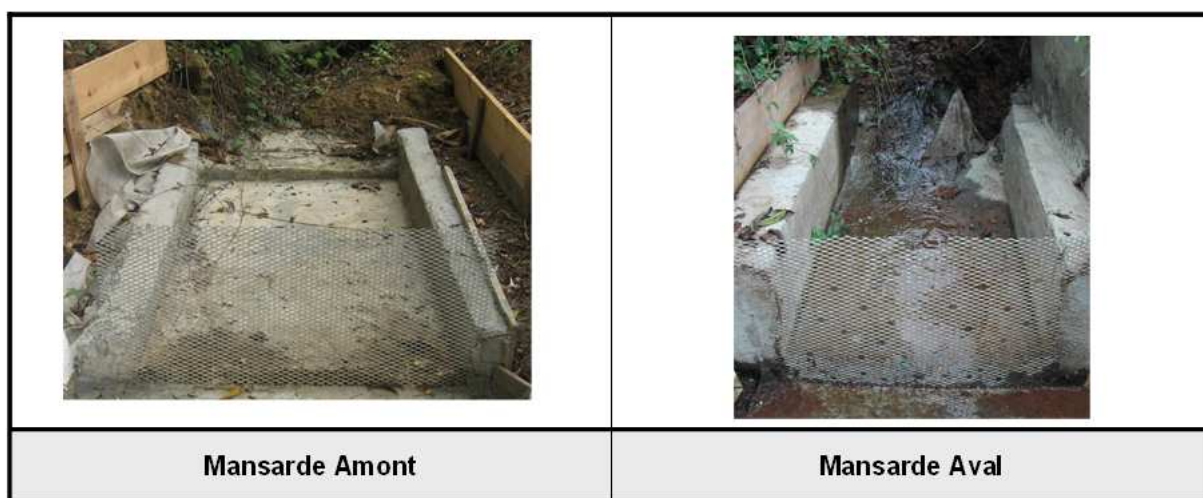


Figure 8 : mécanisme de la plage à sédiment

Les pièges à sédiment sont installés aux deux points de mesure de Mansarde.



Photos 6 et 7 : Réalisation des pièges à sédiment aux deux points de mesure

Dans la situation initiale, les entonnements des canaux Venturi ne semblent pas satisfaisants. En effet, les bâches installées sont froissées et offrent une surface irrégulière à l'écoulement, perturbant très probablement la ligne d'eau à l'entrée dans le canal. Les canaux en inox comportent eux-mêmes un entonnement métallique qui en principe est inclus dans la normalisation de la forme qui autorise à utiliser la relation hauteur-débit du constructeur. Les entonnements à réaliser devaient donc impérativement s'appuyer sur ces formes du canal préfabriqué.



Photos 8 à 11 : Canalisation en amont des canaux Venturi

La capacité totale d'un piège est $0,3528 \text{ m}^3$ environ ; Les pièges sont prélevés aussi souvent que possible. Les dépôts sont retirés au moyen d'un seau calibré (10 litres).

La difficulté principale tient à la réalisation d'un relevé pour chaque crue. En effet, il n'est pas toujours possible de vider le piège après chaque événement. Dans ce cas, le volume mesuré ne peut pas être précisément attribué à un seul épisode.

234 Approche géomorphologique

La ravine Mansarde est petite, son lit est étroit et encaissé. Il est probable que son profil se modifie au fil du temps, suffisamment pour être mesurable d'une année sur l'autre.

La réponse morphologique du lit ne peut être étudiée que sur une période suffisamment longue, c'est pourquoi nous signalons les mesures effectuées, mais nous ne pourrions pas fournir de conclusion immédiate.

Un suivi topographique de surface est donc engagé. Un profil en long a été réalisé durant la période de carême 2008, lorsque la ravine était à sec. Le profil a été réalisé au niveau du « lit actif » de la ravine qui correspond à la zone à l'intérieur de laquelle le lit, nu ou dénudé annuellement, peut être remanié par érosion ou dépôt. La végétation ne peut s'y développer de manière pérenne et les dépôts des matériaux de lessivage y sont négligeables.

Le premier examen met en évidence des zones de stockage préférentielles des matériaux au sein du lit. Puis, au rythme des années et de manière discontinue en fonction des précipitations, ils atteignent des zones de stockage temporaire du lit. Ces zones peuvent être mises en évidence avec un indice géomorphologique principal : la rupture de pente.

Le profil a été réalisé à l'aide d'un niveau optique qui a été mis à notre disposition par le conseil général. C'est un instrument de mesure permettant de calculer, par différence de hauteurs relatives, la dénivelée entre deux points. Il s'appuie sur la méthode du nivellement.

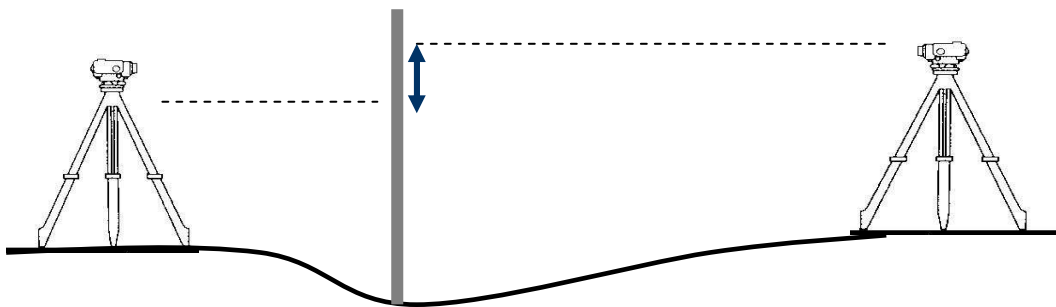


Figure 9 : principe de la méthode par nivellement

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

Les distances entre la mire et le niveau ainsi que les hauteurs successives sont connues grâce à la lecture des valeurs lues au niveau de la mire. Cependant, en procédant par cheminement, des angles entre les points devront être connus afin de recalculer les points entre eux après déplacement du niveau.

Deux méthodes sont possibles afin de calculer ces angles, Celle adoptée est la méthode qui consiste à définir les points en fonction :

- de leur **orientation** par rapport au Nord et
- de leur **distance** par rapport au niveau.

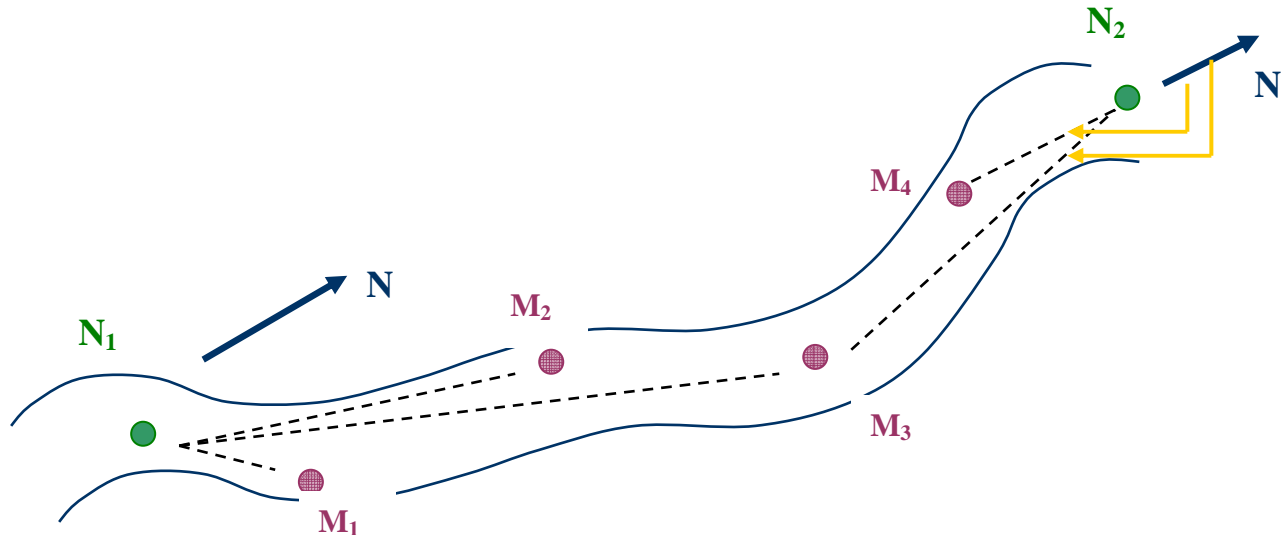


Figure 10 : principe de la méthode par cheminement

On vise le premier point : 0° de l'appareil, puis on note son positionnement par rapport au nord. Les autres mesures des angles se feront en relevant systématiquement les valeurs lues sur l'appareil ; ainsi les mesures seront plus fiables que les relevés de la boussole. Cependant, pour avoir des valeurs de références, les azimuts seront relevés à intervalle régulier (premier point, dernier point, et tous les 5 points). Lorsque l'on procède par cheminement, il faut limiter au maximum les déplacements trop fréquents du niveau, car cela amplifie les erreurs de mesures au fil des lectures.



Photo 12 : visée à la mire dans la ravine Mansarde

Ainsi, la meilleure méthode consisterait à placer le niveau à l'extérieur de la ravine et à balayer un plus grand nombre de points afin de limiter le déplacement du niveau. Cependant, cette méthode ne peut pas être appliquée à tous les tronçons de la ravine. De plus, la pente est assez marquée (13%) et la profondeur de la ravine assez importante par endroit. La mire, qui ne mesure que 2 m 40 cm, ne dépasse que très peu et n'est plus visible de l'extérieur de la ravine. Le niveau sera donc placé à l'intérieur de la ravine ce qui impliquera un déplacement fréquent du niveau sur l'ensemble de la distance de mesure.

24 Travaux en laboratoire : dosage des MES

La nécessité d'accroître les prélèvements d'eau pour mesurer les concentrations en MES donne aux filtrations une importance accrue. Les échantillons sont apportés au laboratoire au retour des sorties terrain. Ils sont conservés dans un endroit sec et à l'abri de la lumière.

Définition des MES : De manière arbitraire, la norme AFNOR NF T 90-105 (1996) définit les matières en suspension par des critères opérationnels. Elles sont obtenues soit par filtration sur une membrane poreuse de 0,45 µm, soit par centrifugation pendant un temps minimum 15 min avec une accélération moyenne de 2800 à 3200 fois l'accélération de la pesanteur (g).

Nous décrivons le protocole normalisé :

La méthode de dosage des matières en suspension par filtration est décrite dans la norme Afnor NF EN 872 (T 90-105 ; Juin 2005) intitulée « **Dosage des matières en suspension : méthode par filtration sur filtre en fibres de verre** ». Il en résulte que la taille de 0,45 µm distingue la fraction solide et la fraction dissoute.

Deux types de filtres de diamètre 47 mm ont été utilisés. Les filtres en « fibre de verre sans liant » et des filtres en « nitrate de cellulose ». Il est important de spécifier le type de filtre car le résultat obtenu dépend dans une certaine mesure du type de filtre utilisé.

Fabriquant	Whatman®		
Type de membrane	Fibre de verre sans liant		Membrane nitrate de cellulose
Seuil du filtre	2.7 µm (GF/D)	1 µm (GF/B)	0.45 µm

Tableau 3 : description des différents filtres utilisés

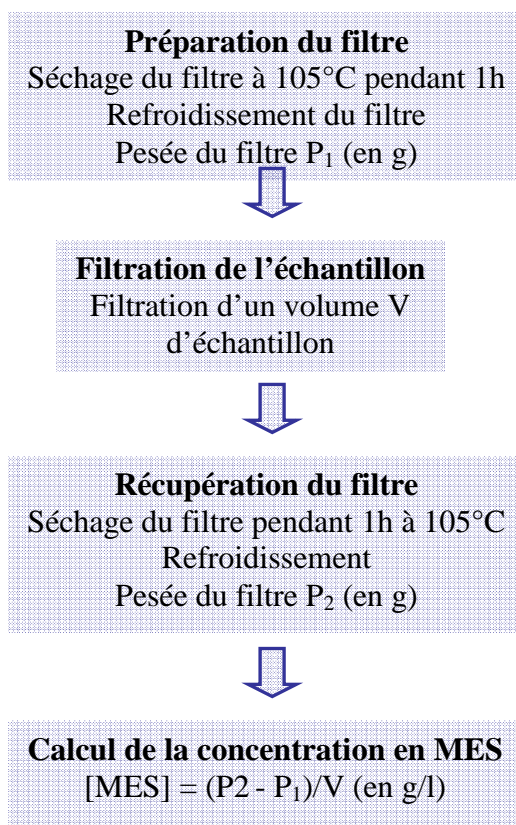






Figure 11 - Protocole Afnor NF EN 872 (T 90-105 ; Juin 2005)

Quelques photographies et commentaires complètent la présentation du protocole :

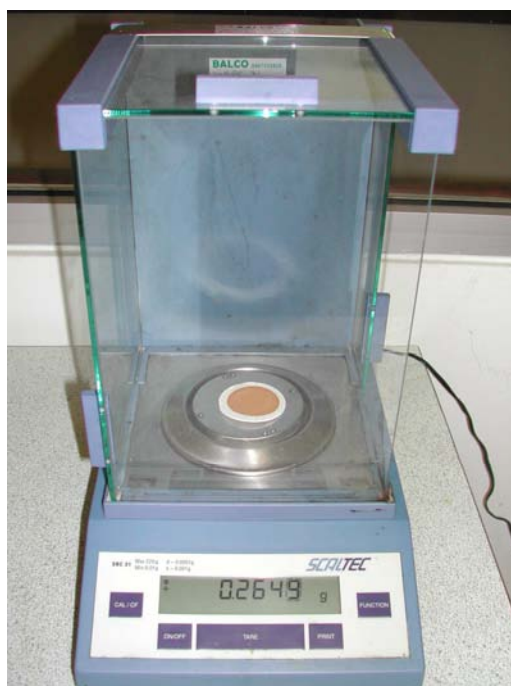
Un prélavage des filtres est recommandé afin d'éliminer les constituants solubles dans l'eau. Les filtres sont lavés individuellement ou en petits nombres (moins de 10).

	
<p>Immersion des filtres dans de l'eau distillée pendant plusieurs heures</p>	<p>Séchage à l'étuve $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ pendant au moins 1 h</p>

Photos 13 et 14 – Lavage et séchage des filtres

	
<p>Le filtre est pesé sur une balance analytique dont la précision est au moins 0,1 mg (pesée « P1 »)</p>	<p>Après une agitation vigoureuse, un volume convenable (0,5 litre) d'échantillon est transféré d'un seul trait dans une éprouvette graduée</p>
	
<p>l'échantillon est filtré</p>	<p>puis le filtre est mis à l'étuve : $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}$ pendant au moins 1 h</p>

Photos 15 à 18 – Préparation de l'échantillon



La deuxième pesée « P2 » est réalisée à l'aide d'une balance dont la précision est au moins 0,1 mg

Photo 19 – Deuxième pesée de l'échantillon

Perte de masse du filtre : Au préalable, un premier essai « à blanc » va permettre de vérifier la perte de masse du filtre au cours de l'opération. Il est réalisé pour chaque boîte de filtres. Pour cela, le mode opératoire appliqué est le même que celui utilisé pour la mesure des MES. L'échantillon est seulement remplacé par de l'eau distillée. L'essai est réalisé 3 fois en utilisant 3 filtres au hasard. Pour tous les essais, la perte de masse est très inférieure à 0,3 mg.

Incertitude de mesure

Le volume d'eau échantillonné, 0,5 litres, peut paraître insuffisant, notamment en fin de décrue où les concentrations rencontrées sont en général assez faibles. Il est certain que la filtration de plusieurs litres, voire décalitres comme sur le Djoué au Congo (Laraque et al., 1994) permettrait de réduire les erreurs de manipulation au laboratoire et sur le terrain, mais cela deviendrait rapidement trop coûteux.

L'incertitude liée au dosage de l'échantillon en laboratoire est faible en comparaison de l'incertitude générée par la prise d'échantillon en cours d'eau, elle-même très difficile à déterminer (paragraphe 232). En conséquence nous retiendrons une **incertitude relative de l'ordre de 50 %** sur la mesure de la concentration en MES, de telle sorte que le transport solide estimé soit encadré en tenant compte de cette relative imprécision.

25 Données disponibles, estimation des valeurs manquantes

251 Bilan des données disponibles ou absentes

2511 Suivi de la turbidité en continu

Les données du suivi en continu de la turbidité sont soit absentes, soit inexploitable. C'est un des échecs de cette étude. Il nous faudra réfléchir aux conditions dans lesquelles de telles mesures pourront être reprises. **Le choix des sites d'observation est crucial et c'est en particulier à ce niveau que nous n'avons pas suffisamment pris la mesure de la difficulté.** En effet, les trois sites se sont révélés inadaptés : Mansarde en maintenant les sondes trop longtemps hors de l'eau les a détériorées, Gashette est le déversoir d'une route nationale qui brouille l'interprétation des mesures, et Voltaire s'est révélé exposé aux dégradations rédhibitoires par les événements orageux et par les branchages en dérive.

Seul le capteur Ponsel positionné sur la rivière Voltaire a permis l'enregistrement de quelques données de MES en continu. Les données s'étalent du 23 décembre 2008 au 4 mai 2009, incomplètes toutefois en raison des déficiences électriques déjà évoquées et difficilement interprétables faute d'un étalonnage fiable. Nous donnons quelques explications techniques : les données, codées en mA au niveau du transmetteur, sont enregistrées en mV au niveau de la centrale. Une résistance de 120 Ω a donc été installée, permettant ainsi de faire la conversion entre les deux grandeurs. Le transmetteur délivre des valeurs allant de 4 à 20 mA. Il est important avant la mise en marche de l'appareil de régler les seuils pour les sorties '4-20mA : le 4 mA a été associé à la valeur de 0,00 g/l. et le 20 mA a été associé à la valeur de 10,00 g/l. Ainsi, lors du traitement des données, les valeurs délivrées par la centrale doivent passer par une série de conversion avant d'aboutir aux données de concentration en MES.

Conversion des mV en mA :

D'après la relation : $U = R \times I$, on obtient $I \text{ (mA)} = R \text{ (mV)} / 120$

- U : tension, I : intensité, R : résistance en Ohms

Conversion des mA en concentration en MES (g/l) :

D'après les réglages des seuils pour les sorties '4-20 mA, la relation obtenue pour déterminer la concentration en MES est la suivante :

$$[\text{MES}] \text{ (g/l)} = [0.625 \times I \text{ (mA)}] - 2.5$$

Tout cela donne un aperçu de la phase de rodage que demande la mise en service de ce type d'appareils avant de produire les séries de mesures attendues.

2512 Matières en suspension en continu et en crue

Le tableau ci-dessous recense les événements observés et le nombre de prélèvements réalisés au cours de chaque évènement.

Date	Station	type	Nombre de prélèvements
3 juillet 2008	Voltaire	décru	3
	Gaschette	décru	2
16 juillet 2008	Mansarde	décru	2
31 Juillet 2008	Voltaire	Crue complète	10
	Mansarde	Décru	7
29 Août 2008	Gaschette	Décru	10
	Mansarde	Décru	5
19 Septembre 2008	Gaschette	Double crue	22
11 octobre 2008	Voltaire	Double crue	31
1 Décembre 2008	Mansarde aval	Crue complète	15

Tableau 4 : tableau récapitulatif des prélèvements et analyses ponctuels

10 évènements de crue ont ainsi été suivis pour une réalisation de 107 prélèvements manuels.

2513 Charriage

Sur la totalité de la période traitée, nous disposons de 11 mesures de relevés de pièges

date	Type d'intervention	Volume de sédiments prélevés m ³	nombre de cailloux prélevés cm ³				
			0-10	10-100	100-500	500-2000	>2000
01/08/2008	curage	0.397	18	11	4		
03/09/2008	curage	0.3528	14	6	9		
23/09/2008	curage	0.406		7	29	9	
13/10/2008	curage	0.432			84	8	13
23/10/2008	curage	0.06607	5	12	4		
28/10/2008	relevé	0.0006					
29/10/2008	curage	0					
12/11/2008	curage	0.140					
24/11/2008	curage	0.09					
04/12/2008	curage	0.168					
23/12/2008	estimation	0.004					
29/01/2009	observation	environ 3 pots de yaouts					

Tableau 5 : tableau récapitulatif des relevés des plages à sédiments

2514 Profil en long, pente

Le profil de la ravine Mansarde a été relevé sur toute sa longueur

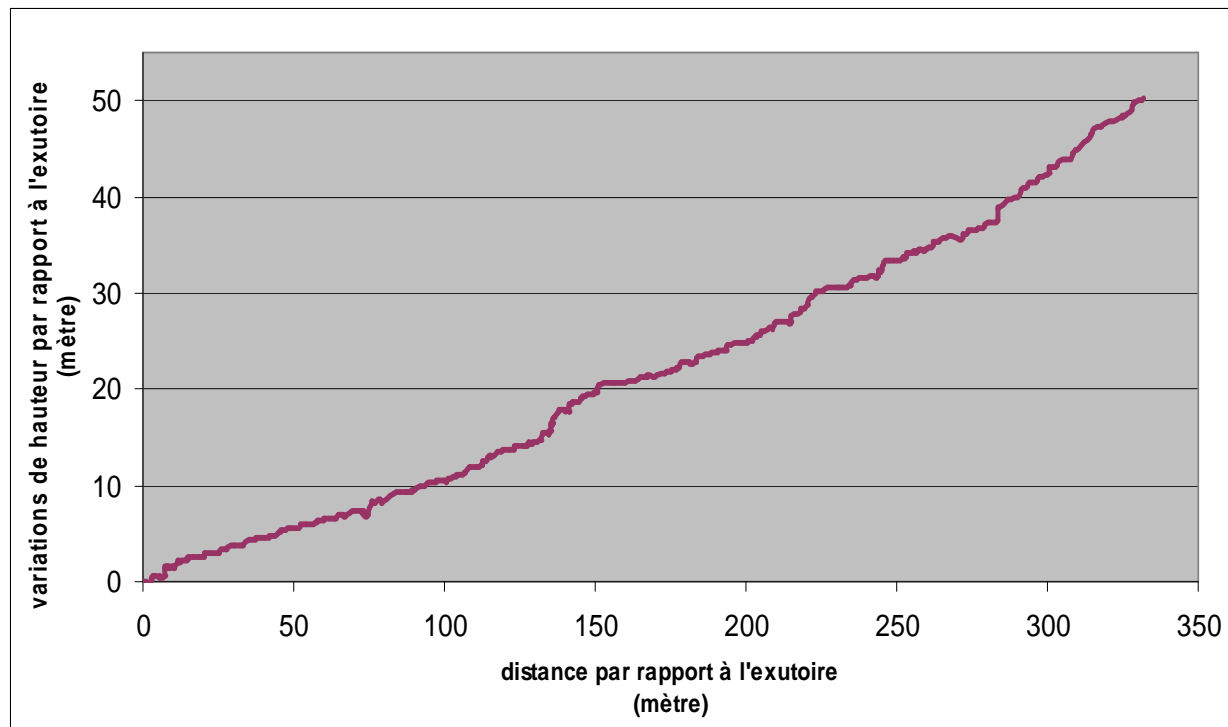


Figure 12 : profil en long de la ravine mansarde

Plus que la pente elle-même, c'est la rupture de pente qui influence le plus l'arrêt des matériaux. Les zones de dépôt de matériaux ont été observées au niveau des méandres au niveau desquels, l'eau, en perdant de la vitesse, dépose une partie de sa charge en matériaux.

Deux types de profils bien caractéristiques ont pu être observés : un profil convexe indiquant une charge sédimentaire de la ravine, un profil concave provenant d'une érosion de la ravine. Le calcul des volumes de sédiments dans les tronçons représentés par des profils en travers convexes pourrait être un bon indicateur du déclenchement probable des premiers départs solides, car il représente le potentiel sédimentaire déposé dans le lit de la ravine.

La pente moyenne de la ravine est 0,13 (13 %) ; elle apparente l'écoulement à un régime torrentiel quand elle est en crue, mais l'application des concepts de l'hydraulique torrentielle à ce cours d'eau intermittent soulève de vraies difficultés théoriques et pratiques.

252 Estimation des valeurs manquantes

Les estimations sont décrites au paragraphe 25 de l'« Etude des transferts de pesticides », pages 36 à 38.

26 Incertitudes sur les données pour l'interprétation des résultats

Voir paragraphe 26 de l'« Etude des transferts de pesticides », pages 38 à 41.

L'incertitude relative retenue sur la mesure des concentrations en MES est 50 % (voir paragraphe 232 du présent rapport).

3. RESULTATS

Remarque liminaire : Nous rappelons qu'un document annexe, le « *recueil des données* » - 115 pages, expose pour chaque site instrumenté l'ensemble des mesures réalisées. Le lecteur pourra s'y reporter pour davantage de détail ou poursuivre ses propres analyses à partir des chroniques qui y sont reportées.

Les outils statistiques mobilisés sont basiques, classifications et dénombrements, régressions linéaire et puissance. Ils s'adaptent aux objectifs de l'étude, première approche quantitative du transport solide sur de petits bassins versants au relief énergétique déversant directement dans le milieu marin.

Au paragraphe 12, nous avons souligné le caractère largement événementiel du transport solide que nous ne dissociions pas de l'envasement de la baie du Robert et des pertes de sol correspondantes. Nous examinons donc des événements particuliers afin d'en tirer des enseignements généraux (paragraphe 31, 32 et 33), pour n'aboutir qu'ensuite à une évaluation globale et prudente du transport solide annuel (paragraphe 34). Enfin, quelques éléments d'hydraulique torrentielle sont confrontés à nos mesures des débits liquides et solides afin d'évaluer leur pertinence à nos échelles d'observation (paragraphe 35).

31 Le charriage est influencé par l'alternance des saisons

La ravine étudiée sur Mansarde traverse une bananeraie qui occupe 2,45 ha. Elle peut générer des crues six mois sur douze. Les premières observations montrent que les composantes du transport solide ne sont pas uniformément réparties sur l'année, mais évoluent comme indiqué à la figure 13 en suivant l'effet des saisons sèches et humides.

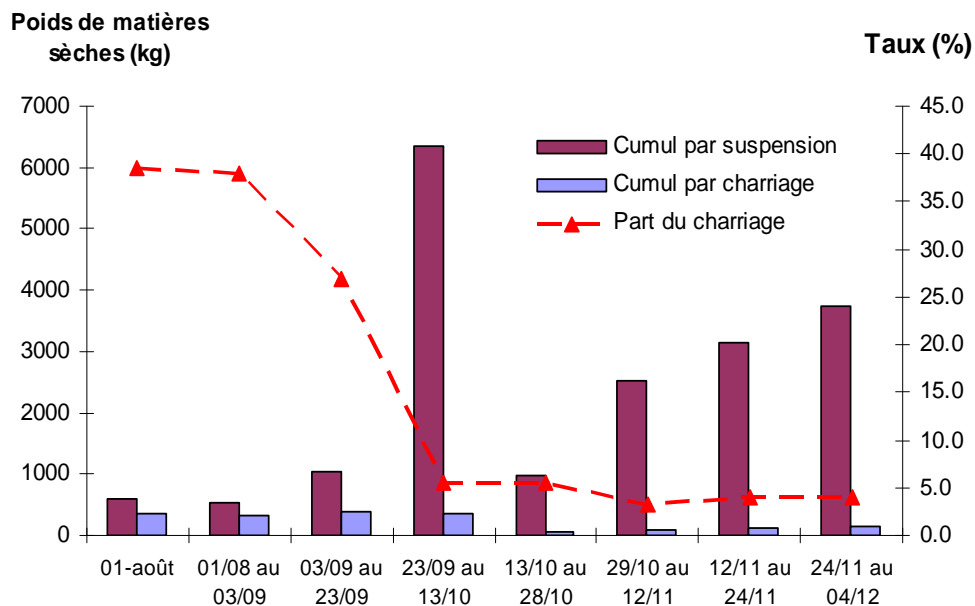


Figure 13 : Transport par suspension et par charriage sur la ravine Mansarde en période d'hivernage 2008 – Données Cemagref

Pour compléter cette observation, la figure 14 représente la dynamique de transport par charriage sur la même période.

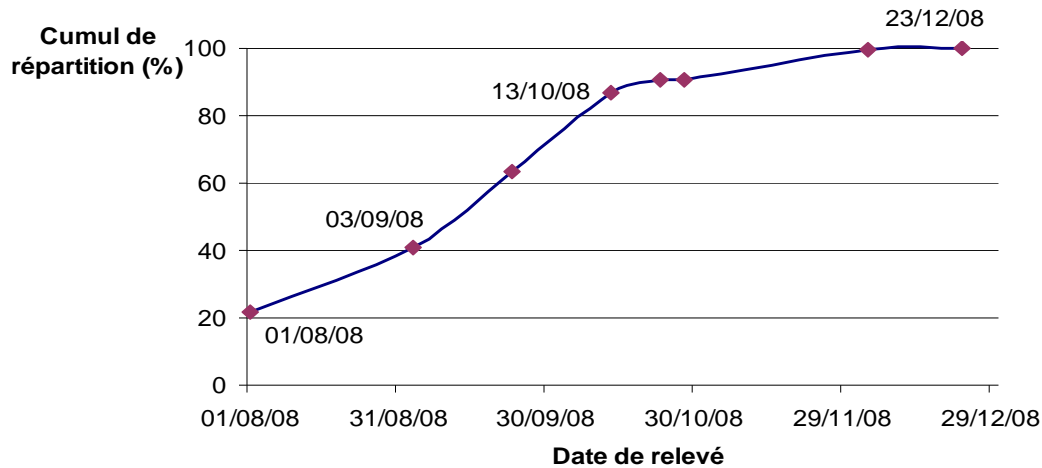


Figure 14: Cumul de répartition des éléments charriés puis déposés dans la ravine Mansarde – Données Cemagref

Plus de 80 % des matériaux sont déposés dans la première moitié de la période étudiée : Sous l'effet des nombreuses alternances humectation/dessiccation qui se déroulent en période de carême (janvier à juin), les agrégats du lit se fragilisent. Ils sont alors fortement disponibles. Ce stock s'épuise au cours de l'hivernage lorsque la ravine est en eau. **Le charriage ne représente plus que 5 % du volume solide total après le mois d'octobre.**

Ce mécanisme illustre assez bien la vulnérabilité des sols à l'érosion hydrique et l'identification de la pluie à une « voiture-balai ». Sur Gashette et Voltaire, le charriage n'a pas été mesuré, mais **le transport en suspension est majoritaire**. C'est donc sur cette composante du transport solide que nous portons notre attention afin de l'approcher au mieux.

