



HAL
open science

Analyse du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Bourville et des transferts de pesticides associés

Rachel L'Helgoualc'H

► **To cite this version:**

Rachel L'Helgoualc'H. Analyse du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Bourville et des transferts de pesticides associés. Science des sols. 2016. dumas-01408640

HAL Id: dumas-01408640

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01408640>

Submitted on 5 Dec 2016

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

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

Année universitaire : 2015-2016

Spécialité :

Génie de l'environnement

Spécialisation :

Sol, Eau, Hydrosystème

Mémoire de fin d'études

d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage

d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Analyse du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Bourville et des transferts de pesticides associés

Par : Rachel L'HELGOUALC'H



Soutenu à Rennes le 16 septembre 2016

Devant le jury composé de :

Président : Christian WALTER

Maître de stage : Laï Ting PAK

Enseignant référent : Zahra THOMAS

Membre du jury :

Olivier CERDAN, BRGM (Érosion des sols et transfert sédimentaire), Orléans

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Remerciements :

Je souhaite remercier les personnes ayant contribué au bon déroulement de mon stage et à la réalisation de mon mémoire.

Je tiens à remercier ma maitre de stage Lai Ting Pak pour m'avoir accompagnée tout au long de ce stage ; pour sa disponibilité et ses conseils qui m'ont été précieux. Merci à Jean-François Ouvry pour l'aide qu'il a pu m'apporter par ses connaissances agronomiques et hydrologiques du territoire du Pays de Caux.

Je tiens à remercier tous les membres de l'AREAS, Corinne, Florence O, Florence W, Jean-Baptiste et Jérôme pour leur accueil chaleureux et leurs bons conseils pour découvrir la Normandie, et merci particulièrement à Anthony, Maryline et Mathieu pour avoir su nous occuper les soirs à Saint Valery en Caux.

Enfin je pense à mes collègues stagiaires et colocataires, Florian et Louis, pour ces bons moments passés au gîte !

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
1. PROBLEMATIQUE DES RUISSELLEMENTS DU PAYS DE CAUX ETUDIEE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE BOURVILLE.....	2
1.1. Contexte de l'étude : un territoire sensible au ruissellement, à l'érosion et au transfert de produits phytosanitaires	2
1.1.1. Contexte géologique et pédologique du Pays de Caux : conditions favorisant le ruissellement et l'érosion	2
1.1.2. Contexte agricole : vulnérabilité et modalité de transfert de pesticides.....	4
1.2. Présentation du bassin versant de Bourville et des données.....	4
1.2.1. Choix du bassin versant de Bourville.....	4
1.2.2. Dispositif de mesure multi-station	6
1.1.3. Présentation des données hydrologiques et agronomiques	7
2. ANALYSE GLOBALE DES CAMPAGNES 2008-2014	10
2.1. Bilan annuel.....	10
2.1.1. Occupation du sol.....	10
2.1.2. Apports en produits phytosanitaires	10
2.1.3. Pluviométrie	11
2.1.4. Ruissellement	12
2.1.5. Exports de substances actives	13
2.2. Saisonnalité du bassin versant de Bourville	15
2.2.1. Importante saisonnalité des apports en produits phytosanitaires	15
2.2.2. Saisonnalité pluviométrique peu marquée	15
2.2.3. Forte saisonnalité des ruissellements	15
2.2.4. Saisonnalité des exports de substances actives	16
3. ANALYSE EVENEMENTIELLE : TYPOLOGIE HYDROLOGIQUE DES « EVENEMENTS PLUIE - DEBIT »	17
3.1. Analyses des événements Pluie-Débit à la station BRVL.....	17
3.1.1. Données et choix des indicateurs.	17
3.1.2. Résultats de l'analyse en composante principale.	18
3.1.3. Résultats de la classification ascendante hiérarchique.	19
3.1.4. Typologie établie par l'analyse statistique descriptive	20
3.2. Analyses multi-stations des événements Pluie-Débit : prise en compte de la variabilité spatiale.....	23
3.2.1. Données et choix des indicateurs	23
3.2.2. Résultats de l'analyse descriptive.....	23
3.3. Bilan et discussion sur la double typologie hydrologique.....	29
4. ANALYSE EVENEMENTIELLE DES DONNEES DE QUALITE D'EAU.....	30
4.1. Complétion de la typologie des événements Pluie-Débit par les données de qualité d'eau	30
4.1.1. Association des événements Pluie-Débit avec les analyses	30
4.1.2. Résultats de la typologie des exports et des concentrations des substances actives	31

4.2. Etude de cas : exemple de suivi d'analyses sur la période juin 2012 à décembre 2012	32
4.2.1. Contexte et présentation des événements Pluie-Débit étudiés	32
4.2.2. Résultats de la typologie sur les exports globaux	34
4.2.3. Résultats de la typologie sur le type des substances actives	34
4.2.4. Résultats sur l'évolution des contributions des différentes zones du bassin versant	35
4.3. Bilan et discussion de l'analyse de qualité d'eau par la typologie	37
CONCLUSION :	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :	39
REFERENCES SITOGRAPHIQUES :	40
ANNEXES :	41

Table des Figures :

Figure 1 : Carte du plateau loessique d'Europe de l'Ouest (Source :Lewis, 2015)	3
Figure 2 : Etape de formation d'une croûte de battance par la description du faciès (Source : Boiffin 1986 ; associée aux photos de suivi des états de surface par l'AREAS	3
Figure 3 : Bassin versant de Bourville avec les différentes stations de mesure.....	7
Figure 4 : Photo (a) et schéma (b) des dispositifs de mesure de la station BRVL (Source : AREAS).....	8
Figure 5 : Exemple de frises temporelles d'occupation du sol et d'interventions sur les parcelles de Bourville, les jalons représentant des interventions physiques (en-dessous de la frise) ou chimiques (au-dessus).....	9
Figure 6 : Occupation du sol du bassin versant de Bourville (1045 ha) sur les campagnes 2008 à 2014, NA (%) : pourcentage de surface non identifiée.....	10
Figure 7 : Quantité de PPS apportés sur le bassin de Bourville par fonction pour les campagnes 2008 à 2014	11
Figure 8 : Pluie à BRVL : lame tombée et nombre d'averses pour chaque catégorie d'averses par campagne ; NA(j) : nombre de jours sans donnée	11
Figure 9 : Ruissellement à BRVL : lame ruisselée et nombre de crues pour chaque catégorie de crues par campagne ; NA(j) : nombre de jours sans donnée.....	12
Figure 10 : Export de substances actives par fonction selon le volume ruisselé analysé par campagne	14
Figure 11 : Moyennes mensuelles des apports (a), de la pluie (b), du ruissellement (c) et des exports de SA (quantités et concentrations) (d) ainsi que le nombre d'averses et de crues recensées sur le bassin versant de Bourville	16
Figure 12 : Résultat du 1 ^{er} plan factoriel de l'ACP pour les variables utilisées (a) et des classes des événements Pluie-Débit issues de la CAH (b)	19
Figure 13 : Découpage en 6 classes du dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des événements Pluie-Débit par la méthode d'agrégation de Ward	20
Figure 14 : Caractéristiques des 6 classes établies par CAH par les 10 variables pluviométriques et hydrologiques de BRVL	21
Figure 15 : Résultats de l'ACP sur les 75 événements P-Q par 13 variables multi-stations : (a) graphique des variables sur le 1er plan factoriel ; (b) répartition des individus après CAH en 5 classes	24
Figure 16 : Caractéristiques des 5 classes établies par CAH sur les 13 variables multi-stations (Annexe X)	25
Figure 17 : Hyétoigrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 d'événements P-Q de la classe A (a) et C (b), et leurs caractéristiques [Cr : coefficient de ruissellement]	26
Figure 18 : Hyétoigrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 de deux événements P-Q de la classe B et leurs caractéristiques : (a) exemple sans ruissellement à FDCM2 et (b) exemple de ruissellement généralisé.....	27
Figure 19 : Hyétoigrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 d'événements P-Q de la classe D (a) et E (b) et leurs caractéristiques	28

Figure 20 : Concentration moyenne des analyses en SA et total des exports par classe sur les campagnes 2008-2014	32
Figure 21 : Prélèvements des échantillons et caractéristiques de l'analyse des événements P-Q 86-87 (a) et des 3 analyses de l'événement P-Q 88 (b).	33
Figure 22 : Exports et part des exports pour chaque analyse selon leur fonction et le type de culture ciblée.....	35

Table des tableaux :

Tableau 1 : Paramètres pour l'utilisation des formules caractérisant le bassin versant de Bourville	5
Tableau 2 : Détermination du temps de concentration de Bourville.....	5
Tableau 3 : Bilan des analyses effectuées sur les échantillons de BRVL pour les campagnes 2008 à 2014 (* : sur 4 analyses les recherches ont été faites uniquement sur les flacons en polypropylène donc sur un nombre très réduit de SA)	13
Tableau 4 : Répartitions des 75 événements entre les classes issues de la CAH de BRVL et les classes issues de la CAH multi-station.....	29
Tableau 5 : Qualité de représentation des associations analyse - classe	31
Tableau 6 : Bilan de la complétion des analyses sur les différentes classes	32
Tableau 7 : Caractéristiques des dosages des SA et des MES sur les 7 analyses étudiées	33
Tableau 8 : Exemples de dosages de 4 SA sur les analyses de l'événement P-Q 88.....	36

INTRODUCTION

Le Pays de Caux, situé en Seine Maritime, présente un sol sensible à l'érosion hydrique et au ruissellement (Le Bissonnais *et al.*, 1998). De nombreuses conséquences hydrologiques sont observables dans la région : inondations, coulées de boues, pertes de terres et appauvrissement des sols agricoles (Ronfort *et al.*, 2011). C'est une région fortement agricole et l'utilisation de produits phytosanitaires est fréquente. Cette combinaison (ruissellements et applications de produits phytosanitaires) génère des transferts de produits phytosanitaires vers les eaux de surface. Il y a alors un risque de contamination des masses d'eau (AESN, 2016). Depuis 2000 la directive cadre sur l'eau (DCE) a été mise en place à l'échelle européenne afin de protéger et restaurer les milieux aquatiques, l'objectif initial étant d'atteindre un « bon état des masses d'eau » en 2015. Ce bon état passe par un bon état physique, écologique et chimique par des concentrations adéquates en substances actives (DGALN, 2014). En effet, les conséquences de fortes concentrations des produits phytosanitaires dans les eaux de surface sont multiples : elles sont d'ordre sanitaire et économique (non-conformité des eaux de pompage, des zones de pêche et de baignade) mais aussi écologique par l'altération des écosystèmes aquatiques. Ainsi, en parallèle à la DCE, de nombreux suivis se sont développés pour quantifier et limiter le transfert de substances actives dans les milieux aquatiques.

Le programme « Pesticéros » développé par l'AREAS et qui a débuté en 2010, cherche à quantifier les flux des produits phytosanitaires dans les eaux de ruissellement au sein d'un bassin versant agricole, limoneux et érosif. Ce suivi est réalisé sur le bassin versant de Bourville d'une superficie de 10 km². Le bassin a été instrumenté de plusieurs stations de mesure le long des thalwegs et à l'exutoire afin d'enregistrer la pluie, le ruissellement et de prélever des échantillons de ruissellement à travers le dosage de plus de 200 substances actives. L'objectif de cette instrumentation est de quantifier et de connaître les conditions de transferts des substances actives en milieu érosif et ruisselant afin de permettre aux acteurs du bassin versant la mise en place de solutions pour réduire les impacts des usages des produits phytosanitaires.

Objectifs du stage :

La mission de ce stage s'intègre dans ce programme. Elle s'intéresse à l'établissement de connaissances sur le fonctionnement hydrologique du bassin pour pouvoir étudier plus finement les transferts des substances actives. En effet, le ruissellement est un vecteur majeur des transferts de substances actives (Carluer *et al.*, 1996). A l'échelle du bassin versant, de nombreux paramètres sont à prendre en compte pour comprendre les transferts. En plus, des propriétés physico-chimique de la substance active et des conditions climatiques ; la variabilité spatiale naturelle (topographie, nature du sol) ou d'origine humaine (occupation du sol, aménagement du territoire) influencent fortement le départ et le transfert des substances actives (Lecomte, 1999). Cette forte hétérogénéité du milieu et des substances actives complexifie les études globales des transferts à l'échelle du bassin (Louchart *et al.*, 2004 ; Stehle *et al.*, 2016).

Pour approcher le fonctionnement hydrologique d'un bassin versant, Dubernet *et al.*, (2006) propose de réaliser une typologie des événements ruisselants. En effet, selon les caractéristiques des ruissellements, les actions à mettre en place pour réduire leurs conséquences sont différentes. Des aménagements de zones tampons sont déjà connus pour réduire les ruissellements et piéger les substances actives. Les bandes enherbées ou les zones humides par exemple, jouent le rôle de zone d'infiltration des ruissellements et de rétention des substances actives (Lecomte, 1999 ; Passeport *et al.*, 2013 ; Vallée *et al.*, 2015). Cependant ces aménagements ne sont efficaces que sur des événements de faible intensité.

Pour les événements plus intenses d'autres stratégies sont alors possibles (Charbonnier *et al.*, 2015) en agissant à l'échelle de la parcelle : le système agricole doit être repensé par la réduction de l'utilisation des produits phytosanitaires, la modification des dates d'application des produits phytosanitaires ou encore le changement de méthode d'application (granulés, traitements de semences) (Campbell, 2004). Les stratégies seront alors davantage axées sur le conseil que sur l'aménagement du territoire. L'enjeu est donc de comprendre quels sont les différents types de ruissellements et de risques de transferts pour adapter les types d'actions à mettre en place au sein du territoire.

L'objectif de ce stage est ainsi de valoriser une base de données (hydrologiques, pluviométriques, chimiques, et agronomiques) riche, acquise sur 7 campagnes hydrologiques (2008 à 2014) afin d'en déduire le fonctionnement du bassin versant ainsi que les périodes à risque de transferts de substances actives par classification des événements ruisselants. Des comportements particuliers au bassin versant de Bourville pourront ainsi être mis en évidence.

Une première partie est consacrée au contexte et aux enjeux liés au ruissellement au sein du Pays de Caux, ainsi que la présentation des données disponibles sur le bassin versant suivi pour étudier ces problématiques. Un bilan global sur les données disponibles est réalisé dans une seconde partie. Ce bilan permettra d'approcher la variabilité temporelle des réponses hydrologiques et des exports des produits phytosanitaires à l'exutoire du bassin versant. La troisième partie est consacrée à l'établissement de la typologie des événements ruisselants par analyse statistique descriptive. La typologie est réalisée en deux temps : la première est consacrée aux données issues de l'exutoire ; la seconde est réalisée sur des données issues des stations de mesure sur les différentes zones du bassin, permettant ainsi d'appréhender la variabilité spatiale de la contribution aux ruissellements pour chaque événement. Enfin, dans la dernière partie de ce rapport, la typologie hydrologique est complétée par les résultats de qualité d'eau.

1. PROBLEMATIQUE DES RUISSELEMENTS DU PAYS DE CAUX ETUDIEE AU SEIN DU BASSIN VERSANT DE BOURVILLE

1.1. Contexte de l'étude : un territoire sensible au ruissellement, à l'érosion et au transfert de produits phytosanitaires

1.1.1. Contexte géologique et pédologique du Pays de Caux : conditions favorisant le ruissellement et l'érosion

Le Pays de Caux se situe en Seine Maritime, il représente la principale région agricole du département. Il se situe sur des grands plateaux crayeux poreux et riche en silex noirs. Ce plateau est altéré avec de nombreuses fissurations et de pertes karstiques liées à dissolution de la craie, appelées bétoires. Cet ensemble est typique d'un paysage karstique.

La couverture pédologique est développée dans le matériau parental lœssique du Nord de l'Europe (Figure 1). Ce sont des dépôts sédimentaires meubles continentaux, d'origine éolienne et dominés par une fraction granulo-silteuse recouvrant le nord-ouest de l'Europe. Ces sols épais et bruns faiblement lessivés (Néoluvisols) sont des sols à fort potentiel agronomique.

Ces sols, de par leur texture (pauvre en argile) et leur faible teneur en matière organique (autour de 1,5 %) sont rapidement dégradés par l'action de la pluie (Le Bissonnais *et al.*, 1995 ; Steegen *et al.*, 2001) : les agrégats de sol se désagrègent par « effet splash » de la pluie

libérant de fines particules de terres facilement mobilisables. Une croûte structurale se forme par le colmatage des particules de terres : les mottes de terre sont fondues et la rugosité de surface est fortement réduite (Figure 2). L'accentuation de ce phénomène entraîne la formation d'une croûte sédimentaire (encore appelée, croûte de battance), la capacité d'infiltration est alors fortement réduite en surface, tombant à moins de 1 mm/h dans le contexte du Pays de Caux. D'après Boiffin (1986), il suffit d'un cumul de pluie de 60 mm pour que se forme une croûte de battance sur ces sols.]

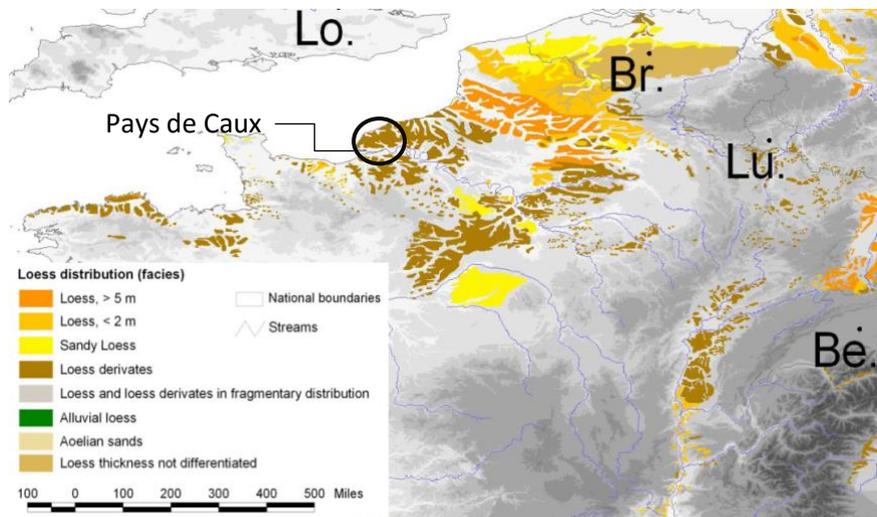


Figure 1 : Carte du plateau lœssique d'Europe de l'Ouest (Source :Lewis, 2015)

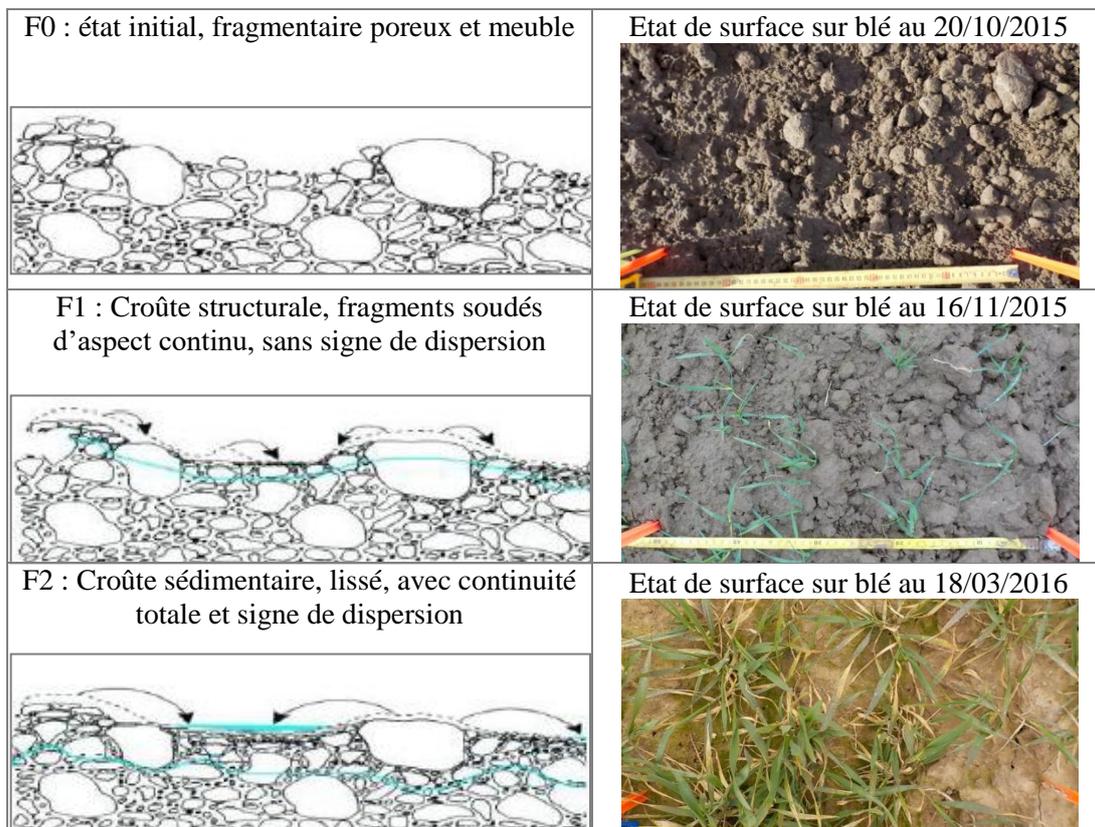


Figure 2 : Etape de formation d'une croûte de battance par la description du faciès (Source : Boiffin 1986 ; associée aux photos de suivi des états de surface par l'AREAS

La faible stabilité structurale des sols du Pays de Caux est favorable au développement de ruissellement, et de l'érosion. Le ruissellement peut être généré sous différents processus. Les

deux principaux sont rappelés ici : le ruissellement est Hortonien lorsque la capacité d'infiltration du sol est inférieure à l'intensité de la pluie (Horton, 1933), ce phénomène est d'autant plus fréquent avec la formation de la croûte sédimentaire. Le ruissellement peut aussi être généré lorsque le sol est saturé en eau, principalement pour des sols hydromorphes : le ruissellement est dit par saturation (Cappus, 1960).

Sous l'effet de la pluie, les particules de terre sont détachées du sol et sont, alors, entraînées par les eaux ruisselées (Le Bissonnais *et al.*, 1995). La genèse de l'érosion dépend fortement de l'état de surface, notamment par sa teneur en matière organique, sa texture et la présence ou non de croûte de battance, sa rugosité ou encore la couverture végétale.

De plus, par le contexte agricole du territoire, les phénomènes de ruissellements érosifs contribuent fortement à l'altération des eaux superficielles par le transfert des produits phytosanitaires.

1.1.2 Contexte agricole : vulnérabilité et modalité de transfert de pesticides

Cette région est fortement agricole avec 63 % de son territoire occupé en terres agricoles (Agreste, 2011). Grâce à la richesse agronomique des sols il y a une forte diversité des cultures (pomme de terre, blé, lin, betterave, maïs, pois, colza, escourgeon,...), qui entraîne une grande diversité d'utilisation de produits phytosanitaires (PPS). Certaines cultures telles que la pomme de terre sont très consommatrices de PPS : alors que l'IFT du blé est de 4,5 celui de la pomme de terre atteint 14,2. La diversité et l'importance de l'utilisation des PPS impliquent une forte pression de transfert des substances actives (SA) qui les composent.

Après application, le devenir des SA des PPS est très variable. Les SA se dégradent plus ou moins rapidement et peuvent alors être transférées de manière diffuse ou ponctuelle par et vers les eaux de surfaces (Gril *et al.*, 1999). Elles sont mobilisées principalement par diffusion du sol vers les eaux ruisselées et sont alors transférées en phase soluble (Leonard, 1990). Selon leur mobilité (déterminé par un coefficient de distribution K_d) elles sont également transportées par les particules de sol entraînées dans les ruissellements. Les SA peuvent alors être transférées en étant adsorbées sur les particules de sol ou subir une désorption dans la lame d'eau ruisselante. Leur transfert dépend de leurs propriétés physico-chimiques : selon leur persistance, ou temps de demi-vie (DT50), elles se dégradent plus ou moins facilement et donc sont mobilisables par le ruissellement plus ou moins longtemps après application.

Les facteurs environnementaux sont aussi déterminants dans les transferts de SA (Leu *et al.*, 2004). En effet, les pratiques culturales peuvent agir d'un facteur de 3 à 10 sur les pertes de pesticides (Carluer *et al.*, 1996 ; Voltz and Louchart, 2001). Ainsi, en plus de la variation des conditions d'application (quantité, date d'application), les caractéristiques du sol telles que la couverture végétale ou l'état hydrique au moment de l'événement pluvieux, influencent la mobilisation et le transfert de pesticides (Lecomte, 1999 ; Van Oost *et al.*, 2000 ; Steegen *et al.*, 2001 ; Carluer *et al.*, 2004). A l'échelle du bassin versant, ces facteurs ont d'autant plus d'importance du fait de la variabilité spatiale complexifiant alors les transferts de SA.

1.2. Présentation du bassin versant de Bourville et des données

1.2.1 Choix du bassin versant de Bourville

Le bassin versant de Bourville de 1045 ha situé au sein du Pays de Caux, a été choisi pour mettre en place l'observatoire des suivis de transfert de pesticides du programme Pesticéros. Avec 91 % de son territoire occupé par des surfaces agricoles, le bassin de Bourville est

représentatif des territoires agricoles. Ce bassin présente des spécificités de la région karstique avec la présence de bétouilles le long des thalwegs. De plus, une partie des installations est déjà mise en place depuis 1995 pour des analyses quantitatives des ruissellements et depuis 2007 pour des analyses qualitatives de SA transférées par les ruissellements de surface, facilitant la mise en place de l'observatoire.

1.2.1.1 Caractéristiques morphologiques

Le relief est peu marqué sur l'ensemble du bassin : 62 % de sa surface a une pente inférieure à 2 % et seulement 3 % de la surface a une pente supérieure à 10 %. La morphologie du bassin versant influence les réponses hydrologiques et peut être analysée par l'indice de compacité de Gravélius (I_G) (Roche, 1963) (Tableau 1) :

$$I_G = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Tableau 1 : Paramètres pour l'utilisation des formules caractérisant le bassin versant de Bourville

Symbole	Description	Valeur pour le bassin de Bourville
L	Longueur du plus long thalweg	4,7 km
P	Périmètre du bassin	14 km
A	Surface du bassin	10,45 km ²
I	Pente moyenne	0,015 m/m
NC	Numéro de courbe de la méthode SCS Curve Number (Annexe I)	84

L'indice de Gravélius de Bourville est égal à 1,21 correspondant à un bassin en éventail. Cette forme est caractéristique d'un bassin engendrant des crues avec un débit de pointe marqué et un faible étalement de la montée et de la décrue.

1.2.1.2. Caractéristiques du réseau hydrographique

Aucun écoulement permanent n'est relevé sur ce bassin. En effet, du fait de la nature karstique du sol, il y a de nombreuses fissurations qui favorisent l'infiltration. Le réseau hydrographique est bifide : ses deux thalwegs principaux s'établissent à 250 m de l'exutoire et atteignent 4,7 km de long dans la direction nord-sud.

Le temps de concentration (T_c) est un indicateur caractéristique de la réponse hydrologique par la morphologie et l'hydrologie du bassin ; il correspond au temps nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombée le plus en amont du bassin versant arrive à l'exutoire. Cette durée correspond théoriquement au délai entre la fin d'une pluie et la fin du ruissellement. Quatre formules sont comparées afin d'estimer ce temps caractéristique (Tableau 2).

En moyennant les différents temps de concentration calculés, on peut estimer le temps de concentration de ce bassin à 2,9 h.

Tableau 2 : Détermination du temps de concentration de Bourville

Méthode	Mockus	Ventura	Passini	Giandotti
Domaine d'application	Bassin de 4-1000 ha, sols limoneux	Bassin > 10 km ² , à faibles pentes	Bassin rural	Bassin rural
Formule	$\frac{(L * 10^3)^{0,8} * (\frac{1000}{NC} - 9)^{1,67}}{2083 * (100 * I)^{0,5}}$	$0,13 * \sqrt{A/I}$	$\frac{0,108 * (A * L)^{1/3}}{\sqrt{I}}$	$\frac{4 * \sqrt{A} + 1,5 * L}{0,8 * \sqrt{1000 * L * I}}$
Tc (h)	2,02	3,43	3,23	2,97

1.2.2 Dispositif de mesure multi-station

L'exutoire de ce bassin est suivi hydrologiquement à la station de mesure de Bourville, notée BRVL. Elle est équipée d'un dispositif qui permet de suivre l'évolution des valeurs de débit, conductivité et température. Un suivi qualitatif est réalisé par deux préleveurs automatiques des eaux de ruissellement paramétrés en fonction du volume ruisselé. Enfin, un pluviomètre est situé à 10 m de l'exutoire du bassin versant.

En plus de la station BRVL, cinq autres stations de mesure ont été mises en place entre novembre 2011 et avril 2012 permettant d'avoir des informations de l'influence de la variabilité spatiale du bassin (morphologie naturelle, aménagements hydrauliques et occupations du sol) sur la réponse hydrologique à l'exutoire (Figure 3).

Les différentes stations de mesure sont détaillées :

La station BRVU enregistre les débits au niveau de la sortie du réseau d'eaux pluviales du bourg de Bourville. Ce sous-bassin de 33 ha correspond à la partie avec la plus forte proportion de sa surface en urbain (19 %). Les surfaces urbanisées se situent à proximité immédiate de la station de mesure, contrairement aux parcelles agricoles qui se situent plus en amont. La réponse hydrologique enregistrée à BRVU correspond donc majoritairement aux ruissellements des surfaces imperméabilisées du bourg de Bourville. De plus, la station BRVU se situant à 200 m de l'exutoire BRVL, la distance d'infiltration est faible, on considère alors que les écoulements enregistrés à BRVU le sont également en totalité à BRVL.

La station de mesure FDCM se situent au niveau de 3 bétoires. Le fonctionnement très variable de ces bétoires est étudié par les 2 dispositifs de mesure situés à l'amont (FDCM1) et à l'aval (FDCM2) des bétoires. Plusieurs événements ruisselants nous témoignent de la perte aléatoire du volume ruisselé du thalweg est. La mesure à FDCM2 est alors un « point de contrôle » qui nous informe d'une potentielle contribution du thalweg est, qui draine 431 ha du bassin versant, aux ruissellements enregistrés à BRVL. Cependant, après les bétoires, le fond du thalweg est enherbé jusqu'à BRVL, représentant une distance de réinfiltration potentielle de 1,3 km.

La station FDTL est située à l'exutoire d'un sous-bassin amont de 145 ha sur le thalweg est. Sa surface est occupé à 96 % par des terres agricoles, le débit enregistré provient essentiellement du ruissellement des parcelles agricoles sans contribution urbaine (à l'exception du réseau routier). On considère alors, les mesures à FDTL comme témoins des ruissellements issus des surfaces agricoles de tout le bassin versant.

La production de ruissellement sur le thalweg ouest est aussi prise en compte par la station FDCB mais non abordée dans ce rapport, car les données ne sont pas encore traitées. En novembre 2011, un barrage de régulation des débits équipé d'un ouvrage de fuite simple et d'une surverse a été réalisé sur ce thalweg. En amont de ce sous-bassin qui draine 384 ha, deux zones n'alimentent que rarement le thalweg ouest : la « Doline » et la mare de Gonzeville correspondent à des zones d'affaissements de sol, les débits doivent alors être importants pour qu'il y ait une contribution au ruissellement du thalweg.

