



HAL
open science

Etude du bassin-versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69) : synthèse de données et mise au point d'un schéma de fonctionnement tenant compte des dynamiques de concentration des pesticides et des métaux

M. Orquevaux

► To cite this version:

M. Orquevaux. Etude du bassin-versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69) : synthèse de données et mise au point d'un schéma de fonctionnement tenant compte des dynamiques de concentration des pesticides et des métaux. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02593304

HAL Id: hal-02593304

<https://hal.inrae.fr/hal-02593304>

Submitted on 15 May 2020

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.

TRAVAIL DE FIN D'ETUDES (TFE)
du 04/01/2010 au 25/06/2010

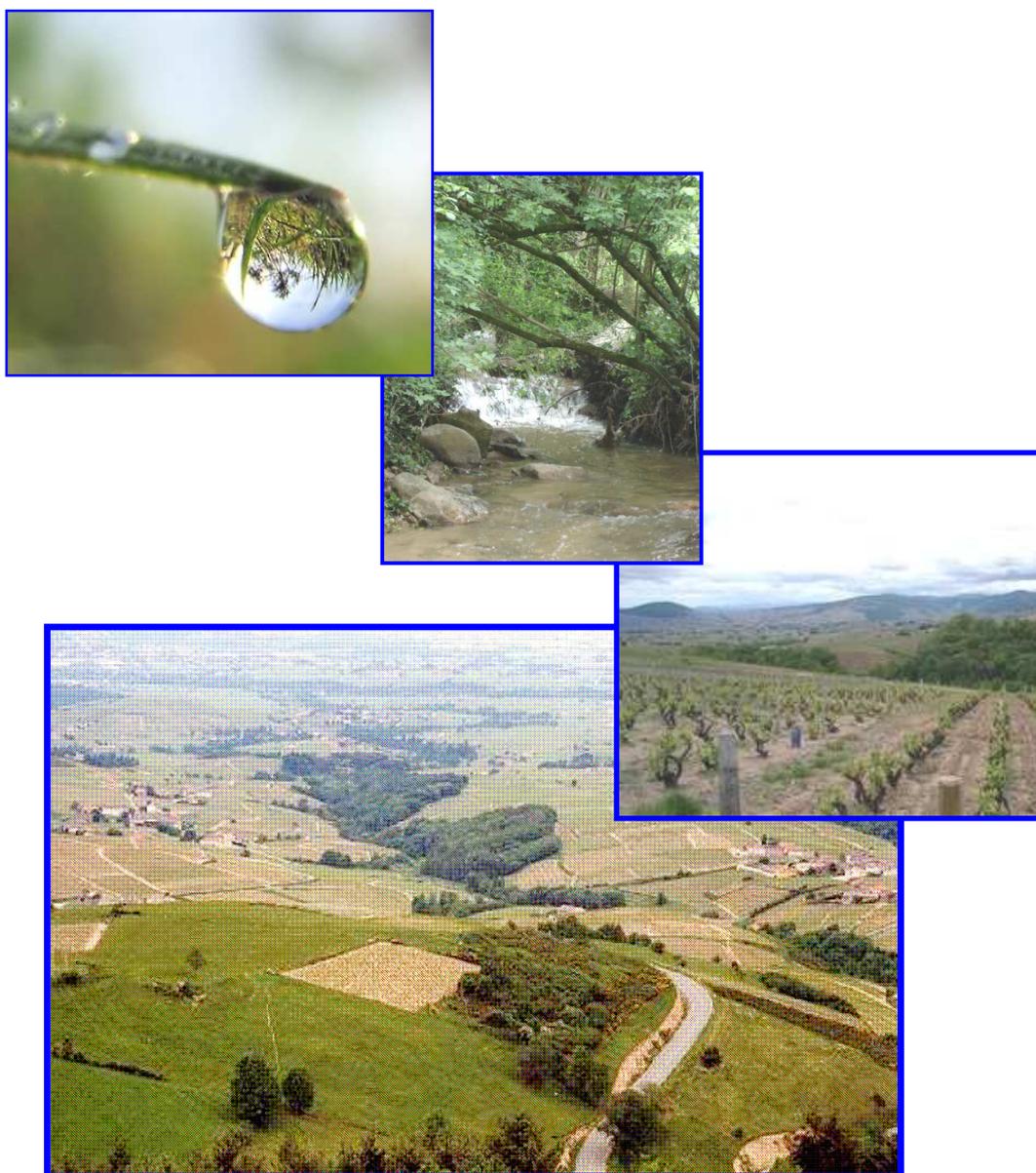
Diplôme « Ingénieur diplômé de l'ENGEES »

Sujet : Etude du bassin-versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69): synthèse de données et mise au point d'un schéma de fonctionnement tenant compte des dynamiques de concentration des pesticides et des métaux.

Maîtres de stage : Nadia CARLUER
et Christelle MARGOUM

Réalisé par : Mathilde ORQUEVAUX

Rapport de Stage de Fin d'Etudes :
Etude du bassin-versant de la Morcille



(Photos du bassin versant de la Morcille)

Remerciements

Je tenais à remercier **l'ensemble du personnel du CEMAGREF de Lyon** pour son accueil et son aide tout au long de mon stage.

Mais je tiens tout particulièrement à remercier :

- Madame **Nadia CARLUER** ainsi que Madame **Christelle MARGOUM**, mes deux maîtres de stage, pour m'avoir confié ce sujet de stage, pour leurs conseils, leur encadrement et leur sympathie.
- L'ensemble de **l'équipe « Pollutions Diffuses Agricoles »**, c'est-à-dire **Marie-Françoise FABRE, Karine FAIDIX, Olivier GARCIA, Christine GAUROY, Véronique GOUY, Jean-Joël GRIL, Claire LAUVERNET, Guy LE HENAFF** et **Lucie LIGER** pour m'avoir accueillie et intégrée dans leur groupe, pour leur disponibilité, leurs conseils et pour toutes les conversations intéressantes que j'ai pu avoir avec eux sur le thème de l'eau et de l'environnement en général.
- Monsieur **Paul LE PIMPEC** pour son aide quant à l'interprétation des paramètres de chimie générale sur la Morcille.
- Madame **Marina COQUERY** pour son aide quant à la signification des différentes concentrations en métaux dans l'eau.
- Monsieur **Etienne LEBLOIS** pour son aide en hydraulique/hydrologie sur les statistiques d'occurrence des événements de crue.
- **L'équipe Informatique et le Secrétariat** pour leur sympathie et leur disponibilité.

Je tenais également à remercier Madame **Caroline LEROUX** du CDB (Comité de Développement du Beaujolais) pour son aide et pour les données qu'elle nous a fournies sur les pratiques agricoles du bassin versant de la Morcille ainsi que l'ensemble des **viticulteurs** de ce bassin que j'ai pu rencontrer et qui ont répondu à mes questions quant à leurs pratiques agricoles.

Résumé

Etude du bassin versant de la Morcille : mise au point d'un schéma de fonctionnement du bassin au regard des transferts de pesticides et de métaux.

Le petit bassin versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69), lieu de genèse des eaux, est fortement impacté par l'activité viticole, qui occupe 70% de son territoire. Se pose alors la question de la qualité de l'eau de cette rivière. Or, dans le cadre de l'application de la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE), l'enjeu actuel est d'atteindre le « bon état » chimique et écologique des masses d'eau d'ici à 2015. Elle implique de ce fait de rechercher les causes des dégradations éventuelles de la qualité des masses d'eau et de mettre en œuvre des actions correctives.

Dans ce contexte, l'équipe « Pollutions Diffuses Agricoles » du Cemagref de Lyon, en lien étroit avec le laboratoire d'analyses physico-chimiques, cherche à mieux quantifier la contamination des eaux par les produits phytosanitaires et métaux et à mieux comprendre les phénomènes de transfert de ces polluants. Dans cette optique, le bassin versant de la Morcille, instrumenté par cette équipe, est suivi depuis plusieurs années et diverses données y sont régulièrement acquises : hydrologie, concentrations de polluants (pesticides et métaux) dans l'eau, chimie générale de l'eau, etc.

L'étude durant ce stage a porté sur la synthèse et le recoupement de l'ensemble de ces données, la mise en évidence de certaines caractéristiques et de certains comportements propres à ce bassin versant. A partir de ces résultats, et pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent le transfert des polluants de la parcelle de vignes jusqu'au cours d'eau, une typologie de crues ainsi qu'un schéma de fonctionnement de ce petit bassin versant ont été proposés.

Le résultat de ce travail, au delà du fait de constituer une phase préalable à la modélisation informatique des transferts de polluants au sein de ce petit bassin versant, permettra de dresser un premier listing de solutions correctives (restauration des zones tampons, bandes enherbées, etc.) à apporter pour améliorer la qualité de l'eau.

Abstract

Study of the Morcille river catchment : realization of a functioning scheme regarding the transfer of pesticides and metals.

The small catchment of the Morcille river (North Beaujolais, 69, France), place of the origin of water, is strongly affected by the wine-producing activity which occupies 70 percent of its territory. So, the question about the quality of the water of this river is asked. On the occasion of the implementation of the European Water Framework Directive or WFD, the present purpose is to meet 'good status' by 2015 for all aquatic ecosystems and, with regard to their water needs, terrestrial ecosystems and wetlands. In this case, this directive implies to look for the causes of the potential deteriorations of the water quality and to carry out corrective actions.

In this context, the scientific team, which works on the agricultural pollution in the Cemagref in Lyon, is looking for a better quantification of the water pollution by the pesticides and the metals and for a better understanding of the phenomenon of transfer of this pollution. In this point of view, the Morcille river catchment has been studied for several years and data are regularly collected in this place concerning hydrology, concentration of the pollution in the water of the stream, chemical data, ...

The study during this work experience has consisted in doing the synthesis and analyzing all this data base, in underlining some characteristics and some behaviours proper to this catchment. From these results and in order to understand well the mechanisms which govern the transfer of the pollution from the parcel to the river, a flood typology and a functioning scheme have been suggested.

The result of this work constitutes a preliminary phase to the realization of a computer guide to imitate the transfer of the pesticides and the metals in the Morcille river catchment. Last but not least, it will allow to suggest a first listing of corrective solutions (as the restoration of wetlands, the setting up of places with grass, ...) which have to be set up to improve the water quality.

SOMMAIRE :

Introduction	8
1. Contexte et objectifs du stage	9
1-1. Présentation du Cemagref de Lyon	9
1-2. Contexte et objectifs du stage.....	9
2. Présentation du bassin versant de la Morcille, des données disponibles et état de l'art.....	11
2-1. Présentation du bassin versant de la Morcille	11
2-2. Instrumentation du bassin versant de la Morcille.....	14
2-3. Présentation des données disponibles	15
2-4. Présentation de l'ensemble des études et des thèses réalisées	17
3. Interprétation des données et identification de phénomènes nouveaux ou déjà évoqués	20
3-1. Saisonnalité du bassin versant de la Morcille : exploitation et interprétation des données hydrologiques.....	20
a) <i>Exploitation des données de pluie (1992-2009) et d'ETP (2002-2007) :</i>	20
b) <i>Exploitation des données de débit (2002-2009) :</i>	22
c) <i>Bilan hydrologique : variation du volume d'eau dans le sol et le sous-sol :</i>	23
d) <i>Synthèse :</i>	25
3-2. Exploitation et interprétation des données disponibles relatives à la qualité de l'eau (MES, produits phytosanitaires, métaux, etc.)	26
a) <i>La chimie générale de l'eau</i>	26
b) <i>Le comportement des MES dans l'eau</i>	28
c) <i>Les produits phytosanitaires dans l'eau et pratiques culturales des viticulteurs</i>	30
d) <i>Les métaux dans l'eau (phase dissoute)</i>	33
e) <i>Analyse critique des données disponibles et synthèse sur la qualité de l'eau</i>	36
4. Proposition d'une typologie de crues.....	38
4-1. Etude des pluies et des débits : établissement des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) et QDF (Débit-Durée-Fréquence)	38
4-2. Typologie de crues selon les caractéristiques hydrologiques.....	40
4-3. Typologie de crues complète en regard des MES, des transferts de produits phytosanitaires et de métaux	46
5. Proposition d'un schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille.....	50
5-1. Parts respectives du ruissellement et des écoulements de proche sub-surface pendant les crues : utilisation du modèle hydrologique « TopModel »	52
5-2. Ecoulements de surface et transfert de pollution	58
5-3. Ecoulements de sub-surface et transfert de pollution.....	61
5-4. Quelques indications sur le sous-sol	66
5-5. Conclusion sur le fonctionnement du bassin versant de la Morcille.....	68
Conclusion et perspectives.....	70
Bibliographie.....	71
Annexes	73

TABLE DES FIGURES :

Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69).....	12
Figure 2 : Les 3 principaux sites et puits de prélèvements le long de la Morcille.....	14
Figure 3 : Histogramme des moyennes de pluie brute mensuelles.....	21
Figure 4 : Courbe d'évolution de l'ETP moyenne mensuelle.....	21
Figure 5 : Courbe d'évolution de la pluie nette moyenne mensuelle.....	22
Figure 6 : Histogramme des débits mensuels moyens.....	22
Figure 7 : Estimation du bilan mensuel réel de la variation de la ressource en eau du sol et du sous-sol.....	24
Figure 8 : Schéma synthétisant la saisonnalité des paramètres hydrologiques.....	25
Figure 9 : Hydrogramme d'une crue (06/07/06) présentant une courbe [MES]=f(Q) en "8" ...	28
Figure 10 : Hydrogramme d'une crue (27/09/07) présentant une courbe [MES]=f(Q) en hystérésis horaire.....	29
Figure 11 : Manifestation de la pollution en produits phytosanitaires pour l'année 2007 : exemple avec un fongicide (diméthomorphe) et un herbicide (diuron).....	31
Figure 12 : Evolution de la concentration des métaux dans la rivière en crue (exemple avec la crue du 10/07/2007).....	34
Figure 13 : BV Morcille, Site 1 St Joseph (BE), 19/03/2010, Présence d'écumes violettes en sortie de collecteur d'eaux usées (période de nettoyage des fonds de cuves).....	37
Figure 14 : BV Morcille, Site 1 St Joseph (BE), 19/03/2010, Déversement des eaux usées dans la Morcille par l'intermédiaire d'un fossé, placé juste à l'aval de la sortie du collecteur d'eaux usées précédent (il n'a pas plu depuis longtemps).	37
Figure 15 : Résultat des courbes IDF pour le bassin versant de la Morcille.....	38
Figure 16 : Résultat des courbes QDF pour le bassin versant de la Morcille.....	39
Figure 17 : Hyétoqramme et hydrogramme résultant d'un événement de crue.....	41
Figure 18 : Répartition des événements de l'échantillon tout au long de l'année.....	41
Figure 19 : Courbe de répartition du cumul des pluies.....	42
Figure 20 : Résultat de la CAH : mise en évidence de 3 classes de crues.....	43
Figure 21 : Schéma global de fonctionnement du bassin versant de la Morcille.....	51
Figure 22 : Carte de l'indice de Beven et carte de Romain Giraud (zones hydromorphes).....	53
Figure 23 : Graphiques présentant les résultats obtenus avec Topmodel (1/2).....	56
Figure 24 : Graphiques présentant les résultats obtenus avec Topmodel (2/2).....	57
Figure 25 : Carte des parcelles "à risques" (1/2).....	59
Figure 26 : Carte des parcelles "à risques" (2/2).....	60
Figure 27 : Carte des sols de Romain Giraud.....	62
Figure 28 : Parcelles présentant des écoulements en sub-surface.....	63
Figure 29 : Carte des aires de drainage et segment hydrographique associé.....	64
Figure 30 : Zones d'accumulation des flux.....	65
Figure 31 : Quelques fonctionnements types hydrologiques.....	67

TABLEAUX :

Tableau 1 : Caractéristiques des 3 classes de crues.....	44
Tableau 2 : Statistiques sur les caractéristiques des 3 classes de crues.....	45
Tableau 3 : Tableaux des différentes classes de crues et saisonnalité du bassin versant de la Morcille :.....	48

Introduction

La prise de conscience grandissante des autorités politiques concernant la qualité de l'eau et la protection de son environnement a mené l'Europe à adopter en 2000 une Directive Cadre sur l'Eau (DCE), son objectif général étant d'atteindre d'ici à 2015 le bon état des différents milieux aquatiques sur tout le territoire européen.

Ce texte marque un tournant dans la politique de gestion de l'eau : autrefois centrée sur ses usages (pêche, irrigation des cultures, production d'électricité, etc.), elle adopte aujourd'hui une toute autre optique ciblée sur la protection du vivant et de son environnement en vue de la non-dégradation des écosystèmes.

Les champs d'application de ce texte de loi, transposé en droit français, sont larges et s'étendent du diagnostic à la restauration des milieux aquatiques. De plus, sa mise en application pose des problèmes complexes auxquels la recherche doit apporter des réponses.

C'est ainsi que, parmi les organismes scientifiques venant en appui au ministère chargé de l'écologie, figure au premier plan le Cemagref. En particulier, l'équipe « Pollutions Diffuses Agricoles » et le laboratoire d'analyses physico-chimiques du Cemagref de Lyon, cherchent à mieux quantifier la contamination des eaux par les produits phytosanitaires et métaux et à mieux comprendre les processus de transfert de ces polluants de la parcelle agricole jusqu'au cours d'eau. A cette occasion, un petit bassin versant d'une superficie de 8 km² et situé dans le Nord Beaujolais (Rhône 69) a été instrumenté par cette équipe et fait l'objet d'un suivi régulier depuis 1986. Un certain nombre de données diverses (hydrologie, géologie, analyse de la qualité de l'eau, etc.) a été acquis depuis cette date. La rivière en question a pour nom « la Morcille » et est un affluent de l'Ardières. En outre, il s'agit d'un site labellisé de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et présente donc un grand intérêt dans l'étude de l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux.

Dans ce cadre, l'étude suivante aura pour premier objectif de synthétiser l'ensemble des résultats des études déjà menées sur ce site, d'en identifier les certitudes et les rendus encore hypothétiques mais aussi de synthétiser et d'exploiter l'ensemble des données disponibles. Des comportements caractéristiques de ce bassin versant seront mis en exergue. Le présent travail tentera par la suite d'apporter des éléments de réponse quant aux transferts des polluants agricoles depuis la parcelle jusqu'au cours d'eau en proposant un schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille. Une typologie de crues sera également établie. Cette étude servira de phase préalable à la réalisation d'un modèle informatique rendant compte des transferts de polluants mais aussi à l'élaboration d'un plan pour la mise en place d'actions correctives.

Les deux premières parties du document sont consacrées à la présentation de l'organisme d'accueil, du travail et du site d'étude : le lecteur y trouvera le contexte et les objectifs du stage, ainsi que l'état de l'art. Les résultats de l'exploitation des différentes données disponibles sont présentés dans le troisième chapitre qui met en exergue les caractéristiques de ce bassin versant. Tout au long de ce document, l'accent sera mis sur la discussion des données et des résultats. Les deux chapitres suivants présentent la typologie de crues et le schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille obtenus, objectifs principaux de ce stage. Enfin, le dernier chapitre propose quelques esquisses d'actions correctives.

1. Contexte et objectifs du stage

1-1. Présentation du Cemagref de Lyon

Le CEMAGREF (Centre d'Étude du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts) vise à offrir des solutions concrètes aux questions environnementales et a pour objectif de produire des connaissances nouvelles et des innovations techniques utilisables par les gestionnaires, les décideurs et les entreprises. Il travaille ainsi en collaboration avec de multiples acteurs du secteur public (Agences de l'eau, Ministères, collectivités territoriales, Union Européenne...), des milieux économiques (bureaux d'études) et du monde de la recherche (universités et organismes de recherche).

C'est dans le domaine de l'eau, en tant que ressource naturelle et milieu vivant, que le groupement de Lyon oriente ses activités de recherche. Il s'intéresse aussi à la gestion des équipements pour l'eau, l'assainissement et les ordures ménagères.

Le Cemagref de Lyon dispose d'un budget annuel d'environ 3 millions d'euros (hors personnel). Le directeur régional est Monsieur Yves Confesson. Ce centre compte environ 120 agents répartis en 3 unités de recherche (UR) :

- Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollution de Lyon (MALY),
- Hydrologie-Hydraulique de Lyon (HPLY),
- et une unité mixte : Gestion des Services Publics (GSP).

L'Unité de Recherche MALY rassemble sept équipes de recherche dont l'équipe « Pollutions Diffuses Agricoles » que j'ai intégrée au cours de ce stage.

Les recherches menées par cette équipe visent à mieux comprendre les mécanismes de transfert et de dégradation des produits phytosanitaires des parcelles traitées vers le réseau hydrographique. Ceci dans le but de mettre en place une méthode de diagnostic du risque de contamination des eaux superficielles et de préconiser des solutions correctives pertinentes pour limiter la dégradation de la ressource hydrique et des milieux aquatiques. Elle dispose pour cela de plusieurs outils et moyens techniques (laboratoires, campagnes de mesures sur le terrain, etc.).

1-2. Contexte et objectifs du stage

La mise en œuvre de la **Directive Cadre sur l'Eau** (DCE, 2000/60/CE – *European Commission*, 2000) se traduit par une intensification des actions de surveillance des écosystèmes aquatiques et notamment par un renforcement des **contrôles des contaminants**. Elle implique également de rechercher les causes des dégradations éventuelles de la qualité des masses d'eau et la mise en œuvre et **l'évaluation d'actions correctives** afin d'atteindre le « bon état » chimique et écologique en 2015.

Le **sous-bassin de la Morcille** a ainsi été choisi par le **Cemagref** parce qu'il présente des caractéristiques qui le rendent intéressant pour **étudier l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux**. En outre, il s'agit d'un site labellisé de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR).

L'équipe « **Pollutions Diffuses** » cherche à mieux quantifier et comprendre les processus sous jacents à la contamination des eaux par les **produits phytosanitaires** à l'échelle du petit bassin-versant, lieu de genèse de la qualité des eaux. Elle travaille en collaboration avec le laboratoire d'analyse en charge des analyses physico-chimiques (paramètres majeurs, métaux et pesticides), qui développe la mise en œuvre de différentes stratégies d'échantillonnage pour mieux comprendre le transfert des contaminants et les origines de la pollution.

L'objectif de ce stage est donc de proposer un/des **schéma(s) de fonctionnement** (plusieurs hypothèses s'avèreront peut-être possibles, un schéma pouvant éventuellement varier en fonction de la saison et de l'intensité des événements pluvieux considérés) de ce petit bassin versant à partir de toutes les données disponibles pour mieux comprendre les mécanismes de transfert des polluants. ***Dans quelle mesure les données mises à disposition permettront-elles d'identifier un schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille ?***

Les recherches se concentreront principalement sur l'étude de la dynamique des différents écoulements. Concernant les événements, il est attendu une **typologie de crues**, dégageant notamment l'importance respective du ruissellement et des écoulements de proches sub-surfaces pendant les crues.

La tâche est complexe car beaucoup de paramètres rentrent en jeu : les paramètres liés à l'homme et à ses activités (pratiques agricoles, occupation du sol, etc.), les paramètres liés à la nature du site (sols, hydrologie, topographie, climat, etc.). Tous les paramètres doivent être pris en compte et toutes les situations possibles déclinées afin de s'approcher au mieux de la réalité. Les phénomènes de transfert sont complexes et variés. *Il est avéré que le bassin versant de la Morcille est soumis à des pollutions d'origine viticole, engendrant ainsi une baisse de la qualité de l'eau. Cet état n'est-il pas également lié aux rejets en assainissement dans la rivière des habitations ?*

Le résultat obtenu à l'issue de ce stage constituera en réalité une phase préalable à la réalisation d'un **modèle informatique** permettant de simuler le comportement de ce bassin vis-à-vis des transferts de polluants. Ces résultats permettront également de dresser un listing de **solutions correctives** (restauration des zones tampons, bandes enherbées, etc.) selon les voies dominantes de transfert des polluants.

2. Présentation du bassin versant de la Morcille, des données disponibles et état de l'art

2-1. Présentation du bassin versant de la Morcille

- *Pourquoi avoir choisi le bassin-versant de la Morcille comme bassin d'étude ?*

L'étude du bassin versant de la Morcille par le Cemagref a débuté à l'automne 1986 afin d'identifier le transfert des pesticides, les phénomènes d'érosion et les pratiques culturales. Il a en effet été choisi par le Cemagref parce que, comme cela a déjà été évoqué précédemment, il présente des caractéristiques qui le rendent intéressant pour étudier l'impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux. En effet, ce bassin a pour particularités d'avoir :

- une dégradation révélée due aux diverses activités anthropiques (la vie piscicole a disparu depuis un certain temps dans ce cours d'eau),
- une vulnérabilité au risque d'érosion,
- une part en vigne très importante,
- une faible superficie (environ 8 km²).

- *Localisation et description :*

Le bassin versant de la Morcille se situe au Nord du département du Rhône, dans le Haut-Beaujolais, entre la bordure orientale du Massif Central et l'extrémité ouest de la vallée de la Saône. Il constitue un sous-bassin de l'Ardières (220 km²) qui se jette elle-même dans la Saône, à proximité de Belleville.

La Morcille s'étire sur 9 km, du lieu-dit « Fonds Bateaux », à l'amont de la commune de Villié-Morgon, jusqu'à la confluence avec l'Ardières, à proximité du lieu-dit « le Champ Lévrier » sur la commune de Saint Jean d'Ardières.

