



Etude des Transferts de pesticides

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 : « **ETUDE DES TRANSFERTS DE PESTICIDES SUR LE SITE ATELIER DE LA BAIE DU ROBERT** »

Nom du responsable scientifique du projet : Julie GRESSER, Cemagref – UR Aema

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

Partenaires financiers : MEDAAT - DIREN Martinique – Convention du 07/12/2006

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.
- **Quatre 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 le **transport solide** dans la ravine et les deux cours d'eau étudiés, la troisième étudie les méthodes de construction des **courbes de tarage**, la quatrième enfin aborde la **sociologie de l'eau** sur le site de la baie du Robert.

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, l'équipe pédagogique de l'agro Montpellier notamment **Marc VOLTZ** et **Gilles BELAUD** 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.

Résumé (En français)

Il est pertinent de mesurer les évènements hydrologiques d'un cours d'eau et les concentrations en pesticides qu'il transporte, car le cours d'eau intègre et révèle les propriétés du bassin versant associé.

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 des flux de molécules à usage phytosanitaire depuis la partie terrestre de la baie du Robert, constituée de versants montagneux de petite dimension, vers la zone littorale.

Nous avons tout d'abord dressé un inventaire des molécules présentes. Nous avons ensuite confirmé l'influence de la pluviométrie saisonnière sur les concentrations mesurées. Enfin, nous avons estimé les flux annuels de contaminants.

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

Transfert de pesticide, bassin versant, climat tropical, Baie du Robert, Martinique

Abstract (In English)

It is pertinent to measure hydrological events occurring in a stream and pesticide contents which flow in, as rivers and gutters bring to light events 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 the hydrological polluting flows from Robert bay occupied areas, which generally are small mountain catchments, to coastal zone.

Firstly, we took stock of pesticidal molecules. Secondly, we confirmed the influence of seasonal rainfall events on the contents we found. Thirdly, we estimated the annual polluting flow.

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

Key words

Pesticide transfer, watershed, tropical climate, Robert bay, Martinique

TABLE DES MATIERES

Introduction	6
1 OBJECTIFS – ETAT DE L'ART	7
11 Objectifs de l'étude	7
12 Etat de l'art et des connaissances	7
2 CONTEXTE ET MODES OPERATOIRES	9
21 Présentation générale de la baie du Robert, territoire à enjeux	9
22 La DCE, un cadre d'action pour le suivi de l'état chimique des masses d'eau	16
23 Présentation des stations de mesure	19
231 Géo-références des lieux de prélèvement	19
232 Choix des sites en fonction des objectifs de l'étude	20
233 Géographie des trois bassins versants étudiés	20
234 Occupation du sol dans l'environnement des stations de mesure,	25
235 Les équipements, station par station	28
24 Type de suivi - recueil des données	29
241 Données hydrologiques	29
242 Concentrations en pesticides	30
2421 Modes opératoires	30
2422 Suivi mensuel	32
2423 Suivi en crue	33
243 Enregistrement des pratiques agricoles dans l'environnement des points de mesure	35
25 Données manquantes	36
251 Bilan des données disponibles	36
252 Estimation des valeurs manquantes	37
26 Incertitudes sur les données pour l'interprétation des résultats	38
261 Concentrations en pesticide	38
262 Données hydrologiques	38
2621 Pluies et averses	38
2622 Débits, crues et flashes	40
3. RESULTATS	42
31 Inventaire des molécules retrouvées, facteur occupation du sol	42
32 Analyse des concentrations en moyennes mensuelles, transfert chronique et facteur climatique	46
321 Caractérisation des stations de mesure	46
322 Examen de quelques suivis mensuels	47
33 Analyse des concentrations en crue, pratiques agricoles, lessivage et facteur hydrologique	53
331 Quelques définitions	53
332 Lessivages en évènement de crue	54
3321 Lessivage en zone cannière - Gashette	54
3322 Lessivage en zone d'habitat diffus - Voltaire	55
3323 Lessivage en une zone bananière – Mansarde aval	59
333 Limites du protocole : distributions spatiales	64
3331 Distribution spatiale des pluies	65
3331 Distribution spatiale de l'Infiltrabilité des surfaces	65
34 Analyses évènementielles, évaluation des flux annuels de pesticides et facteur d'échelle	67

341 Quelques définitions (suite du paragraphe 331)	67
342 Classes de débits instantanés	68
343 Relation concentration / débit	71
3431 Présentation des hypothèses de travail	71
3432 Jeux de données et régressions pour le Diuron sur Gashette	72
3433 Jeux de données et régressions pour l'AMPA sur Voltaire	75
344 Classes d'évènement et flux de pesticides	77
3441 Représentativité des points de mesure	77
3441 Application directe aux évènements de la rivière Voltaire	81
3442 Application directe aux évènements de la rivière Gashette	82
3443 Application indirecte aux évènements de la rivière Mansarde	83
3444 Analyse comparative des flux de pesticide dans trois situations	86
4 ANALYSE DES RESULTATS	88
41 Synthèse des principaux résultats	88
42 Difficultés rencontrées	90
421 Difficultés de protocole	90
422 Difficultés de mise en oeuvre	91
423 Difficultés d'interprétation	91
43 Validation des protocoles	92
44 Réseau de suivi de la qualité des masses d'eau, respect des normes de la directives cadre européenne	93
45 Analyse critique sur l'atteinte des objectifs de l'étude	95
Conclusion	96
Bibliographie	97
Annexes (1 à 5)	100

Introduction

La gestion durable des espaces littoraux se trouve confrontée à de nombreux enjeux, au rang desquels la **qualité des eaux superficielles continentales** joue un rôle majeur. Le réseau hydrographique de ces espaces, entre processus bio-physicochimiques naturels et pressions exercées par les activités humaines, constitue en effet une voie de transfert privilégiée pour des contaminants et polluants divers jusqu'aux zones côtières. La Directive Cadre européenne sur l'Eau, ainsi que la directive européenne pour la Stratégie du milieu marin, fondent le socle commun des actions menées pour surveiller, évaluer et agir en faveur d'une préservation et d'une restauration de la qualité de ces milieux.

Dans ce contexte, la baie du Robert, territoire complexe et particulièrement vulnérable aux pressions d'origine anthropique, est marquée par une dégradation généralisée de ses écosystèmes, dont les services rendus constituent un atout majeur pour les sociétés qui en bénéficient. Face à une urbanisation qui ne décélère pas, les bassins versants qui l'alimentent, de plus en plus aménagés, sont le siège d'une modification de leur fonctionnement et d'une **dégradation des processus naturels** à l'œuvre dans la régulation du cycle de l'eau. Il s'agit aujourd'hui, en accord avec les obligations de résultats fixées par les directives et législations en vigueur, de mesurer pour mieux comprendre l'état et l'évolution de ces hydrosystèmes continentaux.

Cette étude, menée par le Cemagref-PRAM, UR Aema (Agriculture et espace insulaire), résulte d'une volonté partagée avec la ville du Robert, l'Ifremer, la DIREN et l'Office de l'eau de la Martinique d'**accroître les connaissances** relatives aux transferts des pesticides dans les eaux de surface qui alimentent la baie. Toutefois, le contexte particulier créé par la forte énergie structurelle du pourtour de baie du Robert, bassin versant de 23 Km² lui-même décomposé en 22 micro-bassins fortement pentus, nous a amené dans un premier temps à **tester des protocoles de mesure**. La validation des protocoles de mesure et d'échantillonnage est un des principaux buts poursuivis par cette étude.

Le présent rapport fait état des démarches suivies et des résultats obtenus : Nous présenterons dans une première partie (1) la baie du Robert et les quatre stations de mesure installées. Dans une deuxième partie, (2) nous détaillerons le protocole de mesure mis en place. Dans une troisième partie, (3) nous présenterons les connaissances acquises au cours de cette étude. Enfin, (4) nous reviendrons avec un regard critique dans une quatrième partie pour analyser les difficultés rencontrées et les perspectives ouvertes par les résultats obtenus.

1 OBJECTIFS – ETAT DE L'ART

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

11 Objectifs de l'étude

Des prérogatives fortes pour la préservation des ressources en eau et des milieux aquatiques sont aujourd'hui données à l'ensemble des acteurs concernés. Elles visent à répondre à un défi d'envergure : assurer un développement territorial compatible avec la préservation de la qualité des eaux douces et marines, ainsi que des écosystèmes continentaux et marins. La déclinaison à l'échelon local d'objectifs fixés à l'échelon européen détermine le cadre général de notre action.

Après avoir réalisé un état des lieux du pourtour de la baie du Robert en 2005 et 2006, et malgré les enjeux écologiques et économiques qui concernent la zone d'étude, nous avons constaté la pauvreté heuristique relative au fonctionnement du bassin versant.

Cette étude est la première démarche quantitative réalisée sur le site atelier de la baie du Robert. Elle s'intéresse à la contamination des eaux de surface par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture et par l'habitat dispersé. Deux objectifs principaux sont assignés :

Un objectif méthodologique : Valider les installations des quatre stations mises en place et les protocoles de mesure et d'échantillonnage proposés.

Un objectif heuristique : Etudier les facteurs du transfert des pesticides dans le milieu récepteur marin via le système hydrographique de surface, principalement les facteurs liés à l'occupation du sol (usages agricoles, habitat dispersé).

Il faudra souligner ici l'originalité des sites d'étude : D'une part, les trois bassins versants instrumentés sont de **petite taille**, de l'ordre du km², d'autre part, un **cours d'eau intermittent** est étudié à une échelle de temps fine, la minute, parallèlement à deux cours d'eau permanents.

12 Etat de l'art et des connaissances

Nous rappelons ici quelques éléments relatifs à la métrologie des polluants en relation avec les objectifs poursuivis. Nous renvoyons le lecteur intéressé à l'excellent article de Véronique Gouy et al. - revue « Ingénieries EAT N°13 - mars 1998 - pages 3 à 14 »

Nécessité et limites d'un protocole validé

La caractérisation d'un cours d'eau et des substances à risques qu'il véhicule, risques pour l'environnement et pour la santé humaine, tels que certaines molécules phytosanitaires en présentent, suppose un protocole d'échantillonnage validé.

Ces polluants sont difficilement mesurables du fait de leurs modes de transfert dans les eaux et leurs modes de transport, par dissolution ou par adsorption, en relation avec leur affinité pour les particules solides (mesurée par un coefficient de partage) et leur capacité à se dégrader (mesurée par la demi-vie). A ces difficultés s'ajoute l'hétérogénéité spatiale au sein de la masse d'eau.

Le dimensionnement des campagnes d'analyse nécessite alors un premier « calibrage ». Ainsi, le nombre et la fréquence des prélèvements, le choix des équipements de mesure et des méthodes d'analyse doivent être validés. Les incertitudes de mesure seront estimées « au mieux » avant interprétation des résultats.

L'identification du pic de pollution en crue est d'autant plus difficile que le transfert est rapide. La faible dimension des bassins versants étudiés et la forte énergie du relief accroissent cette difficulté. Le recours aux préleveurs à déclenchement automatique est alors conseillé, bien qu'il ne soit pas une garantie absolue d'identification du pic de pollution (Gouy et al. 1998 – article déjà cité).

Les sources de pollution peuvent être de différentes natures : (1) **La nappe** qui alimente le cours d'eau peut être chargée en produit par un contact prolongé avec le sol et constituer la source de la pollution. (2) **Les mécanismes de piégeage / relargage** par les sols sont encore mal connus et difficilement prévisibles. (3) A ces sources de contamination s'additionnent **les contaminations ponctuelles** liées aux usages des formulations commerciales par l'agriculture, mais aussi par les particuliers, notamment les herbicides à large spectre comme le Glyphosate dont le produit de dégradation, l'AMPA, peut se retrouver en quantités importantes dans les eaux de surface.

Les exportations par ruissellement sont particulièrement contingentées par la pluviométrie au cours d'une période supposée courte, juste après épandage. Toutefois, dans une situation expérimentale présentée par le Cirad et l'Inra de Guadeloupe sur différents types de sols argileux, les exportations par ruissellement se sont avérées inférieures à celles par drainage **sous bananier**. (« Quelques éléments clés sur l'origine et le mode de pollution des eaux par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture » - P.Cattan et al. 2005).

Maurice Meunier dans son ouvrage « Les torrents du Nord-Ouest de la Martinique » - Editions Cemagref (reprises par Editions Quae) – 1999, estime les fonctions de production (pluie / ruissellement) et de transfert (ruissellement / débit) à partir de données moyennes tirées de la monographie 1975 de l'Orstom. La validité de ses modèles suppose des bassins versants supérieurs à 4 km². Nous ne pouvons donc pas y faire référence. Toutefois, il note en général une **forte infiltrabilité des sols** de la Martinique et un manque de mesures expérimentales en érosion / transfert.

Relations concentration / débit.

L'étude des évènements de crue et des relations entre les concentrations de matières dissoutes ou en suspension, et les débits, fait apparaître trois types de mécanismes :

(1) En crue, des mécanismes de **dilution** sont observés, lorsque la molécule ou le minéral recherché est présent de manière permanente dans la nappe qui alimente le cours d'eau. Dans ce cas, le pic de crue a pour effet de diminuer la concentration par dilution. Les saisons sèches, au cours desquelles le cours d'eau est essentiellement alimenté par la nappe, s'accompagnent de concentrations plus fortes.

(2) Des mécanismes de **lessivage** par l'eau de ruissellement sont observés, lorsque la molécule recherchée est présente à la surface du sol, notamment après un épandage. Dans ce cas, le pic de crue a pour effet d'augmenter la concentration de l'eau ; on observe alors un pic de pollution.

(3) Des mécanismes de **retard** du pic de pollution sur le pic de crue peuvent être observés lorsque la source de pollution est éloignée du point de mesure. Dans ce cas, l'onde de crue progresse plus rapidement que la masse d'eau contaminée et un décalage entre le pic de crue et le pic de pollution apparaît. Une dilution progressive intervient ensuite en décrue.

Il est difficile d'établir une relation exacte entre concentration et débit, toutefois, certains auteurs notent des relations de la forme : [Concentration = **b** x Débit ^a], formule dans laquelle **b** caractérise la dimension du bassin versant, et **a** caractérise la relation entre la substance mesurée et la crue (« Les cours d'eau » – Jean-Paul Bravard et François Petit – Ed. Armand Colin – 1997 – page 61 et suiv.).

Ces relations ont l'avantage d'être établies simplement, par ajustement de deux fonctions puissances, l'une en montée et l'autre en décrue, et pourront être utilisées pour estimer des flux de produit. Elles sont observées autant pour les éléments dissous que pour les éléments en suspension, autant pour les mécanismes de dilution que pour les mécanismes de concentration. Une réserve à noter est l'échelle spatiale pour lesquelles ces relations sont en général établies, portant sur des bassins de plusieurs dizaines ou centaines de km² qui ne correspondent pas à notre contexte d'étude.

Il serait illusoire de penser mesurer précisément les quantités de matières actives transférées par ces méthodes. Cependant, des estimations fondées sur ce type de régression, voire des ajustements exponentiels justifiés par l'énergie des reliefs étudiés, permettront d'établir des ordres de grandeur qui amèneront des comparaisons utiles à la compréhension des mécanismes de transfert.

2 CONTEXTE ET MODES OPERATOIRES

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

(Le texte de cette présentation est emprunté à Kevin PINTE – 2006)

Située sur la façade atlantique de la côte martiniquaise, la baie du Robert - 3ème commune de l'île avec environ 30 000 habitants - présente des enjeux rencontrés par la plupart des pays insulaires de la Caraïbe. Particulièrement vulnérable aux pressions d'origine anthropique

(bassin versant de 23 km²), elle est marquée par une dégradation généralisée de ses écosystèmes, liée à la fois aux particularités de ce milieu (relief accidenté, important réseau hydrographique, propriétés physiques des sols liées à leur origine volcanique) et à une urbanisation toujours plus importante. L'envasement des fonds marins, les changements de bathymétrie et la dégradation de biocénoses remarquables (herbiers de phanérogames et certaines ressources halieutiques) caractérisent notamment des apports excessifs de polluants physiques et chimiques dans la baie.

Le développement socio-économique de la commune du Robert s'inscrit dans le cadre d'une valorisation de son principal atout naturel, le havre du Robert. Aujourd'hui, le potentiel halieutique (et dans une moindre mesure aquacole) de la baie est menacé par les impacts des activités anthropiques et l'augmentation démographique sur l'ensemble du bassin versant. Les premières études du milieu récepteur ont mis en évidence une dégradation généralisée des écosystèmes marins côtiers, liée aux activités terrestres et au transport de polluants par le réseau hydrologique de surface (Dao et al, 2008).

Depuis 2004, le « site atelier de la baie du Robert » permet ainsi l'émergence d'études coordonnées entre espaces terrestres et côtiers, associant différents organismes de recherche et d'expertise. On se reportera au rapport de Dao et al, 2008, pour les principales études diagnostiques effectuées dans le cadre du programme de recherche LITEAU II (MEEDDAT). Ces études qualitatives menées par le site-atelier se sont attachées à mieux caractériser (1) l'eutrophisation de la baie du Robert, en relation avec les charges polluantes en sels nutritifs du bassin versant, (2) l'envasement de la baie, en relation avec l'érosion hydrique des sols.

Un bassin versant autour d'une baie

Le bassin versant de la baie du Robert est très particulier de par sa forme, qui le différencie des bassins versants de rivières. Il est en effet ramassé autour de la baie, qu'on qualifie de semi fermée, et est drainé par un grand nombre de rivières ou ravines auxquelles sont attachés autant de bassins versants élémentaires. Pour l'étudier, il faut donc passer par un découpage en sous bassins versants à exutoire unique.

Lors d'une étude précédente, réalisée par le Cemagref-PRAM (Marie et Lucas, 2005) sur le diagnostic des pollutions agricoles diffuses, un découpage en 22 sous bassins versants avait été réalisé. Ce découpage fait ressortir 3 sous bassins de taille supérieure. Il s'agit des sous bassins comportant les rivières Cacao (6,3 km²), Mansarde (4,2 km²) et la rivière Gaschette (3 km²).

Un relief très disséqué

Le relief s'organise de façon circulaire autour de la baie. La ligne de crête, constituée de mornes, est bien dessinée et culmine à 366 m au niveau de Morne Pavillon.

Dans la partie centrale, une plaine, majoritairement occupée par le bourg du Robert, borde le front de la baie. Dans la moitié sud du bassin (sous bassin versant de la rivière Cacao), la plaine laisse rapidement place à un relief marqué par de très fortes pentes. On constate ainsi 300 m de dénivelé sur environ 2 km de distance au niveau de Pontaléry, soit une pente moyenne de 15%. Dans la moitié nord, la transition entre la plaine et les versants abrupts sous la ligne de crête est plus douce avec une zone intermédiaire de collines, bien visible sur le sous bassin versant de la rivière Mansarde.

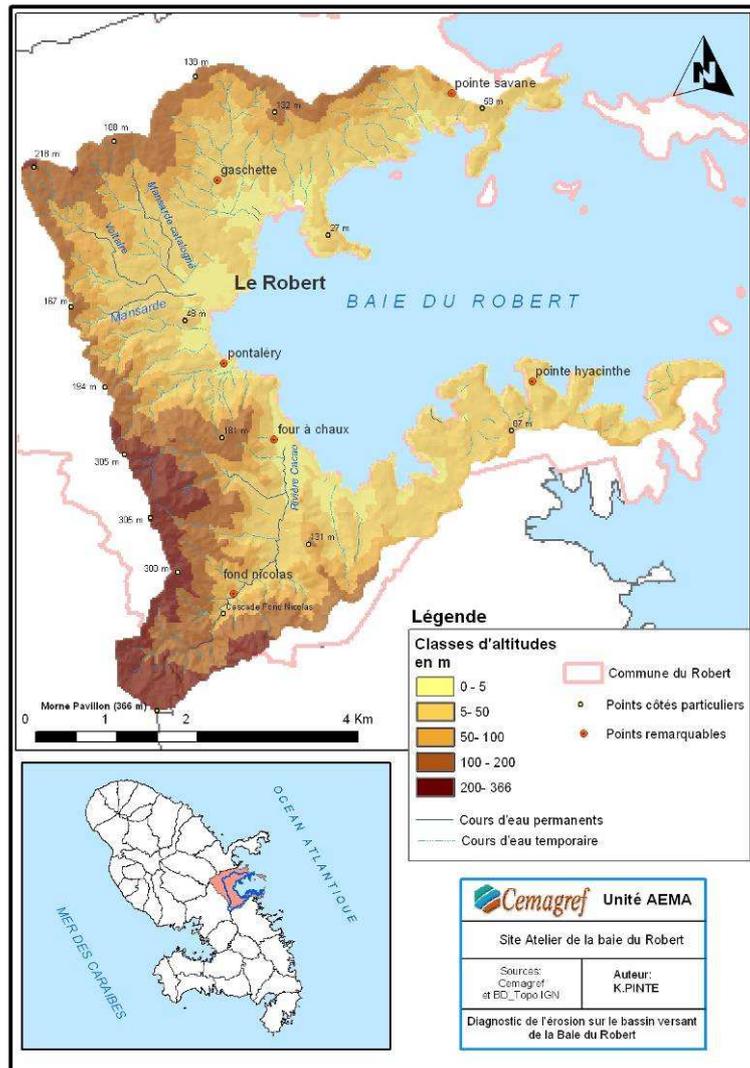


Figure 1 : Carte du relief du bassin versant du Robert

On peut ainsi définir, en s'intéressant au paysage géomorphologique du bassin, 3 grands ensembles paysagers :

- Les plaines qui bordent le fond de la baie,
- La zone d'arrière plaine constituée de collines peu élevées avec des pentes moyennes,
- Le fond de bassin avec les mornes de la ligne de crête et les versants longs et abrupts qui arrivent parfois directement à la baie (zone de Four à Chaux).

L'organisation assez simple du relief et le caractère ramassé du bassin font que le réseau hydrographique est constitué de rivières et ravines qui partent des lignes de crêtes et arrivent sans détour jusqu'à la baie. La rivière la plus longue est la rivière Cacao qui depuis les hauteurs de Fond Nicolas jusqu'à son exutoire totalise un linéaire de 4,6 km. Dans les parties amont des sous bassins, le réseau est très encaissé, comme peuvent en témoigner les cascades et gorges de Fond Nicolas sur le sous-bassin versant de la rivière Cacao.

Un climat peu contraignant

Le bassin versant de la baie est soumis à un climat tropical à saison sèche relativement marquée. Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 1500 mm à 2000 mm.

Les parties du bassin les plus à l'est, constituées par Pointe Savane et Pointe Hyacinthe sont moins arrosées et ont un carême très marqué. Ces zones, situées à une altitude très faible et éloignées des premiers reliefs, ne reçoivent pas de pluie pendant la saison sèche.

Par contre les parties plus centrales du bassin (fond de la baie, et ligne de crête centrale) ont une saison sèche moins prononcée. Ces zones, à altitude plus marquée ou se trouvant au pied de reliefs, reçoivent pendant la saison sèche de faibles pluies issues de la conjonction entre nuages poussés par les alizés et turbulences formées sur les reliefs. La figure des cumuls résume les moyennes mensuelles réalisées sur 13 années et pour deux stations pluviométriques.

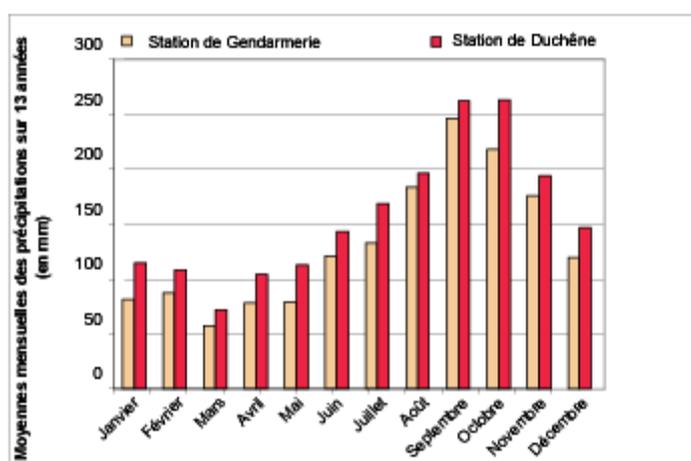


Figure 2 : Moyennes des cumuls mensuels sur 13 années de mesure
(source : données météo-France issues du Diagnostic de l'érosion, Pinte, 2006)

L'ensemble du bassin reste concerné par les épisodes pluvieux d'hivernage plus conséquents (ondes tropicales, tempêtes tropicales et ouragans).

Des sols argileux

Selon la cartographie de Colmet-Daage (1969) réactualisée par l'IRD (Unité Valpédo de Montpellier), les sols présents sur le bassin versant sont presque exclusivement issus de formations volcaniques anciennes. Soumis à un climat relativement humide, ces formations ont subi une altération chimique poussée pour donner des sols très argileux. On rencontre ainsi une majorité de sols brun rouge à montmorillonite et ferrisols compacts. Les vertisols se rencontrent en majorité sur la pointe Sud du bassin (Pointe Hyacinthe), zone occupée d'ailleurs par des pâturages.

Ces sols argileux constituent des terres agricoles à fort potentiel agricole.

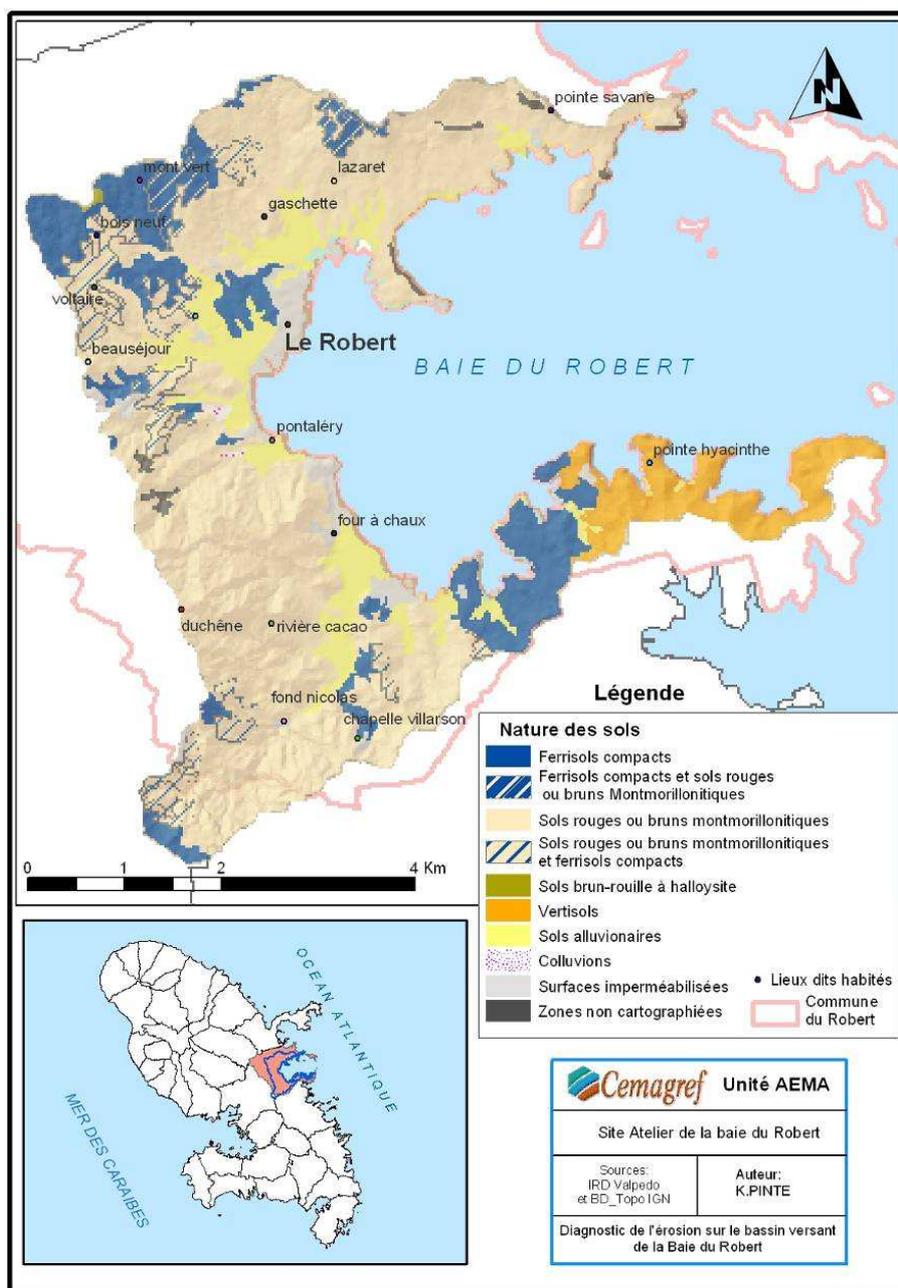


Figure 3 : Carte Pédologique simplifiée au 1/20 000^{ème}

Les mangroves : un milieu tampon

Les mangroves constituent un écosystème particulier à l'interface entre milieu marin et milieu terrestre qui se développe au sein de la zone intertidale (Desse et Saffache, 2005). Dans la présente étude, les zones couvertes par la mangrove n'ont pas été considérées comme faisant partie du bassin versant. Néanmoins, les mangroves de la baie du Robert font partie intégrante de la richesse écologique de la baie grâce notamment au rôle tampon (rétention des sédiments et phytoremédiation) qu'elles peuvent jouer.

Un territoire en pleine mutation

Selon Marie et Lucas (2005), la commune du Robert connaît aujourd'hui des modifications territoriales importantes en termes d'habitat, que ce soit sur sa frange littorale ou son arrière-

pays. Les avantages offerts par la baie du Robert (cadre de vie agréable, activités écotouristiques de plus en plus développées) expliquent en partie l'évolution positive de la démographie.

Depuis cinquante ans, les recensements successifs enregistrent en effet un solde moyen de +15% (Plan local d'urbanisme de la commune, ou P.L.U, 2002). Actuellement, le Robert se classe comme la troisième commune du département, avec une densité de 449 habitants au km².

Cette augmentation de la population n'est pas sans conséquence sur la gestion de l'habitat. On constate ainsi une occupation diffuse du territoire, avec une installation éclatée des nouvelles propriétés. Le bourg lui-même ne concentre que 14% des logements (P.L.U, 2002). Ceci signifie que plus de trois habitants sur quatre vivent dans les mornes de l'arrière pays. On constate donc une mutation de l'organisation urbaine, qui se traduit notamment sur le territoire par un mitage du tissu rural.

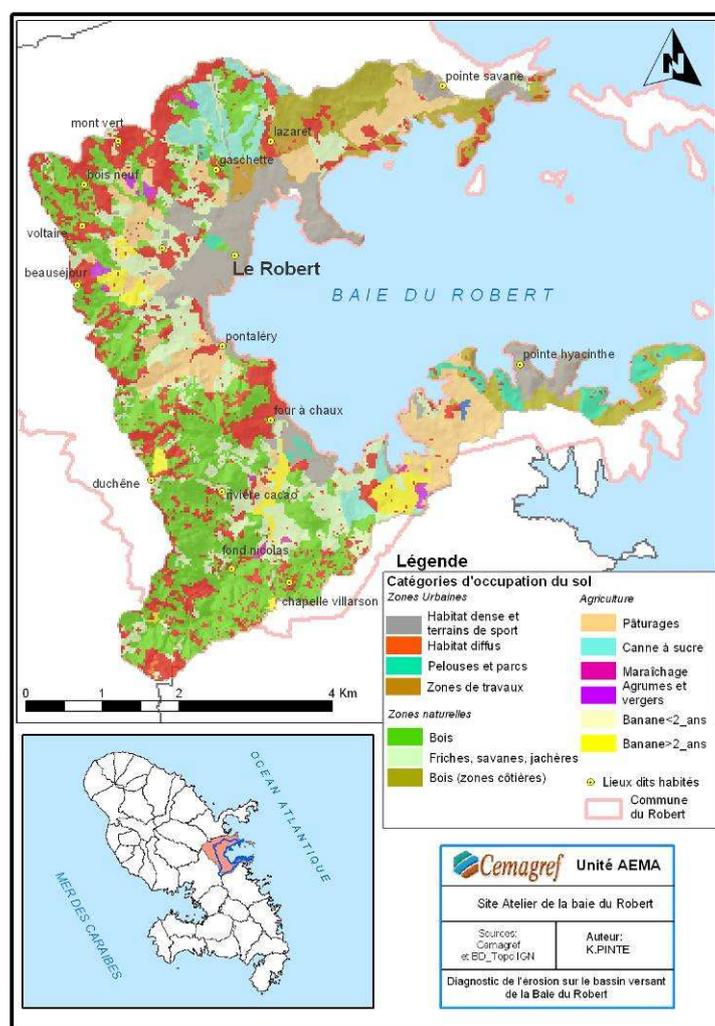


Figure 4 : Occupation du Sol sur le bassin versant de la baie du Robert

Une agriculture diversifiée

Les informations données ici, sont majoritairement issues de l'étude spatiale des risques agro-environnementaux menée par le Cemagref (Marie et Lucas, 2005) dans le cadre du projet

Liteau II. Pour mener cette étude, des enquêtes chez les agriculteurs ont été réalisées (correspondant à 68 % de la surface agricole du bassin).

Cette surface agricole ne représente que 24% de la superficie totale du bassin. Le reste du territoire est occupé par l'habitat et les zones naturelles (bois et savanes) comme en témoigne la carte de l'occupation du sol. Trois activités agricoles dominent : l'élevage (57% de la surface agricole), la culture de la canne à sucre (14%) et celle de la banane (12%). Les élevages intensifs (porcins, cunicoles, avicoles), les vergers (plantés en goyaves et agrumes) et le maraîchage se partagent le reste de la surface agricole.

Une des principales difficultés dans le diagnostic de l'agriculture sur le bassin versant de la baie (remarque identique pour le reste de la Martinique) est de faire la part entre l'agriculture déclarée et commerciale et l'agriculture non déclarée, pratiquée dans les jardins ou sur des terrains annexes. Ainsi, même si le maraîchage n'occupe que 2% de la surface agricole du bassin, les potagers individuels se comptent-ils en grand nombre sur le territoire.

La taille des exploitations est relativement faible (10 ha en moyenne) mais la répartition des surfaces est très hétérogène selon les activités. Les parcelles de pâturage sont en moyenne plus grandes que celles vouées à la culture de canne et de banane (respectivement 9 ha, 4,5 ha, 2,35 ha). Les parcelles fruitières et maraîchères, toujours identifiées sur des exploitations tournées vers une activité principale différente (banane ou élevage), sont en revanche à la limite du jardin individuel.

L'activité agricole du bassin versant de la baie se caractérise donc par une diversité importante, tant par les activités recensées que par la structure d'exploitation. Le morcellement des parcelles domine (petites surfaces, parcelles en friche), lié en partie à la pression urbaine croissante (Scherer, communication personnelle).

Le bassin versant de la baie du Robert est donc un territoire qui représente à la fois les spécificités de l'île (climat, contraste du relief) mais aussi un certain nombre de particularités qui en font un terrain d'étude tout à fait intéressant. Autour d'une baie aux enjeux économiques et environnementaux multiples, le bassin versant se positionne comme un territoire en mutation dont les activités exercent des pressions sur le milieu récepteur (pollutions diffuses, apports solides terrigènes, etc.). Ce constat a été réalisé alors que la situation devient de plus en plus préoccupante et que l'écosystème de la baie semble réellement menacé.

22 La DCE, un cadre d'action pour le suivi de l'état chimique des masses d'eau

La directive n° 2000/60/CE du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau, dite Directive cadre sur l'eau (DCE), fixe pour chaque état membre des objectifs de reconquête du bon état général écologique et physico-chimique des eaux superficielles et du bon état physico-chimique des eaux souterraines d'ici 2015.

Suivant la carte de l'annexe 2, qui reflète le zonage des masses d'eau « cours d'eau » et des masses d'eau côtières sur le district hydrographique de la Martinique, la zone d'étude n'est pas intégrée à une masse d'eau terrestre type « cours d'eau ». Néanmoins, le Comité de Bassin de la Martinique a souhaité, lors de la révision du SDAGE¹, que soit dressée une liste des Autres cours d'eau et ravines (ACER). Parmi cette liste figurent tous les émissaires suivis dans le cadre de cette étude. Ainsi, à la masse d'eau côtière FRJC005 « Fond ouest de la baie du Robert », sont associés les autres cours d'eau et ravines (ACER) suivants : Ravine Gaschette, Ravine Mansarde Catalogne, Ravine Voltaire, Rivière Cacao, Rivière Yoyoye.

Ces cours d'eau « secondaires » et ravines font en effet partie intégrante du réseau hydrographique de la Martinique et sont à ce titre des véhicules tout aussi importants de polluants dans les eaux marines. L'interface terre – mer qu'ils représentent nécessite ainsi d'étudier plus précisément les phénomènes de transfert, d'érosion... qui s'exercent, avec la particularité des cours d'eau intermittents et ravines dont le fonctionnement est mal connu par rapport aux cours d'eau principaux et permanents. Le projet de SDAGE met d'ailleurs en évidence l'amélioration des connaissances comme l'une des actions prioritaires à mettre en œuvre sur ces émissaires. La présente étude vise ainsi à contribuer à cette action prioritaire sur l'amélioration des connaissances sur les ravines et cours d'eau non inscrits au SDAGE en tant que « masses d'eau terrestres », mais sur lesquels repose indéniablement l'objectif de restauration du bon état des eaux côtières.

¹ SDAGE = Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux, à l'échelle du district hydrographique de la Martinique.

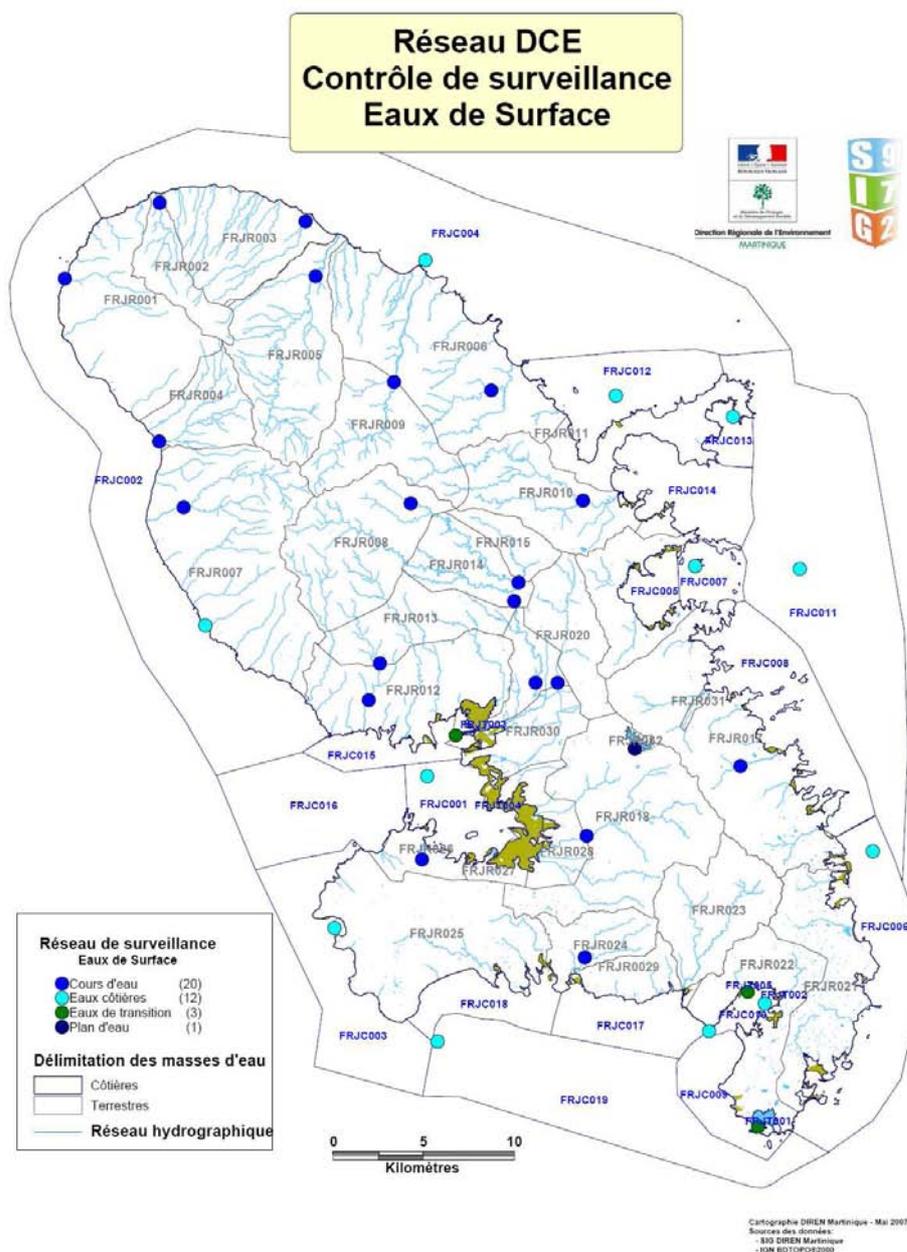


Figure 5 : Carte du réseau de surveillance des eaux de surface sur le district hydrographique de la Martinique - Source : site Internet de la DIREN Martinique

La DIREN et l'Office de l'eau de la Martinique assurent la maîtrise d'ouvrage des études nécessaires à la mise en œuvre de la DCE, et réalisent à ce titre un programme de surveillance pour suivre l'état écologique (ou le potentiel écologique) et l'état chimique des masses d'eau de surface². Les modalités de mise en œuvre du programme de surveillance des cours d'eau sont prévues par la « circulaire DCE 2006/16 relative à la constitution et à la mise en œuvre du programme de surveillance pour les eaux douces de surface ». Nous abordons ci-après les deux principales déclinaisons de cette circulaire afin de replacer l'étude sur les transferts de pesticides dans ce contexte. Le programme comprend ainsi :

² L'état écologique et chimique est caractérisé par différents paramètres suivant la biologie, l'hydromorphologie et la physico-chimie des masses d'eau.

- « - le contrôle de surveillance, destiné à donner l'image de l'état général des eaux, notamment à l'échelle européenne. [...] ;
- les contrôles opérationnels, destinés à assurer le suivi de toutes les masses d'eau identifiées comme risquant de ne pas atteindre les objectifs environnementaux de la DCE [...] »³.

Le contrôle opérationnel vise ainsi à suivre l'évolution de « l'état de santé » des masses d'eau, fonction des caractéristiques naturelles de ces masses d'eau, des pressions anthropiques qui s'y exercent ainsi que des mesures mises en œuvre pour atteindre le bon état écologique et chimique. Dans le cadre du contrôle de surveillance, et concernant la physico-chimie, trois cas sont à différencier :

- les éléments physico-chimiques soutenant la biologie (état écologique), telles que température, conductivité, pH, teneur en matières en suspension... ;
- les substances prioritaires (les 41 substances de la circulaire "bon état" du 28 juillet 2005 utilisées pour l'évaluation de l'état chimique) et les autres substances concernées par la directive 76/464/CE, dites substances dangereuses prioritaires ;
- les pesticides.