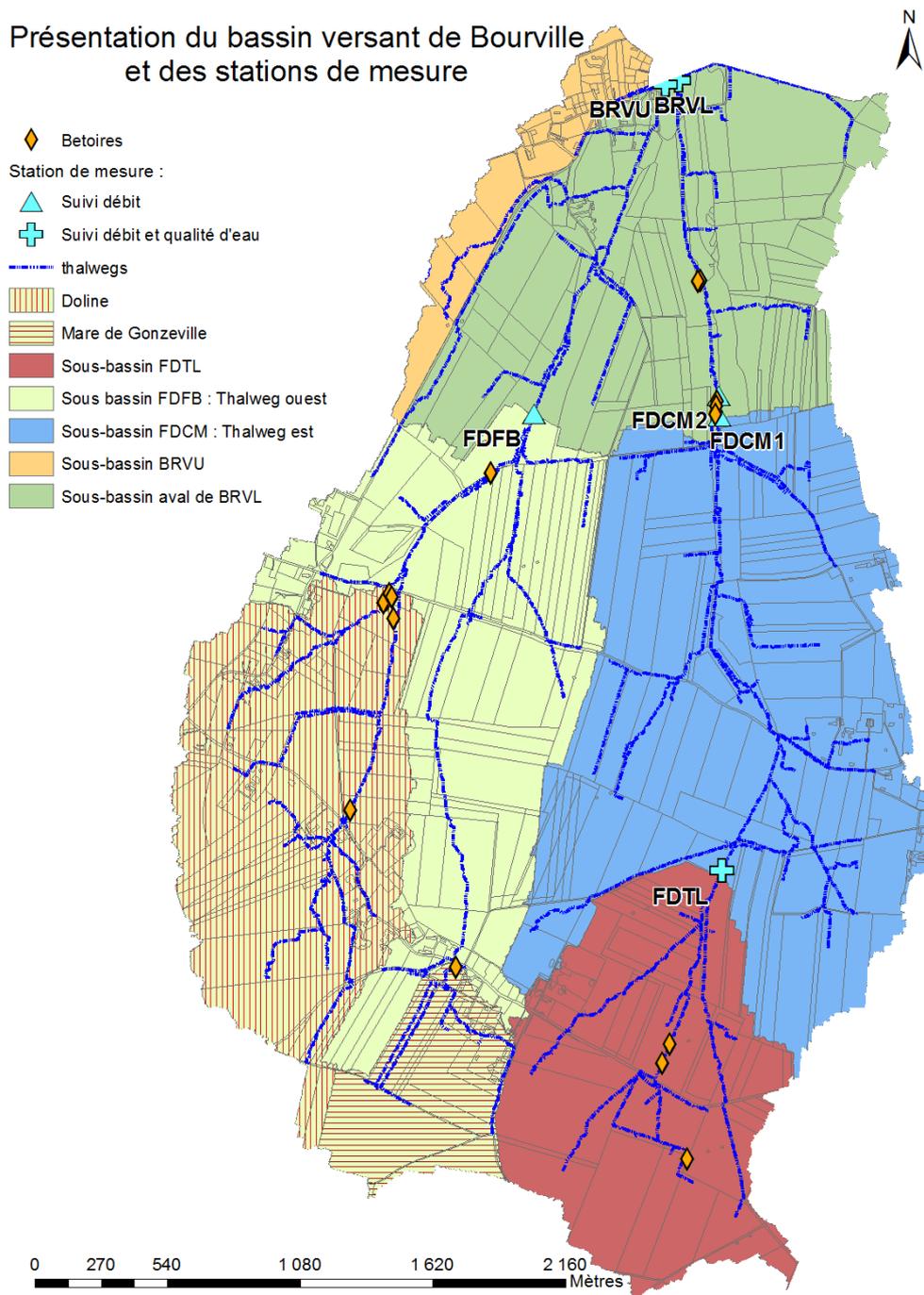


Figure 3 : Bassin versant de Bourville avec les différentes stations de mesure

1.1.3. Présentation des données hydrologiques et agronomiques

1.1.3.1. Données de pluie et de ruissellement

L'étude hydrologique du bassin versant est réalisée sur les données pluviométriques et hydrométriques du 01/09/2007 au 31/08/2014 enregistrées à la station BRVL. Le suivi se fait sur 7 campagnes : la campagne n est définie comme la période du 1^{er} septembre de l'année $n-1$ au 31 août de l'année n . Ce découpage a été choisi afin de suivre la saisonnalité des apports en PPS d'une campagne agricole et la saisonnalité d'une année hydrologique. Dans la suite de ce rapport, les saisons sont définies à partir d'un début de mois afin de simplifier notre démarche : l'automne correspond aux mois de septembre à novembre, l'hiver de décembre à février, le printemps de mars à mai et l'été correspond aux mois de juin à août.

La pluie est suivie par un pluviomètre à augets (associé à un enregistreur) d'une sensibilité de 0,2 mm de lame d'eau par basculement. Les données pluviométriques sont exploitables à 93 %, soit 188 jours d'absence de données dont 151 jours sur la campagne de 2014. En effet, les enregistrements ont cessé à partir du 7 avril 2014 car le pluviomètre est tombé en panne. D'autres données (enregistrées à la station FDTL, par exemple) sont disponibles mais ne seront pas traitées dans ce rapport.

Le suivi des ruissellements se fait par la mesure des hauteurs d'eau ruisselée (H en mm) à l'aide d'une sonde pressiométrique numérique (PT12, INW) installée dans un puits de tranquillisation associée à un enregistreur (Figure 4) : une mesure est relevée toute les 10 secondes et un enregistrement de la hauteur moyenne est effectué par minute. La présence d'un déversoir à seuil court triangulaire permet d'établir la courbe de tarage à partir d'un jaugeage au moulinet hydrométrique (réalisée depuis 1995 par la DIREN). Les débits (Q en l/s) sont déterminés à partir de l'équation suivante :

$$Q = a * H^3 + b * H^2 + c * H$$

Avec : $a = -1,0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ $b = 5,814 \cdot 10^{-3} \text{ l}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ $c = 6,34 \cdot 10^{-1} \text{ l}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

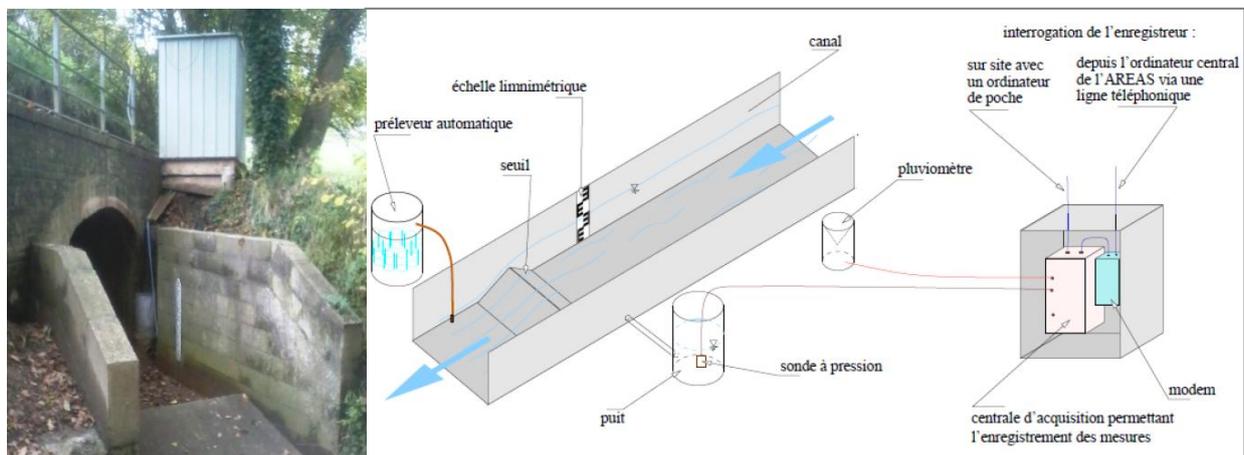


Figure 4 : Photo (a) et schéma (b) des dispositifs de mesure de la station BRVL (Source : AREAS)

Sur les 7 campagnes, 99 % des données hydrométriques sont exploitables sur la station BRVL : il y a 30 jours d'absence de données suite à des dysfonctionnements du matériel de mesure.

Les équipements des autres stations sont présentés en Annexe II.

1.1.3.2. Données de qualité d'eau : suivi des apports et exports de produits phytosanitaires

Les apports en PPS sont obtenus par enquête annuelle auprès de la trentaine d'agriculteurs exploitant des parcelles agricoles sur le bassin versant de Bourville. Les dates et produits des traitements sont renseignés. Les SA associées et les compositions sont déterminées par le descriptif de chaque PPS donné par les catalogues des fournisseurs. De même, les dates de travail du sol (labour, semis, déchaumage,...) et le matériel utilisé sont notés par parcelle, nous renseignant ainsi des variations saisonnières de l'état de surface des parcelles agricoles (Figure 5).

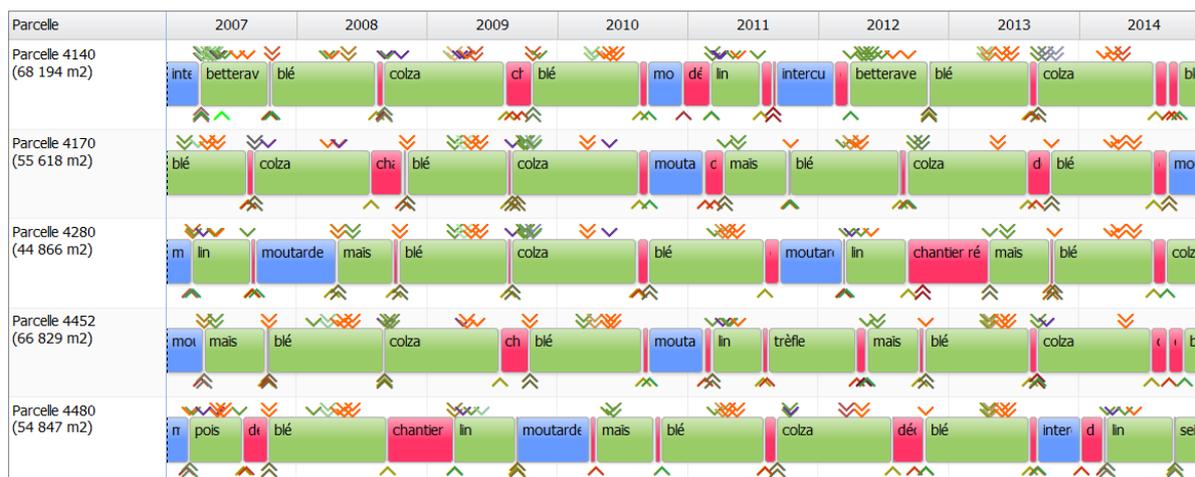


Figure 5 : Exemple de frises temporelles d'occupation du sol et d'interventions sur les parcelles de Bourville, les jalons représentant des interventions physiques (en-dessous de la frise) ou chimiques (au-dessus)

Le suivi qualitatif de l'eau est réalisé à la station de BRVL qui est équipée de deux préleveurs automatiques (ISCO 3700, Ijinus) en fonctionnement synchrone pour le prélèvement des échantillons de ruissellement. L'un comprend des flacons en verre et l'autre comprend des flacons en polypropylène, afin de pouvoir analyser les SA s'absorbant sur le verre (glyphosate, AMPA et les ammoniums quaternaires). Les échantillons analysés sont composés par un nombre variable de flacons de 1 l (généralement 3) selon l'importance du ruissellement, les « séquences ruisselantes » analysées (définies comme l'ensemble du ruissellement représenté par une analyse) peuvent alors représenter de 3 h à 60 jours de suivi. Chaque flacon, contient 5 prélèvements d'eau déclenchés par un seuil de volume ruisselé modulé selon la saison, et l'heure précise de chaque prélèvement est enregistrée. Par l'analyse des échantillons, 203 SA ont été recherchées, soit sur eau brute soit en double-analyse sur la phase aqueuse de l'échantillon (eau filtrée) et sur la phase particulaire de l'échantillon (MES). Cependant dans ce rapport, la répartition des SA entre les phases ne sera pas étudiée. La quantification de plusieurs paramètres physico-chimiques est également réalisée lors des analyses (Annexe III).

Une SA est quantifiée lorsqu'elle est recherchée dans une analyse et que le dosage révèle une concentration supérieure à la limite de quantification (LQ). Ce seuil est généralement autour de 0,01 µg/l mais peut varier selon les capacités d'analyse du laboratoire par SA. Ainsi, une SA non quantifiée à une LQ élevée n'est pas forcément absente dans les ruissellements.

1.1.3.3. Approche de l'état de surface des parcelles agricoles

La genèse du ruissellement et donc le transfert des PPS sont dépendant des conditions de état de surface et de couverture des parcelles agricoles (Lecomte, 1999). Pour décrire l'évolution des états de surface, 19 doublets de placettes ont été mis en place sur les parcelles agricoles en différenciant les cultures et les précédents culturaux (Figure 2). Le suivi est réalisé du semis de la culture jusqu'au déchaumage ou à la fin de croissance des cultures atteignant une couverture végétale maximale. Un premier suivi a débuté à partir d'octobre 2015 sur les cultures d'hiver (blé, colza) et les intercultures. Un second suivi a été réalisé pendant ce stage à partir de mars 2016 pour étudier l'évolution de l'état de surface des cultures de printemps (betterave sucrière, lin, maïs, pomme de terre et pois). Les états des surfaces sont décrits par le faciès, le diamètre minimum des fragments de terre, la rugosité et le pourcentage de recouvrement par le couvert végétal (Annexe IV).

2. ANALYSE GLOBALE DES CAMPAGNES 2008-2014

L'étude hydrologique du bassin versant est d'abord réalisée par un bilan annuel des variables observées sur les 7 campagnes étudiées, puis d'un bilan saisonnier pour en déduire le fonctionnement global du bassin.

2.1. Bilan annuel

2.1.1. Occupation du sol

Le bassin versant est principalement agricole : 73 % de sa surface est en culture labourée, seul 6 % de sa surface est urbain et 18 % en prairie. De 2008 à 2014, il y a peu d'évolution de la surface attribuée pour chaque culture (Figure 6). La part en cultures de printemps (lin, maïs, pomme de terre et betterave principalement) est en moyenne de 38 % de la surface labourée, et celle des cultures d'hiver (blé, colza et orge d'hiver ou escourgeon, principalement) est en moyenne de 62 % (jusqu'à 70 % en 2010). Leur répartition sur le bassin versant est homogène au sein des différents sous-bassins versants (Annexe V).

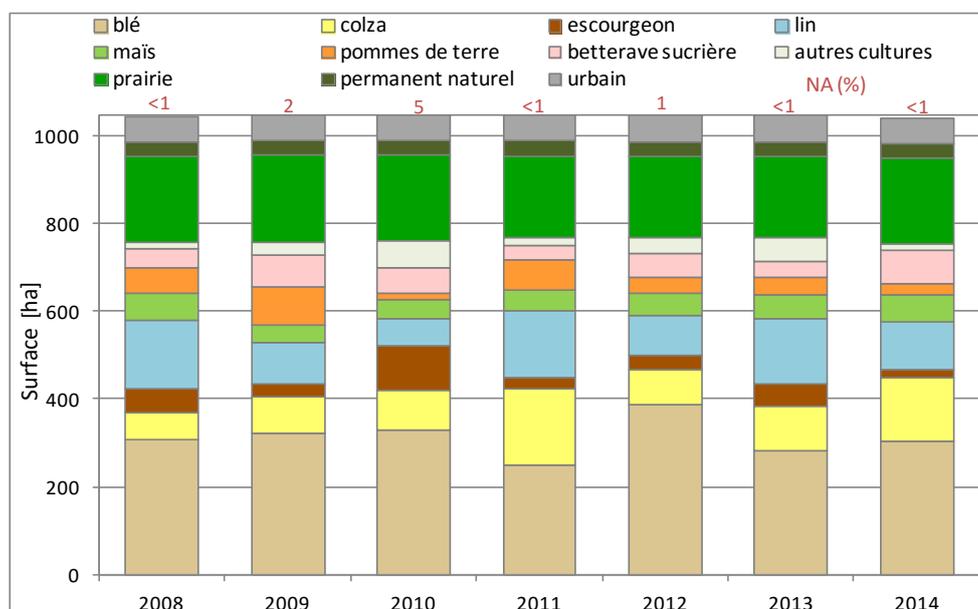


Figure 6 : Occupation du sol du bassin versant de Bourville (1045 ha) sur les campagnes 2008 à 2014, NA (%) : pourcentage de surface non identifiée.

2.1.2. Apports en produits phytosanitaires

En moyenne 1 773 kg de PPS sont apportés sur une campagne, soit en moyenne 1,9 kg/ha agricole/campagne : 48 % sont des apports en herbicides, 35 % en fongicides, 14 % en régulateurs de croissance et 3 % en insecticides (Figure 7).

Les années 2010 et 2011 sont 2 campagnes culturales avec des apports plus faibles qu'en moyenne avec 1 504 kg et 1 476 kg de PPS apportés, respectivement. Ce sont les apports en fongicides qui jouent principalement sur les variations des apports totaux par sa plus forte variabilité. En effet, les conditions de développement de maladies sont beaucoup plus variables d'une année à l'autre que pour les autres problèmes culturaux (de désherbage par exemple).

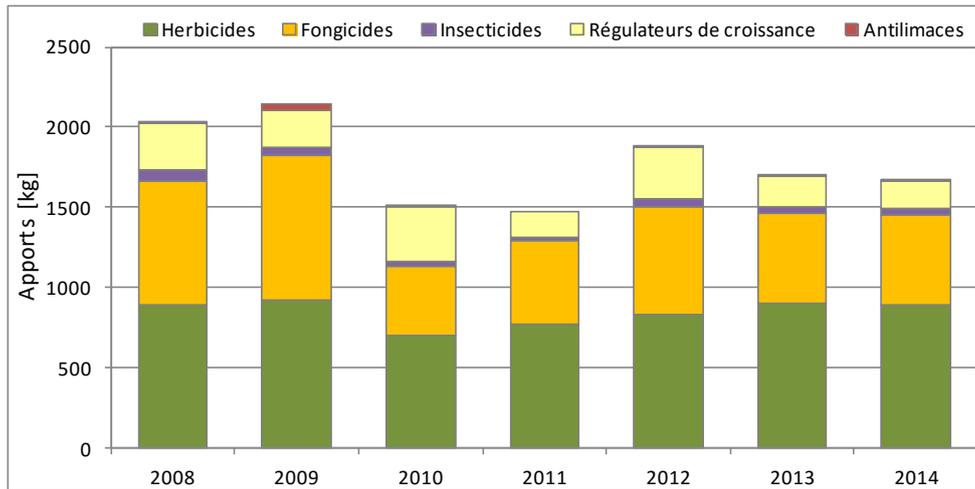


Figure 7 : Quantité de PPS apportés sur le bassin de Bourville par fonction pour les campagnes 2008 à 2014

2.1.3. Pluviométrie

Dans la suite de ce rapport, on désigne le terme « averse », un événement pluvieux de lame cumulée supérieure ou égale à 1 mm et qui se distingue de tout autre événement pluvieux par un délai de 3 heures. Ce délai est déterminé par le temps de concentration : après 3 heures, une goutte de pluie tombée en tout point du bassin est censée être arrivée à l'exutoire (si elle n'a pas infiltré ou réinfiltré), ainsi s'il y a reprise de la pluie, la décrue est suffisamment établie pour considérer la reprise de débit comme une crue différente de la précédente.

En moyenne, la lame tombée annuelle est de 793 mm répartie en 127 averses (établie sans 2014 au vu des 151 jours sans donnée) (Figure 8). Seules les campagnes 2009 et 2011 diffèrent fortement de cette moyenne. Ces deux années sont considérées comme sèches avec respectivement 627 et 651 mm tombés.

Les averses enregistrées à Bourville sont caractérisées par une faible lame d'eau : 64 % des événements pluvieux ont une lame inférieure à 5 mm. Cependant, ces événements ne correspondent qu'à 27 % de la lame annuelle tombée. Représentant seulement 34 % des événements, les averses de 5 à 20 mm cumulent quant à elles 47 % de la pluie annuelle.

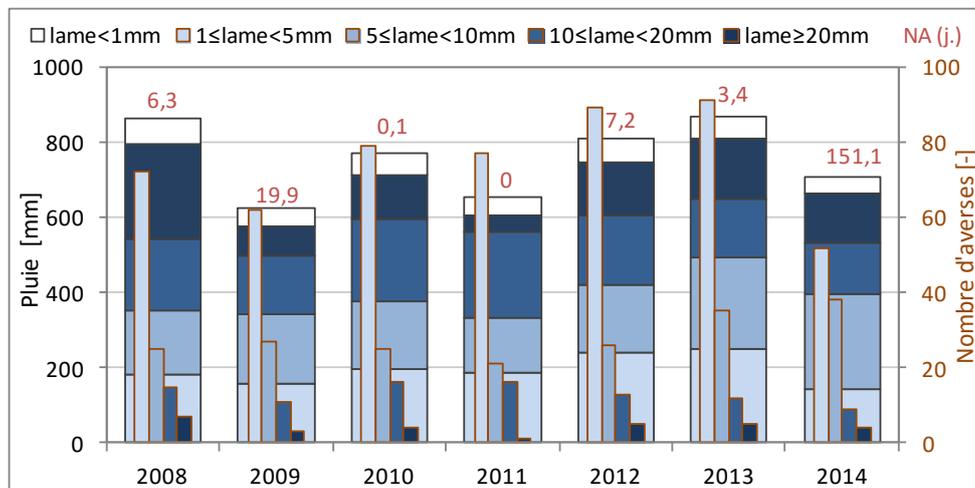


Figure 8 : Pluie à BRVL : lame tombée et nombre d'averses pour chaque catégorie d'averses par campagne ; NA(j) : nombre de jours sans donnée

2.1.4. Ruissellement

Par le terme « crue » on considère ici, tout événement de ruissellement dont le débit de pointe dépasse 30 l/s et ayant un volume ruisselé supérieur à 200 m³, soit 0,02 mm en divisant par la surface du bassin versant. Le découpage des crues est ajusté manuellement selon l'avancement de la décrue et la présence de différentes averses. Les crues ayant des lames inférieures à 0,1 mm sont de faibles ampleurs avec une contribution partielle des surfaces du bassin versant. Au contraire, les crues ayant des lames de plus de 3 mm engendrent du désordre hydrologique (Helloco *et al.*, 2003)

La Figure 9 représente la lame ruisselée par campagne. Sur les campagnes étudiées, 7,82 mm de ruissellement annuel est enregistré en moyenne à BRVL (soit un volume de 81 830 m³) réparti sur 27 crues. 62 % de ces crues sont de petites lames (< 0,1 mm), mais elles ne correspondent qu'à 11 % du volume ruisselé annuel.

Les situations hydrologiques sont variées : les campagnes 2009 et 2010 sont les moins ruisselantes avec 3,57 mm et 2,55 mm respectivement. Au contraire, les campagnes 2008 et 2013 sont considérées comme fortement ruisselantes avec des lames de 10,82 mm et 12,00 mm. La variation des ruissellements annuels peut être expliquée par la présence ou non d'événement ruisselant de lame supérieure à 3 mm : lorsqu'elles ont lieu la catégorie de ces crues représente 34 à 58 % du volume ruisselé annuel.

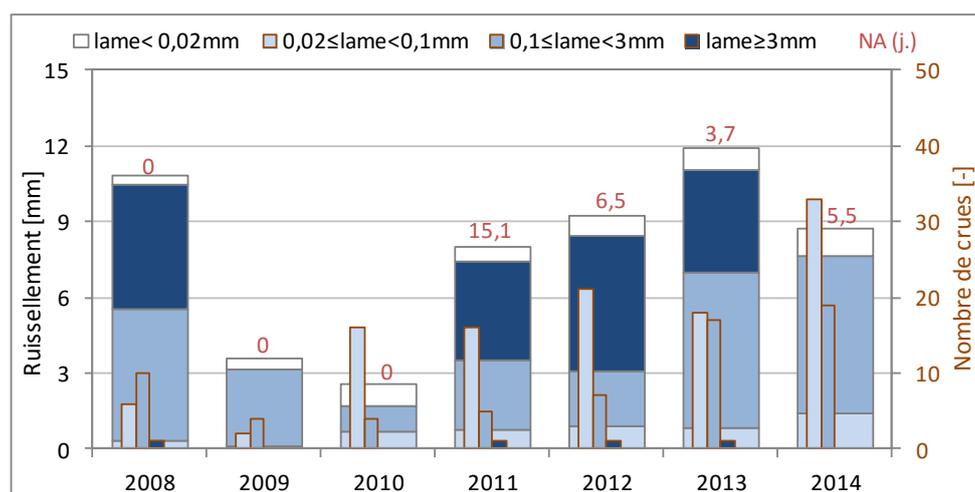


Figure 9 : Ruissellement à BRVL : lame ruisselée et nombre de crues pour chaque catégorie de crues par campagne ; NA(j) : nombre de jours sans donnée

Alors que la majorité des averses sont de petites lames (< 5 mm), elles ne représentent que 13 % des averses à l'origine des crues. Ce sont les averses de plus de 10 mm qui engendrent majoritairement les crues. Selon les années, les averses n'ont pas les mêmes potentiels ruisselants : 2013 apparaît comme une année dont une forte proportion (25 %) des averses produisent du ruissellement. Au contraire, en 2009 seulement 6 % des averses sont ruisselantes. Cependant, la proportion des averses de plus de 10 mm est similaire pour les deux campagnes : d'autres paramètres sont donc à prendre en compte tels que l'état de dégradation du sol où ont eu lieu les averses qui influencent sur leur potentiel à générer du ruissellement.

Les réponses hydrologiques annuelles sont très variables malgré des pluviométries peu fluctuantes. Par exemple, la lame ruisselée en 2010 est bien plus faible que celle de 2011 malgré des lames d'eau tombées plus importantes et une répartition similaire des averses dans les différentes catégories. Les plus fortes averses en 2010 sont de 25,0 mm et 21,4 mm alors

qu'en 2011 la plus forte averse atteint 43,2 mm tombés engendrant alors un événement ruisselant de plus de 3 mm. De plus, les conditions dans lesquelles a eu lieu l'averse étaient favorables au ruissellement : plus de 60 mm de pluie sont tombées les 10 jours précédant la crue. C'est donc par l'étude à l'échelle événementielle que la compréhension de la réponse hydrologique du bassin est possible en intégrant les conditions du milieu et les caractéristiques des pluies.

2.1.5. Exports de substances actives

2.1.5.1. Bilan des analyses selon les apports, les substances actives recherchées et les substances actives quantifiées

Soixante-douze analyses ont été réalisées de 2008 à 2014 caractérisant 68 % du volume ruisselé (Tableau 3). La campagne 2011 a particulièrement été pauvre en analyse avec seulement 3 échantillons représentant 31 % du volume ruisselé, ceci est dû à un changement de matériel de prélèvements des échantillons. De même, les campagnes de 2010 et 2012 n'ont que la moitié du volume ruisselé analysé. Ainsi, les résultats des exports annuels sont étudiés avec précaution. De 2008 à 2011, les analyses se font uniquement sur eau brute. Cependant depuis 2012, les analyses effectués se font aussi sur eau filtrée et sur les MES, afin de distinguer les SA transportées adsorbées sur les sédiments de celles qui sont diluées dans l'eau.

Par rapport aux apports, 46 SA ne sont pas recherchées dans les analyses, ces apports représentent 2 193 kg de PPS épandus, soit 18 % des apports totaux recensés sur les 7 campagnes. Les herbicides recherchés représentent 94 % des apports totaux des herbicides, tandis que pour les fongicides et insecticides les apports recherchés représentent 68 % et 51 % des apports. Ainsi la qualité de représentativité des exports varient selon les fonctions des SA.

De plus, 43 SA sont apportées sans être quantifiées correspondant à 2 966 kg (soit 24 % des apports), 46 % sont des régulateurs de croissance, 38 % des fongicides et 16 % des herbicides.

Tableau 3 : Bilan des analyses effectuées sur les échantillons de BRVL pour les campagnes 2008 à 2014 (* : sur 4 analyses les recherches ont été faites uniquement sur les flacons en polypropylène donc sur un nombre très réduit de SA)

Campagne	Ruissellement [mm]	% Ruissellement analysé [%]	Nombre d'analyses [-]		Nombre médian de SA analysées [-]
			Eau Brute	Eau Filtrée + MES	
2008	10,8	62	15	0	99
2009	3,6	77	5	0	89
2010	2,6	52	7	0	188 ou 5*
2011	8,0	31	5	0	188
2012	9,2	56	2	12	188
2013	12,0	94	3	8	194
2014	8,7	89	9	6	194
Total	54,9	68	46	26	203

Pour les SA recherchées, 1,7 kg de SA ont été quantifiés sur les 7 campagnes : 74 % sont des herbicides, 13 % correspondent aux métabolites de SA apportées sur les parcelles et 10 % sont des fongicides. Trente-six SA et leurs métabolites sont quantifiées sans apport recensé représentant 33,0 g d'exports, ces SA peuvent être interdites mais potentiellement utilisées auparavant ou être des SA non recensées par les enquêtes auprès des agriculteurs.

Les herbicides chlortoluron, glyphosate (et son métabolite l'AMPA), isoproturon et 2,4-D sont les SA les plus exportées et sont responsables de 61 % des exports totaux. La réduction de l'altération des eaux de surface par les PPS en termes de quantification globale peut donc se jouer sur la réduction des transferts de ces SA.

2.1.5.2. Bilan annuel des exports

Les exports annuels sont très variables allant de 17,6 à 527,8 g exportés (Figure 10).

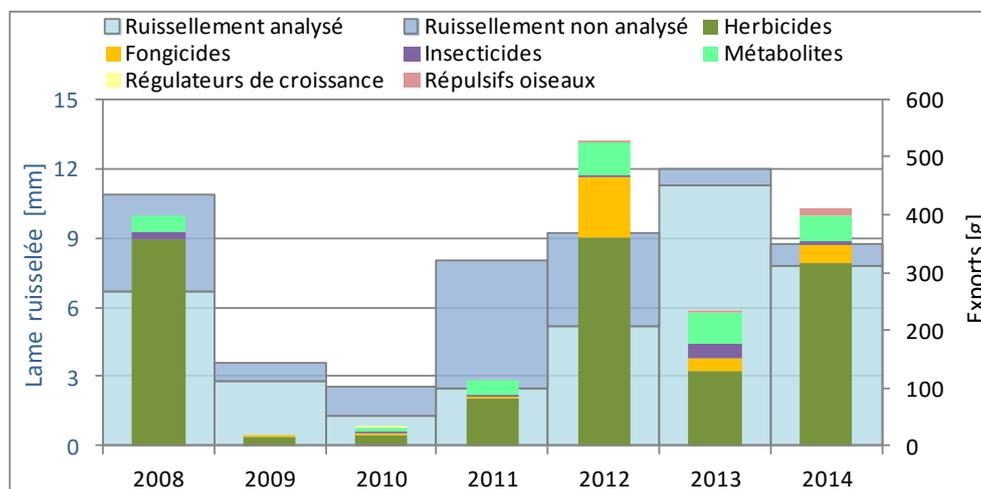


Figure 10 : Export de substances actives par fonction selon le volume ruisselé analysé par campagne

A l'échelle de la campagne aucune corrélation n'est établie entre la quantité exportée et le volume ruisselé et analysé ou par les quantités apportées annuelles ($R^2 = 0,29$ et $R^2 = 0,01$). Par exemple, l'année 2012 est la plus exportatrice de SA, cependant 57 % de ces exports sont dus à un seul événement ruisselant du 21 juin 2012. Cet événement survient juste après de nombreux traitements : 86 kg d'herbicides et 14 kg fongicides sont apportés moins d'une semaine avant, or plus le délai entre la période de traitement et la tombée d'une forte pluie est courte plus les risques d'exports sont importants (Voltz and Louchart, 2001).

2.1.5.3. Bilan sur les dosages

Le seuil de potabilisation fixé à 5 $\mu\text{g/l}$ (arrêté ministériel du 11 janvier 2007) pour la concentration totale en SA est un bon indicateur pour évaluer la contamination des eaux à l'exutoire du bassin versant. Ce seuil est dépassé pour 27 des analyses (correspondant à 48 crues). Ces analyses ont lieu majoritairement après juillet 2012, dû à l'augmentation du nombre de SA recherchées sur cette période.