32 La granulométrie ne caractérise pas l'origine des matériaux

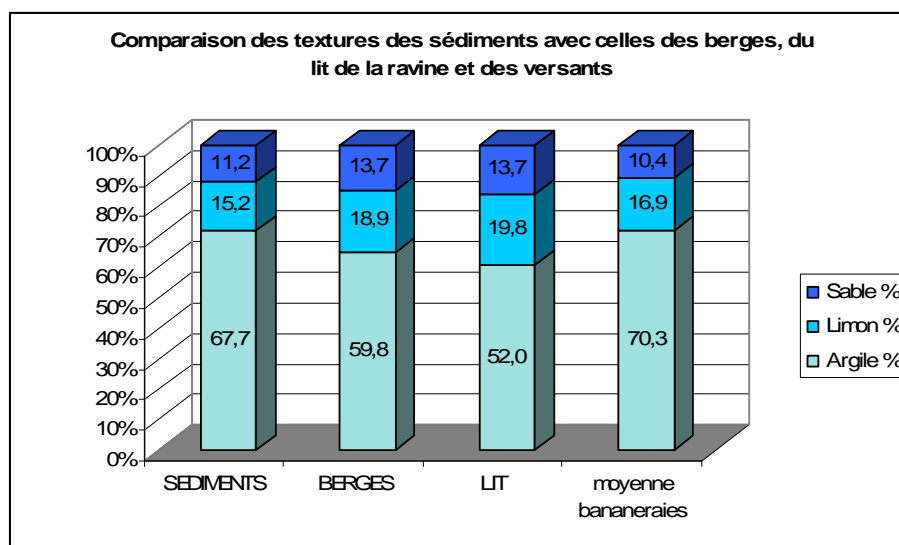


Figure 15 : Comparaison des textures des sols des bananeraies, des berges et du lit de la ravine et des sédiments.

Conformément aux protocoles usuels d'identification de l'origine des matériaux transportés, nous avons réalisé les analyses granulométriques des berges, des sols de versant et des sédiments du lit. Ces analyses n'ont pas permis de distinguer l'origine des sédiments, comme le montre la figure 15. L'observation du lit semble donc la méthode la plus directe pour mesurer l'érosion sur le moyen terme.

33 Les relations entre les concentrations en MES et les débits caractérisent l'interaction entre l'aléa et la vulnérabilité

La solubilité des pesticides fait qu'on en retrouve toujours une certaine quantité dans le cours d'eau, singulièrement à l'étiage. A contrario, les matières en suspension (MES) ne transitent pas par la nappe. **De ce fait, le transport solide révèle des processus discontinus qui répondent plus difficilement à des approches moyennes.** Après avoir précisé quelques définitions, nous nous étendons sur sept cas particuliers de crues afin de caractériser le transport solide des trois sites en comparaison. Au fil de ces analyses de cas, nous dégagerons quelques enseignements généraux. La séquence des présentations est donc organisée dans ce sens.

330 - Paragraphe liminaire, quelques définitions

Forme générale des ajustements concentration/débit, par hypothèse : $C = b Q^a$ (relation 1)

C la concentration MES en g/l (grammes/litre)

Q le débit liquide en l/s (litres/seconde)

Définition du débit solide Q_s

$$Q_s = \frac{C Q}{\mu} \quad (\text{relation 2})$$

μ la masse volumique des sédiments que nous avons fixée à 2650 g/l en l'absence de mesure.

Calcul des débits critiques : des relations (1) et (2) nous déduisons la relation (3). Q_{cr} se substitue à Q dans la conduite de la transformation.

$$Q_{cr} = \left(\frac{\mu Q_s}{b} \right)^{\left(\frac{1}{1+a} \right)} \quad (\text{relation 3})$$

Q_{cr} , le débit (liquide) critique

Q_s , le débit solide

a et b les coefficients de la relation concentration/débit en montée de crue

Débit critique de début de transport et débit critique de plein transport : Les définitions sont données au paragraphe 12, page 11 du présent document. Ils sont calculés à partir des mesures expérimentales des débits solides et de la relation (3).

La signification des coefficients a et b de la régression concentration/débit peut être débattue, mais il est d'abord nécessaire de mesurer les effets de leurs variations sur la forme de la courbe. Nous donnons donc une illustration rapide avec les ordres de grandeur qui correspondent aux relations fonctionnelles qui seront calculées.

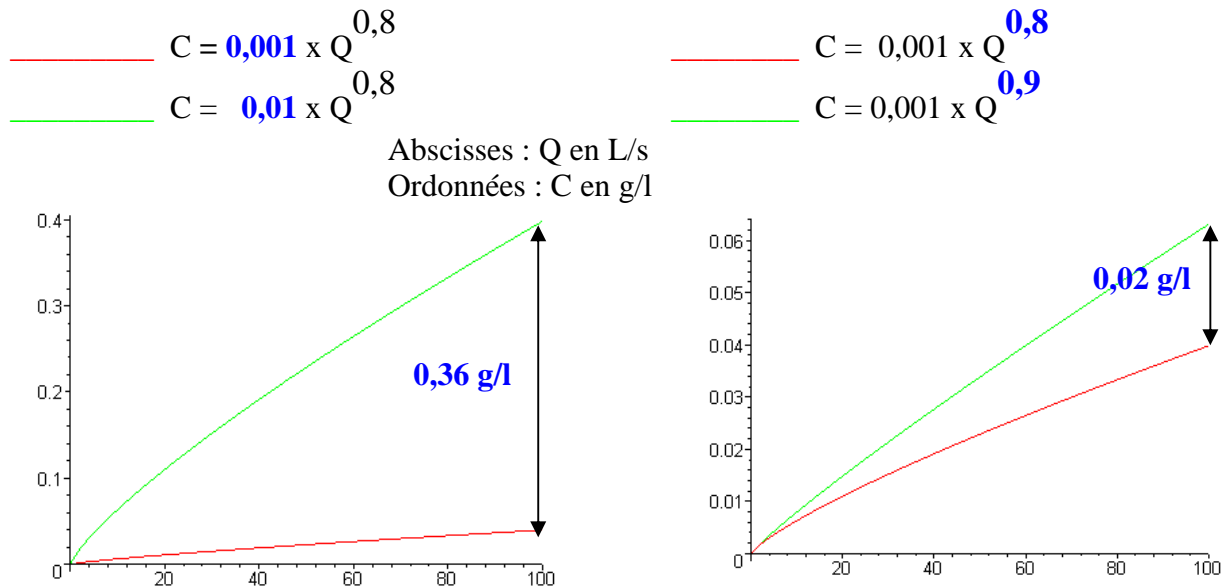


Figure 16 – Effets des variations des coefficients a et b sur la concentration en MES

331 Crue du 31/07/2008, Station Voltaire

Points de mesure (nous n'avons retenu que les points dont les débits sont confirmés).

Entêtes de colonne du tableau 6 :

Ql = débit liquide en litres par seconde, Concentration = Concentration en MES en grammes par litre (g/l),

Qs = débit solide en litres par secondes, calculé pour une masse volumique égale à 2650 g/l.

Voltaire 31/07/2008		MES Diamètre >0,45 µ m/v = 2650 g/l	
Heure:minute	Ql (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
	Montée de crue		
11:26	392	2.17	0.32
	Décrue		
11:36	2 162	2.38	1.94
11:46	1 932	3.83	2.79
11:48	1 886	2.39	1.70
11:53	1 770	2.56	1.71
11:59	1 632	1.73	1.07
12:06	1 471	1.31	0.73
12:16	1 241	0.95	0.44
12:26	1 010	0.72	0.27

Tableau 6 – Points de mesure, Voltaire, crue du 31/07/2008

Commentaires :

- Ces débits ont été estimés (voir Etude des transferts de pesticides paragraphe 252 page 37).
- Les concentrations apparaissent plutôt faibles pour un débit de pointe assez fort.
- Pourtant, le régime critique de plein transport ne semble pas avoir été mesuré.
- **La mesure expérimentale du régime critique de plein transport est essentielle pour la précision de l'ajustement concentration/débit**, car on observe sur les courbes de la figure 16 que la partie haute est la plus variable, et en même temps la plus sensible pour

l'intégration qui en est faite au moment de l'estimation annuelle. Or, ni la crue du 31/07/2008, ni celle du 11/10/2008 (paragraphe 332), n'a permis de mesurer le régime critique. Cela génère une incertitude qui augmente pour les débits élevés.

Courbe concentration/débit des points mesurés

La courbe d'hystérésis est classique, elle montre une augmentation de la concentration des MES en montée de crue et une dilution en décrue. Nous l'associons avec une forte action érosive de la pluie. Pour ajuster la relation concentration/débit, nous devrions procéder à deux régressions puissance, une pour la montée de crue et l'autre pour la décrue. Toutefois, le faible nombre de points en montée nous limite à l'ajustement de la décrue.

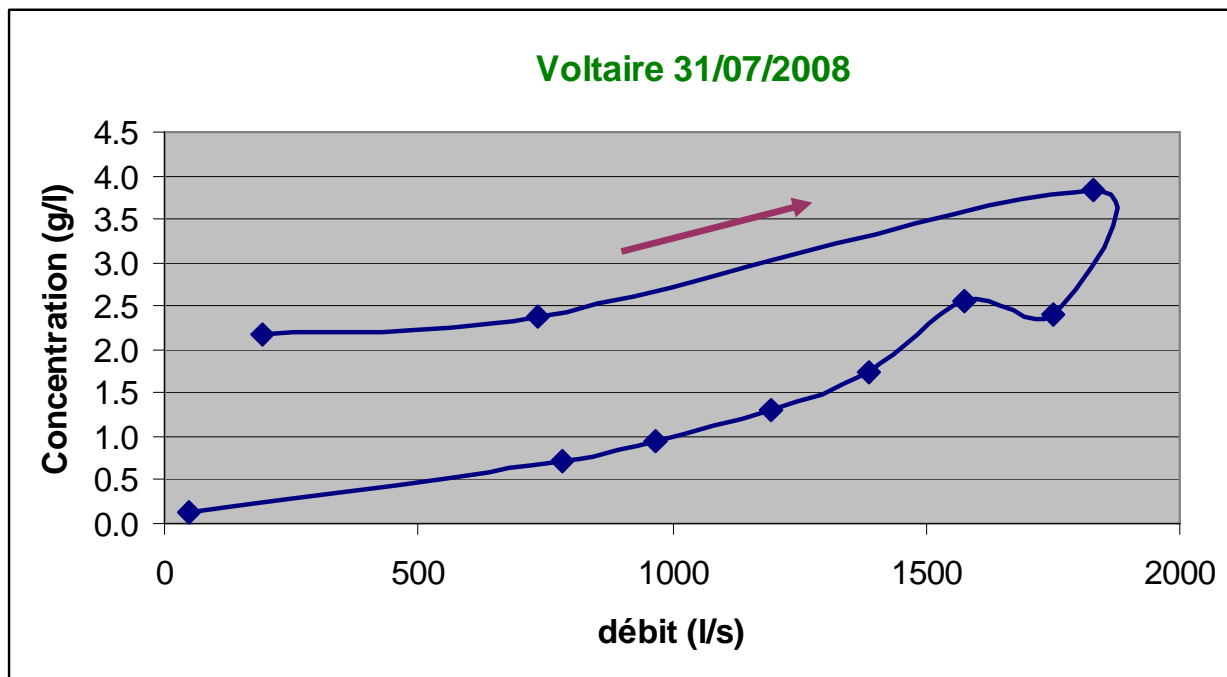


Figure 17 – Concentration/débit, Voltaire, crue du 31/07/2008.

En référence à la distribution des crues présentée dans le rapport sur l'« **étude des transferts de pesticides** » **page 78**, la crue du 31/07/2008 sur Voltaire appartient à la classe 5 des fortes crues (flux de 11 126 m³). En réalité, l'évènement s'étale du 30/07 au 01/08/2009 et dure 44 heures. L'évènement porte le numéro 106 au recueil des données, station Voltaire **page 25**.

Relations fonctionnelles et débit solide

L'incertitude de 50 % sur la mesure des concentrations de MES nous amène à calculer trois régressions puissance pour chaque séquence de montée ou de décrue. Les trois relations fonctionnelles de la décrue du 31/07/2008 à la station Voltaire sont les suivantes :

Hypothèse centrale : $C \text{ (en g/l)} = 0,003 \times QI^{0,85}$ [$r^2 = 0,94$], QI en litres par seconde (L/s)

Hypothèse basse : $(C \times 0,5) = 0,002 \times QI^{0,85}$ [$r^2 = 0,94$]

Hypothèse haute : $(C \times 1,5) = 0,005 \times QI^{0,85}$ [$r^2 = 0,94$]

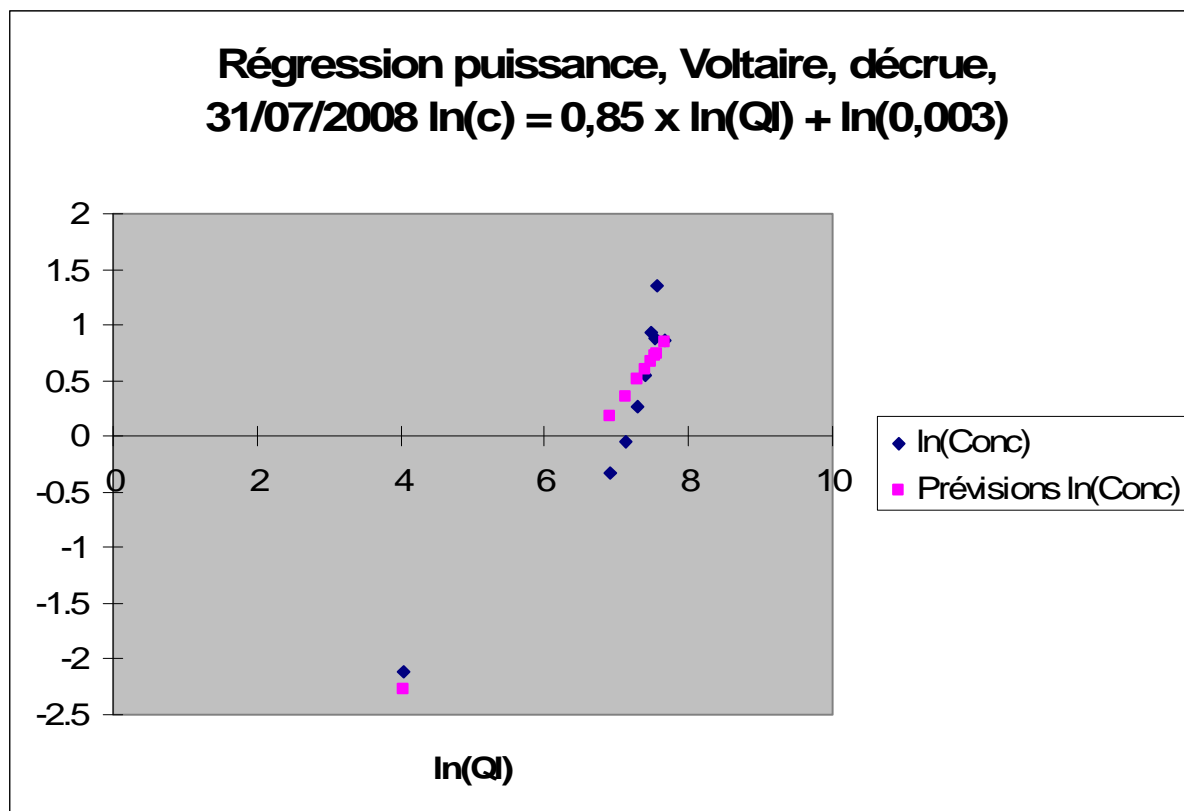


Figure 18 – Relation concentration/débit, Voltaire, décrue, 31/07/2008 (données : tableau 6)
Cela amène le sédimentogramme reconstitué à partir des relations établies (figure 19)

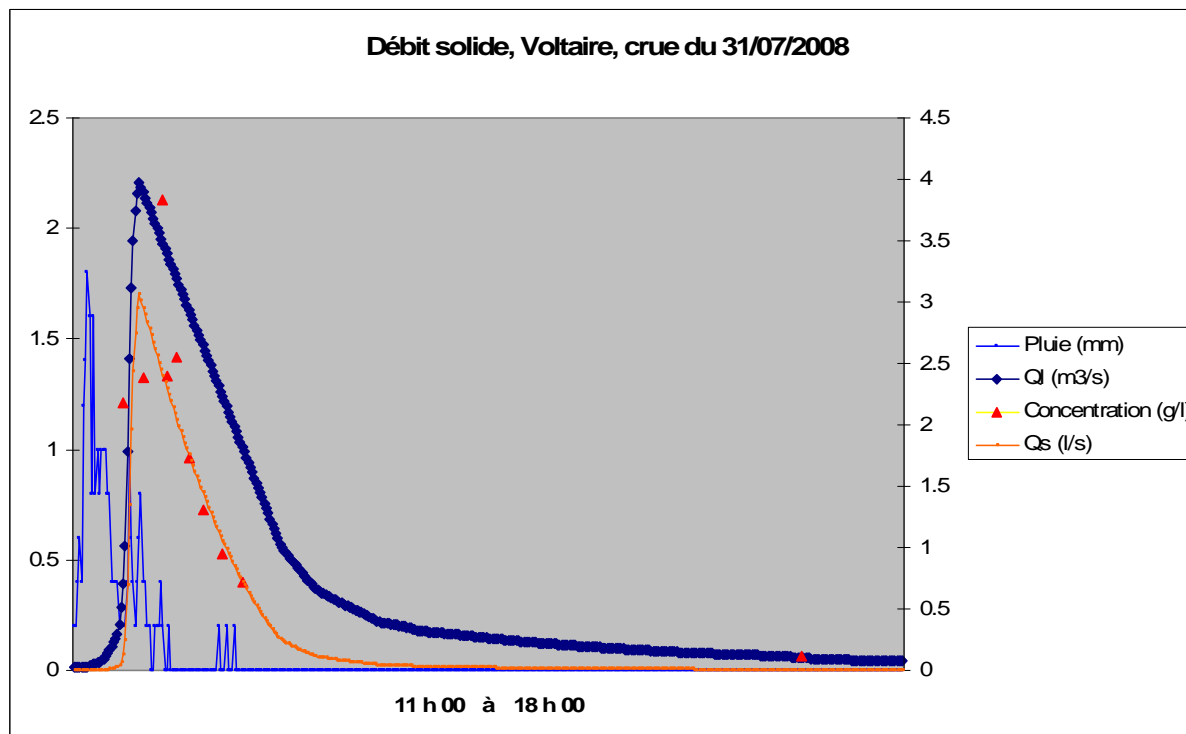


Figure 19 – Débit solide, Voltaire, crue du 31/07/2008

Les points triangulaires représentent les points de prélèvement. La courbe des débits solides (Q_s) est calculée à partir de la régression centrale (0,003 ; 0,85).

Flux de MES

Nous procédons maintenant à une évaluation de la masse déplacée en suspension, ou flux de MES, pendant les 7 heures qui ont été échantillonnées, à partir des débits liquides instantanés mesurés en continu. Nous présentons des coefficients de régression avec trois chiffres après la virgule pour faciliter la lecture. En réalité, ces calculs sont effectués en double précision avec un minimum de 8 chiffres après la virgule.

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage 7 heures et 66 ha 50	7,45 t	11,17 t	18,61 t
tonnage par ha	0,11 t/ha	0,17 t/ha	0,28 t/ha
Kg/ha/heure	16 kg/ha/h	24 kg/ha/h	40 kg/ha/h

Tableau 7 – Flux de MES (durée : 7 heures), voltaire, 31/07/2008

- Plusieurs commentaires ont été produits pages 62 et 63 de l' « étude des transferts de pesticides » relativement à cet épisode pluvieux qui est l'un des plus longs enregistrés entre septembre 2007 et août 2008. Le pic mesuré a duré 47 minutes et est le plus important des 13 accélérations flashes qui se sont succédées pendant les 44 heures de la crue définie par un débit supérieur à deux fois le débit de base ($2 \times 3 \text{ L/s} = 6 \text{ L/s}$).

- Les 7 heures échantillonnées de cet épisode ont donc déplacé au point de mesure entre 7 et 18 tonnes de MES, soit entre 16 et 40 Kg par ha et par heure, selon nos estimations. Les ratios à l'hectare, encore appelés paramètres spécifiques, ne traduisent pas l'érosion générée par l'épisode pluvieux. Ils sont simplement utilisés pour traduire un facteur d'échelle et mettre en comparaison différentes mesures. Ces évaluations ponctuelles sont intéressantes, mais leur généralisation à des échelles de temps plus grandes, en général l'année, pose de nombreuses difficultés d'interprétation.

- En référence à notre modèle d'analyse de risque, nous avons mesuré une interaction globale, mais ponctuelle, entre un aléa-pluie et les deux composantes de la vulnérabilité, sans que nous ayons les moyens de les dissocier sur une seule occurrence de crue. Nous aurons par la suite tendance à considérer par hypothèse que les épisodes mesurés ponctuellement approchent la vulnérabilité structurelle.

- Nous retiendrons que la crue du 31/07/2008 est l'archétype de la crue « horlogique », assez simplement ajustée par deux régressions puissance qui traduisent une concentration de MES en montée de crue et une dilution en décrue.

332 Crue du 11/10/2008, station Voltaire

L'évènement du 11/10/2008 doit être replacé dans le contexte particulier des pluies du mois d'octobre 2008 qui a cumulé 506,6 mm à la station Voltaire, contre 262,8 mm au mois d'octobre 2007. (voir « Etude des transferts de pesticides », tableau 8 page 46). Le débit est en conséquence élevé sur toute la durée de l'évènement. Sur un critère de débit supérieur à 6 L/s, la crue dure 7 jours 11 heures et 9 minutes, du 10/10/2008 au 17/10/2008. Elle est numérotée 137 au recueil des données, station Voltaire page 25. Son flux d'eau est 105 194 m³ sur sa durée, soit l'équivalent de 67 fois une crue moyenne de la rivière Voltaire évaluée d'octobre 2007 à septembre 2008 en référence.

L'échantillonnage a permis de couvrir une phase de montée et une phase de décrue, le cheminement de l'analyse est le même que pour la crue du 31/07/2008 examinée au paragraphe 331.

Points de mesure

Voltaire 10/11/2008		MES diamètre >0,45 µ m/v = 2650 g/l	
Heure:minute	QI (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
Décru de 12 h 41 à 15 h 44 (6 points)			
12:53	680	0.59	0.15
14:33	239	0.32	0.03
14:45	217	0.24	0.02
15:00	209	0.26	0.02
15:17	199	0.18	0.01
15:32	194	0.22	0.02
Montée de 15 h 45 à 16 h 41 (8 points)			
15:58	224	0.25	0.02
16:01	242	0.29	0.03
16:05	270	0.33	0.03
16:08	293	1.11	0.12
16:12	331	0.67	0.08
16:15	361	0.65	0.09
16:26	542	0.71	0.15
16:36	767	0.99	0.29
Décru de 16 h 42 à 17 h 11 (2 points)			
16:52	697	0.58	0.15
17:10	567	0.41	0.09
Montée à partir de 17 h 12 (1 point)			
17:20	625	0.63	0.15

Tableau 8 – Points de mesure, Voltaire, crue du 11/10/2008

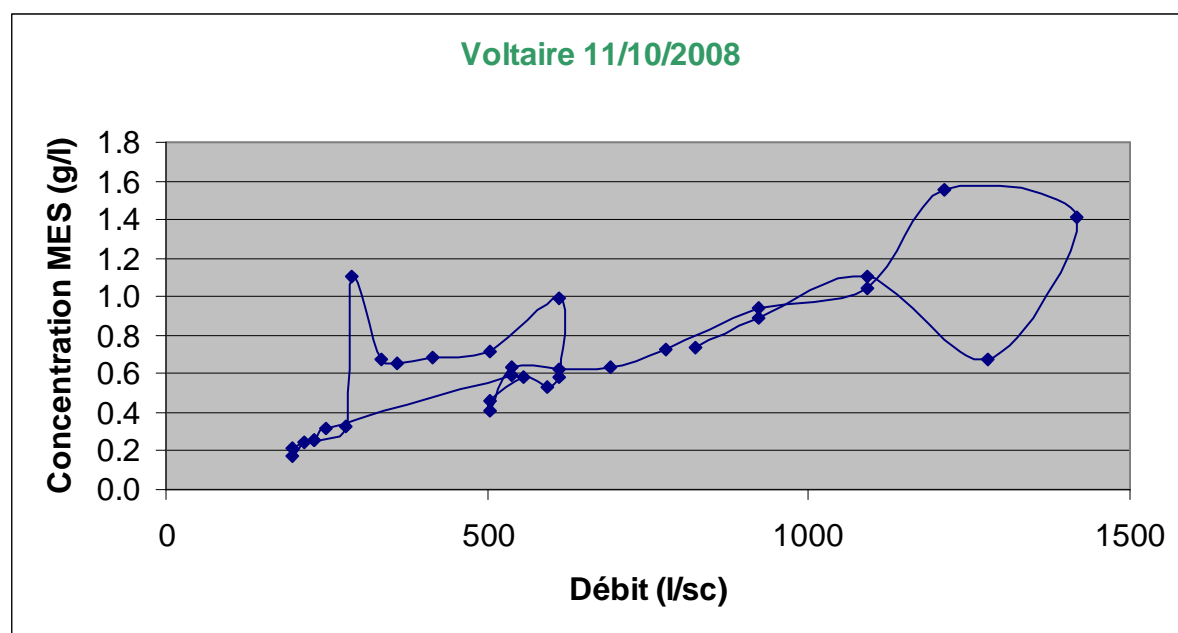


Figure 20 – Concentration/Débit, Voltaire, crue du 11/10/2008

La courbe d'hystérésis, atypique, est nettement structurée en deux phases : une première phase assez classique de forte accélération, et une deuxième phase « en boucle », survenant entre deux fortes accélérations du débit. **Nous assistons probablement en deuxième phase à un soulèvement des matériaux du lit.**

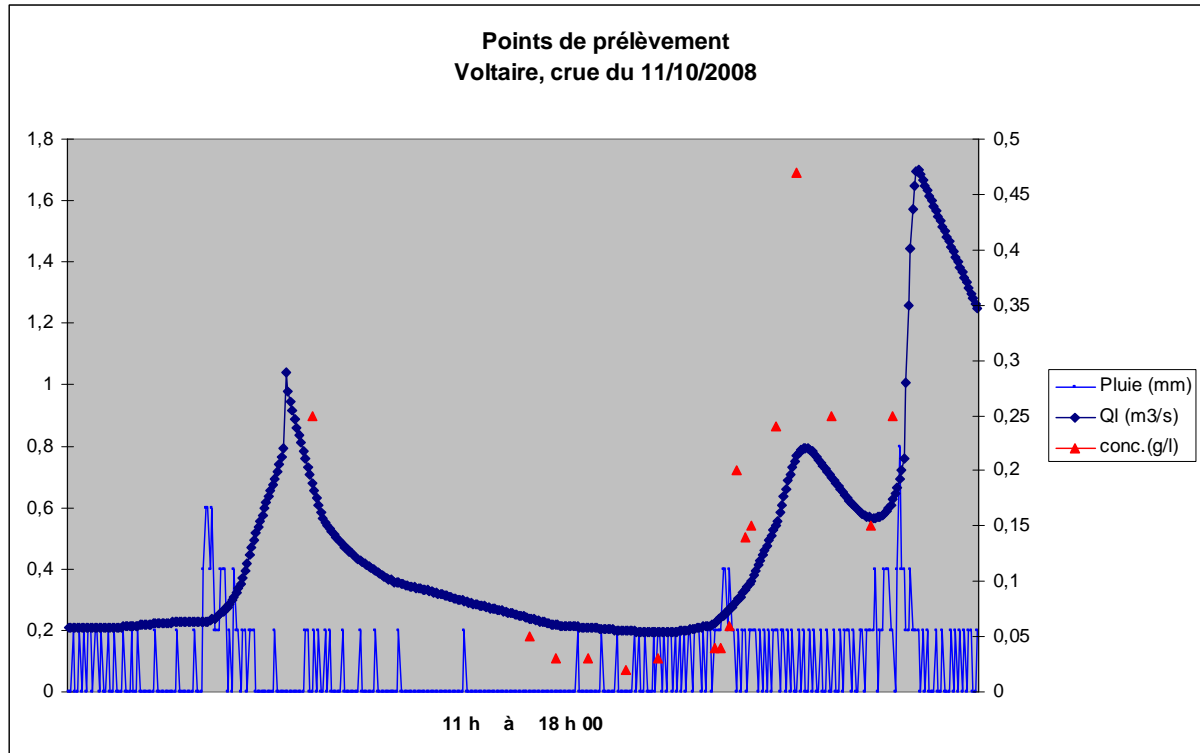


Figure 21 – Points de prélèvement, Voltaire, 11/10/2008

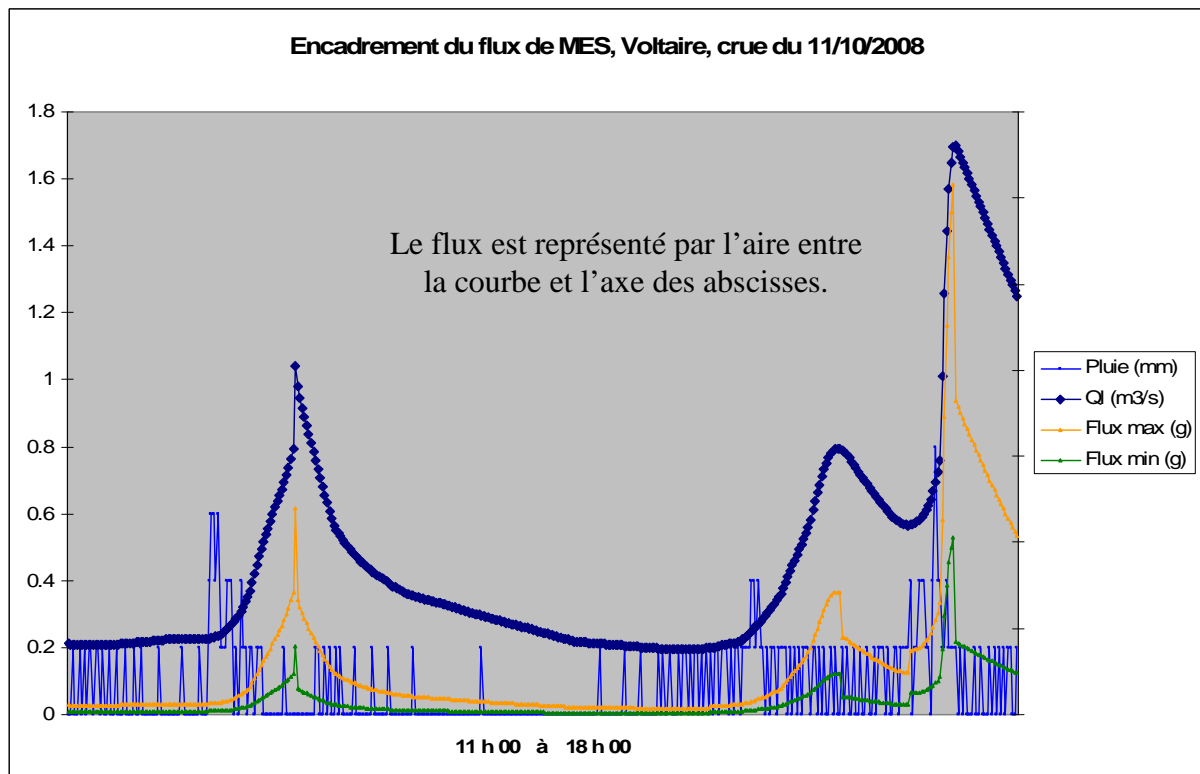


Figure 22 – Encadrement du flux de MES, Voltaire, crue du 11/10/2008

Dans l'hypothèse d'un mécanisme de dépôt/reprise, la relation directe avec l'action érosive de la pluie sur le versant est moins évidente ; non pas qu'il faille en douter mais la progression des sédiments par bonds successifs semble jouer ici, nous incitant à des interprétations prudentes.