Parmi cette dernière famille, une liste des substances à analyser figure en annexe 5 de la circulaire DCE 2006/16. Cette liste est reportée en annexe 1 du présent rapport. On y retrouve les principales substances phytosanitaires utilisées et dont le degré d'écotoxicité a été jugé important au regard de la conservation et la préservation des ressources en eau et des milieux aquatiques. On observe dans cette liste que quelques molécules figurent aussi dans la liste des substances prioritaires au sens de la DCE ainsi que celle des substances dangereuses au titre de la directive de 1976. La circulaire précise par ailleurs que le suivi des pesticides devra s'effectuer, à partir de 2008, sur 25 % des sites du contrôle de surveillance, « de façon à acquérir de la donnée ».

³ Circulaire DCE 2006/16 du 13/07/06 relative à la constitution et la mise en œuvre du programme de surveillance (contrôle de surveillance, contrôles opérationnels, contrôles d'enquête et contrôles additionnels) pour les eaux douces de surface (cours d'eau, canaux et plans d'eau) en application de la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000.

23 Présentation des stations de mesure

Les stations de mesure sont décrites en 5 paragraphes : (1) géo-références, (2) choix des sites en fonction des objectifs de l'étude, (3) géographie physique des trois bassins versants étudiés, (4) occupation du sol dans l'environnement des stations de mesure, enfin (5) les équipements station par station.

231 Géo-références des lieux de prélèvement

En 2007, quatre sites ont été instrumentés afin de quantifier les flux d'eau et de polluants en fonction de différentes occupations du sol à l'échelle de petits bassins versants :

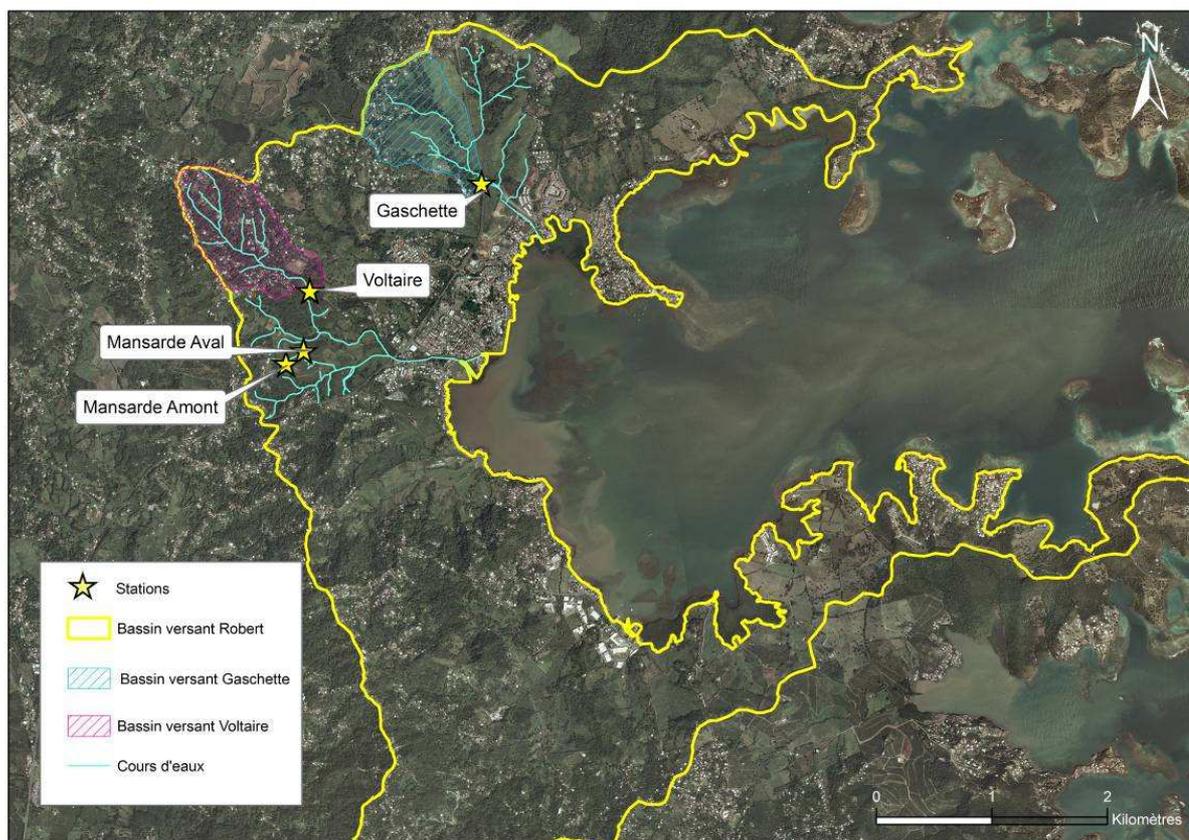


Figure 6 : Carte de localisation des stations de mesures, BV du Robert

Stations	Latitude (Nord)	Longitude (Ouest)
Voltaire	14,68685°	60,94368°
Gaschette	14,68685°	60,94375°
Mansarde amont	14,67806°	60,95753°
Mansarde aval	14,67228°	60,95962°

(Système de coordonnées : UTM fuseau 20 Fort Desaix)

Tableau 1 : Points de géo référencement des stations de mesure

232 Choix des sites en fonction des objectifs de l'étude

- « Voltaire » : La rivière Voltaire est permanente ; le sous-bassin versant est occupé essentiellement par de l'**habitat diffus**. Quelques parcelles de banane, marginales, y sont également présentes. Le point de mesure intègre **66,50 ha**.

- « Mansarde » : ravine à écoulement temporaire. Deux instrumentations en série ont été installées sur ce cours d'eau intermittent, espacées de 200 mètres. Le premier site de mesure isole l'impact de l'**habitat diffus**, et le second est situé directement sous les parcelles de **banane**. Le premier point de mesure intègre **1,25 ha** et le second point de mesure intègre **3,70 ha**.

- « Gaschette » : rivière permanente, exutoire de la partie Ouest du bassin versant de Gaschette, le site est occupé essentiellement par la **culture de la canne à sucre**. La **route nationale** qui traverse le bassin versant déverse dans la rivière Gashette. Un habitat diffus est présent sur la crête du bassin. Le point de mesure intègre **67,52 ha**

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 2 – Occupations 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 : (1) facteurs d'occupation du sol, et (2) facteurs d'échelle. Ces comparaisons seront facilitées entre les sites Voltaire et Mansarde par des pluviométries mensuelles très proches et des altitudes (30 à 33 m) voisines, alors que les surfaces intégrées par les points de mesure sont singulièrement différentes (66,50 ha et 3,70 ha).

233 Géographie des trois bassins versants étudiés

Carte d'identité géographique de la station Gaschette

Le Bassin versant de la rivière Gaschette est compris entre 14°42'0'' et 14°40'45'' de latitude Nord et 60°57'15'' et 60°56'0'' de longitude ouest (Fort Desaix).

Ce bassin avec une superficie de 1,9 km² revêt un caractère particulier de part la route de 10,5 m de large qui la traverse et qui modifie l'écoulement naturel de la rivière.

La longueur du cours d'eau pour l'ensemble du bassin versant est de 6 639 mètres (réseau hydrographique entier représenté sur la carte). Toutefois la présence de la route modifie les cours d'eaux naturels.

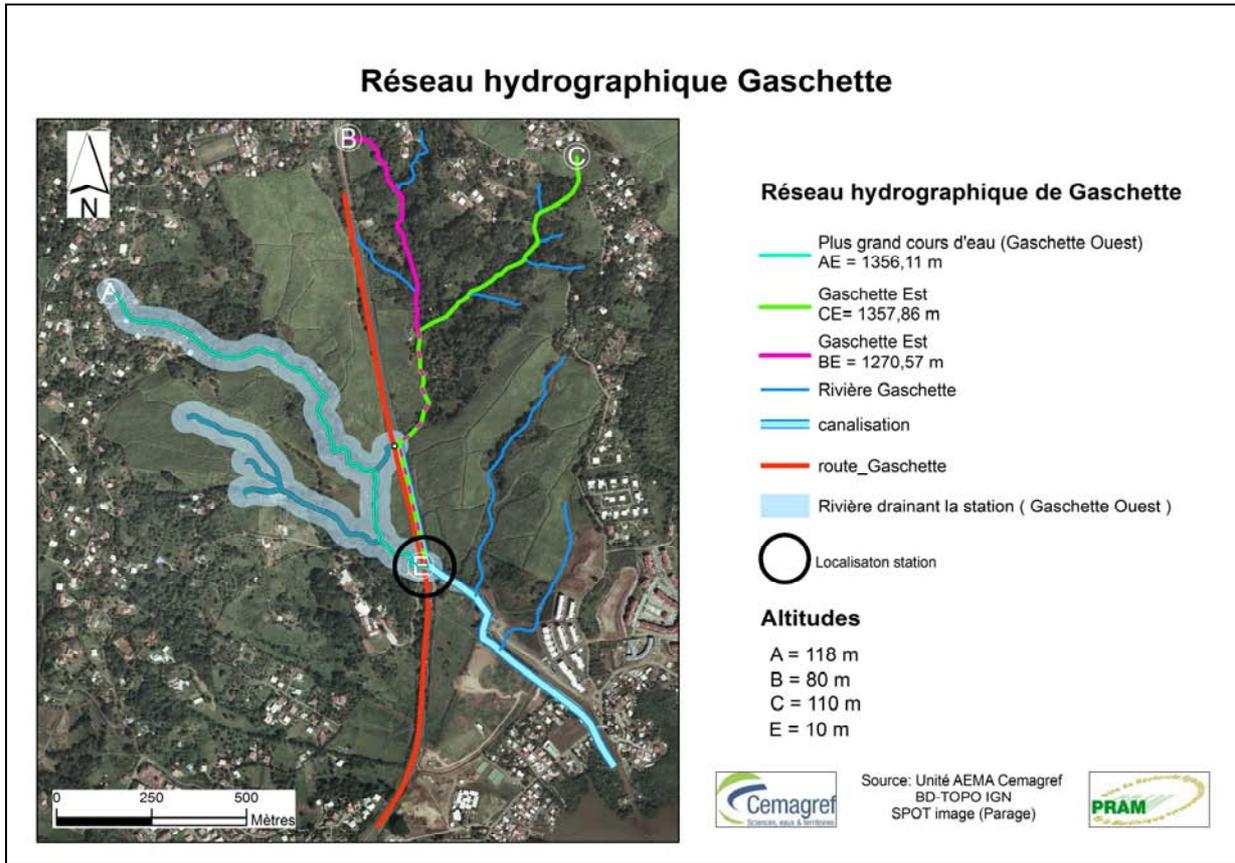


Figure 7 – Réseau hydrographique de la station Gaschette

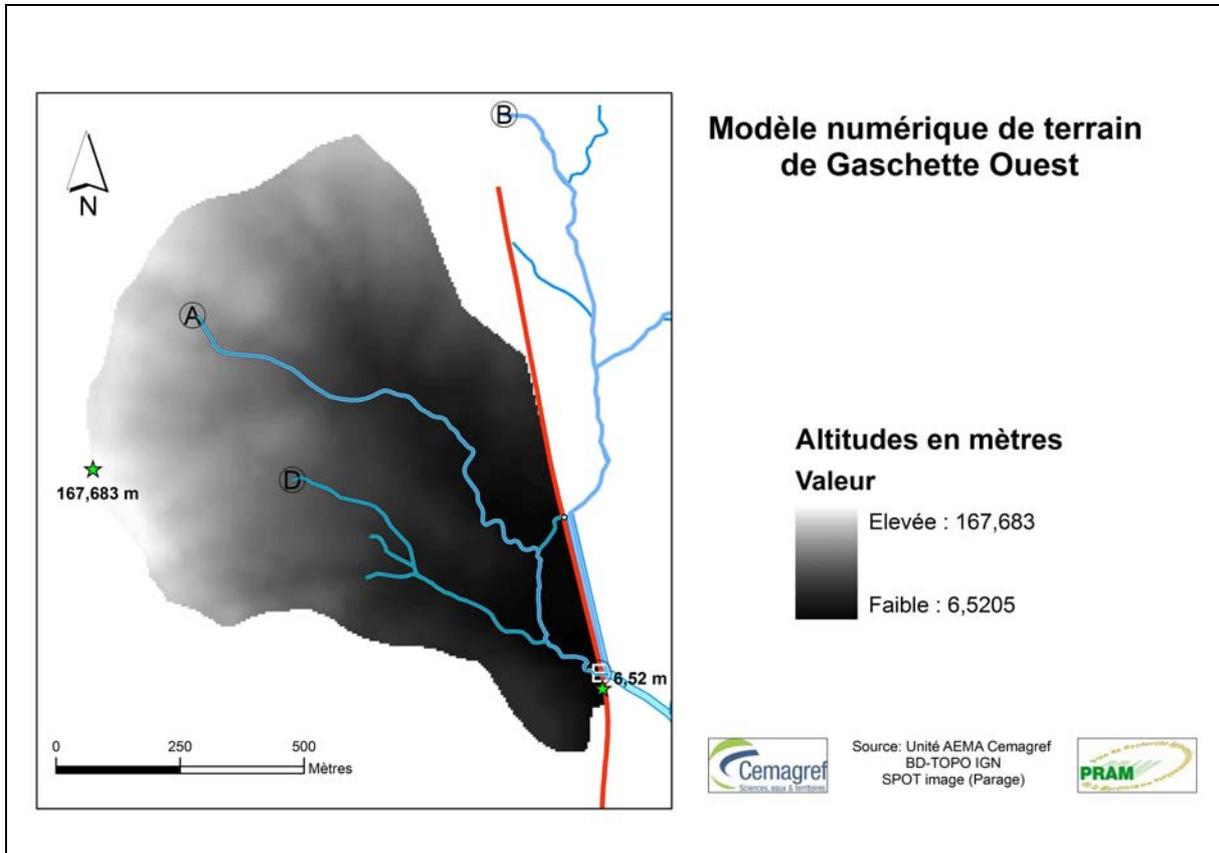


Figure 8 – Modèle numérique de terrain de Gashette Ouest

Nous distinguons alors deux sous bassins versants que nous nommerons ci après Gaschette Ouest (à l'ouest de la route) et Gaschette Est (à l'est de la route).

Les points A B et C représentent certaines sources du réseau hydrographique et le point E l'exutoire de notre terrain d'étude, soit la station.

Calcul des pentes : [(altitude point en amont) – (altitude point en aval)] / (distance entre les deux points)* 100

Résultats : pente moyenne AE = 10%
pente moyenne BE = 6%
pente moyenne CE = 8,6%
pente moyenne DE = 9,4 %

Nous pouvons donc en déduire que la pente moyenne du bassin versant est plutôt faible, mais cela ne doit pas masquer les fortes pentes en tête de bassin.

Altitude

Les altitudes sont comprises entre 6 et 168 mètres et distribuées sur le modèle numérique de terrain.

Le point D se situe à une altitude de 82 mètres et caractérise par sa position les fortes pentes en tête de bassin.

La station se situe à 8 mètres d'altitude au dessus de la mer.

Carte d'identité géographique de Mansarde

Les autres stations sont situées dans deux sous bassins versants nommés ci après Voltaire et Petite Mansarde appartenant à un bassin plus vaste « Grande Mansarde ».

« Grande Mansarde », d'une superficie de 4,20km² est drainé par un réseau hydrographique de 18 249 mètres. L'occupation du sol est majoritairement orientée vers les bois avec 147,65 hectares, l'habitat diffus avec 68,58 hectares et la culture de la banane avec 26,63 hectares.

Le sous bassin versant de la rivière Mansarde, « Petite Mansarde » est compris entre 60°57'44'' et 60°57'4.05'' de longitude Ouest et entre 14°40'43.68'' et 14°40'2.55'' de latitude nord. Sa superficie est de 1,12 km² (112 ha). Les 2 stations culminent en amont à 59m et en aval à 33m.

Les stations de mesure ont été installées sur une branche de cette rivière, dans la proximité immédiate d'une zone d'habitat plus ou moins boisée (Mansarde amont) ou de bananeraies anciennement implantées avec présence de Chlordécone (Mansarde aval).

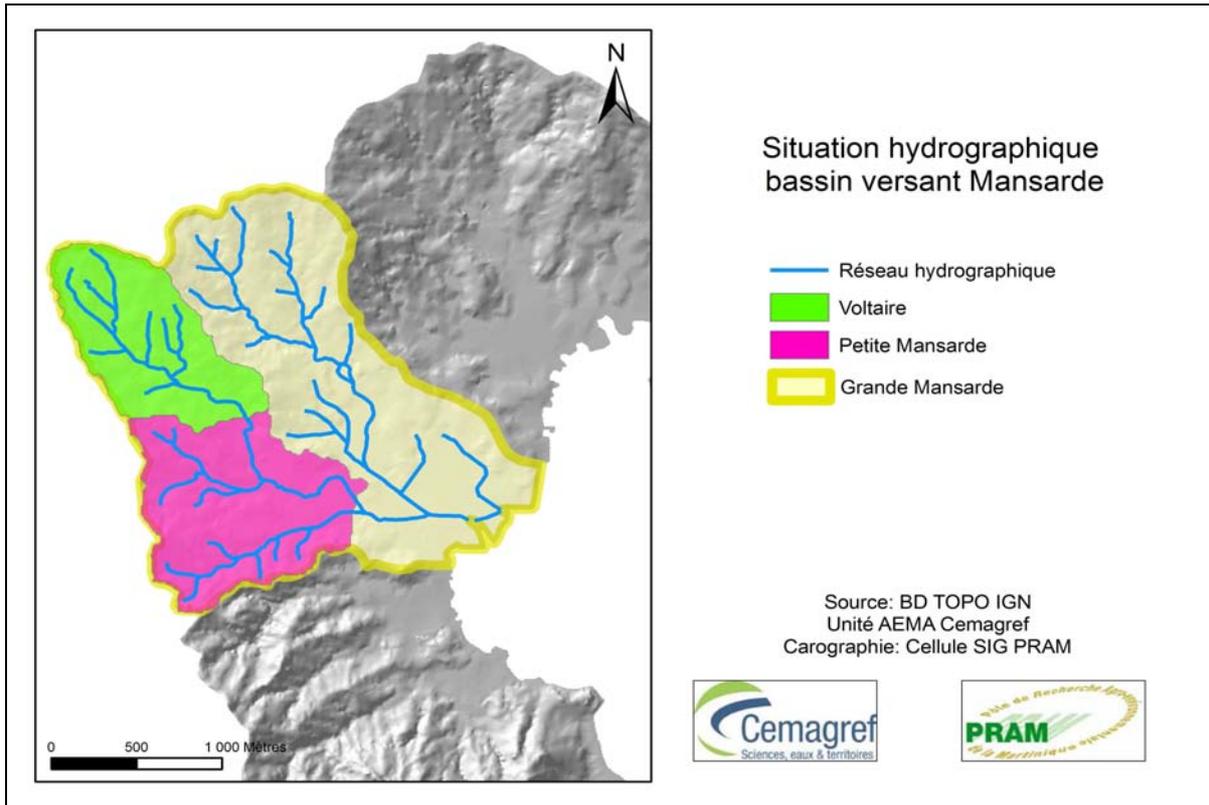


Figure 9 – Grande Mansarde et ses sous-bassins versants

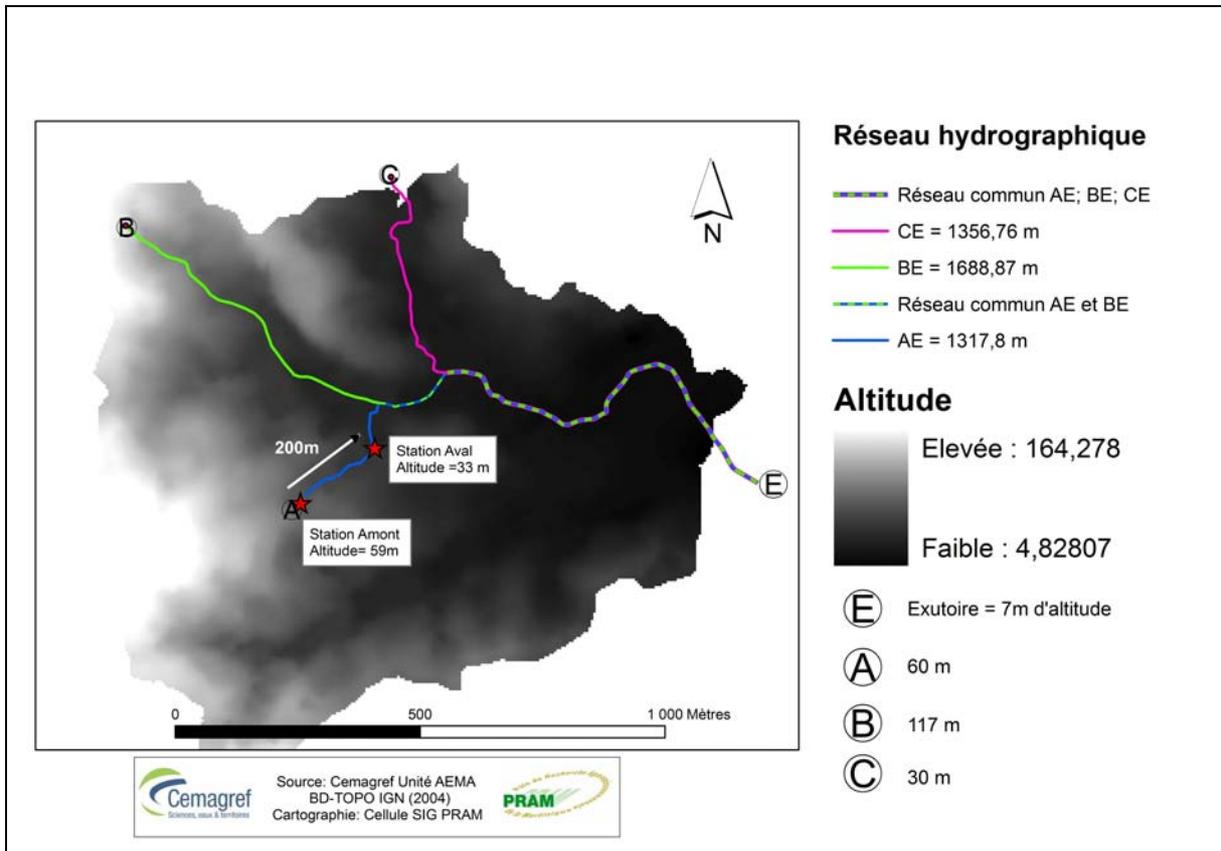


Figure 10 – Réseau hydrographique et modèle numérique de terrain de « Grande Mansarde »
La distance séparant les stations Mansarde Amont de Mansarde Aval est de 200 mètres. Cette distance confère une pente de 13% au trajet qui les rejoint.

Nous avons sélectionné trois sources de la rivière Mansarde pour le calcul des pentes :

- AE = 5,65 %
- BE = 7,87 %
- CE = 2,35 %

Carte d'identité géographique de Voltaire

Voltaire est le sous bassin versant le plus élevé de Grande Mansarde.

Il est géo référencé 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 du réseau hydrographique de ce sous bassin. La longueur du cours d'eau drainant ce sous bassin est de 4 030 m.

Les pentes moyennes sont :

AE = 10,5 %

BE = 11,29 %

CE = 12 %

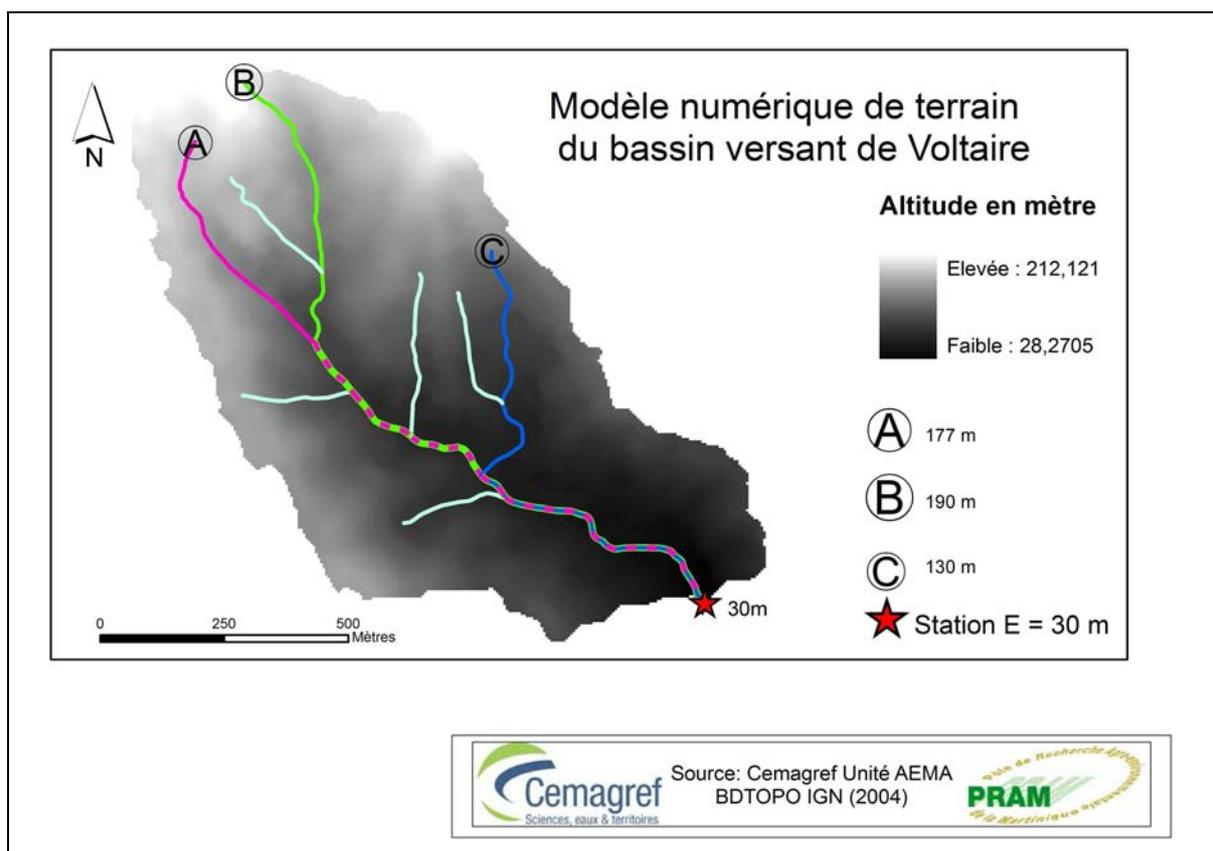


Figure 11 – Réseau hydrographique et modèle numérique de terrain du bassin de la rivière Voltaire

234 Occupation du sol dans l'environnement des stations de mesure,

Occupation du sol Gashette Ouest - point de mesure : E

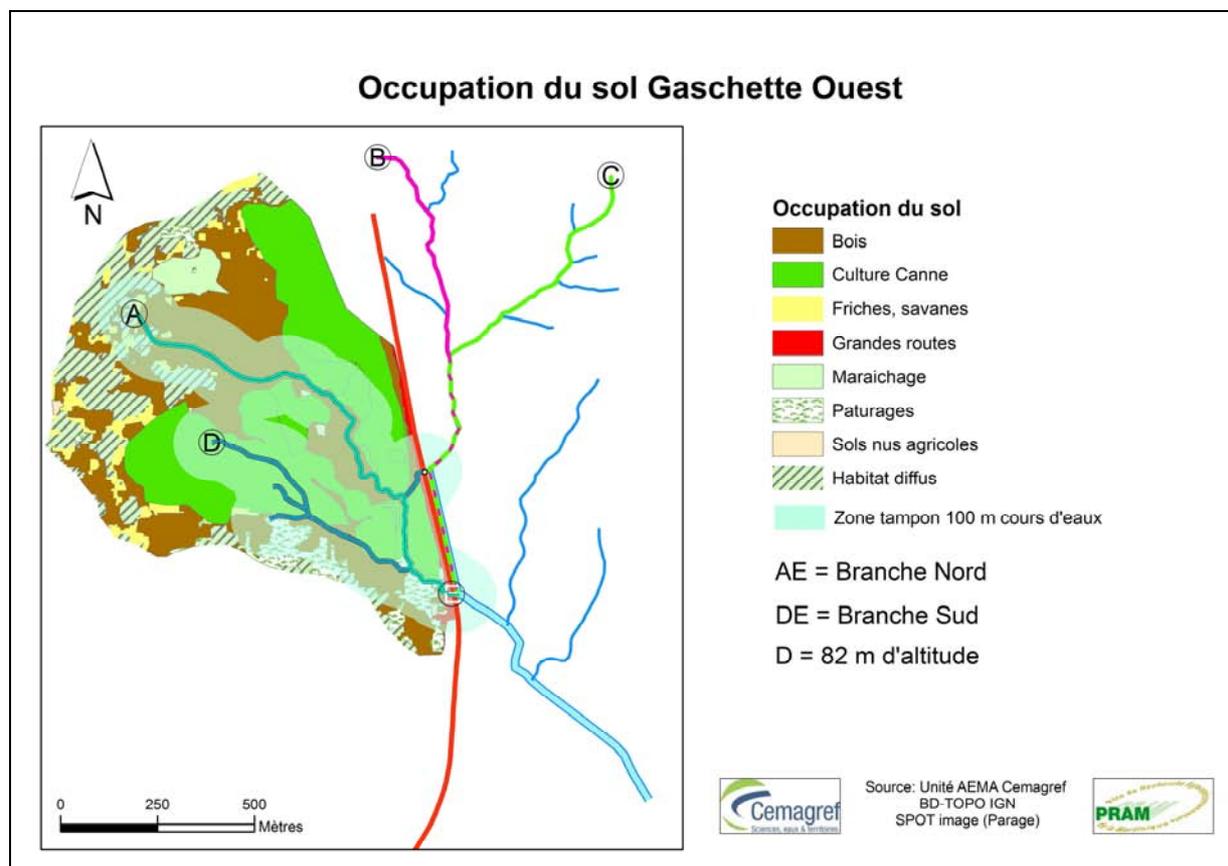


Figure 12 – Occupation du sol Gashette Ouest

L'ensemble du bassin (Est et Ouest) est dominé par la culture de la canne à sucre sur 64,17 hectares ; viennent ensuite les bois sur 60,76 hectares et enfin l'habitat diffus sur 28,47 hectares.

Le sous bassin Gashette Ouest est sera seul impliqué par nos mesures hydrologiques. En réalisant une zone tampon de 100m de part et d'autre du cours d'eaux, nous pouvons mieux observer l'utilisation du sol à proximité du cours d'eaux : la branche Nord du réseau hydrographique (A.E) parcourt généralement le bois tandis que la branche sud (D.E) passe directement et majoritairement à travers les champs de canne à sucre.

Sur Gashette Ouest, la culture de la canne à sucre occupe 29,82 hectares, et les bois couvrent 26,20 hectares, le reliquat de surface est occupé par l'habitat diffus, 11,50 hectares.

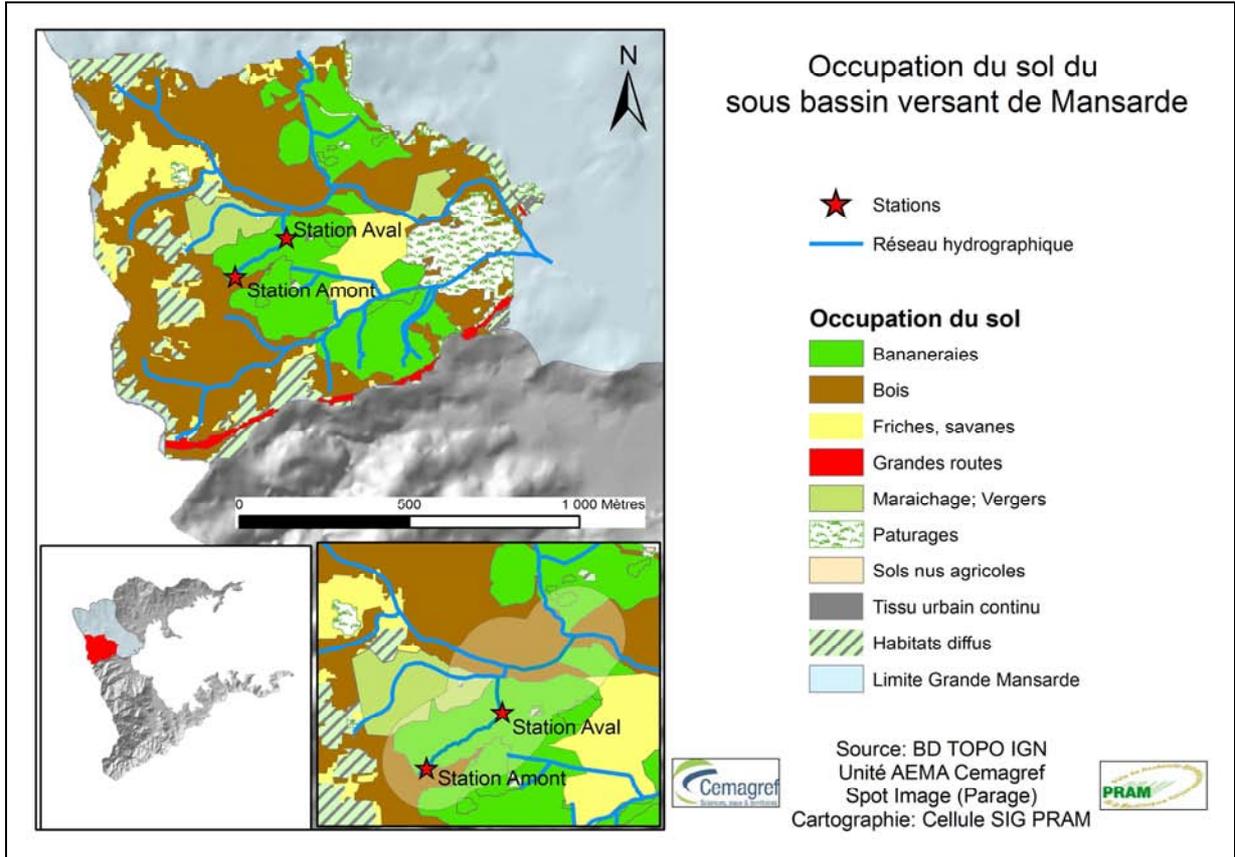


Figure 13 – Occupation du sol sur « Petite Mansarde »

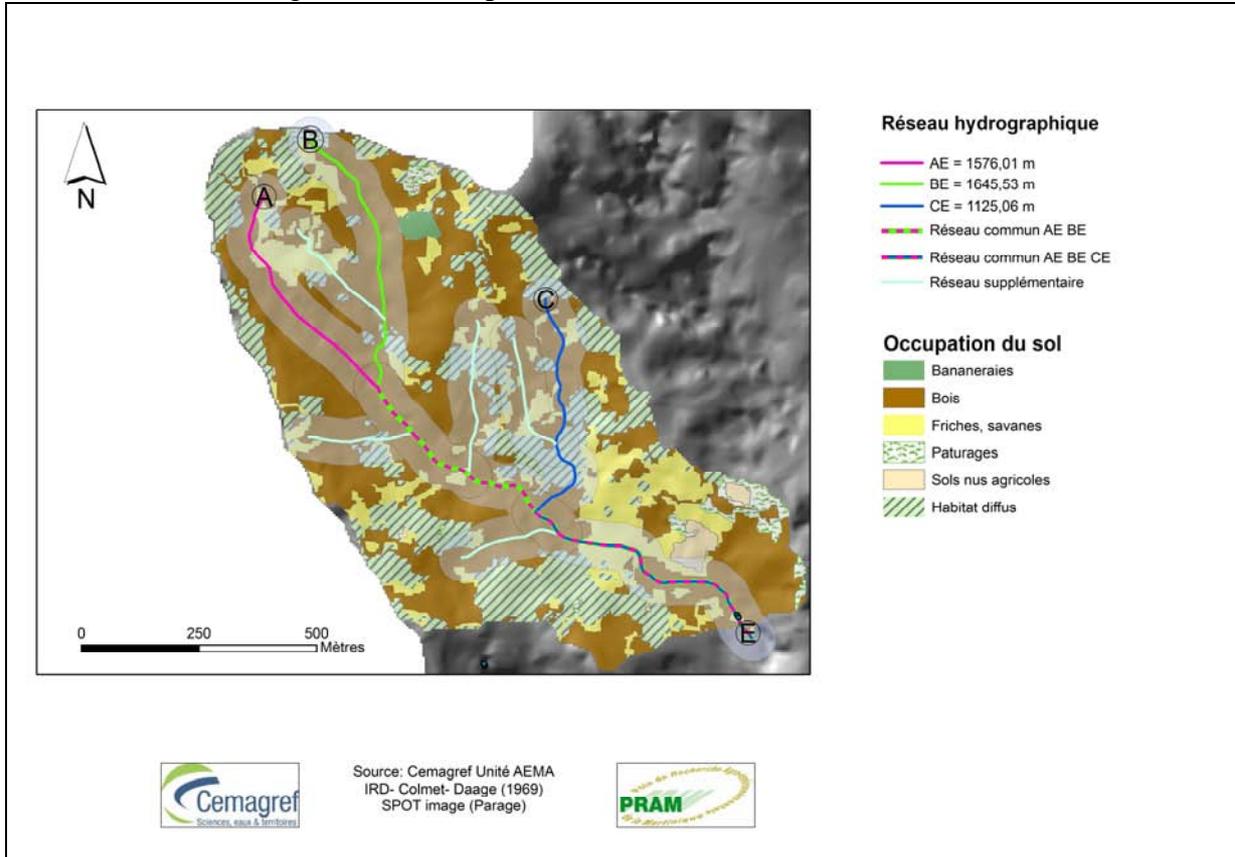
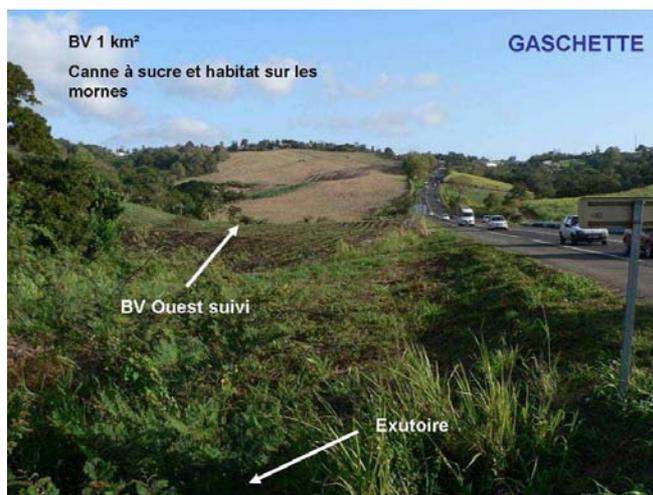


Figure 14 – Occupation du sol sur le bassin versant de la rivière Voltaire



Occupation du sol Gashette Ouest

La portion à usage agricole pour la culture de la canne à sucre est 29,82 hectares, les bois occupent 26,20 hectares, et l'habitat diffus situé essentiellement sur la crête couvre 11,50 hectares.

Figure 15

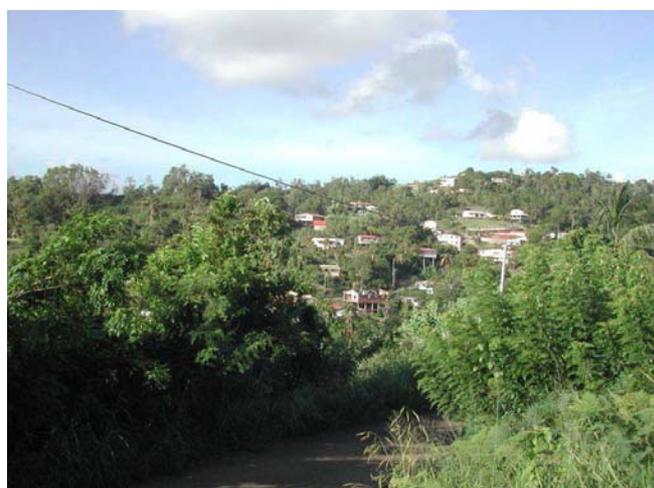
Occupation du sol stations Mansarde Amont et Mansarde Aval (Petite Mansarde)

Sur Petite Mansarde, nous trouvons 0,83 ha de bois, 0,42 ha occupés par l'habitat diffus et 2,45 ha cultivés en bananes.



Figure 16

Occupation du sol station Voltaire



Sur Voltaire, les bois recouvrent 46,88 hectares, l'habitat diffus représente 19,12 hectares et la culture de la banane occupe marginalement 0,5 hectares. En dessinant une zone tampon de 50 m de part et d'autre du cours d'eau, nous remarquons que la rivière traverse des bois et des zones d'habitat diffus.

Figure 17

235 Les équipements, station par station

Stations	Voltaire	Mansarde amont	Mansarde aval	Gaschette
Centrale d'acquisition	Campbell® CR 1000	Campbell® CR 1000	Campbell® CR 1000	Auteg® Emac98
Pluviométrie	Campbell® ARG 100 (augets)	/	Campbell® ARG 100 (augets)	Precis Mecanique® R01 3029/2 (augets)
Calibrage de la section	Ancien seuil mis en place par l'ORSTOM	Canal Venturi Eijkelkamp® 13.17.04 RBC flume 50 L/s	Canal Venturi Eijkelkamp® 13.17.04 RBC flume 50 L/s	Seuil mis en place par la DIREN
Sonde de pression	Campbell® PDCR1830 150 cm	Keller® PR46	Keller® PR46 puis Campbell PDCR1830 75cm pour cause de panne	Druck® PTX1830
Température	Campbell® 107 CSL	Campbell® 107 CSL	Campbell® 107 CSL	/
Mode d'alimentation	Batterie 12 V Panneau solaire	Batterie 12 V Panneau solaire	Batterie 12 V Panneau solaire	Batterie 12 V Panneau solaire

Tableau 3 : Matériels installés sur les stations de mesures

Le **tableau 3** présente le matériel installé. Celui-ci permet de mesurer en continu différents paramètres grâce à une centrale d'acquisition. Pour chaque matériel, la marque et le nom du produit sont précisés.

Notons qu'une batterie reliée à un panneau solaire est nécessaire pour l'alimentation des appareils. Une batterie de 12 Volts est suffisante pour le type et le nombre de sondes décrites dans le tableau 3. Cependant, en cas d'ajout d'autres appareils (un turbidimètre par exemple), il serait nécessaire de repenser la **puissance de l'alimentation électrique**. Le détail des branchements a été exposé dans le rapport intermédiaire (octobre 2007 – janvier 2008).