De plus, il existe un seuil de potabilisation pour la concentration d'une SA unique fixée à 2 $\mu\text{g/l}$. Pour 33 analyses (correspondant à 49 crues), ce seuil est dépassé pour le dosage d'au moins une SA. Ce seuil est dépassé par 17 SA différentes : 10 SA dépassent ce seuil pour une unique analyse alors que 7 SA dépassent ce seuil pour plusieurs analyses. Le glyphosate et son métabolite AMPA dépassent ce seuil respectivement pour 14 et 9 analyses (correspondant à 29 et 19 crues) ; les herbicides chlortoluron, métribuzine et isoproturon dépassent aussi régulièrement ce seuil de potabilisation sur 8, 7 et 5 crues (correspondant à 7, 3 et 5 analyses).

En terme d'export et de concentration, les SA chlortoluron, glyphosate et son métabolite AMPA, et isoproturon sont donc les SA à cibler pour réduire les contaminations des eaux de surface, ces SA faisant parties des 10 SA les plus appliquées sur le bassin versant.

2.2. Saisonnalité du bassin versant de Bourville

2.2.1. Importante saisonnalité des apports en produits phytosanitaires

Pour interpréter les résultats de la saisonnalité des analyses statistiques sont réalisées. Les données ne suivant pas l'hypothèse de normalité, le choix a été fait d'utiliser le test non paramétrique de Kruskal-Wallis.

La saisonnalité des apports sur une campagne est importante : 61 % des traitements sont effectués au printemps (Figure 11). Au contraire, on note une absence de traitement en hiver (2 % des apports) du fait de la faible activité biologique de cette période. De plus, les PPS sont appliqués sur différentes périodes selon leur fonction : 29 % des apports en herbicides se font en automne sur les cultures d'hiver pour éliminer les premières levées d'adventices et 57 % au printemps lors du semis des cultures de printemps. 98 % des apports en fongicides sont effectués de mars à août, correspondant aux périodes de développement des maladies. Enfin, quelques apports de régulateurs de croissance sont recensés essentiellement (99 %) au printemps lors de la phase de croissance des cultures. La pression des transferts de pesticides est donc plus importante au printemps.

2.2.2. Saisonnalité pluviométrique peu marquée

La période automne-hiver est la plus humide de l'année avec 59 % de la pluie annuelle, et plus particulièrement de septembre à novembre (Figure 11). Le nombre d'averses recensé suit cette même tendance : environ 60 % des averses ont lieu en automne-hiver. La saisonnalité est également marquée par différentes caractéristiques des averses : de septembre à décembre ont lieu 72 % des averses à fortes lames (> 20 mm). De plus, sur cette période ont lieu plus de 25 % des averses ruisselantes, alors qu'elles ne représentent que 8 à 19 % des averses pour le reste de l'année. De mai à septembre, les averses sont les plus intenses avec en moyenne des intensités supérieures à 1,7 mm/h. En effet, ces mois sont soumis à des orages printaniers et estivaux engendrant des lames tombées mensuelles importantes par rapport aux faibles nombres d'averses. Au contraire de janvier à avril, les averses ont les plus faibles lames de la campagne.

2.2.3. Forte saisonnalité des ruissellements

Les ruissellements enregistrés à BRVL témoignent d'une forte saisonnalité (Figure 11). Décembre est significativement plus ruisselant que le reste de l'année avec 43 % du volume ruisselé annuel ($p = 0,01$, Kruskal-Wallis). Plus globalement, 80 % des crues ont lieu en automne-hiver, représentant 87 % du volume ruisselé annuel. De plus, les crues sont les plus nombreuses et ont les plus fortes lames ruisselées en novembre et décembre.

La saisonnalité du ruissellement est beaucoup plus marquée que celle de la pluie. Notons la différence de réponse hydrologique entre novembre et décembre (avec des lames ruisselées de 1,45 et 3,52 mm respectivement) malgré une pluviométrie semblable (105 et 111 mm respectivement). Les caractéristiques des averses entre les deux mois sont semblables excepté pour la durée des averses significativement plus longue en décembre ($p < 3.10^{-12}$, Kruskal-Wallis). Mais ce sont les conditions du milieu qui explique la différence dans les réponses hydrologiques de ces deux mois.

En effet, le milieu est significativement plus humide en décembre (comparaison des cumuls sur 48 heures des pluies antérieures à un événement, $p = 1.10^{-5}$, Kruskal-Wallis). De plus l'état de dégradation du sol est différent entre novembre et décembre. Par une première analyse des suivis des états de surface des parcelles agricoles, les états de surface en

novembre pour les cultures d'hiver et en interculture sont généralement dans un état de dégradation F1 : les mottes fragmentaires sont fondues mais présentes, il reste toujours une certaine porosité et une certaine rugosité. Cet état de dégradation est constaté du fait de la proximité temporelle avec les interventions physiques du sol ayant lieu pour la plupart en octobre (labour et semis des cultures d'hiver). Au contraire à partir de décembre, les cultures d'hiver sont en état de dégradation F2 : les sols sont lissés par la pluie, il n'y a plus de rugosité apparente, les capacités d'infiltration sont fortement réduites, pouvant descendre à 1 mm/h (Boiffin *et al.*, 1986). Ainsi, même les plus petites averses sont susceptibles de ruisseler. Pour une même quantité de pluie tombée, les sols de décembre produisent plus de ruissellements que les sols de novembre par une diminution importante de la quantité d'eau infiltrée.

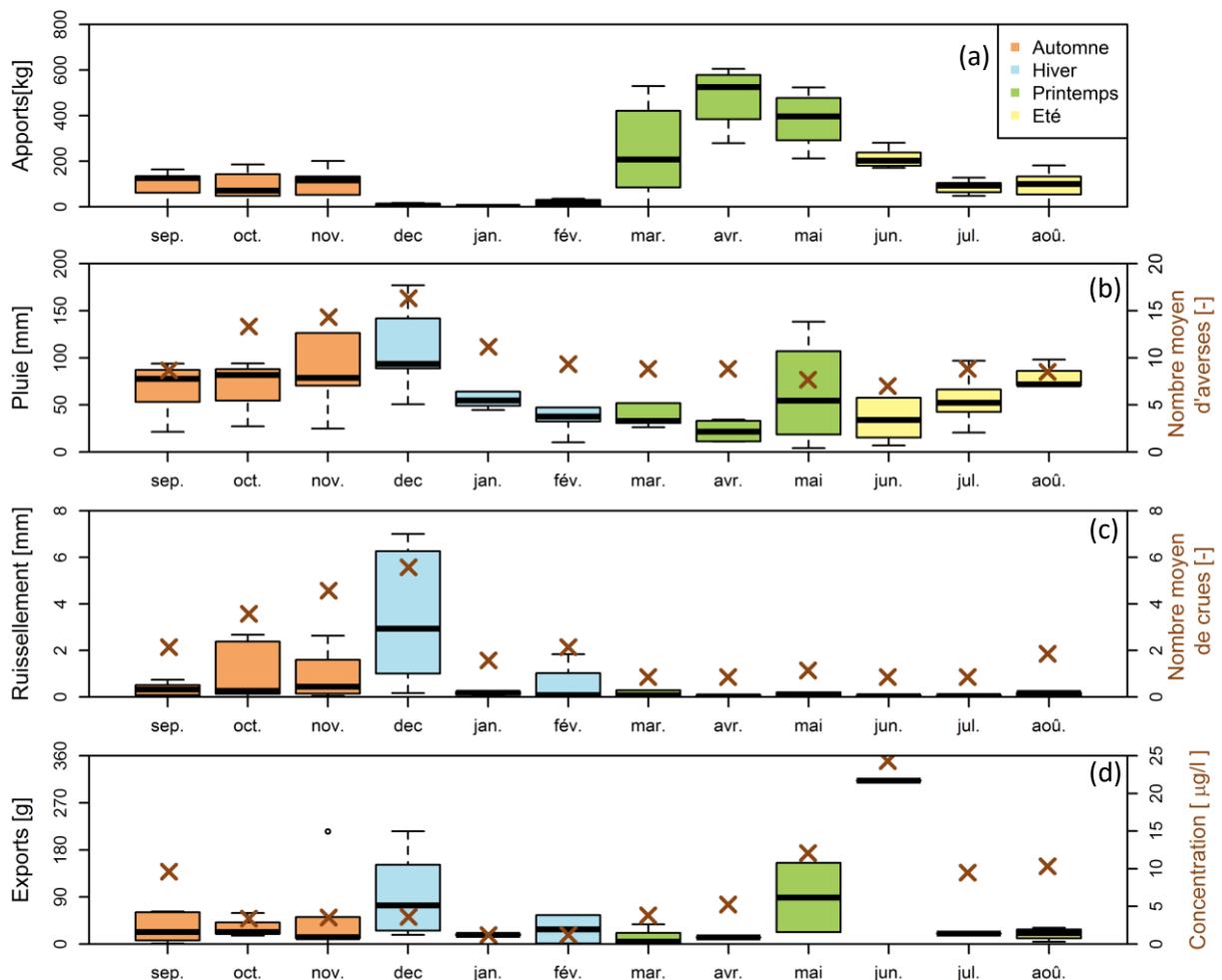


Figure 11 : Moyennes mensuelles des apports (a), de la pluie (b), du ruissellement (c) et des exports de SA (quantités et concentrations) (d) ainsi que le nombre d'averses et de crues recensées sur le bassin versant de Bourville

2.2.4. Saisonnalité des exports de substances actives

Les exports de SA suivent une saisonnalité marquée (Figure 11). On observe deux périodes où les transferts peuvent être importants mais selon des tendances différentes :

- Sur la période octobre-décembre, les apports de PPS sont faibles mais les ruissellements sont importants, les exports sont relativement importants et fréquents

allant de 32,8 à 96,8 g exportés mensuels mais leur concentration reste faible avec 3,50 µg/l en moyenne par séquence ruisselante analysée.

- Sur la période mai-septembre, les traitements sont plus fréquents et en plus fortes quantités, cependant les conditions climatiques ainsi que le fort recouvrement des parcelles par les cultures engendrent peu de ruissellements. Les exports sont alors ponctuels lors d'orages de printemps par exemple, entraînant des transferts de SA à fortes concentrations événementielle, en moyenne de 13,16 µg/l par séquence ruisselante analysée. Le risque de dépasser le seuil de potabilisation est alors plus important pour les événements de cette période.

Les ruissellements et les exports en pesticides suivent donc une certaine saisonnalité à cause de la variabilité agronomique et climatique. Cependant, certains événements se distinguent par leur valeur extrême de volume ruisselé ou de SA exportées, impliquant une variabilité importante dans les moyennes observées et pouvant correspondre à plus de la moitié des ruissellements ou des exports annuels. Les crues sont potentiellement de différentes natures au sein des saisons. L'étude à l'échelle événementielle permet d'analyser plus finement le schéma de fonctionnement du bassin versant par la prise en compte de la variabilité temporelle mais aussi de la variabilité spatiale, particulières à chaque événement ruisselant.

3. ANALYSE EVENEMENTIELLE : TYPOLOGIE HYDROLOGIQUE DES « EVENEMENTS PLUIE - DEBIT »

3.1. Analyses des événements Pluie-Débit à la station BRVL

3.1.1. Données et choix des indicateurs.

Afin de déterminer le fonctionnement hydrologique du bassin versant on réalise une typologie des crues.

On définit les « événements Pluie-Débit » ou « événements P-Q », les crues ayant les données pluviométriques complètes. Sur la période du 01/09/2007 au 31/08/2014, 13 crues ne sont pas prises en compte (dont 11 à partir d'avril 2014) formant alors 168 événements P-Q. Ils représentent 90 % du volume ruisselé enregistré à BRVL : cet échantillon est donc bien représentatif du ruissellement enregistré à BRVL. Une typologie de ces événements hydrologiques est réalisée par une approche statistique descriptive.

Dans un premier temps, une analyse en composante principale (ACP) est effectuée afin de décrire et de valider le choix des variables utilisées pour décrire les événements P-Q. L'objectif de l'ACP est de décrire les informations d'une matrice de données sur un nombre réduit de dimensions. Cette méthode d'analyse permet de dégager des similarités potentielles entre les individus étudiés ainsi que pour les variables utilisées pour les décrire.

Dans un second temps, une classification ascendante hiérarchique (CAH) est réalisée afin de dégager la typologie des événements P-Q. La CAH effectue des regroupements d'individus les plus proches pour les fusionner de manière itérative. La méthode d'agrégation utilisée ici est celle de Ward, qui consiste à agréger les individus qui font le moins varier l'inertie intra-classe. Ainsi, cette méthode tend à minimiser l'inertie intra-classe et à maximiser l'inertie inter-classe (Saporta, 1990). La perte d'inertie est déterminée par la formule de (Lance and Williams, 1967).

Pour caractériser les événements P-Q, 10 variables sont étudiées. Tout d'abord, quatre variables liées aux caractéristiques propres de la crue sont prises en compte : durée de la crue [h] (*duree.crue*), volume ruisselé [m³] (*vol.crue*), débit de pointe [l/s] (*Qmax.crue*) et débit moyen [l/s] (*Qmoy.crue*). Ces variables permettent d'identifier l'ampleur de la crue, et d'avoir une indication sur la forme de l'hydrogramme par la durée (soit l'étalement de l'événement) et le débit maximal, décrivant l'intensité de la crue.

Quatre variables caractérisant l'averse ruisselante sont ajoutées : les caractéristiques des crues dépendent avant tout des caractéristiques de l'averse dont elle est issue (Dubernet *et al.*, 2006 ; Charbonnier *et al.*, 2015) . Les quatre variables concernant les caractéristiques de l'averse sont : durée de l'averse [h] (*duree.averse*), lame de l'averse [mm] (*lame.averse*), intensité moyenne sur 6 min [mm/h] (*Imoy.averse*) et intensité maximale sur 6 min [mm/h] (*Imax.averse*). Comme pour les variables de l'hydrogramme, ces variables sont des indicateurs sur la forme du hyétogramme et de son ampleur.

Enfin, deux variables décrivant les conditions initiales sont aussi prises en compte. En effet, il n'y aura pas « la même réponse selon les propriétés hydriques de la végétation, de la surface et des sols » (Ambroise, 1998). Les transferts d'eau sont particulièrement conditionnés par le taux d'humidité du sol et l'état de dégradation du sol (Dubernet *et al.*, 2006). Ces variables sont :

- le cumul de la lame tombée sur les 48 heures précédant l'événement P-Q [mm] (*lame48h.averse*), qui indique l'état d'humidité du sol
- le cumul de la lame tombée sur les 10 derniers jours [mm], (*lame240h.averse*) qui renseigne sur l'état de dégradation du sol. En effet, Ludwig (1996) observe que les coefficients de ruissellement sont d'autant plus importants sur un bassin versant que lorsque la proportion de surface recouvert par une croûte sédimentaire est importante sur le bassin et que le cumul de pluie sur 10 jours est important.

Malgré le rôle important du couvert végétal sur la genèse du ruissellement, il n'est ici pas pris en compte. Les données concernant l'évolution du couvert sur les différentes cultures sont en cours d'acquisition par le suivi des états de surface des parcelles agricoles, et n'ont pas pu être traitées et quantifiées durant ce stage.

3.1.2. [Résultats de l'analyse en composante principale.](#)

Par notre jeu de données, on s'intéresse aux 2 premières dimensions de l'ACP qui expliquent 68 % de la variabilité des événements P-Q (Figure 12a), les autres axes sont détaillés en Annexe VI. Les variables sont bien structurées selon les 2 dimensions retenues. Le 1^{er} axe qui représente 45 % de l'inertie, est décrit par les caractéristiques même de la crue. En effet, les 4 variables des caractéristiques liées à l'hydrogramme : le volume de la crue, le débit de pointe, le débit moyen et la durée de la crue contribuent à 71 % de la construction de l'axe. La lame de pluie tombée et la durée de la pluie participe aussi à la construction de cet axe avec 21 % de l'inertie.

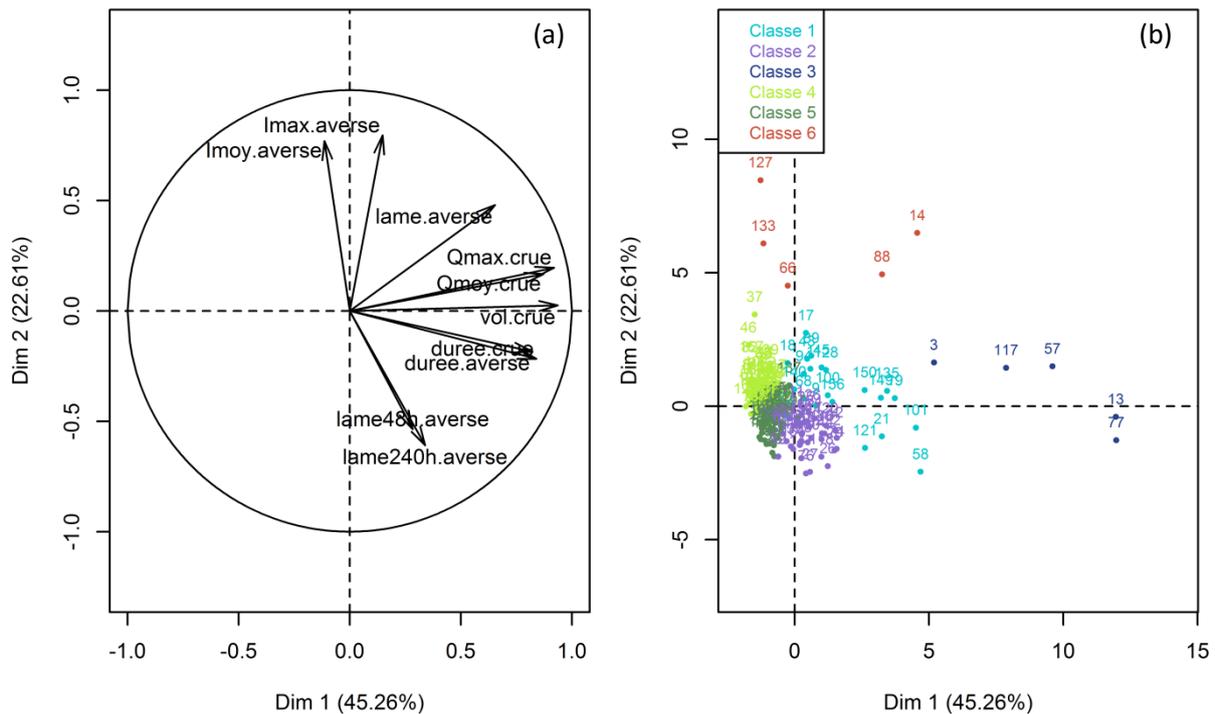


Figure 12 : Résultat du 1^{er} plan factoriel de l'ACP pour les variables utilisées (a) et des classes des événements Pluie-Débit issues de la CAH (b)

Le second axe qui explique 23 % de la variabilité des données représente les conditions dans lesquelles les ruissellements sont produits. L'axe est décrit à 44 % par l'intensité et la forme du hétéogramme par les variables *I_{max.averse}* et *I_{moy.averse}* et à 29 % par les variables caractéristiques des conditions initiales. Il représente les différentes causes du ruissellement. En effet, sur cet axe s'opposent deux situations : une situation où l'averse ruisselante de forte intensité a lieu dans des conditions de dégradation du sol peu avancées (*lame_{240h.averse}* faible) et où le sol est peu saturé en eau (*lame_{48h.averse}* faible) : le ruissellement est produit par un dépassement de la capacité d'infiltration du sol. A l'opposé sur cet axe, sont représentées les averses de faibles intensités qui ont lieu sur un sol potentiellement dégradé et saturé en eau: le ruissellement est produit soit par dépassement de la capacité de stockage du sol ou par dépassement de la capacité d'infiltration du sol dû à la présence d'une croûte sédimentaire réduisant la capacité d'infiltration inférieure à 1 mm/h. Cette deuxième proposition est plus probable étant donné les propriétés peu hydromorphes des sols du bassin versant.

Ainsi le premier plan factoriel de l'ACP différencie les petites crues de faibles intensités aux fortes crues intenses sur l'axe horizontal ; et les crues générées par des dépassements d'infiltration par l'intensité de la pluie aux crues générées des dépassements d'infiltration à cause des conditions de surface du sol sur l'axe vertical.

L'ACP a permis de déduire les caractéristiques qui définissent au mieux les événements P-Q. Afin de caractériser au mieux les événements P-Q par les variables définies, une classification ascendante hiérarchique est réalisée.

3.1.3. Résultats de la classification ascendante hiérarchique.

Les classes issues de la CAH sont déterminées au niveau d'un saut important de l'inertie d'agrégation : les individus regroupés sont alors bien plus proches entre eux qu'avec les individus regroupés après la coupure. Par l'étude du dendrogramme, le choix a été de faire un

découpage en 6 classes permettant d’avoir une bonne différenciation des classes ainsi qu’une répartition correcte des événements (Figure 13).

La classification révèle une bonne discrimination des variables entre les différentes classes, à l’exception du cumul de la lame d’eau sur 48 heures ($p < 0,05$, Kruskal Wallis). Cependant, au sein des classes persiste une forte variabilité des valeurs qui sera prise en compte dans la caractérisation des différentes classes.

Les différentes classes sont représentées sur la Figure 12b selon les axes définis par l’ACP. Les classes sont bien différenciables sur le 1^{er} plan factoriel.

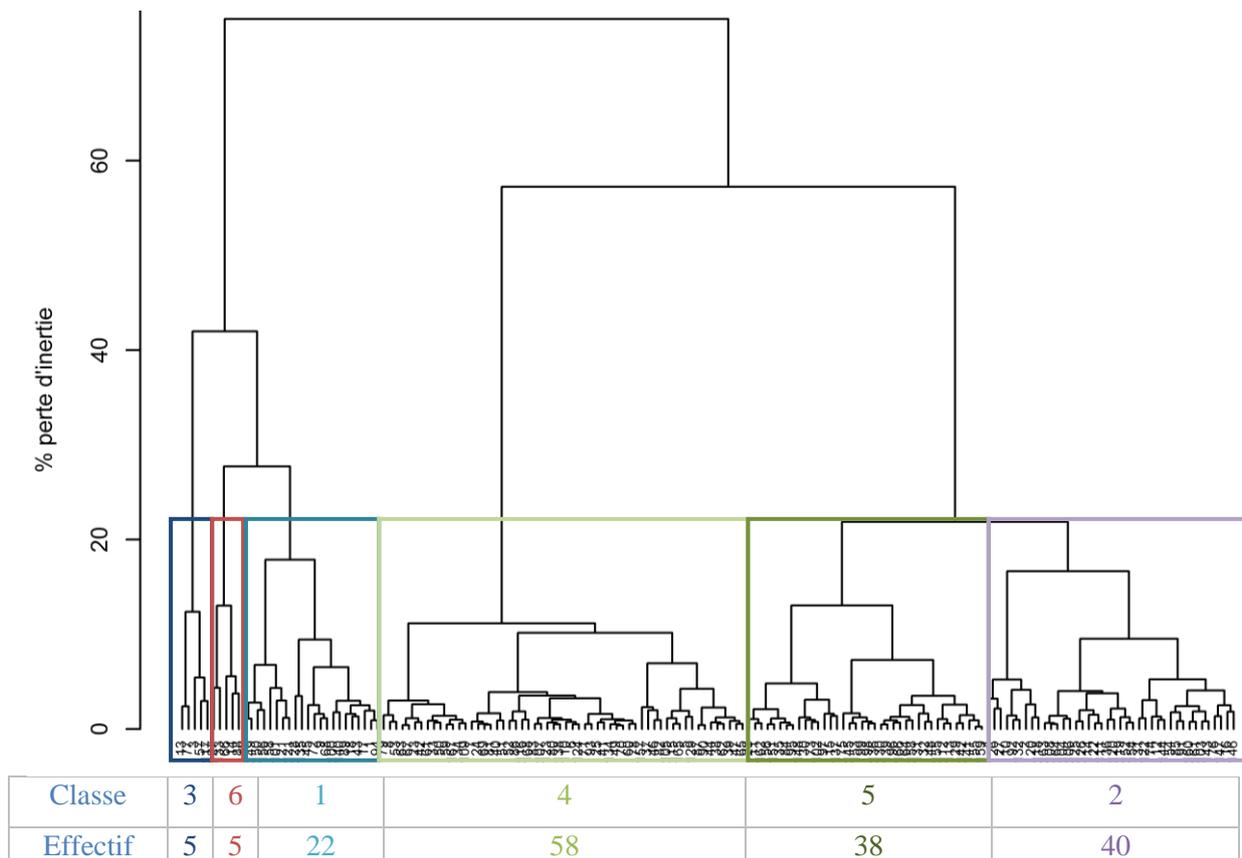


Figure 13 : Découpage en 6 classes du dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique des événements Pluie-Débit par la méthode d’agrégation de Ward

3.1.4. Typologie établie par l’analyse statistique descriptive

L’ensemble des caractéristiques des classes établies par la CAH est représentée sur la Figure 14, et les moyennes, coefficients de variation, minimums et maximums de chaque variable sont détaillés par classe en Annexe VII.

- Classe 1, « Evénements P-Q importants et longs » :

Les événements de cette classe se situant à droite du barycentre du 1^{er} factoriel (Figure 12b), ont des propriétés hydrologiques importantes. Ils sont caractérisés par une durée de ruissellement important, de 22 heures en moyenne, et de forte intensité. Ces événements ont lieu majoritairement en automne-hiver (82 %) et sont issues d’averses importantes avec en moyenne 25,2 mm tombés.

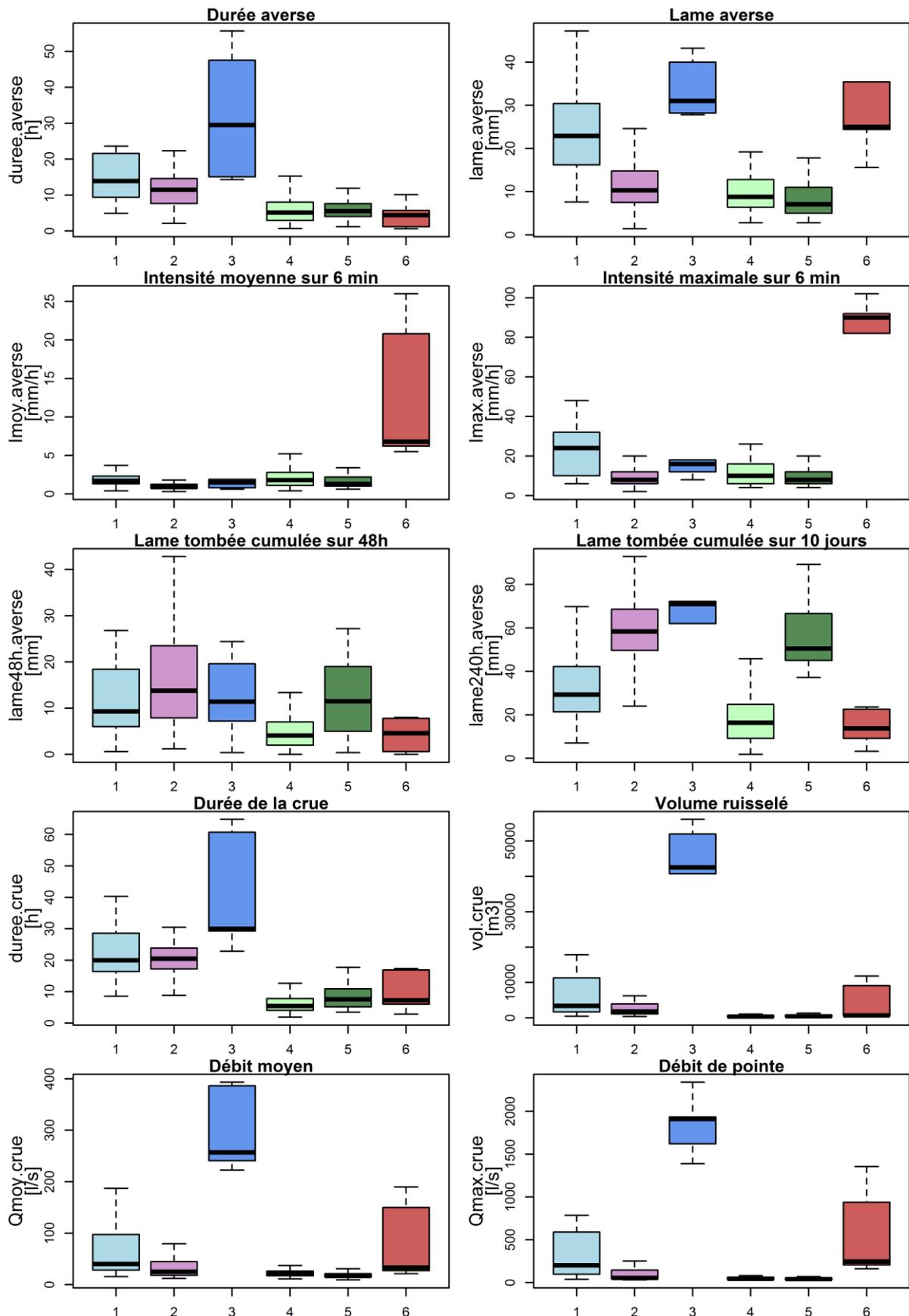


Figure 14 : Caractéristiques des 6 classes établies par CAH par les 10 variables pluviométriques et hydrologiques de BRVL

- Classe 2, « Evénements P-Q importants mais de faible intensité » :

Les événements de la classe 2, se situant en bas à droite du deuxième axe (Figure 12 b), se caractérisent par des averses en moyenne de 11,5 mm peu intenses, ayant lieu dans des conditions initiales humides avec un sol potentiellement dégradé (lame cumulée sur 10 jours de 61,7 mm). Les crues engendrées ont des caractéristiques relativement importantes : la réponse hydrologique est longue (20 heures en moyenne) mais de faible intensité avec un débit de pointe moyen de 106 l/s.

- Classe 3, « Evénements P-Q hivernaux extrêmes » :

Les événements de cette classe correspondent aux extrêmes situés à droite du premier axe (Figure 12 b). Les événements se caractérisent par de fortes lames de pluie (34,0 mm) sur une longue période mais de faible intensité. Les conditions du milieu sont humides et les sols potentiellement dégradés avec 68,1 mm tombés sur les 10 jours précédant l'événement P-Q. Les ruissellements produits sont extrêmes avec une lame ruisselée de 4,0 mm en moyenne sur plus de 41 heures et des pics de débit atteignant 1840 l/s en moyenne. Ce sont les 5 plus grosses crues de la période étudiée.

- Classes 4 et 5, « Evénements P-Q de faibles ampleurs » :

Ces deux classes se situent à gauche du premier axe, les événements sont de faibles ampleurs, avec une lame ruisselée moyenne de 0,05 mm. Ce sont les conditions de la genèse du ruissellement qui différencient les classes. Les événements de la classe 4 ont des pluies plus intenses (la classe étant située plus en haut du second axe) avec une intensité moyenne de 2,3 mm/h ayant lieu dans des conditions initiales potentiellement sèches et peu dégradées, le cumul de pluies étant de 18,1 mm en 10 jours. De plus, 31 % des événements ont lieu en printemps/été contre 20 % en moyenne pour les autres classes. La genèse est donc déterminée par l'intensité de la pluie dans cette classe. Pour les événements de la classe 5, les pluies sont moins intenses moyennées à 1,6 mm/h mais ont lieu dans des conditions humides sur des sols potentiellement dégradés : 92 % des événements ont lieu en automne-hiver et le cumul atteint 56,9 mm en 10 jours. Le ruissellement est alors généré par la faible capacité d'infiltration des sols de cette période. Malgré ces différences, les réponses hydrologiques sont similaires

- Classe 6, « Evénements P-Q estivaux extrêmes » :

Les événements de cette classe correspondent aux extrêmes de l'axe verticale (Figure 12b) : ils sont caractérisés par des averses très intenses allant jusqu'à atteindre des pics de 102,0 mm/h, engendrant de fortes lames de pluies. Ces événements ont lieu sur une période plutôt sèche de mai à septembre avec en moyenne 14,5 mm de pluie sur 10 jours. Ce sont des crues typiques d'orages printaniers-estivaux. Les caractéristiques des ruissellements engendrés sont très variables avec des lames ruisselées allant de 0,03 à 1,13 mm selon les pluies tombées.