Malgré les crues de dimensions comparables qui se succèdent depuis la mi-septembre 2008, la charge en MES est toujours importante alors que nous pourrions supposer l'épuisement des matériaux disponibles.

Malgré cela, les points de prélèvement ne couvrent aucun des deux pics. En conséquence, nous n'avons pas mesuré le débit critique de plein transport. Cela va entraîner une relative imprécision des ajustements.

Relations fonctionnelles et débit solide

Décru premier pic :

$$\text{Estimation centrale : } C \text{ (g/l)} = 0,003 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,94]$$

$$\text{Estimation basse : } C \text{ (g/l)} = 0,001 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,94]$$

$$\text{Estimation haute : } C \text{ (g/l)} = 0,004 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,94]$$

Montée deuxième pic :

$$\text{Estimation centrale : } C \text{ (g/l)} = 0,002 \times QI^{0,93} \quad [r^2 = 0,69]$$

$$\text{Estimation basse : } C \text{ (g/l)} = 0,001 \times QI^{0,93} \quad [r^2 = 0,69]$$

$$\text{Estimation haute : } C \text{ (g/l)} = 0,003 \times QI^{0,93} \quad [r^2 = 0,69]$$

Flux de MES

Nous évaluons maintenant les transports de matières en suspension, les régressions calculées en montée et en décrue ont été appliquées aux trois pics de l'épisode, les deux crues sont présentées simultanément :

Les cases du tableau sont organisées ainsi : [**bleu** du 11/10/2008 / **rouge** du 31/07/2008]

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage 7 heures et 66 ha 50	3,24 / 7.45 t	8,11 / 11.17 t	11,81 / 18.61 t
tonnage par ha	0,05 / 0.11 t/ha	0,12 / 0.17 t/ha	0,18 / 0.28 t/ha
Kg/ha/heure	7 / 16 kg/ha/h	17 / 24 kg/ha/h	25 / 40 kg/ha/h

Tableau 9 – Flux de MES comparés (durée : 7 heures), voltaire

Si l'épisode du 11/10/2008 semble déplacer moins de matériaux que celui du 31/08/2008, les ordres de grandeur sont comparables et proche de 10 tonnes pour les 7 heures échantillonnées et les 66,50 ha intégrés au point de mesure.

Nous entreprenons la comparaison des relations fonctionnelles des décrues de Voltaire :

Les cases du tableau sont organisées ainsi : [valeur du 31/07/2008 | valeur du 11/10/2008]

Voltaire, Décrues

	Coefficients multiplicatifs	Coefficients puissance
Hypothèse centrale	0,003 0,003	0,85 0,82
Hypothèse basse	0,002 0,001	
Hypothèse haute	0,005 0,004	

Tableau 10 – Relations fonctionnelles comparées en décrue, Voltaire

Nous observons une grande analogie des ordres de grandeur des deux séries de coefficients. Cela nous encourage à fusionner les points des décrues pour opérer une seule régression que nous pouvons espérer plus précise :

Estimation centrale, décrues fusionnées : $C = 0,0017\ 3675 \times Q^{0,9341\ 2324}$ [$r^2 = 0,96$]

Nous obtenons alors une régression très proche de celle en montée de crue, mais avec un r^2 meilleur (0,96).

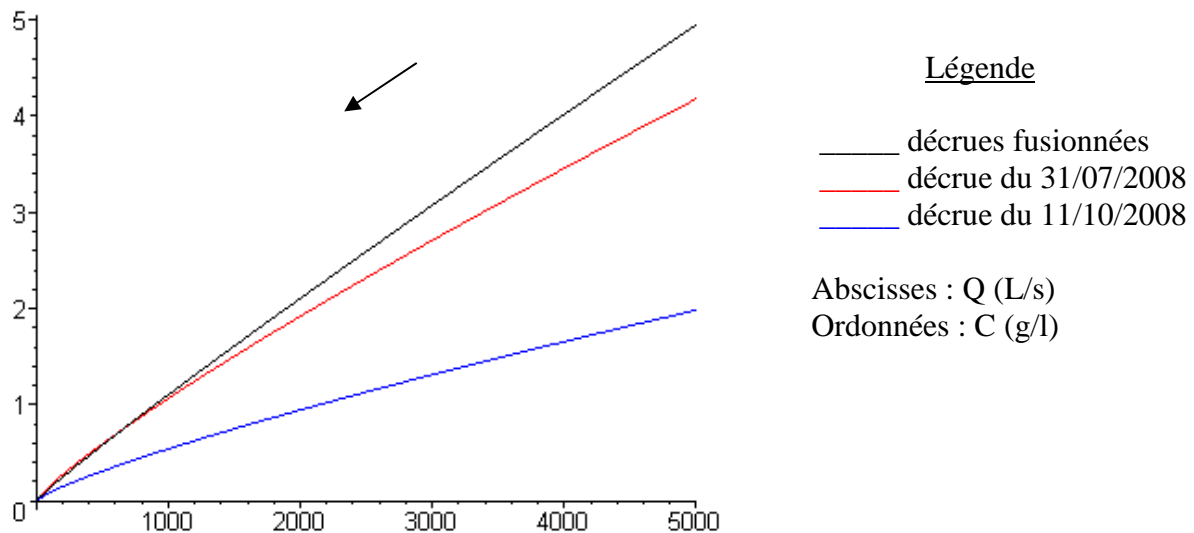


Figure 23 – Concentration en MES/débit - Courbes d'ajustement en décrue, Voltaire

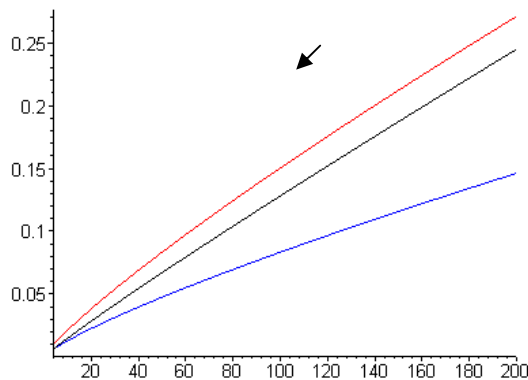


Figure 24 –Décrue, Voltaire, réduction aux débits inférieurs à 200 L/S

Sur ces trois courbes calculées à partir de débits inférieurs à 2200 L/s et regroupés vers le bas, l'imprécision augmente avec le débit.

En réduisant les trois courbes aux débits inférieurs à 200 L/s, la décrue fusionnée apparaît bien comme l'ajustement intermédiaire des deux autres décrues.

333 Crue du 29/08/2008, Station Gashette

Gashette
29/08/2008
Décrue

diamètre >0,45 µ m/v = 2650 g/l

Heure:minute	QI (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
12:04	1 088	4.55	1.87
12:08	991	3.92	1.47
12:10	898	3.42	1.16
12:13	810	2.92	0.89
12:16	685	2.47	0.64
12:22	534	2.19	0.44
12:28	432	1.66	0.27
12:37	340	1.55	0.20
12:49	259	1.24	0.12
13:04	190	1.06	0.08

Tableau 11 – Points de mesure, Gashette, décrue du 29/08/2008

La décrue seule a été échantillonnée pour des débits et un effectif de points honorables.

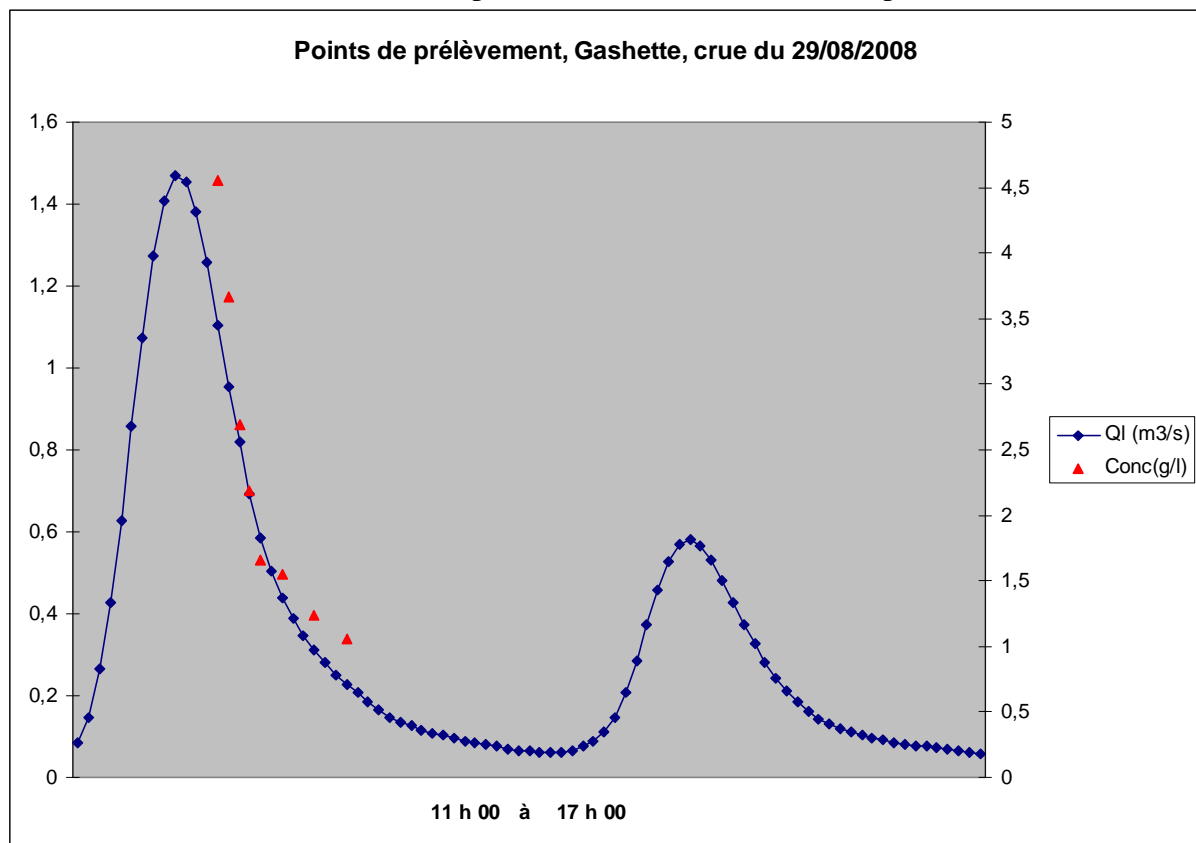


Figure 25 – Points de prélèvement, Gashette, crue du 29/08/2008

(Les points de prélèvement apparaissent sous la forme des points-triangles rouges)

La crue du 29/08/2008 a généré un flux d'eau de 9 392 m³. C'est une crue de classe 10 (voir « Etude des transferts de pesticides » page 78.

Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,013 \times QI^{0,81}$ [$r^2 = 0,98$] (basse : 0,007 ; haute : 0,020)

Flux de MES

Nous avons estimé les flux de MES en appliquant les mêmes séquences que pour la station Voltaire. Pour la crue du 29/08/2008 de Gashette, la montée qui dure 1 h et 35 minutes, relativement courte, a été estimée avec la même fonction que la décrue. De ce fait, les MES ne sont pas maximisées à la station Gashette.

Nous avons remplacé les valeurs de Voltaire du 31/07/2008 pour comparaison : [[donnée de Gashette](#) / [donnée de Voltaire](#) **unité**]. Le parallèle est intéressant, car les volumes d'eau (9 392 m³ et 11 126 m³), les durées (7 heures échantillonnées) et les surfaces drainées (67,52 ha et 66,50 ha) de ces deux épisodes sont comparables. Il s'en dégage deux tendances liées aux occupations du sol très différentes.

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
Tonnage 7 heures	12,63 / 7,45 t	23,46 / 11,17 t	36,10 / 18,61 t
Tonnage par ha	0,19 / 0,11 t/ha	0,35 / 0,17 t/ha	0,53 / 0,28 t/ha
Kg/ha/heure	27 / 16 kg/ha/h	50 / 24 kg/ha/h	76 / 40 kg/ha/h

Tableau 12 – Flux de MES comparés (durée : 7 heures), Gashette, 29/08/2008

Compte tenu de l'incertitude relative des mesures de concentration de MES supposée proche de 50 %, le flux de MES est encadré par deux courbes recalculées. Nous observons logiquement l'écartement des courbes d'encadrement autour des forts débits liquides. Les points triangulaires sont les points de prélèvement (Figure 26).

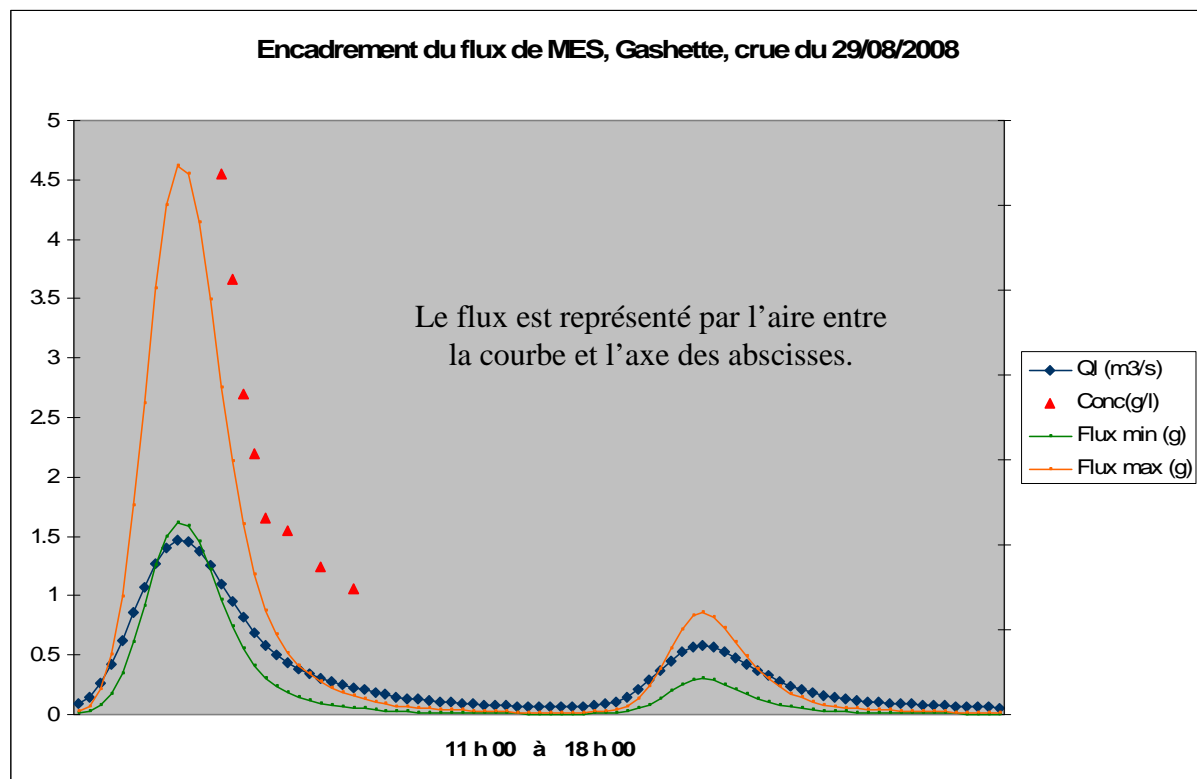


Figure 26 – Encadrement du flux de MES, Gashette, crue du 29/08/2008

334 Crue du 19/09/2008, Station GashettePoints de mesure**Gashette**
19/09/2008**MES**
diamètre >0,45 µ m/v = 2650 g/l

Heure:minute	QI (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
	Montée		
09:19	100	1.07	0.04
09:25	100	1.60	0.06
09:30	602	5.29	1.20
09:31	1 060	28.71	11.49
09:33	1 587	34.81	20.84
09:36	2 100	20.71	16.41
09:40	2 800	22.96	24.27
09:48	3 171	11.99	14.34
	Décrue partielle		
09:53	3 923	8.14	12.05
09:58	5 131	7.48	14.48
10:03	5 341	7.22	14.55
10:06	4 712	6.63	11.79
10:11	3 358	5.26	6.67
10:17	2 100	4.25	3.37
10:35	2 800	3.72	3.93
	Montée		
10:40	4 300	3.47	5.64
10:49	5 970	4.85	10.93
11:09	4 712	2.47	4.39
11:28	3 171	1.40	1.67
	Décrue partielle		
11:52	831	1.06	0.33
12:23	602	0.63	0.14

Tableau 13 – Points de mesure - Gashette, crue du 19/09/2008

La crue du 19/09/2008 a généré un flux d'eau de 29 547 m³, exceptionnel par rapport à la moyenne annuelle d'une crue estimée à 861 m³ à la station Gashette. Voir l' « étude des transferts de pesticides », page 78. Les photographies placées à la page 3 du présent document donnent une idée de ce type d'évènement.

La satisfaction de cet échantillonnage est d'avoir mesuré le débit critique de plein transport. Effectivement, les débits dépassent 5000 L/s et les concentrations en MES sont les plus fortes parmi celles rencontrées. Nous pouvons donc espérer une bonne représentation des forts débits dans les régressions calculées et par suite une évaluation réaliste du flux de MES.

Les découpages entre montée et décrue ne sont pas strictement opérés sur le critère du débit liquide, mais tiennent également compte de l'évolution de la concentration en MES.

Cette crue présente deux particularités : d'une part, deux pics assez proches sont survenus, d'autre part, le deuxième pic intervient en eau claire. A cela deux interprétations possibles : soit le premier pic a épuisé tous les matériaux disponibles, soit les flux n'ont pas la même origine, l'un provenant de la route et l'autre du versant.

Courbe concentration/débit des points mesurés

La courbe d'hystérésis de cette crue est particulièrement intéressante. Pour la comprendre, il faut retrouver les deux pics échantillonnés. C'est pourquoi, les figures 27 et 28 doivent être lues en même temps.

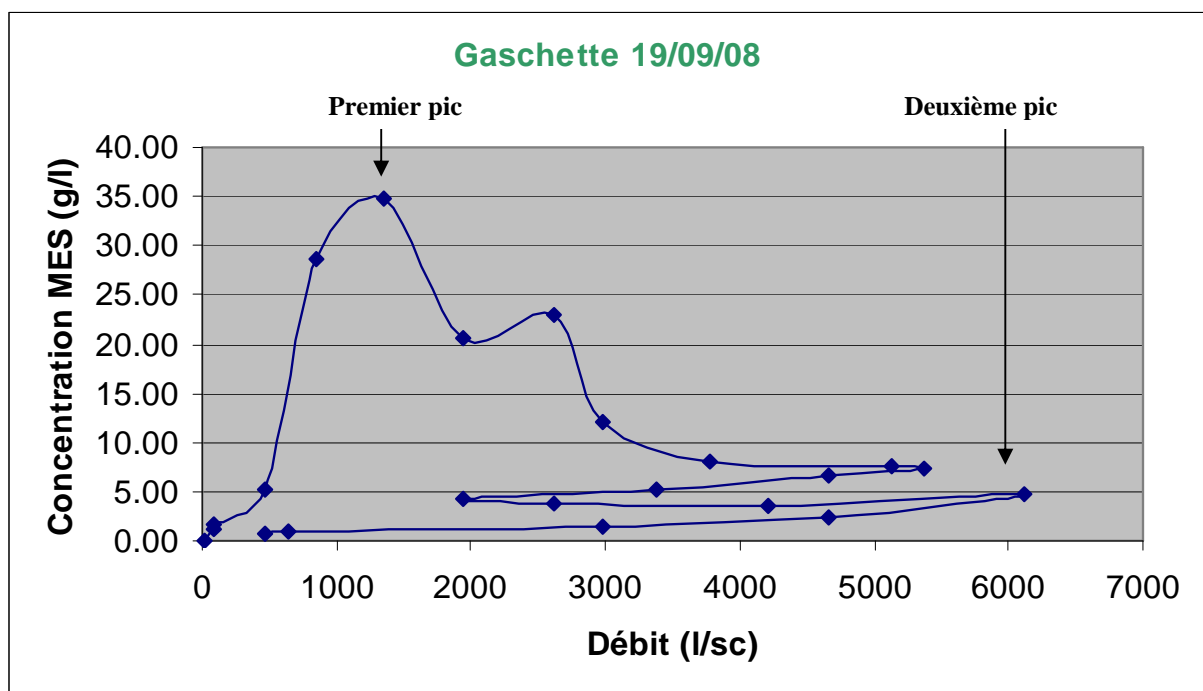


Figure 27 – Concentration/débit, Gashette, crue du 19/09/2008

Dans ce cas de figure, le premier pic est chargé comme celui examiné sur Voltaire le 31/07/2008, mais le deuxième pic se produit en eau claire. **Une généralisation fondée sur les débits liquides instantanés aurait entraîné une erreur d'estimation assez importante dans ce cas.**

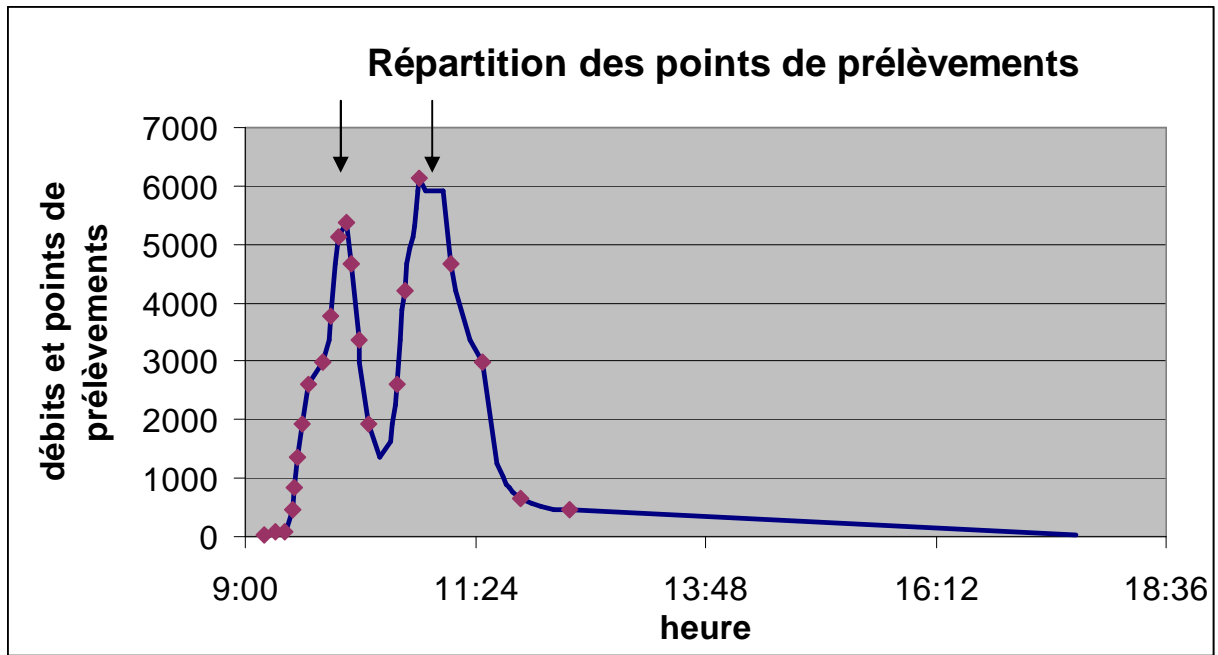


Figure 28 – Les deux pics de la crue du 19/09/2008, Gashette, débit liquide et points de prélèvement

Le sédimentogramme s'en déduit à la figure 29.

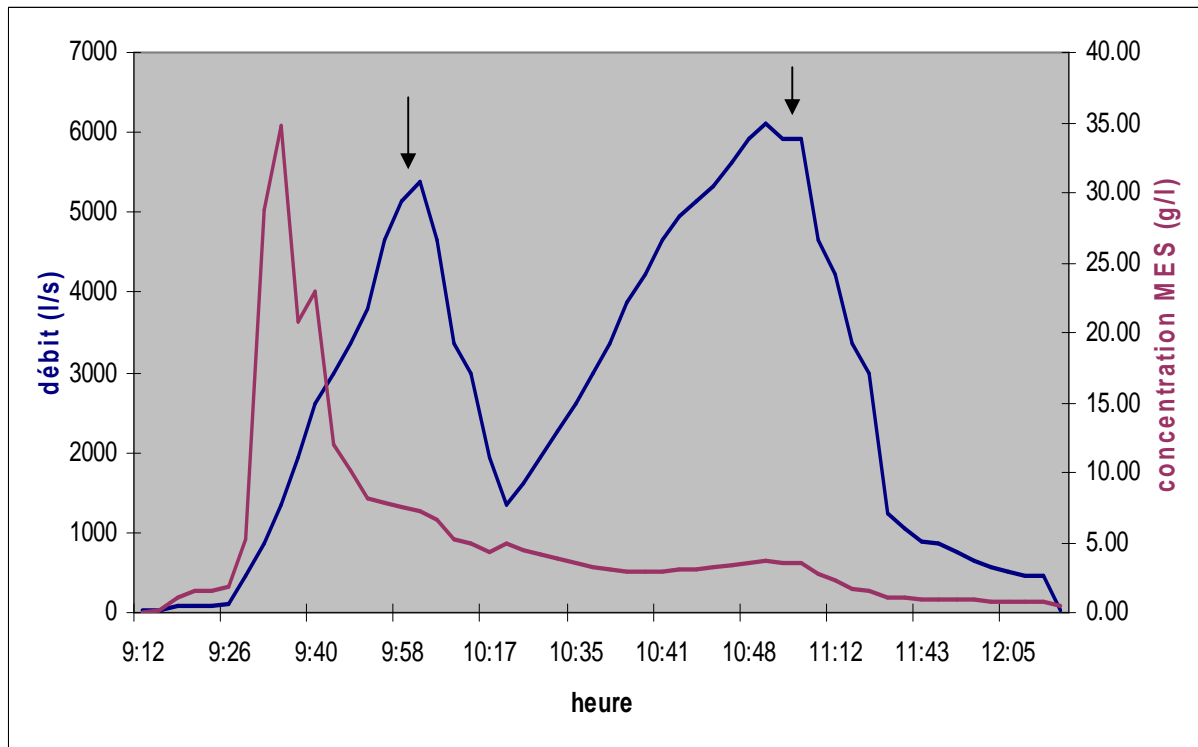


Figure 29 – Sédimentogramme, Gashette, crue du 19/09/2008

Le retard du pic de MES sur le pic de crue est assez classique, car l'onde de crue avance plus rapidement que le nuage turbide dont la source est éloignée du point de mesure.

Relations fonctionnelles

Montée de crue premier pic :

Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,004 \times QI^{1,14}$ [$r^2 = 0,92$] (basse : **0,002** ; haute : **0,006**)

Décru premier pic :

Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,014 \times QI^{0,74}$ [$r^2 = 0,84$] (basse : **0,007** ; haute : **0,021**)

Montée deuxième pic (en eau claire) :

Quatre points ont été échantillonnés sur la montée du deuxième pic qui survient en eau claire, nous donnons l'estimation centrale pour mémoire : le coefficient 10^{-7} est éloquent.

Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 4.10^{-7} \times QI^{1,89}$ [$r^2 = 0,92$].

Nous entreprenons la comparaison des relations fonctionnelles des décrues de Gashette :

Les cases du tableau sont organisées ainsi : [valeur du 29/08/2008 | valeur du 19/09/2008]

	Coefficients multiplicatifs	Coefficients puissance
Hypothèse centrale	0,013 0,014	0,81 0,74
Hypothèse basse	0,007 0,007	
Hypothèse haute	0,020 0,021	

Tableau 14 – Relations fonctionnelles comparées en décru, Gashette.

En première approche on remarque l'évolution des coefficients par rapport à ceux de Voltaire (tableau 10, page 46) : En décru, le coefficient multiplicatif a gagné un ordre 10, et le coefficient puissance est plus bas.