Les **canaux Venturi** des deux stations Mansarde sont décrits dans le rapport « Construction des courbes de tarage »

24 Type de suivi - recueil des données

Cette partie est spécifiquement détaillée car la validation d'une méthodologie est un objectif majeur du projet, et le retour d'expérience était souhaité par les commanditaires de l'étude.

241 Données hydrologiques

Le relevé des stations est effectué à l'aide d'un ordinateur portable tous les 15 jours. Les fichiers recueillis sont des fichiers délimités. Remarquons qu'une station au pas d'une minute (Voltaire et Mansarde) génère 1440 lignes par jour, soit environ 17 000 lignes à chaque relevé et 416 000 lignes par an. Le traitement numérique des séries de mesures est donc un aspect sensible. Nous reviendrons en détail sur ce point au paragraphe 26.



Figure 18 – Relevé des données



Sur la station Gashette, le pas de temps est 5 minutes. Cela divise par 5 la taille des séries et des fichiers, mais enlève à la précision des mesures et cela n'est pas sans conséquence sur les informations qu'on peut en tirer.

Une feuille de terrain permet de relever l'heure, les recalages éventuels après avoir constaté une dérive, le niveau d'eau mesuré à l'échelle limnimétrique et nos actions, par exemple, l'ajout d'eau dans le pluviomètre pour test, la récupération d'échantillons d'eau impliquant une augmentation de la turbidité, etc...

Pluviométrie

Chaque point de mesure est équipé d'un pluviomètre à augets basculeurs (contenance auget 0,2 mm). Celui-ci est relié à la station d'acquisition.

Le pluviomètre doit être placé dans un espace dégagé de 6 m de rayon afin que la pluie collectée ne rencontre pas d'obstacles avant son arrivée dans le cône de collecte.

Avant installation, le pluviomètre doit être étalonné : il s'agit de vérifier que les augets basculent bien tous les 0,2 mm d'eau tombée ; pour le réglage, une vis permet d'ajuster l'inclinaison de l'auget. Régulièrement il est vérifié que les pluviomètres ne sont pas bouchés, si c'est le cas, ils sont nettoyés. Un étalonnage est effectué chaque année.

Nous avons placé chaque pluviomètre à proximité de l'exutoire où est mesuré le débit. La pluie en un seul point de l'impluvium n'a pas permis d'établir une relation systématique entre la pluie et le débit. C'est une limite du protocole sur laquelle nous reviendrons.

Nous avons perdu les pluies du mois d'avril 2008 sur la station Gashette pour un mauvais fonctionnement du pluviomètre. Notons enfin qu'un seul pluviomètre est installé à Mansarde, au point aval, situé à 200 m du point amont.

Hauteur d'eau – Evaluation du débit, station par station

Pour chaque sonde de pression, il existe un choix de gammes de hauteurs d'eau. Plus l'intervalle de mesure est réduit, plus la précision est fine. Il faut donc ajuster le choix de la sonde en fonction de la gamme de hauteurs du cours d'eau. Sur la station Voltaire, nous avons systématiquement perdu les débits supérieurs à 800 L/s, car la sonde n'était pas adaptée. Cela affecte les pics de 13 crues sur les 144 crues mesurées entre le 1^{er} septembre 2007 et le 31 octobre 2008.

En parallèle, une échelle limnimétrique est placée dans le cours d'eau ; celle-ci permet à tout moment une lecture directe de la hauteur. Au moment de l'installation, la sonde est étalonnée avec le logiciel interne de la station de mesure. Lorsqu'une dérive de la mesure est constatée au moment du relevé, un « recalage » est opéré et noté.

Les opérations de correction de la dérive de la sonde et les données manquantes sont traitées aux paragraphes 25 et 26, en relation avec les incertitudes de mesure.

L'élaboration des courbes de tarage, afin de traduire les hauteurs d'eau en débits fait l'objet d'une autre étude « Construction des courbes de tarage », dont le rapport est disponible.

Température de l'eau

Une sonde de température permet une acquisition de ce paramètre en continu.

242 Concentrations en pesticides

Deux types de suivi sont réalisés : Un suivi mensuel ou « chronique » afin d'évaluer le « bruit de fond » des molécules transportées par les cours d'eau ; et un suivi « en crue » afin de mesurer l'impact des événements pluvieux en relation avec les épandages de produits. Nous verrons que cette approche nous conduit à distinguer quatre familles de résultats exposés aux paragraphes 31, 32, 33 et 34.

2421 Modes opératoires

Les prélèvements ont été effectués manuellement, car les deux préleveurs à déclenchement automatique achetés n'ont pas pu être installés, l'acheminement ayant pris du retard. Pour le mode opératoire des prélèvements, nous avons suivi les recommandations décrites dans le Guide méthodologique du prélèvement de l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne.

Définition de l'échantillon

Nous avons réalisé des échantillons ponctuels appelés aussi prélèvements. Cependant pour un même échantillon, plusieurs flacons ont du être utilisés en fonction du volume nécessaire à l'analyse. Ainsi, pour une analyse eau brute ciblée sur une ou deux molécules, 1L d'eau est nécessaire, nous remplissons donc 2 bouteilles de 750 ml et 4 bouteilles pour une analyse eau brute multi-résidus qui nécessite 2 L d'eau.

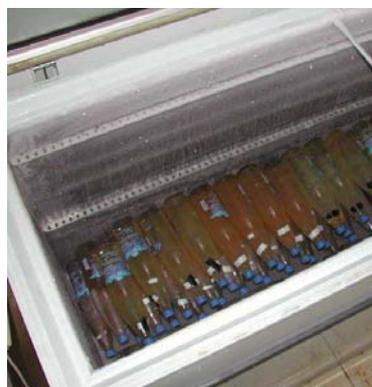
Flaconnage

Pour les pesticides, il est recommandé d'utiliser des flacons en verre excepté pour le Glyphosate où le flaconnage doit être en PET (Polyéthylène terephthalate). Des flacons à cols larges sont préférables car il évite un bullage lors du prélèvement et de couleur ambré afin de protéger l'échantillon de la lumière.

Dans le cadre de notre suivi, ce type de flacons a été commandé dans un premier temps en métropole en raison d'un coût excessif à l'achat en local. En raison d'une livraison de matériel cassé, il a été décidé d'opter pour du verre alimentaire disponible localement et à coût moindre, ainsi nous avons utilisé dans un premier temps des bouteilles de bière lorraine (verre brun de 500ml) puis des bouteilles d'eau gazeuse Didier (verre blanc de 750 ml) car l'achat de bouteilles de bière lorraine n'était plus possible.



Figure 19 – Flacons avant envoi



Les analyses ont systématiquement été réalisées par le laboratoire départemental de la Drôme (LDA26).

Figure 20
Stockage en congélateur

Figure 21
Conditionnement en
glacière pour l'envoi



Les échantillons sont emballés dans du papier bulle et l'envoi se fait dans des glacières en polystyrène avec carboglace afin de maintenir à une faible température les échantillons. Cet envoi est réalisé le lundi ou le mardi, les échantillons arrivent donc au laboratoire avant le week-end. La température des échantillons à l'arrivée est comprise entre 1°C et 18°C. Il faut savoir que les échantillons arrivent au laboratoire le matin encore congelés mais ne sont parfois rangés que dans l'après midi d'où une température élevée.

Remarque : Il est nécessaire de conserver des doublons d'échantillons dans l'éventualité où le transport générerait la casse de flacons. Ceci s'est produit au mois de mai 2008. Dans ce cas, les doublons ont été envoyés.

Certaines analyses ont été doublées pour évaluer la variabilité des résultats.

Nous avons suivi le **plan d'échantillonnage** inscrit au cahier des charges de l'étude, nous détaillons ci-après son calendrier réel :

2422 Suivi mensuel

Stations	Gaschette	Voltaire	Mansarde Aval	Mansarde Amont
Date de données produits phytosanitaires (Prélèvements mensuels)	24/09/07	24/09/07	24/09/07	24/09/07
	10/10/07	10/10/07	10/10/07	10/10/07
	12/11/07	12/11/07	12/11/07	12/11/07
	10/12/07	10/12/07		
	10/01/08	10/01/08		
	11/02/08	11/02/08	11/02/08	
	13/03/08	13/03/08		
	10/04/08	10/04/08		
	13/05/08	13/05/08		
	10/06/08	10/06/08		
	10/07/08	10/07/08		
	11/08/08	11/08/08		
	10/09/08	10/09/08	10/09/08	10/09/08
	10/10/08	10/10/08	10/10/08	10/10/08

Tableau 4 : Bilan des prélèvements mensuels réalisés

Pour l'ensemble des 4 sites, une analyse multi-résidus mensuelle (intégrant le Glyphosate et son dérivé l'AMPA) a été effectuée. Ces mesures serviront donc de points références pour différentes comparaisons, notamment avec les mesures obtenues dans le cadre du suivi en crue.

Les suivis mensuels ont été réalisés en journée autour du 10 de chaque mois, de septembre 2007 à octobre 2008.

Au final, pour les stations de Gaschette et Voltaire (rivières permanentes) nous avons réalisé 14 analyses mensuelles ; pour la station Mansarde aval, 6 analyses mensuelles et enfin pour la station Mansarde amont, 5 analyses mensuelles. Pour ces deux dernières stations, les prélèvements n'ont pas pu être réalisés les mois sans eau.

2423 Suivi en crue

L'objectif du suivi en crue est d'échantillonner pour un produit donné l'ensemble d'une crue autour de son pic de débit.

Le suivi de la météo est constant afin d'anticiper les événements de crue. Lorsqu'un événement pluvieux est prévu, un premier prélèvement est réalisé sur le terrain, il servira de point zéro avant l'événement. Certains événements de crue observés n'ayant pas été prévus, ce point zéro n'existe pas pour tous les échantillonnages.

Le produit ciblé dépend de l'occupation du sol.

Le moment de prélèvement dépend de plusieurs critères :

- date d'application du produit
- type d'événement de crue (intensité/durée)
- budget (nombre d'analyses limitées)

En présence d'une crue, un nombre important d'échantillons est réalisé lors de la montée de la crue afin de ne pas manquer le pic de crue, puis les échantillons s'espacent ensuite en fonction de la vitesse de décrue. Tous les prélèvements ne sont pas analysés ; un choix est fait après la crue afin de répartir dans le temps les échantillons à analyser.

Une moindre importance est accordée aux événements incomplets. Pour ceux-ci, il peut être décidé de réaliser une seule analyse, pour comparaison ou aucune analyse.

Choix des produits

L'occupation du sol est un critère majeur dans notre cas :

* Sur Gaschette, les produits épandus sur les cultures de canne sont des herbicides. En l'occurrence, quatre molécules sont utilisées : 2,4D, Diuron, Asulame et Glyphosate. Deux agriculteurs utilisent l'Asulame sur de petites surfaces, cette molécule ne fera donc pas l'objet d'un suivi.

Par ailleurs, l'origine du Glyphosate serait difficilement discriminée entre culture de canne et habitations en tête de bassin, car cet herbicide est également utilisé sur les jardins des particuliers. Cette molécule ne sera donc pas étudiée en détail sur Gashette.

Les deux molécules ciblées pour Gaschette seront donc le Diuron et le 2,4D, utilisées en saison des pluies sur canne à sucre à un moment où les risques de lessivage sont importants.

* Sur Voltaire, la molécule la plus utilisée comme herbicide dans les jardins particuliers est le Glyphosate. Nous suivrons donc cette molécule et son dérivé l'AMPA, même s'il existe un risque, très faible cependant, de retrouver le Glyphosate épandu sur les 0,5 ha de bananes présentes dans l'aire du point de mesure.

* Sur Mansarde aval, occupé par la culture de la banane, les agriculteurs utilisent deux types de produits : des herbicides et des nématicides. Le nématicide Oxamyl fera donc l'objet d'un premier suivi. Les herbicides à base de Glyphosate ou de Glufosinate seront suivis au point de mesure amont afin de différencier les apports liés à la banane (point aval) et les apports liés à l'habitat (point amont).

Quelques analyses multirésidus en crue ont été réalisées pour comparaisons.

Remarque : au point de mesure aval, les analyses de la Chlordécone sont réalisées dans le cadre d'une étude spécifique du transfert de cette molécule au milieu marin.

Plan d'échantillonnage théorique

Les événements pluvieux et les crues étant peu prévisibles, le plan théorique d'échantillonnage en crue s'est adapté aux conditions climatiques.

Plan d'échantillonnage réalisé, à partir de juillet 2008

Suivi des événements

La première crue de la saison des pluies 2008 a eu lieu dans la nuit du 2 au 3 juillet 2008. Le pic a été manqué mais nous avons prélevé un échantillon en décrue afin d'avoir une première information. Les analyses ont été réalisées pour l'ensemble des sites comme point de référence de la première crue de la saison des pluies 2008.

Des crues importantes se sont produites du 30 juillet au 1^{er} août 2008. Les prélèvements avant crue ont été réalisés pour les deux rivières Gashette et Voltaire ; la ravine Mansarde était à sec. Les échantillonnages ont été suffisamment denses pour encadrer les pics de crue.

Au moment où survinrent les crues du 29 août 2008, une priorité avait été donnée aux stations Mansarde car les applications d'herbicides venaient d'être réalisées, le 25 août 2008. Les prélèvements ont été opérés, mais des travaux sur le site ont empêché un écoulement régulier de l'eau dans la ravine, en partie détournée. Aucune information de débit n'a pu être enregistrée. Il a donc été décidé de ne pas envoyer ces échantillons dont les concentrations n'auraient pas pu être corrélées aux débits et aux flux d'eau.

Les crues en septembre 2008 ont pu être suivies, mais avec des incidents sur les stations d'acquisition, notamment sur Gashette, rendant difficile la récupération intégrale des données.

Suite aux dernières crues de septembre, il est décidé de mettre fin aux suivis en crue en raison du temps de retour des analyses en laboratoire, qui est de 3 à 4 mois, et l'approche de la fin du programme.

Bilan des prélèvements et crues échantillonnées

Pour le suivi Diuron/2,4D sur Gaschette, 4 crues ont été suivies dont deux complètement, 38 échantillons ont été prélevés et 23 analysés. Dans ces échantillons, quatre ont été analysés en multi-résidus.

Pour le suivi Glyphosate/AMPA sur Voltaire, deux crues ont été entièrement échantillonnées, 13 prélèvements ont été réalisés et 11 analysés.

Pour le suivi Oxamyl de Mansarde aval, la crue après application a été échantillonnée avec 5 prélèvements analysés.

Pour le suivi Glyphosate sur les stations Mansarde aval et Mansarde amont, trois crues ont été suivies soit respectivement 7 et 5 échantillons mais seulement deux analyses pour chaque station ont été menées.

L'échantillonnage réalisé est donc conforme pour les suivis en crue des herbicides de la canne à sucre et des nématicides de la banane. Pour le suivi herbicides de la banane, les prélèvements ont été réalisés mais ne sont malheureusement pas exploitables en analyse.

L'ensemble des prélèvements et analyses réalisés sont détaillés en annexe 2

Les résultats de ces suivis sont exposés au paragraphe 33.

243 Enregistrement des pratiques agricoles dans l'environnement des points de mesure

L'annexe 3 donne le détail des applications enregistrées auprès des agriculteurs en 2007 et 2008. Les applications les mieux connues sont celles des herbicides sur canne à sucre au mois de juillet 2007 et 2008. Nous devons remercier ici les agriculteurs qui ont positivement accepté de nous transmettre leurs informations sans en avoir l'obligation.

25 Données manquantes

251 Bilan des données disponibles

Le tableau ci-dessous reprend les périodes de données pluie/débit exploitées dans la présente étude. Les raisons des données manquantes sont exposées à la dernière ligne du tableau.

Pour l'ensemble des stations, la plage des données analysées s'arrête le 31/12/2008, sauf pour la station Gashette dont les équipements ont donné des signes de faiblesse à partir de juillet 2008.

Le suivi des stations Voltaire et Mansarde a continué jusqu'au 4 mai 2009, mais les cours d'eau n'ayant pas fait objet de prélèvements, ceux-ci n'ont pas été intégrés à l'étude sur les transferts des pesticides.

Station	Gaschette	Voltaire	Mansarde aval	Mansarde amont
Période de données pluie exploitables	01/01/07 au 10/09/08 et du 23/09/08 au 10/07/08	18/06/07 à 30/04/08 puis 13/05/08 à 31/10/08	12/07/07 à 31/12/08	Pas de pluviomètre installé sur cette station à proximité de Mansarde aval
Période de données hauteur d'eau exploitables	01/01/07 au 10/09/08 et du 23/09/08 au 13/10/08 12 crues incomplètes au- delà de 800 L/s	30/08/07 à 30/04/08 puis 13/05/08 à 31/10/08	18/09/07 à 31/12/08	30/08/07 à 04/07/08 puis du 10/09/08 au 30/11/08
Raisons du manque de données	1) Relevés de données trop espacés, perte de l'information 2) sonde de pression arrachée par une crue	1) Sonde de pression en panne (erreur dans la mesure). 2) Erreur de manipulation en avril 2008, station éteinte pendant deux semaines suite à des changements de programmation	Lancement de la station le 12/07/07 mais problème d'étalonnage de la sonde de pression puis erreur de câblage.	1) Lancement de la station le 12/07/07 mais problème d'étalonnage de la sonde de pression. 2) Travaux de réhabilitation du 04/07/08 au 10/09/08 (eau non canalisée)

Tableau 5 : Bilan des données de débit et de pluie disponibles

252 Estimation des valeurs manquantes

Données de pluie manquantes

Une panne des équipements survient du 1^{er} au 13 mai 2008 sur la station Voltaire. Le mois de mai 2008 est un mois particulièrement sec. La pluie mesurée sur les 18 derniers jours (23,4 mm) est proratisée ($23,4 \times 31/18 = 40,3$ mm estimés).

Les moyennes mensuelles des stations Voltaire et Mansarde Aval, situées à la même altitude (30 et 33 m) sont assez proches d'octobre 2007 à septembre 2008. Sur Mansarde aval, 37,2mm ont été enregistrés au mois de mai 2008. Cette valeur consolide l'estimation faite sur Voltaire. Nous considérerons qu'il a plu 40,3 mm sur Voltaire en mai 2008.

Sur Gashette, les mesures de la pluie s'arrêtent en juillet 2008. Les relations Concentration/débit des crues des mois de juillet et septembre 2008 seront analysées sans les pluies. Les pluies manquantes (avril 2008), ou mesurées avec des anomalies évidentes (janvier 2008) seront estimées en moyennant les valeurs mensuelles de Voltaire et Mansarde. Cette approximation est acceptable pour des représentations graphiques Pluie/Concentration.

Données de débit manquantes

Sur Voltaire, les 13 premiers jours de mai 2008 présentent également un trou de mesure. Le débit moyen mesuré sur les 18 derniers jours de mai (3 L/s) sera supposé être celui du mois tout entier. Cette approximation est consolidée par le fait qu'aucune crue n'a été observée au mois de mai 2008. Ceci amènera un flux d'eau mensuel estimé à $8\,288\text{ m}^3$

Plus difficiles sont les 21 pics (flashes) manquants pour 13 crues réparties sur les mois pluvieux en 2007 et 2008. Effectivement, la sonde de pression a systématiquement « décroché » au dessus d'un débit de 650 L/s en montée et a « raccroché » à 800 L/s en décrue.

Un algorithme a été appliqué pour estimer les instants et les débits de pointe des pics correspondants. Ainsi, 1213 débits instantanés, donc 1213 minutes, soit presque un jour en temps cumulé, ont ainsi été recalculés sur les 14 mois de mesures valorisées dans notre étude.

L'algorithme consiste à poursuivre d'un côté la cinétique de la montée en supposant que la décélération commence à la rupture de mesure avec une valeur identique à l'accélération enregistrée du pic, et de l'autre côté à rattraper « en cinétique de décrue inversée » à chaque pas, le débit atteint en montée. Au terme de ces deux croissances alternées, l'instant et la valeur du pic sont déterminés par la rencontre des deux courbes.

Nous n'avons malheureusement pas d'éléments de comparaison pour évaluer l'incertitude introduite par cette estimation. En effet, sur Gashette, le pas de la station est 5 minutes contre 1 minute sur Voltaire, et sur Mansarde, les pics ne dépassent pas 80 L/s.

Nous devons distinguer différents cas de figure selon la durée sur laquelle la mesure n'a pas été enregistrée. Lorsque cette durée est inférieure à 15 minutes, l'estimation ne pose pas vraiment de difficulté, car même si elle est légèrement surévaluée, elle a peu d'influence sur les flux mensuels. Par contre, dans trois cas, la durée manquante est suffisamment longue, plusieurs heures, pour laisser supposer que des pics multiples soient survenus plutôt qu'un pic unique comme supposé par l'algorithme d'estimation.

Bien que la pluie ait été enregistrée au point de mesure, nous ne pouvons pas nous reposer sur la relation Pluie/Débit, car un seul point de mesure de la pluie sur le bassin versant se révèle insuffisant. Effectivement, l'hypothèse de la répartition uniforme de la pluie à la surface du versant génère des incohérences dans le calcul des coefficients d'écoulement.

Un encadrement des débits estimés pourrait être calculé, assorti d'un intervalle de confiance. Toutefois, ramenée à la complétude très satisfaisante des séries enregistrées et à la précision recherchée dans le cadre de notre première approche des flux et des transferts, cette question n'apparaît pas déterminante. Nous allons donc continuer à vivre avec cette incertitude sans toutefois l'oublier au moment de l'interprétation des résultats.

26 Incertitudes sur les données pour l'interprétation des résultats

Nous allons maintenant dresser un inventaire des sources d'erreurs dans les données de façon à acquérir une première vision critique des protocoles mis en œuvre et prévenir, autant que possible, les erreurs d'interprétation.

261 Concentrations en pesticide

Toutes les analyses ont été produites par le laboratoire de la Drôme (LDA26) ; l'incertitude relative sur la donnée est celle proposée par le prestataire, environ 38 %.

Cela limite les calculs de transfert qui pourront être faits. Aussi, nous pourrions (1) dresser un inventaire des molécules retrouvées sur chaque site, (2) classer les molécules par niveaux de risques, risques de pollution, risques sanitaires (3) démontrer l'importance des facteurs, notamment des facteurs climatiques et la réalité des lessivages de produits phytosanitaires, (4) nous pourrions également comparer plusieurs situations de transfert, transfert chronique et transfert en crue, mais **nous ne pourrions pas calculer avec précision les quantités de produits transférés** depuis les parcelles agricoles ou les lieux d'habitation vers le milieu marin.

Ce commentaire utile ayant été fait, nous comprenons que la précision toute relative obtenue sur les mesures hydrologiques ne fait pas obstacle aux objectifs que nous poursuivons.

262 Données hydrologiques

2621 Pluies et averses

Les valeurs des pluies ne sont pas corrigées depuis la station d'acquisition jusqu'à l'exploitation qui en est faite dans nos calculs. Seule la séparation des événements pluvieux en averses, donne lieu à un traitement numérique, relativement simple, mais fondé sur des conventions qui peuvent varier d'une étude à l'autre.

Dans cette étude, nous avons retenu la définition suivante :

On considère qu'un ensemble de pluies constitue une averse lorsque qu'il a plu plus de 0,2 mm (taille d'un auget) en moins de 60 minutes. De même, on considère que deux épisodes pluvieux sont séparés s'il n'a pas plu pendant plus de 60 minutes. Nos séparations des pluies en averses ont été réalisés par algorithme sur l'ensemble de la base de données et

n'ont donc pas donné lieu à interprétation. Le « *recueil des données* » en donne un inventaire complet sur la période de mesure.

S'il est possible de connaître la dernière averse avant le déclenchement d'une crue, il n'est pas automatique que ce soit cette averse seule qui en soit responsable. Le calcul du temps sec strict écoulé avant une averse est donc tout aussi important que l'enregistrement des paramètres de l'averse elle-même pour connaître les conditions initiales d'une crue.

Nous donnons ci-après la justification du critère de séparation, 60 minutes, que nous avons retenu, toutefois, les études analogues du Cirad de Guadeloupe retiennent en général 2 heures comme durée minimale de séparation entre deux averses.

Justification

Après un évènement pluvieux, il se peut qu'une quantité inférieure à 0,2mm reste dans l'auget, n'entraînant pas son basculement. A la pluie suivante, il suffira d'une quantité inférieure à 0,2mm pour réaliser le basculement. De ce fait, il a été convenu d'attendre un second basculement de l'auget pour considérer une averse. Ainsi un évènement pluvieux sera caractérisé par un minimum de deux basculements d'augets correspondant à une hauteur d'eau comprise entre 0,2 et 0,4 mm.

D'autre part, un critère de temps doit être défini concernant ce cumul. Pour cela on étudie la fréquence entre deux basculements d'augets sur un temps donné pour la période septembre 2007 à mars 2008.

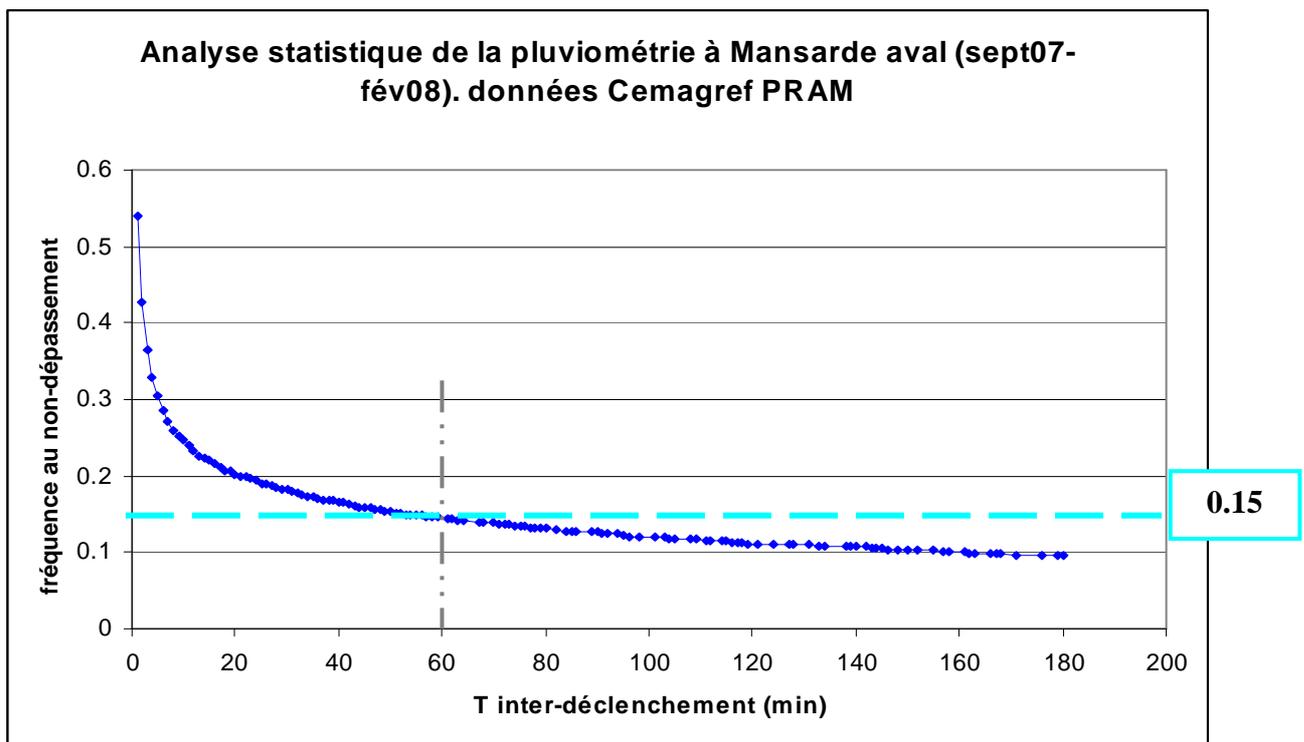


Figure 22 : analyse statistique de la pluviométrie

Le graphique indique que 85% des intervalles de temps entre deux basculements d'augets successifs sont inférieurs à 60 minutes. Ceux-ci peuvent donc être assimilés à des évènements pluvieux, ou averses, et non à des basculements d'augets isolés.

2622 Débits, crues et flashes

Contrairement aux données de pluie, les données de débit demandent de longs traitements numériques, jusqu'à la séparation des évènements. Ces traitements introduisent des erreurs que nous allons décrire sans les mesurer avec précision. Nous distinguons (1) l'obtention des débits et (2) la séparation des évènements, crues et flashes.

Obtention des débits

La borne supérieure du domaine de validité de la courbe constructeur des deux canaux Venturi installés à **Mansarde** est 50 L/s. Le prolongement de la courbe que nous avons opéré introduit donc une incertitude sur les débits supérieurs à cette valeur. Nous avons détaillé ce calcul dans le rapport « Construction des courbes de tarage ». Plus généralement, la relation entre la hauteur d'eau, effectivement mesurée, et le débit est donnée par une courbe de tarage estimée.

L'incertitude sur la mesure primaire de la hauteur d'eau par le couple (sonde-station) et l'erreur introduite par la courbe de tarage n'ont pas été évaluées dans notre cas. Toutefois, la confrontation de plusieurs méthodes d'élaboration des courbes de tarage a consolidé l'expertise des ingénieurs ayant procédé à ces estimations.

Nous avons déjà évoqué la dérive de la mesure effectuée par la sonde de pression. Cette dérive est éventuellement constatée tous les 15 jours au moment des relevés, et corrigée en station par un recalage avec une mesure visuelle sur l'échelle limnimétrique.

Au moment de l'intégration de la série numérique collectée, la correction de cette dérive est effectuée, chaque quinzaine donc, par le logiciel « DP » sans que nous ayons approfondi l'algorithme appliqué et la distribution des résidus.

Le logiciel « DP » applique également un lissage qui élimine un bruit de mesure et rend plus facile la lecture ultérieure des débits. Nous n'avons pas enregistré systématiquement la somme des résidus à l'issue de ces ajustements.

Le défaut d'évaluation de l'erreur finale résultant de ces opérations ne nuit pas à la cohérence globale des débits estimés. Toutefois, lors de la reprise du jeu de données pour de nouvelles estimations, il nous faudra procéder à ces vérifications indispensables, d'autant plus si nous voulons agréger ces données avec de nouveaux enregistrements.

Séparation des évènements : Crues et flashes

Evènements de crue

La séparation des évènements de crue ressemble dans sa méthode à la séparation des averses. Elle repose sur la définition d'un critère de séparation et l'application systématique d'un algorithme. Toutefois, les frontières déterminées par les débits sont moins nettes que celles déterminées par les pluies. En conséquence, les algorithmes évaluent, non plus une valeur seuil, mais la moyenne d'une plage de valeurs. Nous avons appliqué comme critère de séparation, trois valeurs successives dont les moyennes sont supérieures ou inférieures au critère de séparation.

La définition retenue pour un évènement de crue est la suivante :

On considère qu'il y a évènement de crue lorsque la moyenne de trois débits instantanés successifs dépasse la valeur égale à deux fois le débit de base, lequel est défini à dire d'experts. Deux crues doivent être séparées par au moins une heure en dessous de deux fois le débit de base.

Estimation des débits de base

Pour la ravine **Mansarde**, en hivernage, le débit maximum en étiage ne dépasse jamais 0,5L/s, on choisira donc 0,5 L/s comme débit de base.

Pour la rivière **Voltaire**, le débit d'étiage est estimé 3 L/s, qui sera le débit de base.

Pour la rivière **Gaschette**, le débit d'étiage est estimé 2 L/s. Cependant les observations ont mis en évidence un déversement des eaux de la route nationale dans la rivière Gashette. Cela complique la relation Pluie/débit : La crue peut atteindre son débit de pointe, alors qu'il n'a pas commencé à pleuvoir au point de mesure, car la réponse de la route est très rapide.

Evènements de flash

La définition retenue pour la crue est normative et permet de comparer des cours d'eau de dimensions différentes. Pour des cours d'eau d'une certaine dimension et sur des échelles de temps suffisamment longues, les valeurs moyennes qu'elle permet de mesurer sont pertinentes.

Toutefois dans nos petits cours d'eau, l'observation fine des accélérations du débit, permise par des stations au **pas de temps d'une minute**, fait ressortir plusieurs pics significatifs regroupés dans une seule crue. De ce fait, la crue ne rend pas compte du fonctionnement réel du cours d'eau et de son bassin versant. En effet la détermination conventionnelle d'un pic de crue confond toutes les accélérations/décélérations du débit dans une phase artificiellement homogène de montée ou de décrue. Constater des crues à deux ou trois pics n'est pas encore suffisant.

Il nous a donc paru utile de distinguer une deuxième structure évènementielle, fondée sur les accélérations du débit, et non plus sur les débits eux-mêmes. Ainsi, nous appellerons « flash » une phase d'accélération du débit supérieure à 0,1 L/s/mn, seuil unique pour tous les cours d'eau dans notre cas.

Ce seuil d'accélération est empirique : Il s'agit de l'accélération qui caractérise effectivement le démarrage d'un flash **dans les cours d'eau que nous avons observés**. Par convention, la fin de flash est bornée par le pic lui-même. La phase de diminution du débit n'est donc pas intégrée dans l'évènement.

La distinction « confortable » entre montée de crue et décrue est mise à mal par la détermination des flashes qui sont des sortes de crues dans la crue. Ces flashes peuvent effectivement se déclencher à partir de débits très variables. Nous appellerons « **débit d'entrée** », le débit au démarrage de l'évènement. Il existe des crues sans flash, mais l'inverse n'est pas vrai. L'intérêt à les mesurer apparaîtra dans la présentation des résultats au paragraphe 34.

Nous concluons cette deuxième partie en soulignant que le traitement automatisé des séparations de crues est susceptible d'introduire des erreurs minimes dans l'évaluation des

durées de crue car les frontières ont été estimées sur des valeurs moyennes de plages de données, et non sur des valeurs instantanées. Par suite, l'erreur relative commise sur un flux en crue est fonction de la durée de la crue, elle-même très variable (quelques minutes à quelques jours).

3. RESULTATS

Remarque liminaire : Nous rappelons qu'un document annexe, le « *recueil des données* » - 115 pages, dont 38 consacrées aux pesticides, expose selon différents modes l'ensemble des résultats d'analyses. Le lecteur pourra s'y reporter pour retrouver le détail des résultats présentés ici.

De façon classique, nous procédons à l'étude comparative des situations mesurées pour mettre en évidence l'influence des facteurs.

Les résultats ont ainsi été arbitrairement regroupés en quatre familles selon les modèles d'analyse. Le paragraphe 31 s'intéresse à un simple inventaire de molécules. Le paragraphe 32 examine les moyennes mensuelles. Le paragraphe 33 fait état des crues échantillonnées. Le paragraphe 34 valorise la lourde série continue des événements en cours d'eau.

Les outils statistiques mobilisés sont basiques, statistiques descriptives, classifications et dénombrements. Ils s'adaptent aux objectifs de l'étude, première approche méthodologique des facteurs hydrologiques du transfert des pesticides sur de petits bassins versants au relief érogique déversant directement dans le milieu marin. La qualité des données disponibles permet cela.

La recherche des variables les plus discriminantes et de corrélations moins apparentes seront ultérieurement poursuivies avec un jeu de données consolidé par l'estimation des erreurs de mesure, opération à laquelle nous n'avons sciemment pas procédé dans cette première étape, essentiellement pour gagner du temps.

31 Inventaire des molécules retrouvées, facteur occupation du sol

Dans ce paragraphe, nous dressons un premier inventaire de la situation. L'examen d'un simple dénombrement des molécules retrouvées attire l'attention sur la station Gashette, caractérisée par une activité agricole ancienne et prépondérante, mais aussi par le drainage d'une route nationale.

(cf. Recueil des données – pesticides – pages 18 à 23)

	Gashette	Voltaire	Mansarde am.	Mansarde aval
Nombre de molécules retrouvées (*)	18 quantifiables + 2 détectées	8 quantifiables	5 quantifiables	8 quantifiables

(*) Dans ce dénombrement, Glyphosate et AMPA sont comptés pour deux molécules

Tableau 6 – Dénombrement des molécules retrouvées

La culture de la canne à sucre ne peut pas à elle seule expliquer ce nombre important de molécules retrouvées. Le point de mesure draine en réalité des eaux dont l'origine nous est difficile à déterminer, notamment en raison des voies de circulation qui accélèrent les ruissellements. De plus, l'activité maraîchère, forte utilisatrice de pesticides, n'a pas toujours

été absente du bassin versant. Cela n'enlève rien au caractère spectaculaire du spectre des matières actives retrouvées sur Gashette.

Le tableau 6 différencie également Mansarde amont, zone d'habitat sans agriculture, et Mansarde aval occupé par la culture de la banane.

Nous classons les molécules retrouvées par familles d'utilisation et à partir des **analyses d'eau brute** nous calculons les concentrations moyennes sur la campagne de mesure : Les valeurs intégrées dans ce calcul sont les concentrations des suivis mensuels et des suivis en crue, moyennées sans élimination des valeurs extrêmes ni pondération. Cette approche brutale sera nuancée au paragraphe 32 qui s'intéresse exclusivement aux suivis mensuels.

Famille ->molécule Unité : µg/l (microgrammes par litre)	Gaschette	Mansarde amont	Mansarde aval	Voltaire
Fongicides hétérocycles soufrés -> Difénoconazole			0.32	
Fongicides Triazoles -> Azaconazol	0.04			
Fongicides Triazoles -> Propiconazole			0.12	
Herbicides amides -> Métolachlore	0.59			
Herbicides amino phosphonates -> Gluphosinate d'ammonium		-	-	0.07
Herbicides amino phosphonates -> Glyphosate	0.38	1.57	0.51	1.02
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	1.04	0.16	0.17	-
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-MCPA		0.06	0.06	
Herbicides benzonitriles -> Dichlobenil	0.65			
Herbicides triazines -> Amétryne	0.06			
Herbicides triazines -> Terbutryne		0.11	-	
Herbicides Triazinones -> Hexazinone	0.05			
Herbicides Urées substitués -> Diuron	6.09			0.02
Herbicides Urées substitués -> Métoxuron	1.30			
Herbicides Urées substitués -> Monuron	0.28			
Insecticides carbamates -> Oxamyl			-	
Insecticides divers -> Anthraquinone	0.19			
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	0.17		0.45	0.02
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone 5b hydro	0.01		0.02	
Insecticides organo-chlorés -> Endosulfan sulfate				0.02
Insecticides organo-chlorés -> HCH Alpha	0.05			
Insecticides organo-chlorés -> HCH Beta	0.07			
Insecticides phénylpyrazoles -> Fipronil				0.01
Métabolites métabolites -> 1-(3,4 DichloroPhényl)-3-Méthyl Urée	0.88			0.02
Métabolites métabolites -> 1-(3,4-DichloroPhényl) Urée	0.07			
Métabolites métabolites -> AMPA	0.37	0.48	0.59	1.22

Tableau 7 - Moyennes des concentrations des analyses d'eau brute sur la campagne de mesure
(*) Les effectifs et les écarts types correspondants sont donnés en annexe 4.

Les molécules spécifiquement suivies ont été imprimées en couleur, les valeurs remarquables ont été imprimées en caractères gras.

Les produits spécifiquement utilisés sur canne à sucre apparaissent clairement sur Gashette : Diuron et 2-4D. Le nombre important d'herbicides retrouvés nous amène à penser que

certain d'entre eux peuvent provenir d'activités maraîchères. Plus généralement, **les teneurs en herbicides urées substituées sont préoccupantes** sur ce versant.

La forte valeur en Diuron traduit les lessivages qui seront détaillés au paragraphe 33.

Les concentrations en Glyphosate et AMPA correspondent clairement aux occupations du sol : Les fortes valeurs apparaissent sur Mansarde Amont et surtout Voltaire, confirmant ainsi l'impact de cet **herbicide généraliste utilisé à l'intérieur des zones d'habitation**. On le retrouve en moindre quantité, mais de façon significative en zone à dominante agricole, car il est parfois épandu sur les parcelles de bananes.

Les parcelles de Mansarde aval, occupées par la banane, transfèrent des résidus de produits fongicides en faible quantité, mais affichent une forte teneur en Chlordécone. Il est intéressant de remarquer que seule la crête de Mansarde amont ne révèle pas la Chlordécone. Cela illustre la diffusion généralisée de la molécule dans le réseau hydrographique à des concentrations variables corrélées avec la proximité des parcelles où cette molécule a été utilisée.

La figure 23 illustre un fait marquant qui n'apparaît pas dans le tableau des concentrations moyennes.

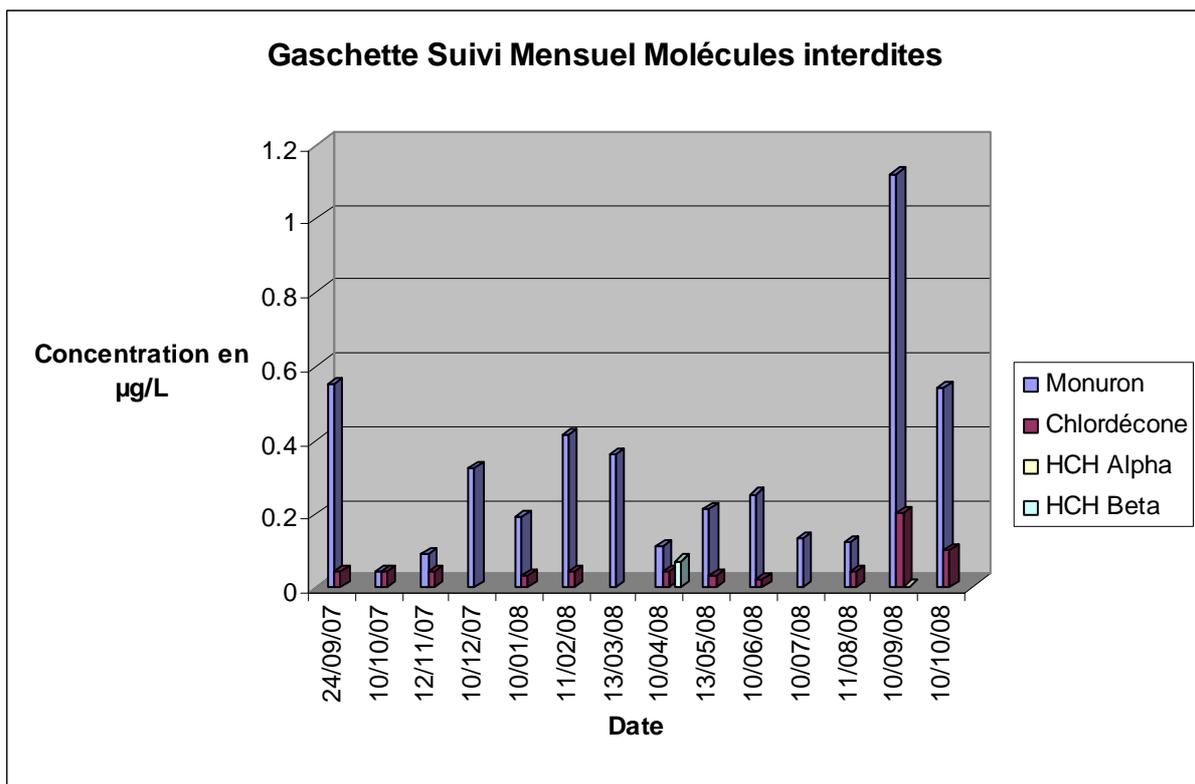


Figure 23 – Molécules interdites sur Gaschette en suivi mensuel

En dehors de la Chlordécone, d'autres organochlorés tels que HCH alpha et bêta, sont détectés. Par surcroît, un herbicide, le monuron est mesuré chaque mois avec des valeurs variant de 0,04 à 1,12 µg/L. Les concentrations d'herbicides en suivi mensuel sont en général corrélées à la pluviométrie. Cela ne semble pas être totalement le cas ici, puisque de fortes concentrations en Monuron sont observées en saison sèche. Si nous faisons abstraction d'une utilisation du produit, peu probable, les fortes concentrations en saison sèche laissent supposer

une présence ancienne du produit dans le sol avec contamination de la nappe et les fortes concentrations en saison des pluies expriment le lessivage par l'eau de ruissellement d'un produit essentiellement présent à la surface du sol. Toutefois, les quatre produits analysés au même moment et par le même laboratoire varient ensemble. Si la répétition, mois après mois, des fortes concentrations en monuron atteste la présence de la molécule, les variations synchrones des différents produits, et l'incertitude relative de la mesure (38%), nous incitent à une prudente interprétation.