(voir Figure 1 ci-dessous)

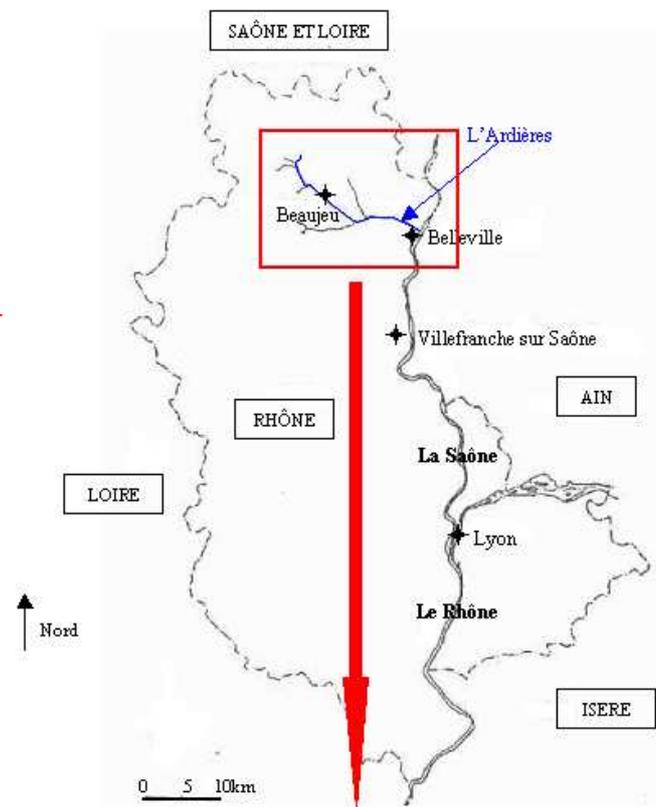
Attention : La plupart des études réalisées sur ce bassin utilise comme exutoire le site d'étude appelé « les Versauds » réduisant ainsi le champ d'étude à un sous-bassin versant d'une superficie de 4,8 km².

(voir Annexe 1 : Carte du sous-bassin versant de la Morcille – Exutoire : site 2 « les Versauds »)

Remarque : des compléments d'information sur le bassin versant de la Morcille (photos par exemple) et sur l'ensemble de la présente étude réalisée (fichiers .pdf divers, etc.) sont disponibles sur le CD-Rom fourni avec ce rapport. Une animation 3D du bassin a également été réalisée avec ArcScene (extension d'ArcGis).

Localisation du département Rhône en France :

Localisation de l'Ardières dans le département Rhône :



Localisation du bassin-versant de la Morcille dans celui de l'Ardières :

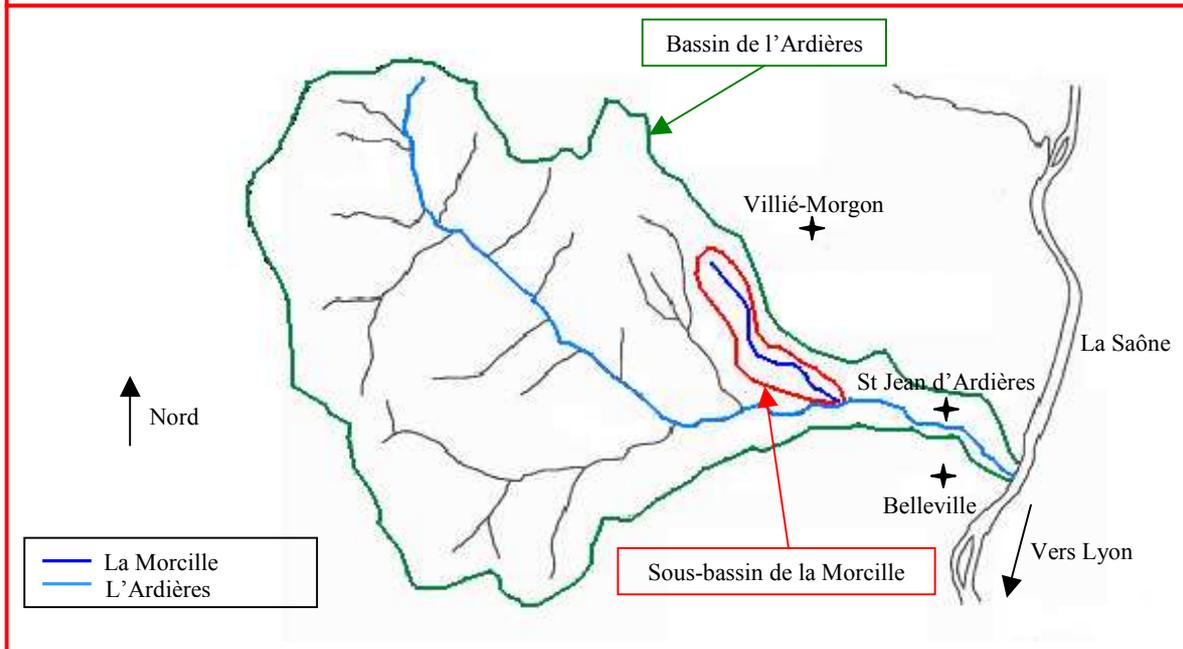


Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Morcille (Nord Beaujolais, 69)

Topographie :

Le bassin de la Morcille présente dans sa partie amont un dénivelé de 370 m entre le haut du bassin et le lieu-dit « Les Versauds », avec une pente moyenne de 8 %. A cet endroit, ses versants sont alors raides et convexes et le lit de la rivière est encaissé et sa largeur est très réduite (entre 0.5 et 2 m). Au-delà des « Versauds », le vallon s'élargit et le relief s'adoucit régulièrement.

Nature du substrat et des sols :

Le substrat est constitué d'un socle cristallin altéré, essentiellement granitique. Les sols sont majoritairement sableux (voire limoneux mais rarement argileux) et érodables (arènes), en général pauvres en matières organiques. Les sols sableux se retrouvent sur le haut des versants et les sols plus argileux dans le fond de vallée.

Caractéristiques climatiques :

Le climat est tempéré mais les saisons sont contrastées avec des écarts importants de températures entre l'été (jusqu'à 30°C et plus) et l'hiver (-8°C à -10°C). Les températures moyennes annuelles s'échelonnent de 7°C à 16°C. La pluviométrie annuelle à Villié-Morgon est de 770 mm. La répartition des événements pluvieux est assez régulière l'hiver alors qu'en été, une pluie sur deux est orageuse.

Hydrologie de la Morcille :

Son débit varie fortement et peut osciller entre 5 et 700 L/s, voire au delà. Ce site est caractérisé par des événements hydrologiques importants (crues fortes et rapides) avec un temps de réponse très court en raison des fortes pentes du bassin. Le lit est rarement à sec.

Les nappes d'eau souterraines :

Un débit de base est assuré dans le cours d'eau de la Morcille par la nappe dite d'arène (ou de socle) granitique située au niveau de la zone forestière amont et du fond du vallon. Cette nappe alluviale est présente dans un horizon limono-sableux filtrant, présent après 110 cm au minimum. Il existe de petites nappes perchées peu étendues qui peuvent, localement, provoquer l'apparition de sources temporaires avec de faibles débits.

Aménagements hydrologiques :

Afin de lutter contre l'érosion sur les terres agricoles, des structures lourdes ont été mises en place dont un réseau de fossés dense et structuré : présence de rases (ou fossés intra parcellaires) connectées à des canalisations principales (de type fossé, demi-buse ou buse) dont le but est d'évacuer l'eau depuis la parcelle jusqu'à l'exutoire au cours d'eau.

Activités humaines :

Sur le bassin versant, l'assainissement pluvial et individuel de l'habitat, dispersé et peu dense, est souvent raccordé aux fossés et contribue donc au maintien d'un débit non négligeable dans ceux-ci, particulièrement à l'étiage. Plus on se déplace vers l'aval de la Morcille, plus le bassin versant s'anthropise : augmentation du trafic routier et du nombre d'habitations. Aucune activité industrielle n'est présente.

La vigne occupe environ 70 % de la superficie totale du bassin versant, le reste étant occupé à l'amont par des forêts et des prairies ou friches dans les fonds de vallées. Cette surface est non convertible à la viticulture car les terres sont trop humides ou trop élevées en altitude.

2-2. Instrumentation du bassin versant de la Morcille

Comme il a été dit précédemment, ce bassin versant est étudié par le Cemagref de Lyon depuis 1986. Pour cela, l'équipe « Pollution Diffuse Agricole » dispose de plusieurs outils de suivi et moyens techniques dont les principaux sont les suivants :

- ✓ **Il existe 3 principaux sites d'études où sont réalisées différentes mesures :**



Figure 2 : Les 3 principaux sites et puits de prélèvements le long de la Morcille

On y réalise des prélèvements d'eau pour le dosage des paramètres en chimie générale, en métaux et en produits phytosanitaires de type ponctuel ou hebdomadaire moyenné. Le site 1 St Joseph est en plus équipé d'un pluviomètre et le site 2 « les Versauds » d'un débitmètre. On note que le site 2 est particulièrement intéressant car il est équipé, depuis 2007, d'un appareil réalisant des prélèvements automatiques d'échantillons d'eau asservis au débit de la rivière, ce qui permet de suivre les paramètres à un pas de temps très fin durant les épisodes de crues. (*voir photos du site 2 « les Versauds » en annexe 2*)

- ✓ **Il existe 4 principaux puits par l'intermédiaire desquels des prélèvements sont réalisés en chimie générale, en métaux et en produits phytosanitaires pour analyser l'eau du sous-sol :** Source Morcille ; Ducroux (Site 1) ; Dufour (Site 2) ; Béréziat (Site 3) (de l'amont vers l'aval) (*voir figure 2 ci-dessus*)

Pour les 3 puits situés le plus à l'aval du bassin, les 3 propriétaires certifient tous que l'eau de leur puits ne provient pas de la nappe mais d'une source venant de l'amont (formation d'une « poche d'eau »). Ces dires restent à être prouvés par une étude hydrogéologique. Concernant le puits le plus à l'amont, il correspond en réalité à la sortie d'un réseau de drainage (captage situé 30 mètres en amont) situé sous une zone humide et aboutissant à un fossé qui longe la route. En effet, la source de la Morcille n'est pas une résurgence mais elle est constituée de la somme de l'ensemble des ruissellements, drainages et autres infiltrations ressortant à divers points qui convergent tous vers un même lit pour former un ruisseau, puis un cours d'eau qui grossit de plus en plus. (*voir photos en annexe 3*)

- ✓ **Il existe plusieurs piézomètres qui se situent sur une bande enherbée instrumentée.**

A l'occasion d'expériences menées sur le processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées ([5] LACAS J. G., 2005), une bande enherbée se situant non loin du site 1 St Joseph a été instrumentée notamment avec 12 piézomètres réalisés par le Cemagref. Or, à l'heure actuelle un problème se pose : les piézomètres se colmatent et ne donnent plus beaucoup de renseignements sur le niveau d'eau dans le sous-sol. D'autre part, ces 12 piézomètres, disposés le long de deux transects parallèles, donnaient certes des renseignements sur la réponse des écoulements aux pluies mais ne donnent aucune information sur la morphologie globale de la nappe. Il serait intéressant de pouvoir installer de nouveaux piézomètres uniformément répartis sur toute la surface du bassin versant. (*voir photos en annexe 4*)

- ✓ **Il existe enfin un pluviomètre qui se situe au lieu-dit « le Calvaire », à mi chemin entre le site 1 et le site 2.**

On remarque qu'un autre pluviomètre est à disposition au site 1 St Joseph dont les données peuvent être utiles en cas de lacunes.

2-3. Présentation des données disponibles

L'étape qui suit a consisté à rassembler, à compléter ou à acquérir dans certains cas, l'ensemble des données disponibles et utilisables sur le bassin versant de la Morcille. Ce paragraphe a pour but également de recenser les éventuelles lacunes, de confronter les périodes ainsi que les paramètres d'étude et de juger de la possibilité d'exploitation de l'ensemble de cette base de données. Cette compilation de données doit conduire à une bonne connaissance générale des différentes caractéristiques du bassin, que ce soit d'un point de vue de la pluviométrie et de l'hydrologie, de la pollution du cours d'eau la Morcille et de sa nappe alluviale, etc. En voici la liste exhaustive :

- ✓ **Les données de pluie** : disponibles de 1992 à 2009 sur un pluviomètre du Cemagref, situé au lieu-dit « le Calvaire », placé non loin du site 2 « les Versauds ». Plusieurs lacunes ont été recensées pour ces données, parfois sur des mois entiers. On note que des données de pluviométrie sont également disponibles auprès de MétéoFrance, sur la commune de Chiroubles, non loin de Villié-Morgon, ce qui peut éventuellement servir de référence dans certains cas et dans une certaine mesure.
- ✓ **Les données d'évapotranspiration potentielle ETP** : elles ont été acquises auprès de Météo France, disponibles sur la commune de LIERGUES (69), non loin de Villié-Morgon, de 2002 à 2007.
- ✓ **Les données de débit** : disponibles de 2002 à 2009 (données du Cemagref) ou de 1993 à 2008 (données de la DIREN Rhône-Alpes) sur le site 2 « les Versauds ». Concernant les données du Cemagref, il y a parfois des lacunes sur plusieurs mois entiers. Celles de la DIREN (DIrection Régionale de l'ENVironnement) sont beaucoup plus complètes mais on

note une grande disparité des données entre ces deux sources, parfois, sur un même événement. Ce sont les données de la DIREN qui sont considérées comme étant les plus fiables en général. D'autre part, le suivi des événements de crues n'est disponible que sur le site « les Versauds », ce qui ne permet pas de procéder à une étude complète amont/aval sur les trois sites en période de crue.