Du point de vue statistique, ces résultats sont encourageants, même si l'ampleur des phénomènes observés est préoccupante. Nous calculons la relation pour les deux décrues dont les données ont été fusionnées et représentons les trois courbes simultanément :

Estimation centrale (dégrues fusionnées) : $C \text{ (g/l)} = 0,064 \times QI^{0,56}$ [$r^2 = 0,96$]

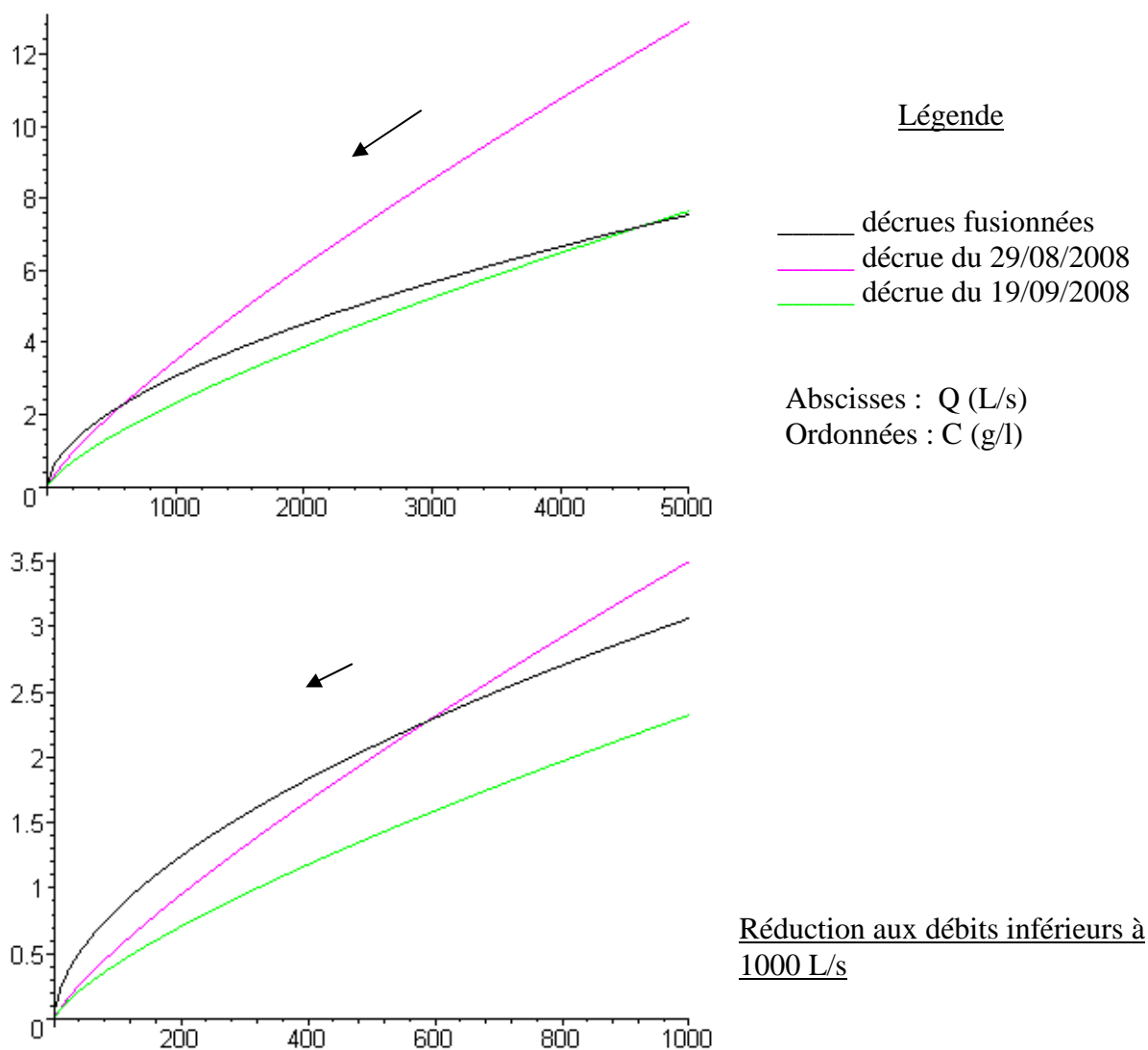


Figure 30 – Concentration en MES/débit - Courbes d'ajustement en décrue, Gashette

A ce stade, il est intéressant de comparer les ajustements sur Voltaire et Gashette.

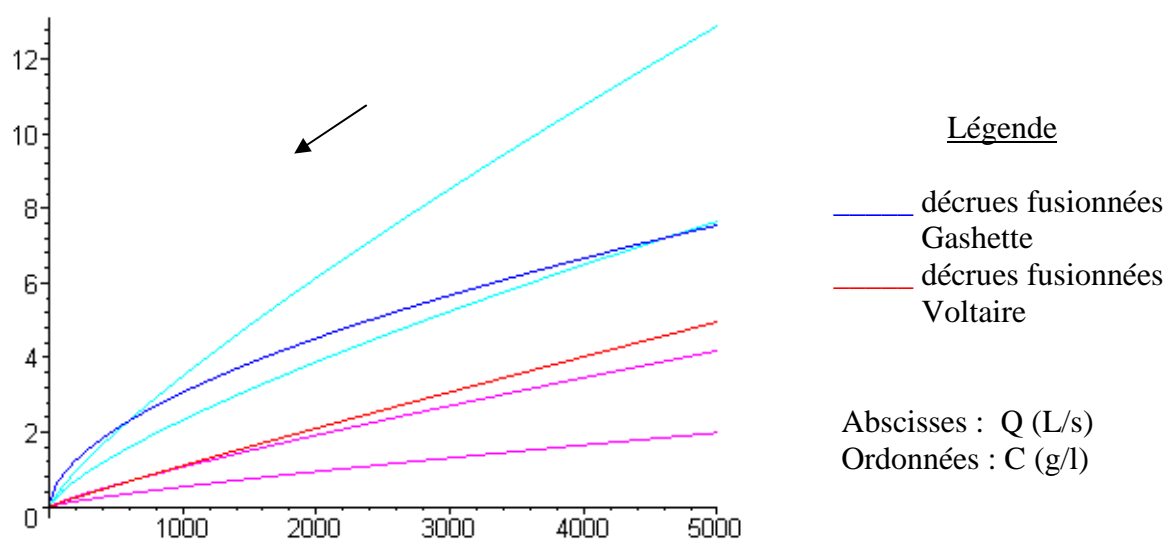


Figure 31 – Comparaison des relations concentration MES/débit, Gashette et Voltaire

Même avec nos incertitudes de mesure relativement élevées, les deux stations révèlent des tendances propres. Les deux courbes fusionnées se rejoignent à un point virtuel légèrement supérieur à 13 000 L/s, c'est-à-dire suffisamment éloigné pour considérer le parallélisme des deux fonctions entre une zone critique voisine de 2000 L/s et la borne supérieure des débits, voisine de 5000 L/s.

Retour sur le modèle d'analyse de risque :

A un débit instantané de 5000 L/s, la relation calculée pour Gashette amène une concentration en MES de 7,54 g/l et la relation de Voltaire une concentration de 4,95 g/l, soit une différence de 2,59 g/l.

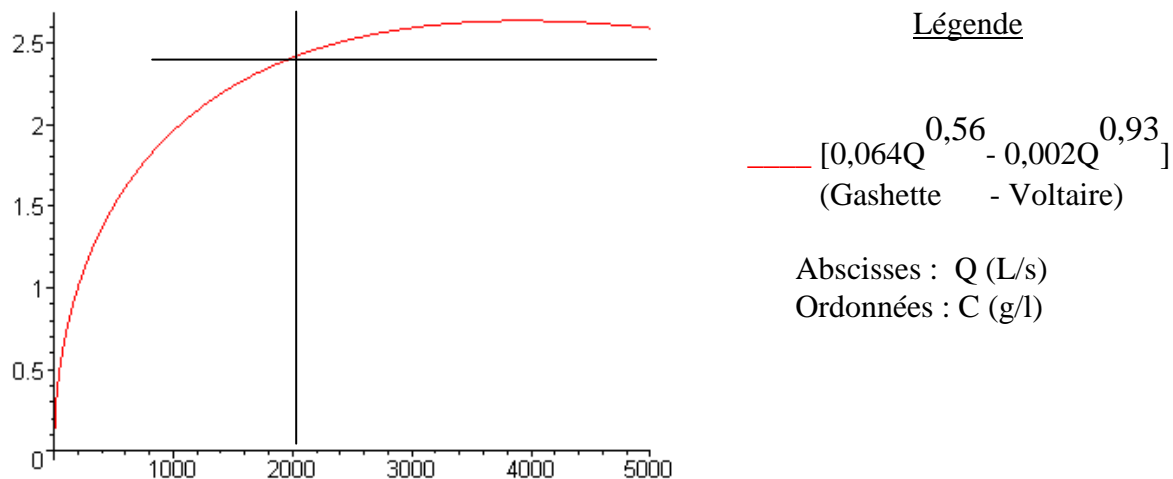


Figure 32 – Différentiel de concentration en fonction du débit [Gashette – Voltaire]

Cette courbe, établie pour deux versants de dimensions, de pentes et de pluviométries comparables, montre que :

- 1- les réponses des versants se différencient assez rapidement, dès les premières élévations du débit au dessus du débit critique de début de transport.
- 2- plus l'évènement climatique est important, et plus les réponses sont différenciées, jusqu'à une plage critique de débits, voisins de 2000 L/s dans notre cas, où la différenciation est clairement établie et n'évolue plus.

Cela détermine une plage de débits critiques voisins de 2000 L/s dans notre cas, à partir de laquelle les réponses exprimées en concentrations de MES sont clairement différenciées. **Il y a dans ce résultat la mesure possible d'un indicateur significatif de la vulnérabilité du bassin versant.**

Entre septembre 2007 et octobre 2008, c'est-à-dire sur 14 mois, nous avons dénombré 13 évènements qui dépassent cette plage de débits critiques, donc 13 occasions de caractériser les vulnérabilités des deux bassins versants des rivières Gashette et Voltaire en comparaison.

Remarquons que les valeurs observées sur Gashette étaient plutôt proches de 25 g/l aux alentours de 5000 L/s (par rapport à 7,54 g/l calculé), mais celles de Voltaire n'ont pas dépassé 3,83 g/l aux alentours de 2000 L/s. Donc notre analyse ne maximise pas les valeurs

observées et cela contribue à démontrer la pertinence de ces rapprochements. Le retard du pic de concentration sur le pic de crue est intégré dans l'ajustement.

Pouvons nous différencier la vulnérabilité structurelle de la vulnérabilité conjoncturelle ? Sur deux occurrences de crue, ce n'est pas possible. Nous ne pouvons que regretter à ce stade de ne pas disposer des enregistrements en continu de la turbidité. Nous aurons donc tendance à considérer que les deux événements échantillonnés approchent la vulnérabilité structurelle.

335 Crue du 31/07/2008, station Mansarde aval

3350 Paragraphe liminaire, débits critiques de début de transport

Avec la station Mansarde, nous abordons un point de mesure caractérisé par une grande échelle spatiale, 3,70 ha. A ce stade de l'exposé, nous devons calculer les débits critiques de début de transport pour mettre en évidence que du point de vue du transport solide, la station Mansarde n'est pas comparable sans précautions aux deux autres points de mesure :

Les débits solides observables dans les rivières Gashette et Voltaire sont de l'ordre de 0,01 L/s (donnée empirique relative à nos observations). Nous appliquons la relation (3) présentée au paragraphe 330, et pour différentes valeurs des coefficients de régression nous obtenons les débits critiques de début de transport :

	Gashette	Voltaire
Hypothèse basse	84 L/s	195 L/s
Hypothèse centrale	61 L/s	137 L/s
Hypothèse haute	50 L/s	111 L/s

Nous observons que les débits critiques de début de transport de Gashette et Voltaire correspondent aux débits maximaux mesurés à Mansarde aval (de l'ordre de 80 L/s). Même s'il est arrivé que des concentrations de l'ordre du centième de gramme par litre aient été mesurées à des débits inférieurs dans les rivières Gashette et Voltaire, cela n'est pas suffisant pour remettre en cause les limites inférieures de l'approche hydraulique.

Nous en déduisons que les courbes d'ajustement de la station Mansarde ne pourront pas être comparées simplement à celles des deux autres stations, mais nous verrons au paragraphe 3372 qu'il y a tout de même un intérêt à le faire.

Sur Mansarde, nous avons observé un transport solide dès le premier débit de la ravine. Nous considérerons donc dans ce cas particulier un débit critique de début de transport proche de zéro. Dans l'hypothèse où nous fixerions à Mansarde un seuil de débit solide à 0,001 L/s, nous trouverions les débits critiques de début de transport suivants : Hypothèse basse 10,6 L/s, centrale 7,3 L/s et haute 5,9 L/s, calculés pour l'ordre de grandeur.

D'autres raisons nous conduisent à penser que les mesures ponctuelles effectuées sur Mansarde ne peuvent pas être facilement comparées à celles des deux autres stations, notamment la distribution non nécessairement gaussienne et par trop discontinue des événements hydrologiques à cette échelle d'observation.

3351 La crue du 31/07/2008, Mansarde aval

Points de mesure

Mansarde aval		MES	
31/07/2008		diamètre >0,45 µ	
Décrue		m/v = 2650 g/l	
Heure:minute	QI (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
11:23	38.83	3.87	0.0566999
12:25	5.35	0.61	0.0012311
12:46	3.27	0.33	0.0004078
13:12	1.97	0.19	0.0001416
16:46	0.09	0.05	0.0000018

Tableau 15 – Points de mesure, Mansarde aval, crue du 31/07/2008

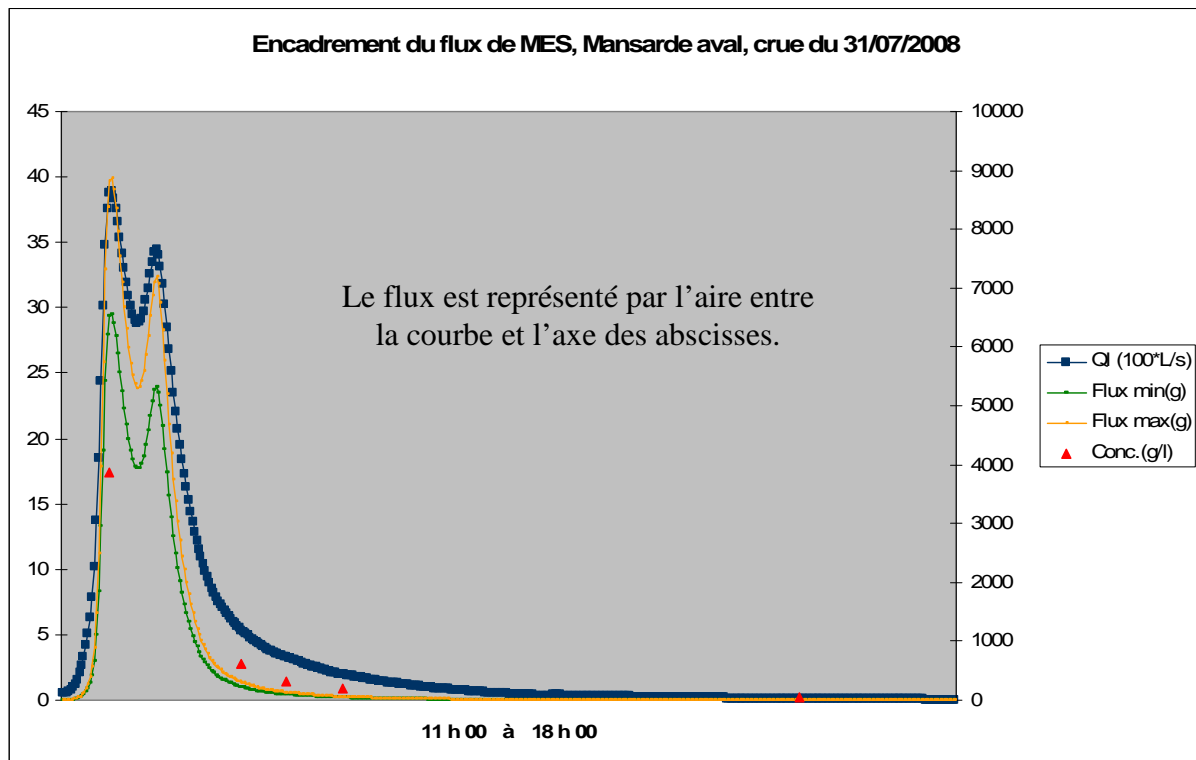


Figure 33 – Encadrement du flux de MES et points de prélèvement
Mansarde aval, crue du 31/07/2008

Relations fonctionnelles, décrue deuxième pic :

Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,188 \times QI^{0,71}$ [$r^2 = 0,97$]

Estimation basse : $C \text{ (g/l)} = 0,094 \times QI^{0,71}$ [$r^2 = 0,97$]

Estimation haute : $C \text{ (g/l)} = 0,282 \times QI^{0,71}$ [$r^2 = 0,97$]

Les coefficients multiplicatifs ont gagné un facteur 10 en ordre de grandeur en comparaison de ceux de Gashette.

Nous analysons les flux de MES en comparaison de ceux de la station Voltaire car l'épisode pluvieux du 31/07/2008 le permet, ce dont nous nous assurons en comparant au préalable les deux averses qui déclenchent les crues :

	Mansarde aval	Voltaire
Pluie (mm) de l'averse	33,0	35,5
Intensité (mm/h)	8,05	8,80
Début de l'averse	8 :14	8 :18
Fin de l'averse	12 :20	12 :22
averse au recueil des données	n°308, M.aval, page 17	n°328, Voltaire page 17

Tableau 16 – Pluies et averses comparées sur Voltaire et Mansarde, le 31/07/2008

Les flux de MES sont présentés ainsi : [**valeur de Mansarde av.** / **valeur de Voltaire**]

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage 7 heures et 3,70 ha	0,09 /7,45 t	0,18 /11,17 t	0,27 /18,61 t
tonnage par ha	0,02 /0,11 t/ha	0,05 /0,17 t/ha	0,07 /0,28 t/ha
Kg/ha/heure	3,5 /16 kg/ha/h	7 /24 kg/ha/h	10,5 /40 kg/ha/h

Tableau 17 – Flux de MES comparés (Durée : 7 heures), 31/07/2008

Les valeurs spécifiques (tonnes /ha) traduisent un facteur 4 à l'avantage de la station Voltaire ; les flux concentrés par les cours d'eau entretiennent avec la surface intégrée au point de mesure une relation non explicite illustrée par la figure 34 et l'annexe 6 à laquelle il est conseillé de se reporter pour la bonne intelligence des termes employés.

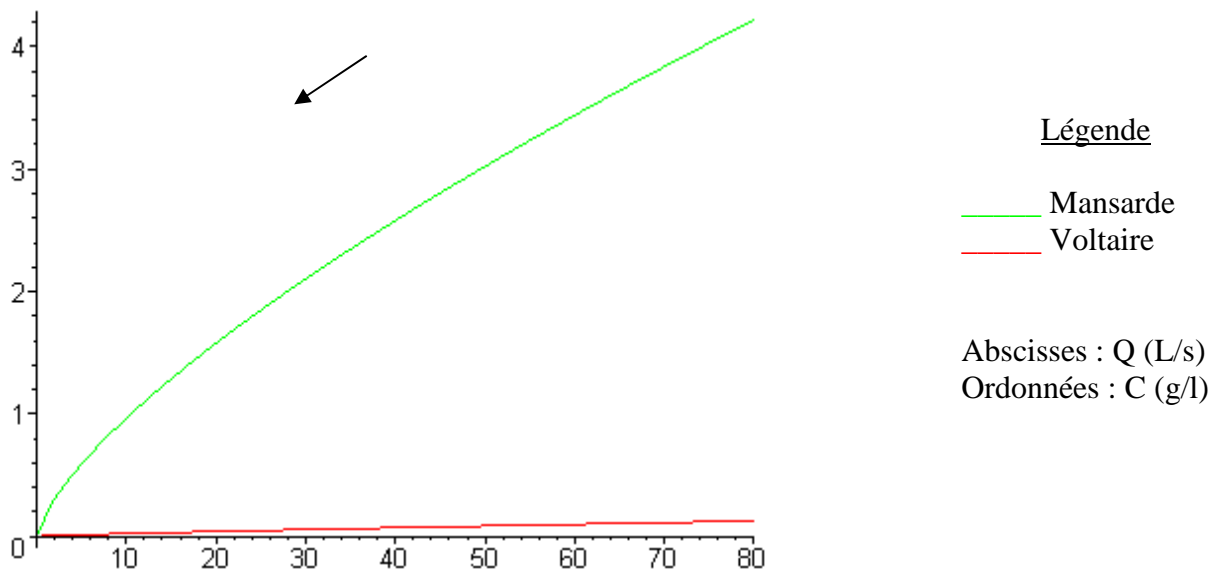


Figure 34 – Comparaison des courbes concentration/débit des stations Mansarde aval et Voltaire pour deux événements pluvieux similaires, en dessous de 80 L/s

Tandis que la rivière Voltaire serait en régime d'eau claire, la ravine Mansarde concentrerait un flux de MES. En réalité, les échelles d'observation sont difficilement comparables avec les méthodes que nous utilisons. Cependant, nous concevons le continuum des dynamiques d'érosion aux différentes échelles, illustré par les figures 19 et 33 qui sont superposables aux unités près. Nous sommes donc en panne de représentation.

336 Crue du 29/08/2008, station Mansarde aval

10 prélèvements ont été analysés, mais 4 ont pu être rattachés à un débit instantané mesuré.

Mansarde aval
29/08/2008
Décrue

MES
diamètre >0,45 µ **m/v = 2650 g/l**

Heure:minute	QI (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
11:59	22.60	0.65	0.0055434
12:18	10.74	0.46	0.0018643
13:09	3.53	0.34	0.0004529
16:53	3.79	0.22	0.0003146

Tableau 18 – Points de mesure, Mansarde aval, crue du 29/08/2008

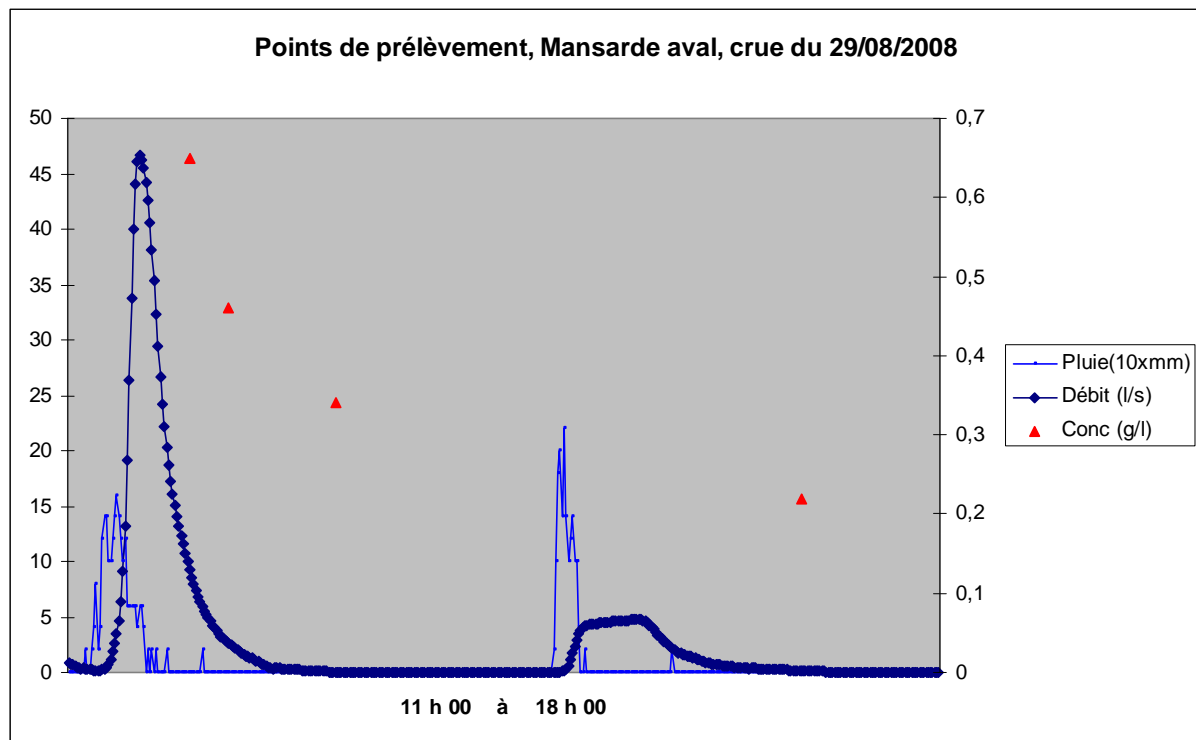


Figure 35 – Points de prélèvement, Mansarde aval, crue du 29/08/2009

Remarque : sur la figure 35, les relations pluie/débit sont difficiles à expliquer quantitativement : on ne comprend pas pourquoi le deuxième pic n'est pas davantage accéléré. Nous devons suspecter un mauvais fonctionnement de la mesure automatisée ou un débordement du canal Venturi, sans possibilité de conclure à une erreur de mesure.

Relations fonctionnelles, décrue premier pic :

$$\text{Estimation centrale : } C \text{ (g/l)} = 0,150 \times QI^{0,47} \quad [r^2 = 0,91]$$

$$\text{Estimation basse : } C \text{ (g/l)} = 0,075 \times QI^{0,47} \quad [r^2 = 0,91]$$

$$\text{Estimation haute : } C \text{ (g/l)} = 0,220 \times QI^{0,47} \quad [r^2 = 0,91]$$

Le coefficient multiplicatif de Mansarde semble suivre une tendance qui lui est propre par rapport à Voltaire (Tableau 10) et Gashette (Tableau 14).

Nous comparons à dessein les deux crues déjà analysées. [31/07/2008 | 29/08/2008], décrues

	Coefficients multiplicatifs	Coefficients puissance
Hypothèse centrale	0,188 0,150	0,71 0,47
Hypothèse basse	0,094 0,075	
Hypothèse haute	0,282 0,220	

Tableau 19 – Comparaison des relations fonctionnelles en décrue, Mansarde aval

L'évolution des coefficients puissance rejoint la tendance du charriage sur Mansarde (paragraphe 31) : nous observons un épuisement progressif des matériaux disponibles pendant la saison des pluies, tendance qui sera confirmée par le calcul des flux de MES

Flux de MES

La comparaison d'événements survenant à des dates différentes est délicate, car les conditions initiales et les conditions de pluie ne sont pas nécessairement comparables. Nous examinons donc l'averse qui a déclenché la crue (recueil des données, station Mansarde aval, page 17, n°343), soit 35 mm en 1 h et 46 minutes pour une intensité de 19,81 mm/h. L'averse du 31/07/2008 avait connu 33 mm en 4 h et 6 minutes, soit une intensité de 8,05 mm/h.

Sur Mansarde, nous appliquons les relations fonctionnelles de décrue à la montée. Cette approximation n'a pas une grande incidence, compte tenu du temps relatif très court de la montée (44 minutes = 10 % de la durée totale) et de la période hors d'eau (2 heures, soit près de 30 % de la durée totale).

Les cases du tableau sont organisées ainsi :

[Mansarde av. 29/08/2008/ Mans. av. 31/07/2008 / Voltaire 31/07/2008]

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage 7 heures et 3,70 ha	0,02 / 0,09 /7.45 t	0,05 / 0,18 /11.17 t	0,09 / 0,27 /18.61 t
tonnage par ha	0, 01 / 0,02 /0.11 t/ha	0,01/ 0,05 /0.17 t/ha	0, 02/ 0,07 /0.28 t/ha
Kg/ha/heure	0, 89 / 3,5 /16 kg/ha/h	1, 79 / 7 /24 kg/ha/h	3, 36 / 10,5 /40 kg/ha/h

Tableau 20 – Flux de MES comparés (Durée : 7 heures)

Les valeurs plus faibles observées le 29/08/2008 peuvent trouver plusieurs interprétations :

- Les flux de MES de Mansarde tendent à diminuer avec la saison des pluies probablement par appauvrissement du stock de matériaux érodibles.
- La durée de la pluie, 4 fois plus longue le 31/07/2008 pour le même volume de pluie est plus déterminante que son intensité, compte tenu de la forte infiltrabilité du sol (voir étude des transferts de pesticides, figure 39, page 64).
- La distribution des transferts de matières en suspension est trop aléatoire pour confirmer une tendance sur deux ensembles de mesures séparées d'un mois, ceci mis en relation avec la petite surface intégrée au point de mesure.

Une dernière crue sera étudiée sur Mansarde Aval, davantage échantillonnée, pour confronter ces résultats (paragraphe 337).

337 Crue du 01/12/2008, station Mansarde aval

3371 Analyse de la crue du 01/12/2008, Mansarde aval

Points de mesure

Mansarde aval 01/12/2008		MES diamètre >0,45 µ m/v = 2650 g/l	
Heure:minute	Ql (L/s)	Concentration (g/l)	Qs (L/s)
Montée			
10:30	3.44	0.15	0.0002
10:48	3.44	0.15	0.0002
11:07	4.18	0.19	0.0003
11:21	5.01	0.31	0.0006
11:23	6.45	0.44	0.0011
11:26	10.81	0.60	0.0024
11:27	13.29	0.71	0.0036
11:28	16.67	0.97	0.0061
11:33	39.29	1.09	0.0162
Décru			
11:36	41.33	1.11	0.0174
11:58	24.03	0.42	0.0038
12:08	16.25	0.36	0.0022
12:19	11.07	0.38	0.0016
Montée			
13:17	5.16	0.24	0.0005
13:25	9.10	0.26	0.0009

Tableau 21 – Points de mesure, Mansarde aval, crue du 01/12/2008

Relation concentration/débit

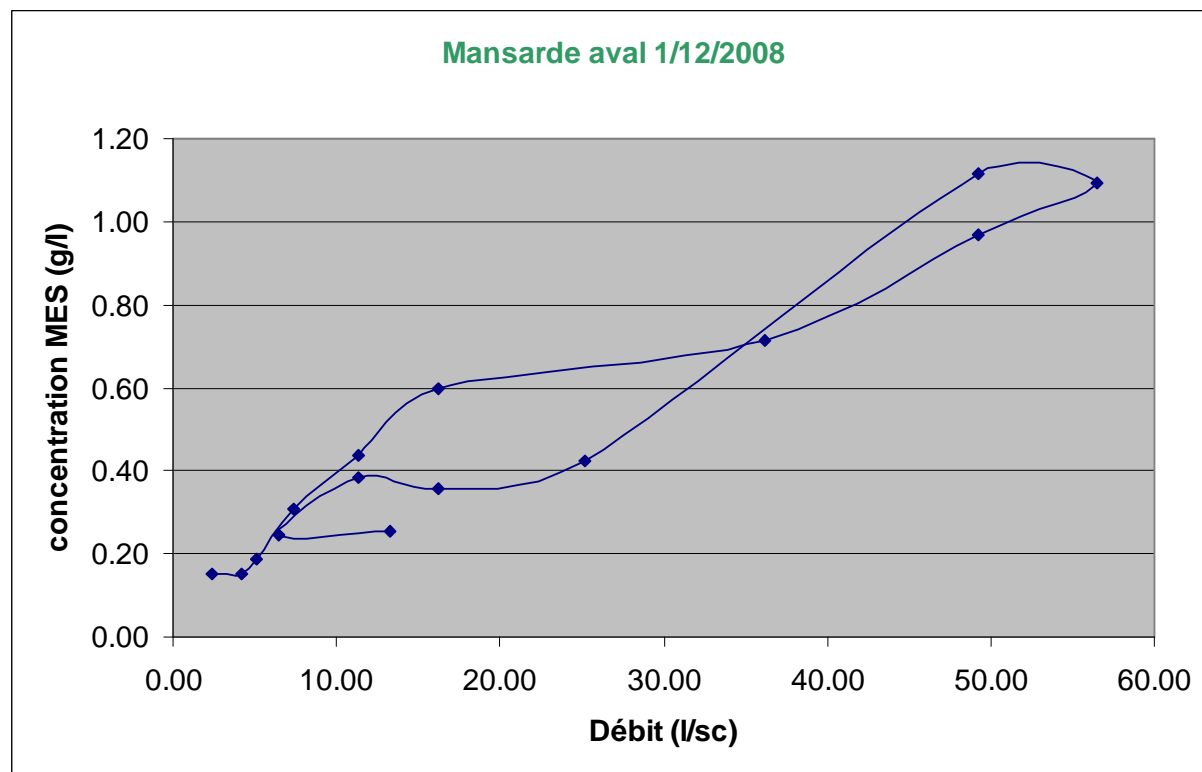


Figure 36 – Concentration/débit, Mansarde aval, crue du 01/12/2008

La courbe (figure 36) n'est pas franche et oscille entre l'hystérésis et un huit incertain. Ce type de courbe manifeste des irrégularités de concentration en décrue et peut être associé à des événements conjoncturels tels que des éboulements qui alimentent le cours d'eau sous l'action de fortes pluies.