Nous rappelons qu'aucune utilisation de cet herbicide n'a été autorisée pour les cultures aux Antilles et il est interdit en métropole depuis 1994.

D'autres produits ne se retrouvent qu'en crue, certains sont interdits : Azaconazole, Carbofuran, Chloroxuron, Métoxuron et Méthabenzthiazuron, d'autres sont autorisés : Dichlobénil (herbicide) et Anthraquinone (contre les oiseaux).

A travers ce premier balayage nous avons mis en évidence comment l'occupation du sol détermine d'une part la nature des produits transférés, et d'autre part les concentrations mesurées dans les cours d'eau. **Le suivi régulier des usages est donc un élément essentiel dans une démarche d'évaluation de la pression phytosanitaire à l'échelle d'un cours d'eau et de son bassin versant.**

32 Analyse des concentrations en moyennes mensuelles, transfert chronique et facteur climatique

Nous commençons par comparer les pluviométries et les débits spécifiques aux points de mesure de façon à les caractériser en comparaison (paragraphe 321) ; puis nous examinons pour quelques produits les évolutions conjointes des valeurs mensuelles de concentration et de pluie (paragraphe 322). Nous aurons alors mis en évidence l'influence du facteur climatique sur les transferts de pesticides.

321 Caractérisation des stations de mesure

Le tableau 8 reproduit les pluviométries mensuelles mesurées (mm), après élimination des anomalies et estimation des données manquantes quand cela a été possible.

Année	Mois	Gashette	Mansarde	Voltaire
2007	01	74.40		
2007	02	60.80		
2007	03	62.20		
2007	04	99.00		
2007	05	71.60		
2007	06	134.20		
2007	07	119.40		
2007	08	338.60		
2007	09	146.20		139.00
2007	10	230.60	223.00	262.80
2007	11	136.10	150.80	158.60
2007	12	88.80	108.40	99.40
2008	01	Anomalies	76.60	76.40
2008	02	91.40	102.60	96.60
2008	03	75.40	118.60	113.00
2008	04	Panne	118.20	83.20
2008	05	21.80	37.20	40.30 (*)
2008	06	144.80	173.6	183.60
2008	07	Panne	190.6	208.20
2008	08	Panne	191.6	145.00
2008	09	Panne	272.8	307.80
2008	10	Panne	429.8	506.60
2008	11	Panne	288.2	Anomalies
2008	12	Panne	122.2	Anomalies

(*) valeur estimée

Tableau 8 – Pluies mensuelles (mm) comparées des trois sites

Ces mesures mettent en évidence la similitude des pluviométries sur Mansarde et Voltaire. La comparaison avec Gashette est rendue difficile par l'absence de données, mais nous nous appuyerons sur la proximité des sites pour justifier certaines estimations de données manquantes sur Gashette à partir de celles de Mansarde et Voltaire.

La pluviométrie annuelle sur Mansarde est 2122 mm de janvier à décembre 2008. Il faudra toutefois noter les pluies exceptionnelles du mois d'octobre 2008, en comparaison de celles de 2007 le même mois. La pluviométrie annuelle sur Mansarde et Voltaire est **proche de 1760 mm** quand on sélectionne les mois d'octobre 2007 à septembre 2008.

Le tableau 9 donne les débits moyens mensuels **spécifiques** (L/s/ha)

Annee	Mois	Gashette	M.amont	M.aval	Voltaire
2007	01	0.04			
2007	02	0.04			
2007	03	0.03			
2007	04	0.04			
2007	05	0.05			
2007	06	0.07			
2007	07	0.03			
2007	08	0.41			
2007	09	0.10			0.12
2007	10	0.37	0.58	0.12	0.30
2007	11	0.17	0.39	0.09	0.21
2007	12	0.04	0.11	0.03	0.09
2008	01	0.04	0.04	0.01	0.06
2008	02	0.04	0.04	0.01	0.06
2008	03	0.04	0.01	0.00	0.06
2008	04	0.04	0.04	0.00	0.07
2008	05	0.03	0.00	0.00	0.05
2008	06	0.09	0.03	0.01	0.06
2008	07	0.09		0.02	0.12
2008	08	0.11		0.01	0.16
2008	09		0.17	0.03	0.37
2008	10		0.48	0.23	1.04
2008	11		0.20	0.26	
2008	12			0.13	

Tableau 9 – Débits spécifiques comparés des 4 stations (L/s/ha)

Les débits spécifiques rapprochent les stations Gashette, Voltaire et Mansarde amont lorsque la ravine est en eau.

Nous verrons au paragraphe 34 comment les facteurs d'échelle différencient les réponses hydrologiques de Mansarde (1,25 ha et 3,70 ha intégrés aux points de mesure amont et aval respectivement) et de Voltaire (66,50 ha intégrées au point de mesure), alors que les débits spécifiques présentent des ordres de grandeur comparables.

322 Examen de quelques suivis mensuels

Tous les prélèvements du suivi mensuel sont réalisés **hors crue**. Chaque valeur est issue d'une seule analyse réalisée autour du 10 de chaque mois.

L'examen des 14 analyses ciblées du suivi mensuel du Diuron sur la station Gashette parallèlement à la pluie mensuelle cumulée montre l'action du facteur pluviométrique sur les concentrations. (Tableau 10 et figure 24).

Sur la figure 24, nous avons également porté les 6 valeurs du suivi mensuel du 2-4D, réalisé en saison des pluies, mais **hors crue**, qui confirme l'allure de la relation Pluie/Concentration.

Mois	Diuron ($\mu\text{g/l}$)	2-4D ($\mu\text{g/l}$)	Pluie (mm)
2007-sep	0.41	0.03	146.20
2007-oct	2.9	0.32	230.60
2007-nov	1.34	0	136.10
2007-dec	0.9	0	88.80
2008-jan	0.54		76.50 (*)
2008-fev	0.43		91.40
2008-mar	0.38		75.40
2008-avr	0.08		100.70 (*)
2008-mai	0.11		21.80
2008-jun	0.07		144.80
2008-jul	0.09		199.40(*)
2008-aou	0.51	0.03	168.30 (*)
2008-sept	0.26	0.03	290.30 (*)
2008-oct	1.9	0.03	468.20 (*)

(*) Les valeurs marquées d'une étoile ont été estimées à partir des pluies enregistrées sur Mansarde et Voltaire, les données de la station ayant été perdues ou entachées d'anomalies sur Gashette.

Tableau 10 - Suivi mensuel – Gashette – Diuron – 2,4D

Les deux produits illustrent la relation Pluie/Concentration.

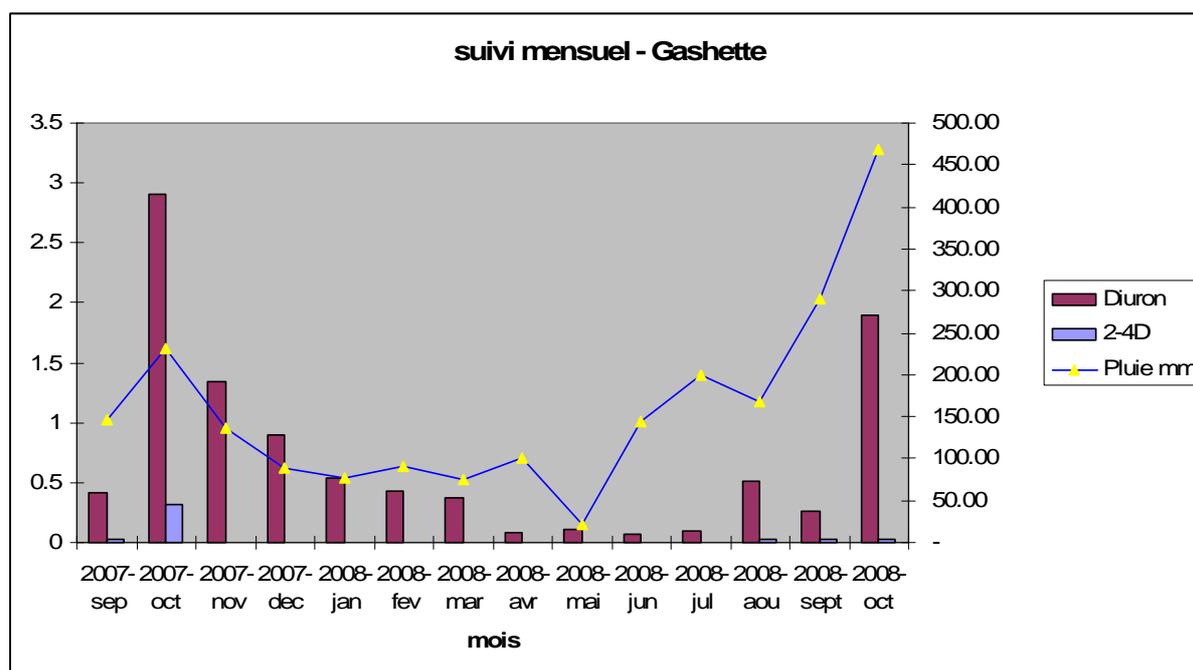


Figure 24 - Suivi mensuel – Gashette – Diuron – 2,4D

Retour sur les pratiques agricoles : La valeur maximum obtenue pour le Diuron est de 2,9 $\mu\text{g/L}$. Les deux maxima sont observés pendant les mois d'octobre. Ces pics ne correspondent pas aux applications de juillet des agriculteurs, car on pouvait supposer observer les pics en août avec les premières crues. Cela nous amène à penser que la forte infiltrabilité des sols, déjà notée par Maurice Meunier, limite le lessivage par ruissellement pendant le mois d'août, qui par contre s'accroît au moment des fortes pluies des mois d'octobre. Ce sera l'objet du paragraphe 33.

L'examen des concentrations chroniques des métabolites du Diuron, **1-(3,4 DichloroPhényl)-3-Méthyl Urée et 1-(3,4-DichloroPhényl) Urée** fait apparaître une concentration accentuée à la saison sèche, phénomène qui caractérise une possible contamination de la nappe.

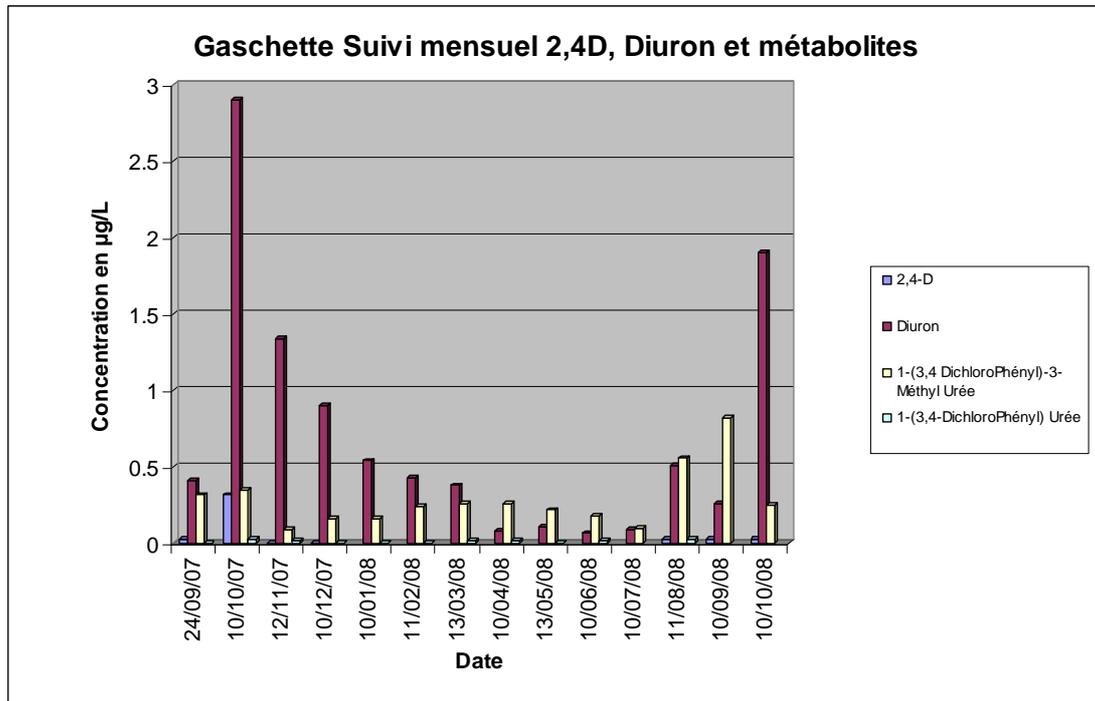


Figure 25 – Suivi mensuel des métabolites du Diuron

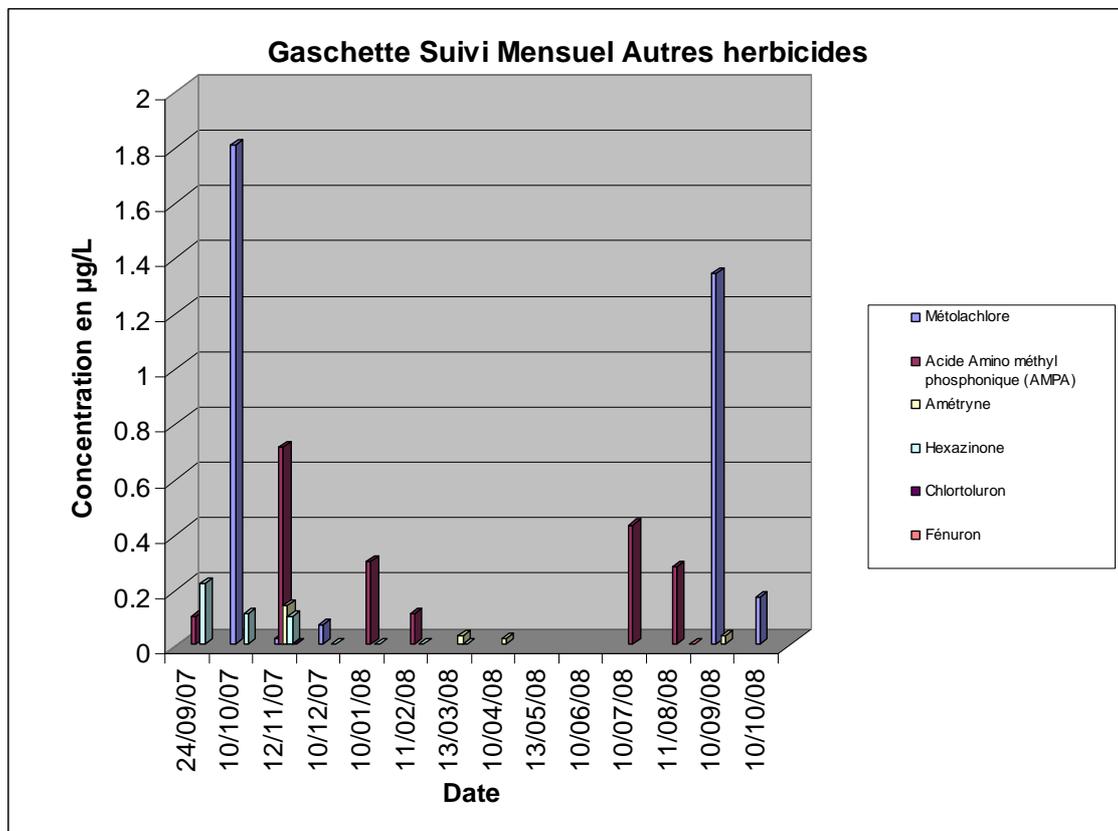


Figure 26 – Gashette - Suivi mensuel des « autres herbicides »

L'examen des autres herbicides confirme l'influence de la pluviométrie. L'AMPA est régulièrement retrouvé.

Sur voltaire, les valeurs mensuelles confirment à nouveau l'augmentation des concentrations avec la pluviométrie. Les molécules retrouvées caractérisent les usages comme nous l'avons déjà observé, particulièrement le Glyphosate et l'AMPA.

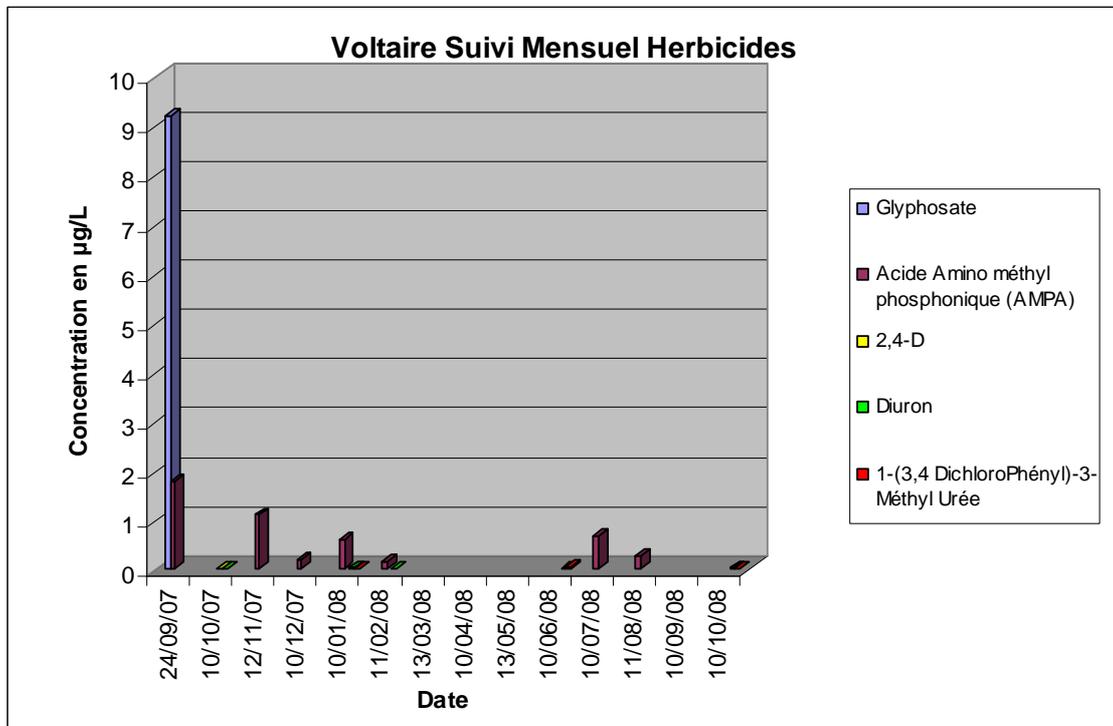


Figure 27 – Voltaire – Suivi mensuel herbicides

Les insecticides sont en revanche peu présents sur la station Voltaire, même si la Chlordécone y est détectée une fois sur deux à des concentrations faibles.

Sur Mansarde aval, les résultats sont variables et difficiles à interpréter : alors que septembre 2007 est le mois le plus chargé en nombre de molécules retrouvées et en concentrations, septembre 2008 ne révèle aucun produit.

En dehors de la Chlordécone mesurée au dessus de 0,1 µg/l, les produits retrouvés sont essentiellement des herbicides. Les producteurs de banane n'ayant confirmé que le Glyphosate et le Glufosinate, on peut supposer que les autres molécules : 2,4D et 2,4-MCPA proviennent de l'habitat. Le Glyphosate et son dérivé l'AMPA sont les molécules les plus présentes dans des proportions non négligeables. Le terbutryne est un herbicide non homologué en France à ce jour. Sa présence ponctuelle à une concentration inférieure au seuil de quantification doit correspondre à une pollution ancienne.

Aucun nématicide n'est retrouvé dans les eaux en étiage.

On détecte des molécules actives contre la cercosporiose (Difénoconazole et Propiconazole) et épandues par avion à des faibles concentrations.

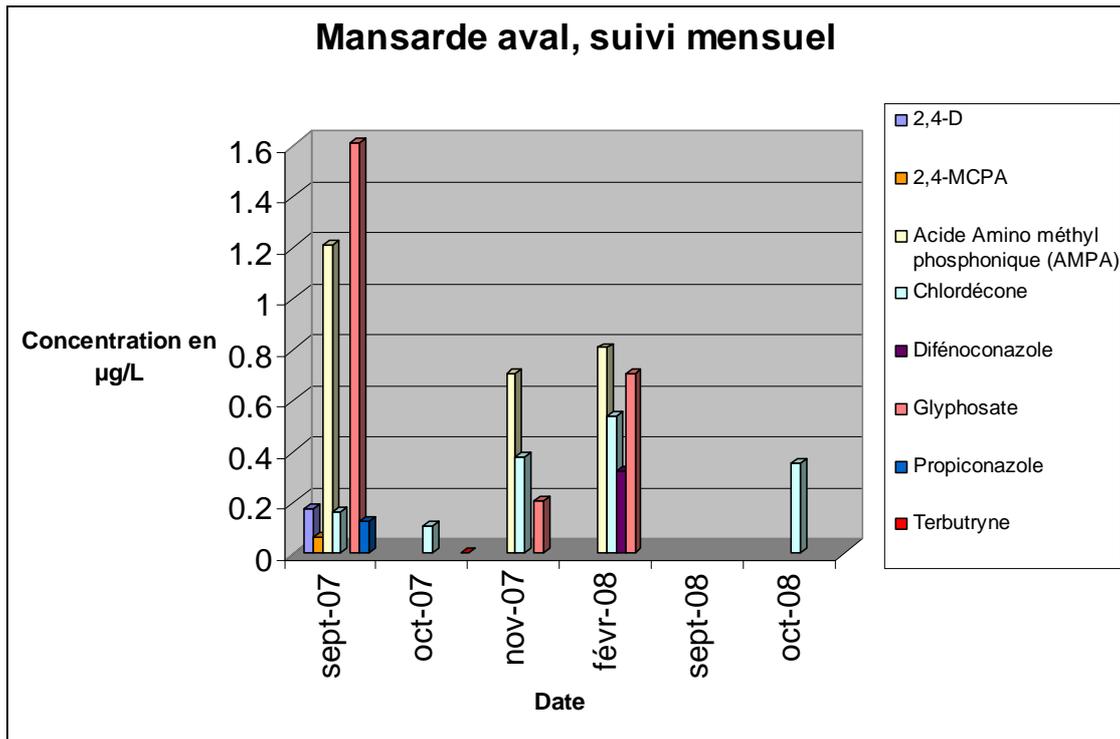
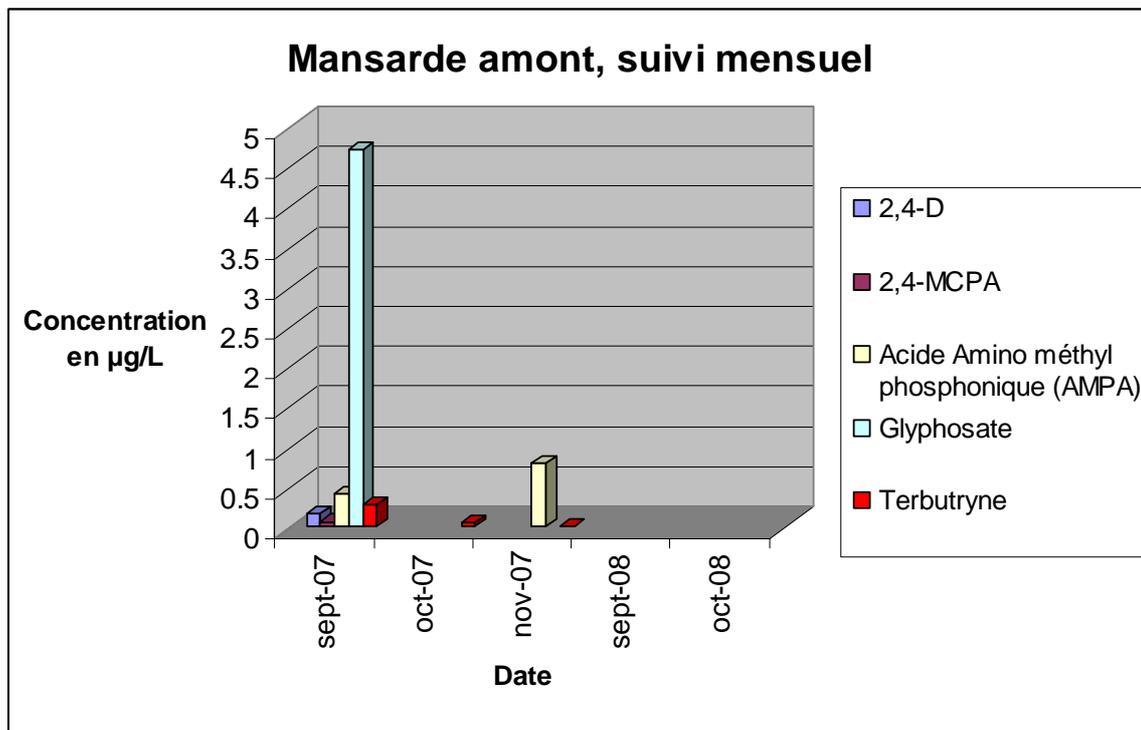


Figure 28 – Mansarde Aval – Suivi mensuel Herbicides

Sur Mansarde aval, les résultats sont difficiles à interpréter, faute d'information pertinente sur les usages que les particuliers font des herbicides retrouvés. L'année 2007 confirme la relation Pluie/Concentration, mais pas l'année 2008 qui présente deux « anomalies » : la saison sèche 2008 est chargée, la saison des pluies 2008 est indemne en dehors de la Chlordécone.

Figure 29 – Mansarde Amont – Suivi mensuel Herbicides



Mansarde amont confirme la fonction croissante pluie/concentration. Les produits majoritaires sont le Glyphosate et l'AMPA.

En septembre 2007, la concentration en Glyphosate est plus élevée à l'amont qu'à l'aval, et c'est l'inverse pour l'AMPA. En novembre 2007, les concentrations en AMPA sont du même ordre de grandeur aux deux stations (valeurs enregistrées : 0,7 et 0,8 µg/L). L'incertitude relative sur ces valeurs (38 %) leur attribue des significations équivalentes.

Les concentrations en 2,4D et en 2,4 MCPA, identiques en amont et en aval, confirment l'apport par l'habitat aux deux points de mesure, car la station amont récolte les eaux de l'habitat diffus avant qu'elles ne traversent les bananeraies situées en aval. De même, le terbutryne est mesuré à trois reprises avec des concentrations plus élevées en amont.

Les réponses des trois bassins versants à la pluviométrie, en termes de concentration en pesticides dans leur cours d'eau, sont similaires : Les concentrations tendent à augmenter avec la pluviométrie mensuelle. Trois exceptions cependant ont été observées : (1) Les métabolites du Diuron sur Gashette accompagnent la saison sèche en 2008, comme (2) les herbicides sur Mansarde Aval à la même saison. Enfin (3) La saison des pluies ne révèle aucune molécule sur Mansarde Aval.

Les stratégies d'échantillonnage qui distinguent « saison sèche » et « saison des pluies » sont donc pertinentes. Cependant, **elles gagneront toujours à être couplées avec une connaissance préalable des usages associés aux occupations du sol**, car les interprétations ne sont pas toujours directes.

Les suivis mensuels sont regroupés à l'annexe 5. Ils sont également détaillés au « *recueil des données* » avec un regroupement saison sèche / saison des pluies.

Le suivi mensuel constitue la référence à partir de laquelle pourront être évalués les phénomènes de lessivage, au moins par comparaison si ce n'est avec précision. C'est l'objet du paragraphe 33.

33 Analyse des concentrations en crue, pratiques agricoles, lessivage et facteur hydrologique

Dans cette partie, notre objectif est de produire une première évaluation quantitative du lessivage des produits phytosanitaires dans la situation où un évènement pluvieux survient peu de temps après un épandage et déclenche une crue.

Nous ne devons pas perdre de vue que nous mesurons le cours d'eau comme intégrateur et révélateur des phénomènes qui se produisent à la surface du bassin versant. L'approche hydrologique est donc asservie à la compréhension des facteurs du déplacement des molécules vers le milieu récepteur marin.

Tout d'abord, nous rappelons quelques définitions (paragraphe 331). Puis, nous présentons les mesures produites sur quelques crues échantillonnées (paragraphe 332). Enfin, nous étudions les aspects hydrologiques des évènements observés afin de préparer l'évaluation des flux qui sera faite au paragraphe 34, mais aussi pour mettre en évidence certaines limites du protocole (paragraphe 333).

331 Quelques définitions

La figure 30 permet de poser les définitions classiques des **temps caractéristiques d'un modèle Pluie/Débit** : Un ensemble de pluies et un ensemble de débits sont ainsi associés.

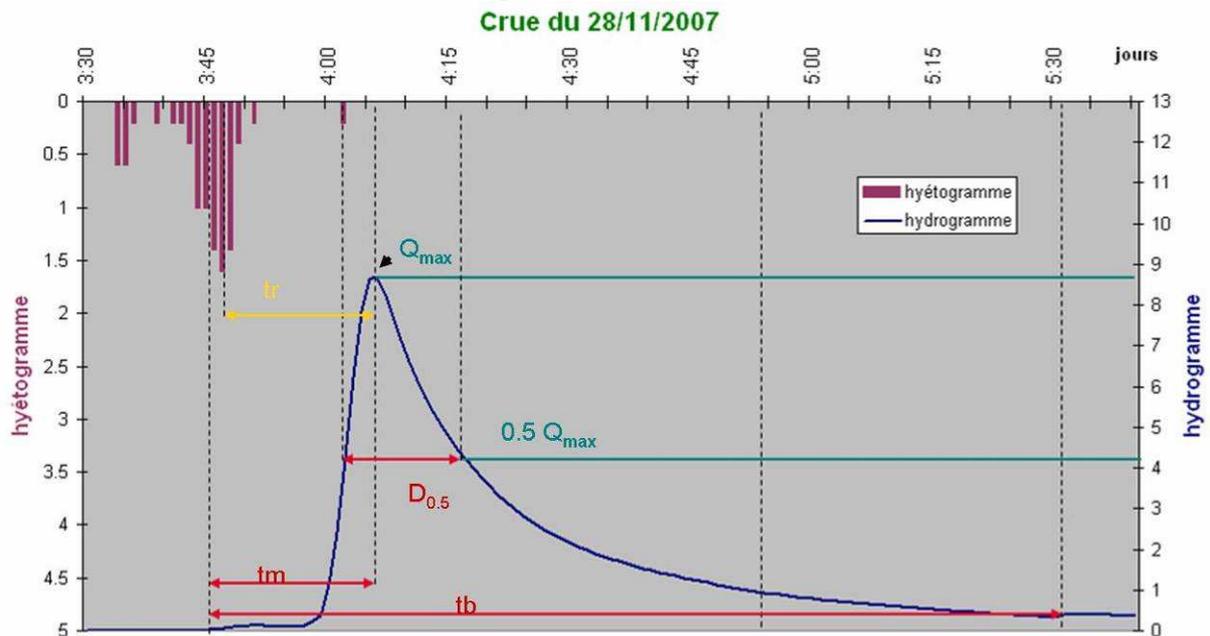


Figure 30 : Hyetogramme et hydrogramme, exemple de la crue du 28/11/2007 sur la station Mansarde Aval

Q max = débit de pointe

Tb = temps de base (temps de la crue entre le début de la montée et le point d'inflexion de la courbe (arrêt du ruissellement))

Tm = temps de montée (temps entre le début de l'augmentation du débit de base et le débit de pointe)

Tr = temps de réponse (temps entre le centre de gravité de la pluie et le Q max)

D_{0,5} = temps entre l'atteinte de la moitié du Qmax à la montée et le retour au demi Qmax à la décrue.

Ces définitions sont normatives et simplificatrices. Elles sont utiles dans cette partie du document, mais nous en étudierons les limites au paragraphe 42.

332 Lessivages en évènement de crue

3321 Lessivage en zone cannière - Gashette

Nous présentons l'échantillonnage de deux crues, survenues la première du 30/07/2008 au 01/08/2008 (appelée crue du 31/07/2008) et l'autre le 19/09/2008 dans la rivière Gashette, crues qui ont fait l'objet d'analyses multirésidus et d'analyses ciblées sur deux herbicides (Diuron et 2-4D) appliqués sur canne à sucre au mois de juillet. Les dates d'épandage et les surfaces correspondantes sont résumées en [annexe 3](#).

Les analyses multirésidus sur les deux crues à différents stades d'avancement, donnent une idée du large spectre des molécules retrouvées dans le cours d'eau après un fort évènement pluvieux : 19 molécules ont été quantifiées ou détectées à travers 4 analyses représentées figure 31.

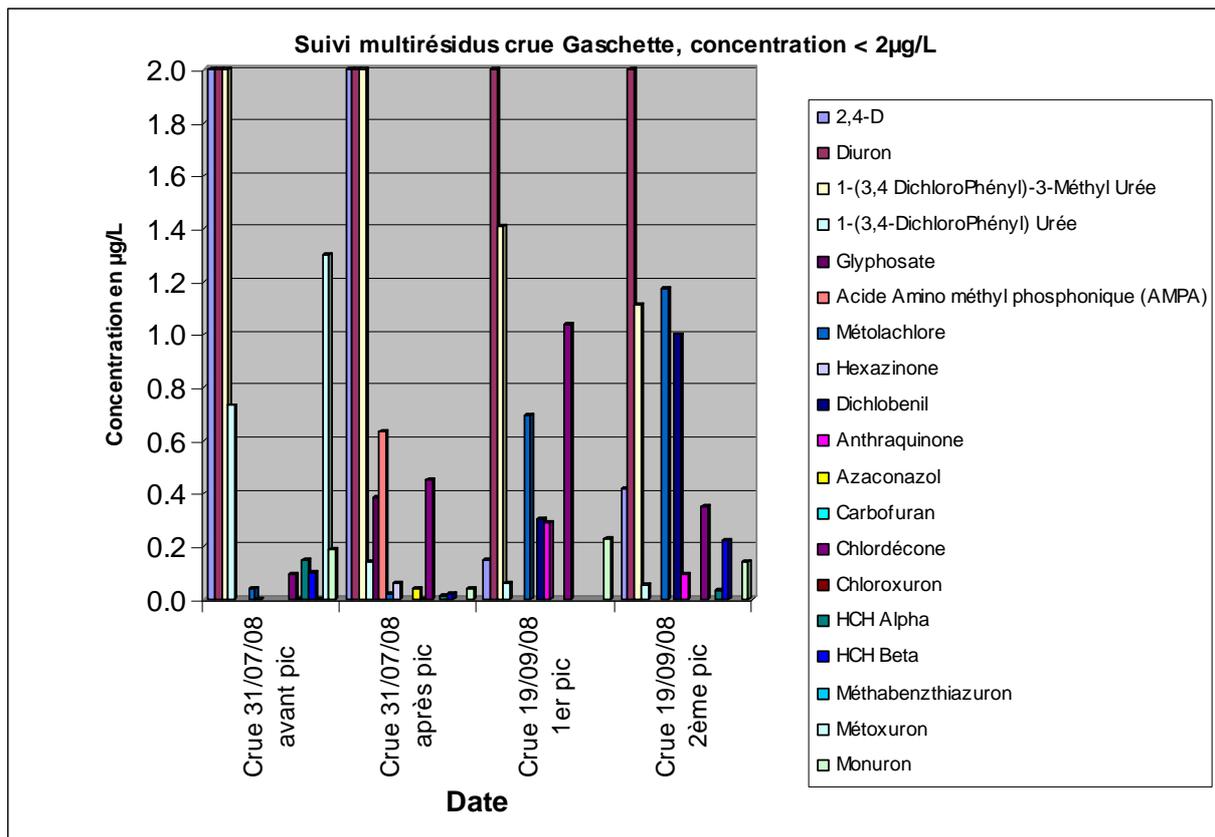


Figure 31 : Suivi multirésidus en crue, station Gashette,

Les figures 32 et 33 présentent les résultats des analyses ciblées sur Diuron et 2,4D. Nous y retrouvons tous les caractères d'un lessivage (voir paragraphe 12 – Etat de l'art et des connaissances – relation concentration/débit)

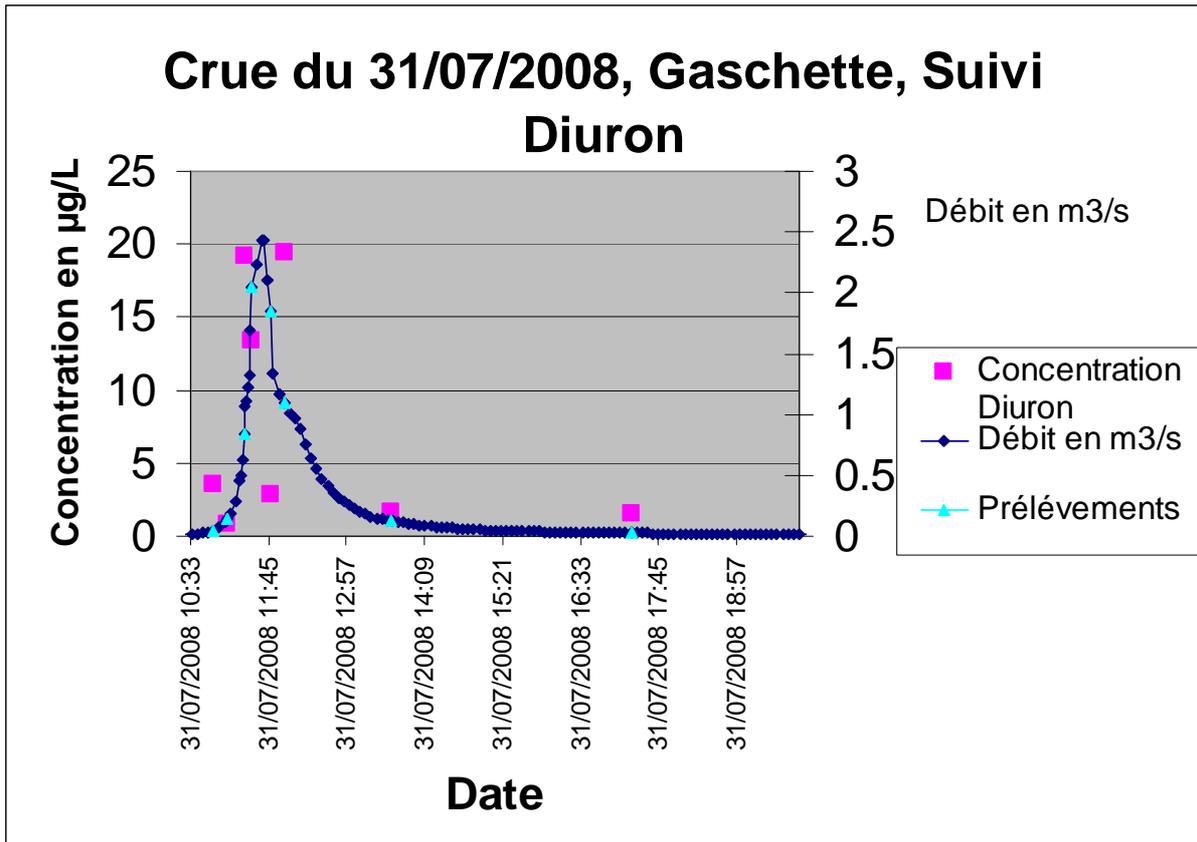


Figure 32 : Concentration en Diuron, crue du 31/07/2008, station Gaschette

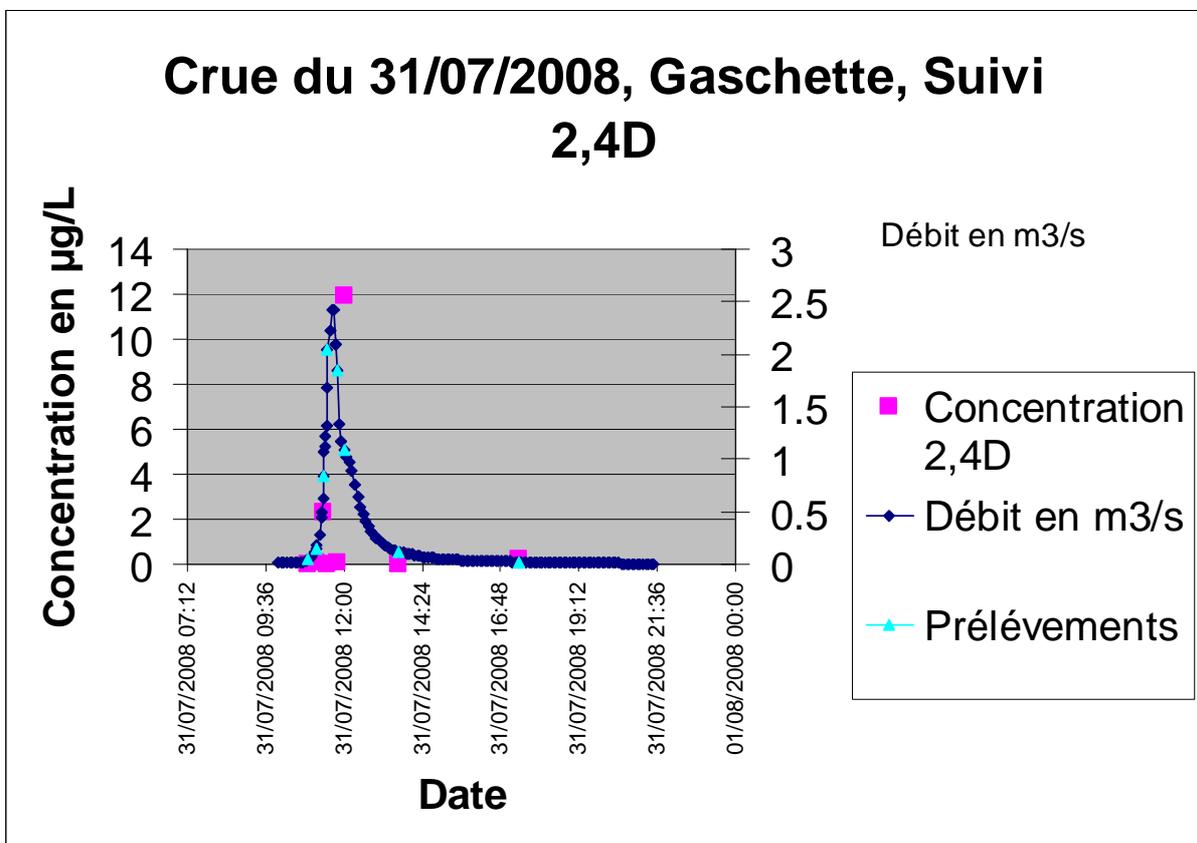


Figure 33 - Concentration en 2,4D, crue du 31/07/2008, station Gaschette

Les pics de pollution observés sur les figures 32, 33, 34 et 35 sont caractéristiques des lessivages. L'ampleur des événements démontrée par les débits de pointe (2,5 et 5 m³/s) consolide cette observation. Un retard du pic de pollution s'observe pour le Diuron sur les deux crues. Cela traduit un retard de la masse d'eau contaminée sur l'onde de crue.