- ✓ **Les données de chimie générale de la Morcille et de l'eau du sous-sol (puits) :** disponibles en 2008 et 2009 pour l'eau du sous-sol et de 2004 à 2008 pour la rivière sur différents sites dont les 3 principaux : St Joseph, les Versauds et St Ennemond. On note que les données pour l'eau du sous-sol sont en trop faible nombre (5 prélèvements en totalité sur 2 années d'études), ce qui risque de constituer un frein dans l'étude du fonctionnement en sous-sol du bassin versant.
- ✓ **Les données de MES (Matières En Suspension) :** disponibles avec les données sur les produits phytosanitaires, les métaux et la chimie générale. Les données de MES sont parfois limitées, notamment en période de crue pour cause de lacunes. Ceci pourra constituer une gêne dans l'étude du comportement de la concentration en MES en période de crues.
- ✓ **Les concentrations en produits phytosanitaires dans la Morcille et dans l'eau du sous-sol (boîtes près des piézomètres de la bande enherbée, site St Joseph) :** disponibles de 2007 à 2009 pour l'eau du sous-sol et de 2004 à 2009 pour la rivière sur différents sites dont les 3 principaux : St Joseph, les Versauds et St Ennemond. Le problème ici est que, de même que pour la chimie générale, les données pour l'eau du sous-sol sont en trop faible nombre (quelques prélèvements de 2007 à 2009), ce qui constitue un frein pour la suite de l'étude sur le fonctionnement en sous-sol du bassin versant. Ces prélèvements sont localisés au niveau de la bande enherbée, se faisant grâce à un système de boîtes enterrées situées non loin des piézomètres. Les résultats obtenus quant à ces concentrations sont souvent inexploitable, les limites de quantification fixées par le laboratoire d'analyses étant souvent trop élevées, ceci étant dû à des contraintes techniques.
- ✓ **Les concentrations en métaux dans la Morcille et dans l'eau du sous-sol (puits) :** disponibles en 2008 et 2009 pour l'eau du sous-sol et de 2004 à 2009 pour la rivière sur différents sites dont les 3 principaux : St Joseph, les Versauds et St Ennemond. Pour le prélèvement des concentrations en métaux dans l'eau du sous-sol, le même problème se pose encore, c'est-à-dire que le nombre de données est bien trop insuffisant (3 à 5 prélèvements en totalité sur 2 années d'études) pour permettre une étude sur l'évolution de la concentration des métaux dans l'eau du sous-sol.
- ✓ **Les données de piézométrie :** disponibles de 2007 à 2009 en plusieurs points sous la bande enherbée. Ces données de piézométrie sont localisées en un point du bassin versant, au niveau de la bande enherbée, près du site St Joseph, et ne permettent donc pas une spatialisation de l'étude pour la détermination de la morphologie de la répartition de l'eau dans le sous-sol (présence d'une nappe d'accompagnement, de nappes perchées ou poches d'eau, etc.). Ceci est très gênant pour la suite de l'étude et de la compréhension du fonctionnement du bassin versant de la Morcille.
- ✓ **Les données sur les sols :** carte réalisée en 2009 par Romain Giraud ([6] GIRAUD R., 2009) sur la partie aval du sous bassin versant de la Morcille qui a pour exutoire le site 2 « les Versauds ». Cette étude se révélera être essentielle dans la compréhension des mécanismes qui régissent les écoulements de surface et de sub-surface et les modes de transferts des

polluants par ces voies de circulation de l'eau. La caractérisation de ces sols s'est faite à l'échelle de la parcelle, ce qui semble suffisant pour l'étude qui va suivre. L'étendue de cette carte au reste du sous bassin versant est en cours de réalisation.

- ✓ **Les données sur les pratiques agricoles** : à acquérir auprès de Madame Caroline Leroux, Conseillère Viticole au CDB (Comité de Développement du Beaujolais) et auprès des viticulteurs du bassin versant de la Morcille. La rencontre avec Mme C. Leroux a permis d'avoir un bon aperçu des pratiques agricoles sur ce bassin versant. Toutefois une enquête plus poussée est en cours de réalisation au sein de l'équipe et permettra d'identifier précisément les pratiques agricoles de chaque viticulteur.
- ✓ **Quelques mesures de conductivités hydrauliques à saturation** sont également disponibles et pourront être utiles dans cette étude.

Synthèse : Le type d'informations disponibles sur le bassin versant de la Morcille est vaste et les données sont riches : données hydrologiques, données relatives à la pollution, etc. Toutefois, il est important d'être vigilant dans l'exploitation de ces données du fait des nombreuses lacunes présentes, des périodes d'études qui diffèrent et qui ne sont pas suffisamment longues pour permettre d'affirmer les résultats obtenus. L'ensemble du travail effectué ne peut donc être qu'envisager sous un angle hypothétique. Toute analyse de données reste délicate et nécessite un esprit critique vis-à-vis des résultats afin d'éviter toute fausse orientation dans les recherches.

On note en particulier que le manque de données (cartes et autres informations) sur le sous-sol, l'hydrogéologie, la géophysique et la géochimie risque de constituer un frein dans l'étude du fonctionnement général du bassin versant de la Morcille.

De même, par exemple, il aurait été intéressant d'avoir des données sur les concentrations des produits phytosanitaires et des métaux dans les MES afin d'avoir une vision complète de la pollution qui transite dans la rivière, à la fois sous forme dissoute et sous forme particulaire. Une étude à ce sujet est d'ailleurs en cours de réalisation.

2-4. Présentation de l'ensemble des études et des thèses réalisées

En parallèle de l'étape précédente, la partie qui suit a consisté à rassembler et à s'imprégner de l'ensemble des études opérationnelles ou de recherche déjà réalisées sur ce bassin versant ou pouvant aider à l'interprétation des données mises à disposition.

Un document a été rédigé à cet effet et mis à disposition des équipes de recherche intéressées afin de faire la synthèse des connaissances disponibles sur ce bassin versant. Ce travail constitue une étape préalable qui permettra de répondre au premier objectif fixé qui est de regrouper et recouper les résultats obtenus suite à ces études afin de leur donner un sens général, notamment concernant le fonctionnement global du bassin-versant au regard des transferts de pesticides et de métaux. En effet, pour l'instant, les données n'ont fait l'objet que d'une interprétation thématique pour quantifier, par exemple, les concentrations et flux exportés d'une classe de contaminant. Un tri a été fait dans tous ces résultats selon que leur interprétation est plus ou moins subjective et reste donc plus ou moins à l'état hypothétique.

En voici quelques références :

a) Ce qui est avéré :

✓ ***Une pollution aggravée par différents facteurs :***

La viticulture entraîne une forte pollution de la Morcille en pesticides et métaux. Cette pollution est accentuée durant les épisodes de crues : les flux de polluants sont parfois du même ordre de grandeur, voire parfois supérieurs, à ceux estimés sur une période mensuelle. Lors de crues, on observe également des pics de MES. On note ici l'importance des conditions hydrologiques (crue ou débit de base, ruissellement hortonien ou non), des conditions initiales (quantité d'intrant, période d'application, lieu de stockage de la substance active : en surface, en sub-surface, dans la nappe) dans le comportement des contaminants, c'est-à-dire dans l'évolution spatio-temporelle de leurs concentrations dans le cours d'eau. (**Source** : [2] : Rabiet M., Margoum C., Gouy V., Carlier N., Coquery M., 2006)

Les aménagements hydrauliques anthropiques de lutte contre l'érosion (réseau de fossés) sont des facteurs aggravants de la pollution. En effet, la nature du sol, les fortes pentes des parcelles et la grande intensité des pluies printanières et estivales entraînent une érosion marquée dans les terres agricoles et la formation de ravines (concentration du ruissellement au même endroit et potentielle constitution d'un réseau de « tranchées » qui peut rejoindre le réseau hydrographique). On rappelle que, pour lutter contre cette érosion, des aménagements ont été mis en place dont un réseau dense de fossés, créant ainsi des voies directes et rapides de transfert de l'eau de la parcelle jusqu'à la rivière. Une étude a alors permis de distinguer deux types de réseaux : ceux débouchant directement sur la Morcille, très impactants, et ceux débouchant sur des zones « tampons » (bosquets, prairies, etc.), à risque moins élevé. (**Source** : [1] : Gouy V., 2001)

✓ ***Des solutions possibles pour améliorer la qualité de l'eau :***

Une étude a montré que, dans le cadre de la DCE, les objectifs d'atteinte du bon état écologique ne sont pas irréalistes, même dans les zones de cultures intensives. Par exemple, la mise en place d'actions correctives (restauration de zones tampons, mise en place de bandes enherbées, diminution des intrants, etc.) améliore la qualité générale de l'eau de la rivière. (**Source** : [3] : Gouy V., Nivon C., 2001-2006)

Parmi ces actions correctives mises en place, les bandes enherbées, sous certaines conditions climatique, hydrologique et géologique, peuvent se révéler être un bon moyen d'intercepter les ruissellements de surfaces contaminés. Le bassin versant de la Morcille a fait l'objet d'une expérimentation sur la dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées et est donc doté d'une bande enherbée expérimentale. La capacité de la zone tampon enherbée expérimentale à intercepter un ruissellement de surface peut être très élevée. Toutefois, la capacité réelle d'infiltration d'un sol enherbé peut être affectée par d'autres paramètres de type climatique, hydrologique et géologique (profondeur du substratum, présence d'une zone saturée ou d'un horizon peu perméable, concentration des écoulements, etc.). Des précautions doivent donc être prises et une étude de site ainsi que le dimensionnement d'un tel espace semblent indispensables pour une meilleure efficacité. (**Source** : [5] : Lacas J. G., 2005)

b) Ce qu'il reste à vérifier/démontrer :

L'ensemble des résultats qui suivent a été prouvé sur des petits bassins versants dans la Manche, reste à voir si ces comportements se vérifient sur le bassin versant de la Morcille. Ainsi, sur ces bassins versants étudiés, la mobilisation des particules lors des crues peut se produire de différentes façons générant dans la plupart des cas des courbes $[MES]=f(Q)$ de type univoque ou présentant une hystérésis horaire. La disponibilité en particules est grande, et seules les crues intenses, en ce qui concerne la durée de la crue, le débit maximum, l'intensité de la pluie, sont capables d'exporter suffisamment de particules pour réduire cette disponibilité : ces crues sont associées à une relation concentration en MES-débit présentant une hystérésis horaire. Lors des événements moins intenses, la disponibilité en particules n'est pas limitante et les crues présentent un profil univoque. L'étude de ces courbes est importante puisque la pollution serait aggravée, notamment en périodes de crues, par la dynamique de concentration en MES (Matières En Suspension) dû au phénomène d'adsorption des polluants sur les particules. (**Source** : [14] : Lefrançois Julie, 2007)

Après avoir mis en évidence la saisonnalité hydrologique du bassin versant de la Morcille, un stagiaire de l'équipe Poll.Diff. a procédé à la détermination d'un modèle de bassin en 3 réservoirs : la nappe en profondeur, les écoulements de sub-surface et le ruissellement de surface. Le modèle apparaît quelque peu simple aujourd'hui au vue de la complexité du bassin et de la quantité de facteurs intervenant dans les écoulements jusqu'à la Morcille, notamment concernant les dynamiques de concentration des MES, des produits phytosanitaires et des métaux. (**Source** : [4] : Taillandier P., 2007-2008)

La provenance de certains métaux reste incertaine du fait du manque d'informations quant à la géochimie du bassin versant de la Morcille. Ainsi, par exemple, on ne sait pas si les concentrations en arsenic relevées dans l'eau de la Morcille et de la nappe sont dues à la présence d'un fond géochimique ou si elles sont liées à un effet de rémanence de la substance dans le sol dû à son ancienne utilisation pour la viticulture (on rappelle que l'utilisation de l'arsenic pour la viticulture est interdite depuis 2001).

Synthèse : l'exposé des résultats précédent sur le bassin versant de la Morcille n'est évidemment pas exhaustif même s'il donne déjà un aperçu des différents problèmes et sujets traités.