Cette classification amène à identifier 3 types de classes des événements P-Q : des forts événements par leurs caractéristiques pluviométriques ou hydrologiques correspondant aux classes 3 et 6 ; les événements de caractéristiques hydrologiques faibles correspondant aux classes 4 et 5 ; enfin, les événements produisant des ruissellements importants avec des intensités variables correspondant aux classes 1 et 2.

La typologie des événements P-Q révèle une différenciation notamment par la variabilité saisonnière. Pour prendre en compte la variabilité spatiale, l'étude des événements P-Q est complétée par la prise en compte des 3 stations hydrologiques supplémentaires (BRVU, FDTL, FDCM). Cette analyse multi-station apporte des informations sur la production et la contribution des différentes zones du bassin versant. En effet, l'enjeu notamment dans les transferts des SA est différent selon si la contribution est majoritairement d'origine urbaine

par une forte contribution des écoulements issus de BRVU ou si elle est majoritairement issues des parcelles agricoles.

3.2. Analyses multi-stations des événements Pluie-Débit : prise en compte de la variabilité spatiale

3.2.1. Données et choix des indicateurs

Les données disponibles sur les différentes stations du bassin versant de Bourville ne permettent pas de réaliser une typologie sur l'ensemble des 168 événements P-Q établis. En effet, les enregistrements de débits sur les stations BRVU, FDTL et FDCM2 ont été mis en place au cours de la campagne 2012. Au final, 75 événements P-Q ont des données sur les différentes stations de mesure, représentant 33 % du volume total écoulé. On considère donc cette analyse comme un nouvel échantillon car la variabilité des événements P-Q diffère. Pour analyser ces événements une ACP suivie d'une CAH sont réalisées, comme pour la partie précédente.

Cette analyse multi-station reprend les 10 variables de l'analyse réalisée à BRVL et prend en compte 3 variables supplémentaires pour caractériser les données hydrologiques de chaque station :

- $R.Vol.BRVU [-] = \frac{Volume\ BRVU}{Volume\ BRVL} :$

Le rapport des volumes ruisselés aux stations BRVU et BRVL. Les stations de BRVU et BRVL étant très proches, on considère que les volumes enregistrés à BRVU arrivent en globalité à la station BRVL. Ainsi le rapport de ces deux volumes renseigne sur la contribution des ruissellements de BRVU aux ruissellements de BRVL.

- $R.Qmax.FDCM2 [-] = \frac{Qmax\ FDCM2}{Qmax\ BRVL} :$

Le rapport des débits de pointe enregistrés à FDCM2 et BRVL. Contrairement à la station BRVU, les ruissellements enregistrés à la station FDCM2 n'arrivent pas en globalité à la station BRVL. Pour qu'il y ait contribution du thalweg est, les débits à FDCM2 doivent être suffisamment importants. Le rapport des débits de pointe entre les deux stations est choisi car en plus de donner des informations sur la contribution du thalweg est, il renseigne l'influence des intensités des ruissellements issus du thalweg est sur la réponse hydrologique à la station BRVL.

- $Qmax.FDTL [l/s] :$

Le débit de pointe enregistré à FDTL. De par la situation géographique de la station FDTL, l'intérêt ici n'est pas de voir l'influence des ruissellements enregistrés à FDTL sur ceux enregistrés à BRVL mais d'avoir des informations sur la production de ruissellement sur les parcelles agricoles et de leur intensité, c'est pourquoi le débit de pointe de FDTL est étudié.

3.2.2. Résultats de l'analyse descriptive

Le 1^{er} plan factoriel produit par l'ACP représente 54 % de la variabilité des données (Figure 15a). Il est semblable à celui défini pour l'analyse mono-station à BRVL (3.1.2): l'axe horizontal est décrit à 61 % par les caractéristiques de crue à BRVL. La variable FDTL.Qmax est aussi importante avec une contribution à 15 %. En effet, le débit de pointe à FDTL est corrélé aux caractéristiques de la crue à BRVL (80 % avec le débit de pointe à BRVL). Ainsi, une crue à BRVL de forte intensité révèle une production de ruissellement de forte intensité

sur les parcelles agricoles. L'axe vertical est déterminé à 77 % par les conditions initiales et l'intensité de la pluie définissant les conditions de genèse du ruissellement. Les autres axes sont détaillés en Annexe VIII. La classification par la méthode de Ward permet de dégager 5 classes aux propriétés distinctes (Figure 16) (par découpage du dendrogramme détaillé en Annexe IX), que l'on représente sur les plans de l'ACP (Figure 15b).

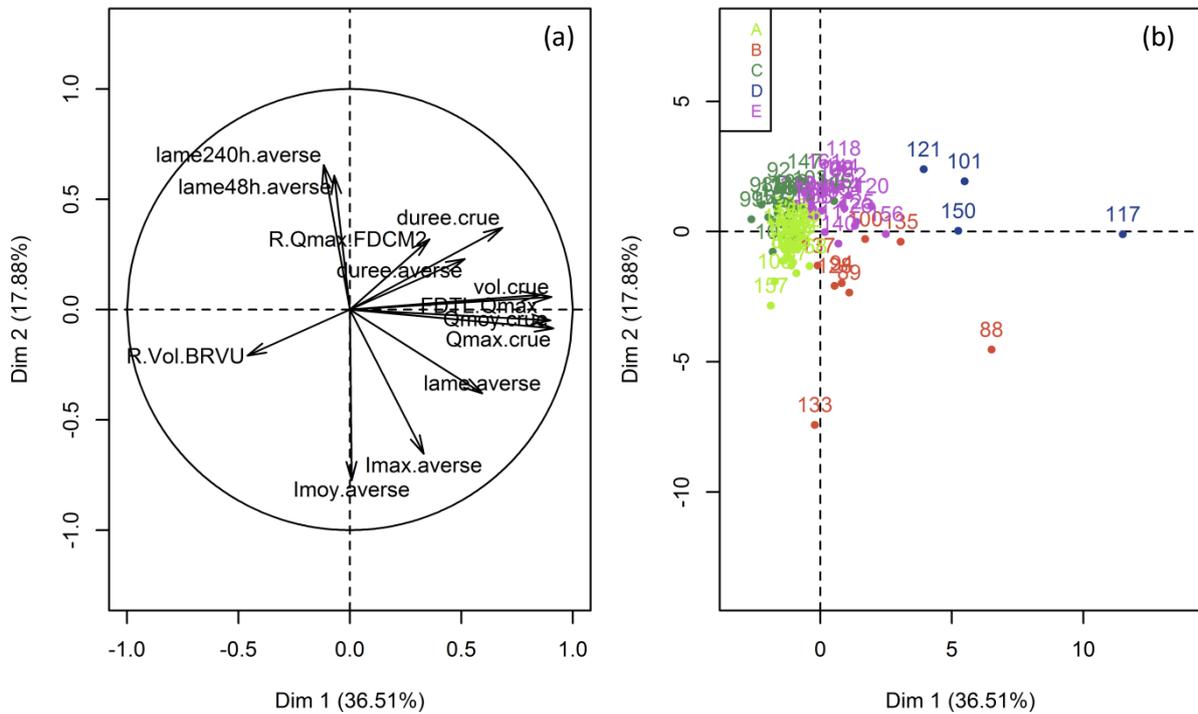


Figure 15 : Résultats de l'ACP sur les 75 événements P-Q par 13 variables multi-stations : (a) graphique des variables sur le 1er plan factoriel ; (b) répartition des individus après CAH en 5 classes

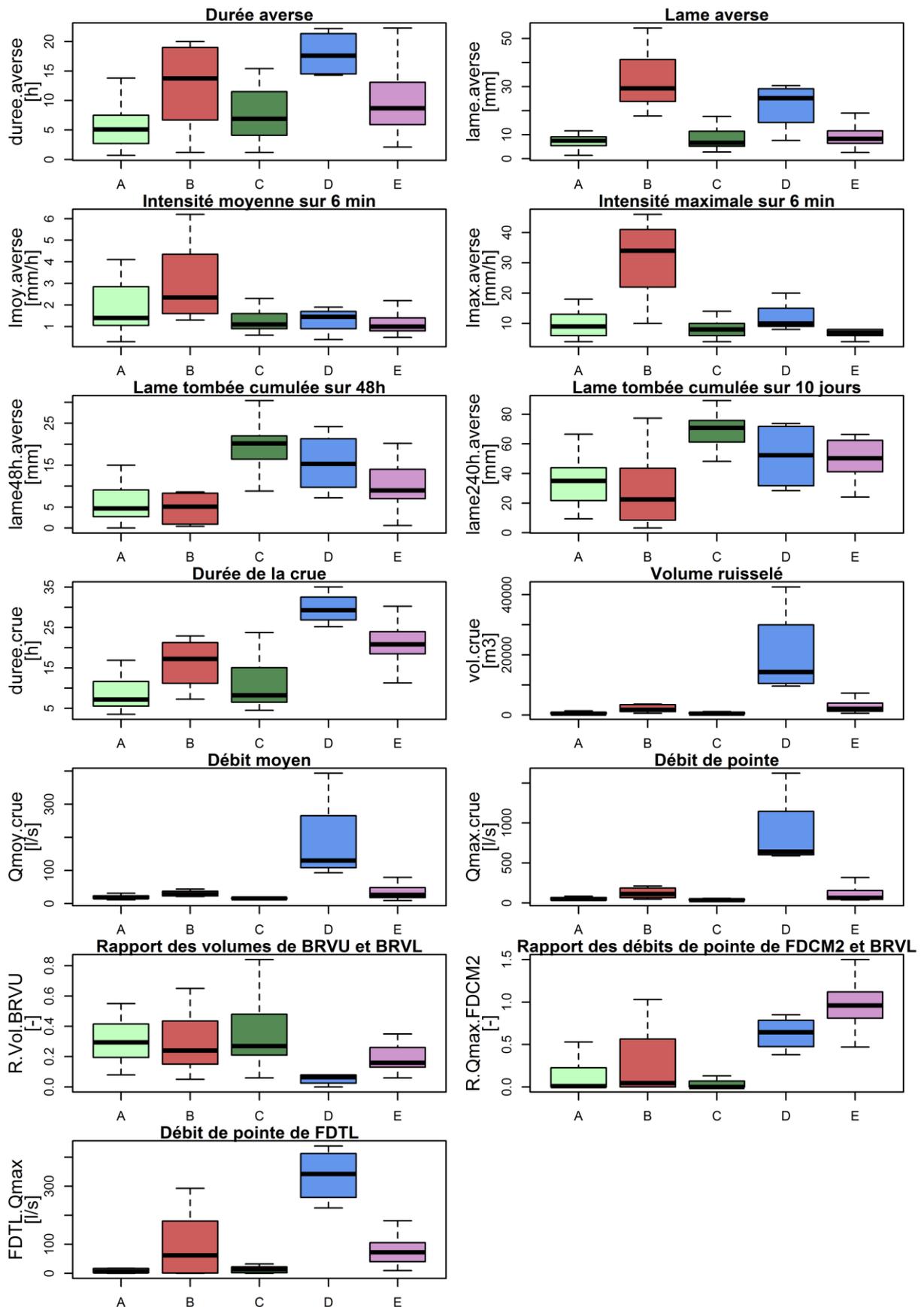


Figure 16 : Caractéristiques des 5 classes établies par CAH sur les 13 variables multi-stations (Annexe X)

- Classes A et C, « Evénements P-Q : ruissellements de proximité et urbains » :

Les événements P-Q décrits par les classes A et C (avec respectivement 24 et 17 événements) sont issus de faibles averses engendrant de faibles ruissellements. Les conditions initiales sont différentes : le sol est potentiellement dégradé et saturé en eau pour les événements P-Q de la classe C (19,2 mm de cumul sur 48 h), alors que les événements P-Q de la classe A se font sur des conditions sèches (6,0 mm de cumul sur 48 h). Malgré ces différences, les réponses hydrologiques sont semblables, ce sont des petites crues qui ont une forte contribution urbaine avec 29 et 35 % du volume ruisselé issu de BRVU (Figure 17a et b). Les parcelles agricoles produisent peu de ruissellement lors de ces crues comme en témoignent les faibles débits enregistrés à FDTL. De plus, les ruissellements à FDCM2 sont trop faibles pour arriver à BRVL : 80 % des débits ne dépassent pas 10 l/s. D'autre part, d'autres zones urbanisées à l'est de l'exutoire ruissent directement à BRVL sans transiter par BRVU, le ruissellement des ces événements P-Q est donc considéré comme majoritairement urbain. L'hydrogramme de BRVL se caractérise par une forte réactivité et une synchronisation aux pics de pluies témoignant de la proximité des ruissellements et de leur genèse sur des surfaces imperméabilisées des zones urbaines.

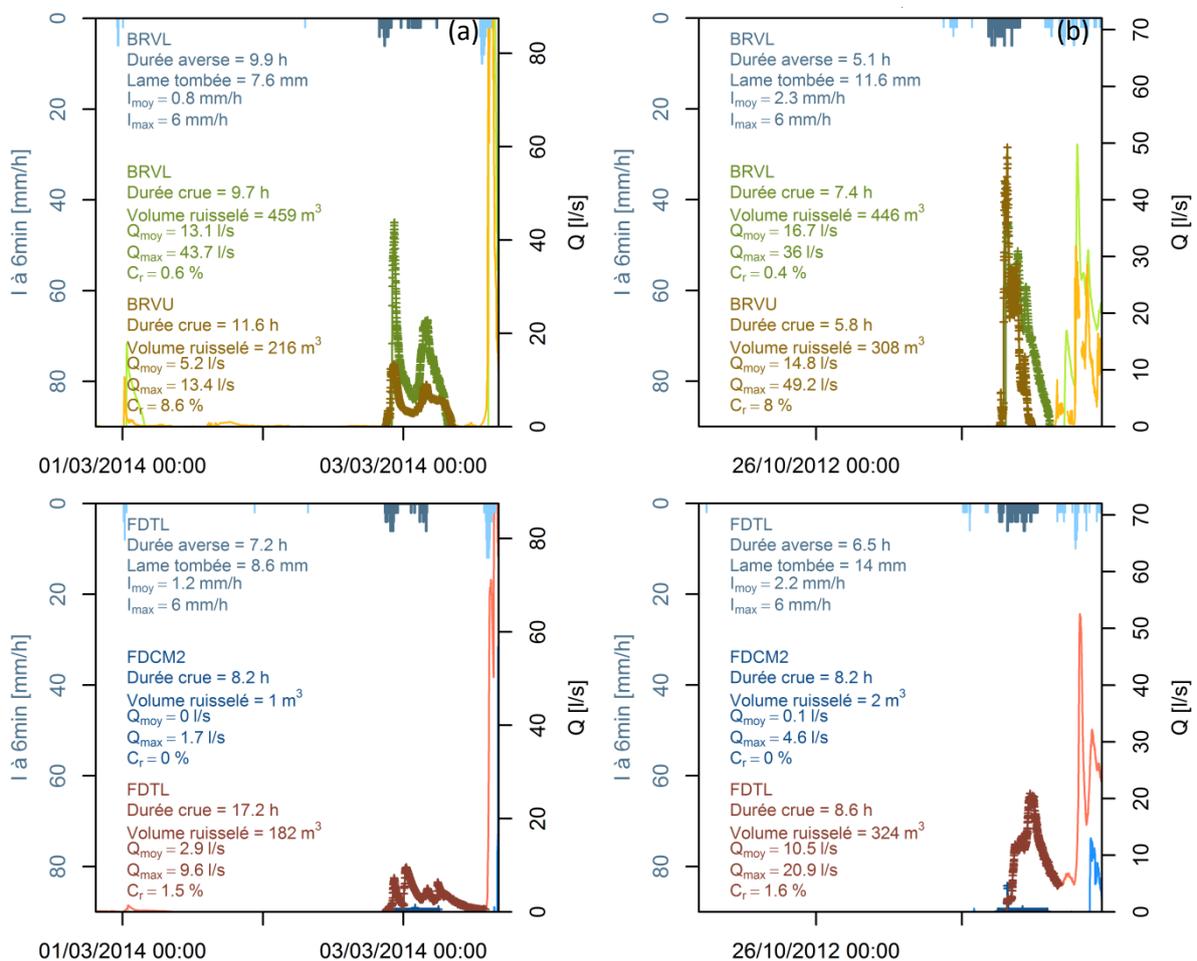


Figure 17 : Hyétogrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 d'événements P-Q de la classe A (a) et C (b), et leurs caractéristiques [Cr : coefficient de ruissellement]

- Classe B, « Evénements P-Q : ruissellements variables issues de pluies extrêmes » :

Cette classe regroupe 8 événements P-Q ayant des caractéristiques d'averse importantes avec des lames tombées de 32,6 mm en moyenne mais très hétérogènes dans l'intensité. Les

réponses hydrologiques sont très variables du fait d'une variabilité de contribution des sous-bassins. Les parcelles agricoles ruissellent pour la plupart des événements. Cependant la production n'est pas assez conséquente pour qu'il y ait une contribution importante du thalweg est pour 5 des 8 événements (débits de pointe à FDCM2 inférieur à 3 l/s pour ces 5 événements) En effet, les sols sont potentiellement peu ruisselants, les événements ont lieu entre juin et début octobre et les conditions initiales sont sèches. Les événements P-Q de cette classe peuvent alors être issus d'un ruissellement majoritairement urbain avec une contribution des parcelles agricoles proches (Figure 18a) ou d'un ruissellement généralisé du bassin versant (Figure 18b) selon l'intensité de l'averse.

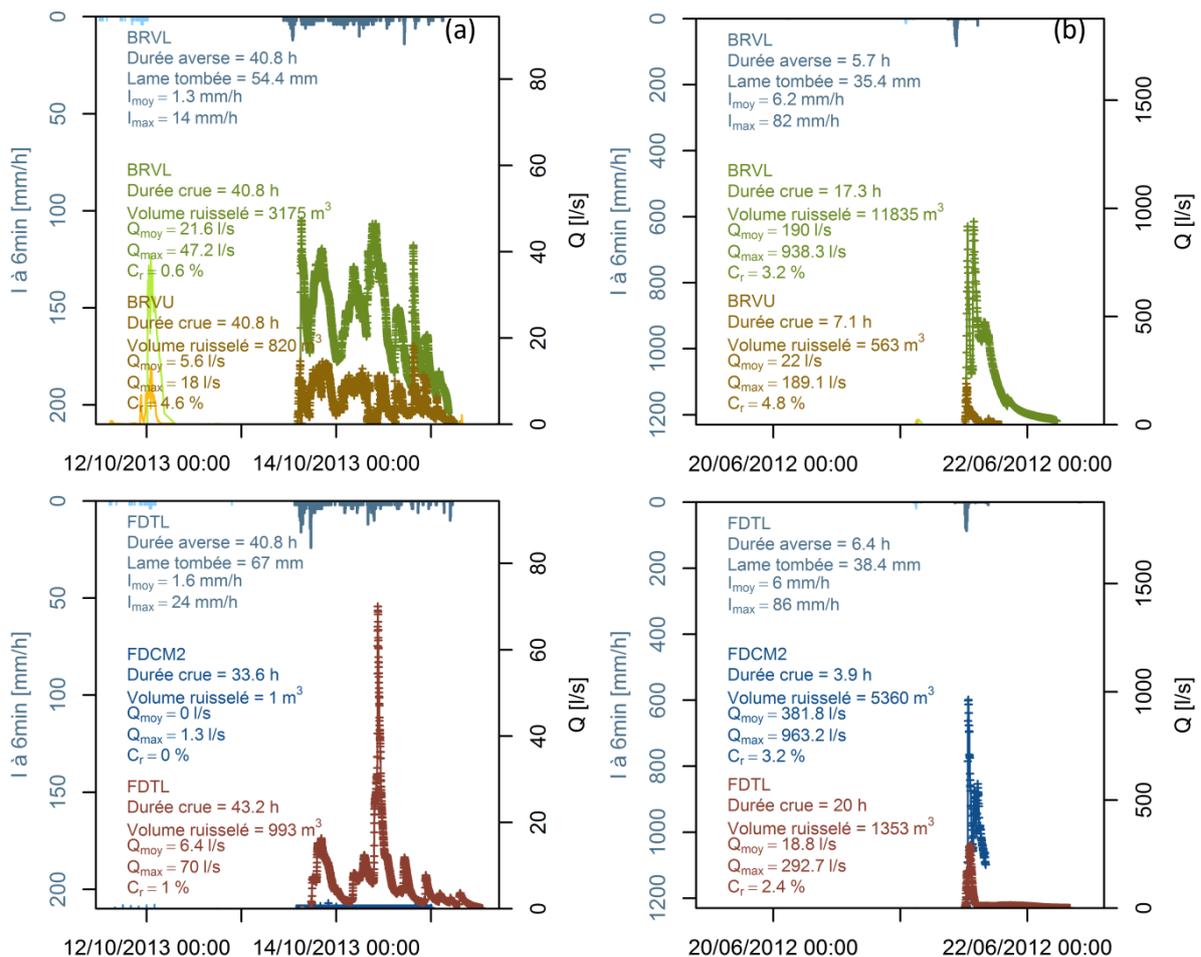


Figure 18 : Hyétogrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 de deux événements P-Q de la classe B et leurs caractéristiques : (a) exemple sans ruissellement à FDCM2 et (b) exemple de ruissellement généralisé

- Classe D, « Evénements P-Q importants issus de ruissellements généralisés du bassin versant » :

Les 4 événements de cette classe sont issus de longues averses (18 h en moyenne) de faibles intensités. Les conditions initiales sont humides et les sols potentiellement dégradés générant de fortes crues avec des lames de 1,93 mm et des pointes de débit de 874 l/s en moyenne. Les volumes ruisselés issus de BRVU sont négligeables par rapport à ceux enregistrés à BRVL (< 5 %). En revanche, il y a une forte contribution du thalweg est : le rapport des débits de pointe entre FDCM2 et BRVL est de 63 %. En effet, les parcelles agricoles ont fortement ruisselé avec des débits atteignant 337 l/s à FDTL. Ces événements sont donc issus de ruissellements généralisés des parcelles du bassin versant. Contrairement

aux événements de faible ampleur des classes A et C, les hydrogrammes de ces événements sont lissés, avec une faible réactivité face aux variations des pics de pluies du fait de l'intensité des débits et de la distance à parcourir pour atteindre l'exutoire (Figure 19a).

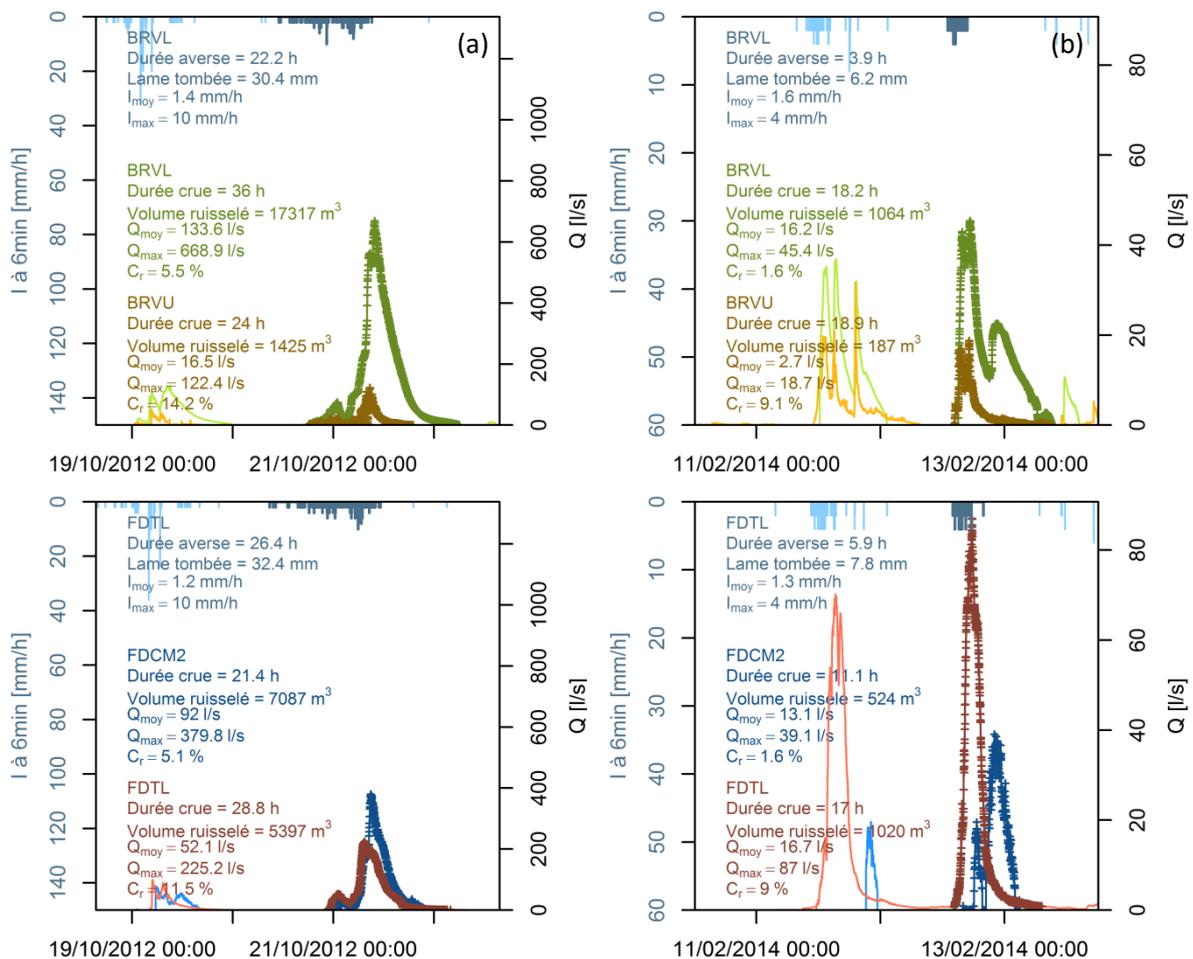


Figure 19 : Hyétogrammes et hydrogrammes des stations de BRVL, BRVU, FDTL et FDCM2 d'événements P-Q de la classe D (a) et E (b) et leurs caractéristiques

- Classe E, « Événements P-Q peu intenses issus du ruissellement de parcelles agricoles situées au sein des différents sous-bassins versants ».

Les 22 événements de cette classe ont des longues crues mais de faible intensité (la moyenne étant à 112 l/s mais la médiane est de 66 l/s révélant la présence de 3 crues de plus forte intensité avec des débits de pointe de l'ordre de 300 l/s). La contribution du volume ruisselé à BRVU est de l'ordre de 20 % et les débits enregistrés à FDCM2 et FDTL sont du même ordre de grandeur que ceux de BRVL, révélant d'important ruissellement sur les parcelles agricoles. La forme des hydrogrammes de ces événements est à « doubles pics » (Figure 19b) correspondant à une double contribution : le premier pic est généré par la réponse rapide des surfaces urbanisées et proches de l'exutoire (avec de fort volume enregistré à BRVU par rapport à BRVL). Le second pic correspond à une réponse agricole tardive provenant d'une production de ruissellement répartie un peu partout sur bassin versant, entraînant une contribution des thalwegs agricoles situés en amont du bassin versant. Ce retard entre la contribution urbaine et celle agricole est d'autant plus marqué car les lames tombées sont faibles.

Les caractéristiques initiales (pluie et conditions initiales) des événements de la classe E sont similaires de celles des classes A et C. Cependant, pour les classes A et C, les ruissellements sont urbains tandis qu'ils sont plus agricoles pour la classe E. En effet, les événements P-Q de la classe E ont lieu à 73 % en hiver, alors que les événements de la classe A et C, ont lieu majoritairement en automne : 50 % et 76 % respectivement. Or d'après la saisonnalité dégagée (2.2.3), la surface des parcelles est bien plus dégradée en hiver, l'infiltration est fortement limitée favorisant la genèse de ruissellement. Au contraire les surfaces en automne sont encore travaillées permettant une meilleure infiltration. Il y a donc plus de parcelles susceptibles de ruisseler, qui sont déclenchées par des plus petites averses, pour les événements de la classe E.

3.3. Bilan et discussion sur la double typologie hydrologique

La mise en fonctionnement des stations de mesure sur les différentes zones du bassin versant de Bourville à partir de la campagne 2012 réduit le nombre d'événements P-Q utilisable pour la CAH multi-station. De ce fait, la caractérisation des contributions des zones du bassin sur la totalité des événements P-Q des campagnes de 2008 à 2014 ne peut se faire qu'indirectement. La répartition des événements entre les classes établies par la CAH multi-station et les classes établies par la CAH de BRVL est détaillée par le Tableau 4. Il est alors possible d'illustrer les sources de ruissellement des événements des classes établies par la CAH de BRVL par celles de la CAH multi-station :

Tableau 4 : Répartitions des 75 événements entre les classes issues de la CAH de BRVL et les classes issues de la CAH multi-station

		CAH BRVL					
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6
CAH multi-station	Classe A	0	1		16	7	
	Classe B	5	0			1	2
	Classe C	0	7			10	
	Classe D	3	0	1		0	
	Classe E	2	17			3	

Les événements des classes 5 et 4 de par leur faible intensité sont issus majoritairement des ruissellements urbains et des parcelles agricoles proches (classes A et C), alors que les événements des classes 1, 2, 3 et 6 étant plus importants, sont issus des ruissellements provenant des parcelles agricoles de tout le bassin mais d'intensités variables (classes B, D et E). On note cependant, des distributions assez larges pour certaines classes. En effet, la variabilité des caractéristiques des événements P-Q est moins importante dans la CAH multi-station car il y a moins d'événements extrêmes pris en compte (1 seul événement de la classe 3) (Annexe XI). De ce fait, les différences de caractéristiques de crues notamment sont davantage mises en avant, notamment les différences des volumes ruisselés et de débits de pointe enregistrés à BRVL. Ainsi, la classe 1 correspond à un mélange des classes B, D et E. Les événements sont alors répartis selon leur intensité, les plus faibles étant dans la classe B et les plus importants dans la classe D. Ainsi il en ressort une forte variabilité des contributions des différentes zones du bassin versant des événements de la classe 1.

La classe 2 est caractérisée par un cumul de pluie sur 10 jours important, tout comme les classes C et D de la CAH multi-station. Là encore, la répartition entre les deux classes correspond à une répartition selon les intensités des événements : les plus faibles étant dans la classe C avec peu de contributions des parcelles agricoles, et les plus importantes étant dans la classe E avec une contribution des parcelles agricoles plus conséquente.

Les classes issues de la CAH présentent donc une forte hétérogénéité pour certaines caractéristiques. En effet, après l'étude au cas par cas, la répartition des événements P-Q au sein des classes peut être optimisée. Cependant, cette typologie automatisée permet de mettre en évidence des fonctionnements hydrologiques représentatifs et caractéristiques du bassin versant de Bourville. Ces fonctionnements sont définis par les conditions initiales (cumul et intensité de pluie) qui déterminent la contribution ou non des différents sous-bassins.

Pour optimiser cette typologie, il peut être intéressant de prendre en compte d'autres paramètres. Certains ont déjà été testés (temps de montée, facteur de forme) mais n'ont pas été concluants. Par l'étude des hydrogrammes, le temps de réponse, défini comme le délai entre le pic de pluie et le pic de débit, est un paramètre à étudier par la suite pour voir s'il permet de différencier les crues engendrées par des ruissellements urbains de celles générées par des ruissellements généralisés au bassin. De plus, pour mieux caractériser le potentiel ruisselant du bassin, les paramètres suivis par l'étude des états de surface peuvent être considérés. Par la caractérisation d'un état de surface à un instant t d'un type de culture et de la surface occupée par cette culture dans le bassin versant, il sera alors possible d'estimer de manière quantifiée (et non simplement par analyse qualitative comme c'est le cas actuellement) la part et la localisation des parcelles les plus à risque de ruisseler et donc de transférer les SA.