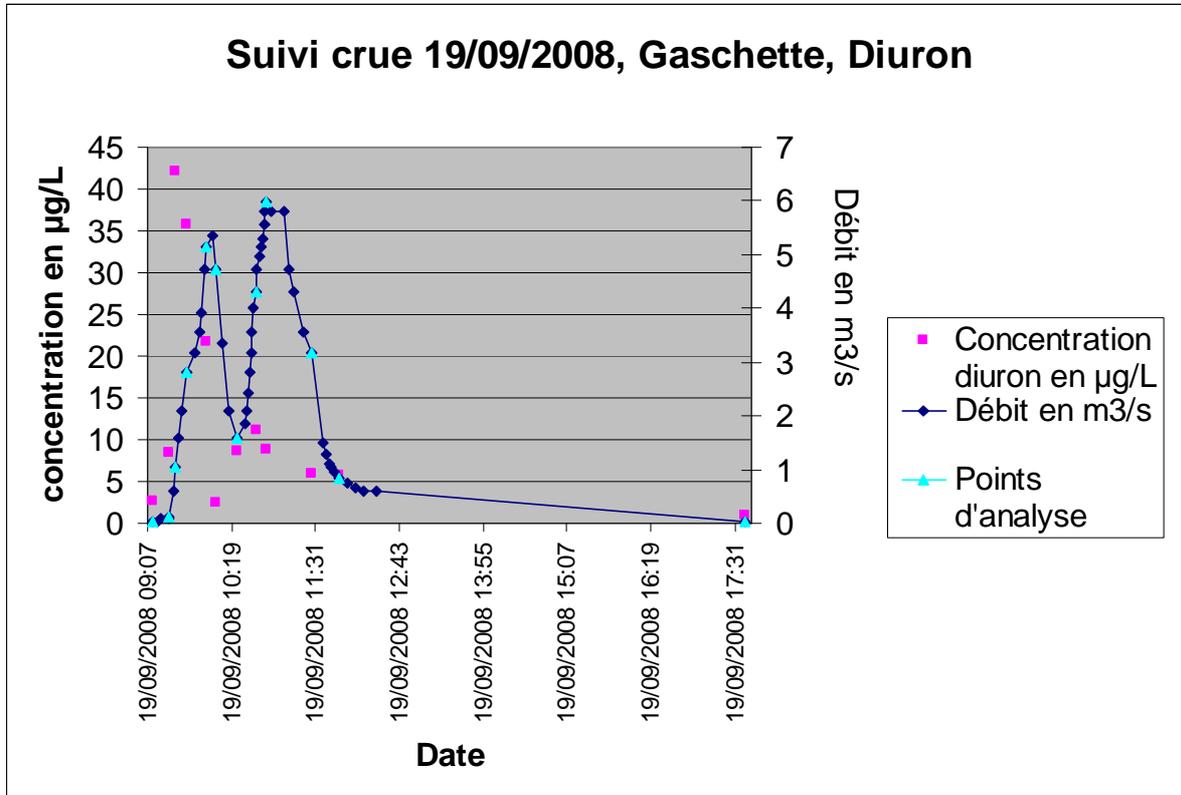


Figure 34 : Concentration en Diuron, crue du 19/09/2008, station Gaschette

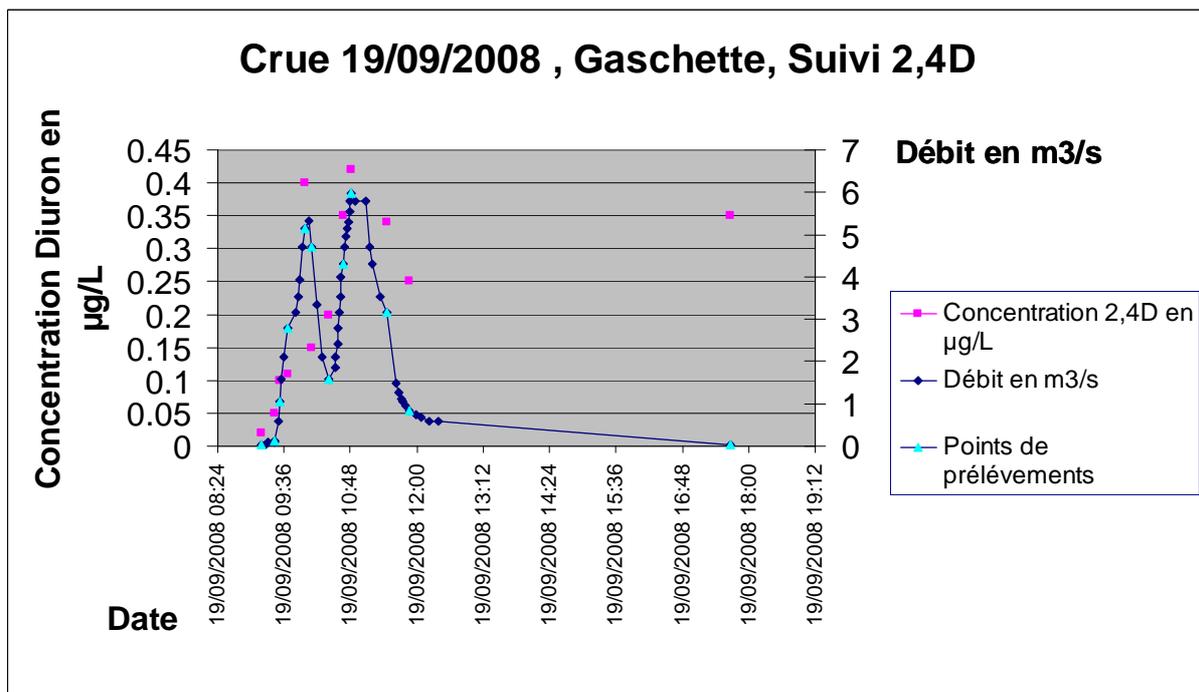


Figure 35 : Concentration en 2,4D, crue du 19/09/2008, station Gaschette

Comparaison des concentrations en crue et des concentrations en suivi mensuel

Notre objet est d'évaluer un coefficient multiplicateur de lessivage, déterminé par la conjonction d'un épandage de produit et d'un évènement pluvieux déclencheur d'une crue. Les concentrations retrouvées dans le cours d'eau en crue sont simplement rapportées à celles mesurées en étiage.

Crue du 31/07/2008 - GashetteSuivi mensuel

Date	Diuron (µg/L)	2,4D (µg/L)
10/07/2008 (Etiage avant crue)	0.09	/
11/08/2008 (Etiage après crue)	0.51	0.03
Moyenne suivi mensuel	0.71 (sur 14 mois)	0.06 (sur 6 mois)

Crue

Date	Heure	Débit en m3/s		Diuron (en µg/L)	2,4D (en µg/L)
Avant montée de crue du 31/07/2008					
30/07/2008	16h00	0.005		0.52	0.00
Montée de crue					
31/07/2008	10h55	0.045		3.50	0.00
31/07/2008	11h08	0.152		0.86	0.09
31/07/2008	11h23	0.869		19.21	2.30
31/07/2008	11h30	2.049		13.40	0.00
			Moyenne	9.24	0.60
Décru					
31/07/2008	11h48	1.638		2.80	0.05
31/07/2008	12h00	1.092		19.40	11.90
31/07/2008	13h39	0.124		1.60	0.00
31/07/2008	17h21	0.023		0.21	1.50
			Moyenne	6.00	3.36

Coefficients multiplicateurs

En montée de crue	$9.24/0.71 = \mathbf{13.01}$	$0.60/0.06 = \mathbf{10.00}$
En décrue	$6.00/0.71 = \mathbf{8.45}$	$3.36/0.06 = \mathbf{56.00}$
Crue totale (montée et décrue)	$7.62/0.71 = \mathbf{10.73}$	$1.98/0.06 = \mathbf{33.00}$

Tableau 11 – Coefficients de lessivage – Gashette le 31/07/2008

Les valeurs les plus fortes des pollutions chroniques (Diuron 0.71 µg/l et 2,4D 0.06 µg/l) portées aux dénominateurs sont retenues pour ne pas maximiser le coefficient multiplicateur.

La valeur retrouvée à 12 h 00 en 2,4D (11.90 µg/l) n'est pas répétée alors que les trois valeurs en Diuron, 19.21, 13.40 et 19.40 confirment un ordre de grandeur élevé ; nous décidons donc de ne pas retenir les facteurs élevés calculés pour 2,4D qui sont 33 et 56 et de nous appuyer sur les mesures du Diuron.

Ainsi, un facteur d'ordre 10 semble représenter le mieux le coefficient multiplicateur recherché.

Le résultat de notre investigation peut être formulé ainsi : Dans les jours qui ont suivi l'épandage du Diuron et 2,4D sur les parcelles de canne à sucre du versant de la rivière Gashette, une surface de 67,52 ha ayant été intégrée au point de mesure, une averse d'intensité 8 mm/h pour 33 mm de pluie a provoqué un lessivage ayant multiplié par dix la concentration du cours d'eau en produits pendant 10 heures environ.

De simples multiplications peuvent amener une estimation de la matière active transférée, mais nous avons déjà mis en garde contre les incertitudes et l'intérêt relatif de tels calculs. Retenons que les quantités obtenues n'ont qu'une signification relative à d'autres estimations, et aucune signification en elles-mêmes. Le débit moyen de la crue (71,73 L/s) pendant 10 heures permet donc d'estimer un flux de 2582 m³ d'eau, soit un transfert de 19,68 grammes de Diuron à la concentration 7,72 µg/l, et un transfert de 4,34 grammes de 2,4D à la concentration 1,98 µg/l. (voir commentaire page 82 suite au tableau 24).

Crue du 19/09/2008 - Gashette

Suivi mensuel

Date	Diuron (µg/L)	2,4D (µg/L)
10/09/2008 (Etiage avant crue)	0.26	0.03
10/10/2008 (Etiage après crue)	1.90	0.03
Moyenne suivi mensuel	0.71 (sur 14 mois)	0.06 (sur 6 mois)

Crue

Date	Heure	Débit en m ³ /s		Diuron (en µg/L)	2,4D (en µg/L)
Montée de crue					
19/09/2008	9h12	0.035		2.70	0.05
19/09/2008	9h26	0.115		8.50	0.05
19/09/2008	9h31	1.060		42.10	0.10
19/09/2008	9h40	2.800		35.80	0.11
19/09/2008	9h58	5.131		21.70	0.40
			Moyenne	22.16	0.14
Décru					
19/09/2008	10h06	4.712		2.47	0.15
19/09/2008	10h24	1.587		8.60	0.20
19/09/2008	10h40	4.299		11.22	0.35
19/09/2008	10h49	5.970		8.83	0.42
19/09/2008	11h28	3.171		6,00	0.34
19/09/2008	11h52	0.831		5.80	0.25
			Moyenne	6.26	0.29

Coefficients multiplicateurs

En montée de crue	22.16/0.71 = 31.21	0.14/0.06 = 2.37
En décrue	6.26/0.71 = 8.81	0.29/0.06 = 4.90
Crue totale (montée et décrue)	12.88/0.71 = 18.14	0.23/0.06 = 3.85

Tableau 12 – Coefficients de lessivage – Gashette le 19/09/2008

Le lessivage apparaît plus important pour le Diuron et plus faible pour le 2,4D, mais les ordres de grandeur sont confirmés, notamment pour le Diuron. Nous conserverons par prudence un facteur 10, bien que le lessivage semble avoir été plus intensif, en relation avec l'averse du 19/09/2009 également plus forte. (*)

(*) Les pluies n'ont plus été enregistrées sur la station Gashette après le 10/07/2008. Aussi, nous avons repris les données des averses enregistrées sur Mansarde, consolidées par celles enregistrées sur Voltaire. Effectivement, les averses survenues sur les trois stations présentent de très fortes similitudes (cf. « recueil des données – chronique des averses »).

Le résultat de notre deuxième investigation peut être formulé ainsi : Dans le mois qui a suivi l'épandage du Diuron sur les parcelles de canne à sucre du versant de la rivière Gashette, une surface de 67,52 ha ayant été intégrée au point de mesure, une averse d'intensité 9,42 mm/h pour 67,8 mm de pluie a provoqué un lessivage ayant multiplié par dix à quinze la concentration du cours d'eau en produit pendant 10 à 12 heures.

Les calculs de flux sont similaires à ceux précédemment exécutés pour l'averse du 31/07/2008.

3322 Lessivage en zone d'habitat diffus - Voltaire

Les mêmes analyses sur **eau brute** sont poursuivies dans une zone d'habitat diffus, mais sans information précise sur les dates d'utilisation des produits. Nous examinons trois molécules à risques : Glyphosate, AMPA et Gluphosinate d'ammonium.

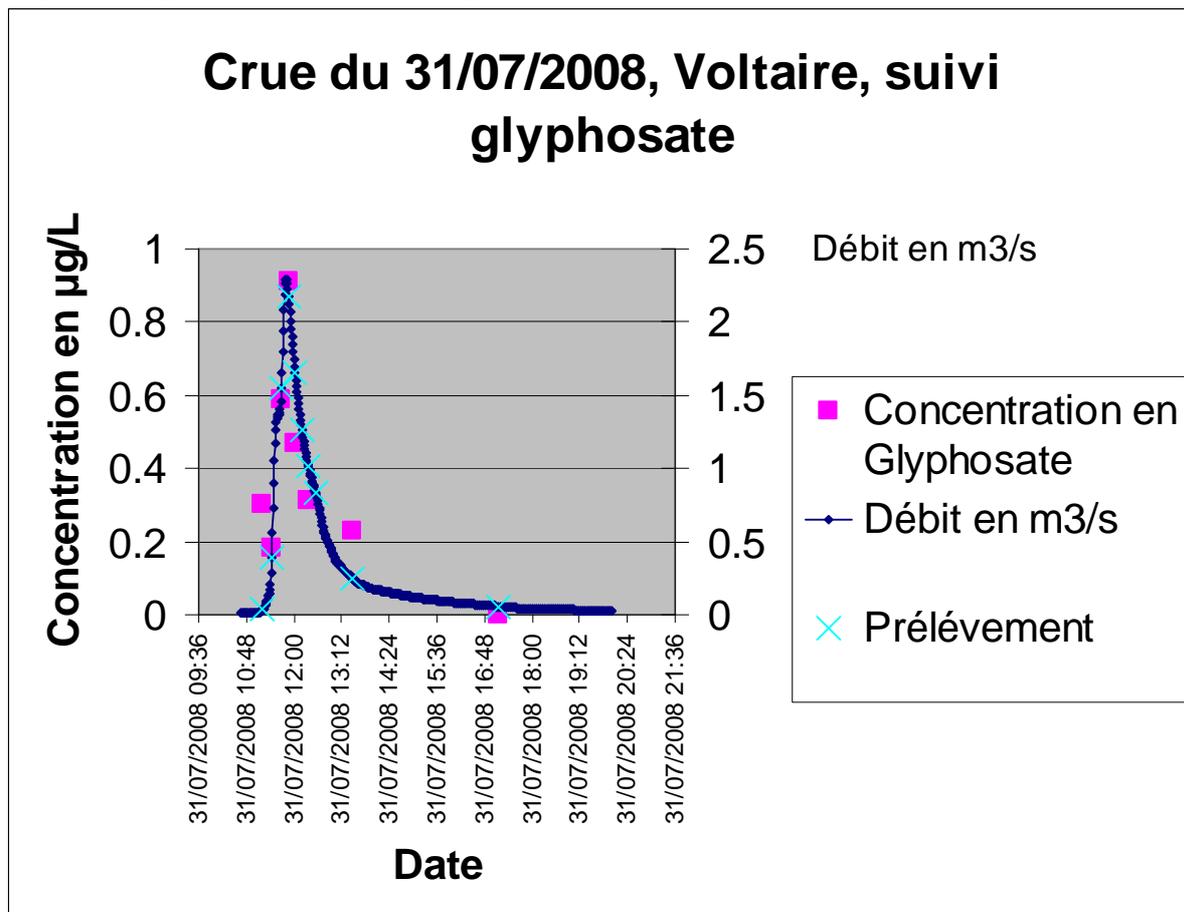


Figure 36 : Concentration en Glyphosate, crue du 31/072008, station Voltaire

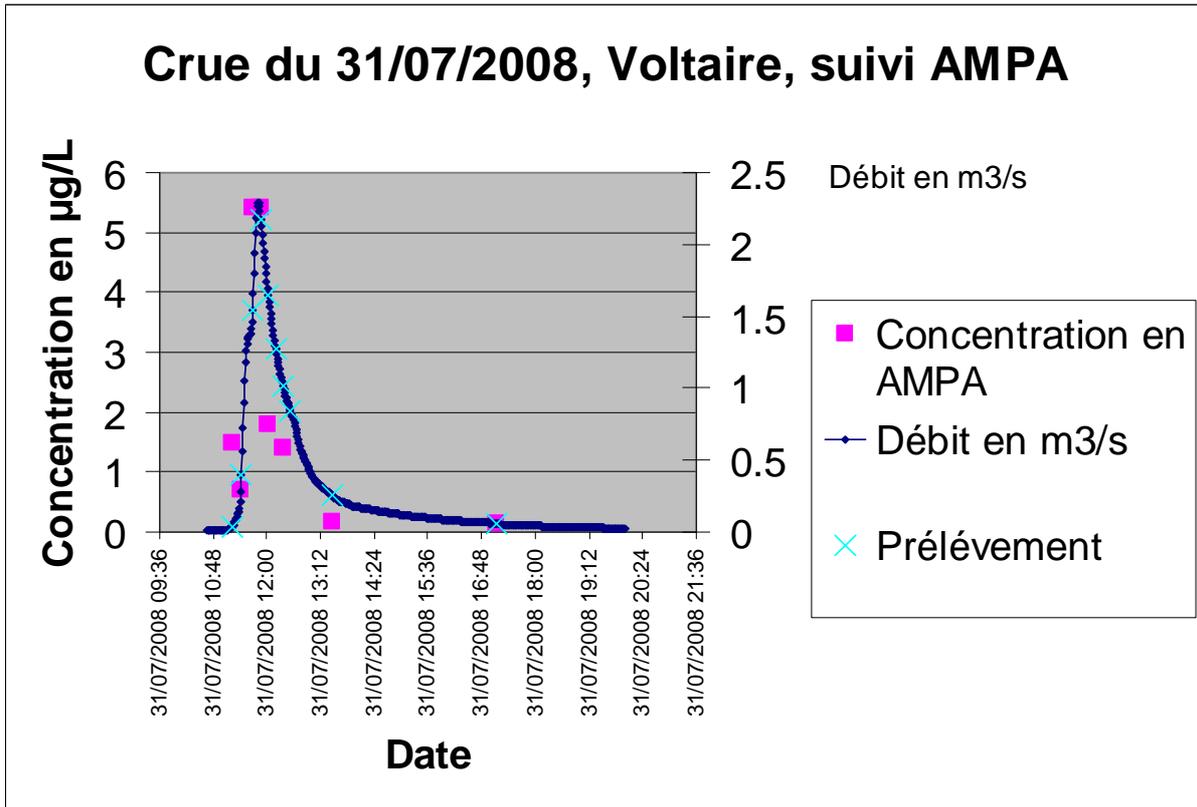
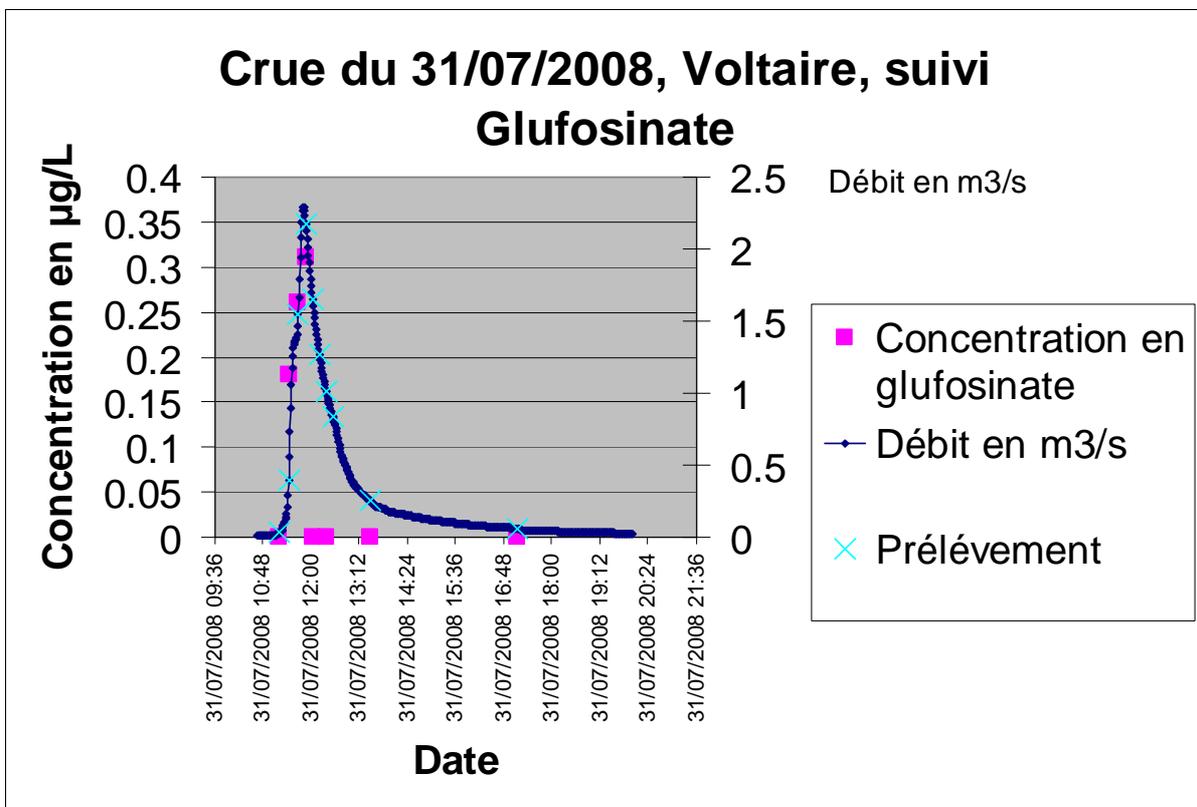


Figure 37 : Concentration en AMPA, station Voltaire, crue du 31/07/2008



(*) Le débit de pointe est un débit estimé en raison des sauts de mesure (voir paragraphe 252)

Figure 38 : Concentration en glufosinate, station Voltaire, crue du 31/07/2008

Une analyse de l'eau brute fut faite la veille de la crue ; elle a révélé une absence de Glyphosate et de Glufosinate, mais une concentration d'AMPA de 0,51 µg/l.

Les figures 36, 37 et 38 révèlent des lessivages pour les trois substances, mais chaque molécule présente un comportement différent tout au long de l'épisode. Le pic de pollution d'AMPA semble anticiper le pic de crue. La variabilité des valeurs d'analyse en laboratoire peu expliquer ces différences. Toutefois, un protocole de suivi spécifique à chaque molécule devrait être poursuivi.

Les calculs analogues à ceux produits pour le Diuron et le 2,4D sur Gashette sont effectués. Ils conduisent aux résultats suivants :

Crue du 31/07/2008 - Voltaire

Suivi en crue 02 et 03/07/2008

(Suivi en crue peu avant)	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Glufosinate (µg/L)
02/07/2008	0.00	0.00	0.00
03/07/2008	0.00	0.10	0.00

Suivi mensuel (--- signifie qu'aucune analyse n'a été faite, 0.00 est un résultat d'analyse).

	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Glufosinate (µg/L)
(Etiage avant crue) 10/07/2008	---	0.69	---
(Etiage après crue) 11/08/2009	---	0.27	---
Moyenne suivi mensuel	---	0.69 (sur 7 mois)	---

Crue

Date	Heure	Q (m3/s)	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Glufosinate (µg/L)
Avant montée de crue du 31/07/2008					
30/07/2008	16h30		0.00	0.51	0.00
Montée de crue					
31/07/2008	11h13		0.30	1.50	0.00
31/07/2008	11h26		0.18	0.71	0.18
Moyennes :			0.24	1.10	0.09
Décru					
31/07/2008	11h41		0.59	5.40	0.26
31/07/2008	11h52		0.91	5.40	0.31
31/07/2008	12h02		0.47	1.80	0.00
31/07/2008	12h22		0.31	1.40	0.00
31/07/2008	13h28		0.23	0.17	0.00
31/07/2008	17h08		0.00	0.14	0.00
Moyennes :			0.42	2.38	0.09

On retiendra **0,69 µg/l**, la valeur en suivi mensuel, comme référence pour l'AMPA

Coefficients multiplicateurs

En montée de crue	---	$1.10/0.69 = \mathbf{1.60}$	---
En décrue	---	$2.38/0.69 = \mathbf{3.46}$	---
Crue totale	---	$2.06/0.69 = \mathbf{2.99}$	---

Tableau 13 – Coefficients de lessivage – Voltaire le 31/07/2008

Le résultat de notre troisième investigation peut être formulé ainsi : Au mois de juillet sur le versant de la rivière Voltaire, une surface de 66,50 ha ayant été intégrée au point de mesure, une averse d'intensité 8,80 mm/h pour 35,8 mm de pluie a provoqué un lessivage ayant multiplié par trois à cinq la concentration du cours d'eau en AMPA pendant 10 heures environ.

Plusieurs commentaires :

- Si nous n'avons pas de valeur de référence pour le Glyphosate, il n'en demeure pas moins que les analyses réalisées pendant la crue du 31/07/2008 démontrent un lessivage.

- Il n'est pas toujours possible de détecter le Glyphosate à l'étiage. De même, les analyses-test réalisées en 2007 auraient plutôt évoqué une dilution en crue. Il n'est pas exclu que les deux phénomènes coexistent : Lessivage peu de temps après une application du produit, et dilution de la fraction du produit installée dans la nappe, essentiellement l'AMPA. Si bien qu'en l'absence d'application, les crues ont plutôt tendance à diluer la pollution chronique.

- Dans chacun de ces calculs, nous avons eu le souci de maximiser la valeur de référence en pollution chronique pour minimiser le facteur multiplicatif et éviter de tomber dans « l'interprétation catastrophe ». Il nous faut en réalité retenir les ordres de grandeur du facteur multiplicatif de la concentration en cours d'eau : 3 à 5 pour un produit utilisé en habitat diffus, 10 à 15 pour un produit utilisé en zone agricole, ceci sur la durée de la crue.

Le pic du 31 juillet 2008 est en réalité une partie seulement d'un événement de crue qui commence le 30 juillet 2008 et dure, sur Gashette **1 jour 9 heures** sur le critère de dépassement d'un débit de 4 L/s, sur Voltaire **1 jour 20 heures** au dessus de 6 L/s. En réalité, 6 averses précèdent celle qui va déclencher le pic mesuré. Nous donnons la chronique de ces averses sur Voltaire :

Debut de l'averse	Fin de l'averse	Durée de l'averse	Pluie (mm)	Intensité (mm/h)	Pic de pluie (mm enregistrés en 1 minute)	Temps sec strict avant l'averse
29/07/2008 21:24	29/07/2008 21:30	0 h 7 mn	2,2	18,86	0,6	1 j 3 h 7 mn
30/07/2008 00:08	30/07/2008 00:30	0 h 23 mn	2,8	7,30	0,4	2 h 38 mn
30/07/2008 07:12	30/07/2008 07:54	0 h 43 mn	7	9,77	1	6 h 42 mn
30/07/2008 09:06	30/07/2008 09:47	0 h 42 mn	1,8	2,57	0,8	1 h 12 mn
30/07/2008 13:30	30/07/2008 16:39	3 h 10 mn	12,8	4,04	1,6	3 h 43 mn
31/07/2008 00:36	31/07/2008 01:53	1 h 18 mn	5	3,85	1	7 h 57 mn
31/07/2008 08:18	31/07/2008 12:22	4 h 5 mn	35,8	8,77	1,8	6 h 25 mn

(* Nous avons imprimé en bleu l'averse qui déclenche le pic mesuré.

Tableau 14 – Chronique des averses – Voltaire les 30 et 31/07/2008

Les intensités suggèrent des lessivages préalables, mais ils ne sont pas démontrés, c'est pourquoi, nous examinons la chronique des flashes qui surviennent dans la même période.

Nous avons dénombré 13 pics, ou flashes, dans la rivière voltaire dont nous donnons la chronique :

Debut	Débit d'entrée dans le flash (L/s)	Durée du flash (mn)	Amplitude du flash (L/s)	Intensité du flash (L/s/mn)	Flux d'eau entre le début d'accélération et le pic (m3)
30/07/2008 09:21	2,99	0 h 10 mn	3,25	0,33	3,07
30/07/2008 10:52	4,82	0 h 2 mn	0,12	0,06	0,59
30/07/2008 10:58	5,35	0 h 3 mn	0,20	0,07	0,98
30/07/2008 15:08	5,57	0 h 8 mn	0,94	0,12	2,90
30/07/2008 16:33	6,58	0 h 13 mn	3,03	0,23	6,19
30/07/2008 16:49	9,70	0 h 12 mn	5,56	0,46	8,95
30/07/2008 17:21	11,95	0 h 20 mn	30,35	1,52	34,10
30/07/2008 18:37	22,50	0 h 14 mn	14,34	1,02	25,24
31/07/2008 01:53	6,99	0 h 15 mn	3,81	0,25	7,88
31/07/2008 03:57	7,57	0 h 15 mn	6,37	0,42	9,78
31/07/2008 04:54	11,29	0 h 5 mn	0,47	0,09	3,46
31/07/2008 06:02	9,02	0 h 15 mn	6,73	0,45	11,29
31/07/2008 08:35	9,98	0 h 20 mn	3,14	0,16	14,05
31/07/2008 10:48	8,69	0 h 47 mn	2 196,61	46,74	915,24

(*) Nous avons noté en bleu le pic mesuré.

Le débit de pointe estimé à 2,205 m3/s est enregistré à 11 h 34

Tableau 14 – Chronique des flashes – Voltaire les 30 et 31/07/2008

Nous remarquons, que si les 13 flashes qui précèdent le pic enregistré sont de durées et d'intensités moindres, ils décrivent des accélérations du débit qui cumulent **152 minutes**, soit **plus de trois fois** la durée du flash mesuré qui est **47 minutes**.

En formulant l'hypothèse probable mais non vérifiée, que ces accélérations spectaculaires du débit correspondent à des phases de ruissellement intense à la surface du bassin versant, nous touchons la limite du concept de crue pour interpréter les lessivages en fonction des événements enregistrés dans les cours d'eau sur nos petits versants.

Malheureusement, le pas de temps de la station Gashette (5 minutes) ne nous a pas permis de mesurer les flashes en ce point, et nous comprenons d'autant mieux l'intérêt d'associer la mesure des accélérations du débit avec l'utilisation de stations au pas de temps de la minute. Toutefois, nous pouvons facilement admettre l'analogie des phénomènes sur Gashette à partir des averses et des crues enregistrées.

Une limite à l'interprétation fine des concentrations demeure la méconnaissance de la **distribution spatiale des pluies**, car il serait utile de pouvoir associer (1) zone de traitement, (2) zone d'averse, (3) zone de ruissellement, (4) accélération du débit et (5) concentration en pesticide retrouvée dans le cours d'eau, pour **caractériser les lessivages qui ont été démontrés par les pics de pollution.**

L'infiltrabilité du sol est un facteur qui limite le ruissellement et le lessivage. Nous savons qu'elle est importante sur les sols de la Martinique, mais dépend de nombreux facteurs d'usage (couvert végétal, travail du sol, aménagements), et aussi de facteurs chroniques (niveau de la nappe, humidité du sol et conductivité hydraulique). Nous ne l'avons pas appréhendée dans notre étude, mais la cartographie de l'infiltrabilité des surfaces dans notre zone d'action serait un élément d'interprétation utile des accélérations de débit mesurées.

L'installation en série des stations de Mansarde amont et aval, espacées de 200 mètres, et les différentiels de débits enregistrés en évènement de crue illustrent la forte infiltrabilité des sols :



Figure 39 : Illustration des décalages Mansarde amont-Mansarde aval. Suivi des hauteurs d'eau Evènements pluvieux du 01-02/02/08. Données Cemagref, UR Aema, traitées avec le logiciel DP de la DIREN Champagne-Ardennes.

3323 Lessivage en zone bananière – Mansarde aval

Sur Mansarde aval, les analyses de l'Oxamyl se sont révélées négatives. Or, l'application a eu lieu le 20 juillet 2008 et les deux crues analysées correspondent aux premières pluies après épandage.

Nous ne possédons pas d'interprétation certaine, mais il nous faut noter que l'extraction (phase préliminaire de l'analyse) a eu lieu tardivement (octobre 2008) et nous n'avons trouvé aucune étude relative à la conservation de cette molécule. Nous pouvons formuler l'hypothèse d'une dégradation de la molécule dans l'échantillon avant analyse.

333 Limites du protocole : distributions spatiales

3331 Distribution spatiale des pluies

Jusqu'à présent, nous nous sommes peu intéressés à la relation entre la pluie et le débit, à cela deux raisons principales :

En premier lieu, nous nous sommes aperçu qu'à partir des mesures de la pluie au seul emplacement de l'exutoire, nous ne pouvons pas systématiquement mettre en relation les pluies et les débits enregistrés. Cela apparaît sur Voltaire lorsque nous calculons les coefficients d'écoulement en faisant l'hypothèse de la répartition uniforme de la pluie sur les 66,5 ha intégrés par le point de mesure :

* 47 coefficients calculés sur 144 crues enregistrées sont supérieurs à 1. Dans ce cas, il pleut ailleurs qu'au point de mesure mais à l'intérieur de l'impluvium.

* 41 coefficients sont proches de zéro. Dans ce cas, les 66,50 ha du bassin versant n'ont pas été uniformément arrosés et la pluie enregistrée à l'exutoire y est très localisée.

* Les 56 autres coefficients couvrent toute l'échelle des possibles entre 0,1 et 0,9.

La répartition spatiale de la pluie n'a pas été appréhendée par notre protocole et le calcul des coefficients d'écoulement révèle l'insuffisance de notre mesure des pluies ; même si, paradoxalement, les trois points de mesure enregistrent des données qui se ressemblent en cumuls mensuels et pour les grosses averses.

En second lieu, les analyses que nous avons produites jusqu'à présent ne font pas directement appel à la relation entre les pluies et les débits :

* En valeurs mensuelles, les cumuls de pluie suffisent à expliquer les variations des concentrations retrouvées en cours d'eau. (paragraphe 32).

* L'analyse de la relation entre les concentrations et les débits pour évaluer les lessivages a pu être conduite sans faire appel aux événements pluvieux (paragraphe 33), même s'il a été intéressant de connaître les averses pour consolider les résultats.

* De la même manière, l'évaluation annuelle des flux reposera essentiellement sur les mesures des événements du cours d'eau sans faire appel aux fonctions de transformation pluie/débit (paragraphe 34).

En réalité, la transformation pluie/débit serait cruciale si nous devions appréhender le cycle de l'eau faisant intervenir le sol, ses états et ses comportements, les ruissellements, le fonctionnement des nappes souterraines, et l'évapotranspiration. Mais nous avons porté notre attention sur un élément du cycle : le réseau hydrographique de surface, comme vecteur principal des substances transférées.

Nous retiendrons que les insuffisances de notre protocole pour connaître la distribution spatiale des averses ne sont pas bloquantes pour atteindre les objectifs de la présente étude : valider les protocoles d'évaluation des pollutions du réseau hydrographique.

3331 Distribution spatiale de l’Infiltrabilité des surfaces

Vouloir appréhender les phénomènes de lessivage et de transfert par le réseau hydrographique en ignorant les comportements des sols (que nous étendons à la notion de surfaces pour englober l’habitat diffus) ne semble pas raisonnable. Dans le même temps, il est nécessaire de limiter les objectifs pour les atteindre effectivement.

Revenons sur l’interprétation de la figure 39, les faits observés sont les suivants :

- Les crues se déclenchent plus fréquemment en amont qu’en aval.
- Le débit de pointe mesuré en amont est généralement plus important que celui mesuré en aval,
- enfin les pics de crue sont plus précoces en amont qu’en aval ; cela revient à dire que le temps de concentration est plus court en amont qu’en aval.

Quatre facteurs possibles :

- L’altitude supérieure de la station amont expliquerait la séquence des pluies à l’avantage de l’amont, mais cette hypothèse d’école est peu probable.
- En début de saison humide, la ravine est à sec et de nombreuses vasques doivent être remplies avant qu’un débit d’été s’établisse en aval ; des observations à l’aide d’un piezomètre ont effectivement montré l’existence d’une nappe perchée en saison des pluies.
- Les surfaces imperméabilisées, toits de maison et voies de circulation placées en amont de la station, génèrent un flux spécifique. Effectivement, la station est située à l’exutoire d’un lotissement.
- Sur les 200 mètres qui séparent les deux stations, essentiellement des sols agricoles occupés par des bananeraies, l’eau est diversement canalisée ou s’infiltré fortement.

Les trois dernières hypothèses se conjuguent pour expliquer les faits observés et contredire l’intuition selon laquelle la surface intégrée par le point aval (3,70 ha) génèrerait des débits supérieurs à la surface intégrée par le point amont (1,25 ha).

Dans cette situation, la prévision des lessivages de surface se révèle difficile en aval. Ainsi, nos stations sur Mansarde mettent en évidence les difficultés à prévoir les écoulements à des échelles fines (grandes échelles). Cela amène les questions de recherche suivantes :

- Quelles sont les échelles spatio-temporelles à partir desquelles les écoulements et les concentrations mesurées en cours d'eau peuvent être corrélés à une aire ?
- Dans une approche territoriale, faudrait-il mieux procéder à des mesures à petite échelle (caméra placée haut) puis désagréger la donnée ou bien faudrait-il mieux procéder à des mesures à grande échelle (caméra placée bas) puis agréger les données ?
- Pour quels objectifs scientifiques ? Pour quels objectifs de gestion ?

Pour l’heure, nous avançons dans notre approche quantitative des pollutions diffuses à la grande échelle de nos petits bassins versants et abordons la difficile question des flux annuels de matières actives au paragraphe 34.

34 Analyses évènementielles, évaluation des flux annuels de pesticides et facteur d'échelle

Nos évaluations des flux de pesticide reposent d'une part sur une estimation des relations Concentration/Débit et d'autre part sur la répartition des flux d'eau en classes d'évènement.

Dans ce paragraphe, Nous examinons trois distributions en classes d'évènement :

- Classes de **débit instantané**,
- Classes d'**évènement de crue**,
- Classes d'**évènement de flash**.

C'est la raison pour laquelle il nous faudra démarrer par une discussion sur les concepts évènementiels : débit instantané, crue et flash (paragraphe 341). Nous examinerons ensuite les classes de débits (342), puis nous ajusterons plusieurs relations Concentration/Débit (paragraphe 343), enfin nous procéderons à une évaluation fondée sur les chroniques évènementielles, crues et flashes (paragraphe 344).

341 Quelques définitions (suite du paragraphe 331)

Le débit instantané est tout simplement le débit mesuré par la sonde et la station de mesure, puis calculé avec la courbe de tarage. La série des débits instantanés est caractérisée par son pas de temps, 1 minute pour Voltaire et les deux stations Mansarde, 5 minutes pour Gashette.

La représentation de la crue comme un simple mécanisme d'action (pluie) et de réaction (débit) est normative. Certaines crues répondent à ce schéma, mais il serait faux de réduire la chronique des évènements du cours d'eau à des enchaînements aussi idéaux. Nous donnons à titre d'exemple la chronique des pluies et des débits du 14 au 30 novembre 2007 à la station Mansarde aval. La relation pluie/débit n'y apparaît pas comme un simple jeu d'actions et de réactions.

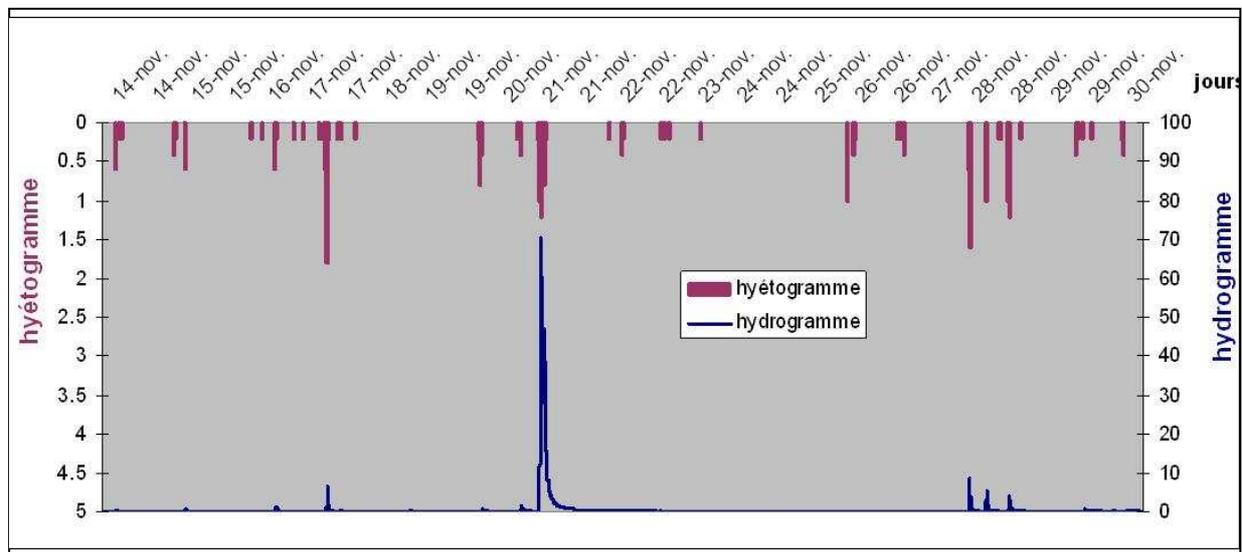


Figure 40 –Chronique pluie/débit du 14/11/2007 au 30/11/2007 – Mansarde aval

Par ailleurs, si le critère de la crue est un seuil de débit en entrée et en sortie, rien ne garantit qu'il n'y ait qu'un seul pic dans l'intervalle ainsi défini. Sur Voltaire par exemple, nous avons dénombré 653 pics répondant à la définition d'un flash pour 144 crues répondant à un seuil égal à 2 fois le débit de base ($2 \times 3\text{L/s} = 6 \text{L/s}$), ceci de septembre 2007 à octobre 2008. Cela amène plus de 4 pics par crue en moyenne. Dans cette situation, le débit de pointe

correspondant au pic le plus fort, mais non nécessairement en entrée de crue, ne garantit pas une courbe aussi parfaite que celle présentée en figure 30. De plus, dans une analyse classique de crue, les pics secondaires sont lissés et perdent une partie de l'information précieuse qu'ils contiennent. Dans d'autres situations, l'hydrologue « interprète », c'est-à-dire qu'il ne tient plus compte du critère de débit pour ne retenir qu'un seul pic précédé de sa montée et suivi de sa décrue redessinée, chronique qui au final ne répond plus à la définition d'une crue et perd sa norme d'interprétation.