Le présent rapport tentera de répondre à certaines questions encore en suspens, et de confirmer ou d'infirmer certaines tendances ou comportements déjà évoqué(e)s. Ce travail, dont le but est de donner un sens général à toutes ces informations pour dresser le fonctionnement global du bassin-versant au regard des transferts de pesticides et de métaux, posera également d'autres problèmes et mènera le lecteur à se poser d'autres questions.

3. Interprétation des données et identification de phénomènes nouveaux ou déjà évoqués

3-1. Saisonnalité du bassin versant de la Morcille : exploitation et interprétation des données hydrologiques

Le bassin versant de la Morcille, comme beaucoup de bassins versants en France, présente une saisonnalité notamment au regard de ses données hydrologiques. C'est ce qui va être mis en évidence dans cette partie en étudiant les paramètres suivants :

- l'EvapoTranspiration Potentielle (ETP),
- la pluie,
- le débit.

A partir de ces données, on établira également le bilan hydrologique de ce bassin afin de déterminer la variation de la quantité d'eau disponible (ressource) dans le sol et le sous-sol.

a) Exploitation des données de pluie (1992-2009) et d'ETP (2002-2007) :

➤ La pluie brute (1992-2009) :

De 1992 à 2009, la pluviométrie moyenne annuelle relevée est environ de 860 mm. Néanmoins, ce résultat est à nuancer puisqu'il ne s'agit que d'une moyenne et que beaucoup d'années en sont parfois éloignées, du fait peut-être de leur caractère exceptionnel ou d'une évolution générale du climat, ceci étant difficile à discerner sur une si courte période (18 ans).

Toutefois, on constate que les pluviométries des années 1994, 1996, 2000 et 2002 se rapprochent de cette moyenne avec une différence inférieure à 100 mm, soit une différence de moins de 11,6 %. Au contraire, l'année 1997 apparaît comme exceptionnelle avec une différence à la moyenne de 30 %. En effet, sa pluviométrie est particulièrement basse avec un cumul annuel de 604 mm. L'année 2008 peut également être qualifiée d'exceptionnelle puisqu'elle atteint le cumul maximum de hauteur d'eau sur la période étudiée qui est de 1060,6 mm, soit 23,1 % de différence.

(voir histogramme en annexe 5)

Une année type sur le bassin versant de la Morcille pourrait se caractériser par :

- ✓ une faible pluviométrie en sortie de l'hiver (février et mars),
- ✓ une augmentation de celle-ci au printemps,
- ✓ une chute de la pluviométrie en début d'été,
- ✓ suivi d'un pic en plein été (mois d'août), probablement dû aux nombreux orages caractéristiques de la région,
- ✓ une ré-augmentation à l'automne où la pluviométrie atteint son maximum,

une re-diminution à l'entrée de l'hiver.

(voir histogramme ci-dessous)

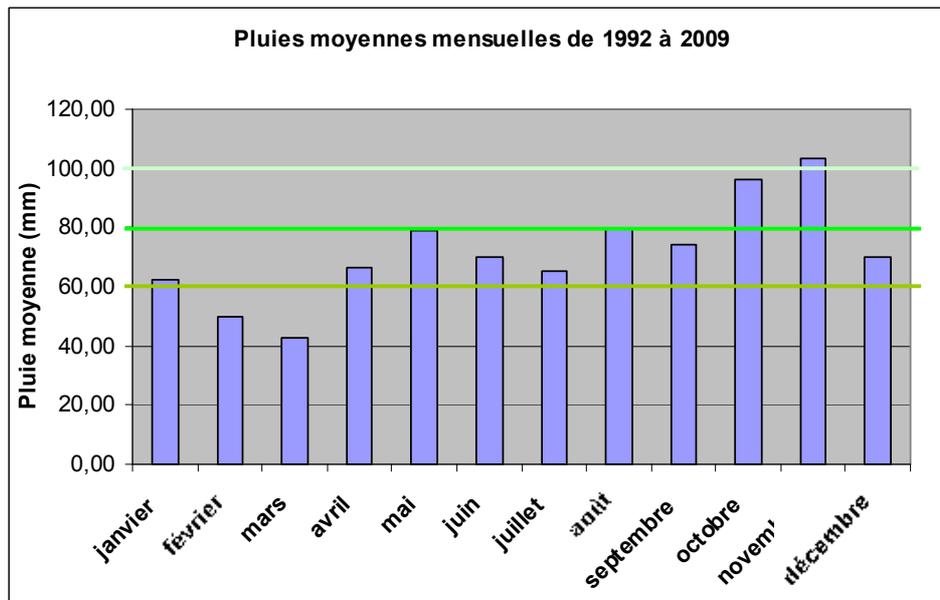


Figure 3 : Histogramme des moyennes de pluie brute mensuelles

Pour ce paramètre, on va donc distinguer 3 « saisons » en terme de cumul de hauteur d'eau :

- les pluies mensuelles dites « faibles » (<60 mm) : en février et mars ;
- les pluies mensuelles dites « moyennes » (comprises entre 60 et 80 mm) : de avril à septembre, et de décembre à janvier ;
- les pluies mensuelles dites « élevées » (environ égales à 100 mm) : en octobre et novembre.

➤ **L'EvapoTranspiration Potentielle (ETP) (2002-2007) :**

Pour chaque année, entre 2002 et 2007, un cumul mensuel a été réalisé sur les données d'ETP (Evapotranspiration Potentielle). L'ensemble des données mensuelles obtenues sur les différentes années a ensuite été moyenné afin d'obtenir le graphique suivant, présentant les ETP moyennes mensuelles :

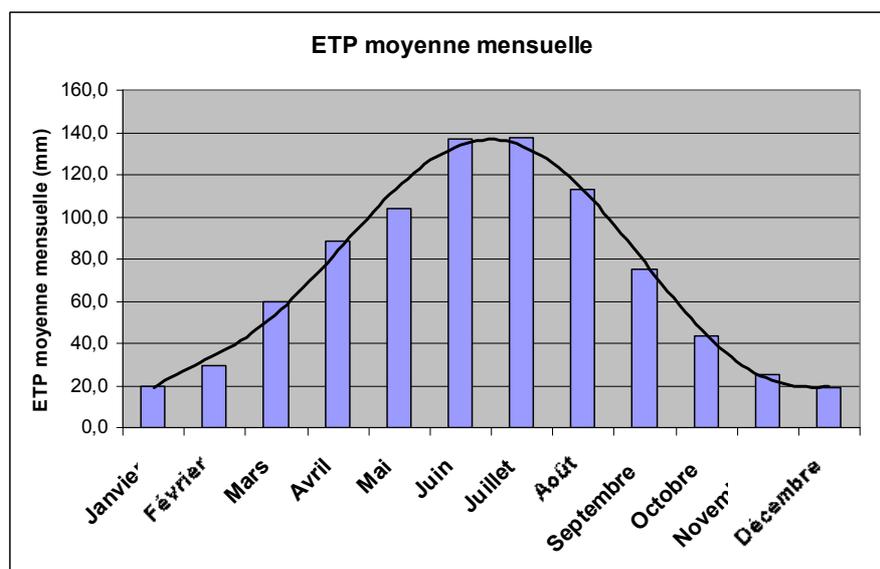


Figure 4 : Courbe d'évolution de l'ETP moyenne mensuelle

(voir tableau des résultats sur chaque année en annexe 6)

On remarque ici que la courbe obtenue est quasiment symétrique et présente un maximum pour les mois de Juin et Juillet, en été. Au contraire, le minimum est atteint en hiver, durant les mois de Décembre et Janvier. Les résultats obtenus sont très cohérents.

➤ **La pluie nette (2002-2007) : bilan Pluie Brute – ETP :**

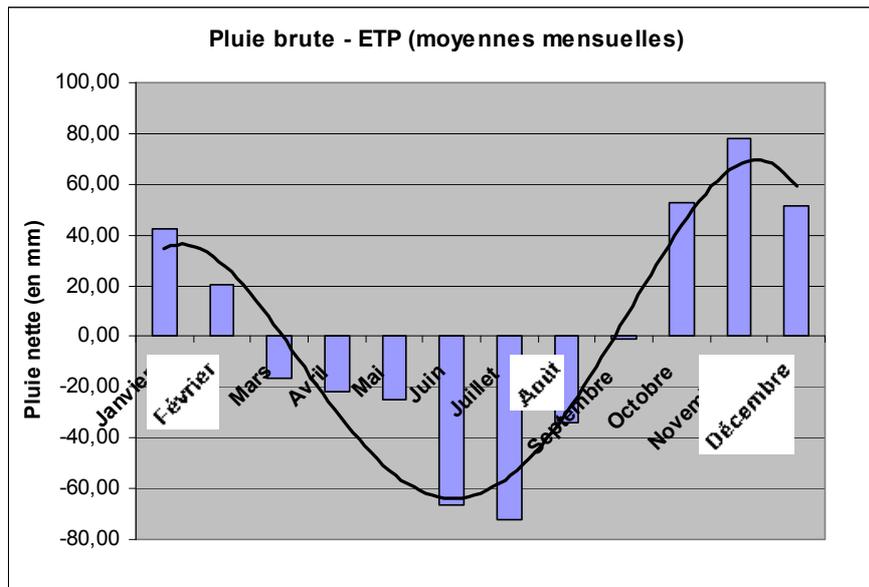


Figure 5 : Courbe d'évolution de la pluie nette moyenne mensuelle

En considérant les données de pluie réellement disponible ou pluie nette (ETP soustraite à la Pluie Brute), on distingue deux saisons majeures :

- bilan (Pluie Brute - ETP) positif : de octobre à février ;
- bilan (Pluie Brute - ETP) négatif : de mars à septembre.

b) Exploitation des données de débit (2002-2009) :

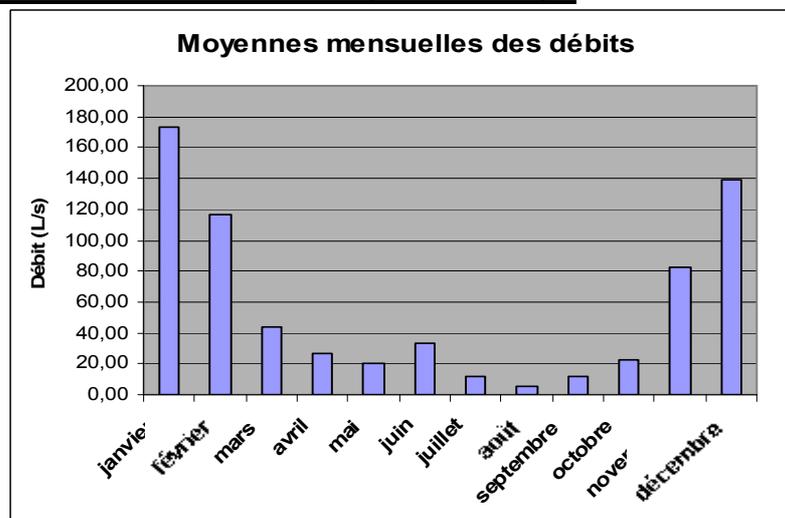


Figure 6 : Histogramme des débits mensuels moyens

Remarque : Lorsque l'on détaille les résultats obtenus pour chaque mois selon les différentes années étudiées, on constate que certains mois, comme celui de Août sont vraiment caractérisés par un certain type de débit (faible, ici, pour le mois d'Août, ne dépassant pas 14 L/s). A l'inverse, selon les années, certains mois présentent des comportements complètement différents. Ainsi, par exemple, le mois de Novembre (*voir histogramme en annexe 7*) a connu de forts débits en 2002 et 2008 (supérieurs à 100 L/s) mais aussi de faibles débits en 2006 et 2009 (inférieurs à 20 L/s). Ainsi, les débits mensuels moyennés sur plusieurs années permettent d'avoir un point de vue d'ensemble des éventuelles saisonnalités de fonctionnement du bassin versant de la Morcille mais il ne faut pas négliger les possibles variations inter annuelles qui peuvent changer alors le raisonnement global.

Concernant le débit, on peut envisager un découpage de l'année en deux « saisons » :

- les débits « faibles » (le débit est inférieur ou égal à 40 L/s environ) : de mars à octobre,
- les débits « élevés » (le débit est compris entre 80 et 170 L/s) : de novembre à février.

c) Bilan hydrologique : variation du volume d'eau dans le sol et le sous-sol :

L'idée est de dresser un bilan annuel sur les volumes de pluie tombés et sur les volumes qui ont transité dans la rivière ou, de façon plus générale, de procéder à un bilan hydrologique. La comparaison de ces deux grandeurs permet de voir, à l'échelle de l'année, si les réserves en eau du sol et du sous-sol se sont vidées ou, au contraire, si elles se sont remplies. L'étape suivante est d'en déduire un éventuel comportement saisonnier du remplissage ou non de ces réserves.