4. ANALYSE EVENEMENTIELLE DES DONNEES DE QUALITE D'EAU

4.1. Complétion de la typologie des événements Pluie-Débit par les données de qualité d'eau

4.1.1. Association des événements Pluie-Débit avec les analyses

Pour compléter la typologie hydrologique réalisée sur les 168 événements P-Q, on souhaite mettre en relation les dosages des SA effectués au cours des sept campagnes avec les classes établies. Cette association n'est pas automatique, car les protocoles de prélèvement n'ont pas été conçus dans cet objectif. En effet, les analyses peuvent représenter seulement une partie d'un événement (majoritairement lors des événements extrêmes), ou aller jusqu'à représenter 8 événements P-Q lorsque ces événements sont peu ruisselants (majoritairement des successions de petites crues).

Pour valoriser cette base de données, on considère que l'analyse caractérise correctement les exports d'une classe lorsque le volume analysé des événements de cette même classe représente plus de 80 % de l'analyse. Ainsi, l'association des analyses à la typologie est établie sur 51 séquences ruisselantes, soit 74 % du volume analysé (Annexe XII). Les analyses restantes correspondent à plusieurs événements de différentes classes, le plus souvent on observe plusieurs petites crues de classe 4 ou 5 suivies de crues plus intenses (classe 1 ou 2 par exemple) (Tableau 5). Ces analyses, non utilisables pour la typologie, sont par la suite regroupées sous une septième classe appelée « Mixte ».

Tableau 5 : Qualité de représentation des associations analyse - classe

	Nombre d'analyses associées	Nombre de crues analysées	Volume analysé sur volume ruisselé [%]
Classe 1	19	14	70
Classe 2	9	11	38
Classe 3	13	5	59
Classe 4	4	7	21
Classe 5	1	2	6
Classe 6	4	2	88
Mixte	18	51	/
Total	68	92	55

Les classes n'ont pas la même qualité de représentativité par les analyses. Seuls 21 et 7 % du volume ruisselé des événements des classes 4 et 5 sont représentés par les analyses. En effet, ces événements étant peu ruisselants, le volume ruisselé n'est pas suffisamment important pour réaliser une unique analyse. Les classes les mieux représentées sont celles ayant les événements les plus ruisselants, c'est-à-dire les classes 6, 1 et 3 avec respectivement des volumes ruisselés analysés à 88, 70 et 59 % (Tableau 5). Ainsi, les observations qui vont suivre ne sont pas généralisables mais indiquent déjà une tendance sur les événements analysés.

4.1.2. Résultats de la typologie des exports et des concentrations des substances actives

Seulement 18 % des exports de SA des campagnes de 2008 à 2014 sont quantifiés par des événements du groupe « Mixte ». La typologie réalisée permet donc d'appréhender une majorité des exports de SA quantifiées. Les différences entre les classes ne sont pas significatives cependant des tendances peuvent être dégagées (Figure 20).

Les forts événements hivernaux des classes 1 et 3 présentent des concentrations totales en SA en moyenne de 4,72 µg/l et 3,33 µg/l respectivement (Figure 20). Cependant, du fait des forts volumes ruisselés (de par leur lame ou leur récurrence), les exports totaux de SA engendrés sont importants avec plus de 350 g exportés par classe. Les analyses des classes 2 ont aussi des concentrations totales en SA du même ordre de grandeur (3,26 µg/l) (Figure 20), mais les volumes ruisselés étant plus faibles, les exports ne représentent que 8 % des exports totaux.

Les analyses de la classe 4 présentent des concentrations variées en SA : pour une de ces analyses, réalisée en juin, la concentration totale en SA atteint 25,38 µg/l ; les autres analyses qui ont lieu en automne-hiver, sont en moyenne concentrées à 6,35 µg/l. Du fait du faible volume ruisselé et analysé, les exports de cette classe représentent 4 % des exports totaux. De même, la classe 5 étant représentée par une seule analyse, on ne peut conclure sur les concentrations et les exports générés par ses événements.

La classe 6 est caractérisée par de fortes concentrations totales en SA dans les analyses associées avec en moyenne 22,39 µg/l (Figure 20). Les événements analysés ont lieu en juin, période où les apports sont les plus importants de la campagne. Malgré de faibles volumes ruisselés, cette classe génère 25 % des exports totaux du fait de sa concentration moyenne six fois plus élevée que celle de la classe 3 par exemple.

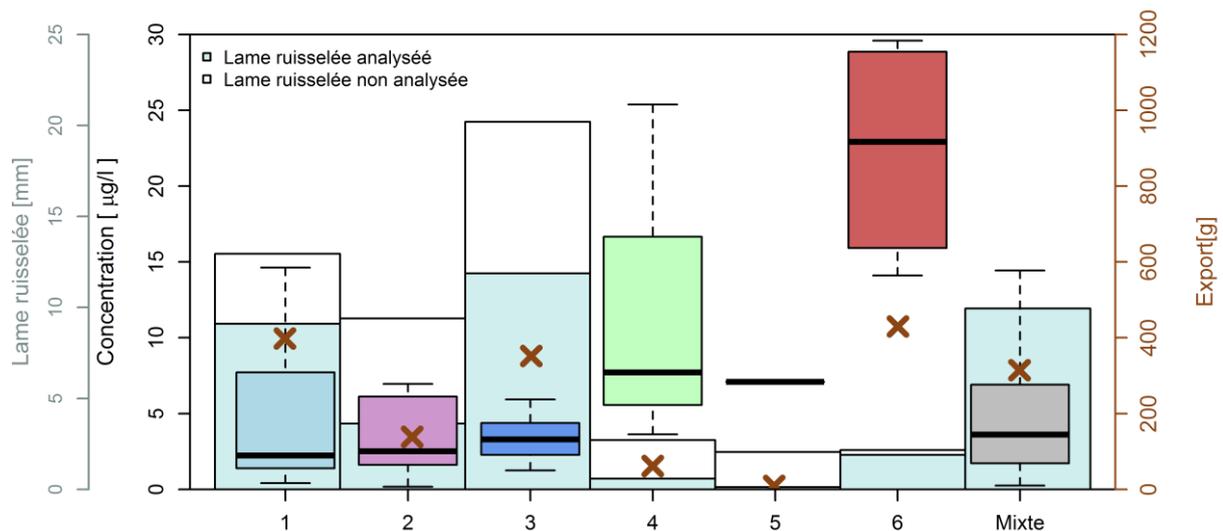


Figure 20 : Concentration moyenne des analyses en SA et total des exports par classe sur les campagnes 2008-2014

Ainsi, la complétion de la typologie hydrologique par les analyses effectuées est partielle du fait de la faible représentativité des classes de petite crue notamment. Cependant les tendances rejoignent la saisonnalité établies précédemment (2.2.4). Les transferts des différentes classes peuvent être résumés par le Tableau 6. De plus, par les échantillons analysés, on observe une faible influence de la contribution généralisée (classes 1, 3 et 6) ou non des parcelles agricoles du bassin (classes 4 et 5) sur les exports de SA. Afin, d’identifier plus finement la typologie des événements sur les exports, quelques événements sont analysés plus en détail.

Tableau 6 : Bilan de la complétion des analyses sur les différentes classes

	Forte concentration totale en SA	Faible concentration totale en SA
Fort export en SA	Classe 6	Classe 1 et 3
Faible export en SA	Classe 4 (et 5)	Classe 2

4.2. Etude de cas : exemple de suivi d’analyses sur la période juin 2012 à décembre 2012

4.2.1. Contexte et présentation des événements Pluie-Débit étudiés

Afin de considérer les principaux facteurs intervenant dans le transfert des SA et pour affiner le rôle de la typologie des différents événements dans les exports ; on réalise une étude de cas sur les transferts de SA sur 7 analyses réalisées entre juin et décembre 2012 correspondant à 5 événements P-Q de 4 classes différentes. La période étudiée s’échelonne sur les campagnes de 2012 et 2013. L’année civile 2012 est particulièrement humide avec une pluviométrie annuelle de 974 mm (notamment pour avril, juin et octobre). Les apports en PPS sont dans la moyenne avec 1699 kg apportés.

Les quatre événements examinés sont représentatifs de leur classe et analysés à plus de 83 % du ruissellement de la crue. La classe 4 est représentée par une analyse sur deux événements P-Q (86 et 87). La classe 6 est représentée par l’événement P-Q 88 qui a été suivi sur 3 analyses. La classe 1 est représenté par une analyse correspondant à l’événement P-Q 101. Enfin, la classe 3 est représentée par l’événement P-Q 117 décrite par deux analyses. Les détails des prélèvements des événements de juin sont décrits sur la Figure 21

(Annexe XIII pour les autres analyses). A titre indicatif les quantités de PPS apportés sur le mois précédent l'événement sont données (Tableau 7 et détaillé en Annexe XIV).

Tableau 7 : Caractéristiques des dosages des SA et des MES sur les 7 analyses étudiées

Date	7-11/06	21-22/06		19-22/10	21-22/12	
Classe	4	6		1	3	
Événement P-Q	86-87	88		101	117	
N° d'analyse	1	1	2 3	1	1	2
Apports sur le mois précédent l'événement (kg)	450	250		54	24	
Lame ruisselé analysée [mm]	0,12	0,17	0,31 0,62	1,66	1,92	2,04
Exports (g)	30,9	53,8	46,1 181,8	30,5	29,7	26,5
Nombre SA quantifiées [-]	43	32	33 33	20	16	14
Concentration totale SA [$\mu\text{g/l}$]	25,38	29,59	14,11 28,14	1,75	1,48	1,25

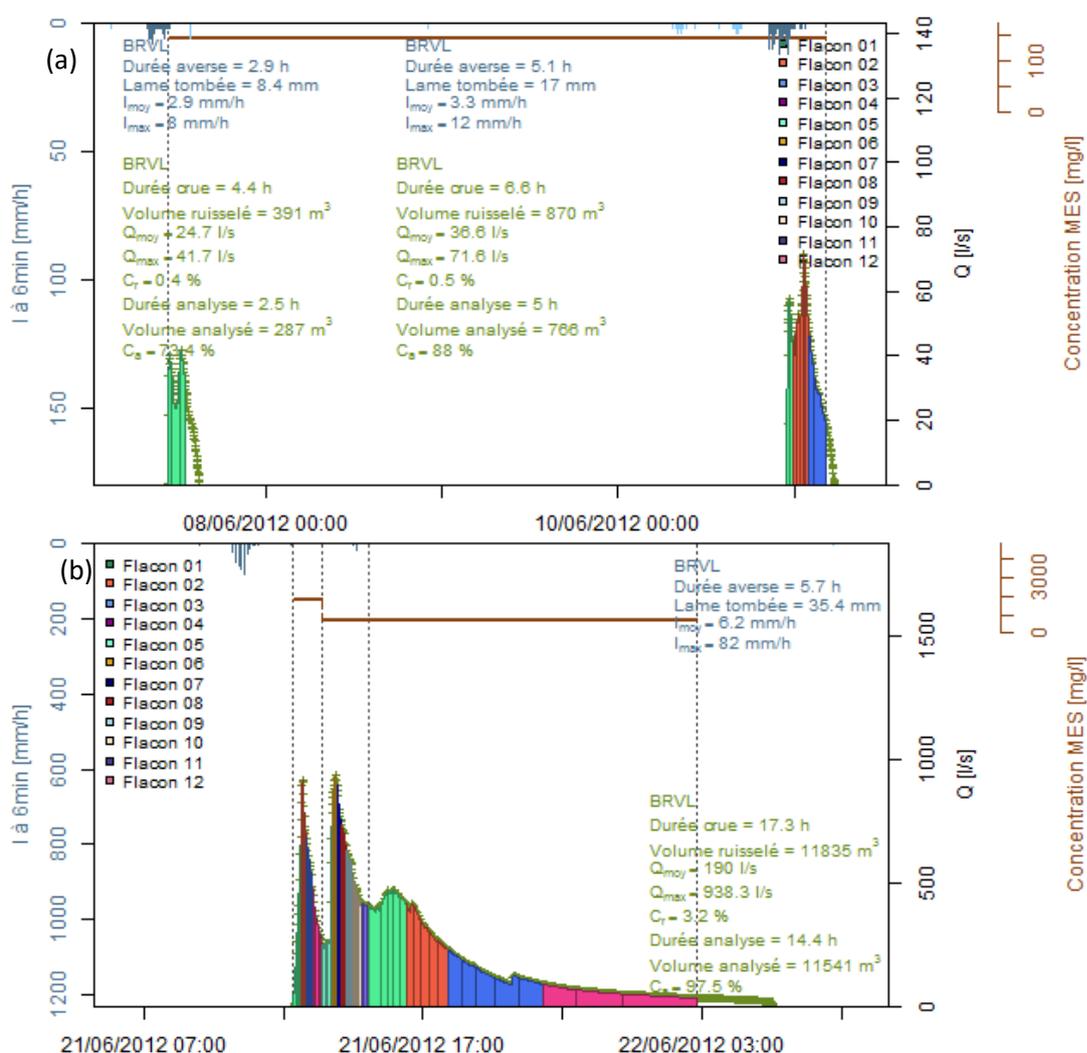


Figure 21 : Prélèvements des échantillons et caractéristiques de l'analyse des événements P-Q 86-87 (a) et des 3 analyses de l'événement P-Q 88 (b).

4.2.2. [Résultats de la typologie sur les exports globaux](#)

D'un point de vue globale, la concentration totale en SA diminue d'un facteur 10 entre les analyses de juin et les analyses de la période automne-hiver. Cette diminution s'accompagne d'une baisse du nombre de SA quantifiées malgré un même nombre de SA recherchées (Tableau 7). Cette forte différence peut s'expliquer notamment par la diminution de la quantité de PPS apportée sur les différentes périodes (2.2.1).

De par leur fort volume ruisselé, les événements 88 et 117 ont les plus forts exports : les exports de l'événement 88 atteignent 281,6 g et ceux de l'événement 117 atteignent 56,2 g.

Malgré de faibles volumes ruisselés, les deux crues de la classe 4 exportent autant que la crue 101. Alors que d'un point de vue hydrologique, les conséquences de ces crues sont limitées, d'un point de vue de transferts de pesticides, elles peuvent poser de réels problèmes d'altération des eaux de surface. Les petits événements ruisselants des premières pluies estivales sont donc aussi à considérer pour limiter les transferts de SA.

En détaillant l'analyse des événements de la classe 4, on remarque que 50 % des 30,9 g exportés correspondent aux exports de glyphosate et de son métabolite AMPA. Le glyphosate est dosé à une concentration de 8,02 µg/l. Cette forte concentration relève d'un apport non recensé sur le bassin versant de Bourville. En effet, les dosages précédents (dernier réalisé le 28/04/2012) sont de l'ordre de 0,6 µg/l et les derniers apports effectués sur le bassin datent de novembre 2011. Or, les événements de la classe 4 sont caractérisés par une forte contribution du bourg de Bourville (BRVU) dans les ruissellements enregistrés à BRVL (ici 21 et 30 % du volume ruisselé à BRVL est issu de BRVU). De plus, le glyphosate étant couramment utilisé comme désherbant chez les particuliers : on peut supposer que des traitements de glyphosate ont été réalisés au niveau du bourg de Bourville sur des bords de chemins ou de trottoirs par exemple, les semaines précédant ces événements.

4.2.3. [Résultats de la typologie sur le type des substances actives](#)

Les SA exportées sont de différentes natures selon les événements (Figure 22). Les exports suivent généralement des tendances saisonnières selon les apports effectués. Des comportements particuliers peuvent alors être mis en évidence lorsque ces tendances ne sont pas suivies.

En juin, les SA quantifiées sont en majorité utilisées sur les cultures de printemps. En effet, les apports sont importants sur ces cultures à cette période (ils représentent le double des apports en des cultures hiver). De plus, ces cultures, encore peu développées, sont les plus susceptibles de ruisseler. Les premiers résultats des suivis des états de surface montrent en effet des couvertures végétales de l'ordre de 5 % pour les parcelles de maïs ou de pomme de terre par exemple, contre plus de 90 % pour les cultures d'hiver (blé, colza). Ces SA quantifiées sont généralement des herbicides. Les deux premières analyses de l'événement 88 ne suivent pas cette tendance : les fongicides sont en effet les plus exportés. Il s'agit des dithiocarbamates exportés à 22,3 g et 18,0 g sur ces deux analyses. En effet, de forts apports ont été effectués juste avant cette crue à proximité de l'exutoire. Ils sont alors fortement mobilisés lors du ruissellement.

Pour les analyses réalisées en automne-hiver, les SA quantifiées sont principalement issues de PPS utilisés sur des cultures d'hiver : les cultures de printemps étant absentes après octobre. Quelques SA utilisées sur les cultures de printemps sont encore quantifiées pour l'événement P-Q 101. Ces exports sont essentiellement dus au lenacile, un herbicide, avec 2,78 g exporté. Les derniers apports du lenacile ont lieu en juillet avec 1,7 kg apportés depuis

avril 2012 sur les parcelles de betterave sucrière. Or, le lenacile a des propriétés physico-chimiques favorables au transfert vers les masses d'eau : il est mobile (Koc de 165 ml/g) et son temps de dégradation est important (DT50 de 93 jours) (INERIS, 2016), c'est pourquoi il est toujours détectable en octobre à des concentrations non négligeables (0,16 µg/l).

On note également, la forte part des insecticides pour les analyses de l'événement P-Q 117. Ces exports proviennent essentiellement de l'imidaclopride qui a été apportée le 28 octobre sur une parcelle d'escourgeon à hauteur de 1,5 kg. Cette parcelle, située en amont des bétouires du thalweg est alors mobilisable par les ruissellements intenses de l'événement P-Q 117.

Ainsi, l'examen des principaux exports de ces événements permet de retracer le fonctionnement agronomique du bassin.

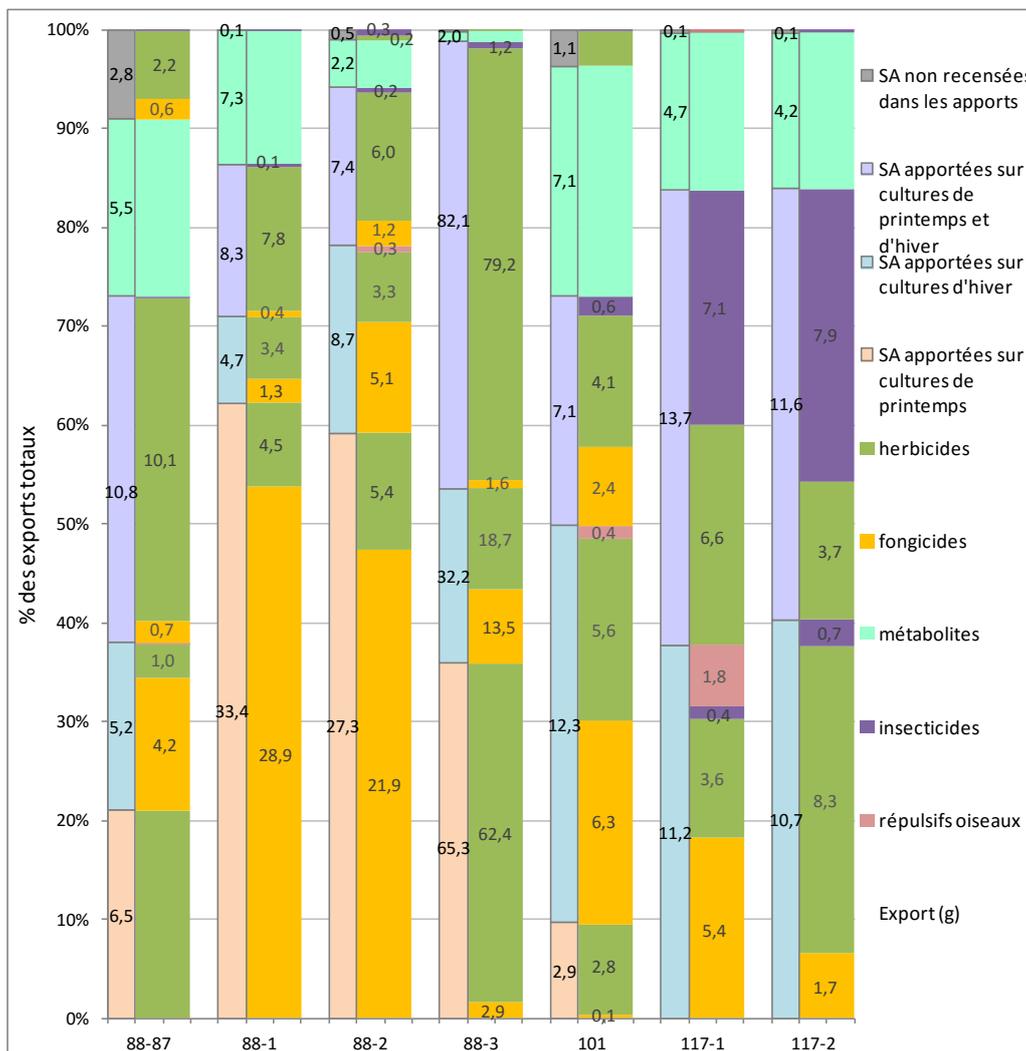


Figure 22 : Exports et part des exports pour chaque analyse selon leur fonction et le type de culture ciblée

4.2.4. Résultats sur l'évolution des contributions des différentes zones du bassin versant

Le fait d'avoir plusieurs analyses sur les événements 88 et 117 permet d'avoir l'évolution des concentrations au cours de ces crues et de constater les contributions successives dans le temps des différentes zones du bassin (Tableau 8). En effet, les parcelles sont potentiellement

toutes sensibles au ruissellement aux vues des intensités de ces événements. Pour l'événement P-Q 88 par exemple la concentration des fongicides cyproconazole, propiconazole augmentent au cours de la crue ; de même les herbicides bentazone et metosulam ne sont quantifiés qu'à la troisième analyse. Les derniers apports de ces SA sont réalisés respectivement les 17 et 18 mai sur deux parcelles de maïs pour le metosulam (0,5 kg) et le 13 juin avec 1,3 kg pulvérisé sur 3 parcelles de maïs toutes situées en amont du barrage de FDFB, sur le thalweg ouest (Annexe XV). La détection tardive de ces deux SA témoigne de l'action du barrage installé à l'aval de FDFB. Celui-ci stocke jusqu'à 16 800 m³ d'eau et donc retarde la contribution du thalweg ouest aux ruissellements enregistrés à BRVL. Pour les SA cyproconazole et propiconazole les apports, se faisant sur les parcelles de blé, sont plus généraux sur le bassin : l'augmentation de la concentration correspond alors à l'augmentation des parcelles contributives au ruissellement.

Tableau 8 : Exemples de dosages de 4 SA sur les analyses de l'événement P-Q 88

SA	LQ [$\mu\text{g/l}$]	Concentration [$\mu\text{g/l}$]		
		88-1	88-2	88-3
bentazone	$2,0 \cdot 10^{-1}$	< LQ	< LQ	3,08
cyproconazole,	$1,0 \cdot 10^{-1}$	0,13	0,20	0,27
dithiocarbamates	2,5	15	5	< LQ
metosulam	$5,0 \cdot 10^{-3}$	< LQ	< LQ	$2,70 \cdot 10^{-2}$
propiconazole	$1,0 \cdot 10^{-1}$	< LQ	0,11	0,35

Les mêmes observations peuvent être faites pour l'événement P-Q 117 : par exemple le chlortoluron est dosé à 0,04 $\mu\text{g/l}$ pour le premier échantillon et augmente à 0,28 $\mu\text{g/l}$ pour le second échantillon. Cette SA, utilisée comme herbicide, est apportée en 2012 le 25 novembre avec 11,5 kg épandus sur 2 parcelles de blé (Annexe XV). Ces parcelles sont situées en amont du bassin au niveau de la Doline (1.2.2). Les ruissellements de cette zone sont retenus par le barrage jusqu'à ce que le volume ruisselé soit suffisamment important. Ils ne contribuent, alors, que tardivement aux ruissellements enregistrés à BRVL.

Au contraire, les concentrations de SA peuvent diminuer au cours des analyses comme l'illustre l'évolution des dosages de dithiocarbamate pour l'événement P-Q 88. Les derniers apports des dithiocarbamates réalisés sur le bassin sont effectués les 12 et 13 juin sur des parcelles de pomme de terre situées dans le sous-bassin délimité par BRVU. Alors que les ruissellements atteignent des débits de 189 l/s à BRVU pour la première analyse, ils deviennent négligeables pour la troisième analyse. C'est pourquoi leur concentration est importante au début de la crue et diminue par la suite. La diminution de la concentration des dithiocarbamates témoigne donc de la succession des contributions des différentes zones du bassin versant.

Les exports confirment les décalages temporels des contributions des différents sous-bassins versants de Bourville au ruissellement. Ce décalage résulte de la localisation des sous-bassins mais aussi de l'existence d'un seuil de volume ruisselé nécessaire pour contribuer aux ruissellements enregistrés à BRVL. Pour le thalweg est, ce seuil dépend de la capacité d'infiltration des bêtouilles et pour le thalweg ouest, il est lié à la présence du barrage.

4.3. Bilan et discussion de l'analyse de qualité d'eau par la typologie

On constate que les exports de SA par classe dépendent de la saison où ont lieu majoritairement les événements P-Q des classes. Les exports les plus importants se font sur les événements hivernaux des classes 1, 2 et 3 ainsi que sur les événements intenses de la classe 6. Les concentrations les plus importantes sont issues des événements des classes 6, 4 et 1 ayant lieu de mai à début septembre, période où les apports sont les plus nombreux.

C'est dans l'analyse des substances actives particulières que la typologie met en évidence des comportements différents dans les concentrations et les types de SA dosées. En effet, selon la classe de l'événement P-Q de l'analyse réalisée, les exports sont différents car les surfaces contributrices au ruissellement le sont aussi. Pour une même période les petites crues de la classe 4 ou 5 ne mobilisent alors pas les mêmes substances actives des événements intenses issus du ruissellement généralisé du bassin (classe 6). Les analyses des événements 86-87 et 88 de juin 2012 permettent d'illustrer ces propos grâce à leur proximité temporelle (les apports entre les deux analyses restent limités). Par exemple, l'herbicide mesotrione apporté en mars et mai 2012, pour un total de 7,22 kg sur 5 parcelles de lin, n'est quantifiée que pour l'analyse de l'événement P-Q 88 à 0,082 g (Annexe XVI). En effet, les parcelles traitées sont situées en amont des bétouilles de la station FDCM et les événements 86-87 ne sont pas assez intenses pour que les thalwegs contribuent aux exports quantifiés à l'exutoire. Les SA quantifiées sur l'analyse des événements P-Q 86-87, sont appliquées sur tout le bassin versant, notamment les parcelles proches de l'exutoire ou situées au sein du sous-bassin de BRVU (exemple du tebuconazole en Annexe XVI). Ces observations restent à être démontrées pour l'ensemble des événements P-Q de la typologie établie.

Cependant, l'analyse sur des uniques crues sur l'ensemble des campagnes n'est pas réalisable sur plusieurs aspects. Tout d'abord d'un point de vue technique : pour réaliser une analyse au laboratoire sur les différentes phases (eau filtrée et MES), le volume doit être suffisamment important (généralement 3 l). Pour pouvoir analyser des crues de 500 m³, le volume seuil déclencheur du prélèvement doit alors être diminué, risquant alors de prélever de l'air ou de l'eau stagnante. D'un point de vue financier cet objectif n'est pas non plus réalisable : 11 analyses sont réalisées en moyenne par campagne à BRVL, or on dénombre en moyenne 27 crues par campagne. Il faudrait alors au minimum doubler le budget actuellement consacré aux analyses. Enfin, d'un point de vue humain, les analyses par crue demanderaient d'augmenter significativement les déplacements pour, d'une part, récupérer les flacons remplis rapidement lors de plus forts ruissellements et d'autre part, remplacer les batteries des préleveurs automatiques. Cependant, le suivi des transferts au sein du bassin versant peut être amélioré par l'étude des analyses réalisées sur les stations FDTL et BRVU. Ces analyses peuvent être complémentaires de celles réalisées à BRVL. Les analyses à BRVU sont indicatrices des exports des petites crues ; et les analyses à FDTL donnent des informations sur les exports des issues des parcelles agricoles en amont du bassin. De plus, ces analyses permettront de cibler plus précisément les parcelles contributrices aux transferts de substances actives jusqu'à l'exutoire du bassin versant, et de connaître les substances qui ont été réinfiltrées entre temps.

CONCLUSION :

L'évolution du paysage agricole (diminution des surfaces en prairie, augmentation des tailles des parcelles, intensification des cultures) engage à mettre en place des solutions pour réduire les conséquences du ruissellement et des transferts de substances actives au sein des territoires sensibles au ruissellement tel que le bassin versant de Bourville. L'étude de ce stage cherchait à caractériser les principaux déterminismes du ruissellement et des transferts au sein de ce bassin versant pour réduire les contaminations de ses masses d'eau.

L'étude globale réalisée au cours de ce stage a montré la complexité du fonctionnement hydrologique et des transferts de substances actives vers les masses d'eau au sein du bassin versant de Bourville. Cependant, une saisonnalité et une typologie des événements ruisselants ont pu être démontrées et ont amené une certaine compréhension du fonctionnement du bassin. Cette typologie a mis en évidence l'importance des conditions de dégradations des surfaces agricoles dans la production de ruissellement. De plus, le bassin présente la particularité d'avoir sur ses deux thalwegs la présence d'obstacles (bêtoires et barrages) limitant l'écoulement direct des ruissellements d'amont vers l'aval. Cette particularité se traduit dans les ruissellements par des décalages marqués des différentes zones du bassin versant.

Des périodes (décembre ainsi que mai, juin et septembre) et des types de crues (« événements estivaux extrêmes », « événements hivernaux extrêmes ») ont ainsi pu être identifiés comme à risque élevé dans les transferts des substances actives. Cette typologie apporte des connaissances clés pour la définition des types d'actions à mettre en place pour limiter les transferts de substances actives au sein du bassin versant. Quelques pistes sont déjà envisageables. Les crues de faibles intensités sont mobilisatrices des substances actives du milieu urbain et des parcelles agricoles proches. Ces événements révèlent de fortes contaminations ponctuelles pouvant être issues de ces milieux par l'utilisation non suivie de produits phytosanitaires par des particuliers par exemple. La majorité des exports sont issus de crues générées par le ruissellement des parcelles agricoles issues de tout le bassin versant. L'enjeu de réduction des transferts de substances actives se fait sur ces événements. Pour les crues d'intensité moyenne, la réduction des transferts des substances actives peut être réalisée par les techniques de zones tampons en favorisant la mise en place de zone de réinfiltration le long des chemins de l'eau. Les événements les plus importants mais moins récurrents, sont trop intenses pour être pris en compte par les ces aménagements. C'est donc au niveau de la gestion du système cultural que les actions pourront être considérées.