La chronique des flashs inverse le point de vue qui structure les événements du cours d'eau. Cela signifie qu'elle lit les événements du cours d'eau à partir des pics, caractérisés par une forte accélération, et non plus à partir des élévations du niveau d'eau correspondant à un seuil de débit.

Nous opérons cette inversion pour étudier l'hypothèse d'une relation directe des flashs avec le ruissellement à la surface du bassin versant, facteur premier des lessivages qui nous intéressent. Mais sans doute, faudra-t-il trouver une représentation globale qui rende mieux compte des débits et de leurs accélérations dans une seule et même chronique des événements du cours d'eau. Nous entrons là dans le champ de la modélisation qui sort du cadre de notre étude.

Ces considérations nous amènent donc à définir deux structures événementielles du cours d'eau, l'une fondée sur le concept de **crue** associé au critère de **débit**, et l'autre fondée sur le concept de **flash** associé au critère d'**accélération du débit**.

La question de recherche qui en découle est la suivante : la mesure des accélérations du débit dans un cours d'eau est-elle pertinente pour caractériser les lessivages associés au ruissellement sur un bassin versant dont la surface est de l'ordre du km² ?

La caractérisation des flashs est approfondie dans le rapport de l'étude conjointe « *Caractérisation du transport solide en ravine et cours d'eau permanent* ».

342 Classes de débits instantanés

Cette analyse repose sur l'hypothèse d'une relation fonctionnelle entre débit instantané et concentration pour un produit déterminé. Nous examinons les classes de débits de Voltaire, tous événements confondus :

Classes de débit instantané	Temps cumulé	% temps cumulé	Flux (m ³)	% Flux
< 1 Qb (3 L/s)	202 j 2 h 15 mn	55.37%	51 585	18.28%
1 Qb (3 L/s) à 2 Qb (6 L/s)	109 j 23 h 54 mn	30.05%	44 698	15.84%
2 Qb (6 L/s) à 3 Qb (9 L/s)	26 j 14 h 18 mn	7.27%	15 818	5.61%
3 Qb (9 L/s) à 4 Qb (12 L/s)	4 j 14 h 24 mn	1.26%	4 134	1.47%
4 Qb (12 L/s) à 5 Qb (15 L/s)	3 j 3 h 46 mn	0.86%	3 650	1.29%
5 Qb (12 L/s) à 10 Qb (30 L/s)	8 j 12 h 49 mn	2.33%	15 581	5.52%
10 Qb (30 L/s) à 100 Qb (300 L/s)	9 j 0 h 6 mn	2.46%	64 099	22.72%
100 Qb (300 L/s) à 1000 Qb (3000 L/s)	23 h 54 mn	0.27%	75 536	26.77%
1000 Qb (3000 L/s) à 2000 Qb (6000 L/s)	0 h 34 mn	0.01%	7 063	2.50%
> 2000 Qb	0	0	0	0

Tableaux 15 - Classes de débit instantané, octobre 2007 à septembre 2008 – station Voltaire

Qb représente le débit de base. Les bornes des classes sont proportionnelles au débit de base et notées ainsi : « 1 Qb à 2 Qb » signifie « de 1 fois à 2 fois le débit de base ».

Représentation des classes de débits en proportion des temps cumulés sur 12 mois (*)

Classes de débits	Gashette	Voltaire	M.Aval	M.Amont
< 1 Qb	52.36%	55.37%	98.07%	95.32%
1 Qb à 2 Qb	33.89%	30.05%	0.84%	2.97%
2 Qb à 3 Qb	7.16%	7.27%	0.34%	0.69%
3 Qb à 4 Qb	1.47%	1.26%	0.20%	0.31%
4 Qb à 5 Qb	0.00%	0.86%	0.00%	0.00%
5 Qb à 10 Qb	2.03%	2.33%	0.30%	0.36%
10 Qb à 100 Qb	2.56%	2.46%	0.25%	0.33%
100 Qb à 1000 Qb	0.48%	0.27%	0.01%	0.01%
1000 Qb à 2000 Qb	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%
> 2000 Qb	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%

Représentation des classes de débits en proportion des flux d'eau sur 12 mois(*)

Classes de débits	Gashette	Voltaire	M.Aval	M.Amont
< 1 Qb	12.47%	18.28%	35.56%	46.99%
1 Qb à 2 Qb	11.59%	15.84%	5.99%	11.08%
2 Qb à 3 Qb	4.34%	5.61%	4.22%	4.83%
3 Qb à 4 Qb	1.28%	1.47%	3.47%	3.04%
4 Qb à 5 Qb	0.00%	1.29%	0.00%	0.00%
5 Qb à 10 Qb	3.60%	5.52%	10.65%	7.11%
10 Qb à 100 Qb	18.42%	22.72%	35.16%	22.89%
100 Qb à 1000 Qb	30.05%	26.77%	4.94%	4.06%
1000 Qb à 2000 Qb	11.78%	2.50%	0.00%	0.00%
> 2000 Qb	6.47%	0.00%	0.00%	0.00%

Représentation des classes de débits en fonction des temps cumulés sur 12 mois(*)

Durée d'écoulement (366 jours)	Gashette	Voltaire	M.Aval	M.Amont
< 1 Qb	191 j 8 h 20 mn	202 j 2 h 15 mn	358 j 22 h 45	289 j 18 h 34
1 Qb à 2 Qb	123 j 19 h 50 mn	109 j 23 h 54 mn	3 j 1 h 23 mn	9 j 0 h 35 mn
2 Qb à 3 Qb	26 j 4 h 5 mn	26 j 14 h 18 mn	1 j 5 h 57 mn	2 j 2 h 41 mn
3 Qb à 4 Qb	5 j 9 h 15 mn	4 j 14 h 24 mn	17 h 17 mn	22 h 35 mn
4 Qb à 5 Qb	---	3 j 3 h 46 mn	---	---
5 Qb à 10 Qb	7 j 10 h 20 mn	8 j 12 h 49 mn	1 j 2 h 5 mn	1 j 2 h 11 mn
10 Qb à 100 Qb	9 j 8 h 40 mn	9 j 0 h 6 mn	21 h 52 mn	23 h 58 mn
100 Qb à 1000 Qb	1 j 17 h 40 mn	23 h 54 mn	0 h 41 mn	0 h 55 mn
1000 Qb à 2000 Qb	3 h 5 mn	0 h 34 mn	---	---
> 2000 Qb	0 h 50 mn	---	---	---

Représentation des classes de débits en fonction des flux d'eau (m3) sur 12 mois(*)

Flux d'eau (m3) sur 12 mois	Gashette	Voltaire	M.Aval	M.Amont
< 1 Qb	6 229	51 585	1 111	2 171
1 Qb à 2 Qb	5 793	44 698	187	512
2 Qb à 3 Qb	2 170	15 818	132	223
3 Qb à 4 Qb	640	4 134	108	140
4 Qb à 5 Qb	-	3 650	-	-
5 Qb à 10 Qb	1 796	15 581	333	328
10 Qb à 100 Qb	9 201	64 099	1 099	1 057
100 Qb à 1000 Qb	15 013	75 536	154	188
1000 Qb à 2000 Qb	5 883	7 063	-	-
> 2000 Qb	3 234	-	-	-
Totaux (m3) :	49 959	282 164	3 125	4 619

(*) 12 mois. Voltaire et Mansarde : octobre 2007 à septembre 2008 – Gashette : avril 2007 à mars 2008

Tableau 16 – Présentation comparée des classes de débits – Gashette, Voltaire et Mansarde

Le tableau 15 a pour objectif de familiariser le lecteur avec les données. Il fait ressortir une tendance générale à tous les cours d'eau :

- **En flux**, deux ensembles de classes se distinguent : débits inférieurs à 3 Qb, d'une part, et 5 à 1000 Qb d'autre part, séparés par une classe intermédiaire moins représentée. Cela confirme la pertinence de la distinction entre « En crue » et « Hors crue » pour une première estimation des flux de matière active. Cependant la classe 2 à 3 Qb n'est pas négligeable en flux d'eau sur Voltaire et Gashette.

- **En temps cumulé**, la grande majorité des débits survient en dessous de 2 Qb pour les trois cours d'eau, 85 à 99 %, si nous nous référons aux deux premières lignes du tableau 16.

L'examen conjoint des deux premières parties du tableau 16 fait ressortir les ressemblances et les différences selon les structures de flux et selon les structures de temps cumulé. **Mansarde se distingue nettement des deux autres cours d'eau en valeurs annuelles**. Toutefois, la deuxième partie du tableau 16 montre qu'en opérant un regroupement des classes (<1 à 3 Qb) et (5 à 1000 Qb), les trois cours d'eau répondent à la même distribution des classes de débits en proportion des flux.

La faible représentation des forts débits en temps cumulé ne doit pas faire ignorer la fréquence des événements qui génèrent du lessivage. Sur les mêmes 12 mois, Voltaire connaît 483 flashes répartis sur l'année. Le lecteur pourra se reporter aux documents du « *recueil des données* » intitulés « *Chronique sur 12 mois* » pour davantage de détails.

Cette classification des débits a l'inconvénient d'ignorer la nature essentiellement événementielle des pollutions ; mais elle a l'avantage de reposer sur un grand nombre de mesures, relativement à notre base de données qui demeure limitée à deux campagnes d'analyse (2007 et 2008).

Ainsi, nous attirons l'attention sur le mois d'octobre 2008 qui a lui tout seul a généré un flux d'eau de 185 809 m³ sur Voltaire, soit les 2/3 du flux total des 12 mois qui ont précédé (282 165 m³ d'octobre 2007 à septembre 2008). Cette observation relativise la signification de nos données et nous encourage aux analyses comparatives, plutôt qu'aux affirmations brutales fondées sur une ou deux années d'observation seulement.

Enfin, nous avons calculé la différence de flux d'eau généré selon les deux classifications :

$$\text{Flux(Hors crue / En crue)} - \text{Flux(Inférieur à 2 Qb / Supérieur ou égal à 2 Qb)}$$

Nous obtenons les écarts suivants :

Sur voltaire : 1290 m³ = 0,46 % du flux annuel
 Sur Mansarde aval : 104 m³ = 3,32 % du flux annuel
 Sur Mansarde amont : 236 m³ = 5,10 % du flux annuel
 Sur Gashette : 3 358 m³ = 6,72 % du flux annuel

Ces écarts proviennent du fait qu'une crue peut intégrer des débits inférieurs à 2 Qb s'ils surviennent sur une durée inférieure à une heure entre deux dépassements de 2 Qb

Les écarts sont significatifs, mais suffisamment faibles pour confirmer la pertinence de l'approche événementielle pour une première évaluation annuelle des flux de pesticides. Aussi, nous nous reposerons sur la répartition des flux en classes d'évènement pour entreprendre nos estimations.

343 Relation concentration / débit

3431 Présentation des hypothèses de travail

Dans ce paragraphe, nous valorisons les mesures conjointes des débits et des concentrations en pesticides pour tenter de construire des relations fonctionnelles.

Nous avons déjà souligné les incertitudes sur les données et nos calculs prendront parfois l'allure d'un exercice d'école. Nous rappelons que les valeurs estimées n'ont pas de signification propre, mais n'acquièrent une signification que par comparaison, à condition d'avoir su limiter l'ambition de nos objectifs : obtenir des ordres de grandeur.

Il est aisé à l'aide d'un logiciel standard et d'un nombre limité de données d'obtenir des régressions savantes avec un r^2 proche de 1. Ce type d'exercice n'a pas d'intérêt ici, car nous recherchons des relations suffisamment génériques pour être appliquées à une chronique annuelle d'évènements et non une corrélation artificiellement bonne sur une seule occurrence de crue.

Nous retenons une hypothèse présentée avec l'état de l'art (paragraphe 12) : Les relations recherchées en crue sont du type : $C = b \times Q^a$, avec C la concentration et Q le débit, a et b deux coefficients, ou de la forme $C = e^{(a \times Q + b)}$ dans le cas des flashes.

Nous retenons la structure événementielle suivante :

- L'étiage en saison sèche
- L'étiage en saison des pluies
- La montée de crue bornée par le pic.
- La décrue

- Les flashes sont estimés individuellement, puis les flux correspondants sont distingués.

Les points de mesure retenus pour produire la régression sont ceux correspondant aux pics. Toutefois, pour tenir compte de l'hétérogénéité de la masse d'eau qui se traduit par la désynchronisation des pics de crue et de pollution, nous estimons un partage des données en tenant compte du pic de pollution, sachant qu'à chaque fois, il a été observé dans l'environnement du pic de crue.

Ces estimations amènent trois régressions par situation. Nous analysons deux situations directement : Le Diuron sur Gashette et l'AMPA sur Voltaire. Puis nous étudions prudemment la possibilité de prolonger les résultats de Voltaire sur Mansarde.

3432 Jeux de données et régressions pour le Diuron sur Gashette

Les jeux de données du suivi mensuel sont présentés en annexe 5. Nous ne reprenons ici que les suivis en crue pour expliciter la répartition qui en est faite selon les évènements.

Crue du 31/07/2008

Date	Heure	Débit en m3/s		Diuron (en µg/L)	2,4D (en µg/L)
Montée de crue hors flash					
31/07/2008	10h55	0.045		3.50	0.00
31/07/2008	11h08	0.152		0.86	0.09
Montée de crue en flash					
31/07/2008	11h23	0.869		19.21	2.30
31/07/2008	11h30	2.049		13.40	0.00
Décru					
31/07/2008	11h48	1.638		2.80	0.05
31/07/2008	12h00	1.092		19.40	11.90
31/07/2008	13h39	0.124		1.60	0.00
31/07/2008	17h21	0.023		0.21	1.50

Crue du 19/09/2009

Date	Heure	Débit en m3/s		Diuron (en µg/L)	2,4D (en µg/L)
Montée de crue hors flash					
19/09/2008	9h12	0.035		2.70	0.05
19/09/2008	9h26	0.115		8.50	0.05
Montée de crue en flash					
19/09/2008	9h31	1.060		42.10	0.10
19/09/2008	9h40	2.800		35.80	0.11
19/09/2008	9h58	5.131		21.70	0.40
Décru					
19/09/2008	10h06	4.712		2.47	0.15
19/09/2008	10h24	1.587		8.60	0.20
19/09/2008	10h40	4.299		11.22	0.35
19/09/2008	10h49	5.970		8.83	0.42
19/09/2008	11h28	3.171		6,00	0.34
19/09/2008	11h52	0.831		5.80	0.25

Tableau 17 – Distribution des débits et des concentrations – Diuron, Gashette

Estimations et régressions (débit en m3/s)

Etiage, saison sèche : application de la moyenne du suivi mensuel en saison sèche : **0,27 µg/l**

Etiage, saison pluies : application de la moyenne du suivi mensuel correspondant : **0,83 µg/l**

Montée : [**Concentration = 14,08 x Débit^{0,53}**], $r^2 = 0,76$

Décru : [**Concentration = 4,61 x Débit^{0,36}**], $r^2 = 0,72$

Flash : [**Concentration = e^{1,38 x Débit - 0,21}**], $r^2 = 0,95$, Le domaine de validité de cette fonction est limité aux débits supérieurs à 2 m3/s. **Cela nous amène à ne pas pouvoir l'appliquer.**

Montée de crue – régression puissance : [Concentration = 14.08 x Débit^{0,53}], r² = 0,76

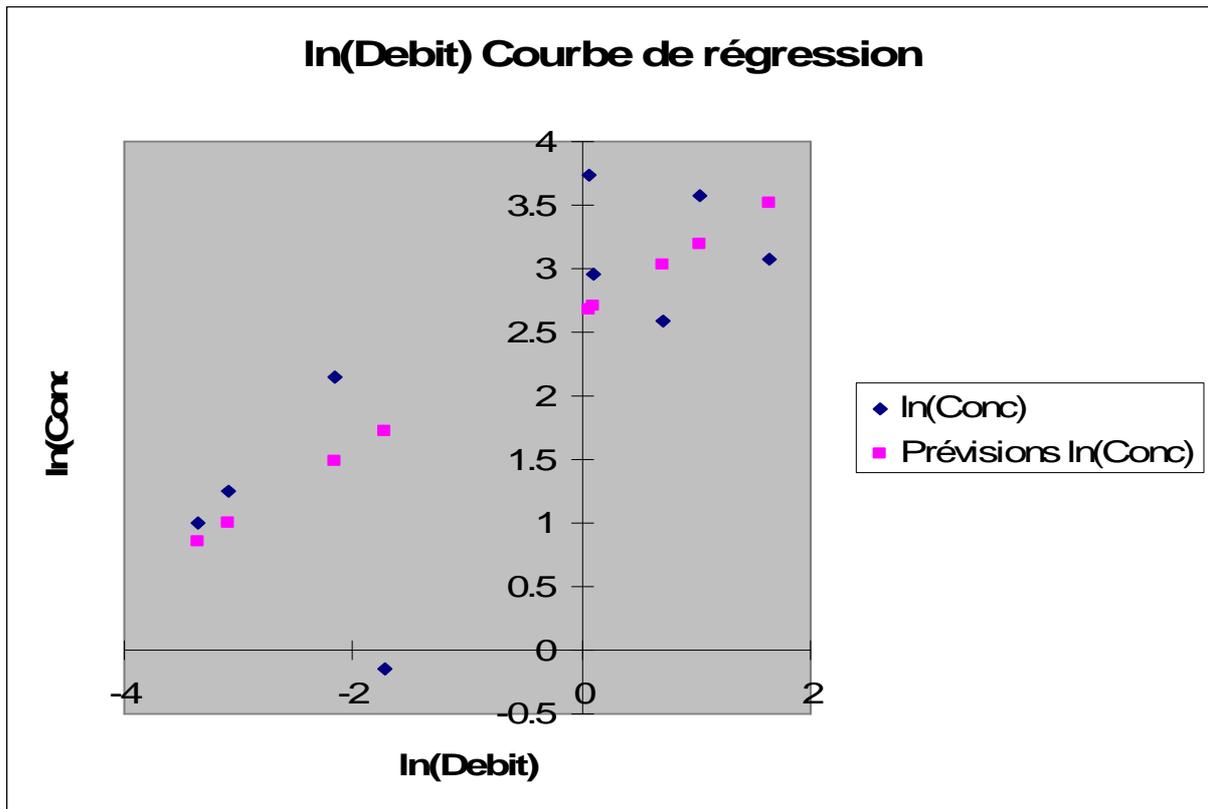


Figure 41 régression puissance concentration/débit, **montée de crue**, Diuron, Gashette

Décru – régression puissance : [Concentration = 4,61 x Débit^{0,36}], r² = 0,72

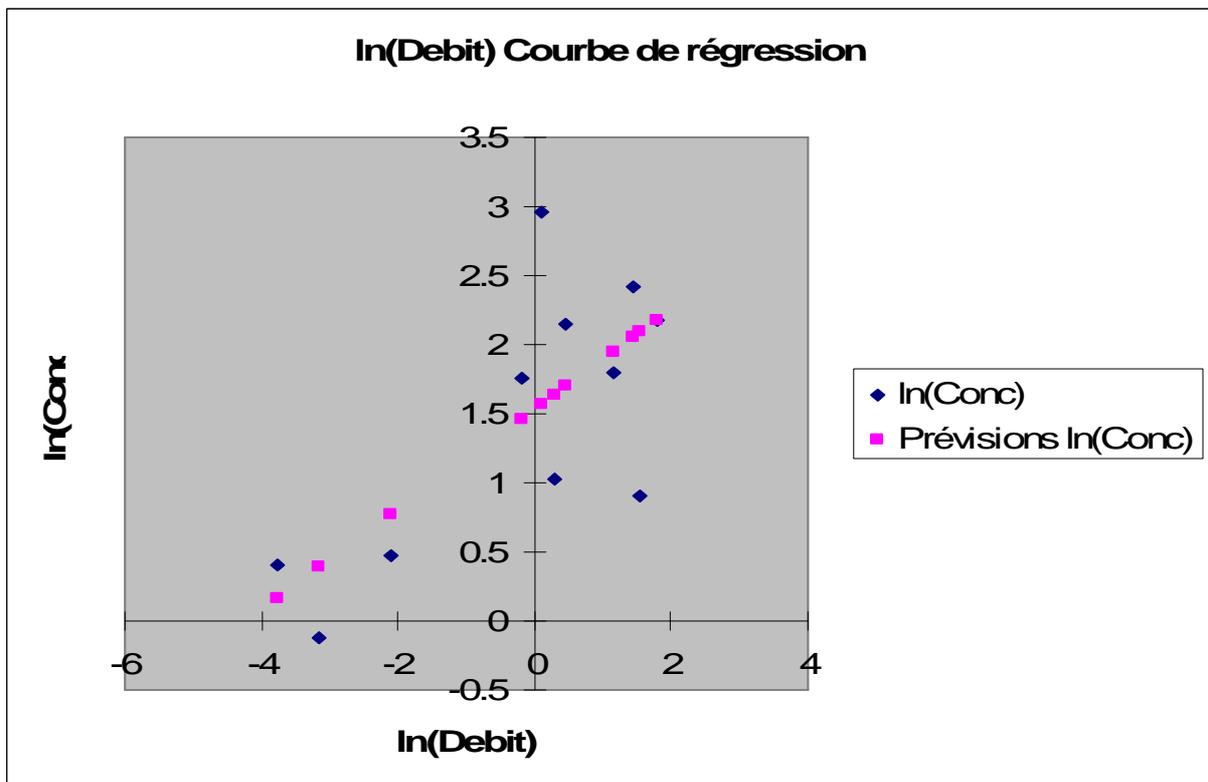


Figure 42 régression puissance concentration/débit, **décru**, Diuron, Gashette

Les régressions en montée et en décrue ont été produites sur un seul jeu de données issu de la compilation des deux crues. Les corrélations ne sont pas excellentes, mais la somme des résidus, toujours négative, montre que les fonctions ne surestiment pas en moyenne les concentrations calculées.

La distribution des deux maigres jeux de données dont nous disposons : 2 paires de valeurs pour le flash du 31/07/2008 et 3 paires de valeurs pour le flash du 19/09/2009 traduisent un démarrage de la dilution dans le pic de crue. Dans cette situation, la fonction exponentielle calculée ne peut être que décroissante, posant une vraie difficulté.

Ayant observé que les deux crues traduisent une graduation d'intensité, celle du 19/09/2009 étant plus importante, il nous a paru judicieux de moyenniser chacune des crues et de traduire la graduation par une fonction estimée à partir des deux paires de valeurs moyennes, en y adjoignant un troisième point bas correspondant à un étiage moyen. Toutefois, cette fonction sous-estime les concentrations pour les débits d'entrée de flash inférieurs à 2 m³/s.

Nous devons donc constater notre impuissance devant le faible nombre de mesures.

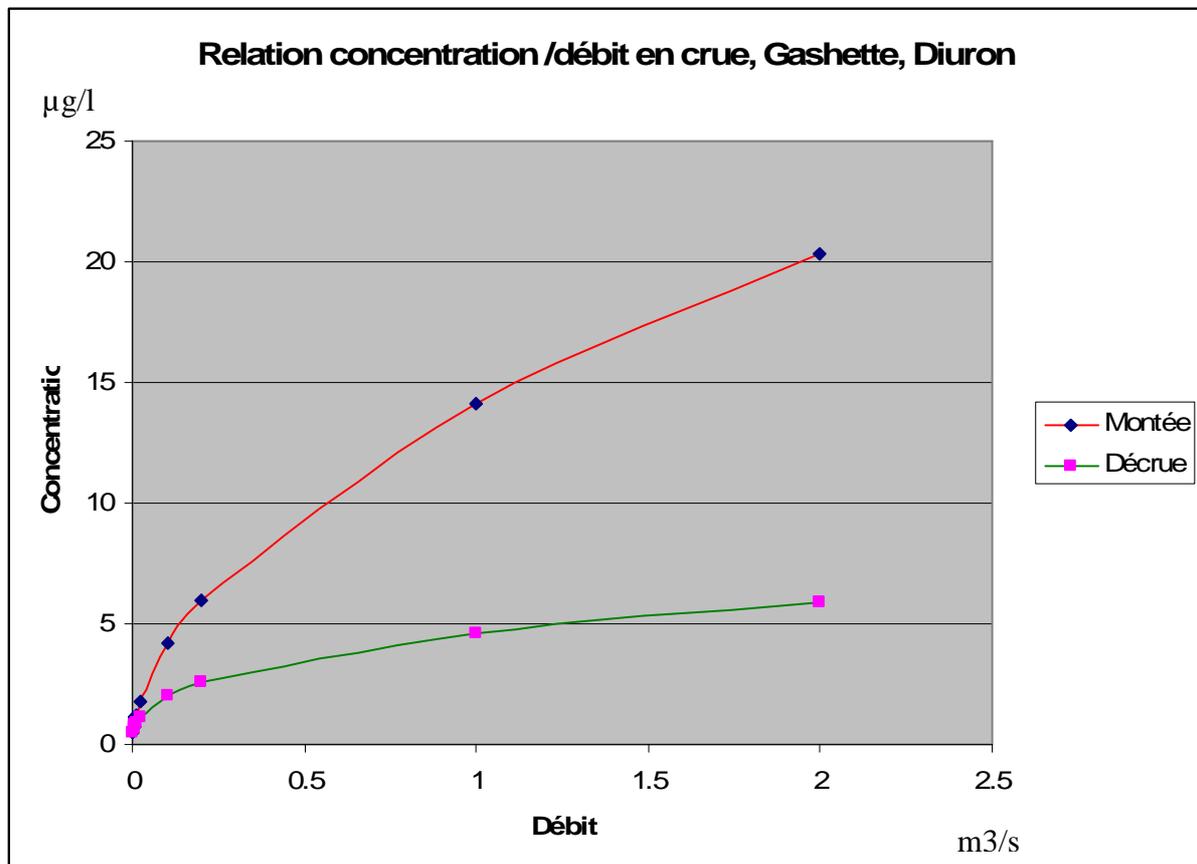


Figure 43 – Relation concentration / débit en crue, Gashette, Diuron

Les relations fonctionnelles reposent sur l'hypothèse de la variation continue de la concentration en fonction du débit en événement de crue, qui est simplement une hypothèse commode. Ces relations ignorent les péripéties qui peuvent se produire dans l'aire du bassin versant. Nous avons déjà souligné les incertitudes dont sont entachées nos estimations. Ces fonctions ont donc pour objet d'exécuter des simulations pour permettre des rapprochements avec d'autres observations, **mais en aucun cas de déterminer avec précision les quantités de matière active réellement transférées.**

3433 Jeux de données et régressions pour l'AMPA sur Voltaire

Crue du 31/07/2008

Date	Heure	Q (m3/s)	Glyphosate (µg/L)	AMPA (µg/L)	Gluphosinate (µg/L)
Montée de crue hors flash					
31/07/2008	11h13	0.034	0.30	1.50	0.00
31/07/2008	11h26	0.392	0.18	0.71	0.18
Montée de crue en flash					
31/07/2008	11h41	2.046	0.59	5.40	0.26
31/07/2008	11h52	1.793	0.91	5.40	0.31
Décru					
31/07/2008	12h02	1.563	0.47	1.80	0.00
31/07/2008	12h22	1.102	0.31	1.40	0.00
31/07/2008	13h28	0.252	0.23	0.17	0.00
31/07/2008	17h08	0.056	0.00	0.14	0.00

Tableau 18 – Jeu de données, régression puissance, Voltaire, AMPA

Sur les couples (Débit, Concentration AMPA) de Voltaire, la même procédure amène les résultats suivants (les débits sont en m3/s) :

Etiage :

- Application de la moyenne du suivi mensuel en saison sèche : **0.37 µg/l (2 points)**
- Application de la moyenne du suivi mensuel en saison des pluies : **0.81 µg/l (5 points)**

Crue :

- Montée : [**Concentration = 0.83 x Débit^{0.38}**], $r^2 = 0,95$
- Décru : [**Concentration = 0.83 x Débit^{1.05}**], $r^2 = 0,93$

Flash : [**Concentration = $e^{1,14 \times \text{Débit} - 0,51}$**], $r^2 = 0,99$. La relation a été construite à partir de 3 points : Nous avons intégré un point bas correspondant à un étiage moyen (0,003 m3/s, 0,59 µg/l), aussi nous testons un jeu de données calculé à partir du débit de base pour consolider la relation et s'assurer qu'elle ne surestime pas les concentrations sur le domaine de validité des débits :

Facteur w	Débit = w x Débit de base (m3/s)	concentration calculée (µg/l) [$e^{1,14 \times \text{Débit} - 0,51}$]
1	0.003	0.60
2	0.006	0.60
3	0.009	0.61
4	0.012	0.61
5	0.015	0.61
10	0.030	0.62
50	0.150	0.71
100	0.300	0.85
500	1.500	3.32
1000	3.000	18.36 (*) -> 5,40 (plafond)

Tableau 19 – Simulation de la régression exponentielle en situation de flash, Voltaire, AMPA

(*) Nous appliquons un plafond de concentration fixé à la valeur maximale enregistrée sur deux prélèvements : 5,40 µg/l, pour ne pas prendre le risque de surestimer la concentration aux forts débits, car la fonction calcule 18,36 µg/l au débit 3 m³/s, valeur qui est manifestement trop forte au regard des résultats d'analyses.

La fonction devient : Si la concentration calculée est supérieure à 5,40 µg/l alors elle est égale à **5,40 µg/l**, sinon elle prend la valeur $[e^{1,14 \times \text{Débit} - 0,51}]$.

Contrairement au cas du Diuron sur Gashette, cette relation fonctionnelle rend assez bien compte des accélérations pour tous les débits d'entrée de flash, depuis le débit de base 0,003 m³/s, jusqu'à 2 m³/s. Toutefois, comme pour le Diuron, il faudra avoir noté le faible nombre de mesures sur lesquelles reposent ces équations.

Nous donnons à la figure 44 la courbe d'ajustement des concentrations en événement de flash. L'estimation ne maximise pas les valeurs de concentration comme le signalent les deux points mesurés.

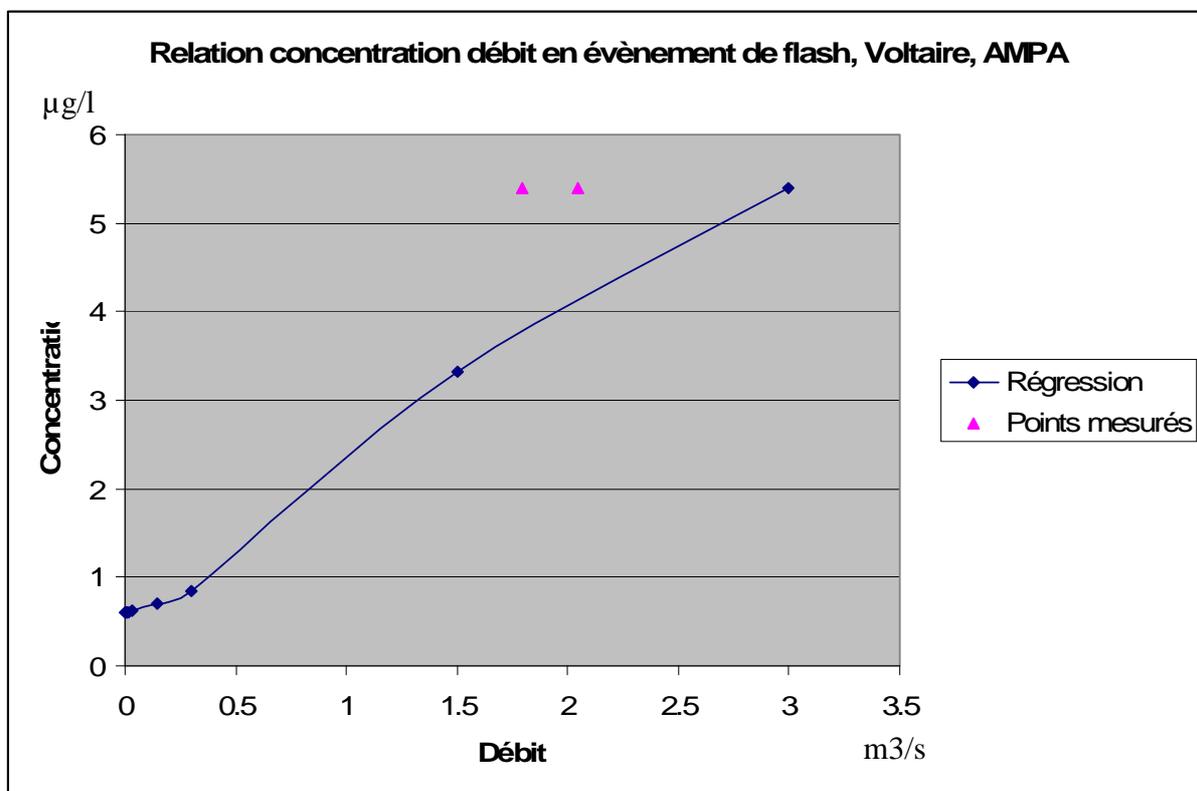


Figure 44 – Relation fonctionnelle concentration débit, évènement de flash, Voltaire, AMPA

Sur la figure 45 qui reprend les trois relations fonctionnelles, le croisement des courbes de montée et de décrue au débit de 1 m³/s est atypique : Cela traduit l'avance atypique du pic de pollution sur le pic de crue dans la cas de figure qui nous avons mesuré à la station Voltaire.

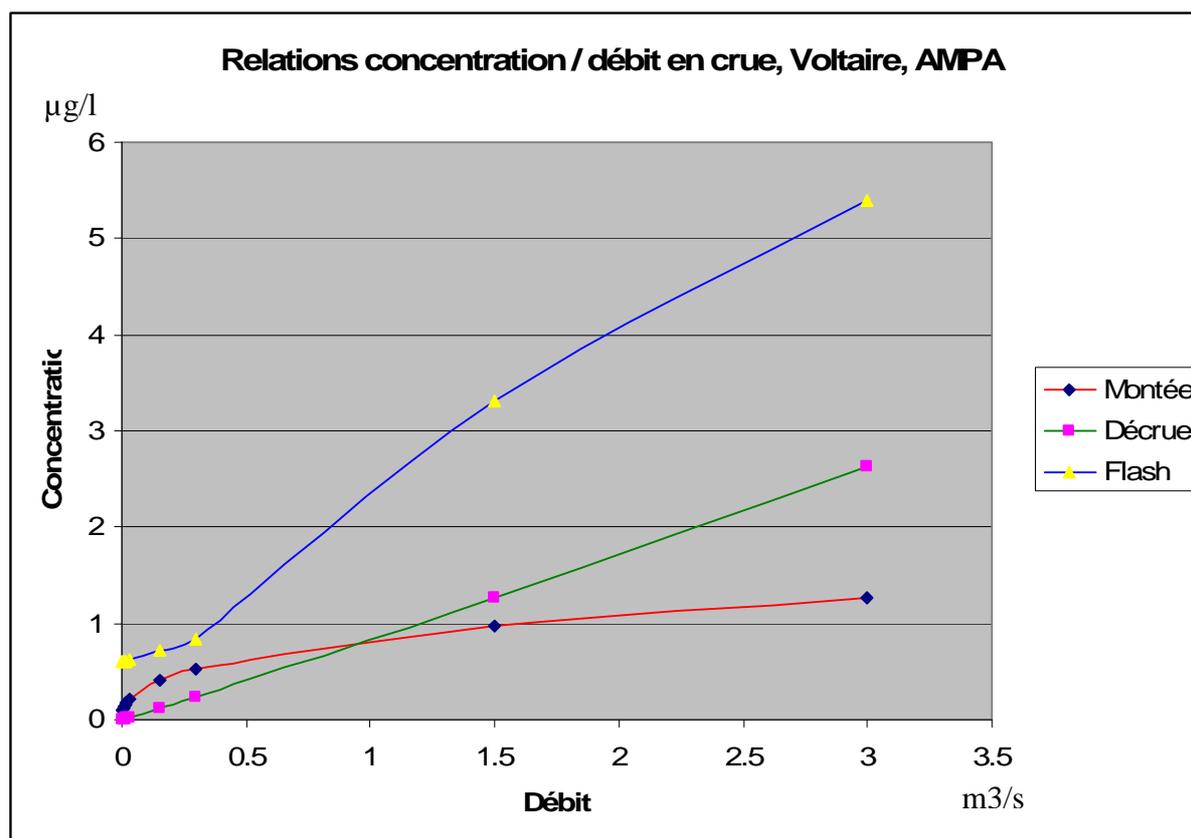


Figure 45 – Relations fonctionnelles concentration/débit, Voltaire, AMPA

Il aurait été judicieux de rechercher les relations entre concentration et accélération du débit, mais le faible nombre de mesures nous a limité.

Nous sommes désormais équipés pour estimer les transferts à partir de la chronique des événements enregistrés, d'une part pour le Diuron sur le versant de la rivière Gashette et d'autre part pour l'AMPA sur le versant de Voltaire, deux versants de dimensions comparables (67,52 ha et 66,50 ha)

344 Classes d'évènement et flux de pesticides

3441 Représentativité des points de mesure

Les courbes obtenues reposent, d'une part sur l'hypothèse de fonctions puissance et d'autre part sur l'échantillonnage de débits élevés, représentatifs en flux annuel, mais non représentatifs en temps cumulé (voir paragraphe 342). La possible mauvaise représentation des débits faibles pourrait être une limite. Aussi, nous examinons ce point sur la base d'une distribution annuelle (Tableaux 20 et 21) puis d'une distribution de crue (Tableau 22).

	Gashette	Mansarde amont	Mansarde aval	Voltaire
Flux en crue	41 295 m3 (83 %)	2 172 m3 (47 %)	1 930 m3 (62 %)	187 171 m3 (66 %)
Flux hors crue	8 664 m3 (17 %)	2 447 m3 (53 %)	1 194 m3 (38 %)	94 994 m3 (34 %)

Tableau 20 – Flux en crue et hors crue sur 12 mois(*)

(*) Les 12 mois sont avril 2007 à mars 2008 pour Gashette, octobre 2007 à septembre 2008 pour les autres stations.

Gashette

Classe	Effectif	pct Eff
< 1 Fb (861 m3)	48	83%
1 Fb (861 m3) à 2 Fb (1722 m3)	6	10%
2 Fb (1722 m3) à 3 Fb (2583 m3)	2	3%
5 Fb (4305 m3) à 10 Fb (8610 m3)	1	2%
10 Fb (8610 m3) à 20 Fb (17220 m3)	1	2%
	58	100%

Mansarde amont

< 1 Fb (26 m3)	67	81%
1 Fb (26 m3) à 2 Fb (52 m3)	5	6%
2 Fb (52 m3) à 3 Fb (78 m3)	3	4%
4 Fb (104 m3) à 5 Fb (130 m3)	3	4%
5 Fb (130 m3) à 10 Fb (260 m3)	4	5%
10 Fb (260 m3) à 20 Fb (520 m3)	1	1%
	83	100%

Mansarde aval

< 1 Fb (36 m3)	40	75%
1 Fb (36 m3) à 2 Fb (72 m3)	4	8%
2 Fb (72 m3) à 3 Fb (108 m3)	4	8%
3 Fb (108 m3) à 4 Fb (144 m3)	2	4%
4 Fb (144 m3) à 5 Fb (180 m3)	2	4%
10 Fb (360 m3) à 20 Fb (720 m3)	1	2%
	53	100%

Voltaire

< 1 Fb (1560 m3)	99	83%
1 Fb (1560 m3) à 2 Fb (3120 m3)	8	7%
2 Fb (3120 m3) à 3 Fb (4680 m3)	2	2%
3 Fb (4680 m3) à 4 Fb (6240 m3)	1	1%
4 Fb (6240 m3) à 5 Fb (7800 m3)	1	1%
5 Fb (7800 m3) à 10 Fb (15600 m3)	6	5%
10 Fb (15600 m3) à 20 Fb (31200 m3)	3	3%
	120	100%

Tableau 21 -Classes de crue selon le flux d'eau et représentativité des points de mesure.(**)

(*) Ces valeurs sont issues du traitement de 12 mois : avril 2007 à mars 2008 sur Gashette, octobre 2007 à septembre 2008 pour les trois autres stations.

(*) **Fb** signifie « Flux de base », par analogie au « débit de base ». Ils est déterminé pour chaque station comme le flux moyen d'une crue sur la période des 12 mois considérés : Gashette : **861 m3**, Mansarde amont : **26 m3**, Mansarde aval : **36 m3**, Voltaire : **1560 m3**
Par ce procédé classique les stations peuvent être examinées en comparaison.

L'examen du tableau 21 permet de situer les 3 crues échantillonnées dans une distribution représentative d'une chronique annuelle :

- Crue des 30/07, **31/07** et 01/08/2008 sur Gashette : **8607 m3** : Classe 5 des fortes crues.

- Crue du **19/09/2008** sur Gashette : **29 547 m3** : Cette crue, hors classe, annonce les pluies exceptionnelles de septembre et surtout d'octobre 2008. L'apport de la route nationale n'a malheureusement pas été discriminé dans le flux global.

- Crue du **31/07/2008** sur Voltaire : **11 126 m³** : Classe 5 des fortes crues.

Le positionnement des crues et des points de mesure associés peut faire craindre leur faible représentativité. Cela est surtout vrai pour Gashette qui entre dans un mois exceptionnellement pluvieux au moment où la crue du 19/09/2008 survient. En réalité, nous observons un fait statistiquement intéressant : **Une crue « importante » reproduit une distribution des débits instantanés d'allure semblable à une distribution annuelle selon les deux critères étudiés, temps cumulé et flux d'eau.**

A titre d'illustration nous avons distribué les débits instantanés pendant la crue mesurée de la rivière Voltaire qui dure 1 jour 20 heures et 8 minutes, du 30/07 au 01/08/2008, pour un flux total de 11 126 m³ (crue dite du 31/07/2008, recouvrant 3 jours calendaires).