On rappelle le point suivant :

Pour le bilan hydrologique, on a l'équation suivante, valable à l'échelle du bassin versant, qui, on le rappelle, se limite à une superficie de 4,8 km² jusqu'au site « les Versauds » :

$$\mathbf{P = Q + ETR + DR}$$

- P** correspond à la pluie tombée sur le bassin versant
- Q** correspond au débit écoulé dans la Morcille
- ETR** correspond à l'évapotranspiration réelle
- DR** correspond à la variation des réserves en eau du sol et du sous-sol

Remarque : On note que les variations de réserve peuvent être également négatives et contribuer aux écoulements et/ou à l'évapotranspiration.

L'étude a été réalisée de 2002 à 2009. Pour chaque mois de chaque année, lorsque les données le permettaient, un bilan hydrologique a été réalisé grâce aux données de pluie, de débit et d'ETP. Il a ainsi été possible de représenter, sur une année « type » (valeurs moyennées des différentes années étudiées) la variation des volumes disponibles pour la recharge en eau des réservoirs du sol et du sous-sol (dans le cas des volumes positifs) ou la variation des volumes de ces réserves qui ont contribué à l'évapotranspiration et/ou à l'alimentation en débit de la rivière.

Deux cas sont à considérer :

- le premier cas pour lequel toute l'ETP est satisfaite tout au long de l'année,
- et le deuxième cas pour lequel on imagine qu'aucune évaporation n'est possible à partir des réserves en eau du sol puisqu'on suppose qu'elles sont vides. Cela revient à dire que lorsque la valeur d'ETP mensuelle moyenne est supérieure à la valeur de pluie brute mensuelle moyenne, on considère le bilan (Pluie – ETP) égal à 0.

Le bilan mensuel réel de variation de volumes en eau du sol est alors contenu entre les deux enveloppes extrêmes représentées ci-dessous (« ETP non satisfaite » et « ETP satisfaite »).

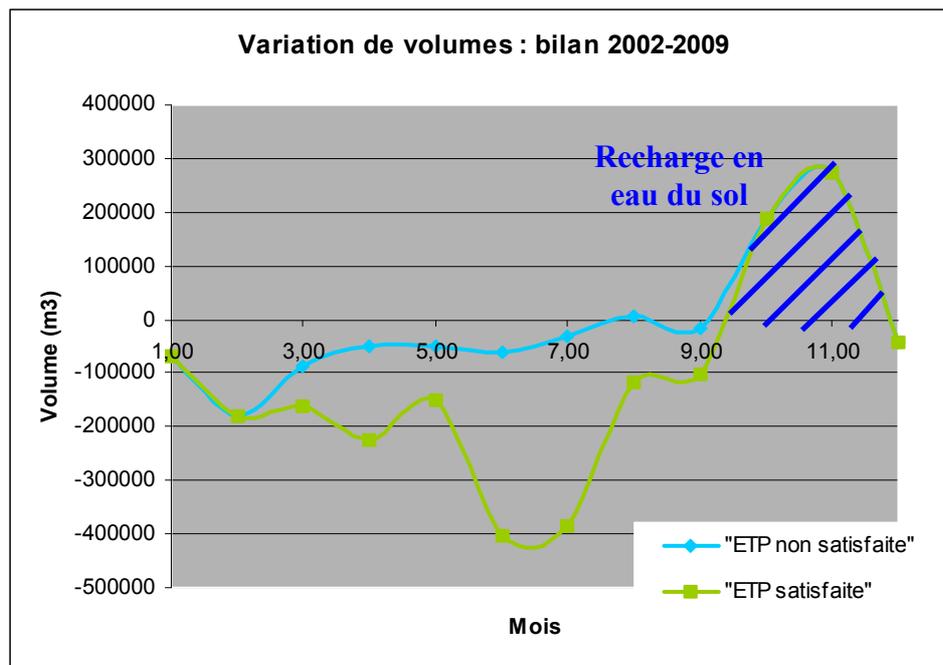


Figure 7 : Estimation du bilan mensuel réel de la variation de la ressource en eau du sol et du sous-sol

On remarque une certaine saisonnalité quant au comportement de la recharge ou de la « décharge » de ces réservoirs d'eau du sol ou du sous-sol. Ainsi, il semblerait que, de septembre à décembre, les réservoirs d'eau soient rechargés par les eaux de pluie alors que de janvier à août, au contraire, ces réservoirs permettent de contribuer à l'évapotranspiration et/ou de contribuer aux différents écoulements notamment dans la Morcille. On note que la contribution de ces réservoirs est très forte durant les mois de juin et juillet, mois durant lesquels l'évapotranspiration atteint son maximum et où les débits dans la Morcille sont faibles, voire très faibles.

Concernant la recharge en eau du sol, on peut donc distinguer deux « saisons » :

- de septembre à décembre : on a un bilan positif en terme de volume d'eau stocké dans le sol : celui-ci se recharge ou est chargé en eau et la nappe également,
- de janvier à août : le bilan hydrologique est négatif, ce qui signifie que le stock en eau du sol et/ou de la nappe diminue ou est vide.

d) Synthèse :

On a trouvé un découpage de l'année en différentes saisons selon les 3 variables :

- la pluie nette,
- le débit de la Morcille,
- et la variation de la ressource en eau du sol et du sous-sol.

L'objectif est maintenant de trouver un certain découpage de l'année en différentes « saisons » ou périodes respectant la variabilité de l'ensemble de ces paramètres. On résume les données précédentes sur le schéma ci-dessous :

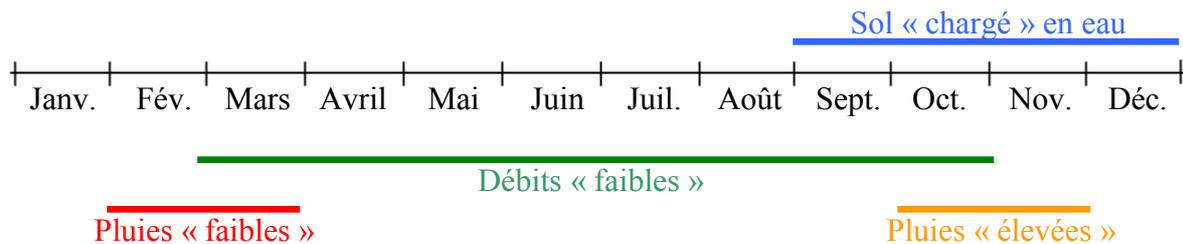


Figure 8 : Schéma synthétisant la saisonnalité des paramètres hydrologiques

Résultat :

Finalement, on retiendra les 4 « saisons » suivantes :

- **De Janvier à Février** : pluie faible à moyenne, la nappe se vide, débit élevé
- **De Mars à Juillet** : pluie faible à moyenne, la nappe se vide, débit faible
- **De Août à Septembre** : pluie faible à moyenne, début du remplissage de la nappe, débit faible
- **De Octobre à Décembre** : pluie moyenne à élevée, nappe rechargée, débit élevé

3-2. Exploitation et interprétation des données disponibles relatives à la qualité de l'eau (MES, produits phytosanitaires, métaux, etc.)

Maintenant que les données hydrologiques ont été étudiées, il reste à analyser les autres données du bassin versant de la Morcille, en lien avec la composition de l'eau et sa qualité.

Les données qui suivent vont donc permettre de dresser un bilan de la pollution retrouvée dans l'eau de la Morcille et du sous-sol en période normale et surtout en période de crue. En effet, comme ceci a déjà été prouvé dans de nombreuses études (par exemple : [2] : RABIET M., MARGOUM C., GOUY V., CARLUER N., COQUERY M., 2006), en général, les épisodes de crues sont caractérisés par des pics de concentrations records en pollution et également par des pics de MES (Matières En Suspension).

Les données utilisées seront les suivantes :

- la chimie générale de l'eau de la Morcille et du sous-sol (puits) ;
- le comportement de la concentration des MES dans l'eau, leur étude étant très importante puisqu'elle nous renseigne sur la dynamique du bassin versant et puisque, mais ceci reste encore à être prouvé, la pollution serait adsorbée sur celles-ci et ainsi encore mieux véhiculée dans l'eau ;
- les concentrations des produits phytosanitaires dans l'eau de la Morcille et du sous-sol (puits) ;
- les concentrations des métaux dans l'eau de la Morcille et du sous-sol (puits).

Enfin, pour une meilleure interprétation de ces données et une meilleure compréhension de l'origine des polluants, on utilisera les données suivantes :

- les données sur les pratiques agricoles des viticulteurs du bassin versant de la Morcille (dates d'application, types d'intrants, etc.).

a) La chimie générale de l'eau

A l'issue de cette étude, les paramètres qui ont été jugés importants (par l'équipe et par **Monsieur Paul Le Pimpec**, chimiste au Cemagref) pour la compréhension du suivi du bassin versant de la Morcille en terme de chimie générale sont les suivants : **conductivité, pH, K⁺, COD, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, MES et Cl⁻**.

Voici la signification des paramètres dont le suivi a été jugé utile :

- Il est très important de contrôler la **conductivité** de l'eau puisqu'elle permet de mesurer l'ensemble des minéraux (sels dissous) présents et de révéler ainsi leur comportement.
- Le **pH** permet de vérifier la neutralité de l'eau. Sur le bassin versant de la Morcille, l'eau est en général neutre voire un petit peu acide, caractéristique du socle cristallin.
- Le **Potassium K⁺** est un indicateur de la pollution d'origine végétale donc signe d'une pollution viticole ou vinicole (caves, etc.).
- Le **Carbone Organique Dissous (COD)** révèle la qualité de l'eau du point de vue de la charge en matière organique.

- L'ammonium NH_4^+ , les nitrites NO_2^- , les nitrates NO_3^- et les phosphates PO_4^{3-} , au-delà d'une certaine limite de concentration, sont des indicateurs de pollutions divers (pollution d'origine humaine par les eaux résiduaires, pollution d'origine agricole).
- L'étude de la concentration en **MES** permet de comprendre le fonctionnement du bassin en terme de dynamique de transfert de celles-ci, surtout en période de crue.
- Les **chlorures** sont un traceur hydraulique permettant de repérer les phénomènes de dilution par les pluies.

Sont ressorties de cette étude les conclusions suivantes :

Le bassin versant de la Morcille est constamment pollué par les **orthophosphates** PO_4^{3-} , présents dans les rejets d'eaux usées, principalement à l'aval (aux Versauds et à St Ennemond) pour la rivière et sur tous les sites, en plus grande concentration, pour le sous-sol : les concentrations dépassent systématiquement la valeur seuil de 0.30 mg/L. Cette pollution est accentuée dans la Morcille en période de crue ou au contraire en période de sécheresse. *(Voir graphique et tableau en annexe 8)*

La Morcille présente une pollution d'origine viticole par les végétaux en période de crue dans la rivière avec une augmentation significative de la concentration en **Potassium** K^+ .

Une pollution en **ammonium** NH_4^+ est ressentie durant certains épisodes de crues sur tout le bassin, dans la Morcille. Elle est également ressentie à l'aval du bassin lorsque les débits d'eau sont faibles et qu'une accumulation de pollution liée aux rejets en assainissement individuel se produit. Sinon, le restant de l'année, sa concentration reste inférieure à la valeur seuil de 0.30 mg/L.

Globalement, on peut dire que le bassin versant de la Morcille n'est pas sujet aux pollutions dues **aux nitrites** NO_2^- . Toutefois, l'accent doit être mis sur le fait que des pollutions peuvent être tout de même occasionnées lors d'une baisse notable du niveau des eaux de surface ou lors de la présence de biofilm due aux vendanges.

On a une élévation anormale de la **conductivité** dans l'eau du sous-sol sur les sites St Joseph et St Ennemond pouvant être due à un changement de fond géochimique mais aussi à une pollution d'origine anthropique liée au salage des routes (ions **chlorures** et ions **sodium**) et au lessivage de celles-ci par la pluie.

Les **MES** doivent toujours être suivies puisque leur concentration augmente considérablement en période de crue, ce qui pourrait entraîner un accroissement des transferts de polluants.

Synthèse et critique : En conclusion de cette étude, on note que les pollutions viticole et vinicole sont à surveiller, notamment par le biais des indicateurs chimiques, surtout en période de crue. D'autre part, il est également impératif de surveiller les paramètres chimiques révélateurs d'une pollution liée aux rejets résiduaires dans la rivière (NH_4^+ et PO_4^{3-}). En effet, on soupçonne le fait que les rejets en assainissement, qui se font directement dans la rivière, soient à l'origine d'une pollution dans la Morcille. Une étude complémentaire doit être réalisée à ce sujet (quantification journalière et nature des rejets dans la rivière, etc.). On constate systématiquement pour tous les paramètres étudiés un gradient amont/aval de leur concentration qui est en cohérence avec une intensification de la viticulture et une densification de l'habitat dans ce sens.