La correspondance entre les typologies effectuées à l'exutoire et par multi-station permet d'envisager un suivi uniquement sur l'exutoire et d'établir une modélisation par les variables prises en compte. Cette modélisation permettra alors d'identifier les principales zones de contribution du bassin versant. De plus, par le maintien des suivis uniquement à l'exutoire, le fonctionnement hydrologique et les transferts de pesticides pourront être appréhendés tout en réduisant les frais de maintenance du programme Pesticéros.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Agreste, 2011. Haute-Normandie : Recensement agricole 2010 (No. 71). Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- Ambroise, B., 1998. Génèse des débits dans les petits bassins versants ruraux en milieu tempéré: 1 - Processus et facteurs. *Rev. Sci. Eau* 11, 471.
- Campbell, N. (Ed.), 2004. *Diffuse pollution: an introduction to the problems and solutions*. IWA Publ, London.
- Cappus, P., 1960. Etude des lois de l'écoulement - Application au calcul et à la prévision des débits. *Houille Blanche* A, 493–520.
- Carluer, N., Gouy, G., Kao, C., Lagacherie, P., Benoit, P., Molénat, J., Réal, B., Souillier, C., Gril, J.-J., Trolard, F., Voltz, M., Ackerer, P., Moussa, R., Arousseau, P., Cordier, M.-O., Gascuel-Oudou, Margoum, C., Coquet, Y., Dutertre, A., 2004. Rôle des aménagements d'origine anthropique (dispositifs enherbés et fossés) dans le transfert et la dissipation des produits phytosanitaires en bassin versant agricole. Modélisation en vue d'apprécier les effets des aménagements et des pratiques agricoles sur la contamination des eaux de surface (No. Pesticides (APR 1999)).
- Carluer, N., Gouy, V., Gril, J.J., 1996. Contamination des eaux de surface par produits phytosanitaires et modélisation. *Ingénieries-EAT* 16 à 30.
- Charbonnier, E., Ronceux, A., Carpentier, A.-S., Soubelet, H., Barriuso, E., 2015. *Pesticides : Des impacts aux changements de pratiques*, Quae. ed, Savoir faire.
- DGALN, 2014. Directive-cadre sur l'eau : objectifs et mise en oeuvre.
- Dubernet, J., Delmas, F., Hennion, M.-C., Mazzella, N., Scribe, P., Vernier, F., 2006. Recherche sur le déterminisme du transfert des pesticides et leur devenir dans les eaux de surface : incidence sur l'évaluation des risques.
- Gril, J.J., Gouy, V., Carluer, N., 1999. Processus de transfert superficiel des produits phytosanitaires, de la parcelle au bassin versant. *Houille Blanche* 76–80.
- Hellico, F., Ouvry, J.-F., Richet, J.-B., 2003. Système d'anticipation des épisodes pluvieux hivernaux générateurs de désordres hydrologiques. Etude de faisabilité. AREAS.
- Horton, R., 1933. The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Trans. Am. Geophys. Union* 446–460.
- Lance, G.N., Williams, W.T., 1967. A general theory of classificatory sorting strategies. *Comput. J.* 4, 373–380.
- Le Bissonnais, Y., Benkhadra, H., Chaplot, V., Fox, D., King, D., Daroussin, J., 1998. Crusting, runoff and sheet erosion on silty loamy soils at various scales and upscaling from m² to small catchments. *Soil Tillage Res.* 46, 69–80.
- Le Bissonnais, Y., Renaux, B., Delouche, H., 1995. Interactions between soil properties and moisture content in crust formation, runoff and interrill erosion from tilled loess soils. *CATENA* 25, 33–46.
- Lecomte, V., 1999. Transfert de produits phytosanitaires par le ruissellement et l'érosion de la parcelle au bassin versant. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts.
- Leonard, R.A., 1990. Movement of pesticides into surface waters, in: *Pesticides in Soil Environnement : Processes, Impacts and Modeling*. Soil Science Society of America, pp. 303–349.
- Leu, C., Singer, H., Stamm, C., Müller, S.R., Schwarzenbach, R.P., 2004. Variability of Herbicide Losses from 13 Fields to Surface Water within a Small Catchment after a Controlled Herbicide Application. *Environ. Sci. Technol.* 38, 3835–3841.
- Lewis, M., 2015. Mapping Loess Soils in Europe | GeoCurrents [WWW Document]. GeoCurrents. URL <http://www.geocurrents.info/geonotes/mapping-loess-soils-in-europe> (accessed 8.24.16).

- Louchart, X., Voltz, M., Coulouma, G., Andrieux, P., 2004. Oryzalin fate and transport in runoff water in Mediterranean vineyards. *Chemosphere* 57, 921–930.
- Ludwig, B., Auzet, A.-V., Papy, F., King, D., Chadoeuf, J., 1996. Etats de surface, structure hydrographique et érosion en rigole de bassins versants cultivés du Nord de la France. *Etude Gest. Sols* 53–70.
- Passeport, E., Tournebize, J., Chaumont, C., Guenne, A., Coquet, Y., 2013. Pesticide contamination interception strategy and removal efficiency in forest buffer and artificial wetland in a tile-drained agricultural watershed. *Chemosphere* 91, 1289–1296.
- Roche, M., 1963. *Hydrologie de surface*, Gauthier-Villars Editeur Paris. ed.
- Ronfort, C., Souchère, V., Martin, P., Sebillotte, C., Castellazzi, M.S., Barbottin, A., Meynard, J.M., Laignel, B., 2011. Methodology for land use change scenario assessment for runoff impacts: A case study in a north-western European Loess belt region (Pays de Caux, France). *CATENA* 86, 36–48.
- Saporta, G., 1990. Simultaneous analysis of qualitative and quantitative data. *Societ`a italiana di Statistica, CEDAM*.
- Stämpfli, N., Beaulieu, R., Breune, I., Guillou, M., 2007. Evaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec.
- Steege, A., Govers, G., Takken, I., Nachtergaele, J., Poesen, J., Merckx, R., 2001. Factors Controlling Sediment and Phosphorus Export from Two Belgian Agricultural Catchments. *J. Environ. Qual.* 30, 1249.
- Stehle, S., Dabrowski, J.M., Bangert, U., Schulz, R., 2016. Erosion rills offset the efficacy of vegetated buffer strips to mitigate pesticide exposure in surface waters. *Sci. Total Environ.* 545–546, 171–183.
- Vallée, R., Douset, S., Schott, F.-X., Pallez, C., Ortar, A., Cherrier, R., Munoz, J.-F., Benoît, M., 2015. Do constructed wetlands in grass strips reduce water contamination from drained fields? *Environ. Pollut.* 207, 365–373. doi:10.1016/j.envpol.2015.09.027
- Van Oost, K., Govers, G., Desmet, P., 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landsc. Ecol.* 15, 577–589.
- Voltz, M., Louchart, X., 2001. Les facteurs-clés de transfert des produits phytosanitaires vers les eaux de surface. *Ingénieries Numéro Spéc. «Phytosanitaires Transf. Diagn. Solut. Correct.* 45–54.

REFERENCES SITOGRAPHIQUES :

- AESN, 2016. Agence de l'Eau Seine Normandie - SDAGE 2016-2021 - Etat des lieux du Bassin de la Seine. URL <http://www.eau-seine-normandie.fr/index.php?id=7854> (accessed 8.26.16).
- INERIS, 2016. SIRIS Pesticides, Moteur de calcul. SIRIS Pestic. Système Intégré. Risques Par Intérag. Scores Pour Pestic. URL http://www.ineris.fr/siris-pesticides/moteur_calcul (accessed 8.30.16).

ANNEXES :

Annexe I : Détermination du numéro de courbe NC pour l'utilisation du temps de concentration par la méthode de Mockus (Stämpfli et al., 2007).....	42
Annexe II : Détermination des débits sur les différentes stations de mesures	43
Annexe III : Méthode de prélèvements et d'analyses des substances actives des Produits phytosanitaires	45
Annexe IV : Exemple de fiche de suivi d'état de surface d'une parcelle de blé au sein du bassin versant de Bourville.....	46
Annexe V : Occupation du sol sur le bassin versant de Bourville pour les campagnes de 2012 et 2013	47
Annexe VI : Résultats de l'ACP des dimensions 3-4 sur les 168 événements P-Q décrites par les 10 variables pluviométriques et hydrologiques enregistrées à BRVL.....	49
Annexe VII : Caractéristiques des événements par les classes définies par la CAH issue des variables pluviométriques et hydrologiques de BRVL	50
Annexe VIII : Résultat de l'ACP sur les 75 événements P-Q par les 13 variables étudiées sur le plan factoriel définis par les 3èmes et 4èmes dimensions	51
Annexe IX : Résultat de la CAH sur les 75 événements P-Q par les 13 variables pluviométriques et hydrologiques multi-stations	52
Annexe X : Caractéristiques des 5 classes de la CAH issues des 13 variables pluviométriques, hydrométriques multi-stations	53
Annexe XI : Correspondance de la typologie multi-station et de la typologie établie à BRVL : Caractéristiques des classes par les variables multi-stations	54
Annexe XII: Bilan des associations événements P-Q-Analyses réalisées sur du 01/09/2007 au 31/03/2014.....	55
Annexe XIII: Hydrogrammes des événements P-Q analysées dans l'étude de cas du 4.2	58
Annexe XIV: Substances actives dosées pour les analyses étudiées dans l'étude de cas du 4.2.	61
Annexe XV : Localisation des apports en Metosulam et du Chlortoluron sur l'année 2012... 67	
Annexe XVI : Carte de localisation des apports du Tebuconazole et du Mesotrione de mars à juin 2012 : illustration des parcelles contributives aux exports des événements 86-87 (classe 4).....	68

Annexe I : Détermination du numéro de courbe NC pour l'utilisation du temps de concentration par la méthode de Mockus (Stämpfli et al., 2007)

Le numéro de courbe NC représente « l'effet des conditions de surface du bassin versant sur le ruissellement ». Il prend en compte différentes caractéristiques du sol : sa texture, son utilisation (intensive ou non), son état de dégradation (capacité d'infiltration) et son état de recouvrement (couverture végétale); et de la morphologie générale du bassin (pente transversale).

Tableau : Valeur de Numéro de courbe, méthode SCS Curve Number

Utilisation du sol	Pente transversale du bassin versant (perpendiculaire au cours d'eau)	Condition hydrologique	Classe de sol			
			A	B	C	D
Culture intensive	<3%	Pauvre Bonne	63 60	74 70	80 78	82 81
	3-8%	Pauvre Bonne	65 63	76 75	84 83	88 87
	>8%	Pauvre Bonne	72 67	81 78	88 85	91 89
Culture extensive	<3%	Pauvre Bonne	39 25	61 40	74 70	80 78
	3-8%	Pauvre Bonne	49 39	69 61	79 74	84 80
	>8%	Pauvre Bonne	68 49	79 69	86 79	89 84
Boisé	<3%	Pauvre Bonne	25 22	55 53	70 65	77 74
	3-8%	Pauvre Bonne	41 25	63 55	75 70	81 77
	>8%	Pauvre Bonne	47 41	68 63	80 75	84 81
Résidentielle		Dense Peu dense	73 59	83 74	88 82	90 86
Conditions hydrologiques		Classes de sol				
Pauvre : Faible couvert végétal et conditions limitant l'infiltration		A : Graviers et sables grossiers (infiltration élevée); B: Sables moyens et fins (infiltration moyenne); C : Sables fins mal drainés, sols limoneux et argiles perméables (infiltration pas-sable); D : Argiles lourdes et sols minces (infiltration faible)				
Bonne : Bon couvert végétal et conditions favorisant l'infiltration						

 : Choix correspondant aux conditions du bassin versant de Bourville

Source : Stämpfli, N., Beaulieu, R., Breune, I., Guillou, M., 2007. Evaluation des débits de pointe pour les petits bassins versants agricoles du Québec.

Annexe II : Détermination des débits sur les différentes stations de mesures

Station de mesure BRVU :



La station de mesure de BRVU mis en place depuis janvier 2012 à la sortie du réseau d'eaux pluviales du bourg de Bourville. Cette station est équipée d'un capteur hauteur-vitesse permettant de déterminer le débit instantanément.

En plus du suivi quantitatif, cette station est équipée d'un suivi qualitatif avec 2 préleveurs automatiques (ISCO 3700, Ijinus).

Photo du dispositif de mesure mis en place à BRVU (Source : AREAS)

Station de mesure FDTL :



Photo du dispositif mis en place à FDTL : canal trapézoïdal super-critique (Source : AREAS)

La station de mesure de FDTL est en fonctionnement depuis novembre 2011. Elle est équipée d'un canal trapézoïdal super-critique réalisé par l'USGS, cette technique permet d'éviter les formations de dépôts dans les zones de mesure et ainsi d'assurer une précision sur les faibles débits. La hauteur d'eau est mesurée par un piézomètre numérique (INW modèle PT12, pleine échelle de 3m, avec une précision de 0,06% de la pleine échelle) dans un puits de tranquillisation. La courbe de tarage est établie à partir de celle théorique de cette installation, avec vérification par un étalonnage par concentration au sel. En plus du suivi quantitatif, cette station est équipée d'un suivi qualitatif avec 2 préleveurs automatiques (ISCO 3700, Ijinus).

Station de mesure FDCM :



La station de mesure de FDCM est mise en place en avril 2012, la mesure des débits se font instantanément par couplage d'un capteur hauteur-vitesse au niveau de fossés trapézoïdaux

Photo du dispositif de mesure mis en place à FDCM (Source : AREAS)

Annexe III : Méthode de prélèvements et d'analyses des substances actives des Produits phytosanitaires

L'analyse des SA sur les différentes stations de mesures (BRVL, BRVU et FDTL) se fait par les prélèvements de volume d'eau ruisselé. Ce volume est déterminé par un volume ruisselé seuil, appelé « Vd » qui varie selon la saison : en période sèche, le volume seuil déclencheur des prélèvements est diminué de moitié par rapport au volume prélevé standard. A l'inverse, lors des événements exceptionnels le seuil est augmenté afin de ne pas remplir les flacons trop rapidement.



Chaque flacon de 1L est composé de 5 à 10 prélèvements selon les sites. A BRVL, le volume prélevé est défini à 200 ml.

L'analyse des flacons est réalisée par le laboratoire de Rouen sur un nombre variable de flacons : l'analyse peut se faire alors sur 5 à 100 prélèvements. Le nombre de flacons analysé est déterminé en fonction du budget et des conditions ruisselantes.

Préleveurs automatiques composés de 12 flacons
(Source : AREAS)

L'analyse des échantillons quantifie les paramètres physico-chimiques suivants :

- nitrates, nitrites, ammonium, orthophosphate, phosphore total
- turbidité et MES
- carbone organique total, dissous et particulaire
- pH
- 203 substances actives sur eau brute ou sur eau filtrée et MES

Annexe IV : Exemple de fiche de suivi d'état de surface d'une parcelle de blé au sein du bassin versant de Bourville

Suivi d'état de surface – Fiche de notation :

Instructions :

- Choix des parcelles selon une combinaison de : culture, semis précoce ou tardif, travail du sol
- Faciès : noter l'importance du **F2 en %** et la présence d'**autres faciès**
- Type de couvert : noter la **culture** ainsi que les **repousses d'adventices**
- Couverture du sol : il existe deux grands seuils, < **20%** et > **60%**

Responsable : XX

Précédent cultural : **Betterave sucrière** semée le 13/03/15 et **arrachée le 28/10/15**

Interculture : **pas de culture intermédiaire**

Travaux du sol : **Labour le 30/10/15**

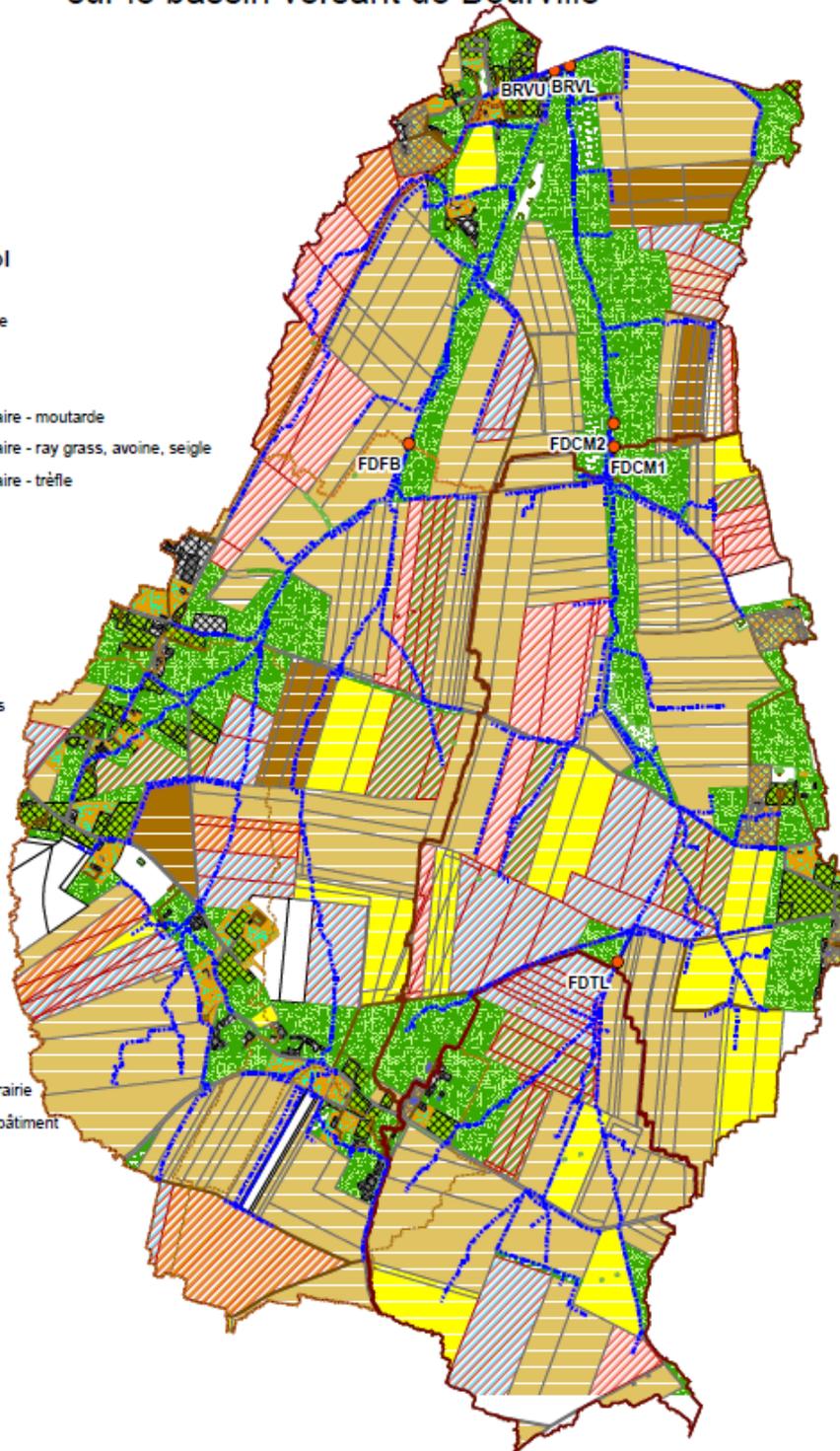
Date Heure	Observateur	Site	Modalité	N° Photo	Faciès		D _{min} (cm)	Rugosité		Couvert végétal			
					Nature	Étendue (%)		Parallèle (de 0 à 4)	Perpend. (de 0 à 4)	Date de semis	Couverture du sol (%)	Hauteur du couvert (cm)	
16/11/2015	XX	B052	Rang	4 photos	F0	NA	0.1	1 cm	3 cm	30/10/15	0	NA	
			Inter-rang										
11/12/2015	XX	B052	Rang	4 photos	F2	NA	0.5-0.6	< 1 cm	2-3 cm		30/10/15	< 5	NA
			Inter-rang										
21/01/2016	XX	B052	Rang	3 photos	F2	80	1	< 1 cm	1 cm			30/10/15	5
			Inter-rang										
18/03/2016	XX	B052	Rang	3 photos	F2	NA	1	< 1 cm	1 cm	30/10/15			10
			Inter-rang										
27/04/2016	XX	B052	Rang	6 photos	F2	NA	1	3-4 cm	2 cm		30/10/15		90
			Inter-rang										
			Inter-rang										

Annexe V : Occupation du sol sur le bassin versant de Bourville pour les campagnes de 2012 et 2013

Occupation du sol en juin 2012 sur le bassin versant de Bourville



- station
 - thalweg
- Occupation du sol**
- inconnu
 - ▨ chantier de récolte
 - ▨ labour
 - ▨ déchaumage
 - ▨ culture intermédiaire - moutarde
 - ▨ culture intermédiaire - ray grass, avoine, seigle
 - ▨ culture intermédiaire - trèfle
 - ▨ maïs
 - ▨ lin
 - ▨ betterave
 - ▨ pois
 - ▨ fève, féverole
 - ▨ trèfle, luzerne
 - ▨ orge de printemps
 - ▨ pomme de terre
 - ▨ avoine
 - ▨ blé
 - ▨ escourgeon
 - ▨ colza
 - ▨ gel, jachère
 - ▨ mare
 - ▨ bois
 - ▨ verger
 - ▨ friche
 - ▨ prairie
 - ▨ corps de ferme prairie
 - ▨ corps de ferme / bâtiment
 - ▨ bâtiment
 - ▨ maison et jardin
 - ▨ jardin
 - ▨ chemin
 - ▨ route



0 250 500 1 000 1 500 2 000 Mètres

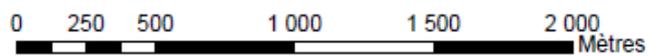
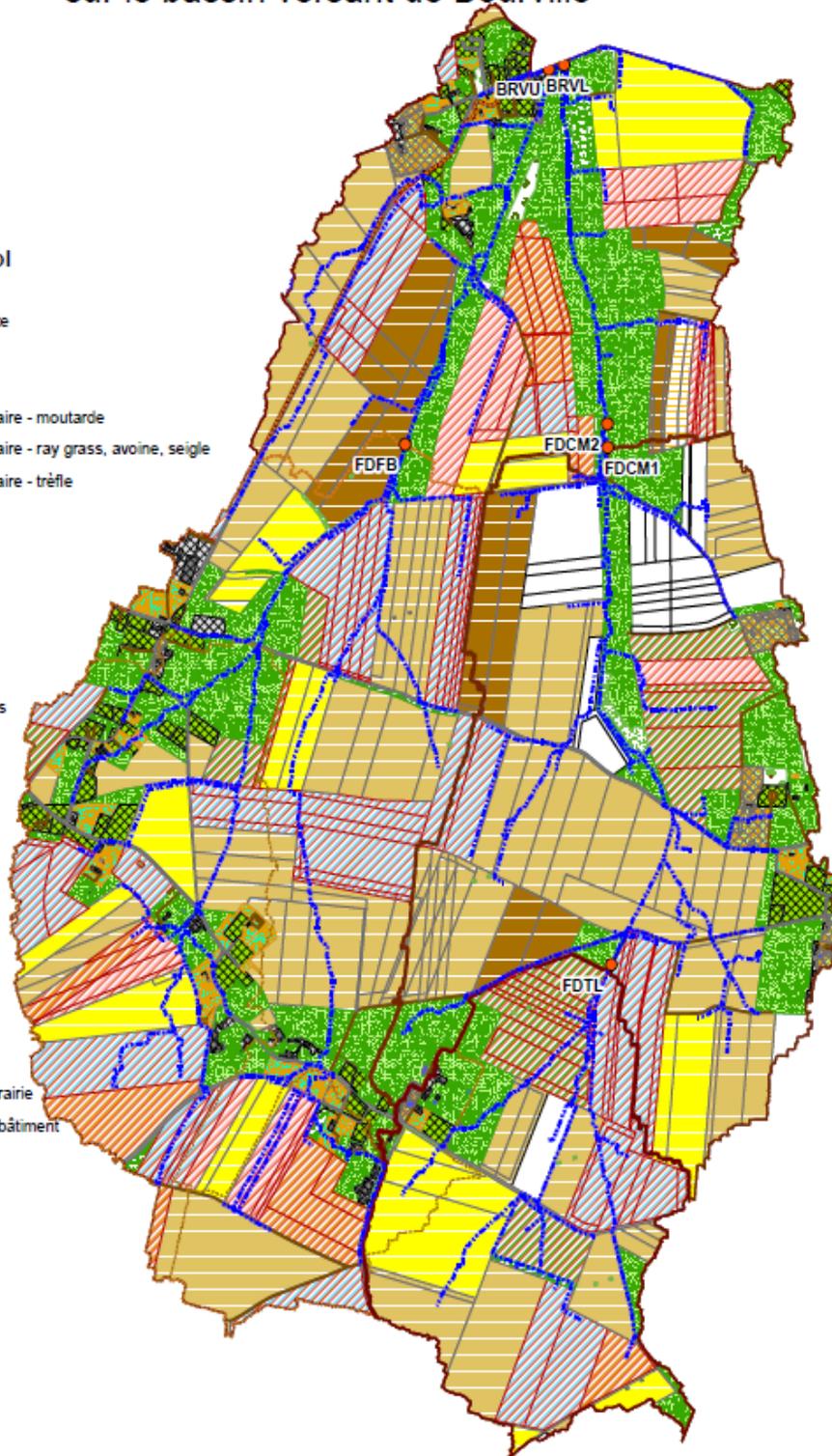
Occupation du sol en juin 2013 sur le bassin versant de Bourville



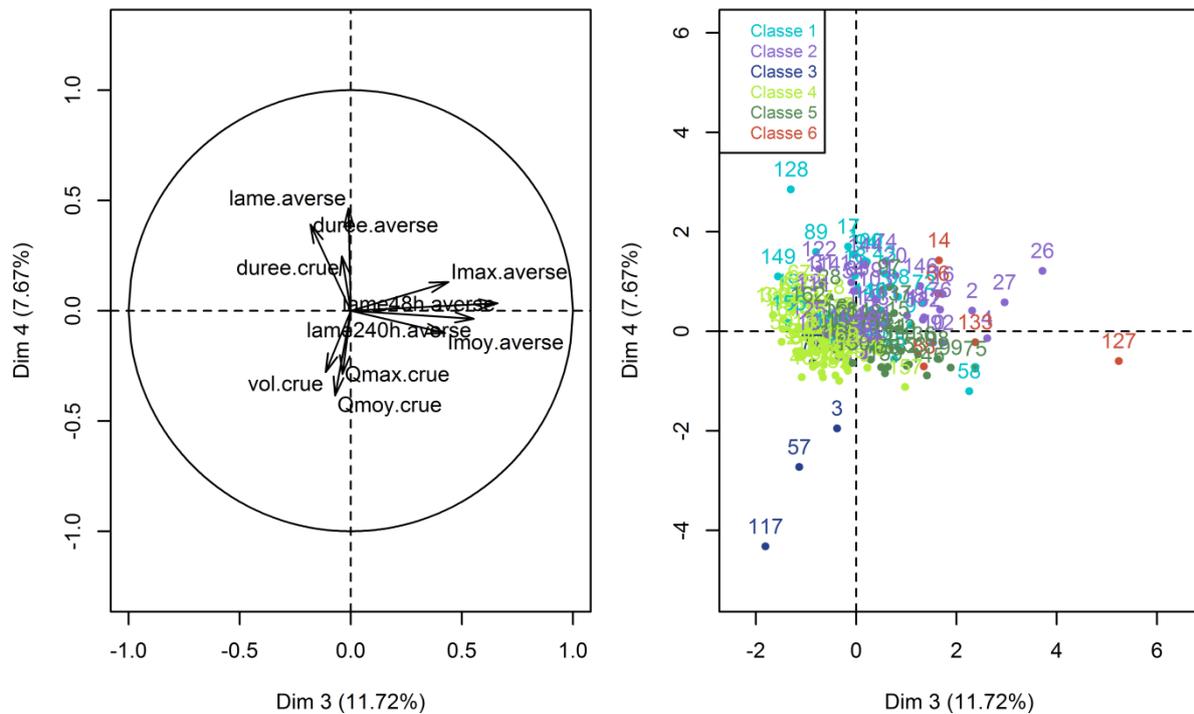
- station
- thalweg

Occupation du sol

- inconnu
- ▨ chantier de récolte
- ▨ labour
- ▨ déchaumage
- ▨ culture intermédiaire - moutarde
- ▨ culture intermédiaire - ray grass, avoine, seigle
- ▨ culture intermédiaire - trèfle
- ▨ maïs
- ▨ lin
- ▨ betterave
- ▨ pois
- ▨ fève, féverole
- ▨ trèfle, luzerne
- ▨ orge de printemps
- ▨ pomme de terre
- ▨ avoine
- ▨ blé
- ▨ escourgeon
- ▨ colza
- ▨ gel, jachère
- ▨ mare
- ▨ bois
- ▨ verger
- ▨ friche
- ▨ prairie
- ▨ corps de ferme prairie
- ▨ corps de ferme / bâtiment
- ▨ bâtiment
- ▨ maison et jardin
- ▨ jardin
- ▨ chemin
- ▨ route



Annexe VI : Résultats de l'ACP des dimensions 3-4 sur les 168 événements P-Q décrites par les 10 variables pluviométriques et hydrologiques enregistrées à BRVL



Les dimensions 3 et 4 représentent 19,4 % de la variabilité des individus. L'axe 3 est décrit à 66 % par les indicateurs des conditions initiales « lame48h.averse » et « lame240h.averse » et à 32% par l'intensité des événements de pluie « Imax.averse » et « Imoy.averse ».

L'axe 4 représente 7,67 %, il est construit à partir des variables liées aux caractéristiques de la pluie « duree.averse », « lame.averse » à 48 %, et aux débits des ruissellements « Qmoy.crue » et « Qmax.crue » à 30 %.