Classe	Temps cumulé	% tps cumulé	Flux (m ³)	% Flux
2 Qb (6 L/s) à 3 Qb (9 L/s)	19 h 19 mn	44%	494	4%
3 Qb (9 L/s) à 4 Qb (12 L/s)	7 h 42 mn	17%	291	3%
4 Qb (12 L/s) à 5 Qb (15 L/s)	3 h 43 mn	8%	178	2%
5 Qb (15 L/s) à 10 Qb (30 L/s)	5 h 5 mn	12%	399	4%
10 Qb (30 L/s) à 100 Qb (300 L/s)	7 h 28 mn	17%	2 326	21%
100 Qb (300 L/s) à 1000 Qb (3000 L/s)	1 h 51 mn	4%	7 437	67%

Tableau 22 – Distribution des débits instantanés pendant la crue du 31/07/2008, Voltaire

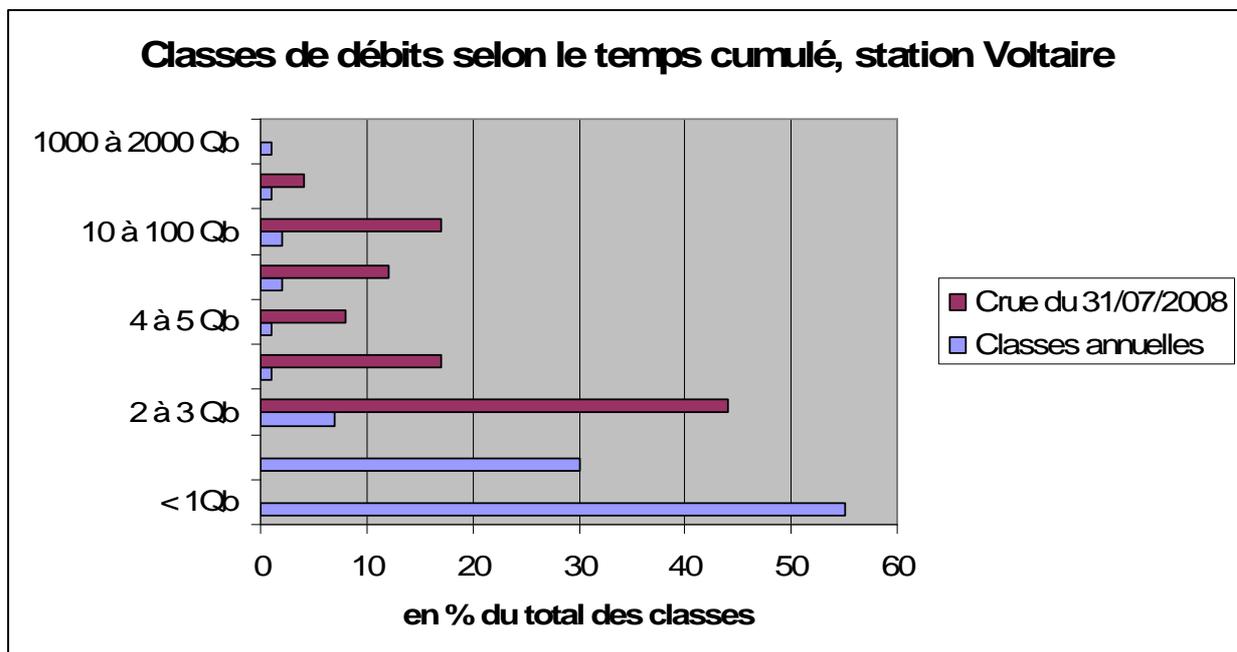


Figure 46 – Comparaison des classes de débits selon le temps cumulé, station Voltaire, classes annuelles / classes de crue.

Le temps cumulé d'une longue crue intègre une forte proportion de débits faibles (2 à 3 Qb), prenant ainsi l'allure générale d'une distribution annuelle des débits instantanés (Figure 46).

L'analogie des allures générales est également visible selon le flux d'eau. A contrario du temps cumulé, les gros débits sont les plus représentés en flux (Figure 47).

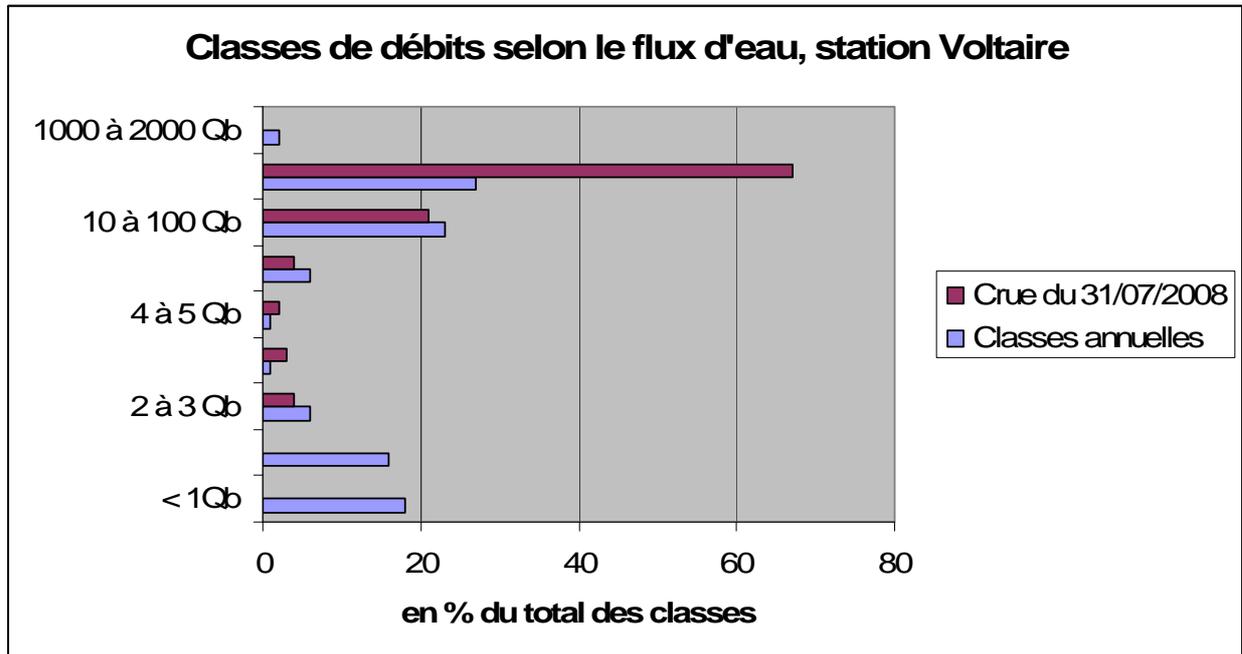


Figure 47 – Comparaison des classes de débits selon le flux cumulé, station Voltaire, classes annuelles / classes de crue

Une dernière limite à la représentativité des crues mesurées est la proximité de l'épandage du Diuron en juillet 2008. Toutefois, la comparaison des deux crues semble montrer que l'importance du lessivage est davantage liée à la pluviométrie et au ruissellement qu'au délai qui s'écoule entre l'épandage et la crue, au moins sur la durée de la saison pluvieuse qui suit l'épandage. Nous ne disposons pas de donnée supplémentaire qui nous permettrait d'aller plus loin dans cette réflexion qui contredit partiellement les observations de *Gouy et al. 1998*.

Par contre, disposant de points de référence la veille des crues et de suivis mensuels continus, les phases de montée peuvent être ajustées en intégrant à chaque fois un point bas. Enfin, les décrues supportent les séries numériques les plus denses. **Du point de vue de la représentativité, nos ajustements satisfont aux objectifs d'une première estimation.**

Les analyses de classes pourraient être poursuivies sur l'ensemble des paramètres de crue : Par exemple nous pourrions poursuivre le classement des crues par rapport aux distributions marginales des débits instantanés qui les composent pour faire suite au tableau 22, et partant de là affiner une stratégie annuelle d'échantillonnage.

Cependant, les traits essentiels de ces distributions en lien avec les lessivages ont été mis en évidence et nous fermons ce sujet qui méritera des développements ultérieurs.

Avant de passer aux calculs de flux de pesticides (paragraphe 3442, 3443 et 3444), il nous a paru utile de produire trois commentaires sur les tableaux 20 et 21 :

1- La répartition des flux de Gashette (Tableau 20) attire l'attention tant le flux en crue est proportionnellement important ; alors qu'en classes de débits, les rivières Gashette et Voltaire montrent des distributions du flux tout à fait analogues (voir paragraphe 342), en classes d'évènement de crue, une différence notable apparaît. Cela traduit deux effets conjoints :

a) **la fréquence des variations de débit** en période de pluie est augmentée par le ruissellement de la route nationale ; si bien que de courtes périodes en dessous du seuil de débit, inférieures à une heure selon la définition que nous avons retenue, sont insérées dans les évènements de crues.

b) par suite, ce mécanisme met en évidence **les déformations induites** par les analyses de classes, fondées sur des distributions discrètes et arbitraires, quoiqu'utiles en première approche. Sur Gashette, la classification [« En crue » / « Hors crue »], insère 3358 m³ correspondant à des débits inférieurs à 2 Q_b dans des évènements de crue sur les 12 mois retenus pour notre analyse.

2- Par ailleurs, nous sommes surpris par les 53 % et 38 % « hors crue » affichés par les stations de Mansarde (Tableau 20), car le cours d'eau est intermittent et nous nous attendions à n'y observer que des flux « en crue ». Nous avons déjà mentionné ce fait en lien avec une nappe perchée qui fonctionne à la saison des pluies. En termes de transfert de contaminants en solution, ce fait n'est pas négligeable. La fraction soluble de la Chlordécone trouve dans ce filet d'eau une voie de diffusion tranquille, ignorée dans nos mesures quand le débit n'était pas mesurable. Il y a nécessairement un flux de pollution non mesuré qui a fonctionné sur Mansarde en saison des pluies.

3- Mansarde aval et Voltaire (Tableau 20), confirment par leur distribution des flux un rapprochement déjà observé pour les données climatiques. Nous reviendrons au paragraphe 3444 sur le facteur d'échelle qui peut être étudié en comparant ces deux stations, l'une intégrant 3,70 ha et l'autre 66,50 hectares. La comparaison des documents intitulés « Chronique sur 12 mois » du « recueil des données » donne une première idée.

3441 Application directe aux évènements de la rivière Voltaire

L'estimation du flux d'AMPA procède de la distribution des classes d'évènement du cours d'eau dans une chronique annuelle :

- étiage en saison sèche
- étiage en saison des pluies
- montée de crue
- décrue

A l'intérieur de chaque classe d'évènement, les relations fonctionnelles sont appliquées aux séries de **débits instantanés** pour en déduire une estimation des **flux instantanés** de matière active.

Cette chronique au pas de temps de la minute sur Voltaire est ensuite agrégée (Tableau 23).

Dans une deuxième estimation, nous isolons les flashes en montée et en décrue, puis le transfert sale qui leur serait propre (colonne de droite du tableau 23).

AMPA		Station Voltaire		unité : grammes de matière active		
-		Etiage		Crues		
Année	Mois	Saison sèche	s. pluies	Montées	Décrués	Flashes
2007	10		5.17	2.32	3.18	3.04
2007	11		7.57	0.48	0.84	1.18
2007	12		8.85	0.29	0.21	0.50
2008	01	3.18		0.12	0.03	0.15
2008	02	2.65		0.14	0.02	0.16
2008	03	3.34		0.12	0.01	0.12
2008	04	2.64		0.37	0.08	0.42
2008	05	1.78				
2008	06	2.62		0.39	0.09	0.48
2008	07		5.63	0.43	0.80	0.79
2008	08		5.68	2.54	1.04	2.14
2008	09		5.20	3.47	5.39	6.89
Totaux		16.20 (21%)	38.11 (50%)	10.67 (14%)	11.69 (15%)	
		54.30 (71 %)		22.36 (29 %)		
		76.66 (100 %)				16.11 (21 %)

Tableau 23 – Flux d'AMPA sur 12 mois (en grammes) – station Voltaire

3442 Application directe aux évènements de la rivière Gashette

Nous avons exposé les difficultés à isoler les flashes de la station Gashette ; aussi, nous ne procédons qu'à une seule estimation des transferts de Diuron sur 12 mois, fondée sur 4 classes d'évènements :

DIURON		Station Gashette		unité : grammes de matière active		
-		Etiage		Crues		
Année	Mois	Saison sèche	s. pluies	Montées	Décrués	
2007	04	1.61		0.10	0.33	
2007	05	1.43		0.02	8.49	
2007	06	3.35		0.01	0.00	
2007	07		4.51	0.09	0.25	
2007	08		53.88	11.75	9.56	
2007	09		13.29	2.52	2.04	
2007	10		52.19	2.39	3.87	
2007	11		9.96	2.33	2.95	
2007	12		4.76	2.28	2.03	
2008	01	1.47		0.63	0.48	
2008	02	1.64		0.04	0.02	
2008	03	1.47		1.08	0.67	
Totaux		10.98 (5%)	138.60 (68%)	23.23 (11 %)	30.71 (15 %)	
		149.58 (73 %)		53.95 (27 %)		
		203.53 (100 %)				

Tableau 24 – Flux de Diuron sur 12 mois (en grammes) – station Gashette

Retour sur l'estimation en valeur moyenne de la page 58 : L'estimation de 19,68 grammes de Diuron calculée sur une seule crue est difficilement comparable aux valeurs plus faibles de la chronique mensuelle du tableau 24. Cela démontre la fragilité de ce type de calcul.

3443 Application indirecte aux évènements de la rivière Mansarde

Plusieurs fois au cours de notre exposé, nous avons signalé les analogies des paramètres spécifiques de Voltaire et Mansarde. Après quelques considérations générales, nous examinons ce point en calculant les rapports des valeurs Voltaire/Mansarde aval (Tableau 25).

La petite taille de la surface intégrée par les mesures sur Mansarde amont et aval donne à des facteurs tels que l'infiltrabilité du sol ou l'efficacité du réseau de drainage, une influence directe et mesurable localement : Effectivement, 32 % du flux d'eau annuel du point amont ne parvient pas à l'aval, $([4619-3125] / 4619)$, également 11 % du flux d'eau en crue à l'amont ne parvient pas à l'aval en moyenne annuelle $([2172 - 1930] / 2172)$. Ces valeurs sont en m3.

Nous nous demandons alors si Voltaire (66,50 ha) et Mansarde (1,25 et 3,70 ha) sont comparables ? Car non seulement les surfaces ne sont pas les mêmes, mais les échelles de territoire ne confèrent pas aux facteurs les mêmes implications dans les phénomènes observés. Mansarde (1, 25 et 3,70 ha) caractérise l'échelle de la parcelle, alors que Voltaire (66,50 ha) caractérise une échelle globale à laquelle le cours d'eau compense les variabilités locales, singulièrement illustrées par la comparaison des deux points de Mansarde (Figure 39).

Admettons par hypothèse que le point aval intègre une certaine variabilité des facteurs liés aux 3,70 ha qu'il draine ; les paramètres mesurés à l'aval sont alors rapportés à ceux de la station Voltaire. Sous cette hypothèse, certes discutable, nous cherchons des paramètres qui traduisent un rapport constant Voltaire/Mansarde aval et qui tradiraient un effet d'échelle. Comme contre-exemple, les concentrations de Glyphosate et AMPA retrouvées respectivement sur Mansarde et Voltaire en suivi mensuel (Annexe 5 et Tableau 25) sont dans le même ordre de grandeur et ne traduisent pas une amplification des concentrations qui serait liée à la dimension du versant drainé, comme on aurait pu intuitivement l'imaginer. Nous passons donc en revue quelques paramètres mesurés (Tableau 25), en les classant selon l'ordre de grandeur du rapport calculé. Rappelons que **le rapport des surfaces est de l'ordre de 1 à 20 et que les paramètres de pluie sont similaires** aux deux points de mesure. Par contre, l'hypothèse de la répartition uniforme des pluies à la surface des versants n'est pas satisfaisante lorsqu'elle est appliquée au calcul des coefficients d'écoulement.

- Rapport d'ordre 1 : Les **concentrations en pesticides** (Glyphosate et AMPA) à l'étiage, en saison sèche et en saison des pluies, ne sont pas différenciables sur les deux sites. Pour mémoire, il en est de même pour les pics de concentration en MES (Matières en suspension).
- Rapport d'ordre 2 à 5 : Les rapports des **effectifs d'évènement** de crue et de flash répondent à cet ordre de grandeur. Le rapport plus fort du nombre de flash intègre un nombre important d'évènements mineurs de durée inférieure à 5 minutes, et doit être relativisé à cette représentation des petits évènements (voir les documents « Chronique des évènements de flash » dans le « recueil des données »).
- Rapport d'ordre 10 à 20 : Les débits moyens **en crue** diversement calculés sont dans ce rapport, ainsi que les temps cumulés **en crue** en valeurs absolues et en valeurs relatives.
- Rapport d'ordre 50 à 100 : Les rapports des flux d'eau annuels et en évènements de crue sont dans cet ordre de grandeur, ainsi que les rapports des débits moyens annuels et les flux de matières actives. Par contre, les représentations relatives des flux en crue dans le flux annuel (ligne du Tableau 25 : « Flux en crue % ») sont similaires.

Paramètre	Voltaire	M.aval	Rapport	Ordre de grandeur
Surface (ha)	66.50	3.70	17.97	20
Pluies 12 mois (mm)	1775	1764	1.01	1
Temps cumulé pluies	3j 14h 18mn	3j 16 h 24mn	1.00	1
Intens. μ averses (mm/h)	7.12	7.09	1.00	1
Débit mensuel μ (m3/s)	0.009	0.0001	90	100
Flux d'eau annuel (m3)	282 165	3 125	90	100
Crues				
Nbre de crues	120	53	2.26	2
Flux en crue (m3)	187171	1930	96.98	100
Flux en crue (%)	66%	62%	1.07	1
Tps cumulé en crue	52j 10h 50mn	4j 21h 48 mn	10.69	10
Tps cum.en.crue (%)	14%	1.35%	10.39	10
Débit de pointe μ (m3/s)	0.211	0.012	17.58	20
Débit μ en crue (m3/s)	0.021	0.004	6.00	10
Flashes				
Nbre de flashes	483	87	5.55	5
Flux (m3)	24927	454	54.91	50
Flux (%)	13%	24%	0.54	1
Tps cumulé	4j 6h 6mn	15 h	6.81	5
Tps cum. (%)	8%	13%	0.62	1
Débit μ entrée (m3/s)	0.031	0.003	9.12	10
Amplitude μ (m3/s)	0.064	0.008	7.80	10
Intensité μ (m3/s/mn)	2.88	0.57	5.05	5
Pesticides				
Glyphosate étiage saison sèche ($\mu\text{g}/\text{l}$)	non mesuré	0.70		
Glyphosate – étiage saison des pluies	0.27	0.18	1.50	1
AMPA – étiage saison sèche	0.37	0.80	0.48	1
AMPA – étiage saison des pluies	0.81	0.95	0.98	1
Transfert 12 mois (g)	76.66	1.30	59	50
Mes				
Pic de concentration	3.83	3.87	0.99	1

Tableau 25 – Facteur d'échelle Voltaire/ Mansarde

Dans les situations que nous avons appréhendées, **seuls les paramètres de débit et de flux en crue** semblent se rapporter assez simplement à la surface du versant. Les débits et flux hors crue sont davantage dépendants du fonctionnement des nappes souterraines. **Les concentrations en pesticides et MES n'ont pas révélé de facteur d'échelle**, par contre les flux de pesticides suivent la tendance des flux d'eau. Ces observations sont consolidées par le rapport des débits en étiage et en crue qui peut être de l'ordre de 1 à 100 sur Mansarde et de 1 à 1000 sur Voltaire, rapport qui illustre la détermination principale des débits en crue par les événements pluvieux distribués à la surface de l'impluvium ; même si les conditions initiales de la crue, notamment le niveau de la nappe souterraine mis en relation avec le temps sec avant l'évènement, jouent un rôle que nous n'avons pas interprété.

Les débits de pointe spécifiques moyens (sur 12 mois) en crue : 3,17 L/s/ha sur Voltaire et 3,24 L/s/ha sur Mansarde aval, établissent une simple relation de proportionnalité entre les **débits de pointe moyens en crue** et les **surfaces intégrées aux points de mesure**. Les 12 mois de référence retenus sont octobre 2007 à septembre 2008.

Le rapprochement des débits de pointe spécifiques en crue (L/s/ha) et la similitude des concentrations à l'étiage en Glyphosate et AMPA ($\mu\text{g/L}$) nous amènent donc à appliquer les parties basses des régressions obtenues sur la station Voltaire aux débits instantanés de la station Mansarde aval.

Intégration des flux instantanés d'AMPA au point de mesure Mansarde aval :

AMPA		Station M. aval		unité : grammes de matière active	
Année	Mois	Etiage		Crues	
		Saison sèche	s. pluies	Montées	Décrués
2007	10		0.47	0.02	0.00
2007	11		0.32	0.03	0.01
2007	12		0.26		
2008	01	0.03		0.00	0.00
2008	02	0.06		0.00	0.00
2008	03	0.02		0.00	0.00
2008	04	0.01		0.00	0.00
2008	05	-			
2008	06	0.01		0.00	0.00
2008	07		0.02	0.00	0.00
2008	08		0.00	0.01	0.00
2008	09		0.01	0.01	0.00
Totaux		0.14 (11%)	1.08 (83%)	0.07 (6%)	0.01 (1%)
		1.21 (93 %)		0.09 (7 %)	
		1.30 (100 %)			

Tableau 26 – Flux d'AMPA sur 12 mois (en grammes) – station Mansarde aval

Une réserve à ce prolongement est donnée par l'analyse des flashes : L'amplitude spécifique moyenne des flashes de Mansarde ($8 \text{ L/s} / 3,70 \text{ ha} = \mathbf{2,2 \text{ L/s/ha}}$) est 2 fois supérieure à celle des flashes de Voltaire ($64 \text{ L/s} / 66,50 \text{ ha} = \mathbf{0,9 \text{ L/s/ha}}$). Or, les flashes rassemblent toutes les accélérations du débit, pas seulement les accélérations extrêmes associées aux débits de pointe. Cela démontre que les effets des évènements extrêmes sont peu dépendants de la surface de drainage intégrée au point de mesure. Par contre les débits spécifiques des évènements moyens et faibles sont influencés par un facteur d'échelle associé aux rétentions de l'eau par le versant. **La différenciation des classes de flash peut donc révéler des indicateurs probablement corrélés aux relations qu'entretiennent l'infiltration et le ruissellement à la surface d'un versant dont l'aire peut être associée au cours d'eau mesuré.** Ce point est suffisamment intéressant pour appeler des développements méthodologiques et de nouvelles investigations.

Par surcroît, l'amplitude spécifique moyenne des flashes, plus forte sur Mansarde aval, exprime sous une autre forme le temps de réponse généralement plus court d'une petite surface, mais **possède l'avantage de ne pas dépendre de la mesure de la pluie** dont nous avons vu les difficultés à déterminer la distribution spatiale et finalement les difficultés à la quantifier dans une aire. Les intensités spécifiques moyennes des flashes conduisent à l'évaluation des mêmes comportements, mais par une autre voie.

Si notre objectif est d'évaluer les ruissellements et les lessivages associés à une aire à partir des évènements enregistrés dans un cours d'eau, nous trouvons dans ce résultat un intérêt supplémentaire à mesurer les flashes et leurs paramètres spécifiques à l'aide de stations au pas

de temps de la minute. D'une façon plus générale, la recherche de variables mesurées en cours d'eau, corrélées aux ruissellements et aux lessivages associés à la surface du versant, doit orienter la méthodologie appliquée à nos mesures.

3444 Analyse comparative des flux de pesticide dans trois situations

Le fait essentiel démontré par les estimations des flux annuels de pesticide est l'**importance de la pollution chronique** : 71, 73 et 93 % (Tableaux 23, 24 et 26), soit plus des deux tiers sur 12 mois dans les trois situations, alors que les parts des flux d'eau en crue sur Voltaire (66 % - Tableau 20) et Gashette (83 % - Tableau 20) sur la même période, nous auraient plutôt amenés à supposer le contraire. Ce résultat confirme que le « temps cumulé en étiage » alias « la tortue » l'emporte sur l'impétueux « flux d'eau en crue » alias « le lièvre ».

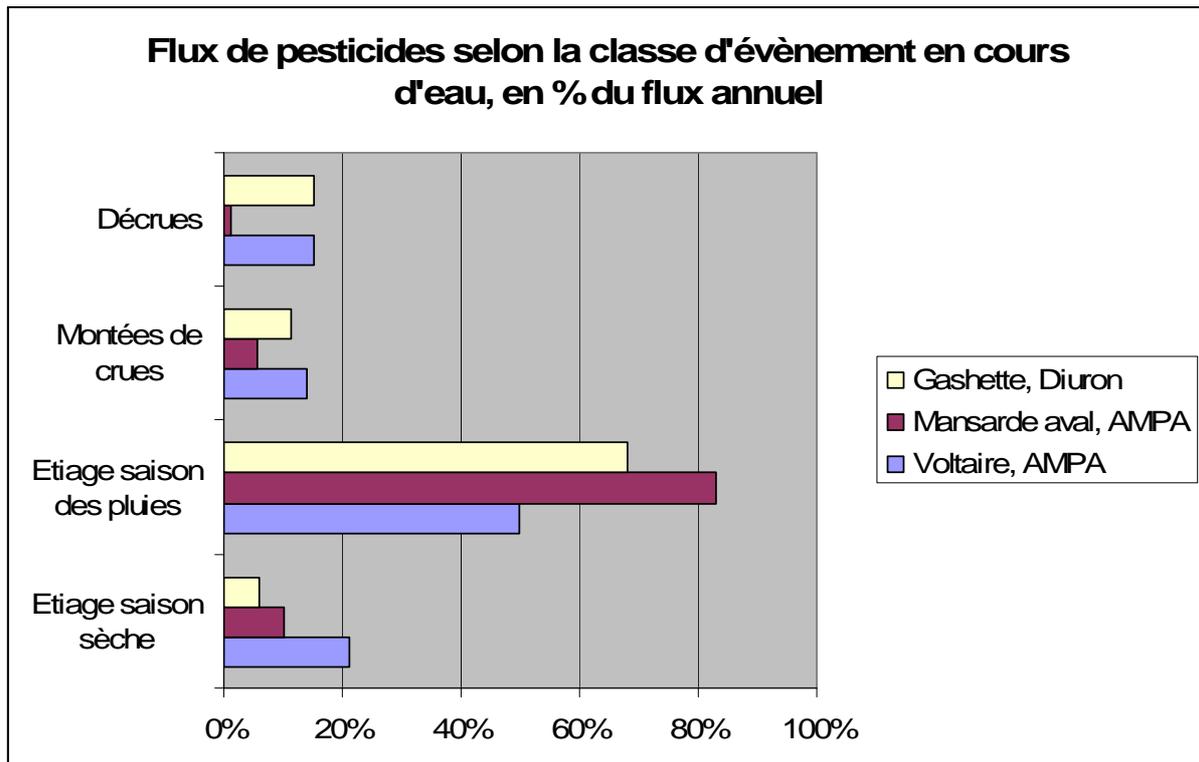


Figure 48 – Flux de pesticides selon la classe d'évènement en % du flux annuel

Les comparaisons des stations deux à deux confirment les tendances déjà observées : L'usage agricole du bassin de la rivière Gashette génère des transferts importants, comparativement au bassin de la rivière Voltaire, de dimension comparable et dominé par l'habitat diffus : Le rapport est de 1 à 3 (Figure 49).

Les flux de pesticide estimés sur Mansarde aval sont 50 à 100 fois inférieurs à ceux de Voltaire, traduisant le facteur d'échelle observé pour les flux d'eau. Ce flux n'est pas pour autant négligeable, notamment lorsqu'il implique des polluants organiques persistants comme la Chlordécone, leur offrant une voie de diffusion à partir des parcelles contaminées.

Enfin, les transferts en évènements de flash représentent 71 % des transferts en crue et 21 % des transferts annuels à la station Voltaire pour l'AMPA, dans un temps cumulé ne représentant que 8 % du temps annuel compté en minutes.

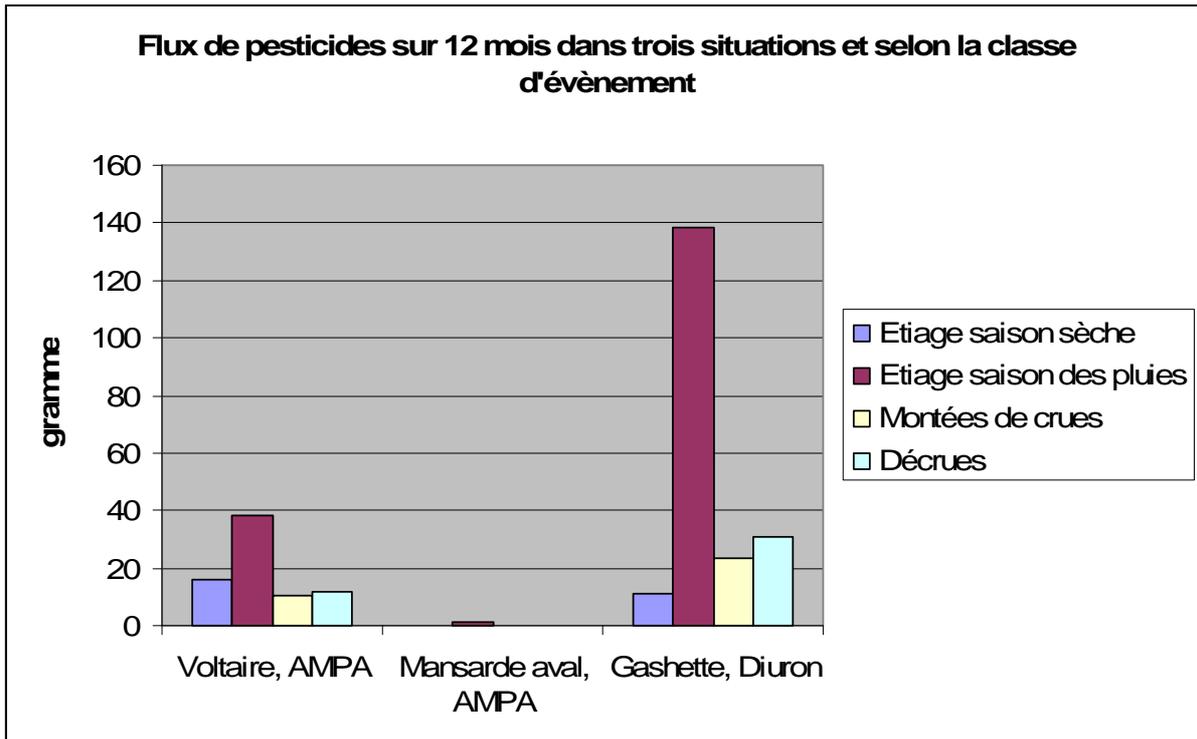


Figure 49 – Flux de pesticides comparés dans trois situations correspondant aux usages du sol et au facteur d'échelle spatiale

Voltaire, AMPA : 66,50 ha, habitat diffus dominant

Mansarde aval, AMPA : 3,70 ha, usage agricole dominant, habitat diffus en amont

Gashette, Diuron : 67,52 ha, usage agricole dominant

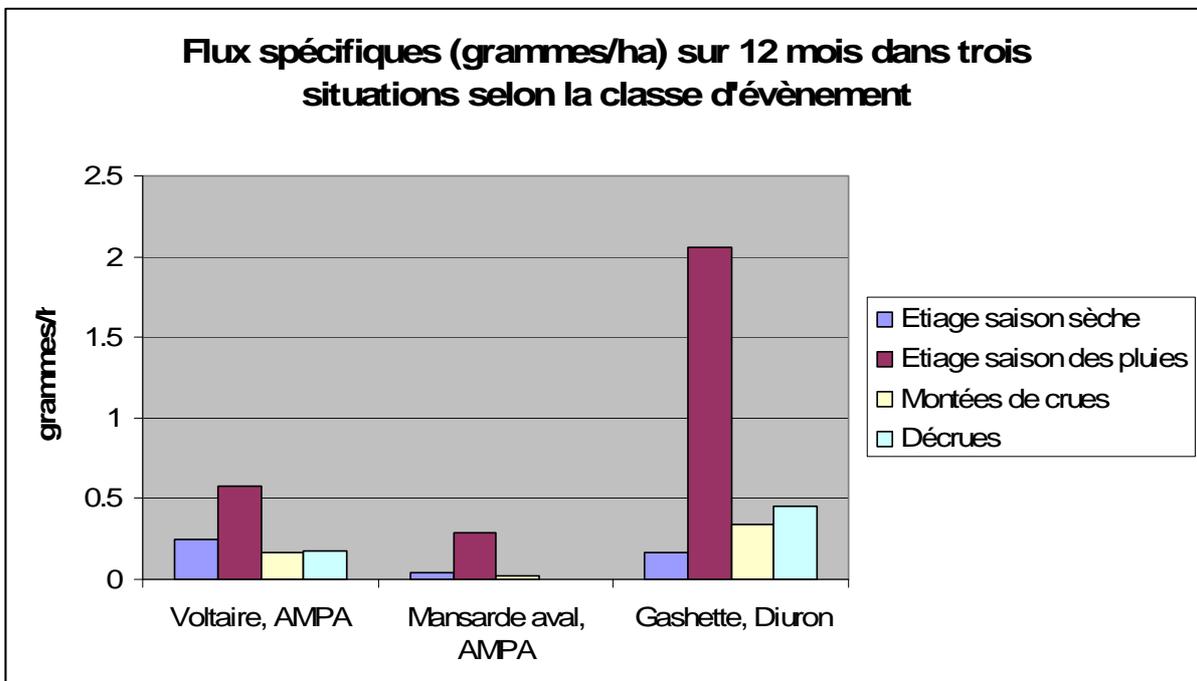


Figure 50 – Flux spécifiques de pesticides dans trois situations, selon la classe d'évènement

L'expression des flux de matière active ramenés à l'hectare atténue le facteur d'échelle mais ne change pas la tendance. Les figures 49 et 50 font ressortir que les flux en décrue rattrapent les flux en montée. Le volume d'eau en décrue compense la dilution dans cette phase.

Nous sommes parvenus au terme de la présentation des principaux résultats que nous avons regroupés en 4 familles : l'inventaire des molécules retrouvées en fonction des usages du sol, l'influence des facteurs climatiques mesurés en moyennes mensuelles, l'examen des lessivages associés aux événements de crue, enfin, l'évaluation quantitative des transferts annuels de substances actives par le réseau hydrographique de surface.

Nous abordons la dernière partie de notre document qui apporte une vision critique des protocoles mis en œuvre, par rapports aux objectifs de départ.

4 ANALYSE DES RESULTATS

41 Synthèse des principaux résultats

Les protocoles de mesure mis en œuvre ont permis de balayer trois ensembles de données :

- **Les chroniques des événements** de trois cours d'eau de petites dimensions pendant deux années hydrologiques au pas de temps de la minute pour deux d'entre eux. 14 à 18 mois de données ont été exploités.
- **Les chroniques mensuelles des concentrations** en pesticides à l'étiage dans les trois cours d'eau.
- **Les concentrations en pesticides en crue.** Six couples (crue / molécule) ont été entièrement échantillonnés, ayant permis de proposer deux familles de régression pour estimer les relations Concentration/Débit dans 5 classes d'évènement (étiage en saison sèche, étiage en saison des pluies, montée de crue, décrue, flash). Certaines molécules ne sont révélées qu'en crue, suite à des lessivages, d'autres ne se révèlent qu'à l'étiage provenant d'une contamination probable de la nappe.

Les premières évaluations quantitatives des transferts de pesticide à l'interface terre/mer ont pu ainsi être conduites en comparant 4 situations caractérisées par les usages du sol et par un facteur d'échelle. Elles ont mis en évidence :

- la relation étroite entre les usages du sol et les pollutions retrouvées,
- l'importance des lessivages en période de pluie, pouvant multiplier par 10 à 15 les concentrations retrouvées en cours d'eau pendant la crue,
- les contributions des classes d'évènement d'un cours d'eau au transfert annuel,
- la relation entre les paramètres du transfert et un facteur d'échelle : A nos échelles d'observation, le débit de pointe spécifique moyen semble caractériser le facteur d'échelle spatiale par un simple rapport de proportionnalité.

Plusieurs intuitions de départ se sont révélées fausses :

- Le cours d'eau intermittent étudié génère davantage de flux polluants en dehors des événements pluvieux déclencheurs de crues, du fait d'une nappe perchée qui fonctionne en saison des pluies.
- Le point de mesure aval de Mansarde, bien qu'intégrant 3,70 ha, concentre seulement 68 % du flux d'eau enregistré au point amont qui intègre 1,25 ha ; 200 mètres seulement séparent les deux points de mesure. Ce fait met en évidence la forte infiltrabilité des sols et une échelle d'observation, celle de la parcelle agricole, non nécessairement comparable à celle des deux autres bassins versants étudiés.
- Les cours d'eau permanents, bien qu'ils drainent en crue des flux d'eau représentant les deux tiers de leur flux annuel, transfèrent davantage de matières actives en régime

d'étiage qui représente les quatre cinquièmes du temps cumulé d'octobre 2007 à septembre 2008, 12 mois retenus comme référence annuelle sur Voltaire et Mansarde.

- Le modèle normatif de la crue organisé autour d'un pic s'est révélé commode mais castrateur des informations contenues dans les flashes, ces accélérations du débit dont la mesure est rendue possible par les stations d'acquisition au pas de la minute.
- La mesure de la pluie au seul exutoire, s'est révélée insuffisante pour rendre compte de la relation pluie/débit, notamment dans le calcul des coefficients d'écoulement fondés sur l'hypothèse de la répartition uniforme de la pluie dans l'aire du bassin versant.

Outre cet apport de connaissances, les jeux de données acquis permettent désormais de mieux calibrer les équipements, notamment les sondes de pression, les canaux Venturi et les préleveurs à déclenchement automatique dans de telles situations expérimentales.

Les échantillonnages pourront également être mieux planifiés dans ces situations jusque là peu étudiées. Les principes suivants peuvent être énoncés :

- Le suivi chronique ne doit pas être négligé car il peut représenter les deux tiers du flux annuel d'une matière active.
- La distinction « saison sèche », « saison des pluies » est pertinente pour le regroupement des mesures et des prélèvements.
- Les lessivages semblent davantage influencés par le volume et l'intensité des pluies que par le délai qui s'écoule entre l'application du produit et l'averse qui déclenche la crue. Cela peut influencer le réglage d'un préleveur à déclenchement automatique si le nombre de déclenchements doit être limité. Dans ce cas il vaut mieux choisir une hauteur d'eau correspondant aux fortes pluies du mois d'octobre, même avec une application du produit en juillet. Cette observation est à confirmer, car elle contredit les observations rapportées par *Véronique Gouy et al. 1998* d'un lessivage principal dès les premières fortes pluies après épandage.
- Une analyse multirésidus en crue peut révéler des molécules non détectées à l'étiage, et inversement, car les mécanismes de mobilisation des substances ne sont pas les mêmes au cours d'un lessivage et en saison sèche au moment où la nappe est plus fortement sollicitée. Il est donc judicieux, d'un point de vue qualité/prix de conjuguer la multiplicité des analyses ciblées pour la représentativité des mesures et la rareté des analyses multirésidus pour l'exhaustivité des inventaires.
- La grande variabilité des résultats d'analyse en laboratoire incite à parfois doubler les analyses d'un unique prélèvement. Il est donc utile de conserver des doublons d'échantillons dans un congélateur pour confirmer ou dédire d'éventuelles curiosités.
- Si les résultats d'analyse ont vocation à être valorisés dans des régressions, il faut penser à mesurer au moins un point de référence avant et un autre après la séquence du cours d'eau échantillonnée pour les besoins du calcul.

Enfin, il est apparu que plusieurs recherches méthodologiques portant sur la représentation des événements d'un cours d'eau trouvaient un intérêt à être entreprises à partir des mesures effectuées :

D'une part il est probable que les accélérations du débit enregistrées et baptisées « flashes » puissent être étroitement corrélées avec les ruissellements et les lessivages associés survenant à la surface du bassin versant. La mesure en continu de paramètres tels que les débits d'entrée et les amplitudes spécifiques de ces événements pourraient permettre de caractériser une chronique des infiltrations et ruissellements sans nécessairement faire intervenir la mesure de la pluie et ses approximatives fonctions de production/transfert. **La valorisation du cours d'eau comme intégrateur des périétés du bassin versant associé est ici mise en avant.**

D'autre part, l'analyse fréquentielle des débits instantanés permet de mesurer la représentativité annuelle d'une ou de plusieurs courtes séquences du cours d'eau. Cela a été rapidement observé à l'occasion d'une crue qui a duré près de deux jours. Ce point méthodologique pourrait déboucher sur une exploitation plus précise et plus économe des mesures hydrologiques appliquées aux mécanismes d'érosion/transfert et améliorer ainsi la fiabilité des plans d'échantillonnage.

Ces deux approches mettent en évidence la nécessité d'aborder une chronique événementielle comme un objet doté de propriétés propres qui rendent compte simultanément des débits, des accélérations du débit et de pseudo-périodes, en relation avec l'action érosive de la pluie dans l'aire du bassin versant, et non pas comme l'occurrence d'un modèle idéal, souvent baptisé « pluie/débit », qui d'une part ne rend pas suffisamment compte des mesures à nos échelles d'observation, et d'autre part s'automutile quand il veut correspondre aux chroniques enregistrées.

42 Difficultés rencontrées

Les difficultés rencontrées peuvent être regroupées en trois ensembles : Protocole, mise en œuvre et interprétation

421 Difficultés de protocole

Le mauvais calibrage de certains équipements a déjà été débattu dans la deuxième partie du document, nous les rappelons rapidement :

- Courbes de tarage des canaux Venturi limitées à des débits de 50 L/s alors que les débits maximum atteignent 80 L/s sur Mansarde.
- Sonde de pression limitée à 800 L/s sur Voltaire alors que les débits peuvent atteindre 3000 L/s lors des fortes crues ; 13 crues sont concernées sur les 144 valorisées dans cette étude.
- Pas de temps 5 minutes sur la station Gashette, insuffisant pour caractériser les flashes.

Les origines des flux n'ont pas été discriminées sur la station Gashette ; or il s'est avéré que les écoulements de la route nationale amenaient la rivière en crue alors qu'aucune pluie n'était enregistrée au point de mesure. L'instrumentation s'est révélée insuffisante pour discriminer les différentes origines du flux d'eau.