Avant d'aller plus avant dans l'analyse, nous présentons les concentrations des points de prélèvement (Figures 37). Un seul pic a été échantillonné, qui pour comparaison avec les situations précédentes a été sélectionné avec 7 heures.

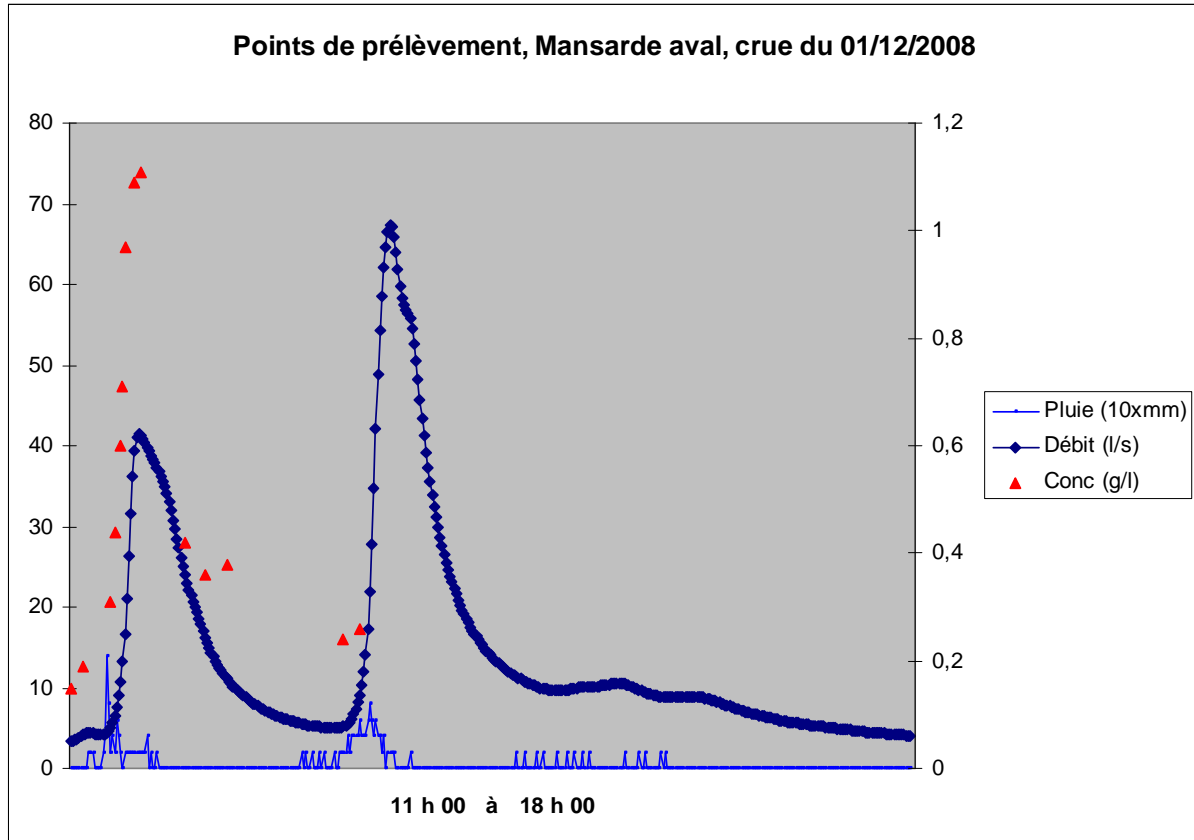


Figure 37 – Points de prélèvement, Mansarde aval, crue du 01/12/2008

Montée premier pic :

$$\text{Estimation centrale : } C \text{ (g/l)} = 0,063 \times QI^{0,88} \quad [r^2 = 0,95]$$

$$\text{Estimation basse : } C \text{ (g/l)} = 0,031 \times QI^{0,88} \quad [r^2 = 0,95]$$

$$\text{Estimation haute : } C \text{ (g/l)} = 0,094 \times QI^{0,88} \quad [r^2 = 0,95]$$

Descrue premier pic :

$$\text{Estimation centrale : } C \text{ (g/l)} = 0,043 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,86]$$

$$\text{Estimation basse : } C \text{ (g/l)} = 0,021 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,86]$$

$$\text{Estimation haute : } C \text{ (g/l)} = 0,064 \times QI^{0,82} \quad [r^2 = 0,86]$$

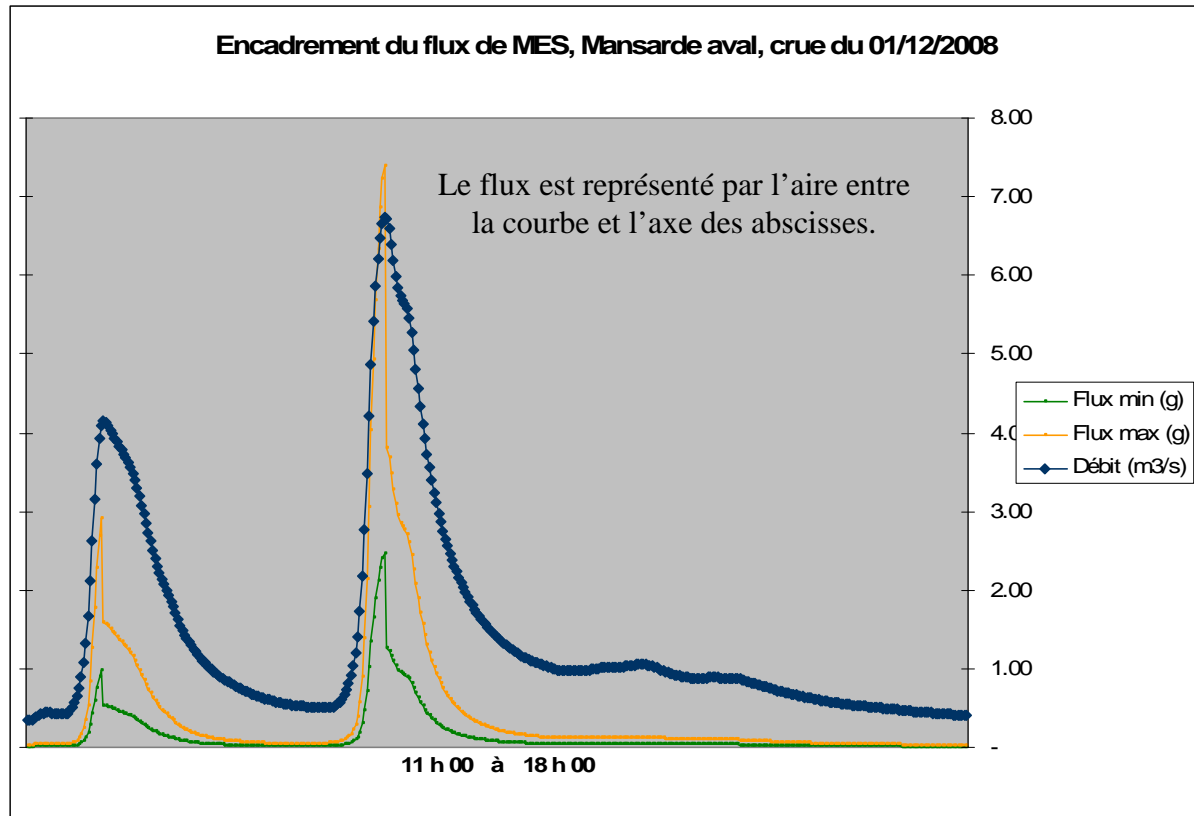


Figure 38 – Encadrement du flux de MES, Mansarde aval, 01/12/2008

La montée de crue du 01/12/2008 est la seule échantillonnée sur Mansarde ; elle souffre d'éléments de comparaison, mais dure 60 minutes et porte sur 9 points.

Flux de MES

Puisque seul le premier pic a été échantillonné, nous procédons à deux estimations du flux de MES : 1- Sans épuisement des matériaux disponibles et 2- Avec épuisement au terme de la première décrue :

Estimation sans épuisement

Les cases du tableau sont organisées ainsi :

[Mansarde av. 01/12/2008 /Mansarde av. 29/08/2008/ Mans. av. 31/07/2008

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage 7 heures et 3,70 ha	0,62 / 0,02 / 0,09 t	1, 24 / 0,05 / 0,18 t	1,86 / 0,09 / 0,27 t
tonnage par ha	0,17 / 0, 01 / 0,02 t/ha	0,34 / 0,01/ 0,05 t/ha	0,50 / 0, 02/ 0,07 t/ha
Kg/ha/heure	24 / 0, 89 / 3,5	48 / 1, 79 / 7	72 / 3, 36 / 10,5

Tableau 22 – Flux de MES comparés (Durée : 7 heures), Mansarde aval

Estimation **avec épuisement**

Les cases du tableau sont organisées ainsi :

[Mansarde av. 01/12/2008 /Mansarde av. 29/08/2008/ Mans. av. 31/07/2008

	Hypothèse basse	Hypothèse centrale	Hypothèse haute
tonnage7 heures et 3,70 ha	0,17 / 0,02 / 0,09 t	0,34 / 0,05 / 0,18 t	0,52 / 0,09 / 0,27 t
tonnage par ha	0,05 / 0, 01 / 0,02 t/ha	0,09 / 0,01/ 0,05 t/ha	0,14 / 0, 02/ 0,07 t/ha
Kg/ha/heure	7 / 0, 89 / 3,5	13 / 1, 79 / 7	20 / 3, 36 / 10,5

Tableau 23 – Flux de MES comparés (Durée : 7 heures), Mansarde aval

Rappel - [Voltaire 31/07/2008 / Voltaire 11/10/2008]

	<i>Hypothèse basse</i>	<i>Hypothèse centrale</i>	<i>Hypothèse haute</i>
<i>tonnage7 heures et 66 ha 50</i>	<i>3,24 /7.45 t</i>	<i>8,11 /11.17 t</i>	<i>11,81 /18.61 t</i>
<i>tonnage par ha</i>	<i>0,05 /0.11 t/ha</i>	<i>0,12 /0.17 t/ha</i>	<i>0,18 /0.28 t/ha</i>
<i>Kg/ha/heure</i>	<i>7 /16 kg/ha/h</i>	<i>17 /24 kg/ha/h</i>	<i>25 /40 kg/ha/h</i>

Flux de MES (Durée : 7 heures), voltaire

Les flux de MES de la troisième crue observée sur Mansarde aval se distinguent nettement, tout en se rapprochant de ceux de Voltaire.

Les flux importants de MES du 01/12/2008 sur Mansarde surviennent en fin de saison des pluies. La théorie de l'épuisement des matériaux est mise à mal. Toutefois, nous nous souvenons de la courbe « en huit » examinée en début de paragraphe. Les deux faits réunis (1) courbe concentration/débit en huit et (2) des flux élevés, nous conduisent à penser que des éboulements se sont produits et ont alimenté spécifiquement cette crue. Effectivement, l'épisode survient dans une séquence de quatre averses caractéristiques des crues de classe 10 : 13,4 mm, 33,0 mm, 17 mm et 14,2 mm pour des intensités, respectivement 3,35 ; 5,45 ; 9,53 ; et 4,71 mm/h. C'est la troisième averse d'intensité 9,53 mm/heure qui déclenche la crue. Les 4 averses sont survenues entre le 30/11/2008 12 h 55 et le 01/12/2009 15 h 57. (voir le recueil des données, station Mansarde aval, page 19, averses n° 473 à 476). **L'hypothèse d'une alimentation localisée de la crue en MES est probable.** L'évènement extrême du 04/05/2009 (200 à 480 mm en quelques heures selon les lieux) démontrera par de nombreux éboulements la fragilité de cette zone plantée en banane, également repérée comme zone à risque érosif élevé lors du travail de cartographie réalisé par Kevin PINTE, Cemagref-PRAM, en 2006. **De ce fait, les flux spécifiques de Mansarde ont rattrapé ceux de la station Voltaire**, même avec une hypothèse la plus basse, les deux estimations les plus faibles sur Mansarde et Voltaire sont égales : 7 kg/ha/heure de MES déplacées.

Cette situation confirme deux hypothèses déjà évoquées :

- L'échelle d'observation de la station Mansarde est trop grande (caméra placée bas) pour garantir une distribution suffisamment gaussienne des phénomènes érosifs consécutifs aux pluies. Cette échelle d'observation supporte donc mal les trous de mesure.
- Les aléas de forte intensité différencient les vulnérabilités, notamment les vulnérabilités structurelles, **en accentuant l'effet de surface** et par conséquent en diminuant l'influence de la surface intégrée au point de mesure (voir annexe 6).

3372 Etude comparative des ajustements

Nous reprenons la comparaison des trois décrues sur Mansarde.

Les cases du tableau sont organisées ainsi :
[valeur du 31/07/2008 | valeur du 29/08/2008 | valeur du 01/12/2008] – Décrues

	Coefficients multiplicatifs	Coefficients puissance
Hypothèse centrale	0,188 0,150 0,043	0,71 0,47 0,82
Hypothèse basse	0,094 0,075 0,021	
Hypothèse haute	0,282 0,220 0,064	

Tableau 24 – Relations fonctionnelles comparées en décrue, Mansarde aval

Nous calculons la relation fonctionnelle des décrues fusionnées. Deux points extrêmes ont été retirés. Estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,148 \times Q^{0,44}$ [r² = 0,95]

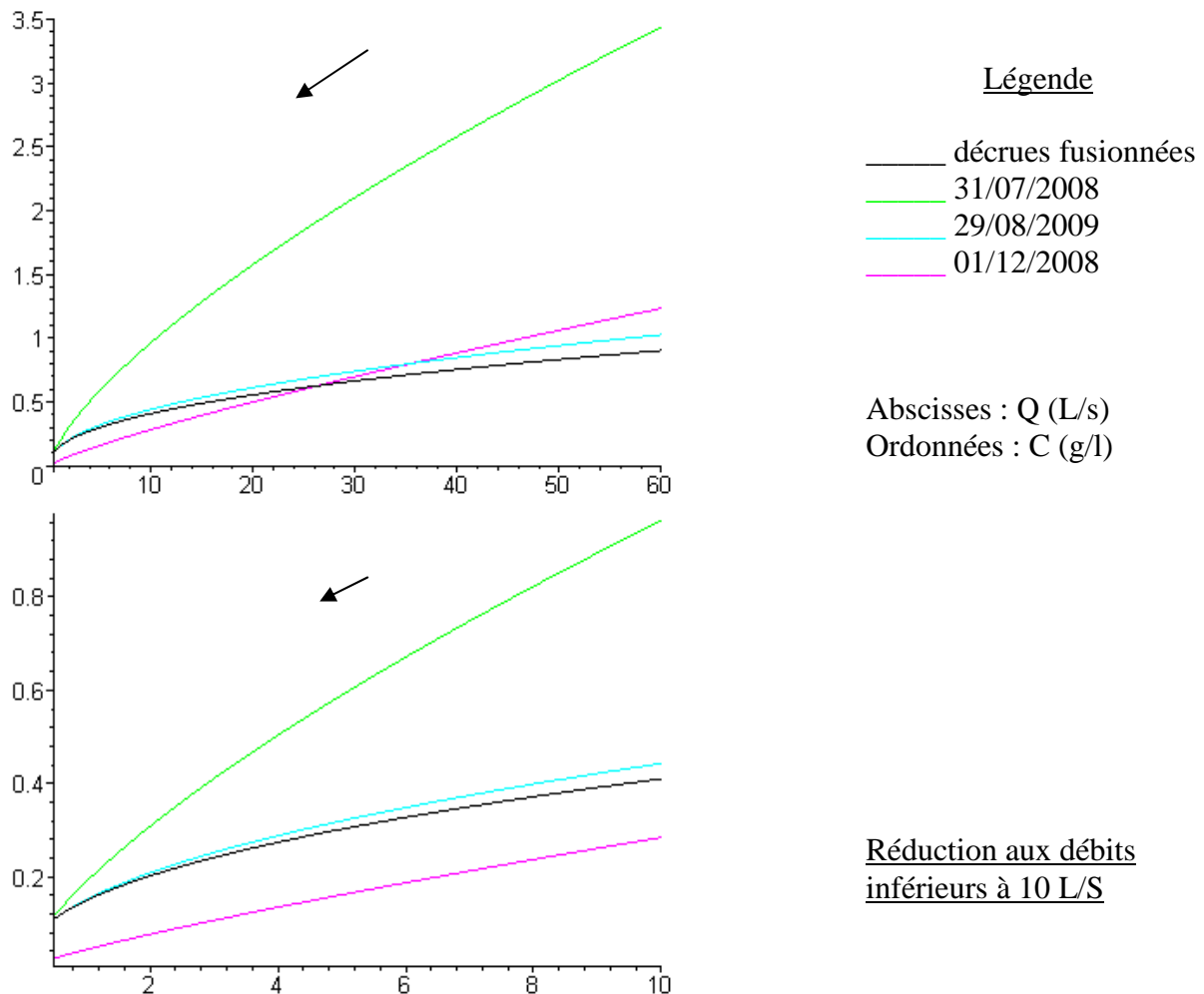


Figure 39 – Relations fonctionnelles, décrue, Mansarde aval

Nous observons qu'il n'y a pas de relation évidente entre la forme de la courbe et l'importance de l'évènement mesuré par le flux de MES : l'évènement du 01/12/2008, le plus important en flux, n'est pas le plus concentré.

Par contre, les concentrations peuvent être mises en relation avec les hypothèses que nous avons avancées : L'évènement du 31/07/2008 apparaît comme le plus chargé au départ et correspond à celui qui, selon nos hypothèses, devrait disposer d'un stock de matériau disponible le plus important au démarrage de l'évènement, comparativement aux deux autres.

Comparaison des trois stations de mesure (Mansarde aval, Gashette et Voltaire)

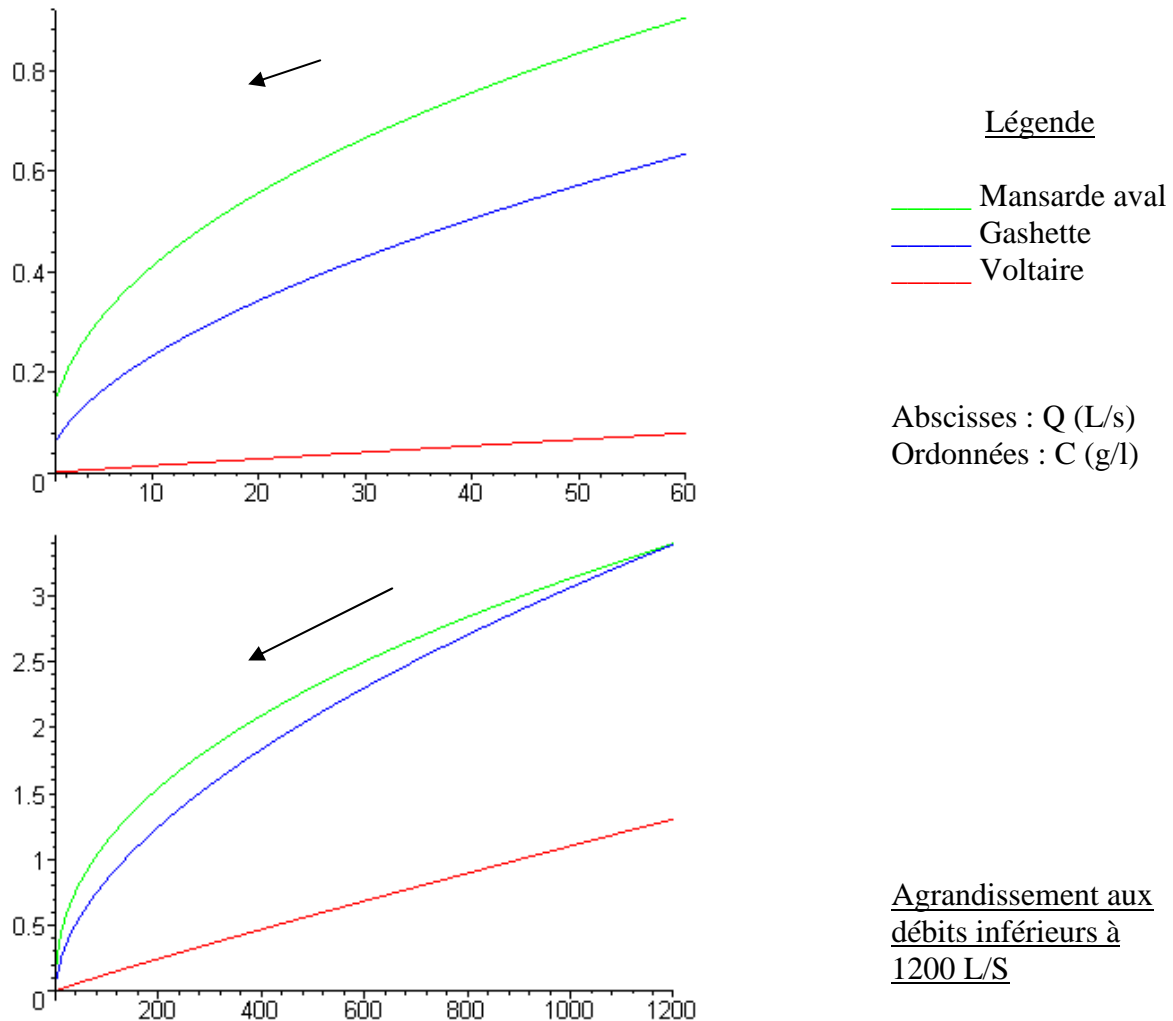


Figure 40 – Relations fonctionnelles des décrues aux trois stations

Comme nous l'avons déjà souligné, les classes de débit de Mansarde n'ont pas de commune mesure avec celles de Gashette et Voltaire. Pourtant, cet exercice de comparaison n'est pas purement théorique : Il signale une parenté entre les courbes de Gashette et de Mansarde qui sont deux versants à usage agricole, tandis que Voltaire est un versant occupé par l'habitat diffus. Nous retrouvons cette tendance dans les progressions inverses des coefficients **a** et **b**, c'est pourquoi nous rappelons les valeurs calculées pour les trois stations en décrue :

Mansarde av., décrues fusionnées, estimation centrale $C \text{ (g/l)} = 0,148 \times Q^{0,44}$ [$r^2=0,95$]

Gashette, décrues fusionnées, estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,064 \times Q^{0,56}$ [$r^2 = 0,96$]

Voltaire, décrues fusionnées, estimation centrale : $C \text{ (g/l)} = 0,002 \times Q^{0,93}$ [$r^2 = 0,96$]

Autrement dit les relations fonctionnelles donnent une indication sur la vulnérabilité à l'érosion, en relation avec les cinétiques du transport solide. La première accélération semble caractériser l'évènement.

Si ce résultat était confirmé, il serait pertinent de classer les versants en fonction d'un indice de vulnérabilité à l'érosion calculé à partir des coefficients de la régression concentration/débit ou plus généralement à partir des paramètres de la cinétique du transport.

Nous donnons un exemple simplifié sur la base des valeurs obtenues : les coefficients **b** décrivent des classes différenciées par un ordre 10 (0,1 ; 0,01 et 0,001) tandis que les coefficients **a** décrivent des classes différenciées par un point d'ordre 0,1 (0,1 ; 0,2 ; 0,3 etc). En retenant l'hypothèse de trois classes de coefficient **b** et 9 classes de coefficient **a**, les relations concentration en MES/débit en décrue permettent de classer la vulnérabilité des versants en $3 \times 9 = 27$ classes de vulnérabilité. Les usages peuvent alors être mis en relation avec une famille de classes.

Usages agricoles

b \ a	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1				Mans.av.					
0,01					Gashette.				
0,001									Voltaire.

Habitat diffus

Tableau 25 – Exemple de classification des bassins versants
sur un critère de relation concentration/débit

Nous avons donc décrit une séquence de sept crues dont nous prolongeons l'analyse au paragraphe 341.

34 Chronique annuelle du transport solide

Dans cette partie, notre objectif est de produire une première évaluation annuelle et quantitative du transport solide en suspension. Nous commençons par tirer les enseignements du paragraphe 33 (paragraphe 341), puis nous examinons la question des régimes critiques de transport (paragraphe 342), enfin, nous procédons à plusieurs simulations pour aboutir à des estimations annuelle pour deux des trois sites instrumentés (paragraphe 343). De la même manière que pour l'évaluation des transferts de pesticide, nous nous appuyons sur l'enregistrement en continu des événements hydrologiques d'un cours d'eau pour évaluer son transport solide annuel.

341 De la manière de poser le problème

La séquence des 7 crues que nous avons examinée au paragraphe 33 nous a permis de tirer quelques enseignements généraux et questions utiles :

Certains transports solides répondent à de simples mécanismes de concentration en montée de crue (paragraphe 331). Dans la mesure où ces mécanismes seraient majoritaires sur une année, cela pourrait justifier qu'on ignore les autres dans un calcul de tendance, pour in fine généraliser les régressions calculées sur quelques événements seulement. Est-ce justifié ?

Des mécanismes d'épuisement des matériaux disponibles sont observés à différentes échelles de temps :

- A l'échelle de l'évènement de crue (paragraphe 334)
- A l'échelle saisonnière (paragraphe 31, 335 et 336)

Peut-on modéliser les stocks de matériaux érodibles dont les reconstitutions et les consommations seraient prévisibles à différentes échelles spatio-temporelles ? Cela n'est pas tout à fait le concept de « surface contributive » utilisé en érosion, mais cela y ressemble sous une autre forme. Les échelles d'observation aussi grandes que celle appliquée à Mansarde correspondent-elles à ce type de préoccupation ?

Des mobilisations de matériaux surviennent sans qu'on puisse réellement les prévoir à court terme :

- A partir du lit du cours d'eau (paragraphe 332)
- A partir du versant (paragraphe 337)

Quels que soient les modèles qui pourraient être construits, le facteur aléatoire ne pouvant pas être éliminé doit y être intégré. Faut-il dans ce cas privilégier les approches statistiques et oublier la description des déterminismes purs ? Nous pensons à l'hydraulique torrentielle en particulier, discipline à tendance dure, qui, nous devons le faire remarquer, par nécessité et pragmatisme a été largement influencée par les méthodes plus molles de l'hydrologie. La réponse à cette question influence directement les échelles d'observation et la pression de mesure.

Chaque bassin versant semble caractérisé par une réponse quantitative et cinétique qui lui est propre, liée à l'utilisation du sol d'une part, à la surface intégrée par le point de mesure d'autre part (paragraphe 3372). Faut-il mesurer tous les bassins versants et leurs cours d'eau ? Quelle serait la pérennité de telles références en regard des dynamiques d'aménagement ?

Les crues sont individuellement mesurables, mais globalement très variables (quelques minutes à quelques jours). Cela signifie que la mesure des crues est une entrée pertinente à condition de toutes les enregistrer. Cela est d'autant plus vrai que l'échelle d'observation est grande (caméra placée bas). Ce point de vue doit être nuancé à partir de l'analyse des classes de débit qui a été conduite dans l'« Etude des transferts de pesticides », page 79. Une certaine représentativité de courtes séquences saisonnières pourrait être évaluée à partir d'une distribution annuelle des débits instantanés.

Au risque d'énoncer une évidence, nous dirons que le transport solide est d'abord déterminé par un aléa climatique, la pluie ; mais considérer la pluie seulement n'est pas suffisant. Il nous faut représenter la pluie en interaction avec un milieu vulnérable. C'est la représentation de cette interaction qui nous gêne parce que nous ne savons pas à quelles échelles la mesurer et la traduire. Nous donnons un exemple de représentation non classique pour montrer qu'une réflexion à ce niveau est utile : Nous pouvons par exemple assimiler la pluie à un **signal**, et le transport solide en cours d'eau à un **signal transformé**. La question posée est la suivante : comment le bassin versant et son cours d'eau associé transforment-ils le « signal pluie » en « signal transport solide » ? Par suite, nous inversons le point de vue en énonçant que **la transformation** du « signal pluie » en « signal transport solide » **caractérise le bassin versant**, et singulièrement sa vulnérabilité. Dès lors que nous saurions traduire ces concepts en mesures opérationnelles, nous disposerions d'un outil de gestion du risque érosif à travers l'interaction entre l'« aléa pluie » et la « vulnérabilité d'un milieu » et plus seulement à travers la probabilité de retour d'un aléa climatique. La précision obtenue par les mesures en continu des événements hydrologiques justifie ce type de réflexion.

A travers ces propos, nous avons voulu mettre en évidence la nécessité d'accentuer les recherches méthodologiques, singulièrement l'amélioration des représentations à partir des mesures opérationnelles, si nous voulons progresser sur le sujet de l'érosion vue à travers le prisme du transport solide.

342 De la manière de définir un régime critique de début de transport

Nous sommes confrontés à une question immédiate et simple : Nous disposons d'un enregistrement continu au pas de temps de la minute des événements de trois cours d'eau, mais d'un équipement très sommaire de régressions concentration/débit, construites essentiellement à partir de séquences d'événements climatiques plutôt forts. Ces relations sont-elles généralisables à toutes les classes d'évènement ? Cette question est celle de la détermination d'un seuil d'application, soit à des débits instantanés, soit à des crues, soit à des séquences de crues.

Formellement, cette question est équivalente à celle de la détermination du **débit critique de début de transport**, notion appartenant à l'hydraulique torrentielle.

Nous sommes limités par la faiblesse des jeux de données, mais de façon à avancer, nous formulons quatre hypothèses, et nous nous appuyons quand cela est nécessaire sur notre observation des cours d'eau, procédé que Maurice Meunier désigne par l' « approche naturaliste ».

L'hypothèse du débit solide minimum significatif

Tout au long du paragraphe 33, nous avons calculé les débits solides associés aux points de mesure en retenant arbitrairement une masse volumique des sédiments de 2650 g/l. L'examen de ces valeurs expérimentales est notre point de départ. A partir d'un ordre de grandeur d'un débit solide observable (**0,01 L/s** pour Gashette et Voltaire, **0,00 + ϵ L/s** pour Mansarde), **significatif par hypothèse**, nous pouvons calculer pour chaque régression un seuil de débit liquide que nous assimilerons au **débit critique de début de transport (Q_{cr})**. L'avantage de cette approche est d'obtenir des débits critiques qui ont la même signification pour toutes les stations. Les régressions en montée de crue ont été utilisées dans ce calcul pour respecter la logique du modèle de crue classique organisé autour d'un débit de pointe ; mais du point de vue de l'hydraulique et du sens donné au régime critique de début de transport qui s'inscrit dans le même gradient que le régime de plein transport, cela est discutable.