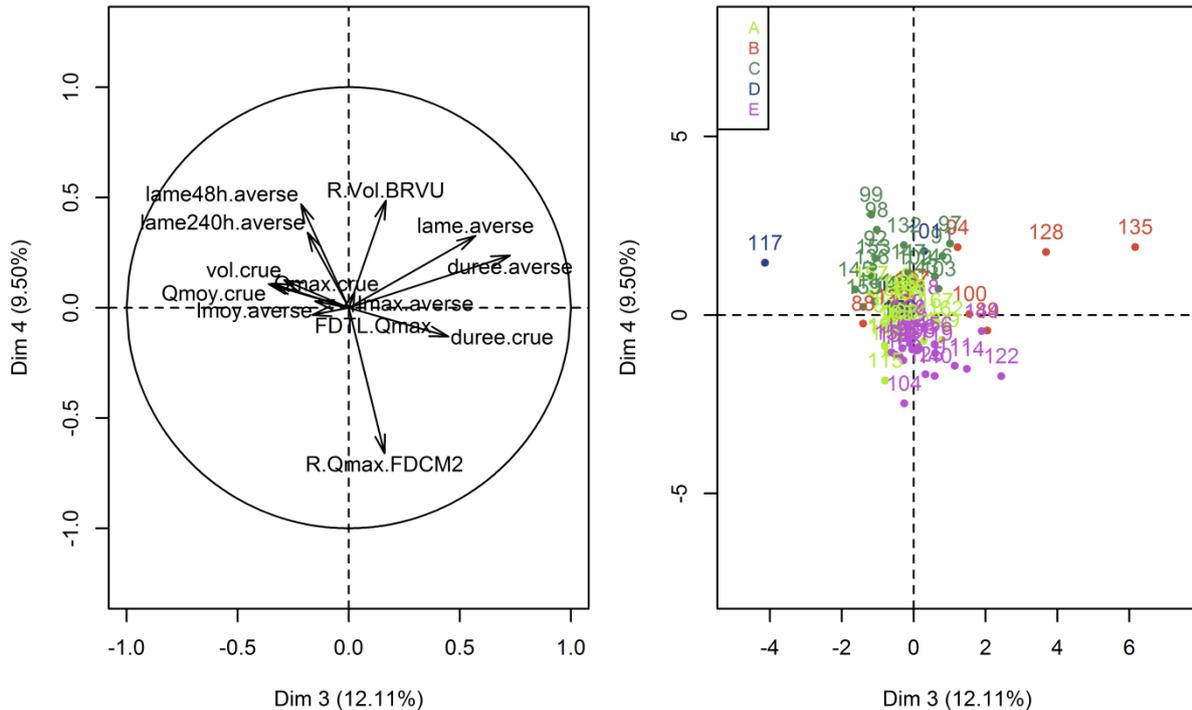
Annexe VII : Caractéristiques des événements par les classes définies par la CAH issue des variables pluviométriques et hydrologiques de BRVL

		Classe 1				Classe 2				Classe 3				Classe 4				Classe 5				Classe 6			
Nombre d'événements		22				40				5				58				38				5			
Part en automne-hiver [%]		82%				85%				100%				69%				92%				40%			
		Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max
Caractéristiques de l'averse	Durée [h]	15,7	51%	4,9	40,3	11,6	44%	2,1	22,3	32,4	58%	14,3	55,7	6,0	68%	0,7	15,3	6,2	57%	1,2	14,8	4,4	87%	0,6	10,1
	Lame [mm]	25,2	46%	7,6	54,4	11,3	48%	1,4	24,6	34,0	21%	27,8	43,2	9,6	48%	2,8	19,2	8,2	49%	2,8	17,8	33,8	61%	15,6	68,6
	Intensité moyenne [mm/h]	1,9	54%	0,4	4,9	1,0	49%	0,3	3,3	1,3	46%	0,6	1,9	2,3	69%	0,4	9,5	1,6	47%	0,6	3,4	13,1	74%	5,5	26,0
	Intensité maximale [mm/h]	22,0	56%	6,0	48,0	9,9	67%	2,0	40,0	17,2	53%	8,0	32,0	12,2	48%	4,0	38,0	10,1	64%	4,0	36,0	82,4	26%	46,0	102,0
Conditions initiales	Lame cumulée sur 48h [mm]	13,2	78%	0,6	43,2	17,0	69%	1,2	49,8	12,6	76%	0,4	24,4	4,8	74%	0,0	15,0	11,8	65%	0,4	27,2	4,2	91%	0,0	8,0
	Lame cumulée sur 10 jours [mm]	35,6	65%	7,0	103,6	61,7	35%	24,0	124,2	68,1	34%	35,0	100,2	18,1	60%	1,8	45,8	56,8	28%	37,2	99,4	14,5	60%	3,2	23,6
Caractéristiques de la crue	Durée[h]	22,5	41%	8,5	40,3	20,3	27%	7,2	30,5	41,5	47%	22,9	64,8	6,3	52%	1,9	16,9	8,3	45%	3,5	17,7	10,1	66%	2,9	17,3
	Lame ruisselée [mm]	0,59	93%	0,05	1,71	0,23	67%	0,04	0,60	4,04	33%	1,90	5,37	0,05	55%	0,02	0,13	0,05	52%	0,02	0,13	0,43	123%	0,03	1,13
	Débit moyen [l/s]	65,2	72%	15,6	187,1	32,4	60%	11,9	79,4	300	28%	222,7	393,4	22,3	24%	11,2	41,5	19,3	38%	9,0	45,5	84,1	94%	21,2	189,6
	Débit maximal [l/s]	315,5	81%	37,9	785,8	105,8	88%	31,2	351,4	1839,5	20%	1389,4	2341,0	54,4	40%	30,2	168,1	46,6	35%	30,3	90,5	581,3	92%	160,8	1355,2

$CV = \frac{Ecart\text{-}type(i)}{Moyenne(i)}$: le coefficient de variation, permettant d'avoir une indication sur la dispersion relative des valeurs par rapport à la moyenne, on considère que la dispersion est importante lorsque $CV > 60\%$.

Moy : Moyenne ; Min : Minimum ; Max : Maximum

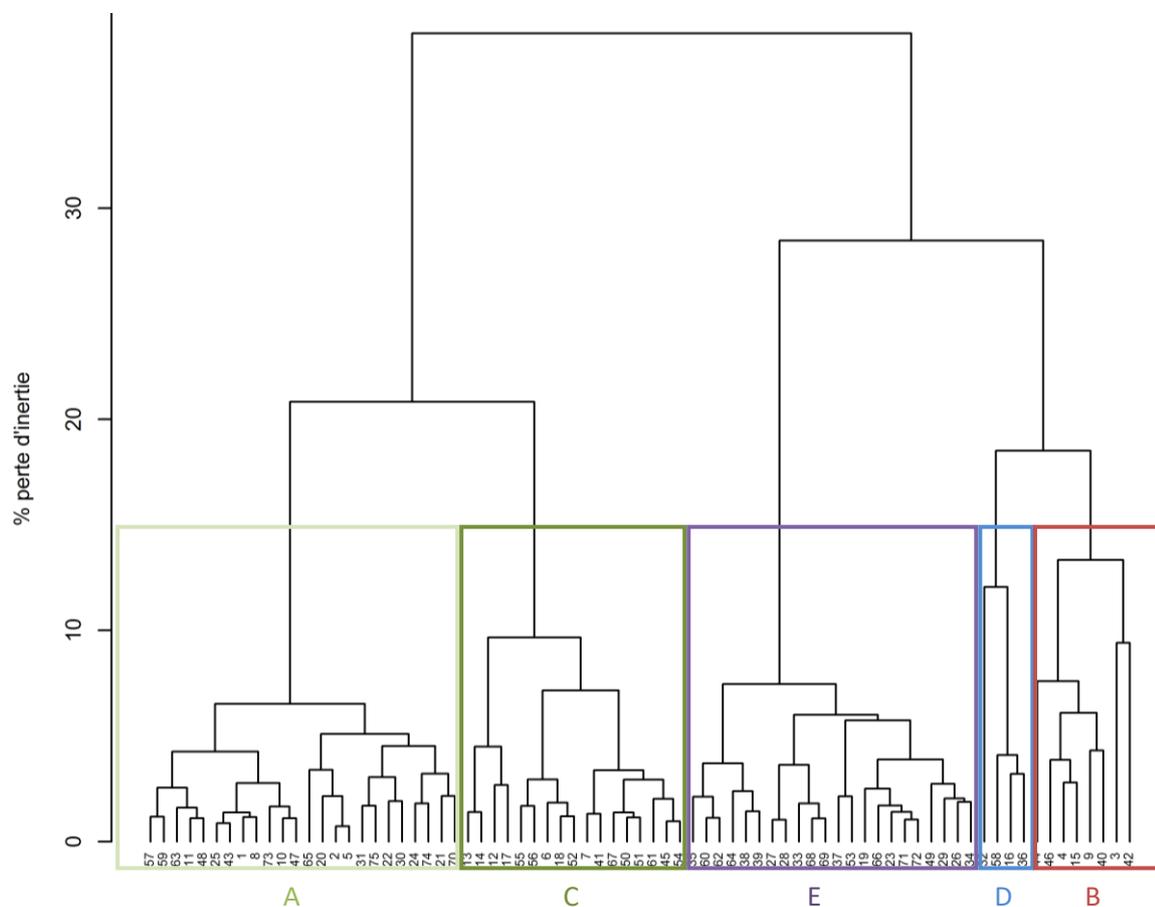
Annexe VIII : Résultat de l'ACP sur les 75 événements P-Q par les 13 variables étudiées sur le plan factoriel définis par les 3èmes et 4èmes dimensions



L'axe 3 représente 12,11 % de la variabilité des individus. Cet axe est construit à 54 % par les variables caractérisant les lames de pluie tombées « duree.averse » et « lame.averse ». 12,7% de cet axe est également construit sur la variabilité de la durée des crues.

Le quatrième axe représentant 9,5 % de l'inertie est construit à partir des variables caractérisant les contributions des sous-bassins définis par BRVU et FDCM2 (54,4 % de la construction). Le cumul de pluie sous 48h est aussi pris en compte dans la construction de l'axe (17,8 %).

Annexe IX : Résultat de la CAH sur les 75 événements P-Q par les 13 variables pluviométriques et hydrologiques multi-stations



Le dendrogramme est découpé avant une forte perte d'inertie interclasse en passant de 5 à 4 classes. Ce découpage est choisi afin d'avoir une bonne description des événements.

Annexe X : Caractéristiques des 5 classes de la CAH issues des 13 variables pluviométriques, hydrométriques multi-stations

		Classe A				Classe B				Classe C				Classe D				Classe E			
Nombre d'événements		24				8				17				4				22			
Part des saisons [%]		29% A ; 50% H ; 8%P; 13% E				63% A ; 38% E				76% A; 12% H ; 12% E				20% A ; 80% H				18% A ; 73% H ; 9%P			
		Moy	Min	Max	CV	Moy	Min	Max	CV	Moy	Min	Max	CV	Moy	Min	Max	CV	Moy	Min	Max	CV
Caractéristiques de l'averse	Durée [h]	5,48	0,70	13,80	62%	15,05	1,20	40,32	80%	7,53	1,20	15,40	61%	17,93	14,30	22,20	22%	9,43	2,10	22,30	53%
	Lame [mm]	7,72	1,40	17,00	47%	32,63	17,80	54,40	38%	8,27	2,80	17,60	55%	22,10	7,60	30,40	46%	9,35	2,60	19,00	46%
	Intensité moyenne [mm/h]	2,09	0,30	8,90	88%	4,84	1,30	20,80	137%	1,30	0,60	2,80	45%	1,30	0,40	1,90	49%	1,13	0,50	2,20	40%
	Intensité maximale [mm/h]	10,17	4,00	18,00	46%	35,75	10,00	82,00	62%	9,06	4,00	24,00	57%	12,00	8,00	20,00	45%	8,64	2,00	28,00	66%
Conditions initiales	Lame cumulée sur 48h [mm]	5,99	0,00	15,00	69%	4,70	0,40	8,60	76%	19,21	2,00	31,00	37%	15,50	7,20	24,20	48%	10,77	0,60	28,20	64%
	Lame cumulée sur 10 jours [mm]	33,95	9,40	66,60	43%	28,73	3,20	77,40	88%	68,95	48,20	89,20	17%	51,75	28,40	73,80	45%	50,37	24,00	66,40	26%
Caractéristiques de la crue	Durée[h]	8,98	3,52	23,93	55%	18,37	7,26	40,32	56%	11,36	4,52	28,56	64%	29,70	25,20	35,04	14%	21,40	11,27	30,24	20%
	Lame ruisselée [mm]	0,06	0,02	0,13	49%	0,30	0,05	1,13	117%	0,07	0,02	0,28	89%	1,93	0,92	4,07	76%	0,26	0,06	0,70	65%
	Débit moyen [l/s]	19,75	11,20	36,60	33%	48,51	21,20	189,60	118%	17,34	13,00	28,50	27%	186,78	93,20	393,40	74%	34,74	9,00	79,30	59%
	Débit maximal [l/s]	56,03	30,20	151,70	47%	214,94	46,60	938,30	138%	45,01	30,30	119,70	47%	874,00	590,20	1620,90	57%	112,35	38,10	355,00	83%
Caractéristiques des contributions	Rapport volume BRVU/BRVL	0,29	0,08	0,55	46%	0,29	0,05	0,65	74%	0,35	0,06	0,84	65%	0,05	0,00	0,08	72%	0,19	0,06	0,35	45%
	Rapport débit maximal FDCM2/BRVL	0,15	0,00	0,85	169%	0,28	0,00	1,03	139%	0,05	0,00	0,26	176%	0,63	0,38	0,85	32%	0,99	0,47	1,90	35%
	Débit maximal à FDTL	19,10	0,00	113,5	153%	97,19	0,00	292,70	120%	15,21	0,00	52,60	95%	337,20	225,20	438,90	28%	81,72	9,00	181,00	64%

A : Automne ; H : Hiver ; P : Printemps ; E : Eté

Moy : Moyenne ; Min : Minimum ; Max : Maximum ; CV : coefficient de variation

Annexe XI : Correspondance de la typologie multi-station et de la typologie établie à BRVL : Caractéristiques des classes par les variables multi-stations

		Classe 1				Classe 2				Classe 3	Classe 4				Classe 5				Classe 6	
Nombre d'événements utilisés pour le multi-station		10				25				1	18				21				2	
		Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Valeur	Moy	CV	Min	Max	Moy	CV	Min	Max	Min	Max
Caractéristiques de l'averse	Durée [h]	18,37	48%	7,4	40,3	10,024	47%	2,1	22,3	14,3	0,7	77%	0,7	13,8	6,12	57%	1,2	14,8	5,7	10,1
	Lame [mm]	27,86	50%	7,6	54,4	9,2	44%	1,4	17,6	27,8	2,8	51%	2,8	17	7,63	52%	2,8	17,8	35,4	68,6
	Intensité moyenne [mm/h]	1,64	38%	0,4	2,5	0,972	34%	0,3	1,6	1,9	0,7	79%	0,7	8,9	1,42	41%	0,6	2,8	6,2	6,8
	Intensité maximale [mm/h]	19,6	56%	6	36	8,24	50%	2	18	8	4	46%	4	18	10,3	75%	4	36	82	92
Conditions initiales	Lame cumulée sur 48h [mm]	9,62	75%	0,6	24,2	13,344	64%	2,4	31	7,2	0	66%	0	15	12,9	64%	0,4	24,2	4,6	8
	Lame cumulée sur 10 jours [mm]	37,04	61%	7	73,8	56,856	26%	24	87,4	35	9,4	42%	9,4	45,8	59,1	26%	37,2	89,2	13,8	23,6
Caractéristiques de la crue	Durée[h]	24,55	35%	12,98	40,3	21,0152	25%	7,2	30,2	30	3,52	50%	3,52	16,9	9,39	43%	4,52	17,7	16,9	17,3
	Lame ruisselée [mm]	0,57	90%	0,12	1,66	0,22	65%	0	0,54	4,07	0,02	54%	0,02	0,13	0,06	47%	0,02	0,11	0,87	1,13
	Débit moyen [l/s]	60,95	71%	21,8	137	29,964	60%	12	79,3	393	11,2	36%	11,2	36,6	17,8	29%	9	30,7	150	190
	Débit maximal [l/s]	287	87%	46,6	669	91,752	82%	31	320	1621	30,2	49%	30,2	152	46,2	39%	30,3	87,8	1355	938
Caractéristiques des crues multi-stations	Rapport des volumes de BRVU et BRVL	0,22	45%	0,06	0,45	0,49	53%	0,15	0,42	0,01	0,32	61%	0,09	0,90	0,32	67%	0,06	0,84	0,05	0,27
	Rapport des débits de pointe de FDCM2 et BRVL	0,71	71%	0,00	1,90	0,71	71%	0,00	0,83	0,38	0,17	174%	0,00	0,85	0,19	197%	0,00	1,29	0,00	1,03
	Débit de pointe à FDTL	0,75	67%	0,02	1,92	0,73	65%	0,02	0,65	0,24	0,24	121%	0,00	0,90	0,49	106%	0,00	1,90	0,00	0,31

Moy : Moyenne ; Min : Minimum ; Max : Maximum ; CV : coefficient de variation

Annexe XII: Bilan des associations événements P-Q-Analyses réalisées sur du 01/09/2007 au 31/03/2014

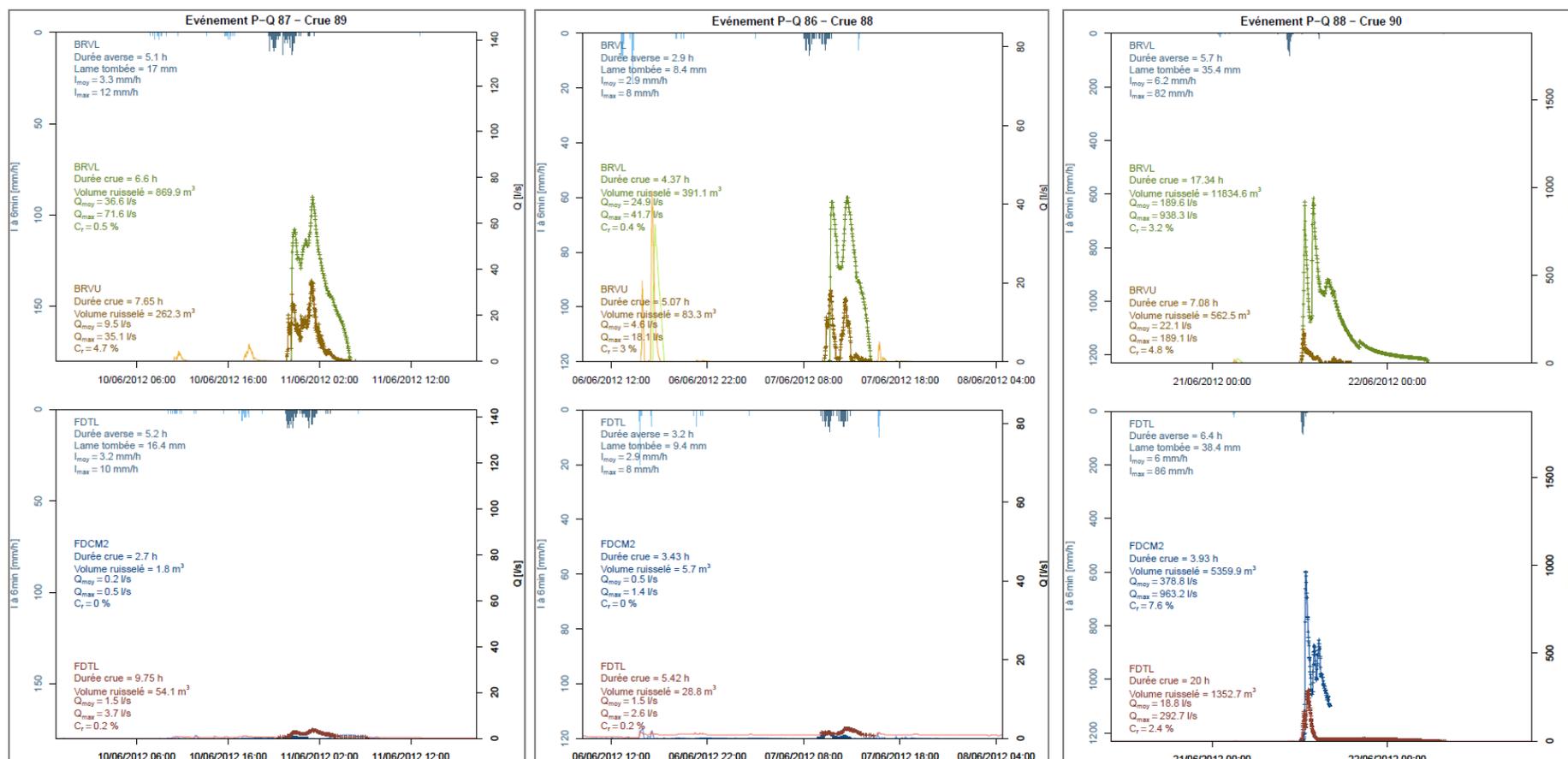
Date début	Date fin	Associations		Ruissellements			Analyses			Exports et dosages			
		Classes	Evénements P-Q	Durée [h]	Volume [m3]	Débit de pointe [l/s]	% Volume ruisselé analysé	Nombre de prélèvements [-]	Nombre de SA recherchées	Exports [g]	Concentration en SA [µg/l]	Concentration en MES [mg/l]	Exports en MES [g]
27/09/2007 04:45	27/09/2007 03:15	1	1	1,5	447,13	87,7	100%	18	99	0,99	2,21	219	98
01/10/2007 06:26	01/10/2007 05:26	3	3	1,0	358,89	114,3	100%	12	99	1,18	3,29	232	83
01/10/2007 08:06	01/10/2007 07:06	3	3	1,0	2601,61	814,8	100%	12	99	6,53	2,51	268	697
01/10/2007 09:26	01/10/2007 08:26	3	3	1,0	4606,03	1389,4	100%	12	99	15,45	3,36	164	755
02/12/2007 19:32	01/12/2007 17:22	4	7-8	26,2	2261,24	71,7	100%	8	100	17,94	7,93	/	/
02/12/2007 22:56	02/12/2007 19:32	1	9	3,4	1135,78	148	100%	5	100	11,24	9,89	/	/
03/12/2007 00:37	02/12/2007 22:56	1	9	1,7	1056,45	190,2	100%	5	100	4,98	4,71	/	/
03/12/2007 09:19	03/12/2007 00:37	1	9	8,7	1932,69	153,1	100%	8	100	9,02	4,67	/	/
08/12/2007 12:01	03/12/2007 09:19	2	10-12	122,7	7160,85	198,2	100%	26	99	49,79	6,95	1330	9524
09/12/2007 12:21	08/12/2007 12:01	3	13	24,3	10089,70	376,2	100%	45	99	33,25	3,30	/	/
09/12/2007 16:17	09/12/2007 12:21	3	13	3,9	15609,34	2341	52%	39	99	10,62	1,32	/	/
10/12/2007 16:23	09/12/2007 16:17	3	13	24,1	25688,49	2222,9	74%	90	99	78,77	4,13	/	/
18/05/2008 15:27	18/05/2008 03:24	6	14	12,0	8522,75	1355,2	98%	46	89	148,21	17,72	/	/
28/05/2008 04:05	26/05/2008 02:34	2	15-16	49,5	1278,98	82,2	90%	6	14	7,05	6,12	/	/
04/08/2008 03:14	08/07/2008 02:18	1	17	648,9	1861,68	124,6	99%	10	15	4,21	2,29	/	/
02/12/2008 22:43	23/11/2008 13:29	1	19	225,3	2758,43	565,7	100%	15	89	3,28	1,19	/	/
02/12/2008 23:59	02/12/2008 22:43	1	19	1,3	2954,05	743,3	100%	15	89	3,02	1,02	/	/
03/12/2008 05:02	02/12/2008 23:59	1	19	5,1	6468,47	642,8	100%	30	89	3,99	0,62	/	/
05/12/2008 12:19	03/12/2008 10:25	Mixte	19-20	49,9	5068,18	181,4	100%	21	89	2,51	0,50	/	/
06/12/2008 10:25	05/12/2008 12:19	1	21	22,1	11590,33	727,8	100%	0	89	4,82	0,42	/	/
05/11/2009 08:57	04/09/2009 04:54	4	24-25	1492,0	1674,08	69,7	99%	19	5	6,01	3,63	402	666
06/11/2009 07:42	05/11/2009 10:53	2	26	20,8	1531,80	54,5	100%	15	188	3,85	2,52	1610	2466

07/11/2009 18:32	06/11/2009 09:03	2	27	33,5	944,30	42,3	100%	11	188	1,53	1,62	632	597
28/02/2010 11:45	26/02/2010 05:17	Mixte	35	54,5	1914,32	153,5	100%	10	5	0,48	0,25	1190	2278
28/02/2010 14:27	28/02/2010 11:45	2	36	2,7	2858,30	351,4	100%	15	5	0,48	0,17	1050	3001
01/03/2010 04:17	28/02/2010 14:27	2	36	13,8	2884,28	296,7	100%	14	5	0,97	0,34	456	1315
27/08/2010 11:21	10/08/2010 15:37	Mixte	41-43	403,7	2121,31	239	100%	14	188	17,34	8,18	208	441
08/09/2010 15:51	27/08/2010 11:21	Mixte	44-45	292,5	3304,40	483	100%	15	188	28,17	8,53	1150	3800
09/09/2010 08:50	08/09/2010 15:51	1	45	17,0	3142,94	410,2	100%	13	188	32,64	10,39	1520	4777
09/11/2010 03:56	23/10/2010 14:02	Mixte	50-54	397,9	5900,72	106,8	96%	19	188	20,89	3,70	278	1569
13/11/2010 12:30	11/11/2010 10:36	3	57	49,9	12214,93	861,1	100%	60	188	27,75	2,27	460	5619
14/11/2010 22:11	14/11/2010 11:48	1	58	10,4	1640,12	122,3	100%	7	188	3,00	1,83	130	213
03/09/2011 21:34	13/08/2011 18:27	Mixte	64-66	507,1	2205,88	246,2	100%	11	188	31,86	14,44	1060	2338
18/09/2011 22:59	06/09/2011 15:46	Mixte	67-68	295,2	3026,01	154,1	100%	15	188	30,17	9,97	2240	6778
13/12/2011 18:23	12/12/2011 22:26	2	74	19,9	3135,88	94,3	100%	33	193	19,50	6,22	220	690
15/12/2011 10:15	13/12/2011 18:23	Mixte	74-77	39,9	2531,99	46,4	100%	12	193	9,88	3,90	240	608
15/12/2011 22:45	15/12/2011 10:15	3	77	12,5	3810,55	133,3	100%	44	193	22,54	5,93	192	730
16/12/2011 00:34	15/12/2011 22:45	3	77	1,8	1463,10	624,3	96%	12	193	6,17	4,38	372	524
16/12/2011 14:30	16/12/2011 07:56	3	77	6,6	10909,66	508,2	96%	62	193	47,50	4,51	532	5598
17/12/2011 09:36	16/12/2011 15:16	3	77	18,3	9943,64	367,2	100%	20	193	45,91	4,62	232	2307
30/04/2012 21:34	23/04/2012 16:49	Mixte	84-85	172,7	2397,42	45,5	100%	18	193	12,58	5,25	176	422
11/06/2012 04:17	07/06/2012 10:42	4	86-87	89,6	1216,09	71,6	100%	12	193	30,86	25,38	144	175
21/06/2012 13:25	21/06/2012 12:19	6	88	1,1	1816,54	916,4	100%	20	193	53,77	29,59	1840	3342
21/06/2012 15:05	21/06/2012 13:25	6	88	1,7	3289,23	938,3	99%	36	193	46,08	14,11	648	2116
22/06/2012 02:48	21/06/2012 15:05	6	88	11,7	6459,52	474,1	100%	18	193	181,80	28,14	708	4573
08/07/2012 08:01	24/06/2012 08:58	1	89	335,0	2116,50	213	100%	12	188	20,06	9,48	/	/
24/09/2012 11:35	24/08/2012 18:12	4	93	737,4	897,01	38,9	100%	11	194	6,72	7,49	72	65
04/10/2012 08:31	03/10/2012 20:37	1	94	11,9	1237,90	96,3	100%	14	194	7,37	5,95	190	235
19/10/2012 14:40	06/10/2012 07:46	Mixte	95-100	318,9	6072,81	129,5	99%	64	194	21,31	3,55	266	1596
22/10/2012 01:33	19/10/2012 14:40	1	101	58,9	17669,83	668,9	98%	100	194	30,51	1,76	304	5281
06/11/2012 04:10	27/10/2012 07:12	Mixte	102-108	237,0	7013,86	67,6	100%	42	194	13,26	1,89	356	2497
21/12/2012 01:44	27/11/2012 16:19	Mixte	110-116	561,4	10383,46	62,5	100%	58	194	17,85	1,72	356	3697
22/12/2012 16:07	22/12/2012 05:47	3	117	10,3	20066,84	1620,9	100%	55	194	29,70	1,48	1230	24682
23/12/2012 08:26	22/12/2012 16:07	3	117	16,3	22004,09	1331,4	97%	36	194	26,53	1,25	596	12677

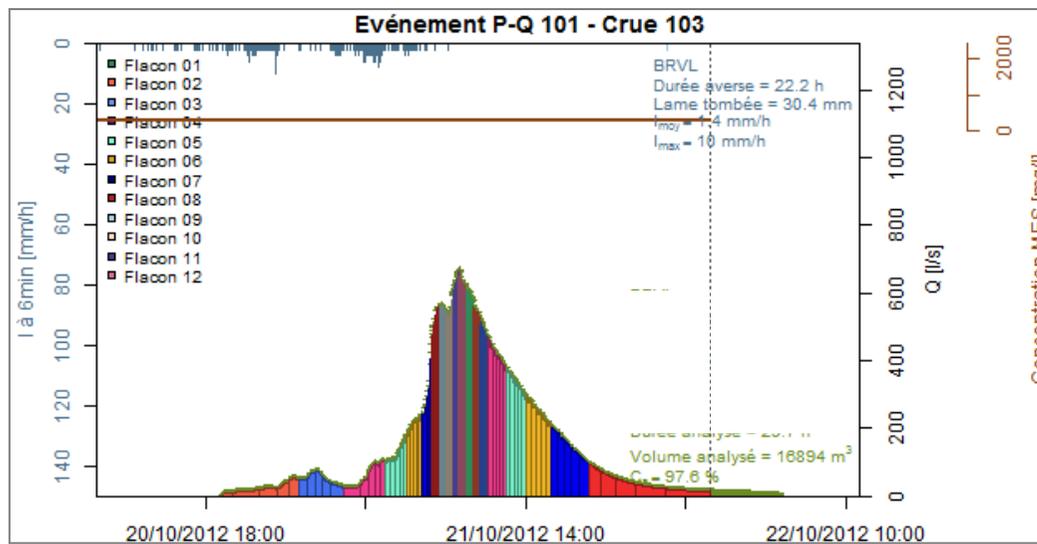
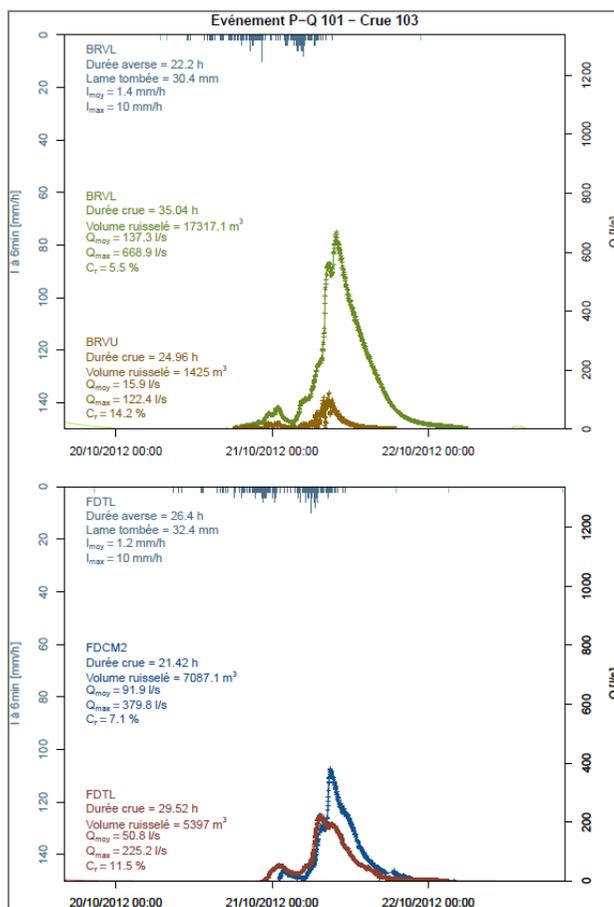
01/01/2013 14:39	23/12/2012 08:26	Mixte	118-122	222,2	22584,86	616	100%	38	194	18,54	0,82	852	19242
18/03/2013 02:42	15/03/2013 14:05	2	125-126	60,6	9568,12	251,7	100%	39	194	37,70	3,94	352	3368
25/08/2013 10:58	24/08/2013 17:06	1	128	17,9	1644,97	46,6	100%	19	194	24,05	14,62	24,8	41
29/09/2013 07:31	14/09/2013 02:21	Mixte	129-133	365,2	3320,15	160,8	100%	35	194	22,89	6,90	102	339
15/10/2013 03:36	09/10/2013 05:19	1	134-135	142,3	3813,53	47,2	100%	43	194	4,26	1,12	1780	6788
19/10/2013 19:22	16/10/2013 12:00	5	136-137	79,4	1277,11	87,8	100%	14	194	9,06	7,09	476	608
30/10/2013 03:31	23/10/2013 13:18	Mixte	138-139	158,2	1623,90	58,1	100%	19	194	2,80	1,73	126	205
04/11/2013 11:11	01/11/2013 20:37	Mixte	140-141	62,6	3110,80	107,6	100%	35	194	6,34	2,04	376	1170
10/11/2013 17:16	05/11/2013 08:48	2	142-147	128,5	8401,67	119,7	100%	38	194	17,62	2,10	224	1882
21/11/2013 23:01	14/11/2013 05:00	1	148-149	186,0	14059,08	438,6	100%	38	194	191,51	13,62	668	9391
25/12/2013 04:58	22/12/2013 20:04	1	150	56,9	11417,38	590,2	100%	28	194	25,46	2,23	696	7947
04/01/2014 01:39	27/12/2013 08:12	Mixte	151-155	185,5	10564,32	168,4	100%	34	194	16,63	1,57	424	4479
01/02/2014 19:13	26/01/2014 13:39	1	156	149,6	8558,08	355	100%	25	189	13,54	1,58	276	2362
16/02/2014 06:06	05/02/2014 07:19	Mixte	157-164	262,8	11150,11	145,7	100%	38	194	40,88	3,67	212	2364