Les points de mesure de la pluie aux exutoires des 3 bassins versants se sont révélés insuffisants pour évaluer les transformations de la pluie. Par contre, les trois séries de mesures ont pu s'appuyer les unes sur les autres pour estimer les données manquantes.

L'indisponibilité du laboratoire d'analyse du PRAM, surchargé, nous a obligés à faire réaliser toutes nos analyses par LDA26. Cette manipulation a généré une pression de travail et de contrôle accrue, avec quelques épisodes de casse de flacons pendant les voyages, et une

certaine difficulté à suivre en temps réel les résultats des analyses, car le délai de retour est souvent de 4 mois.

422 Difficultés de mise en oeuvre

Les retards de livraison des équipements furent rédhibitoires : Au terme des opérations, les deux préleveurs automatiques achetés n'ont pas fonctionné, car livré trop tardivement pour l'un, et inadapté pour l'autre.

La chaîne de traitement des données n'a pas été organisée au départ : Pendant le déroulé des opérations, les traitements numériques ont été réduits aux premières opérations de contrôle : réintégration des fichiers des stations au format d'un tableur, estimation des données ponctuelles manquantes, corrections de la dérive, application des courbes de tarage et lissage des débits.

Par contre, les séparations d'évènements (averses, crues, flashes) n'ont été réalisées qu'après la fin des mesures. Les dimensions des matrices étaient de l'ordre du million de lignes. Se sont alors posées des questions aussi basiques que la puissance des microordinateurs disponibles et les programmes pouvant effectuer ces opérations, car il était impensable de réaliser les séparations manuellement. Les algorithmes ont finalement été développés localement. Tout cela a consommé un temps qui n'avait pas été correctement évalué au départ.

La pénurie de main d'œuvre et les changements d'équipes ont pénalisé les travaux : Les mouvements de personnels ont eu plusieurs conséquences négatives sur le fonctionnement de l'action. D'une part, deux jeunes personnes ont assumé l'ensemble des opérations de mesures, simultanément sur 4 projets conjoints, tout en assurant l'encadrement d'élèves ingénieurs stagiaires. D'autre part, trois personnes clés ont été remplacées en cours d'action. Tout cela a généré un héroïsme des chercheurs, certes admirable, mais aussi des retards embarrassants.

423 Difficultés d'interprétation

Calculs des incertitudes : Nous avons détaillé ce point dans la partie 2 du document. La première caractérisation quantitative des transferts a été menée sans avoir effectué les calculs d'incertitude sur les mesures et les résultats. Nous énonçons donc des résultats qui ne sont pas scientifiquement établis, mais qui ont la **valeur utile d'une première estimation**. Notons que cette validation sera faite dès que possible, car le jeu de données acquis demeure en exploitation.

Paradoxe des volumes de données hydrologie / pesticides – difficiles régressions : Autant les données hydrologiques sont denses, autant les données pesticides, exhaustives du point de vue de l'inventaire des molécules, sont en nombre limité lorsqu'elles doivent être introduites dans un calcul de régression. Certaines relations fonctionnelles ont été établies avec trois points de mesure. Leur interprétation pose une réelle difficulté.

Peu de références bibliographiques sur ce type de bassins versants : La particularité de notre étude réside dans la dimension très petite, inférieure au km², des bassins versants étudiés. Peu d'articles portent sur ce type de situation, et donc peu de références peuvent être comparées à nos résultats.

Limites du modèle pluie/débit utilisé : Nous avons construit le protocole en supposant simple et directe la relation entre la pluie mesurée à l'exutoire et la hauteur d'eau ; or les incohérences retrouvées dans le calcul des coefficients d'écoulement ont démontré que cette relation n'était ni simple, ni directe à nos échelles d'observation.

Limites de la classification des évènements de crue : La hauteur d'eau traduite en débit permet de distinguer l'étiage et le régime de crue. Cette distinction est délicate les mois particulièrement pluvieux, comme le mois d'octobre. Les points de mesure de l'« étiage en saison des pluies » sont réalisés hors crue apparente, mais il faut noter que si le régime du cours d'eau est stable au moment des prélèvements, il n'est pas toujours en dessous de deux fois le débit de base. Les classes d'évènement « étiage en saison des pluies » et « décrue » ne sont donc pas séparées avec une très grande précision. Cela a pu amener une surestimation de la classe « étiage en saison des pluies », même si son importance relative est démontrée.

Deux limites majeures du modèle de crue utilisé :

a) Les petits flashes sont majoritaires en effectif et en temps cumulé : L'essentiel de notre analyse est fondée sur la distribution des débits d'une crue autour d'un débit de pointe qui est son pic. Or il s'est avéré que sur 12 mois, les pics de crue ne représentent que 20 % de l'effectif des accélérations flash du débit. De plus, sur la même période les flashes ignorés cumulent une durée trois fois supérieure à celle des pics de crue. Il est donc possible que les flux en crue aient été sous-estimés, même si les pics de crue sont les accélérations les plus probablement liées à des lessivages.

b) Il existe des lessivages en dehors des montées de crues : La fréquence des évènements pluvieux est importante, alors que proportionnellement, peu d'averses déclenchent une crue : Sur 370 averses enregistrées à la station Voltaire pendant les 12 mois pris en référence, 120 seulement déclenchent une crue. Pourtant, les 250 autres averses surviennent hors crue ou en décrue et ont une action de lessivage probable. Cela signifie que les concentrations mesurées en étiage, sont influencées à la hausse par des lessivages « ordinaires » qui surviennent hors crue ou en fin de décrue. Cela est d'autant plus vrai pour la classe d'évènement « étiage en saison des pluies ».

43 Validation des protocoles

La validation d'un protocole de mesure et d'échantillonnage est un des principaux objectifs de cette étude. Dans sa structure, fondée sur le couplage d'un suivi mensuel et d'un suivi en crue, sur le mariage d'analyses ciblées et d'analyses multirésidus, associées à des mesures hydrologiques en continu, le protocole rend suffisamment compte du spectre des molécules recherchées et des classes d'évènement sur lesquelles reposent les estimations des flux annuels de polluants.

Par contre, la faiblesse du protocole s'est révélée :

1) dans l'**échantillonnage insuffisant des pics de crue** et des pics de pollution. Bien que nous ayons limité les risques de surévaluation des transferts en minimisant à chaque fois les paramètres estimés, il aurait été préférable d'asseoir la représentativité des crues échantillonnées sur davantage de points de mesure et d'encadrer les relations fonctionnelles par des intervalles de confiance. La correction de cette faiblesse suppose l'utilisation de préleveurs à déclenchement automatique et une quantité d'analyses ciblées plus importante autour des pics de crues et des flashes.

2) dans la **mesure des pluies** à l'échelle du bassin versant, singulièrement leur distribution spatiale. Nous avons trois pistes pour corriger ou éviter cette faiblesse :

- Poser davantage de pluviomètres et estimer une distribution spatiale des pluies

- Apprendre à exploiter les photographies radar de Météo-France pour estimer cette distribution au moment d'un évènement pluvieux
- S'appuyer davantage sur les évènements mesurés en cours d'eau, notamment les accélérations du débit, à condition de pouvoir les mettre en relation avec le ruissellement et le lessivage se produisant à la surface du bassin versant.

3) dans la lourdeur du **procédé d'analyse** : l'envoi au LDA26 et le coût généré posent des limites fonctionnelles, sauf à être suffisamment doté en personnels et en moyens financiers.

4) dans l'insuffisance des **modèles statistiques** préalablement déterminés, associés aux traitements numériques des séries de données ; la correction de cette faiblesse implique une chaîne de traitement des données préalablement organisée et validée.

5) dans le manque de **préparation des personnels** à assumer un programme de mesure aussi dense. Il faudra noter ici le courage des personnes qui en ont assumé la charge.

6) dans le manque d'**observation de la surface du bassin versant** ; les observations a minima ont été faites : enregistrement des pratiques agricoles, cartographies des occupations du sol, mais il aurait été pertinent de mesurer des chroniques d'infiltration/ruissellement à la surface du versant pour mieux interpréter les accélérations du débit et les pics de pollution au moment où se produisent les lessivages des substances recherchées.

44 Réseau de suivi de la qualité des masses d'eau, respect des normes de la directives cadre européenne

En matière de définition et d'évaluation de l'état des eaux, la DCE considère deux notions :

- L'état chimique, destiné à vérifier le respect des normes de qualité environnementales fixées par des directives européennes (sauf les directives « usages »), qui ne prévoit que deux classes d'état (respect ou non-respect). Les paramètres concernés sont les substances dangereuses qui figurent à l'annexe IX et les substances prioritaires citées à l'article 16 de la DCE (annexe X),

- L'état écologique [...] Les paramètres physico-chimiques sous-tendant la biologie ne prennent pas en compte les substances qui décrivent l'état chimique.⁴

Pour l'état chimique, il s'agit donc de vérifier le respect des normes de qualité environnementales fixées par les directives européennes. Les paramètres concernés sont essentiellement ceux de la future directive-fille relative aux substances prioritaires. Dans l'attente de ce texte, les substances et leurs valeurs seuils à retenir (valeurs en dessus desquelles le bon état n'est pas respecté) sont celles qui figurent en annexe X. L'évaluation de l'état chimique est par ailleurs établie sur la base de moyennes arithmétiques. Il suffit que la moyenne d'une des substances dépasse la valeur-seuil pour que l'état chimique ne soit pas respecté.

On distingue ainsi, dans les tableaux suivants, les concentrations calculées sur le nombre total d'analyses (suivi mensuel + crues) et celles relevant uniquement du suivi régulier mensuel.

⁴ Circulaire DCE 2005/12 n°14 du 28 juillet 2005 relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (cours d'eau, plans d'eau), en application de la directive européenne 2000/60/DCE du 23 octobre 2000, ainsi qu'à la démarche à adopter pendant la phase transitoire (2005-2007)

Substances prioritaires	Concentration (µg/l) Suivi total	Concentration (µg/l) Suivi mensuel	Seuil (µg/l)	Bon état chimique	Limite de quantification *
Alachlore	Nd	nd	0,3	Oui	0,04
Aldrine	Nd	nd	0,01	Oui	0,01
Atrazine	Nd	nd	0,6	Oui	0,02
Chlorfenvinphos	Nd	nd	0,1	Oui	0,02
DDT, DDD	Nd	nd	0,025	Oui	0,01
Dieldrine	Nd	nd	0,01	Oui	0,01
Diuron	6,09	0,70	0,2	NON	0,02
Endosulfan (sulfate)	0,02	0,02	0,005	NON	0,01
Endrine	Nd	nd	0,005	Oui	0,01
HCH alpha	0,047	déteçté	0,1	Oui	0,01
HCH beta	0,05	0,027	0,1	Oui	0,01
Isodrine	Nd	nd	0,005	Oui	0,01
Isoproturon	Nd	nd	0,3	Oui	0,04
Simazine	Nd	nd	1	Oui	0,02
Trifluraline	Nd	nd	0,03	Oui	0,02

nd : Non déteçté

* Environ 3 fois la limite de déteçtion (LDA 26)

Tableau 27 : Caractérisation de l'état chimique d'une masse d'eau, exemple de la station Gaschette / septembre 2007 – octobre 2008 (suivi total = suivi mensuel + en crue)

Pour les trois masses d'eau suivies, les résultats à partir du suivi mensuel uniquement sont les suivants :

Substances prioritaires	Gaschette	Voltaire	Mansarde aval	Seuil (µg/l)
Alachlore	nd	nd	nd	0,3
Aldrine	nd	nd	nd	0,01
Atrazine	nd	nd	nd	0,6
Chlorfenvinphos	nd	nd	nd	0,1
DDT, DDD	nd	nd	nd	0,025
Dieldrine	nd	nd	nd	0,01
Diuron	6,09	0,007	nd	0,2
Endosulfan (sulfate)	0,02	nd	nd	0,005
Endrine	nd	nd	nd	0,005
HCH alpha	0,047	nd	nd	0,1
HCH beta	0,05	nd	nd	0,1
Isodrine	nd	nd	nd	0,005
Isoproturon	nd	nd	nd	0,3
Simazine	nd	nd	nd	1
Trifluraline	nd	nd	nd	0,03
	Pas bon	Bon	Bon	

Tableau 28: Caractérisation de l'état chimique des masses d'eau sur la campagne d'analyses

→ La rivière Gaschette au droit de la station de mesure présente donc un mauvais état chimique des eaux au sens de la Directive Cadre sur l'Eau. Les concentrations relevées en Diuron sont nettement supérieures à la valeur seuil fixée pour ce paramètre. On pourra noter que cette substance a fait l'objet d'une interdiction d'utilisation le 13 décembre 2008 et que par conséquent sa présence dans les eaux se manifesterait de plus en plus rarement.

La ravine Mansarde et la rivière Voltaire présentent une bonne qualité chimique sur la campagne d'analyses réalisée, avec une détection et une quantification de Diuron sur la station Voltaire à cinq reprises sur la campagne d'analyses.

Lors de l'étude de caractérisation des conditions chimiques de référence pour les masses d'eau superficielles en Martinique⁵ de 2007, en sus de 10 substances prioritaires prévues par la directive communautaire, 11 substances « problématiques au niveau local » ont été ciblées afin de refléter l'état chimique global des eaux superficielles servant de référence au bon état des masses d'eau type cours d'eau. Ces molécules sont répertoriées dans le tableau ci-dessous afin d'apporter des résultats sous forme similaire, pour lesquels les enjeux liés à la qualité de l'eau sont également prépondérants.

	Gaschette	Voltaire	Mansarde aval	Mansarde amont	Limite de quantification
Chlordécone	0,044	0,008	0,252	nd	0,01
Glyphosate	nd	0,657	0,417	0,940	0,1
Aldicarbe	nd	Nd	nd	nd	0,05
Hexazinone	0,036	Nd	nd	nd	0,05
2,4 D	0,031	DéTECTÉ	0,028	0,032	0,02
AMPA	0,138	0,344	0,450	0,240	0,1
COV	Substances spécifiques locales prises en compte dans la définition des masses d'eau de référence mais non suivies dans le cadre du projet				
Fosthiasate					
Diquat					
Paraquat					

Tableau 29: Caractérisation de l'état chimique des masses d'eau suivant des molécules spécifiques locales (analyses en suivi mensuel de septembre 2007 à octobre 2008)

Aucune valeur seuil n'est définie au niveau communautaire pour ces substances.

Outre la Chlordécone, le Glyphosate et son dérivé l'AMPA figurent parmi les molécules les plus préoccupantes pour l'état chimique des masses d'eau, compte-tenu des utilisations agricole et non agricole du Glyphosate.

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

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

Objectif méthodologique : « Oui mais ». Le contrat aurait été mieux rempli si les échantillonneurs à déclenchement automatique avaient pu être mis en œuvre. Nous avons expliqué les difficultés rencontrées. Cela n'enlève rien à la valeur des analyses disponibles.

Objectif heuristique : « Oui mais ». Bien que tous les résultats recherchés aient été obtenus, ils auraient gagné à être consolidés par le calcul des incertitudes et des intervalles de confiance. Les séries numériques acquises constituent un jeu de données suffisamment dense pour approfondir les analyses, supporter les recherches méthodologiques et améliorer les protocoles à venir.

Ce dernier point concrétise les objectifs attendus et récompense les efforts consentis par toutes les équipes qui y ont collaboré.

⁵ Réalisation du suivi des sites de référence pour les eaux douces de type cours d'eau de Martinique, synthèse finale, janvier 2008, DIREN Martinique et Asconit Consultants, 145 pages.

Conclusion

Le Cemagref-PRAM, UR Aema (Agriculture et espace insulaire), en partenariat avec la ville du Robert, l'Ifremer, la DIREN et l'Office de l'eau de la Martinique a entrepris d'**accroître les connaissances** relatives aux transferts des pesticides dans les eaux de surface qui alimentent la baie du Robert. Cette première étude quantitative permet de valider les protocoles de mesure et d'échantillonnage dans leur principe, et d'en faire ressortir les limites. Ainsi, Nous avons fait état des démarches suivies et des résultats obtenus à partir de quatre stations de mesure installées dans deux cours d'eau permanents et une ravine.

Nous avons tout d'abord dressé un inventaire des molécules retrouvées ; certaines relèvent de pollutions anciennes et d'autres sont liées à des usages récents de formulations phytosanitaires ; nous avons ensuite confirmé dans nos situations caractérisées par des petits versants au relief énergique quelques résultats souvent rencontrés, notamment l'influence de la pluviométrie saisonnière sur les concentrations retrouvées en cours d'eau. Enfin, nous avons suivi en continu la séquence événementielle des trois cours d'eau pour estimer les flux annuels des contaminants ciblés. Ces estimations n'ont pas de signification individuelle, mais comparées les unes aux autres, elles permettent de tirer des enseignements précieux :

- La forte pression phytosanitaire exercée sur les zones à usage agricole est mise en évidence, mais l'usage de produits phytosanitaires dans les zones d'habitation est également préoccupant.
- Les lessivages par les pluies peuvent augmenter les concentrations dans une proportion de 1 à 10 en événement de crue dans nos conditions expérimentales.
- Pourtant, le flux polluant majoritaire sur une année hydrologique est chronique : ce flux « ordinaire » peut représenter les deux tiers du flux annuel.

Notre travail aura donc permis de confirmer des intuitions, ou de contredire des idées préconçues et qui se sont révélées fausses :

- A l'échelle de la parcelle, le flux sortant n'est pas nécessairement corrélé à la dimension de l'impluvium, car des nappes souterraines, éventuellement perchées et bénéficiant de la forte infiltrabilité des sols interviennent dans des mécanismes de stockages temporaires de l'eau.
- Ainsi, à nos échelles d'observation, la transformation de la pluie en débit est régie par des mécanismes qui répondent difficilement aux estimations moyennes. Cela est illustré par le fait que la ravine étudiée présente sur l'année un flux majoritaire en dehors des événements pluvieux.
- Sur les 12 mois pris en référence, les 120 pics de crue mesurés à la station Voltaire ne représentent qu'un cinquième des accélérations « flash » enregistrées au pas de temps de la minute. Cela illustre les limites du modèle de crue couramment admis.

Il est donc pertinent de mesurer les événements d'un cours d'eau et les molécules transportées par le réseau hydrographique de surface, car les cours d'eau intègrent les périétés des bassins versants associés. Il nous revient d'améliorer les mesures et leurs interprétations dans ce sens. Pour cela nous poursuivons nos recherches dans deux directions : d'une part en approfondissant la connaissance des éléments transportés, singulièrement la relation MES-Chlordécone, d'autre part en poursuivant l'observation de deux cours d'eau pour mieux interpréter les chroniques événementielles en relation avec les périétés, les aménagements et la sociologie du versant associé.

Bibliographie

Hydrologie

Arnaud P., 2006, Cartographie des débits de crues de la Martinique, Phase 1 : la pluviométrie, Cemagref, Aix en Provence, 17p

Baume JP., Belaud G., Vion PY., 2004, Eléments d'hydraulique pour l'ingénieur, Cemagref-AgroM, 180p

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

CETMEF, 2005, Notice sur les déversoirs-Synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs, Rapport Ministère des Transports, de l'Equipement, du Tourisme et de la Mer, 89p

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

Lamachere JM. et Seguis L., 1997, Nouvelles techniques de mesure des pluies, des débits liquides et solides sur parcelles agronomiques, rapport ORSTOM, 17 p

Lavabre J.& al, 2005, Estimation des débits de référence de crues à la Martinique, Phase 1 : la pluviométrie, Cemagref, Aix en Provence, 17p

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

Organisation Météorologique Mondiale, 2006, Règlement technique volume 3-Hydrologie, 104p

ORSTOM, archives 1975-1989, note de terrain, recueil données jaugeage, graphiques courbe de tarage station Voltaire, 15p

ORSTOM, 1976, Etude de l'écoulement de surface sur des petits bassins versants représentatifs dans le sud et centre de la Martinique, Compte rendu d'activité, 31p

Instrumentation et transferts de polluants

Catan Ph., 2005, Quelques éléments clés sur l'origine et le mode de pollution des eaux par les produits phytosanitaires utilisés en agriculture »

Charlier JB., 2007, Fonctionnement et modélisation hydrologique d'un petit bassin versant cultivé en milieu tropical, Thèse Lisah-Cirad Guadeloupe-Université Montpellier II, 246p

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

Domange N., 2005, Etude des transferts de produits phytosanitaires à l'échelle de la parcelle et du bassin versant viticole (Rouffach, Haut Rhin), Thèse ULP, 328p

Garon Boucher-Margoum C., 2003, Contribution à l'étude du devenir des produits phytosanitaires lors de l'écoulements dans les fossés : caractérisation physico-chimique et hydrodynamique, thèse Cemagref, 282p

Gouy V. & al, 1998, Suivi du transfert des produits phytosanitaires sur les bassins versant et exemple de modélisation globale, Revue Ingénieries n°13, p3 à 14

Lacas JG., 2005, Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons, thèse Cemagref-Université Montpellier II, 310p

Marie P., Lucas G., 2005, *Etude spatiale des risques agro-environnementaux*, Rapport annexé au rapport intermédiaire du programme Liteau II, 60p

Marie P., Pinte K., 2006, *Evaluer les risques agro-environnementaux à l'échelle de territoires : Diagnostic de l'érosion hydrique des sols agricoles sur le bassin versant de la baie du Rober*, Cahiers du PRAM n°6, p 36 à 40

Mathys N., 2006, Analyse et modélisation à différentes échelles des mécanismes d'érosion et de transport de matériaux solides. Cas des petits bassins versants de montagne sur marne (Draix, Alpes de Haute Provence), thèse INP Grenoble, 346 p

Pinte K., 2006, *Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert en Martinique*. Mémoire de stage de fin d'études de Master « agronomie-environnement », INA-PG, Projet DIACT, 52p + annexes

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

DCE

MEDD, Agences de l'Eau, 2003, Système d'évaluation de la qualité de l'eau, version 2, 40p

CR, CG, MATE, Comité de bassin, 2002, SDAGE de la Martinique, volume 1 à 3, 315p

DIREN, ODE, Comité de bassin, 2004, SDAGE de la Martinique-tableaux de bord, 272p

DIREN, 2007, Loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006, powerpoint, 141 diapositives

ANNEXES**ANNEXE 1****DCE****Evaluation de l'état chimique des eaux (cours d'eau et plans d'eau)****Substances prioritaires : valeurs-seuils provisoires**

(si valeurs supérieures : non-respect du bon état chimique)

Les 33 substances de l'annexe X et les 8 substances de l'annexe IX de la DCE.

	Substance	N° CAS	Code SANDRE	Origine du seuil	Valeur-seuil Eau (µg/l) *	Koc	Valeur-seuil sur sédiments (µg/kg) **
1	ALACHLORE	15972-60-8	1101	NP	0,3		/
2 et I-3	ANTHRACENE	120-12-7	1458	A	0,1	15800	34
3	ATRAZINE	1912-24-9	1107	NP	0,6		/
4 et I-7	BENZENE	71-43-2	1114	A	1,7		/
5	PENTABROMODIPHÉNYLÉTHÉR	32534-81-9	1921	NP	0,0005	556801	6
	OCTA-BROMODIPHÉNYLÉTHÉR	32536-52-0				1363040	/
	DECA-BROMODIPHÉNYLÉTHÉR	1163-19-5				1590000	/
6 et I-12	CADMIUM	7440-43-9	1388	A	5		Bruit de fond
7	C10-13 CHLOROALCANES	85535-84-8	1955	NP	0,4	199526	1750
8	CHLORFENVINPHOS	470-90-6	1464	NP	0,06	479	0,7
9	CHLORPYRIFOS	2921-88-2	1083	NP	0,03	5012	3
10 et I-59	1,2 DICHLOROETHANE	107-06-2	1161	A	10		/
11	DICHLOROMETHANE	75-09-2	1168	NP	20		/
12	DI (2-ETHYLHEXYL)PHTHALATE (DEHP)	117-81-7	1461	NP	1,3	165000	4720
13	DIURON	330-54-1	1177	NP	0,2		/
14	ENDOSULFAN	115-29-7	1743	NP	0,005	6770	0,7
15	FLUORANTHENE	206-44-0	1191	NP	0,09	41700	83
16 et I-83	HEXACHLOROBENZENE	118-74-1	1199	A	0,03	130000	85
17 et I-84	HEXACHLOROBUTADIENE	87-68-3	1652	A	0,1	32360	71
18 et I-85	HEXACHLOROCYCLOHEXANE alpha, beta, delta (chaque isomère) LINDANE	608-73-1	1200/ 1201/ 1202	A	0,1	3800	8
		58-89-9	1203	A	0,1	5460	12
19	ISOPROTURON	34123-59-6	1208	NP	0,3		/
20	PLOMB	7439-92-1	1382	NP	Bruit de fond + 0,4		Bruit de fond
21 et I-	MERCURE	7439-97-6	1387	A	1		Bruit de fond

92							
22 et I-96	NAPHTALENE	91-20-3	1517	NP	2,4	871	48
23	NICKEL	7440-02-0	1386		Bruit de fond + 1,7		Bruit de fond
24	NONYLPHENOL 4-para-nonylphénol	25154-52-3 104-40-5	1957 1959	NP	0,3	5360	35
25	OCTYLPHENOL para-ter-octylphénol	1806-26-4 140-66-9	1920 1959	NP	0,06	18400	24
26	PENTACHLOROBENZENE	608-93-5	1888	NP	0,003	40000	3
27 et I-102	PENTACHLOROPHENOL	87-86-5	1235	A	2	3800	170
28 et I-99	HAP BENZO (a)PYRENE BENZO (b)FLUORANTHENE BENZO(g, h, i)PERYLENE BENZO(k)FLUORANTHENE INDENO(1,2,3-cd)PYRENE	50-32-8 205-99-2 191-24-2 207-08-9 193-39-5	1115 1116 1118 1117 1204	A A NP NP NP	0,05 0,05 0,016 0,03 0,016	6920000 156000 406000 22000 1600000	7600 170 140 14 560
29	SIMAZINE	122-34-9	1263	NP	0,7		/
30	TRIBUTYLETAIN tributylétain-cation	688-73-3 36643-28-4	1820	NP	0,0001	3750	0,01
31 et I-117	TRICHLOROBENZENE	12002-48-1	1630	A	0,4	1400	13
31 et I-118	1,2,4-TRICHLOROBENZENE	120-82-1	1283	A	0,4	1430	13
32 et I-23	TRICHLOROMETHANE (chloroforme)	67-66-3	1135	A	12		/
33	TRIFLURALINE	1582-09-8	1289	NP	0,03	8500	6
I-1	ALDRINE	309-00-2	1103	A	0,01	48500	10
I-13	TETRACHLORURE DE CARBONE	56-23-5	1276	A	12		/
I-46	TOTAL DDT	50-29-3		A	25	152000	83600
	PARA-PARA DDT		1144	A	10	152000	33400
I-71	DIELDRINE	60-57-1	1173	A	0,01	14125	3
I-77	ENDRINE	72-20-8	1181	A	0,005	11420	1
I-111	PERCHLOROETHYLENE (tétrachloroéthylène)	127-18-4	1272	A	10		/
I-121	TRICHLOROETHYLENE	79-01-6	1977	A	10		/
I-130	ISODRINE	465-73-6	1207	A	0,005	105682	11

/ : absence de valeur. * : concentration totale dans les eaux. ** : La valeur seuil dans les sédiments est calculée à partir de la valeur seuil dans l'eau selon : $[VS_{sed}] = [VSeau] \times (0.696 + 0.022 Koc)$: les chiffres ont été arrondis. Koc : coefficient de partage avec le carbone organique du sol En grisé : support le plus pertinent pour certaines molécules. A : valeurs de l'arrêté du 20 avril 2005. NP : valeurs du « non paper » de juin 2004 élaboré par la Commission européenne I-xxx : substances de la liste I de la directive 76/464/CE. N° CAS : Chemical Abstract Services.

Source : Circulaire DCE 2005/12 n°14 du 28 juillet 2005 relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface (cours d'eau, plans d'eau), en application de la directive européenne 2000/60/DCE du 23 octobre 2000, ainsi qu'à la démarche à adopter pendant la phase transitoire (2005-2007).

ANNEXE 2

Suivi ciblé en crue

analyse sur eau brute

Gaschette

2,4D et Diuron

Crue 1 du 3 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Autre code
02/07/2008	16h38	119	JC1G1		JG1
03/07/2008	7h30	NC	JC1G2		JG2

Crue 3 du 31 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Com.
30/07/2008	16h00	120	JC3G0		
31/07/2008	10h55	198	JC3G1		
31/07/2008	11h08	260	JC3G2		
31/07/2008	11h23	450	JC3G3		multirésidus
31/07/2008	11h30	690	JC3G5		
31/07/2008	11h48	650	JC3G6		
31/07/2008	12h00	505	JC3G8		multirésidus
31/07/2008	13h39	248	JC3G9		
31/07/2008	17h21	160	JC3G10		

Crue 4 du 29 août 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse
29/08/2008	12h05	545	JC4G1	
29/08/2008	12h11	505	JC4G2	
29/08/2008	12h19	450	JC4G3	
29/08/2008	12h28	390	JC4G4	
29/08/2008	12h53	320	JC4G5	

Crue 5 du 19 septembre 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Com.
19/09/2008	9h12	180	JC5G1		
19/09/2008	9h26	235	JC5G2		

19/09/2008	9h30	400	JC5G3		
19/09/2008	9h31	500	JC5G4		
19/09/2008	9h33	600	JC5G5		
19/09/2008	9h36	700	JC5G6		
19/09/2008	9h40	800	JC5G7		
19/09/2008	9h48	850	JC5G8		
19/09/2008	9h53	950	JC5G9		
19/09/2008	9h58	1100	JC5G10		
19/09/2008	10h06	1050	JC5G11		multirésidus
19/09/2008	10h11	900	JC5G12		
19/09/2008	10h17	700	JC5G13		
19/09/2008	10h24	600	JC5G14		
19/09/2008	10h35	800	JC5G15		
19/09/2008	10h40	1000	JC5G16		
19/09/2008	10h49	1200	JC5G17		multirésidus
19/09/2008	11h09	1050	JC5G18		
19/09/2008	11h28	850	JC5G19		
19/09/2008	11h52	450	JC5G20		
19/09/2008	12h23	400	JC5G21		
19/09/2008	17h40	190	JC5G22		

Voltaire

Glyphosate, AMPA, glufosinate

Crue 1 du 03 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Autre code
02/07/2008	17h12	260	JC1V1		V1C1
03/07/2008	7h30	289	JC1V2		JV2

Crue 3 du 31 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	
30/07/2008	16h30	270	JC3V0	
31/07/2008	11h13	340	JC3V1	
31/07/2008	11h26	NC	JC3V1bis	
31/07/2008	11h41	830	JC3V2	
31/07/2008	11h52	880	JC3V3	
31/07/2008	12h02	820	JC3V4	
31/07/2008	12h12	768	JC3V5	
31/07/2008	12h22	720	JC3V6	
31/07/2008	12h32	700	JC3V7	
31/07/2008	13h28	558	JC3V8	
31/07/2008	17h08	370	JC3V9	

Mansarde aval**Oxamyl****Crue 3 du 31 juillet 2008**

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	
31/07/2008	11h23	>220	AC3MV1	
31/07/2008	12h20	78	AC3MV2	
31/07/2008	12h49	59	AC3MV3	
31/07/2008	13h12	49	AC3MV4	
31/07/2008	16h46	18	AC3MV5	

Crue 4 du 29 août 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	
29/08/2008	11h59	130-135	AC4MV1	
29/08/2008	12h18	85-90	AC4MV2	
29/08/2008	12h38	58	AC4MV3	
29/08/2008	13h09	45	AC4MV4	
29/08/2008	16h53	47	AC4MV5	

Glyphosate, AMPA, glufosinate**Crue 1 du 3 juillet 2008**

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Autre code
03/07/2008	7h50	7.5	JC1MV1		JMV2

Crue 2 du 16 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	
16/07/2008	19h54	41	JC2MV1		

Crue 3 du 31 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Com.
31/07/2008	11h23	> 220	AC3MV1		multirésidus

Crue 4 du 29 août 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse
29/08/2008	11h59	130-135	JC4MV1	

29/08/208	12h18	85-90	JC4MV2	
29/08/208	12h38	58	JC4MV3	
29/08/208	13h09	45	JC4MV4	
29/08/208	16h53	47	JC4MV5	

Mansarde amont

travaux dans la ravine, eau non canalisée

Glyphosate, AMPA, glufosinate**Crue 1 du 3 juillet 2008**

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse	Autre code
03/07/2008	08h01	NC	JC1MM1		JMM2

Crue 2 du 16 juillet 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse
16/07/2008	20h03	NC	JC2MM1	

Crue 4 du 29 août 2008

Date	Heure	Niveau eau (en mm)	Prélèvements	Analyse
29/08/2008	12h13	NC	JC4MM1	
29/08/2008	12h44	NC	JC4MM2	
29/08/2008	17h12	NC	JC4MM3	

ANNEXE 3Epandage de produits sur les zones d'étude en 2007 et 2008

Culture	Nom et surface de culture	Apports en pesticides (molécules actives)	Apports en 2007 (date d'application)	Apports en 2008 (date d'application)
Banane	Marc Nouvet (0,36 ha)	Glyphosate	16/05 24/08 05/09 28/11	Pas d'apport
Banane	Violetta Laverne (0,88 ha)	Glyphosate	Pas de renseignements	Début juin Du 25/08 au 28/08 en bordures
		Glufosinate	Non utilisé	Début juin Et du 25/08 au 08/09
		Fosthiazate	Non utilisé (dernière application juillet 2006)	Remplacé par Oxamyl
		Oxamyl		20/07
Canne	Joël Chiffirin (2,44ha)	Diuron	08/07	22/05
		Glyphosate (bordures)		Prévu le 29/06, mais non réalisé 06/07
Canne	Philippe Duchamp (22,39 ha)	Diuron et 2,4D	Juillet	02/07 au 04/07 08 au 11/07 15/07
Canne	Jean Pierre Plocus (1,24ha)	2,4D	Juillet	Mi juillet
		Asulame		
Canne	Marie Annette Radon (1,11ha)	2,4D	Juillet	Mi juillet
		Asulame		
Canne	Marie Annette Soter (2,49 ha)	Diuron et 2,4D	juillet	Mi juillet
Canne	Tony Bellune (2,49 ha)	Diuron	juillet	26/07
		Glyphosate	juillet	

ANNEXE 4

Concentrations moyennes, nombre de mesures et écarts types – suivis mensuels et en crue – analyse eau brute

Famille ->molécule Unité : µg/l (microgrammes par litre)	Gaschette	Mansarde amont	Mansarde aval	Voltaire	Gash.	M.am	M.av	Vol.	Gash.	M.am	M.av	Vol.
Fongicides hétérocycles soufrés -> Difénoconazole			0.32				1					
Fongicides Triazoles -> Azaconazol	0.04				1							
Fongicides Triazoles -> Propiconazole			0.12				2				0.01	
Herbicides amides -> Métolachlore	0.59				9				0.69			
Herb. amino phosph. -> Gluphosinate d'ammonium		-	-	0.07		2	2	11		-	-	0.12
Herbicides amino phosphonates -> Glyphosate	0.38	1.57	0.51	1.02	1	3	6	12		2.71	0.61	2.59
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	1.04	0.16	0.17	-	31	1	1	1	3.30			
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-MCPA		0.06	0.06			1	1					
Herbicides benzonitriles -> Dichlobenil	0.65				2				0.49			
Herbicides triazines -> Amétryne	0.06				4				0.06			
Herbicides triazines -> Terbutryne		0.11	-			3	1			0.15		
Herbicides Triazinones -> Hexazinone	0.05				11				0.07			
Herbicides Urées substitués -> Diuron	6.09			0.02	38			5	9.77			0.01
Herbicides Urées substitués -> Métoxuron	1.30				1							
Herbicides Urées substitués -> Monuron	0.28				18				0.26			
											-	
Insecticides carbamates -> Oxamyl			-				5				0.01	
Insecticides divers -> Anthraquinone	0.19				2				0.14			
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	0.17		0.45	0.02	15		22	8	0.27		0.32	0.01
Insect. organo-chlorés -> Chlordécone 5b hydro	0.01		0.02		2		14		-		0.02	
Insecticides organo-chlorés -> Endosulfan sulfate				0.02				1				
Insecticides organo-chlorés -> HCH Alpha	0.05				4				0.07			
Insecticides organo-chlorés -> HCH Beta	0.07				6				0.08			
Insecticides phénylpyrazoles -> Fipronil				0.01				1				
								1				
M. métab -> 1-(3,4 DichloroPhényl)-3-Méthyl Urée	0.88			0.02	18			3	1.47			0.03
M. métabolites -> 1-(3,4-DichloroPhényl) Urée	0.07				17				0.17			
M. m. -> Ac. Am. méthyl phosphonique (AMPA)	0.37	0.48	0.59	1.22	7	4	6	18	0.24	0.30	0.41	1.63

ANNEXE 5

Suivis mensuels - Analyses eau brute

(Chaque valeur de concentration est issue d'une seule analyse)

STATION GASHETTE

Famille -> molécule	Année	Mois	Conc° (µg/l)
Herbicides amides -> Métolachlore	2007	10	1.80
	2007	11	0.02
	2007	12	0.07
	2008	9	1.34
	2008	10	0.17
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	2007	9	0.03
	2007	10	0.32
	2007	11	0
	2007	12	0
	2008	8	0.03
	2008	9	0.03
Herbicides triazines -> Amétryne	2007	11	0.14
	2008	3	0.03
	2008	4	0.02
	2008	9	0.03
Herbicides Triazinones -> Hexazinone	2007	9	0.08
	2007	10	0.22
	2007	11	0.11
	2007	12	0.1
	2008	1	0
	2008	2	0
	2008	3	0
	2008	4	0
Herbicides Urées substitués -> Chlortoluron	2007	11	0
Herbicides Urées substitués -> Diuron	2007	9	0.41
	2007	10	2.9
	2007	11	1.34
	2007	12	0.9
	2008	1	0.54
	2008	2	0.43
	2008	3	0.38
	2008	4	0.08
	2008	5	0.11
	2008	6	0.07
	2008	7	0.09
	2008	8	0.51
2008	9	0.26	

	2008	10	1.9
Herbicides Urées substitués -> Fénuuron	2008	8	0
Herbicides Urées substitués -> Monuron	2007	9	0.55
	2007	10	0.04
	2007	11	0.09
	2007	12	0.32
	2008	1	0.19
	2008	2	0.41
	2008	3	0.36
	2008	4	0.11
	2008	5	0.21
	2008	6	0.25
	2008	7	0.13
	2008	8	0.121
	2008	9	1.12
	2008	10	0.54
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	2007	9	0.04
	2007	10	0.04
	2007	11	0.04
	2008	1	0.03
	2008	2	0.04
	2008	4	0.04
	2008	5	0.03
	2008	6	0.02
	2008	8	0.04
	2008	9	0.2
	2008	10	0.1
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone 5b hydro	2008	4	0.01
	2008	8	0.01
Insecticides organo-chlorés -> HCH Alpha	2008	9	0
Insecticides organo-chlorés -> HCH Beta	2008	4	0.07
	2008	9	0
	2008	10	0.01
Métabolites métabolites -> 1-(3,4 DichloroPhényl)-3-Méthyl Urée	2007	9	0.32
	2007	10	0.35
	2007	11	0.09
	2007	12	0.16
	2008	1	0.16
	2008	2	0.24
	2008	3	0.26
	2008	4	0.26
	2008	5	0.22
	2008	6	0.18
	2008	7	0.1
	2008	8	0.56

	2008	9	0.82
	2008	10	0.25

Métabolites métabolites -> 1-(3,4-DichloroPhényl) Urée	2007	9	0
	2007	10	0.03
	2007	11	0.02
	2007	12	0
	2008	1	0
	2008	2	0
	2008	3	0.02
	2008	4	0.02
	2008	5	0
	2008	6	0.02
	2008	8	0.03
	2008	9	0.03
	2008	10	0

Métabolites métabolites -> Acide Amino méthyl phosphonique (AMPA)	2007	9	0.1
	2007	11	0.71
	2008	1	0.3
	2008	2	0.11
	2008	7	0.43
	2008	8	0.28

MANSARDE AMONT (Suite de l'ANNEXE 5)

Famille -> molécule	Année	Mois	(µg/l)
Herbicides amino phosphonates -> Glyphosate	2007	9	4.7
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	2007	9	0.16
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-MCPA	2007	9	0.06
Herbicides triazines -> Terbutryne	2007	9	0.28
	2007	10	0.05
	2007	11	0
Métabolites métabolites -> Acide Amino méthyl phosphonique (AMPA)	2007	9	0.4
	2007	11	0.8

STATION MANSARDE AVAL

Famille -> molécule	Année	Mois	(µg/l)
Fongicides hétérocycles soufrés -> Difénoconazole	2008	2	0.32
Fongicides Triazoles -> Propiconazole	2007	9	0.12
Herbicides amino phosphonates -> Glyphosate	2007	9	1.6
	2007	11	0.2
	2008	2	0.7
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	2007	9	0.17
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-MCPA	2007	9	0.06
Herbicides triazines -> Terbutryne	2007	10	0
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	2007	9	0.16
	2007	10	0.1
	2007	11	0.37
	2008	2	0.53
	2008	10	0.35
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone 5b hydro	2008	10	0.01
Métabolites métabolites -> Acide Amino méthyl phosphonique (AMPA)	2007	9	1.2
	2007	11	0.7
	2008	2	0.8

STATION MANSARDE PONT

Famille -> molécule	Année	Mois	(µg/l)
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	2008	6	0.04
	2008	8	0.04
	2008	9	0.1
	2008	10	0.09
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone 5b hydro	2008	6	0.01

STATION VOLTAIRE (Suite de l'ANNEXE 5)

Famille -> molécule	Année	Mois	Conc° (µg/l)
Herbicides amino phosphonates -> Glyphosate	2007	9	9.2
Herbicides aryloxyacides -> 2,4-D	2007	10	0
Herbicides Urées substitués -> Diuron	2007	10	0.02
	2008	1	0.03
	2008	2	0.02
	2008	6	0
	2008	10	0.03
Insecticides organo-chlorés -> Chlordécone	2007	9	0.01
	2007	10	0.02
	2007	11	0.01
	2008	2	0.02
	2008	4	0.01
	2008	6	0.01
	2008	10	0.03
Insecticides organo-chlorés -> Endosulfan sulfate	2008	3	0.02
Insecticides organo-phosphorés -> Pyrimiphos méthyl	2008	4	0
Insecticides phénylpyrazoles -> Fipronil	2008	10	0.01
Métabolites métabolites -> 1-(3,4 DichloroPhényl)-3-Méthyl Urée	2008	1	0
	2008	6	0.05
	2008	10	0
Métabolites métabolites -> Acide Amino méthyl phosphonique (AMPA)	2007	9	1.8
	2007	11	1.1
	2007	12	0.2
	2008	1	0.6
	2008	2	0.15
	2008	7	0.69
	2008	8	0.27