Les résultats obtenus quant à l'eau du sous-sol donnent quelques indications mais restent difficiles à interpréter car ils se basent sur un nombre de données insuffisant (4 à 5 prélèvements en 2008 et 2009). Pour mieux comprendre et interpréter l'ensemble de ces résultats, il faudrait avoir une meilleure connaissance de la nappe et de sa morphologie ainsi que de la composition géochimique du bassin. En effet, ceci permettrait de lever certaines incertitudes quant à l'origine des pollutions relevées, notamment concernant l'élévation de la conductivité liée aux ions chlorures et sodium.

b) Le comportement des MES dans l'eau

L'idée dans cette partie est de procéder à la même réflexion que Julie Lefrançois dans sa thèse consacrée à l'analyse des hystérésis formées par les courbes $[MES]=f(Q)$ en période de crues sur des petits bassins versants dans la Manche ([14] LEFRANCOIS Julie, 2007), mais appliquée au bassin versant de la Morcille. On note que d'autres formes de courbes, moins courantes, existent comme la courbe univoque, la forme en huit, etc.

L'étude des courbes $[MES]=f(Q)$ en période de crues sur le bassin versant de la Morcille va donc nous permettre d'expliquer en partie les origines de ces Matières En Suspension (MES) : en provenance du ruissellement, déjà disponibles dans la rivière, par érosion des berges, par remise en suspension des sédiments, etc. Ce travail est capital pour l'analyse des transferts de polluants puisqu'ils sont susceptibles d'être adsorbés sur ces particules et véhiculés par celles-ci. Sur les 7 événements de crues étudiés, pour lesquels les données de MES sont disponibles, on distingue 2 types de courbes $[MES]=f(Q)$:

➤ **Les courbes ayant une forme en « 8 », soit 1 courbe sur 7 :**

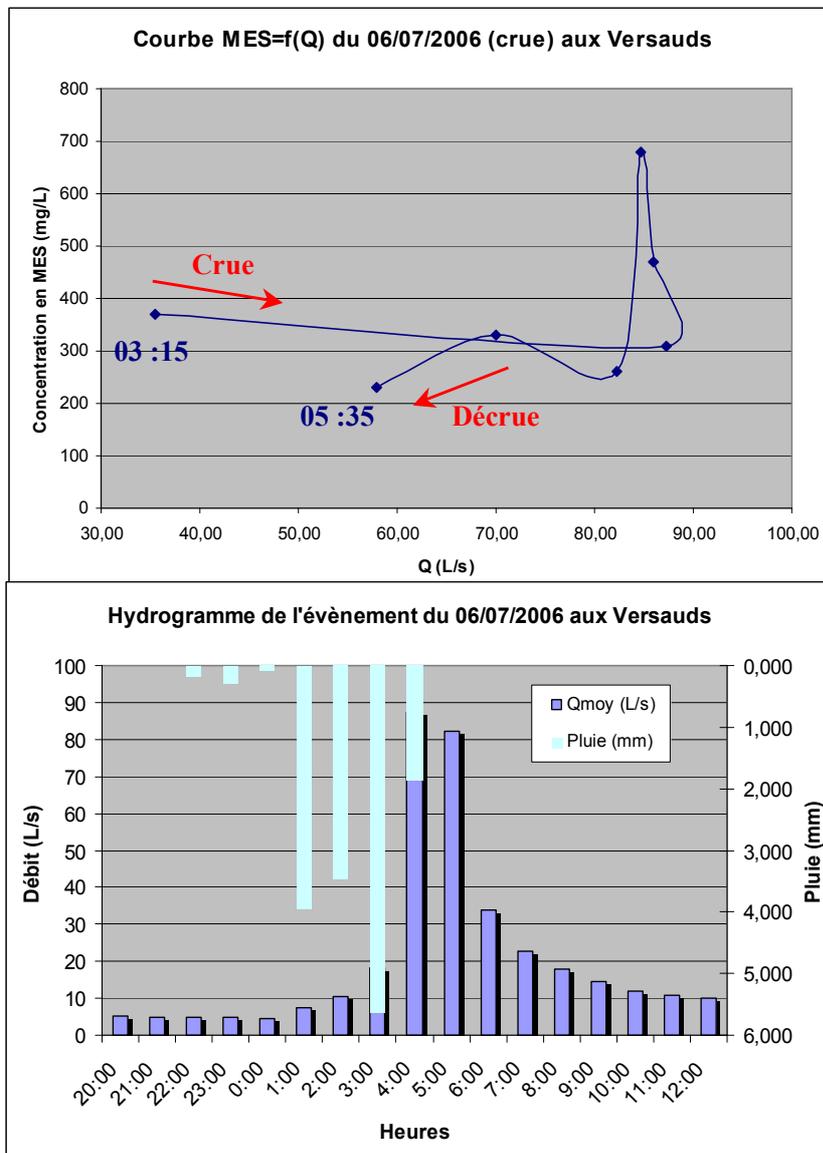


Figure 9 : Hydrogramme d'une crue (06/07/06) présentant une courbe $[MES]=f(Q)$ en "8"

Cette courbe est quelque peu particulière et aurait plutôt une forme en huit.

Ici, on suppose que les particules du lit de la rivière ne sont pas en quantité suffisante en début de crue et on a donc un effet de dilution, d'où cette diminution de concentration en MES.

Le pic de MES se produit peu après le pic de débit, ce qui laisse à penser que de nouvelles particules ont été apportées, probablement par érosion (ceci étant lié à l'intensité de la pluie et du débit) ou par une reprise de sédiments (à justifier selon la granulométrie).

On peut également penser au fait que la provenance des particules peut être lointaine, d'où un certain temps de réponse.

➤ Les courbes présentant une hystérésis horaire ou dextre (4 courbes sur 7) :

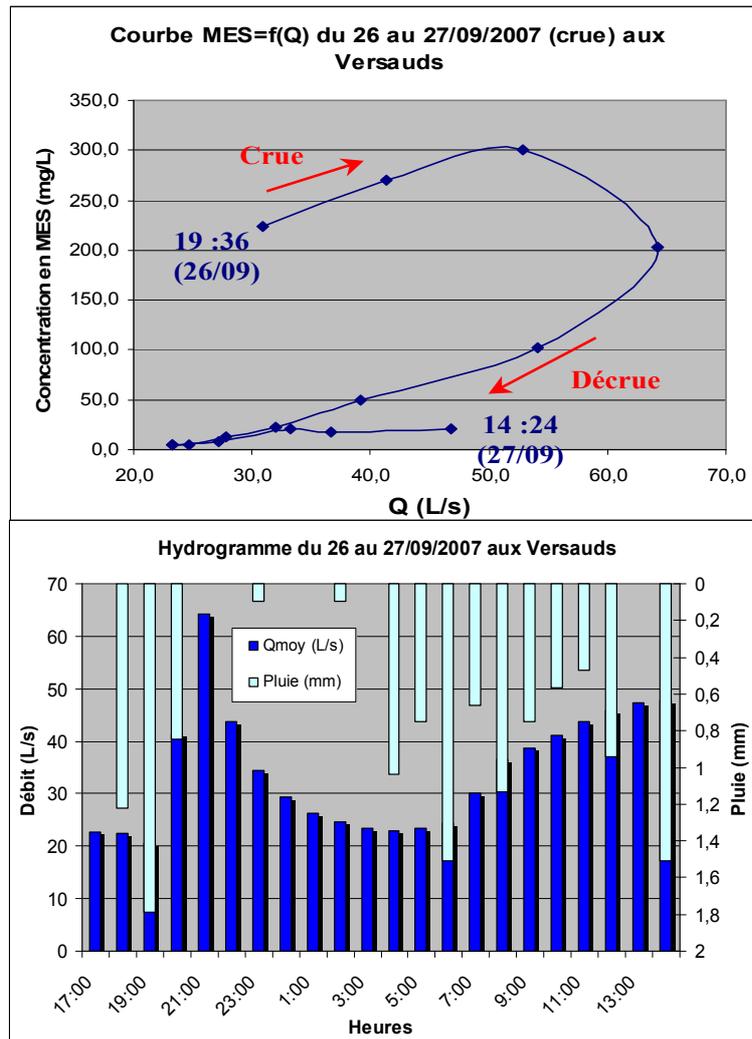


Figure 10 : Hydrogramme d'une crue (27/09/07) présentant une courbe $[MES]=f(Q)$ en hystérésis horaire

➤ Origine(s) des différences de forme de courbes :

On note que cette différence de comportement des courbes est sûrement liée en premier lieu aux conditions initiales du bassin (stock en particules, etc.) mais également à l'intensité de la pluie et du débit. Une réflexion menée sur les 7 événements considérés semble montrer qu'une courbe en forme de huit serait plus caractéristique d'une pluie avec une forte intensité et un stock initial en particules important alors qu'au contraire, une courbe à hystérésis horaire serait caractéristique d'une pluie de plus faible intensité avec un stock initial en particules appauvri par les événements précédents. (voir tableau en annexe 9)

Synthèse : Les résultats obtenus, peu nombreux (manque de données), ne permettent pas d'envisager une conclusion ferme et définitive quant au comportement en hystérésis des courbes $[MES]=f(Q)$. Néanmoins, ceci nous permet déjà d'avancer quelques hypothèses quant à un potentiel type de fonctionnement de ce bassin versant. La plupart des résultats, sous forme de courbe à hystérésis horaire, a montré que le stock de particules n'est pas suffisamment grand pour empêcher une diminution de la concentration en MES lors de crues. Un autre comportement a été mis en évidence (courbe en huit), laissant présumer la mise en jeu de particules provenant de zones plus éloignées. Dans une optique plus générale et au regard des transferts de polluants par adsorption sur les MES, il serait intéressant de mieux étudier le comportement des MES dans le temps et dans l'espace (sédimentation, etc.) et leur faculté d'adsorption des polluants selon leur taille, leur composition, etc.

c) Les produits phytosanitaires dans l'eau et pratiques culturales des viticulteurs

Les produits phytosanitaires (ou pesticides) sont couramment utilisés en viticulture car ils servent à traiter les principales maladies suivantes : Mildiou (champignon parasite), Oïdium (champignon) et Botrytis ou Pourriture grise (pourriture généralisée des grains). Sur le bassin versant de la Morcille, les principaux pesticides utilisés, ou les plus fréquemment utilisés, sont : le tébuconazole et l'azoxystrobine contre l'oïdium ; le cuivre et l'azoxystrobine contre le mildiou ; la procymidone et le diméthomorphe contre le botrytis ; le glyphosate comme herbicide (il s'agissait du diuron, avant son interdiction fin 2008).

Suite à la rencontre avec Madame Caroline Leroux du CDB (Comité de Développement du Beaujolais), on a confirmé les périodes de l'année durant lesquelles sont appliqués :

- ✓ les herbicides : de Mars à Mai. Les herbicides peuvent être ensuite appliqués de manière plus ponctuelle lorsque des mauvaises herbes apparaissent localement (exemple : utilisation du Glyphosate en été).
- ✓ les fongicides : de Mai à Juin/Juillet
- ✓ les insecticides : en Mai (1 application), puis en Juillet (2 applications) pour les tordeuses de la grappe (première et deuxième génération).

Globalement, on constate que la période à risque durant laquelle est appliqué l'ensemble des produits phytosanitaires s'étend de Mars à Juillet, mois durant lesquels la pluviométrie est moyenne (40 à 80 mm) mais durant lesquels il peut y avoir de violents épisodes pluvieux (orages). Le débit est, quant à lui, plutôt faible en moyenne, ce qui peut favoriser les phénomènes de concentrations de polluants dans l'eau de la Morcille. Ceci se retrouve d'ailleurs dans les analyses effectuées dont on expose les résultats ci-dessous.

Au site 1 « St Joseph », situé le plus à l'amont du bassin, on retrouve très peu de produits phytosanitaires dont les concentrations sont, pour la plupart, soit inférieures à la limite de quantification (LQ), soit non détectées (ND). Ceci paraît logique puisque, étant à l'amont du bassin versant, celui-ci ne subit encore pas, ou très peu, de pressions liées à la viticulture.