L'hypothèse du transport solide majoritaire en crue et négligeable à l'étiage

Cette hypothèse est justifiée par nos observations en suivi pseudo-continu des rivières Voltaire et Gashette qui sont en eau claire en dehors des crues ; mais aussi par la bibliographie (voir paragraphe 12, état de l'art et des connaissances) qui accrédite l'hypothèse d'un transport en suspension majoritaire en crue. Par surcroît, le flux d'eau en crue dans le flux annuel est précisément connu pour les trois cours d'eau grâce à nos mesures hydrologiques (« Etude des transferts de pesticides », **page 77**, tableau 20). Remarquons que la question de la distribution des MES entre l'étiage et les crues ne se pose pas dans les mêmes termes que pour les pesticides, car il n'y a pas de part soluble à considérer en transport solide. Les débits d'étiage seront donc tout simplement ignorés.

Sur Mansarde, nous avons observé une charge permanente en MES à l'étiage pendant les 6 mois où la ravine est en eau. Cette charge a été corrélée au transport de la Chlordécone adsorbée dans l'étude ad hoc à laquelle nous renvoyons le lecteur intéressé (« Gestion agro-environnementale intégrée du risque de contamination de la faune halieutique » **page 71**, graphique 7). Ici, nous négligeons cette fraction des MES.

L'hypothèse de la représentativité des régressions calculées (Gashette et Voltaire)

Nous fondons cette hypothèse sur la stabilité relative des relations calculées à partir de deux crues au moins par bassin versant. Nous avons vu que cette hypothèse n'est pas satisfaisante sur Mansarde compte tenu de sa petite dimension (paragraphe 337).

L'hypothèse de la compensation des facteurs aléatoires sur une année (Gashette et Voltaire)

Nous avons observé plusieurs phénomènes qui agissent en sens contraire et qui revêtent un caractère aléatoire : d'une part des mécanismes d'épuisement des matériaux disponibles à différentes échelles de temps et d'autre part des mécanismes de recharge, tels que les éboulements. Nous formulons l'hypothèse invérifiable que ces mécanismes contraires annulent leurs effets sur l'année. Nous les ignorons donc en soulignant que plus l'aire du bassin versant est grande et plus probable est cette hypothèse. Pour les mêmes raisons, cette hypothèse ne s'applique pas à Mansarde. Le cadre étant dressé, nous pouvons procéder aux évaluations (paragraphe 343).

343 De la manière d'estimer le transport solide en suspension

Nous précisons les hypothèses de calcul pour différents scénarii (paragraphe 3431) et donnons quelques commentaires (paragraphe 3432) avant de conclure (paragraphe 3433).

3431 Conduite des calculs

Les hypothèses permettent de préciser les valeurs suivantes :

Hypothèses « basses » (Mansarde est calculé pour mémoire en retenant un seuil $Q_s = 0,001$ L/s)

	Gashette	Voltaire	Mansarde aval
Qcr début transp. (L/s)	84	195	10,6
Montée de crue	b = 0,002 a = 1,14	b = 0,001 a = 0,93	b = 0,031 a = 0,88
Décruce	b = 0,007 a = 0,74	b = 0,001 a = 0,82	b = 0,075 a = 0,47

Hypothèses « centrales »

	Gashette	Voltaire	Mansarde aval
Qcr début transp. (L/s)	61	137	7,3
Montée de crue	b = 0,004 a = 1,14	b = 0,002 a = 0,93	b = 0,063 a = 0,88
Décruce	b = 0,014 a = 0,74	b = 0,003 a = 0,82	b = 0,150 a = 0,47

Hypothèses « hautes »

	Gashette	Voltaire	Mansarde aval
Qcr début transp. (L/s)	50	111	5,9
Montée de crue	b = 0,006 a = 1,14	b = 0,003 a = 0,93	b = 0,094 a = 0,88
Décruce	b = 0,020 a = 0,81	b = 0,005 a = 0,85	b = 0,282 a = 0,71

Tableau 26–Paramètres des hypothèses, évaluation annuelle du transport solide

Remarque : Il est normal que le débit critique diminue avec une hypothèse haute, car les débits supérieurs sont sélectionnés. Pour Mansarde aval, les seuils de Qcr ne sont pas appliqués.

Les 18 paires de coefficients (a, b) font appel à l'ensemble des relations fonctionnelles calculées au paragraphe 33. Nous avons à chaque fois maximisé l'hypothèse haute et minimisé l'hypothèse basse. L'hypothèse centrale est rattachée à l'hypothèse basse pour le choix des coefficients a et b qui ne sont jamais dissociés.

Nous retiendrons 12 mois de référence pour chaque station, de telle sorte que les pluviométries cumulées soient proches de 1760 mm à chaque station par souci de comparaison.

Gashette : avril 2007 à mars 2008, Voltaire et Mansarde : octobre 2007 à septembre 2008. Remarquons toutefois la pluviométrie atypique du mois d'août 2007.

Après traitement des débits instantanés sur les 12 mois retenus en référence, voici les Chroniques annuelles calculées du transport solide en suspension aux stations **Gashette** (tableau 27) et **Voltaire** (tableau 28) :

Année	Mois	H basse (t)	H centrale (t)	H haute (t)
2 007	04	-	0.17	0.37
2 007	05	1.00	2.06	4.29
2 007	06	1.24	2.74	5.78
2 007	07	-	-	0.04
2 007	08	84.41	169.10	404.56
2 007	09	3.85	7.89	16.76
2 007	10	97.73	196.12	495.30
2 007	11	68.07	136.38	236.06
2 007	12	0.23	0.59	1.08
2 008	01	-	-	-
2 008	02	-	-	-
2 008	03	-	0.02	0.04
Total annuel en t. (67,52 ha)		256.54	515.07	1 164.28
Transfert annuel en t/ha		3.80	7.63	17.24

Tableau 27 – Chronique du transport solide en suspension sur 12 mois, Gashette

Année	Mois	H basse (t)	H centrale (t)	H haute (t)
2 007	10	8.09	23.38	46.70
2 007	11	12.29	34.16	68.77
2 007	12	0.13	0.36	0.68
2 008	01	-	-	0.01
2 008	02	-	-	-
2 008	03	-	-	-
2 008	04	-	0.03	0.18
2 008	05	-	-	-
2 008	06	-	0.05	0.17
2 008	07	3.40	9.45	18.82
2 008	08	3.83	9.52	17.03
2 008	09	11.30	31.83	62.84
Total annuel en t. (66,50 ha)		39.04	108.79	215.20
Transfert annuel en t/ha		0.59	1.64	3.24

Tableau 28 – Chronique du transport solide en suspension sur 12 mois, Voltaire

3432 Quelques commentaires

3432-1 Estimations du transport solide annuel

Compte tenu des séquences de pluies retenues, ces évaluations peuvent être vues comme des **valeurs a minima**.

Aucun évènement exceptionnel d'ordre conjoncturel n'a été relevé au cours des évènements qui ont servi de base à ces estimations. Nous pouvons supposer qu'elles approchent la **composante structurelle de la vulnérabilité**, mais ignorent la composante conjoncturelle qui n'est pas négligeable pour autant.

L'estimation sur **Mansarde aval** ne pourra être faite que par comparaison avec la valeur obtenue pour Gashette, ayant constaté la difficile interprétation des mesures à la station Mansarde aval, en relation avec l'échelle spatiale.

3432-2 Sur le plan méthodologique, le prolongement annuel conserve assez bien le rapport d'échelle établi par les évènements ponctuels qui ont été mesurés :

Gashette / Voltaire :

Rapports des flux spécifiques en **Kg/ha** pour deux évènements comparables et trois hypothèses

Gashette 29/08/2008	27	50	76
Voltaire 11/10/2008	7	17	25
Gashette/voltaire	4	3	3

Rapports des flux spécifiques annuels en **t/ha**

Gashette	3.80	7.63	17.24
Voltaire	0.59	1.64	3.24
Gashette/voltaire	6	5	5

Gashette / Mansarde aval

Rapports des flux spécifiques en **Kg/ha** pour deux évènements comparables

29/08/2008 Gasshette	27	50	76
29/08/2008 Mansarde av.	0.89	1.79	3.36
Gashette/Mansarde aval	30	28	23

Rapports des flux spécifiques annuels en **t/ha**

Gashette	3.80	7.63	17.24
Mansarde aval	0.17	0.34	0.98
Gashette/Mansarde aval	22	22	18

Voltaire / Mansarde aval

Rapports des flux spécifiques en **Kg/ha** pour deux évènements comparables

31/07/2008 Voltaire	16	24	40
31/07/2008 Mansarde av.	3.5	7	10.5
Voltaire/Mansarde aval	5	3	4

Rapports des flux spécifiques annuels en **t/ha**

Voltaire	0.59	1.64	3.24
Mansarde aval	0.17	0.34	0.98
Voltaire/Mansarde aval	3	5	3

Tableau 29 – Comparaison du transport solide des trois sites d'étude

La cohérence de la méthode employée est ainsi démontrée.

3432-3 Les facteurs étudiés peuvent être caractérisés par comparaison :

- L'occupation du sol par l'agriculture et le fort drainage de la route nationale expliquent en partie un transport solide plus important à Gashette par rapport à Voltaire. Les deux versants sont de dimensions, de pentes et de pluviométries comparables. Par surcroît, la forte présence des bois sur le versant de la rivière Voltaire devrait limiter l'érosion sur ce territoire occupé par un habitat diffus (voir « Etude des transferts de pesticides », page 26, occupation du sol).

En première approche, un facteur d'ordre 3 à 5 des flux de MES caractérise donc **la vulnérabilité structurelle à l'érosion** du bassin versant de Gashette relativement à celle du versant de Voltaire, tant à l'échelle événementielle qu'à l'échelle annuelle. **Pourtant, il nous faudra nuancer la vision trop déterministe de ces phénomènes.**

- Les comparaisons avec Mansarde sont plus délicates et nous amènent à réintroduire l'aléa dans notre réflexion, en même temps qu'un questionnement associé au facteur d'échelle.

3432-4 Effectivement, la crue du 01/12/2008 sur Mansarde aval (paragraphe 337), montre que des événements climatiques de très forte intensité peuvent générer une érosion, qui ramenée à l'unité de surface, dépasse celle enregistrée sur les deux autres bassins versants. Dans le même temps, Mansarde connaît deux à trois fois moins de crues que Voltaire pour des pluviométries comparables. C'est dans l'interprétation de cette situation que nous introduisons le facteur d'échelle : Plus l'échelle spatiale est grande (caméra placée bas) et plus les effets de l'aléa sont difficiles à prévoir. Statistiquement, cette situation est classique : une petite échelle (caméra placée haut) amortit la variabilité des effets de l'aléa, tandis qu'une grande échelle (caméra placée bas) l'amplifie.

Nous en tirons donc l'enseignement suivant : si nous voulons observer une aire de petite dimension (1 ha), un suivi en continu s'impose car **la distribution des phénomènes érosifs sur l'année n'est pas suffisamment gaussienne**. Par contre, un point de mesure intégrant une aire de dimension plus grande (1 km²) exprime des flux dont la distribution répond davantage à la loi des grands nombres, supportant quelques trous dans les mesures.

Dans l'étude sur le transfert de la Chlordécone réalisée sur le site de Mansarde, nous avons retenu une érosion de l'ordre de 10 t/ha/an. L'explication vient d'en être donnée.

3433 Estimation d'un ordre de grandeur du transport solide annuel

L'estimation est fondée sur deux composantes :

Une composante structurelle que nous avons essentiellement étudiée à partir des concentrations en MES mesurées directement, et une composante conjoncturelle, qui faute de mesures suffisantes, a été appuyée sur l'observation de l'état du sol et l'expertise.

Composante structurelle de la vulnérabilité :

L'estimation réalisée à Gashette est celle qui offre le plus de garanties :

- En effet, elle est fondée sur une **mesure réelle du régime de plein transport**. A contrario, l'estimation du transport solide de la rivière Voltaire souffre d'un défaut de mesure de ce régime critique dont dépend la précision des relations fonctionnelles.

- Par surcroît, **l'aire du bassin de Gashette est suffisante (66,50 ha)** pour amortir des événements marginaux ou mal mesurés. A contrario, la petite surface de Mansarde (3,70 ha) n'offre pas ce confort statistique.

- Un dernier aspect, très intuitif mais important à notre sens, qui consolide l'estimation du transport solide sur Gashette est la mise en valeur agricole permanente et donc prévisible du versant. Même si le défaut de couverture lié aux labours expose les sols canniers une fraction de l'année, **les phénomènes érosifs qui s'y produisent sont régulés** par la culture de la canne. A contrario, l'habitat diffus n'offre pas cette régularité. Dans la rivière Voltaire, des transports solides massifs surviennent sans qu'ils soient nécessairement corrélés à l'intensité des crues. D'un point de vue statistique, les effets produits par l'habitat diffus présentent la même difficulté que l'aléa climatique, avec l'inconvénient supplémentaire de ne pas être quantifiables en mm de pluie. Dans cette situation, seul un suivi en continu de la turbidité pendant une période assez longue, que nous évaluons à trois ou quatre années, permettrait de discriminer les deux composantes de la vulnérabilité.

Nous nous appuyons donc sur l'estimation produite à la station Gashette.

Composante conjoncturelle de la vulnérabilité « à dire d'expert »

En l'absence de séries numériques suffisantes, nous estimons une vulnérabilité pseudo conjoncturelle en partant de l'occupation du sol et en notant la qualité de la protection qu'elle offre contre l'érosion : une note est attribuée à chaque % d'occupation. Nous sommes bien dans une logique d'interaction entre un aléa et un milieu, même si la composante structurelle influence fortement cette approche « à dire d'expert ».

Note		Gashette			Voltaire			Mansarde		
3	Canne	29.82	44%	132	0	0%	-	0	0%	-
1	Banane	0	0%	-	0.5	1%	1	2.45	66%	66
2	Habitat	11.5	17%	34	19.12	29%	58	0.42	11%	23
4	Bois	26.2	39%	155	46.88	70%	282	0.83	22%	90
	ha	67.52	100%	322	66.5	100%	340	3.7	100%	179

Tableau 30 - Classement sommaire des trois sites selon leur vulnérabilité pseudo conjoncturelle à l'érosion

Le résultat est une classification des sites : Mansarde apparaît logiquement très vulnérable avec la note la plus faible.

	Gashette	Voltaire	Mansarde
Vulnérabilité structurelle	8 à 10 t/ha/an	2 à 3 t/ha/an	8 à 10 t/ha
Vulnérabilité conjoncturelle	0 à 5 t/ha/an	0 à 5 t/ha/an	0 à 10 t/ha/an
Vulnérabilité globale	8 à 15 t/ha/an	2 à 8 t/ha/an	8 à 20 t/ha/an

Tableau 32 – Vulnérabilité à l'érosion sur les trois sites d'étude

L'ensemble de ces estimations établit un ordre de grandeur : l'érosion mesurée par le transport solide en suspension est proche de 10 tonnes par hectare et par an sur les trois versants étudiés, hors aléa climatique majeur.

Comparativement, l'usage agricole tend à augmenter le transport solide, mais aussi à le réguler. L'habitat diffus tend à augmenter la vulnérabilité conjoncturelle.

La définition de la **vulnérabilité conjoncturelle** demeure intuitive. Cette composante du risque érosif s'apparente à la vulnérabilité structurelle par opposition à l'aléa climatique auquel nous sommes familiarisés. Mais dans les effets mesurés, par exemple les charges en MES aux exutoires de zones d'habitat non nécessairement corrélées à l'intensité des pluies, la vulnérabilité conjoncturelle s'apparente davantage à un aléa, car nous ne connaissons pas à priori les causes qui génèrent ces flux.

Dans une analyse du signal appliquée au transport solide mesuré en continu, les composantes du risque (aléa, vulnérabilité structurelle et vulnérabilité conjoncturelle) seraient décomposées et la vulnérabilité conjoncturelle apparaîtrait alors comme un bruit résiduel effectivement mesuré. La vulnérabilité conjoncturelle du risque perdrait alors la part d'intuition qui l'entache au stade où nous sommes parvenus dans la caractérisation du transport solide.

35 Applicabilité d'un modèle hydraulique simplifié

L'objectif du paragraphe 35 est de tester la validité d'une formule simplifiée de transport solide dans nos conditions expérimentales. Nous allons donc introduire les valeurs de débit solide obtenues à partir de nos mesures dans une formule de transport solide afin d'en évaluer la pertinence. Le cheminement des calculs structure cette présentation. Les coefficients a et b des relations fonctionnelles de décrue (hypothèse haute) sont intégrés dans la relation (3) donnée au paragraphe 330 avec les maxima observés du débit solide afin de donner une détermination expérimentale au régime critique de plein transport.

Nous fixons un débit solide de plein transport observable à Mansarde aval de 0,06 L/s.

	Gashette	Voltaire	Mansarde av.
Débit solide maximum (L/s)	24,27	16,18 (*)	0,06
Débit critique plein transport(L/S)	5493,12	5593,77	40,63

Tableau 33 –Débits critiques de plein transport aux trois stations de mesure

(*) Sur Voltaire, le débit solide maximum observé est seulement 2,79 L/s. Or, les débits liquides correspondants sont faibles, de l'ordre de 1500 L/s, par rapport à des débits de pointe qui peuvent atteindre 5000 L/s. **Nous n'avons donc pas mesuré le débit critique de plein transport à la station Voltaire**, alors que nous y sommes parvenus sur Gashette. En nous appuyant sur la comparaison des crues échantillonnées aux deux stations (paragraphe 334), nous pouvons supposer un rapport des débits critiques de plein transport de l'ordre de 1,5 à 2. Nous appliquons ce rapport pour estimer le débit critique de plein transport à la station Voltaire à partir de celui de Gashette : $24,27 / 1,5 = 16,18$ L/s.

La formule simplifiée proposée par Maurice Meunier (voir le paragraphe 12, état de l'art et des connaissances) pourrait trouver une application sur le pourtour de la baie du Robert. La confrontation d'une pente calculée au moyen de la formule avec la pente réelle du cours d'eau nous permettra d'en évaluer la pertinence dans notre contexte. Nous reviendrons ultérieurement à la vocation première de cette formule, prévoir le débit solide à partir du débit liquide et de la pente.

Formule simplifiée du transport solide : $\frac{Q_s}{Q_{cr}} = BI^A$ (relation 4)

I la pente, A et B deux coefficients

D'où nous tirons la pente théorique :

$$I = \left(\frac{Q_s}{Q_{cr} B} \right)^{\left(\frac{1}{A} \right)} \quad (\text{relation 5})$$

Maurice Meunier (page 301, ouvrage déjà cité) reproduit les coefficients A et B mesurés par différents auteurs. Nous les intégrons dans notre calcul :

Station Gashette

Auteur	Date	A	B	Pente calculée (I)
Mizuyama	1981	5,5	2,0	0,33
Smart et Jaeggi	1983	2,5	1,6	0,09
Meunier	1989	6,3	2,0	0,38
Rickenmann	1990	6,4	2,1	0,38

Tableau 34 – Pentes théoriques calculées à partir de la formule simplifiée, Gashette

Sur le versant Gashette-Ouest, les pentes mesurées pour quatre tronçons qui alimentent le point de mesure sont **0,10 ; 0,06 ; 0,08 ; et 0,09** (voir « Etude des transferts de pesticides », page 22). **Il y a donc une grande cohérence avec les coefficients proposés par Smart et Jaeggi.** La formule simplifiée du transport solide est pertinente dans cette situation.

Station Voltaire

Auteur	Date	A	B	Pente calculée (I)
Mizuyama	1981	5,5	2,0	0,30
Smart et Jaeggi	1983	2,5	1,6	0,08
Meunier	1989	6,3	2,0	0,35
Rickenmann	1990	6,4	2,1	0,36

Tableau 35 – Pentes théoriques calculées à partir de la formule simplifiée, Voltaire

Sur Voltaire, les pentes mesurées pour trois tronçons qui alimentent le point de mesure sont **0,10 (AE) ; 0,11 (BE) et 0,12 (CE)**. E désigne l'exutoire instrumenté. Nous observons comme sur Gashette une grande cohérence avec les coefficients proposés par Smart et Jaeggi.

La pente au droit de la station de mesure Voltaire est 0,01 de telle sorte qu'un seuil a pu y être installé. Cela traduit la forme schématiquement hyperbolique des petits bassins versants du pourtour de la baie, avec de fortes pentes en tête de bassin, de l'ordre de 0,30 et une horizontalité sensible à proximité de la côte. A titre d'illustration, nous reproduisons ici le modèle numérique de terrain du bassin versant de la rivière Voltaire.

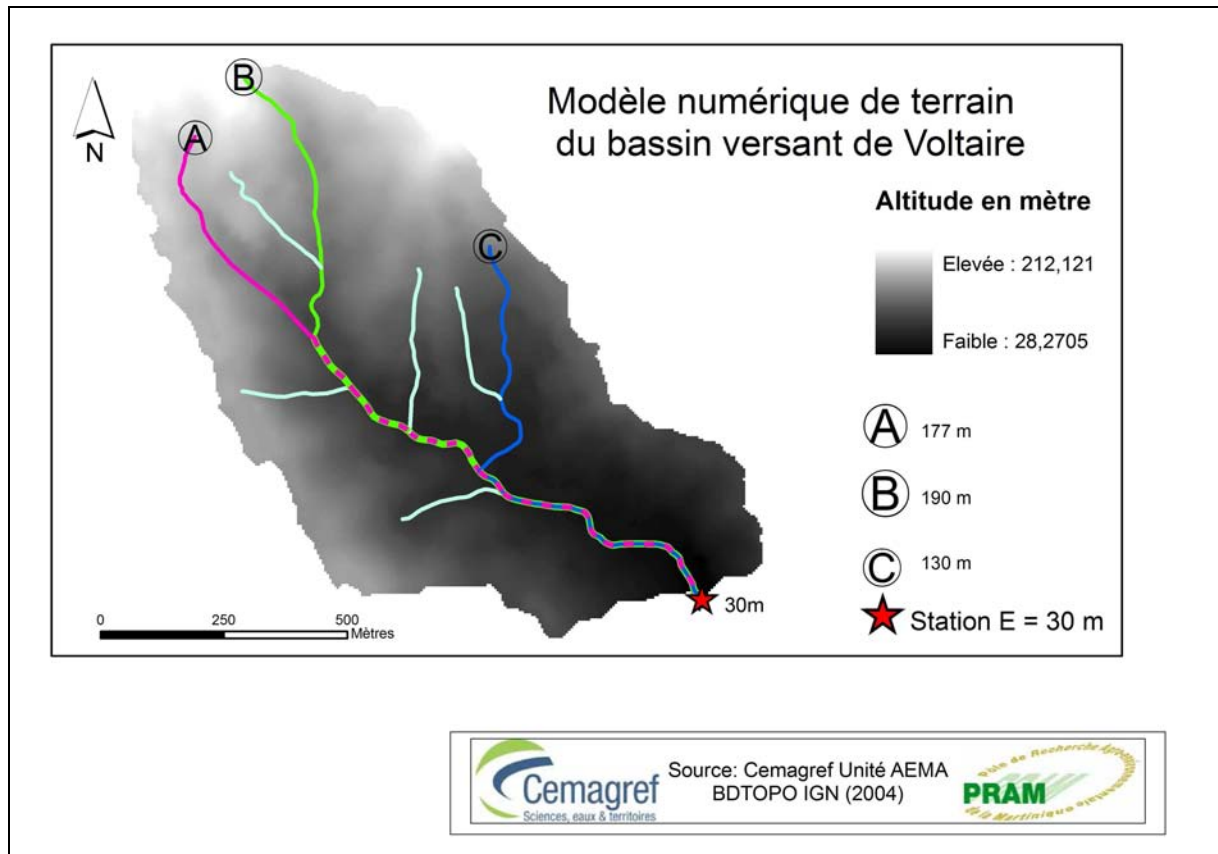


Figure 41 – Modèle numérique de terrain du bassin de la rivière Voltaire

Le bassin de la rivière Voltaire est géoréférencé entre 60°58'6,91'' et 60°57'23,15'' de longitude ouest et 14°41'17,51'' et 14°40'39,06'' de latitude nord. La station Voltaire culmine à 30 m d'altitude en aval d'un réseau hydrographique sinueux et dense. La longueur du cours d'eau drainant ce sous bassin est de 4 030 m.

Station Mansarde

Auteur	Date	A	B	Pente calculée (I)
Mizuyama	1981	5,5	2,0	0,27
Smart et Jaeggi	1983	2,5	1,6	0,06
Meunier	1989	6,3	2,0	0,32
Rickenmann	1990	6,4	2,1	0,32

Tableau 36 – Pentes théoriques calculées à partir de la formule simplifiée, Mansarde

La pente de la ravine est **0,13** sur les 350 mètres de sa longueur. Trois drains qui alimentent la ravine ont été mesurés à partir du modèle numérique de terrain : les pentes mesurées sont **0,06** ; **0,08** ; et **0,02** (« Etude des transferts de pesticides », page 24). Ces valeurs sont cohérentes avec les pentes calculées par la formule simplifiée du transport solide.

Il nous reste à contrôler trois conditions de validité de la formule simplifiée dans nos conditions expérimentales :

1- « **un rapport des masses volumiques (μ matériau/ μ eau) constant, en général 2,65 (terme adimensionnel) pour des cours d'eau d'une dimension suffisante** ». Nous avons supposé cette condition sans l'avoir vérifiée. Nous disposons de très peu de références à ce jour.

2- « **Un débit critique de plein transport 5 fois supérieur au débit critique de début de transport** ». Cette condition est vérifiée sur Gashette (rapport de l'ordre de 90) et sur Voltaire (rapport de l'ordre de 40). Sur Mansarde, nous sommes à la limite du domaine de validité de la formule simplifiée. C'est pourquoi nous donnons les trois hypothèses. Basse : 3,6 centrale : 5,7 et haute : 6,7

3- « **Une étendue granulométrique caractérisée par un rapport d90/d30 de l'ordre de 10 à 20** » (d90 et d30 désignent les quantiles des classes granulométriques, donc les diamètres correspondant aux limites des classes regroupant respectivement 90 % et 30 % des particules). Nous avons mesuré trois classes granulométriques au dessus de 0,45 μ , bornées par 2,7 μ et 1,6 μ . Mais ces mesures ne sont pas suffisantes pour déterminer les quantiles en référence à la formule testée. Aussi nous reprenons les données publiées par la revue Fruits, vol 44 n° 1 (1989) 3-12 et transcrites par Maurice Meunier (ouvrage déjà cité, page 203) sur les indications de Pierre MARIE du Cemagref-PRAM, pour les sols bruns à halloysite qui correspondent à nos sites d'étude.

La première ligne désigne les limites supérieures des classes

2 μ	20 μ	50 μ	200 μ	2 mm	> 2mm
58,7 %	11,8 %	6,8 %	10,8 %	6,6 %	5,4 %

Tableau 37 – Classes granulométriques des sols bruns à halloysite de la Martinique
Source : Fruits, vol 44 n° 1 (1989) 3-12

Les répartitions ne traduisent pas exactement les quantiles recherchés, mais 200 μ correspond approximativement au d90 (58,7 + 11,8 + 6,8 + 10,8 = 88,10 peu différent de 90). Le d30 se situe quelque part en dessous de 2 μ . Nous en déduisons que le rapport d90/d30 est nécessairement supérieur à 100. Cette valeur est un peu élevée, mais non rédhibitoire.

Nous avons donc atteint le résultat recherché :

La formule simplifiée du transport solide semble pertinente à nos échelles d'observation.

Toutefois, les faibles débits de la ravine Mansarde placent la formule à la limite de son domaine de validité et l'étendue granulométrique des sols bruns appellerait des mesures complémentaires pour apporter une réponse mieux argumentée.

Les rapprochements possibles avec l'hydraulique torrentielle ouvrent la perspective d'une modélisation du transport solide sur les 22 sous-bassins qui entourent la baie du Robert. Cette perspective suppose un renforcement des mesures basiques qui alimentent le formalisme propre à l'hydraulique torrentielle, singulièrement dans les domaines de la sédimentologie, de la géomorphologie et de l'hydrographie.

Nous introduisons ici un long commentaire relatif au concept de « flash », car nous pensons que ces accélérations spectaculaires du débit devraient être étudiées du point de vue de l'hydraulique torrentielle et de l'érosion.

Dans l' « étude des transferts de pesticides », nous avons souvent souligné les insuffisances de l'approche des événements en cours d'eau sur le seul critère du débit et l'intérêt que nous aurions à mieux appréhender ses accélérations. (paragraphe 341, page 61). La distribution des accélérations du débit sur un critère de durée montre que les petites accélérations sont majoritaires en effectif et en temps cumulé (voir documents intitulés « Chronique des flashes enregistrés » au « recueil des données » pour les trois stations Voltaire, Mansarde aval et Mansarde amont. Sur Voltaire, les 144 pics de crue mesurés de septembre 2007 à octobre 2008 (14 mois) surviennent en accélération flash dont la durée est presque toujours supérieure à 20 minutes. Nous sommes donc préoccupés par les 409 autres accélérations flashes dont les durées sont individuellement inférieures à 20 minutes, mais dont le temps cumulé sur les 14 mois représente plus de deux fois le temps cumulé des pics de crue.

95 flashes ont une durée inférieure à 5 minutes

206 ont une durée comprise entre 5 et 10 minutes

182 ont une durée comprise entre 10 et 15 minutes

La classe 15-20 minutes mélange des pics de crue avec d'autres flashes.

Nous ne devons pas oublier que nos cours d'eau s'apparentent à des torrents et que des perturbations de l'écoulement caractérisées par le nombre de Froude sont dues au simple effet de la pente. Toutefois, l'hypothèse à vérifier d'une relation directe entre le ruissellement érosif à la surface des versants de petite dimension, de l'ordre du km², et les accélérations flashes enregistrées au pas de temps de la minute pourraient amener des interprétations fécondes pour caractériser les phénomènes érosifs qui nous préoccupent.

4 ANALYSE DES RESULTATS

41 Synthèse des principaux résultats

Nous avons donc construit une démarche expérimentale d'évaluation quantitative du transport solide dans trois cours d'eau situés sur le bassin versant de la baie du Robert.

Nous reprenons la structure des objectifs de départ pour énoncer les principaux résultats :

411 Les résultats méthodologiques

L'objectif initial était de tester un protocole de suivi en continu de la turbidité pour atteindre par ce truchement la concentration en MES, mesurée au pas de temps de la minute. D'une certaine manière, nous avons péché par excès de confiance dans les équipements ou dans notre capacité à les mettre en oeuvre. Les sites de mesure avaient été choisis pour leurs qualités hydrologiques, principalement la mesure des débits. Mais il s'est avéré que la fiabilité de la mesure optique et surtout la sécurité des équipements vis-à-vis des aléas étaient des critères déterminants et sélectifs pour le choix des implantations. La détérioration et le coût de tels appareils auront été rédhibitoires sur la durée de notre étude. Les sites d'utilisation des turbidimètres et MES-mètres doivent donc répondre à certaines conditions :

- Permettre l'immersion permanente des têtes
- Permettre le bon positionnement de l'appareil dans le cours d'eau
- Permettre l'ancrage du câble reliant l'appareil à la station pour résister aux forts courants
- Permettre la protection du câble de liaison vis-à-vis des objets flottants, qui en s'y accrochant exercent une traction qui finit par le rompre.
- Disposer d'une alimentation électrique suffisante pour éviter les trous de mesure.
- Garantir la sécurité des agents qui interviennent régulièrement pour contrôler les appareils.