Les analyses surlignées dans ce tableau correspondent aux analyses étudiées plus finement dans l'étude de cas (4.2)

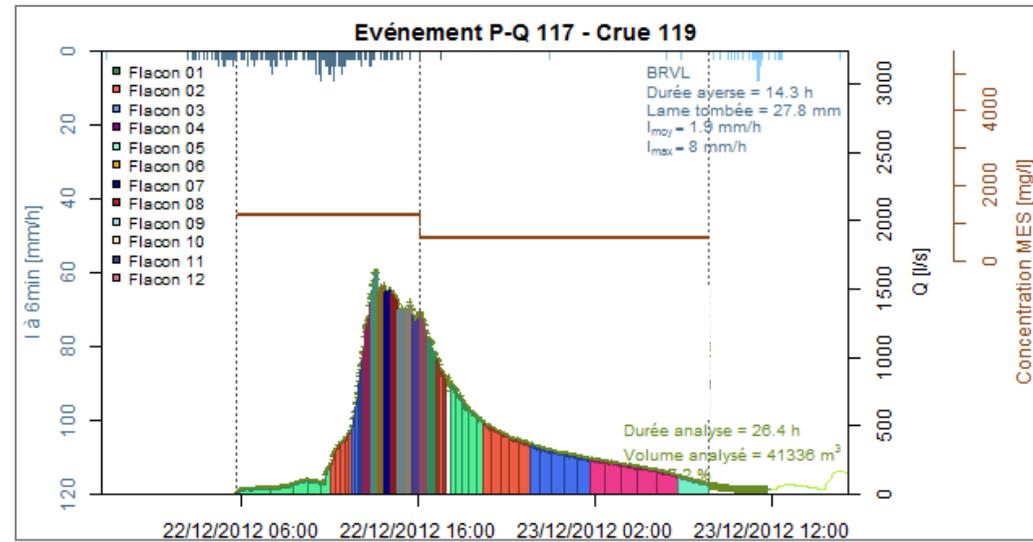
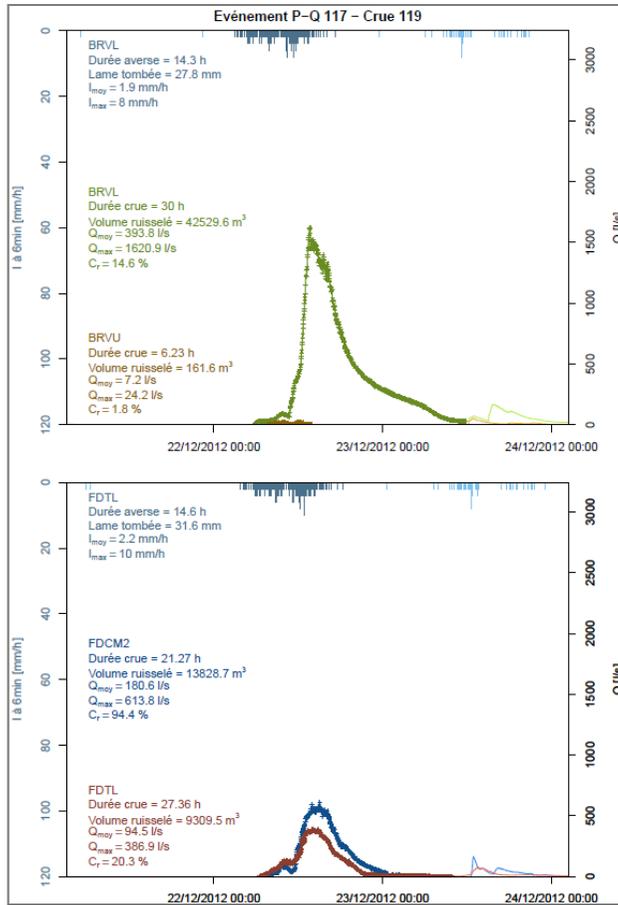
Annexe XIII: Hydrogrammes des événements P-Q analysés dans l'étude de cas du 4.2



Hydrogrammes des événements P-Q 86-87 de la classe 4 et de l'événement 88 de la classe 6, correspondant à l'analyse du 07 au 22 juin 2012, sur les stations BRVL, BRVU, FDCM2, FDTL



Hydrogrammes de l'événement P-Q 101 de la classe 1, correspondant à l'analyse réalisée du 19 au 22 octobre 2012, sur les stations BRVL, BRVU, FDCM2, FDTL (à gauche) et détails des dates de prélèvements (à droite)



Hydrogrammes de l'événement P-Q 117 de la classe 3, correspondant aux 2 analyses réalisées du 22 au 23 décembre 2012, sur les stations BRVL, BRVU, FDCM2, FDTL (à gauche) et détails des dates de prélèvements (à droite)

Annexe XIV: Substances actives dosées pour les analyses étudiées dans l'étude de cas du 4.2.

Substances actives dosées pour l'analyse associée aux événements P-Q 86-87 de la classe 4 réalisée du 07 au 11 juin 2012

SA	Fonction	Phase détectée	Concentration [µg/l]	SA	Fonction	Phase détectée	Concentration [µg/l]
glyphosate	herbicide	EF	7,850	anthraquinone	répulsif oiseaux	MES	0,031
AMPA	métabolite	EF	4,320	metolachlore	herbicide	MES	0,029
metribuzine	herbicide	EF	3,420	diuron demethyl	métabolite	EF	0,027
tebuconazole	fongicide	EF	2,300	diuron didemethyl	métabolite	EF	0,027
aminotriazole	herbicide	EB	1,690	folpel	fongicide	MES	0,025
linuron	herbicide	EF	0,990	diflufenicanil	herbicide	MES	0,024
azoxystrobine	fongicide	EF	0,749	azoxystrobine	fongicide	MES	0,020
lenacile	herbicide	EF	0,650	epoxiconazole	fongicide	MES	0,018
pyrimethanil	fongicide	EF	0,480	linuron	herbicide	MES	0,016
epoxiconazole	fongicide	EF	0,430	isoproturon	herbicide	EF	0,016
2,4-D	herbicide	EF	0,368	cypermethrine	insecticide	MES	0,016
quinmerac	herbicide	EF	0,266	diuron	herbicide	EF	0,014
2,4-MCPA	herbicide	EF	0,188	prosulfocarbe	herbicide	EF	0,013
AMPA	métabolite	MES	0,180	triticonazole	fongicide	EF	0,011
cyproconazole	fongicide	EF	0,180	dimethomorphe	fongicide	EF	0,008
glyphosate	herbicide	MES	0,173	iprodione	fongicide	EF	0,008
diflufenicanil	herbicide	EF	0,133	sulcotrione	herbicide	EF	0,006
prochloraze	fongicide	EF	0,129	isodrine	insecticide	EF	0,005
ethofumesate	herbicide	EF	0,128	napropamide	herbicide	EF	0,005
boscalid	fongicide	EF	0,102	HCH-gamma [lindane]	insecticide	EF	0,004
tebuconazole	fongicide	MES	0,055	DDT et metabolites	herbicide	MES	0,003
chlortoluron	herbicide	EF	0,054	DDT et metabolites	herbicide	EF	0,002
acetochlore	herbicide	EF	0,049	heptachlore epoxyde exo cis	métabolite	EF	0,002
metolachlore	herbicide	EF	0,045	heptachlore epoxyde endo trans	métabolite	MES	0,001
chloridazone	herbicide	MES	0,045	HCH-beta	insecticide	EF	0,001
metazachlore	herbicide	EF	0,040	heptachlore epoxyde endo trans	métabolite	EF	0,001
imidaclopride	insecticide	EF	0,033				

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 90 % des exports totaux de l'analyse.

EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

Substances actives dosées pour les analyses associées aux événements P-Q 88 de la classe 6 réalisées le 21 juin 2012 (1/3)

SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]	SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]
dithiocarbamates	EB	fongicide	15,000	imidaclopride	EF	insecticide	0,066
2,4-D	EF	herbicide	2,770	boscalid	EF	fongicide	0,048
AMPA	EF	métabolite	2,280	isoproturon	EF	herbicide	0,034
AMPA	MES	métabolite	1,222	folpel	EF	fongicide	0,030
2,4-MCPA	EF	herbicide	1,180	2,4-D	MES	herbicide	0,023
glyphosate	EF	herbicide	1,040	prochloraze	EF	fongicide	0,015
diméthomorphe	EF	fongicide	0,897	metolachlore	EF	herbicide	0,011
lenacile	EF	herbicide	0,880	2,4-MCPA	MES	herbicide	0,010
ethofumesate	EF	herbicide	0,787	triflusalufuron-méthyle	EF	herbicide	0,010
fluroxypyr	EF	herbicide	0,603	fluroxypyr	MES	herbicide	0,009
tebuconazole	EF	fongicide	0,470	chlortoluron	EF	herbicide	0,009
acetochlore	EF	herbicide	0,346	perméthrine	MES	insecticide	0,009
glyphosate	MES	herbicide	0,329	nicosulfuron	EF	herbicide	0,008
metamitrone	EF	herbicide	0,183	mesotrione	EF	herbicide	0,006
epoxiconazole	EF	fongicide	0,180	diméthomorphe	MES	fongicide	0,006
cyproconazole	EF	fongicide	0,130	HCH-beta	EF	insecticide	0,004
acetochlore	MES	herbicide	0,084	DDT et métabolites	EF	herbicide	0,001
linuron	EF	herbicide	0,081	endrine	EF	insecticide	0,001
metribuzine	EF	herbicide	0,077	heptachlore epoxyde endo trans	MES	métabolite	0,001
azoxystrobine	EF	fongicide	0,072				

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 95 % des exports totaux de l'analyse

EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

Substances actives dosées pour les analyses associées aux événements P-Q 88 de la classe 6 réalisées le 21 juin 2012 (2/3)

SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]	SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]
dithiocarbamates	EB	Fongicide	5,500	<i>acetochlore</i>	MES	<i>herbicide</i>	0,100
2,4-D	EF	Herbicide	1,290	diflufenicanil	EF	herbicide	0,094
dimethomorphe	EF	Fongicide	1,140	permethrine	EF	insecticide	0,086
tebuconazole	EF	Fongicide	0,860	imidaclopride	EF	insecticide	0,065
lenacile	EF	Herbicide	0,630	<i>metolachlore</i>	MES	<i>herbicide</i>	0,045
AMPA	MES	Métabolite	0,578	<i>linuron</i>	MES	<i>herbicide</i>	0,041
2,4-MCPA	EF	Herbicide	0,545	boscalid	EF	fongicide	0,036
linuron	EF	Herbicide	0,452	prochloraze	EF	fongicide	0,031
<i>glyphosate</i>	MES	<i>Herbicide</i>	0,434	metolachlore	EF	herbicide	0,027
AMPA	EF	Métabolite	0,379	chlortoluron	EF	herbicide	0,022
azoxystrobine	EF	Fongicide	0,347	<i>folpel</i>	MES	<i>fongicide</i>	0,021
epoxiconazole	EF	Fongicide	0,330	2,4-D	MES	<i>herbicide</i>	0,018
glyphosate	EF	herbicide	0,319	<i>azoxystrobine</i>	MES	<i>fongicide</i>	0,017
ethofumesate	EF	herbicide	0,287	isoproturon	EF	herbicide	0,010
fluroxypyr	EF	herbicide	0,274	diuron demethyl	EF	métabolite	0,010
cyproconazole	EF	fongicide	0,200	diuron didemethyl	EF	métabolite	0,006
<i>anthraquinone</i>	MES	<i>répulsif oiseaux</i>	0,183	<i>HCH-beta</i>	MES	<i>insecticide</i>	0,003
<i>diflufenicanil</i>	MES	<i>herbicide</i>	0,122	DDT et métabolites	EF	herbicide	0,001
metribuzine	EF	herbicide	0,120	dieldrine	EF	insecticide	0,001
propiconazole	EF	fongicide	0,110	HCH-gamma [lindane]	EF	insecticide	0,001
acetochlore	EF	herbicide	0,107				

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 85 % des exports totaux de l'analyse

EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

Substances actives dosées pour les analyses associées aux événements P-Q 88 de la classe 6 réalisées le 21 juin 2012 (3/3)

SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]	SA	Phase détectée	Fonction	Concentration [µg/l]
2,4-D	EF	herbicide	12,100	diflufenicanil	EF	herbicide	0,030
lenacile	EF	herbicide	3,500	metosulam	EF	herbicide	0,027
bentazone	EF	herbicide	3,080	<i>bentazone</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,024</i>
2,4-MCPA	EF	herbicide	1,500	<i>fluroxypyr</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,021</i>
fluroxypyr	EF	herbicide	1,280	AMPA	MES	<i>métabolite</i>	<i>0,021</i>
acetochlore	EF	herbicide	1,020	prochloraze	EF	fongicide	0,021
ethofumesate	EF	herbicide	0,931	linuron	EF	herbicide	0,018
dicamba	EF	herbicide	0,930	<i>metolachlore</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,016</i>
tebuconazole	EF	fongicide	0,740	triflurosulfuron-methyle	EF	herbicide	0,015
dimethomorphe	EF	fongicide	0,433	nicosulfuron	EF	herbicide	0,011
azoxystrobine	EF	fongicide	0,416	mesotrione	EF	herbicide	0,011
propiconazole	EF	fongicide	0,350	<i>glyphosate</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,010</i>
AMPA	EF	métabolite	0,283	<i>azoxystrobine</i>	MES	<i>fongicide</i>	<i>0,009</i>
cyproconazole	EF	fongicide	0,270	<i>2,4-MCPA</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,009</i>
boscalid	EF	fongicide	0,233	<i>boscalid</i>	MES	<i>fongicide</i>	<i>0,008</i>
epoxiconazole	EF	fongicide	0,230	<i>dimethomorphe</i>	MES	<i>fongicide</i>	<i>0,007</i>
imidaclopride	EF	insecticide	0,190	chlortoluron	EF	herbicide	0,007
glyphosate	EF	herbicide	0,097	DDT et métabolites	EF	herbicide	0,004
<i>acetochlore</i>	MES	<i>herbicide</i>	<i>0,060</i>	HCH-beta	EF	insecticide	0,001
folpel	EF	fongicide	0,054	endrine	EF	insecticide	0,001
isoproturon	EF	herbicide	0,033	isodrine	EF	insecticide	0,001

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 91 % des exports totaux de l'analyse

EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

Substances actives dosées pour l'analyse associée à l'événement P-Q 101 de la classe 1,
réalisée le 21 octobre 2012

SA	Fonction	Phase détectée	Concentration [µg/l]
AMPA	métabolite	EF	0,336
glyphosate	herbicide	EF	0,234
metazachlore	herbicide	EF	0,227
cyproconazole	fongicide	EF	0,180
Lenacile	herbicide	EF	0,160
tebuconazole	fongicide	EF	0,150
epoxiconazole	fongicide	EF	0,140
metolachlore	herbicide	EF	0,062
AMPA	<i>métabolite</i>	<i>MES</i>	<i>0,059</i>
clomazone	herbicide	EF	0,036
imidaclopride	insecticide	EF	0,035
diflufenicanil	herbicide	EF	0,024
boscalid	fongicide	EF	0,023
dimethachlore	herbicide	EF	0,023
anthraquinone	répulsif oiseaux	EF	0,014
napropamide	herbicide	EF	0,014
mercaptodimethur sulfoxide	métabolite	EF	0,013
dimethomorphe	fongicide	EF	0,009
azoxystrobine	fongicide	EF	0,008
<i>anthraquinone</i>	<i>répulsif oiseaux</i>	<i>MES</i>	<i>0,007</i>
HCH-gamma [lindane]	insecticide	EF	0,002

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 92 % des exports totaux de l'analyse

EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

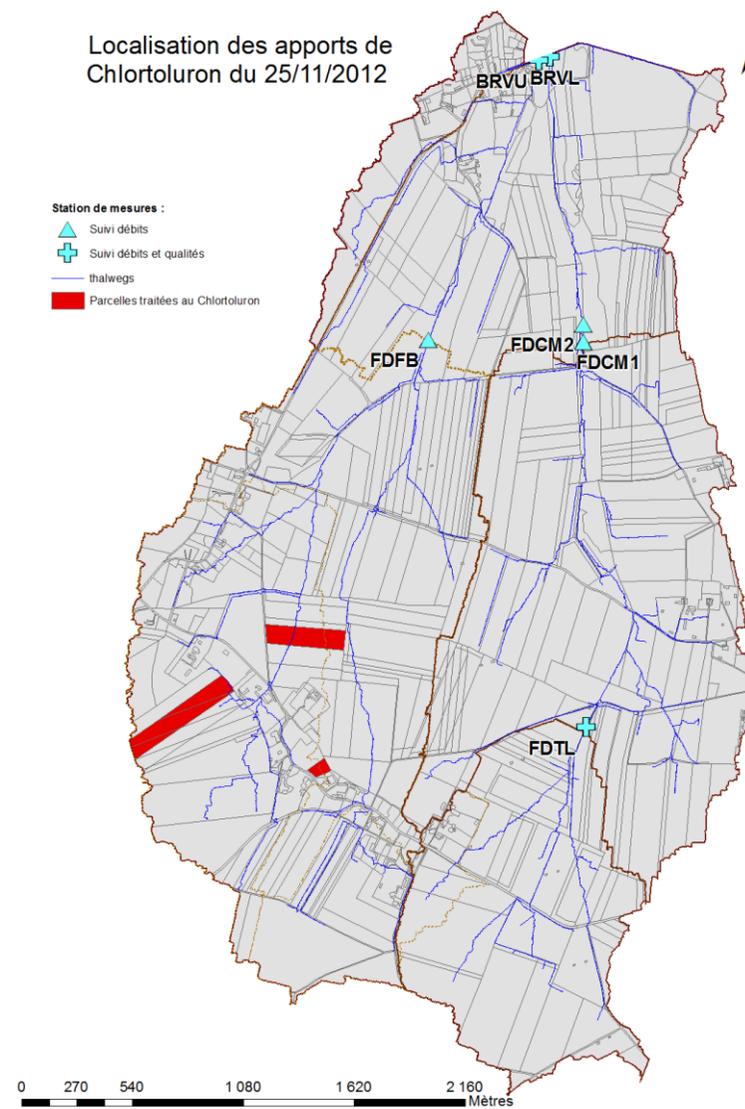
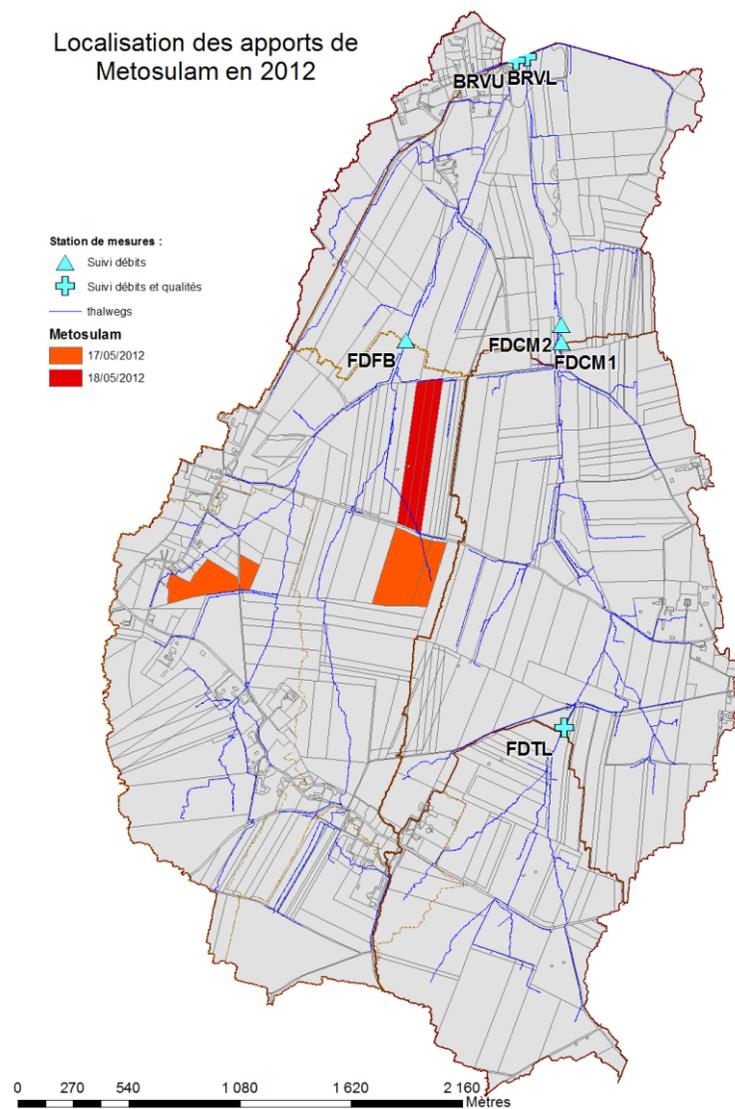
Substances actives dosées pour les analyses associées à l'événement P-Q 117 de la classe 3, réalisées le 21 et 22 décembre 2012

1ère analyse				2ème analyse			
SA	Fonction	Fraction détectée	Concentration [µg/l]	SA	Fonction	Fraction détectée	Concentration [µg/l]
imidaclopride	insecticide	EF	0,352	imidaclopride	insecticide	EF	0,371
glyphosate	herbicide	EF	0,238	chlortoluron	herbicide	EF	0,277
prothioazole	fongicide	EF	0,230	glyphosate	herbicide	EF	0,127
AMPA	métabolite	EF	0,106	mercaptodiméthur sulfoxide	métabolite	EF	0,092
mercaptodiméthur sulfoxide	métabolite	EF	0,066	boscalid	fongicide	EF	0,069
chlortoluron	herbicide	EF	0,045	AMPA	métabolite	EF	0,057
isoproturon	herbicide	EF	0,040	AMPA	<i>métabolite</i>	MES	0,047
diflufenicanil	herbicide	EF	0,036	<i>glyphosate</i>	<i>herbicide</i>	MES	0,046
Boscalid	fongicide	EF	0,034	isoproturon	herbicide	EF	0,037
metazachlore	herbicide	EF	0,034	metazachlore	herbicide	EF	0,034
methiocarb	insecticide	EF	0,019	methiocarb	insecticide	EF	0,033
<i>glyphosate</i>	<i>herbicide</i>	MES	0,009	diflufenicanil	herbicide	EF	0,026
<i>anthraquinone</i>	<i>répulsif oiseaux</i>	MES	0,009	flurtamone	herbicide	EF	0,015
azoxystrobine	fongicide	EF	0,007	azoxystrobine	fongicide	EF	0,012
AMPA	<i>métabolite</i>	MES	0,006	HCH-gamma [lindane]	insecticide	EF	0,003
<i>diflufenicanil</i>	<i>herbicide</i>	MES	0,002	<i>aldrine</i>	<i>insecticide</i>	MES	0,001
HCH-gamma [lindane]	insecticide	EF	0,001				

Les 10 SA les plus exportées sont surlignées en rouge dans l'analyse représentent 94 % et 96 % des exports totaux de la 1^{ère} et 2^{ème} analyse respectivement.

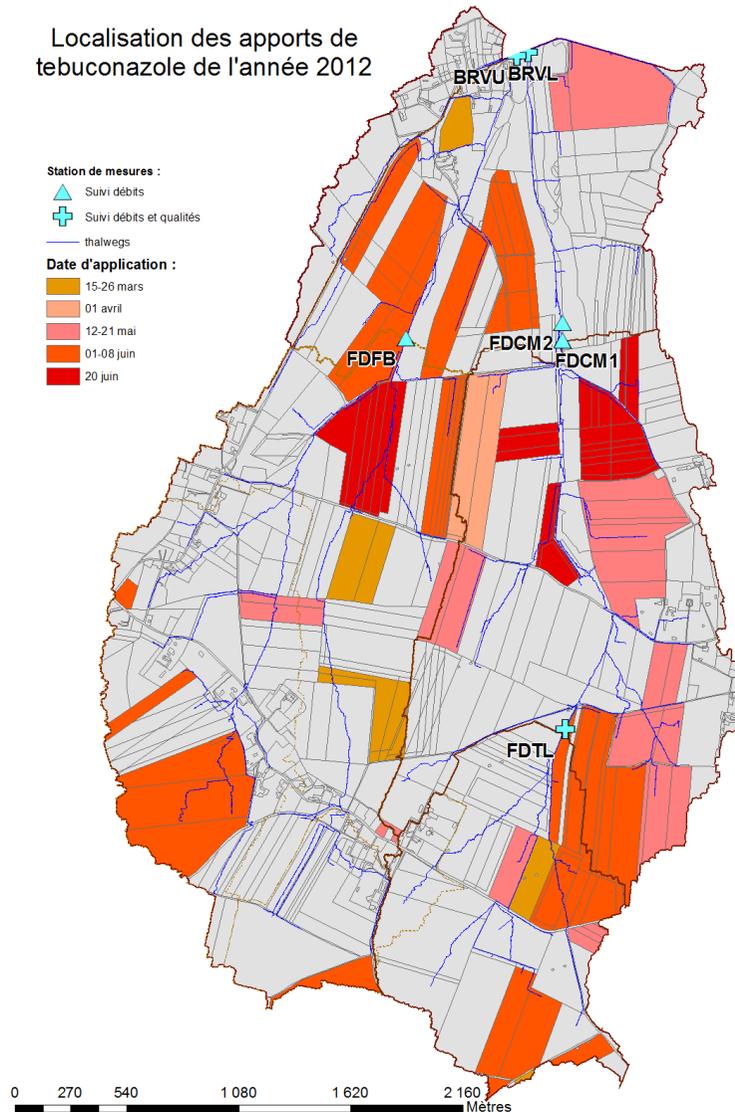
EF : Analyse sur Eau Filtrée ; EB : Analyse sur Eau Brute ; MES : Analyse sur MES

Annexe XV : Localisation et dates des apports en Metosulam et du Chlortoluron sur l'année 2012

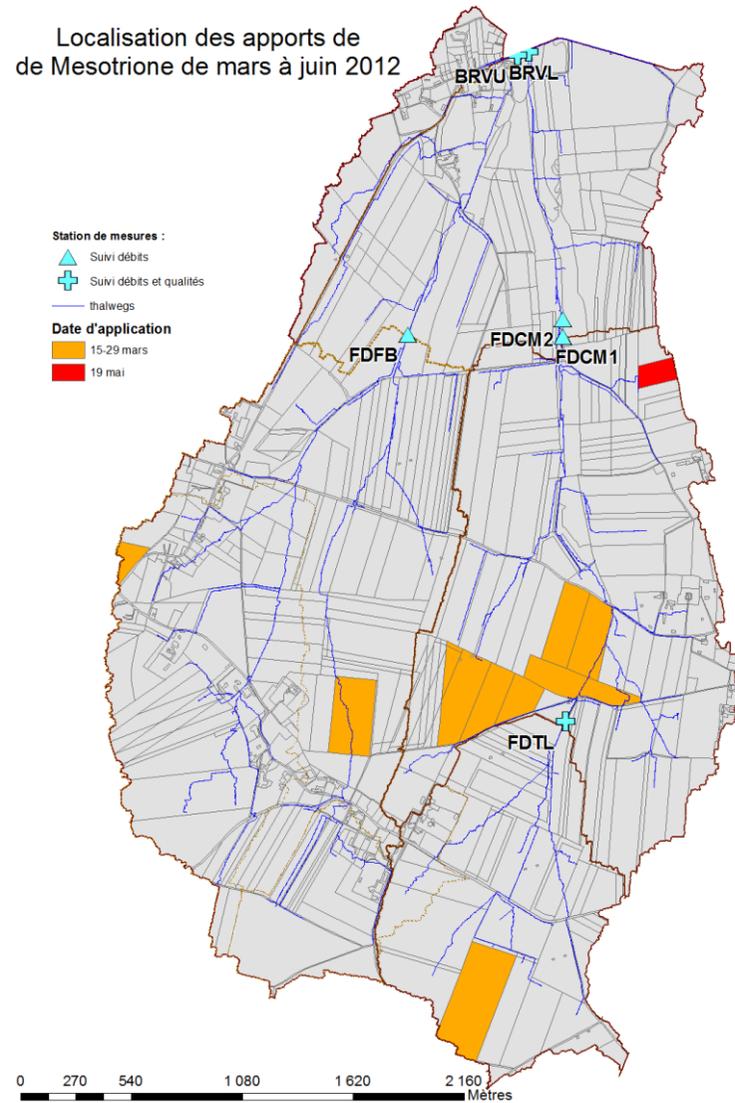


Annexe XVI : Carte de localisation des apports du Tebuconazole et du Mesotrione de mars à juin 2012 : illustration des parcelles contributives aux exports des événements 86-87 (classe 4)

Localisation des apports de tebuconazole de l'année 2012



Localisation des apports de de Mesotrione de mars à juin 2012



	Diplôme : Ingénieur Agronome Spécialité : Génie de l'Environnement Spécialisation / option : Sol Eau Hydrosystème Enseignant référent : Zahra THOMAS	
Auteur(s) : Rachel L'HELGOUALC'H Date de naissance : 04/12/1993	Organisme d'accueil : AREAS Adresse : 2 Avenue Foch	
Nb pages : 40 Annexes : 16	76 460 Saint Valery en Caux	
Année de soutenance : 2016	Maître de stage : Lai Ting PAK	
Titre français : Analyse du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Bourville et des transferts de pesticides associés		
Titre anglais : Hydrological and pesticides transfers analysis of Bourville catchment		
<p>Résumé :</p> <p>Dans les bassins versants agricoles de la ceinture loessique du Nord de l'Europe, les sols sont particulièrement sensibles aux ruissellements pouvant entrainer des transferts importants de pesticides vers les masses d'eau. Pour limiter ces contaminations, il est important de connaître le fonctionnement hydrologique du bassin versant. Ce rapport synthétise une base de données riche (agronomie, pluviométrie, hydrologie, qualité de l'eau) de sept campagnes issue du bassin versant de Bourville de 1045 ha. Pour comprendre son fonctionnement hydrologique, une analyse globale des données a été réalisée, suivie d'une analyse événementielle par une analyse statistique descriptive. Afin d'y associer la variabilité spatiale, des variables hydrologiques des différentes stations de mesures sur les thalwegs du bassin sont prises en compte. Cette étude a mis en évidence l'importance des conditions de dégradation du sol lors de la genèse de ruissellement, elle a également fait ressortir l'influence des particularités morphologiques du bassin sur les ruissellements et les transferts produits par la classification des crues. Il en ressort une forte saisonnalité des ruissellements et des exports ainsi qu'une typologie des crues définie principalement par leur intensité et leur provenance. Cette typologie permettra alors d'adapter le type d'actions à mettre en place sur le bassin pour réduire les transferts de pesticides.</p>		
<p>Abstract :</p> <p>In the cultivated catchment of the loess belt in the Northern Europe, soils are particularly sensitive to the runoff that can entail sensitive transport of pesticides to the body of water. To limit the contaminations, it is important to understand the catchment hydrological functioning. This report synthesizes a large data base (agronomy, pluviometry, hydrology, water quality) from seven years of the 1045 ha Bourville catchment. To understand its hydrological functioning, a global analysis was realised, followed by an event analysis by descriptive statistical analysis. The hydrological variables of different measurement stations on the thalwegs of the catchment are considered to apprehend the spatial variability. This study highlighted the importance of the soil degradation conditions in the runoff genesis. It also emphasised the influence of the morphological features of the catchment on the runoff and pesticides transfers produced by the flooding classification. It highlights a strong seasonality of the runoff and exports as well as a flooding typology in function of its intensity and its origin. The result of this study will allow suggesting actions to set up on the catchment to reduce pesticide transfers.</p>		
Mots-clés : ruissellement, typologie, exports, substances actives, saisonnalité, état de surface, Key Words: runoff, typology, exports, active substances, seasonality, surface condition		