Dans cette situation, l'exploitation des mesures ponctuelles par des méthodes statistiques conventionnelles (régressions) a confirmé leur inadéquation aux grandes échelles de territoire (caméra placée bas), **échelles auxquelles seul un suivi exhaustif des transports et une pression de mesure suffisante peut apporter une évaluation quantitative satisfaisante du transport solide**. Ceci explique l'échec relatif de la mesure du transport solide sur la ravine Mansarde, alors que les mesures hydrologiques parfaitement conduites ont apporté un éclairage déterminant sur le transfert des pesticides à ces échelles de territoire.

Par contre, appliquées à des échelles suffisamment petites (caméra placée haut), elles mettent en évidence une certaine constance dans la réponse du bassin versant et de son cours d'eau, constance qui se traduit par une tendance quantitative et par une cinétique propre du transport solide en événement de crue. Cela ouvre la perspective d'une caractérisation statistique de la vulnérabilité structurelle d'un milieu au regard du risque érosif.

Le terme « risque » érosif est abusif en regard de l'érosion ordinaire ; c'est bien à l'érosion générée par les pluies ordinaires que nous nous intéressons. Pourtant, l'érosion étudiée à travers le transport solide en cours d'eau s'apparente par bien des aspects à un risque, caractérisé par l'interaction entre un aléa et un milieu vulnérable. Dans ce cadre l'aléa climatique n'est pas le seul élément imprévisible. La conjonction des actions humaines sur l'état du sol avec des événements pluvieux ordinaires augmente la vulnérabilité conjoncturelle du versant et se traduit par des transports solides massifs en direction de la baie, parfois surprenants par la charge en MES, non nécessairement corrélée avec les débits de la crue enregistrée.

L'estimation relativement fiable obtenue sur la rivière Gashette en comparaison de celle moins satisfaisante obtenue sur la rivière Voltaire, met en évidence l'intérêt de disposer de préleveurs à déclenchement automatique pour mesurer efficacement les régimes critiques de plein transport qui sont des paramètres déterminants pour une évaluation juste du transport solide. Les turbidimètres et les prélèvements manuels seuls ne suffisent pas à caractériser ces régimes critiques essentiels. Par surcroît, une meilleure exploitation des mesures opérationnelles doit être recherchée de façon à discriminer les composantes de la vulnérabilité, dès lors que les mesures des événements du cours d'eau seraient réalisées en continu au pas de temps de la minute.

L'**intensité** des aléas climatiques et la **surface** intégrée au point de mesure entretiennent une relation peu explicite pour les faibles intensités ; cette relation s'exprime plus clairement pour les événements de forte intensité, c'est à dire avec des différentiels de concentration plus élevés lorsque deux situations sont comparées et avec une plus grande dépendance vis-à-vis de l'effet de surface, donc d'une moindre dépendance vis à vis de la surface intégrée au point de mesure ; les paramètres spécifiques sont alors plus faciles à interpréter. Cela n'est pas contradictoire avec le fait que les concentrations en MES mesurées sur deux versants comparables se différencient assez rapidement dès les premières augmentations du débit au dessus du régime critique de début de transport.

Enfin, la centaine d'analyses réalisées ont été confrontées à une équation simplifiée de transport solide en référence aux régressions proposées par quatre auteurs. Il semble que les concepts de l'hydraulique torrentielle puissent être adaptés à la modélisation des 22 sous-bassins qui composent le pourtour de la baie. Cette voie de recherche supposerait d'engager plusieurs programmes de mesures fondamentales pour caractériser les familles de sédiment, la géomorphologie des zones visées et le réseau hydrographique impliqué.

Ce questionnaire rejoint les préoccupations du collectif d'organismes de recherche qui travaillent sur le site atelier du Robert, notamment pour reconstituer le déroulé des dégradations du milieu naturel.

412 Les résultats heuristiques

Nous passons en revue les quatre champs de connaissance visés :

Facteur occupation du sol et transport solide : La quantification méthodique du transport solide, conduite tout au long de la troisième partie nous a montré une plus forte vulnérabilité structurelle du bassin versant de la rivière Gashette liée aux usages essentiellement agricoles de cette zone. En revanche, l'analyse spéculative de la vulnérabilité conjoncturelle nous a amenés à nuancer cette vision trop déterministe et insuffisamment probabiliste du risque érosif, d'autant que nous ne sommes pas parvenus à mesurer le régime critique de plein transport de la rivière Voltaire. Dans nos conditions expérimentales, l'érosion mesurée par le transport solide en suspension, largement majoritaire dans notre contexte, est évaluée par un ordre de grandeur de sa composante structurelle : **10 tonnes par hectare et par an, hors aléa climatique majeur.**

L'usage agricole présente l'inconvénient d'augmenter tendanciellement la vulnérabilité structurelle des versants, mais présente également l'avantage de la réguler et donc d'aider à mieux la prévoir.

Ces mesures ont été réalisées sur de petits bassins versants anthropisés au relief énergique dont les pentes varient entre 0,05 et 0,30 à partir d'une instrumentation des cours d'eau. Les observations de la surface du versant au moment des ruissellements érosifs n'ont pas été suffisamment précises pour apporter davantage d'éléments. Par sécurité, nous avons retenu une incertitude relative de 50 % sur les mesures de concentration de MES. Ceci nous a amenés à conduire de front trois séries de calculs de façon à encadrer au mieux cette estimation : **L'estimation maximale de la vulnérabilité, assimilée à sa composante structurelle, ne dépasse jamais 20 t/ha/an et l'estimation minimale ne descend jamais en dessous de 3 t/ha/an.** Cet encadrement stabilise l'ordre de grandeur estimé, mais ne prédispose pas des effets d'évènements climatiques majeurs ou de flux localisés générés par les activités humaines.

Etudier les chroniques du transport solide à partir des évènements des cours d'eau : Nous renvoyons aux tableaux 27 et 28 qui présentent sur 12 mois, moyens du point de vue de la pluviométrie, le résultat du traitement des débits instantanés enregistrés en continu au pas de temps de 5 minutes à Gashette et 1 minute à Voltaire. Les premiers résultats obtenus pour Mansarde démontrent l'inadéquation de la méthode utilisée à l'échelle spatiale d'observation (paragraphe 343).

Etudier certaines actions préventives : Nous renvoyons au rapport séparé relatif aux **micro barrages filtrants**.

Consolider l'étude des transferts de la Chlordécone : Nous renvoyons à l'étude correspondante intitulée : « **Gestion agro-environnementale intégrée du risque de contamination de la ressource halieutique par les produits phytopharmaceutiques, cas du transfert de la Chlordécone dans la baie du Robert** ».

412 Difficultés rencontrées

Voir l' « étude des transferts de pesticides » page 90 et le paragraphe 411 du présent rapport.

42 Analyse critique sur l'atteinte des objectifs de l'étude

L'étude a-t-elle atteint ses objectifs ?

Objectif méthodologique : « Non mais » Nous avons expliqué les difficultés rencontrées avec les appareils de mesure et la violence chronique des crues : chaque année enregistre des détériorations d'équipements dus aux forts débits. Il demeure que seul un **suivi en continu de la concentration en MES** et la **mesure des régimes critiques de plein transport** peuvent quantifier raisonnablement le transport solide. D'autres méthodes que les mesures optiques et le recours aux préleveurs à déclenchement automatique existent, notamment l'échantillonnage passif. Ce sujet reste une préoccupation majeure de nos protocoles à venir.

Objectif heuristique : « Oui mais ». L'imprécision des mesures ponctuelles est partiellement rattrapée par la densité de nos mesures hydrologiques. Toutes les ressources du recueil des données n'ont pas été exploitées, notamment l'analyse comparative des séries d'évènements sur les quatre stations. Le jeu de données demeure en exploitation et supportera de nouvelles analyses.

Conclusion

Nous avons donc retracé les procédures expérimentales et les résultats d'une première évaluation quantitative du transport solide dans trois cours d'eau du bassin versant de la baie du Robert.

Nous avons connu deux échecs principaux : D'une part le protocole de mesure en continu de la turbidité n'a pas été validé, nous nous en sommes expliqués. D'autre part, les méthodes utilisées sur la ravine Mansarde se sont révélées inadaptées pour mesurer le transport solide annuel, compte tenu de sa petite dimension (3,70 ha), échelle à laquelle la distribution des évènements érosifs n'est pas suffisamment gaussienne pour supporter des trous de mesure trop grands. Effectivement, 53 crues ont été enregistrées en continu à la station Mansarde aval pendant les 12 mois que nous avons retenus en référence, alors que 3 crues ont été complètement échantillonnées en MES. Cela semble peu et relève pourtant d'un tour de force.

De nombreux résultats posent les bases de développements futurs : Des ordres de grandeur ont été établis, reposant sur la détermination conjointe des usages du sol. Nous devons également souligner deux avancées essentielles : D'une part nous avons acquis un jeu de données hydrologiques suffisamment dense pour supporter des approfondissements et des recherches méthodologiques. D'autre part la difficile question des échelles spatiales a été éclairée par notre effort à devoir interpréter les résultats hétérogènes de Mansarde.

Enfin, l'approche hydraulique simplifiée que nous avons pu conduire nous a ouvert la perspective d'une modélisation du transport solide sur le pourtour de la baie. De nombreuses mesures fondamentales en sédimentologie, en géomorphologie et en hydrographie devront d'abord être entreprises si nous voulons avancer collectivement dans cette voie.

Bibliographie

Hydrologie

Bravard Jean-Paul et Petit François, 1997, *Les cours d'eau*, Armand Colin éditions

Gresser J., Marie P., 2007, *Mise en place de protocoles expérimentaux pour le suivi des produits phytosanitaires*. Rapport intermédiaire, Projet DIREN, 61p

Meunier M., 1999, *Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique - Hydrologie des crues*, hydraulique et dynamiques torrentielles. Cemagref Editions. 403 p

Instrumentation et transferts de polluants

DIREN, 2007, Plaquette Qualité des milieux aquatiques en Martinique, 21fiches

Prélèvements

Agence de l'Eau Loire Bretagne- GAY Environnement, 2006, Le prélèvement d'échantillons en rivière- Techniques d'échantillonnage en vue d'analyses physico-chimiques, Guide Technique, 134 p + annexes

Transport solide

Balland, P. (1983). Méthodologie de quantification des flux de nutriments en rivière. In: Dissolved Loads of Rivers and Surface Quantity/Quality Relationships, Proceedings of the Hamburg Symposium, August 1983, IAHS, No.141, pp.333-345.

Bertrand-Krajewski, J.L. (1993). Modélisation du transport solide en réseau d'assainissement unitaire : le modèle HYPOCRAS. La Houille Blanche. No.4, pp. 243-255.

Birgand, F. (2004). Mesure des flux et échantillonnage des matières en suspension sur des petits cours d'eau. Ingénieries-Cemagref n°40, p 21-35.

Borges, A.L. (1993). Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud. Doctorat Mécanique, Université Joseph Fourier Grenoble I Thesis, 205 pp.

Colombani, J. (1967). Contribution a la méthodologie des mesures systématiques de débits solides en suspension. Cahiers ORSTOM. Serie Hydrologie, Vol. 4, No 2, pp. 27-36.

Dickinson W.T. (1981). Accuracy and precision of suspended sediment load. In : Erosion and Sediment Transport Measurement, Florence, june 1981. IAHS Publ. 133, pp. 195-202.

Hubert, P., Adamski, M., Meybeck, M. (1988). Simulation de stratégies d'échantillonnage : application à la Loire et à la Noé sèche. In : IV Journée Hydrologiques de l'ORSTOM, 14 -15 septembre 1988, Montpellier, pp.177-195.

Laraque, A., Pandi, A., Berthelot, M., Mietton, M. (1994). Ecoulement et transports de matiere dans le bassin versant du Djoue, affluent du fleuve Congo-Zaire. Hydrologie Continentale, Vol. 9, No 2, pp. 153-168.

- Lopez Periago, E. and Soto, B. (2004). Modeling wash load transport of soil in a headwater catchment cultivated by non-tillage methods. *Journal of Hydrology*, 287(1-4): 19-33
- Meybeck, M., Friedrich, G., Thomas, R., Chapman, D. (1996a). Rivres. In : *Water quality assessments, a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. Ed. Deborah Chapman, second edition, UNESCO/WHO, UNEP. pp.243-318.
- Meybeck, M., Pasco, A., Ragu, A. (1996b). Evaluation des flux polluants dans les eaux superficielles. Etude inter-Agence de l'eau, Ministère de l'Environnement, 3 tomes.
- Meybeck, M., Idlafkih, Z., Ragu, A. (1996c). Les réseaux de flux. In: *Mesurer l'eau*, Colloque de Montbard, Agence de l'eau Seine-Normandie, 27 et 28 juin 1996, pp. 196-205.
- Moukolo, N., Bricquet, J.P., Biyedi, J. (1990). Bilans et variations des exportations de matières sur le Congo à Brazzaville. De janvier 1987 à décembre 1988. *Hydrologie Continentale*, Vol.5, No.1, pp.41- 52.
- Nouvelot, J.F. (1969). Mesure et étude des transports solides en suspension au Cameroun. *Cahiers ORSTOM. Série Hydrologie*, Vol. 6, No 4, pp. 43-85.
- Pinte, K. (2006). Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, INA P-G – Cemagref, 184 p
- Puigdefabregas, J., del Barrio, G., Boer, M.M., Gutierrez, L. and Sole, A. (1998). Differential responses of hillslope and channel elements to rainfall events in a semi-arid area. *Geomorphology*, 23(2-4): 337-351.
- Sole-Benet, A. et al. (1997). Influences of micro-relief patterns and plant cover on runoff related processes in badlands from Tabernas (SE Spain). *CATENA*, 31(1-2): 23-38.
- Tonderski, A., Grimvall, A., Dojlido, J.R., Van Dijck, G.D. (1995). Monitoring nutrient transport in large rivers. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.34, pp.245-269.
- Veyrat-Charvillon, S. and Memier, M. (2006). Stereophotogrammetry of archive data and topographic approaches to debris-flow torrent measurements: Calculation of channel-sediment states and a partial sediment budget for Manival torrent (Isère, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(2): 201-219.
- Walling, D.E. (1983). The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*, 65(1-3): 209-237.
- Walling, D.E. and Woodward, J.C. (1992). Use of radiometric fingerprints to derive information on suspended sediment sources. Erosion and sediment monitoring programmes in river basins. *Proc. international symposium*, Oslo, 1992: 153-164.
- Wen Shen, H., Julien, P (1993). Erosion and sediment transport. In : *Handbook of Hydrology*, Ed by David R. Maidment, McGRAW-HILL, INC, pp.12.1-12.61.
- Williams Garnett, P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111(1-4): 89-106.

ANNEXE 1

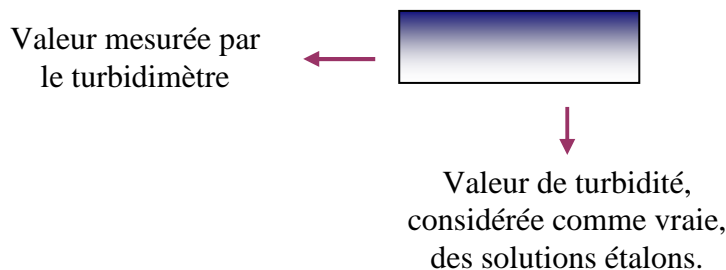
Etalonnage d'un turbidimètre

Les mesures de turbidité sont exprimées en NTU et l'utilisation de sondes de turbidité requiert le calage d'une relation entre concentrations en MES et turbidité. Pour cela, plusieurs méthodes sont appliquées.

On peut procéder :

- soit avec des mesures directes de concentration par prélèvement et pesée lors d'événements de fort transport en suspension.
- Soit le turbidimètre est étalonné au moyen de solutions étalons de formazine. On peut utiliser des solutions commerciales certifiées NIST (National Institute of Standards and Technology) ou préparer en laboratoire des solutions mères de formazine (Ruban et al., 2007).

Pour chaque solution étalon, au moins cinq mesurages de turbidité sont effectués pour établir une **fonction d'étalonnage f**

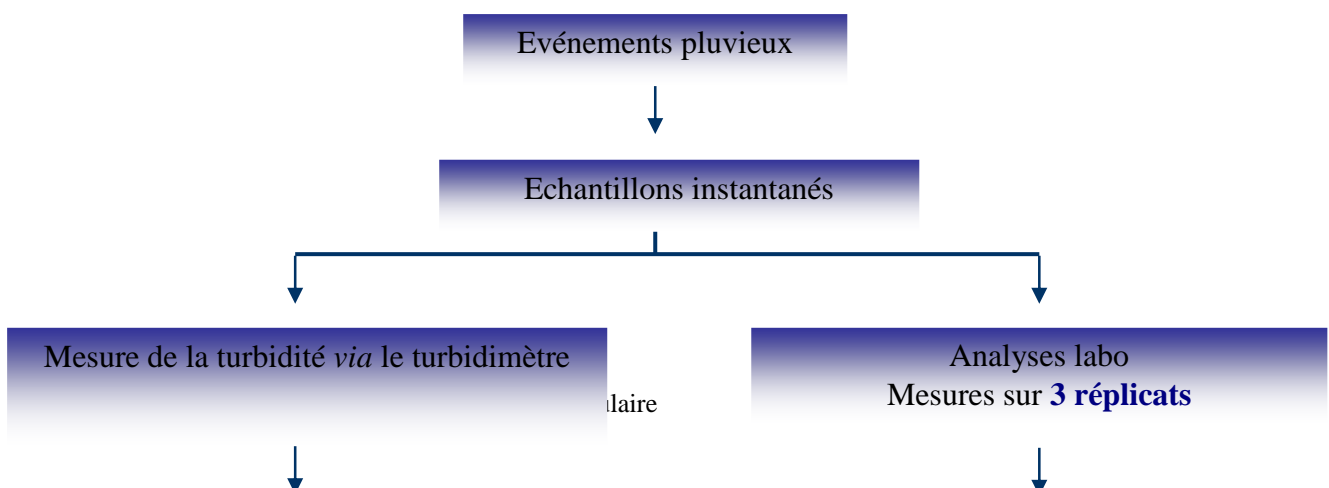


Pour toute valeur y mesurée de la turbidité, la valeur vraie la plus probable **T** est estimée au moyen de l'inverse f^{-1} de la fonction d'étalonnage :



Une fois cette relation établie, on procède à la correspondance entre la valeur mesurée par le turbidimètre et la concentration en MES.

Pour cela, des prélèvements manuels couplés aux relevés des valeurs affichées par le turbidimètre sont nécessaires.



Les turbidimètres doivent être recalé régulièrement afin d'éviter les dérives des mesures. Pour cela, des mesures directes de concentration par prélèvements et pesées sont réalisées quotidiennement ou lors d'évènements de fort transport en suspension.

Les turbidimètres peuvent être utilisés pour estimer de manière satisfaisante les charges événementielles et annuelles en MES, à condition que des méthodes appropriées et rigoureuses soient appliquées pour l'étalonnage des capteurs, la collecte d'échantillons représentatifs de divers événements pluvieux ou périodes de temps sec, les analyses en laboratoire, la détection et le rejet des valeurs suspectes,

- Etalonnage du Turbimix

Le turbimix a cet avantage que l'étalonnage à la formazine est déjà réalisé en usine, et donc que l'utilisation de la formazine dès la première utilisation est inutile.

On procède donc directement à la correspondance entre la valeur mesurée par le turbidimètre et la concentration en MES.

- Etalonnage en trois points du capteur

L'étalonnage doit se réaliser dans la gamme de turbidité ou de concentration en MES dans laquelle on va travailler.

La courbe d'étalonnage de la chaîne de mesure est calculée avec 3 échantillons de concentration en MES connue.

Les échantillons peuvent être réalisés par dilution d'un échantillon initial.

En règle générale, de bons résultats d'étalonnage sont obtenus avec des paliers de concentration de 10%, 33% et 100%.

Pour l'étalonnage, la condition suivante doit être remplie :

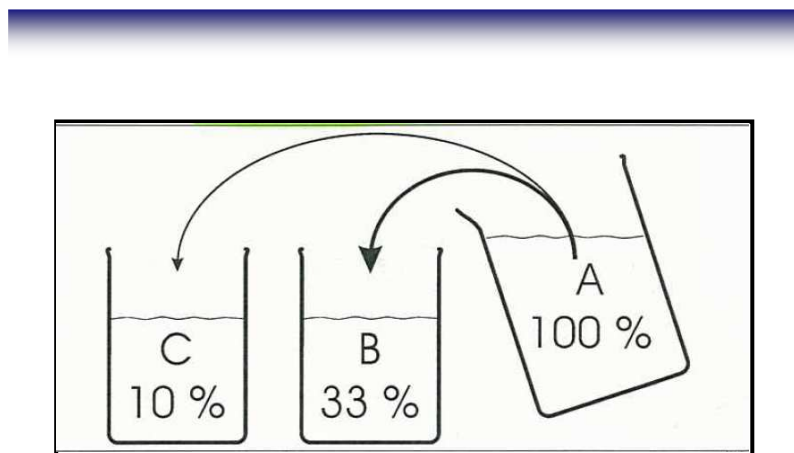


Figure 3 : dilution des différentes solutions utilisées pour l'étalonnage du turbimix

Cependant, afin de limiter les dérives des mesures qui s'établissent dans le temps, un étalonnage régulier devra être effectué.

Etalonnage d'un MES-mètre

■ Etalonnage immédiat

Dans un premier temps, il est préférable d'étalonner les appareils au laboratoire en utilisant différentes mélanges à des concentrations connues en MES. La difficulté principale consiste à avoir suffisamment de matériau représentatif des MES in situ.

Les échantillons prélevés lors des crues vont servir de solution étalon pour l'étalonnage immédiat, et pour lesquels la concentration en MES (en g/l) est connue après filtration.

Une autre méthode consiste à réaliser une suspension la plus fidèle possible à partir des matériaux source. En effet, ces capteurs sont sensibles à la granulométrie des suspensions et il est possible que la relation de soit pas stable d'une rivière à l'autre. D'après la théorie de Mie (1908) la relation d'étalonnage ne sera une droite que si et seulement si toutes les MES sont de granulométrie et de nature absolument identiques.

Les échantillons de boue ayant tendance à sédimenter, il faut bien agiter afin d'assurer une bonne mise en suspension et une bonne homogénéité dans la cuve où on plonge la sonde pour l'étalonnage. Durant cette phase d'agitation, il est important de maintenir le capteur suffisamment loin du fond et des parois du récipient d'étalonnage. La profondeur d'immersion doit être d'au moins 4 cm.



Photo 1 : brassage des solutions étalons

Il est recommandé de faire l'étalonnage dans la gamme de mesure sur laquelle vous désirez travailler.

Station	Nombre de solutions	Gamme de concentration	Concentration maximale obtenue lors des prélèvements manuels en crue
Mansarde	7	[0.16 g/l ; 6.37 g/l]	3.87
Voltaire	6	[0.13 g/l ; 5.68 g/l]	3.83

Tableau 1 : tableau récapitulatif des solutions utilisées pour l'étalonnage des Poncir

Après mise en marche des capteurs, ces derniers doivent être étalonnés (zéro + pente) au moins une fois tous les 15 jours, lors du nettoyage des optiques. Ces étalonnages, appelés

étalonnages différés, consistent en des prélèvements réalisés in situ qui sont ensuite utilisés pour contrôler et ajuster la relation turbidité-débit.

▪ Etalonnage différé

Cet étalonnage est intéressant dans le sens où l'étalonnage se fait dans les conditions normales d'écoulement.

Il se fait en deux étapes successives pouvant être espacés de plusieurs heures (max 24h) :

- La première étape consiste à faire l'étalonnage à l'eau claire (0 g/l), puis à prélever un échantillon de boue tout près de la tête de mesure optique qui sera dans la foulée filtrée afin de déterminer sa concentration en MES. En parallèle, on procède à la mesure et l'enregistrement de transmission infrarouge dans cet échantillon de boue de teneur inconnue.
- La deuxième étape consiste à l'enregistrement du poids sec de l'échantillon de boue obtenu afin de finaliser l'étalonnage du capteur.

Date	Temps entre le prélèvement et la saisi sur le transmetteur	Concentration (g/l)	valeur lue (g/l)
21/01/2009	22 h	0.12	0.08
12/02/2009	16 h	0.07 (0.1)	0.13
10/03/2009	26 h	0.18	
7/04/2009	18 h	0.23	

Tableau 2 : étalonnages différés

Cette procédure d'étalonnage in situ est pertinente car elle intègre le régime hydraulique de brassage et mise en suspension des MES, alors que celle dans un seau ne peut constituer qu'une approximation de ce régime hydraulique, et peut donc amener des écarts de mesure plus ou moins importants.

ANNEXE 2

Relevé topographique – traitement des données

Entrée des données brutes :

Toutes les données prises sur le terrain doivent être dans un premier temps enregistrées sur Excel afin d'assurer la sauvegarde des relevés.

Une colonne « Vérification » sera rajoutée et permettra de valider les données rentrées sur Excel et de se rendre ainsi compte des erreurs de frappes lors de la rentrée des données ou des erreurs de lecture. Etant donné que h_{\min} et h_{\max} sont situées à égale distance de h ; $[(h_{\min}+h_{\max})/2]$ devrait être égale à h . C'est ce que la colonne va nous permettre de vérifier.

Point visé	h min	h	h max	Vérif	α		Observations
					boussole	grades	
						0	
						0	

position du niveau
1

position du niveau
2

= SI [(hmin + hmax)/2] = h ; 0 ; 1

Ajustement des données

Un autre tableau identique au précédent permettra d'ajuster et de corriger les données qui nous semblent incohérentes ou les plus improbables avec l'idée que l'on a du terrain. Ainsi, les hauteurs seront réajustées suite à la vérification réalisée précédemment.

Point visé	h min	h	h max	α		Observations
				boussole	grades	
					0	
					0	

position du niveau
1

position du niveau
2

Les valeurs boussoles (par rapport au nord) seront complétées de la manière la plus cohérente entre les valeurs obtenues par des mesures boussoles et celles lues sur l'appareil.

Traitement des données en vue de leur exploitation

Ce tableau permettra dans un premier temps de faire ressortir les informations qui nous seront utiles par la suite . Cette étape passera par le traitement des données initiales.

0-90	90- α
90-180	360-(α -90)
180-270	180+(270- α)
270-360	90+(360- α)

[illegible]

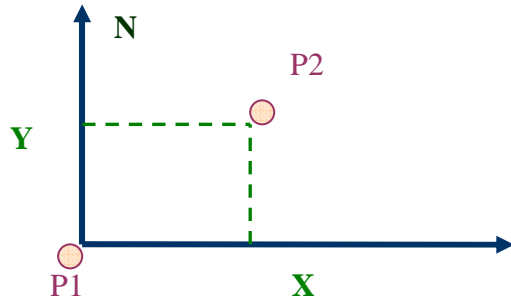
- On reporte les valeurs de h
- On calcul les distances de la mire au niveau (en cm) :

$$(\text{Hmax} - \text{hmin}) * 100$$

- l'angle α est un angle relevé sur le terrain avec le niveau ; ce dernier comptant les angles dans le sens topographique opposé au sens trigonométrique (que j'ai pris comme sens positif pour ces formules) ; des formules de conversions seront utilisées pour pouvoir ensuite appliquer les formules trigonométriques :

Grades	Trigo
0-90	$90 - \alpha$
90-180	$360 - (\alpha - 90)$
180-270	$180 + (270 - \alpha)$
270-360	$90 + (360 - \alpha)$

- Les coordonnées X-Y du point seront calculées.
 - Axe des ordonnées : sud-nord
 - Axe des abscisses : ouest-est
 - L'origine est le premier point « p1 »



P2

$$X = d \times \cos [(a \times \pi) / 180]$$

$$Y = d \times \sin [(a \times \pi) / 180]$$

- en h', les variations de hauteurs seront mesurées par rapport au premier point auquel sera attribuée la valeur 0
 - h'1 = 0
 - h'2 = h'1 + (h1 - h2)
 - h'3 = h'1 + (h1 - h3)
 -
 - h'8 = h'7
 - h'9 = h'7 + (h8 - h9)
 -

A ce stade là, on se retrouve avec plusieurs repères qu'il va falloir associer entre eux. Cette association se fera grâce aux points repères. Ces points ont été visés par les deux positions du niveau et permettent ainsi de recalcr les points dans le référentiel principal dont l'origine est le premier point visé.

Repère initial**Repère principal**

X	Y (nord)	h'	X'	Y' (nord)	h'
X1	Y1	h'1	X'1	Y'1	h'1
X2	Y2	h'2	X'2	Y'2	h'2
X3	Y3	h'3	X'3	Y'3	h'3
X4	Y4	h'4	X'4	Y'4	h'4
X5	Y5	h'5	X'5	Y'5	h'5
X6	Y6	h'6	X'6	Y'6	h'6
X7	Y7	h'7	X'7	Y'7	h'7
X8	Y8	h'8	X'8	Y'8	h'8
X9	Y9	h'9	X'9	Y'9	h'9
X10	Y10	h'10	X'10	Y'10	h'10
X11	Y11	h'11	X'11	Y'11	h'11
X12	Y12	h'12	X'12	Y'12	h'12
X13	Y13	h'13	X'13	Y'13	h'13
X14	Y14	h'14	X'14	Y'14	h'14

Le repère principal à pour origine le premier point visé. On pose donc

- $X'1 = 0$
- $Y'1 = 0$

Auquel on lui associe la hauteur 0 d'où $h'1 = 0$

X	Y (nord)	h'	X'	Y' (nord)	h'
X1	Y1	0	0	0	0
X2	Y2	h2	X2	Y2	h2
X3	Y3	h3	X3	Y3	h3
X4	Y4	h4	X4	Y4	h4
X5	Y5	h5	X5	Y5	h5
X6	Y6	h6	X6	Y6	h6
X7	Y7	h7	X7	Y7	h7
X8	Y8	h8	X8	Y8	h8
X9	Y9	h9	X9	Y9	h9
X10	Y10	h'10	X'10	Y'10	h'10
X11	Y11	h'11	X'11	Y'11	h'11
X12	Y12	h'12	X'12	Y'12	h'12
X13	Y13	h'13	X'13	Y'13	h'13
X14	Y14	h'14	X'14	Y'14	h'14

Pour recaler les points du repère initial au repère principal :

- $Y'2 = Y2 + (Y'1 - Y1)$
- $Y'3 = Y3 + (Y'1 - Y1)$
-
- $Y'8 = Y7$
- $Y'9 = Y9 + (Y'8 - Y8)$
- $Y'10 = Y10 + (Y'8 - Y8)$
-

La ravine est linéaire sur toute sa longueur du fait de l'écoulement rapide de l'eau lors de son passage dans la ravine.

Afin de positionner les points les uns par rapport aux autres, notamment lorsque l'on fait des allers et retour avec la mire, une dernière colonne intitulée « distance par rapport à l'exutoire » va permettre de positionner les points les uns par rapport aux autres.

Distance par rapport à l'exutoire
d1
d2
d3
d4
d5
d6
d7
d8
d9
d10
d11
d12
d13
d14

- $d1 = 0$
- $d2 = [(X'1 - X'2)^2 + (Y'1 - Y'2)^2]^{0,5}$
- $d3 = [(X'1 - X'3)^2 + (Y'1 - Y'3)^2]^{0,5}$
-
- $d8 = d7$
- $d9 = [(X'1 - X'9)^2 + (Y'1 - Y'9)^2]^{0,5}$
- $d10 = [(X'1 - X'10)^2 + (Y'1 - Y'10)^2]^{0,5}$
-

ANNEXE 3 (1/3)

Pesées en laboratoire (Filtres et MES)

N°	Code	V (ml)	>2,7 µm	MES (g)	>2,7 µm	MES (g)	>2,7 µm	MES (g)	>2,7 µm	MES (g)	analyse 2,7 µm - 0,45 µm	resultat	2,7 µm - 1 µm	MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm	MES (g)	resultat	> 0,45 µm
1	C5-G1	30											0,2423	0,2439	0,0016	0,1043	0,1047	0,01	0,07
2	C5-G2	30											0,2416	0,2727	0,0311	0,1017	0,1028	0,04	1,07
3	C5-G3	30											0,2417	0,289	0,0473	0,1044	0,1052	0,03	1,60
3'	C5-G3	30											0,2468	0,2633	0,0165	0,0994	0,1013	0,06	0,61
4	C5-G4	30											0,2401	0,3979	0,1578	0,105	0,1058	0,03	5,29
5	C5-G5	30	0,2081	0,649	0,4409	0,2085	0,4408	0,2323	0,2044	0,3752		0,844	0,2444	0,2552	0,0108	0,1007	0,1073	0,066	28,71
6	C5-G6	30	0,2089	0,6739	0,465	0,2078	0,5048	0,297	0,2067	0,472		1,0273	0,2454	0,2562	0,0108	0,0991	0,1054	0,063	34,81
7	C5-G7	30	0,2065	0,479	0,2725	0,2091	0,4347	0,2256	0,208	0,3114		0,6015	0,247	0,2603	0,0133	0,1027	0,1092	0,065	20,71
7'	C5-G7	30	0,20741	0,4037	0,19629	0,2092	0,4665	0,2573	0,2084	0,3438		0,58899	0,2429	0,2611	0,0182	0,1008	0,1114	0,0106	20,59
8	C5-G8	30	0,2088	0,5017	0,2919	0,2066	0,4106	0,204	0,2083	0,3744		0,662	0,2451	0,2692	0,0141	0,1002	0,113	0,0128	22,96
8'	C5-G8	30	0,2065	0,4289	0,2204	0,2073	0,4348	0,2275	0,2069	0,3734		0,632	0,2469	0,2691	0,0222	0,1013	0,1152	0,0139	22,27
9	C5-G9	30	0,2054	0,3878	0,1824	0,2082	0,3069	0,1007	0,2072	0,2638		0,3397	0,2448	0,2563	0,0115	0,0991	0,1075	0,0084	11,99
10	C5-G10	30	0,21	0,2878	0,0778	0,208	0,2981	0,0901	0,2064	0,2592		0,2207	0,2461	0,261	0,0149	0,0992	0,1078	0,0086	0,29
11	C5-G11	30	0,2081	0,2967	0,0886	0,2076	0,3237	0,1161				0,2047	0,2451	0,2556	0,0105	0,1015	0,1107	0,0092	7,48
12	C5-G12	30	0,206	0,3038	0,0978	0,2061	0,3069	0,1008				0,1986	0,2437	0,2538	0,0101	0,0997	0,1076	0,0079	0,26
13	C5-G13	30	0,207	0,3126	0,1056	0,209	0,2861	0,0771				0,1827	0,2449	0,2536	0,0087	0,0994	0,1069	0,0075	6,63
14	C5-G14	30	0,2091	0,284	0,0749	0,2079	0,2757	0,0678				0,1427	0,2456	0,2543	0,0087	0,0999	0,1064	0,0065	5,26
15	C5-G15	30	0,208	0,277	0,069	0,2076	0,2462	0,0406				0,1096	0,2422	0,2529	0,0107	0,1009	0,1081	0,0072	4,25
16	C5-G16	30																	
17	C5-G17	30	0,2078	0,3115	0,1037							0,1037	0,2418	0,2461	0,0043	0,1007	0,1043	0,0036	3,72
18	C5-G18	30	0,206	0,3003	0,0943							0,0943	0,2444	0,2497	0,0053	0,1012	0,1058	0,0046	3,47
19	C5-G19	30	0,2059	0,3446	0,1387							0,1387	0,2451	0,2504	0,0043	0,1049	0,1074	0,0025	4,85
20	C5-G20	30	0,208	0,2724	0,0644							0,0644	0,2471	0,2528	0,0057	0,1044	0,1084	0,004	2,47
21	C5-G21	30	0,2076	0,2403	0,0327							0,0327	0,2449	0,2499	0,005	0,1023	0,1065	0,0042	1,40
21'	C5-G21	30											0,2459	0,2662	0,0403	0,1006	0,103	0,0024	0,08
22	C5-G22	30											0,2429	0,2718	0,0289	0,1007	0,1035	0,0028	1,06
23	C5-G23	30											0,2427	0,2587	0,016	0,1008	0,1036	0,0028	0,63
24	C5-G24	30											0,2437	0,2482	0,0045	0,102	0,1046	0,0026	0,24

ANNEXE 3 (2/3)

Pesées en laboratoire (Filtres et MES)

N°	Code	analyse 1 µm - 0,45 µm									> 0,45 µm
		V (ml)	>1 µm		MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm		MES (g)	resultat	
1	C4-MV1	30	0.2451	0.2617	0.0166	0.55	0.1052	0.108	0.0028	0.09	0.65
2	C4-MV2	30	0.2449	0.2565	0.0116	0.39	0.0995	0.1018	0.0023	0.08	0.46
3	C4-MV3	30	0.2454	0.2531	0.0077	0.26	0.099	0.1014	0.0024	0.08	0.34
4	C4-MV4	30	0.2431	0.2476	0.0045	0.15	0.0982	0.1002	0.002	0.07	0.22

N°	Code	analyse 0,45 µm					analyse 1 µm - 0,45 µm								> 0,45 µm	
		V (ml)	P1	P2	MES (g)	resultat	V (ml)	>1 µm		MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm		MES (g)		resultat
1	C3-MV1						30	0.2459	0.3598	0.1139	3.80	0.1071	0.1093	0.0022	0.07	3.87
2	C3-MV2	30	0.1041	0.1214	0.0173	0.58	100	0.2464	0.3031	0.0567	0.57	0.1053	0.1096	0.0043	0.04	0.61
3	C3-MV3	50	0.1061	0.1199	0.0138	0.28	50	0.2457	0.2574	0.0117	0.23	0.1051	0.1098	0.0047	0.09	0.33
4	C3-MV4	50	0.1059	0.1164	0.0105	0.21	50	0.2454	0.2518	0.0064	0.13	0.105	0.1081	0.0031	0.06	0.19
5	C3-MV5	50	0.1019	0.1039	0.002	0.04	50	0.2478	0.2496	0.0018	0.04	0.1003	0.101	0.0007	0.014	0.05

N°	Code	analyse 0,45 µm					analyse 1 µm - 0,45 µm								> 0,45 µm	
		V (ml)	P1	P2	MES (g)	resultat	V (ml)	>1 µm		MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm		MES (g)		resultat
1	C3-V1						30	0.244	0.3089	0.0649	2.16	0.1049	0.1052	0.0003	0.01	2.17
2	C3-V2						30	0.2442	0.3145	0.0703	2.34	0.1045	0.1056	0.0011	0.04	2.38
3	C3-V3						30	0.2447	0.3558	0.1111	3.70	0.103	0.1069	0.0039	0.13	3.83
4	C3-V4						30	0.2461	0.3174	0.0713	2.38	0.1008	0.1013	0.0005	0.02	2.39
5	C3-V5						30	0.2449	0.3215	0.0766	2.55	0.1006	0.1007	0.0001	0.00	2.56
6	C3-V6						30	0.2376	0.2884	0.0508	1.69	0.1005	0.1017	0.0012	0.04	1.73
7	C3-V7						30	0.248	0.2857	0.0377	1.26	0.1017	0.1033	0.0016	0.05	1.31
8	C3-V8						30	0.2399	0.2664	0.0265	0.88	0.101	0.1029	0.0019	0.06	0.95
9	C3-V9	30	0.1011	0.1232	0.0221	0.74	30	0.2382	0.2572	0.019	0.63	0.1016	0.1042	0.0026	0.09	0.72
10	C3-V10	30	0.1011	0.1059	0.0048	0.16	30	0.2409	0.2422	0.0013	0.04	0.1025	0.1048	0.0023	0.08	0.12

N°	Code	analyse 1 µm - 0,45 µm									> 0,45 µm
		V (ml)	>1 µm		MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm		MES (g)	resultat	
1	C4-G1	30	0.2446	0.3796	0.135	4.50	0.1036	0.1051	0.0015	0.05	4.55
2	C4-G2	30	0.2427	0.3587	0.116	3.87	0.1042	0.1059	0.0017	0.06	3.92
3	C4-G3	30	0.2429	0.3433	0.1004	3.35	0.1048	0.1069	0.0021	0.07	3.42
4	C4-G4	30	0.2452	0.331	0.0858	2.86	0.1044	0.1063	0.0019	0.06	2.92
5	C4-G5	30	0.2472	0.3196	0.0724	2.41	0.1048	0.1064	0.0016	0.05	2.47
6	C4-G6	30	0.2471	0.3093	0.0622	2.07	0.1047	0.1082	0.0035	0.12	2.19
7	C4-G7	30	0.2442	0.2898	0.0456	1.52	0.1036	0.1078	0.0042	0.14	1.66
8	C4-G8	30	0.2455	0.2903	0.0448	1.49	0.0988	0.1006	0.0018	0.06	1.55
9	C4-G9	30	0.2448	0.2793	0.0345	1.15	0.1044	0.1072	0.0028	0.09	1.24
10	C4-G10	30	0.2434	0.2726	0.0292	0.97	0.0978	0.1005	0.0027	0.09	1.06

ANNEXE 3 (3/3)

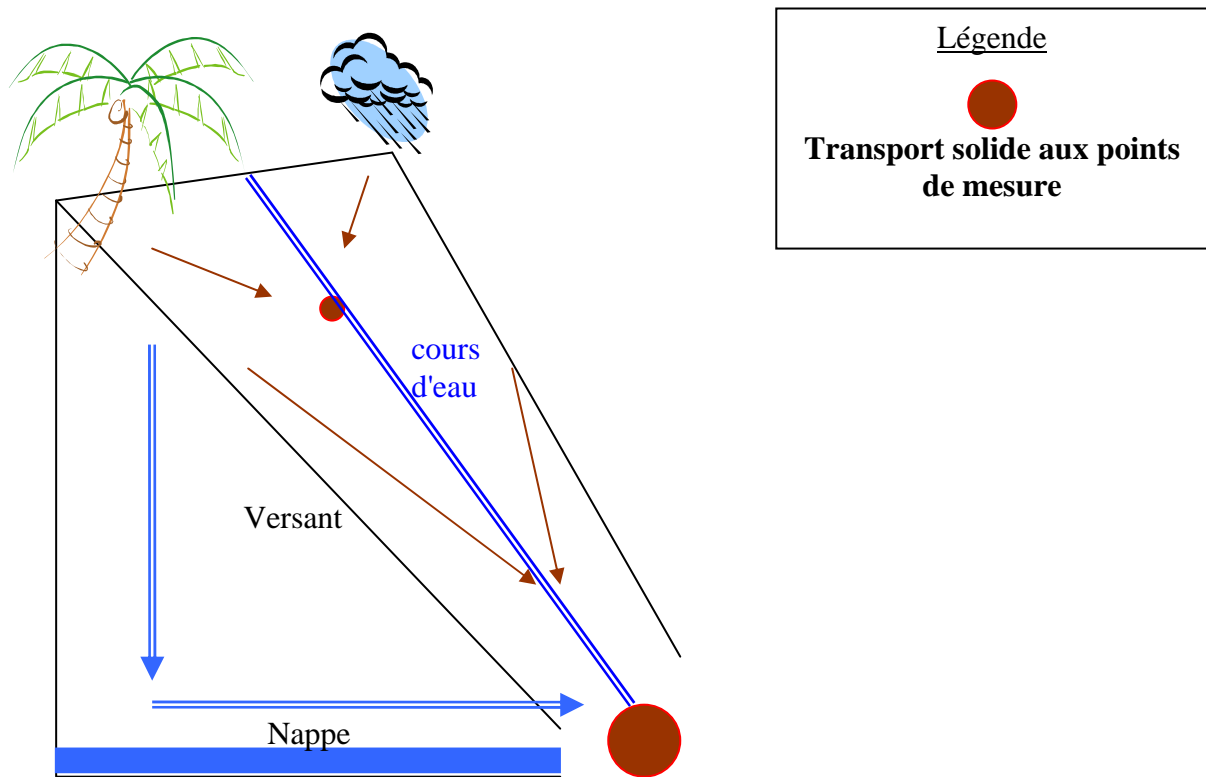
Pesées en laboratoire (Filtres et MES)

N°	Code	analyse 2,7 µm - 0,45 µm									> 0,45 µm
		V (ml)	>1 µm		MES (g)	resultat	1 µm - 0,45 µm		MES (g)	resultat	
1	C6-G1	50	0.244	0.2696	0.0256	0.51	0.1067	0.1108	0.0041	0.08	0.59
2	C6-G2	50	0.2451	0.2554	0.0103	0.21	0.1016	0.1071	0.0055	0.11	0.32
3	C6-G3	50	0.2454	0.2527	0.0073	0.15	0.105	0.1099	0.0049	0.10	0.24
4	C6-G4	30	0.2438	0.2484	0.0046	0.15	0.1034	0.1065	0.0031	0.10	0.26
5	C6-G5	30				0.00	0.1057	0.111	0.0053	0.18	0.18
6	C6-G6	30				0.00	0.1055	0.112	0.0065	0.22	0.22
7	C6-G7	30				0.00	0.1051	0.1127	0.0076	0.25	0.25
9	C6-G9	50	0.2487	0.2608	0.0121	0.24	0.1026	0.1069	0.0043	0.09	0.33
10	C6-G10	30	0.2437	0.2722	0.0285	0.95	0.106	0.1107	0.0047	0.16	1.11
11	C6-G11	30	0.2433	0.1107	-0.1326	-4.42	0.1051	0.2579	0.1528	5.09	0.67
12	C6-G12	30	0.2442	0.2588	0.0146	0.49	0.1045	0.1094	0.0049	0.16	0.65
13	C6-G13	30	0.245	0.2618	0.0168	0.56	0.1039	0.1078	0.0039	0.13	0.69
14	C6-G14	30	0.2479	0.2667	0.0188	0.63	0.102	0.1046	0.0026	0.09	0.71
15	C6-G15	30	0.2449	0.273	0.0281	0.94	0.1062	0.1078	0.0016	0.05	0.99
16	C6-G16	30	0.2466	0.2617	0.0151	0.50	0.1076	0.1099	0.0023	0.08	0.58
17	C6-G17	30	0.2446	0.258	0.0134	0.45	0.1059	0.1084	0.0025	0.08	0.53
18	C6-G18	30	0.2446	0.2591	0.0145	0.48	0.1064	0.1094	0.003	0.10	0.58
19	C6-G19	30	0.2456	0.2567	0.0111	0.37	0.1001	0.1027	0.0026	0.09	0.46
20	C6-G20	30	0.2471	0.2566	0.0095	0.32	0.1026	0.1055	0.0029	0.10	0.41
21	C6-G21	30	0.245	0.2616	0.0166	0.55	0.1059	0.1082	0.0023	0.08	0.63
22	C6-G22	30	0.2451	0.2597	0.0146	0.49	0.1063	0.1104	0.0041	0.14	0.62
23	C6-G23	30	0.2466	0.2626	0.016	0.53	0.1054	0.1085	0.0031	0.10	0.64
24	C6-G24	30	0.2441	0.2621	0.018	0.60	0.1034	0.1073	0.0039	0.13	0.73
25	C6-G25	30	0.2446	0.2671	0.0225	0.75	0.1031	0.1087	0.0056	0.19	0.94
26	C6-G26	30	0.2445	0.2736	0.0291	0.97	0.1035	0.1057	0.0022	0.07	1.04
27	C6-G27	30	0.2448	0.2479	0.0031	0.10	0.1047	0.10886	0.00416	0.14	1.55
28	C6-G28	30	0.2455	0.2842	0.0387	1.29	0.1072	0.1107	0.0035	0.12	1.41
29	C6-G29	30	0.2434	0.2605	0.0171	0.57	0.1043	0.1076	0.0033	0.11	0.68
30	C6-G30	30	0.2455	0.2739	0.0284	0.95	0.102	0.1068	0.0048	0.16	1.11
31	C6-G31	30	0.2431	0.2659	0.0228	0.76	0.1056	0.1095	0.0039	0.13	0.89
32	C6-G32	30	0.2468	0.2652	0.0184	0.61	0.1038	0.1074	0.0036	0.12	0.73

ANNEXE 4

Le transport solide mesure la vulnérabilité à l'érosion du bassin versant

Illustration Cemagref-PRAM



Le transport solide en suspension peut être caractérisé par différents paramètres, notamment :

1 - Paramètres qualitatifs :

- 11 - Etendue granulométrique
- 12 - Masse volumique, densité

2 - Paramètres quantitatifs :

- 21 - **Concentration** en MES (grammes/litre)
- 22 - **Flux** (tonnes ou m³), fortement corrélé au débit liquide
- 23 - **Flux spécifique**
 - 231 - par unité de surface (exemple : tonnes /ha)
 - 232 - par unité de temps (exemples : Kg/heure ou tonnes/an)
 - 233 - par unité de largeur du cours d'eau (approche hydraulique)




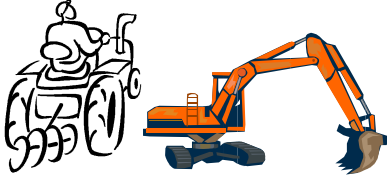

3 - Paramètres cinétiques

- 31 - **Régimes critiques**, caractérisés par un débit liquide et un débit solide
 - 311 - début de transport
 - 312 - plein transport
 - 313 - différenciation limite des transports de deux versants comparables
- 32 - **Accélération initiale du débit solide**, corrélée aux matériaux disponibles et, hypothèse à vérifier, aux accélérations flash du débit liquide
- 33 - **Vitesse d'épuisement** des matériaux disponibles
- 34 - **Vitesses relatives** des écoulements solide et liquide

ANNEXE 5

Analyse de risque : Aléa et vulnérabilité mesurés par le transport solide

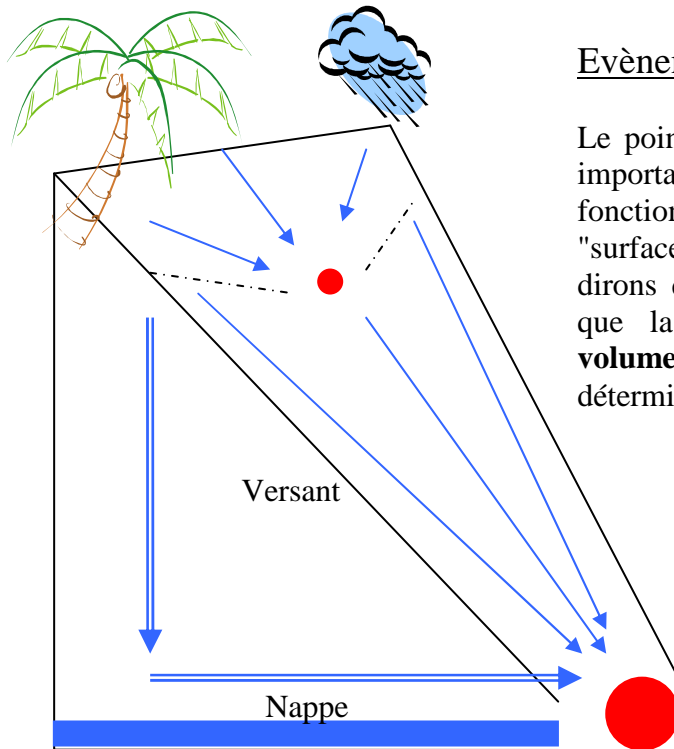
Illustration Cemagref-PRAM

	<u>Aléa moyen ou faible</u>	<u>Aléa fort ou extrême</u>
		
<u>Vulnérabilité structurelle</u> <ul style="list-style-type: none"> - Pente / altitude - Erodibilité des sols - Linéaire des cours d'eau - Absence de zones d'expansion des crues ou de rétention des sédiments. - Taux d'imperméabilisation - Usages agricoles permanents 	<p>Les vulnérabilités structurelles se différencient dès les premières élévations du débit au dessus du débit critique de début de transport</p>	<p>Les vulnérabilités structurelles sont plus fortement différenciées par les évènements climatiques majeurs.</p>
<u>Vulnérabilité conjoncturelle</u> <ul style="list-style-type: none"> - Actions humaines sur l'état du sol (Défrichements, labours, affouillements)  <ul style="list-style-type: none"> - Cisaillements de terrain, suite à de fortes pluies 	<p>A l'échelle de l'année, l'aléa-pluie fonctionne comme une "voiture-balai". Les pluies ordinaires emportent rapidement tous les matériaux rendus disponibles.</p>	<p>La fréquence des évènements pluvieux augmente la vulnérabilité conjoncturelle.</p>

ANNEXE 6

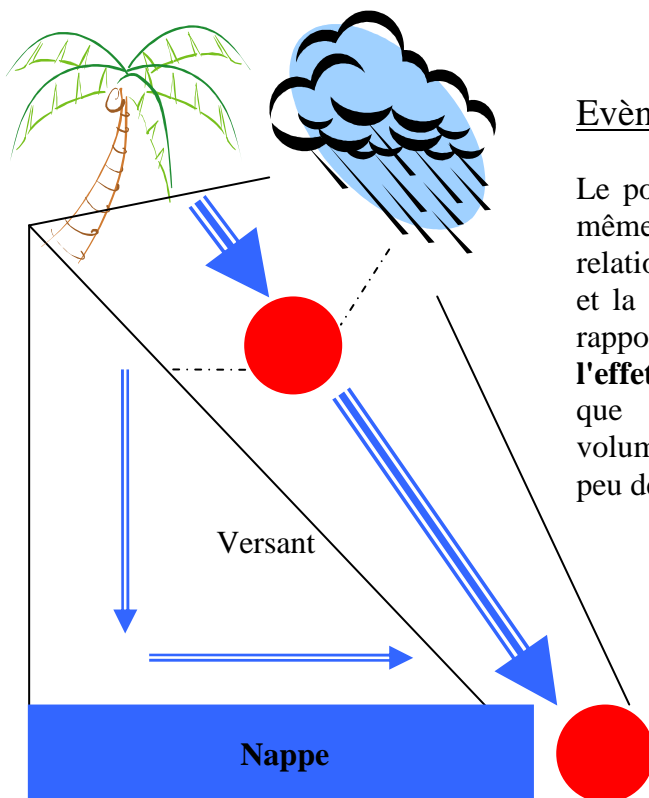
"Surface intégrée au point de mesure" et "effet de surface"

Le terme "surface intégrée" procède d'un abus de langage qui peut induire en erreur. Cette fiche donne quelques explications. - Illustration Cemagref-PRAM



Evènement pluvieux faible ou moyen

Le point bas exprime un flux spécifique plus important que le point haut : la relation fonctionnelle entre le ruissellement et la "surface intégrée" n'est pas explicite. Nous dirons que l'**effet de surface** est faible, mais que la "surface intégrée", assimilée au volume du versant par abus de langage, est déterminante.



Evènement pluvieux fort ou extrême

Le point bas exprime un flux spécifique de même ordre de grandeur que le point haut : la relation fonctionnelle entre le ruissellement et la "surface intégrée" tend vers un simple rapport de proportionnalité. Nous dirons que l'**effet de surface est prépondérant**, mais que la "surface intégrée", assimilée au volume du versant par abus de langage, est peu déterminante.

Légende

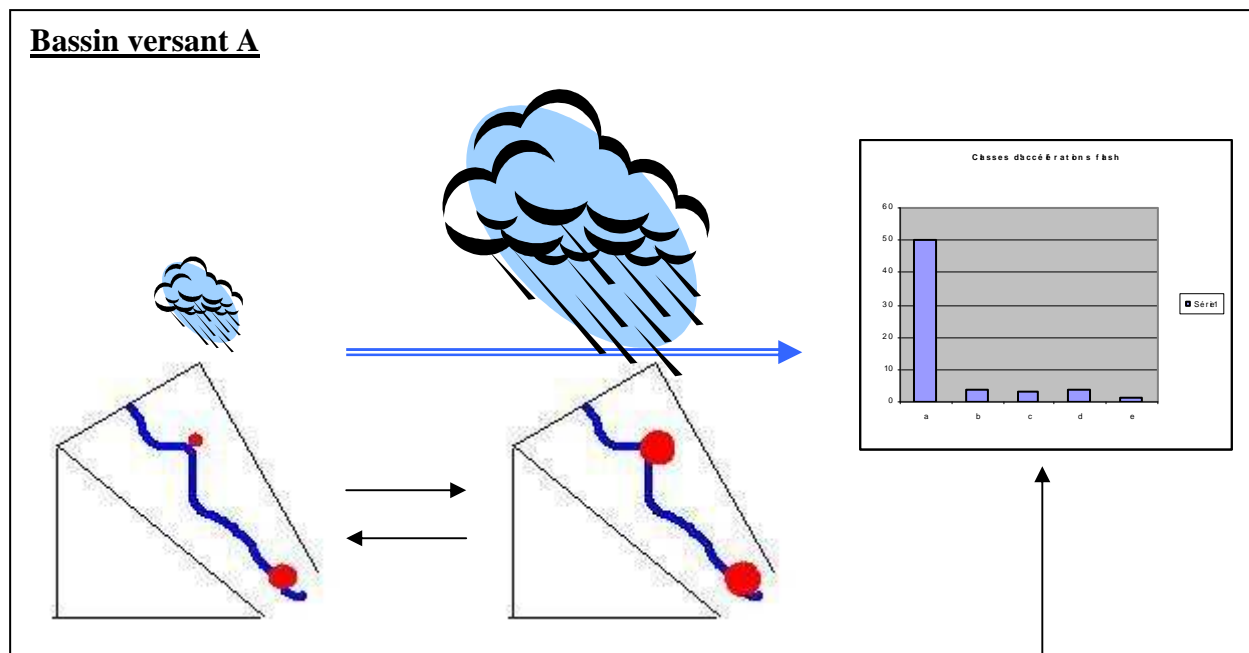
●
flux spécifiques au
point de mesure
(unité = m³/ha)

ANNEXE 7

Application de la distribution des accélérations flash du débit à la comparaison de deux bassins versants

Illustration Cemagref-PRAM

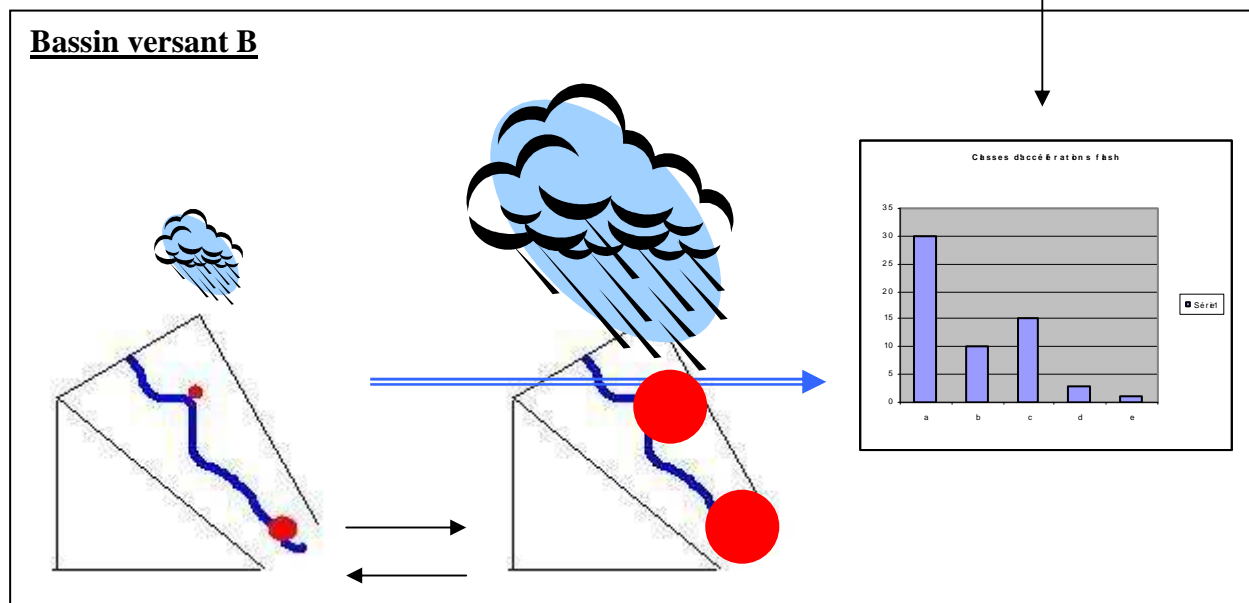
Bassin versant A



Hypothèse : La distribution des classes d'accélération flash du débit caractérise la relation qu'entretiennent le ruissellement et l'infiltration, donc en particulier :

- l'action érosive de la pluie à la surface du versant.
- L'infiltrabilité des surfaces

Bassin versant B



ANNEXE 8

Les élèves ingénieurs stagiaires contribuent efficacement à l'avancée des travaux de recherche ; nous avons ici voulu leur rendre hommage.



Anne CATLOW – Elève ingénieur stagiaire – AgroParisTech – 2008
Relevé topographique de la ravine Mansarde

Photographie Anne-Claire NIVET et Julie GRESSER