La période dite « à risque » pour le bassin versant de la Morcille, s'étendant de Mars à Juillet, on constate à cette période une augmentation de la concentration en produits phytosanitaires dans l'eau de la Morcille sur les sites 2 « les Versauds » et 3 « St Ennemond », comme le montrent les graphiques suivants (exemple avec l'année 2007 pour un fongicide et un herbicide) :

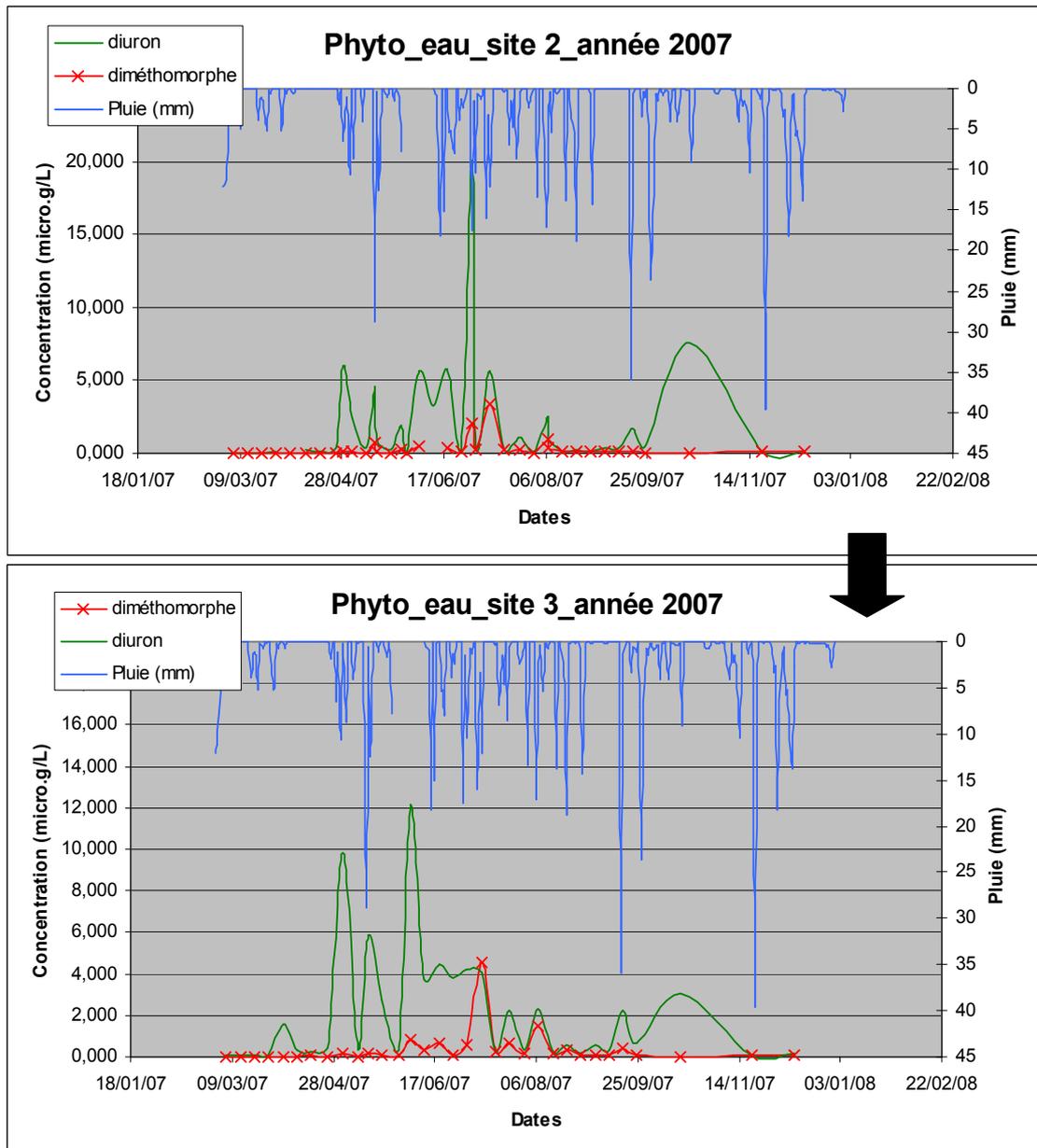


Figure 11 : Manifestation de la pollution en produits phytosanitaires pour l'année 2007 : exemple avec un fongicide (diméthomorphe) et un herbicide (diuron)

On note que la présence de pics de concentration en produits phytosanitaires dépasse la période de Mars à Juillet, et va jusqu'à Septembre/Octobre en moyenne, ce qui peut s'expliquer par le fait, qu'après application de ces produits, une partie dite « excédentaire », c'est-à-dire non absorbée par la vigne, se retrouve adsorbée sur les agrégats du sol. En période de crue ou au cours d'épisodes de pluie, les sols sont donc lessivés et les particules du sol transportées par le ruissellement, ce qui explique la rémanence dans l'eau de la présence des produits phytosanitaires. On remarque que le début de l'augmentation significative de la concentration en produits phytosanitaires démarre bien fin Avril/début Mai (date repère sur les graphiques : 28/04), ce qui correspond au début du traitement de la vigne.

Les fortes augmentations de la concentration en pesticides dans l'eau constatées sur les graphiques précédents ont lieu durant les épisodes de crue. (*voir graphiques en annexe 10 pour un exemple*)

On distingue deux types de crues dans le comportement des produits phytosanitaires dans l'eau de la Morcille :

Au cours du premier type de crues, on remarque que les pics de concentration en MES et en produits phytosanitaires, qui coïncident, ont lieu avant le pic de débit, ce qui signifie qu'au moment où le débit atteint son maximum on observe déjà un effet de dilution pour les produits phytosanitaires.

Au cours du deuxième type de crues, les courbes en MES et en produits phytosanitaires sont similaires à celles trouvées pour le type de crues précédent. Toutefois, il semblerait que les pics en produits phytosanitaires aient lieu au même moment que les pics de débit.

Cette différence de comportement entre crues peut éventuellement s'expliquer par la mobilisation en MES au cours de cet événement :

-en effet, lorsqu'il y a plus de MES, la part en pollution sous forme particulaire, adsorbée sur les MES, prend le dessus sur la part en pollution dissoute : les courbes de concentration en produits phytosanitaires suivent donc logiquement celle en MES ;

-au contraire, lorsque la mobilisation en MES est faible, c'est la part en pollution dissoute qui prend le dessus sur la part en pollution sous forme particulaire : le temps de réponse du bassin étant très court, il semble évident que les courbes de concentration en produits phytosanitaires suivent celle du débit.

Remarque : les interprétations précédentes reposent uniquement sur des hypothèses qu'il serait judicieux, par la suite, de vérifier notamment en comparant les parts de pesticides retrouvées dissoutes dans l'eau et celles retrouvées sous forme particulaire, adsorbées sur les MES. Or, ces dernières données manquent, comme cela a déjà été évoqué au §2-4.

Même si l'on constate une pollution marquée de l'eau de la Morcille en pesticides, on note que des efforts sont faits et que l'évolution globale de l'utilisation des produits phytosanitaires (fongicides et insecticides) connaît plutôt une diminution, sauf pour l'année 2008 qui fut une année fortement frappée par le Mildiou.

(voir graphiques en annexe 11)

On note également que des produits phytosanitaires sont régulièrement interdits, les plus récents (depuis les années 2000) étant: le Diuron (13/12/2008) ; la Terbutylazine (30/06/2004) ; l'Oxadixyl (01/01/2004) ; le Norflurazon (31/12/2003) ; la Simazine (30/09/2003). Pour ces produits phytosanitaires, on note qu'ils sont encore présents dans les analyses d'eau de la rivière réalisées actuellement. En effet, le bruit de fond de certains de ces produits phytosanitaires aujourd'hui interdits, comme le Norflurazon par exemple (*voir graphique en annexe 12*), s'explique par leur rémanence liée aux propriétés de la molécule (demie-vie, valeur du K_{oc}, etc.) (*voir tableau en annexe 13*). Un gradient amont/aval de ces produits est encore constaté à ce jour, trace d'une intensification de la viticulture dans ce sens. Toutefois, on constate une diminution dans le temps, plus ou moins rapide, de leur concentration dans l'eau, signe d'un arrêt d'utilisation généralisé.

Concernant l'analyse de l'eau du sous-sol, les prélèvements se font dans des boîtes au niveau de la Bande Enherbée (BE) uniquement. De plus, les limites de quantification sont souvent trop élevées et ne permettent pas un suivi de l'évolution des concentrations en produits phytosanitaires dans la nappe. Aucun résultat n'est donc véritablement exploitable.

Synthèse : Même si l'on note une tendance générale dans le Beaujolais à la baisse de l'utilisation des produits phytosanitaires, l'eau de la Morcille reste fortement polluée par ces produits, notamment durant la période à risque (période d'application), de Mars à Juillet. La pollution est très marquée en période de crues. Un phénomène de rémanence des pesticides est également constaté. Le suivi de la concentration de ces pesticides dans l'eau du sous-sol n'étant pas suffisant, aucun phénomène spécifique ne peut être identifié.

d) Les métaux dans l'eau (phase dissoute)

On note que la présente étude est essentielle puisque tous les métaux, au-delà d'une certaine concentration seuil, présentent un caractère toxique et représentent donc un danger pour l'environnement. Les métaux étudiés sont les suivants : l'Aluminium **Al**, l'Argent **Ag**, l'Arsenic **As**, le Bore **B**, le Baryum **Ba**, le Cadmium **Cd**, le Cobalt **Co**, le Chrome **Cr**, le Cuivre **Cu**, le Fer **Fe**, le Lithium **Li**, le Nickel **Ni**, le Plomb **Pb**, le Rubidium **Rb**, le Strontium **Sr**, le Zinc **Zn**.

Les métaux suivants ont des origines anthropiques et peuvent donc témoigner de pollutions diverses :

- le chrome, le fer, le cobalt, le nickel, l'argent, le cuivre, l'arsenic et le zinc peuvent se retrouver dans les pluies et avoir ainsi une origine atmosphérique mais peuvent aussi être retrouvés dans les rejets urbains (produits ménagers) et dans le ruissellement sur chaussée.
- le cuivre et l'arsenic peuvent également avoir pour origine les activités agricoles. On sait que l'arsenic, aujourd'hui interdit depuis presque 10 ans, était utilisé dans le traitement des vignes. Il peut donc y avoir des résidus d'arsenic dans le sol.
- le zinc, constituant de certains pesticides, peut provenir aussi de l'usage de ceux-ci sur les cultures.
- le bore constitue un traceur d'eaux usées domestiques (produits ménagers). Sa concentration moyenne se situe entre 20 et 40 µg/L. Si celle-ci présente un pic supérieur à ces valeurs moyennes, on peut alors dire qu'il y a une pollution d'origine domestique.

(voir le tableau pour les valeurs seuil, PNEC ou NQE, en annexe 14)

D'autres métaux, constituants de certaines roches, comme le lithium, le rubidium, l'aluminium, le strontium, l'uranium et le baryum n'ont pas d'origine anthropique en général et constituent des traceurs géologiques.

Sont ressorties de cette étude les conclusions suivantes :

- Le bassin versant de la Morcille est constamment pollué par le **Cuivre** avec une intensification de la pollution dans l'eau du sous-sol et en période de crue dans la rivière.
- Concernant les concentrations en **Arsenic**, elles sont très élevées dans la Morcille et dans l'eau du sous-sol à partir du site 2 « les Versauds ». La pollution est fortement accentuée en période de crue.
- La pollution en **Bore**, révélatrice des rejets en eaux domestiques, n'est présente que dans l'eau du sous-sol au niveau du site 1 St Joseph. Dans la rivière, un fort gradient amont/aval est constaté pour la concentration en Bore, sans toutefois dépasser la concentration limite.
- La pollution en **Zinc**, par les pesticides ou par les rejets domestiques, est à surveiller au niveau de l'eau du sous-sol, où les concentrations peuvent parfois atteindre des valeurs records. Il semblerait que cette pollution se concentre sur les sites St Joseph et les Versauds dans l'eau du sous-sol.
- Le **Cobalt** est également un élément à surveiller puisque sa concentration révèle systématiquement une pollution de la rivière et de l'eau du sous-sol, de façon plus intense pour cette dernière, dont l'origine est liée aux rejets en eaux usées.

Pour tous ces éléments métalliques, on constate un gradient amont/aval très marqué ***(voir graphiques en annexe 15)*** de leur concentration le long du cours d'eau, dont l'origine

ne peut manifestement pas être naturelle du fait de cette évolution. Cette pollution est donc attribuable à la forte augmentation de la proportion de vigne ou de l'habitat de l'amont vers l'aval. On note toutefois que le bassin versant de la Morcille possède des fonds géochimiques en Cuivre, Arsenic, Bore, Zinc et en Cobalt, qui se traduisent par une concentration moyenne dite « ambiante » dans les eaux de surface (exemple : 0.63 µg/L pour l'arsenic et 1.45 µg/L pour le cuivre), pouvant contribuer à l'élévation des concentrations totales relevées.

D'autre part, on remarque que l'ensemble de ces pollutions est largement accentué en période de crues. On observe alors un phénomène de « concentration de la pollution » durant ces événements.

Pour chaque événement de crue, on note une différence de comportement selon les éléments métalliques durant cette période : alors que certains présentent des pics de concentration, d'autres voient leur concentration, au contraire, chuter (*voir graphiques ci-dessous : illustration avec la crue du 10/07/2007*). On peut penser que cette différence de comportement dépend à la fois des caractéristiques de l'élément et de sa provenance.

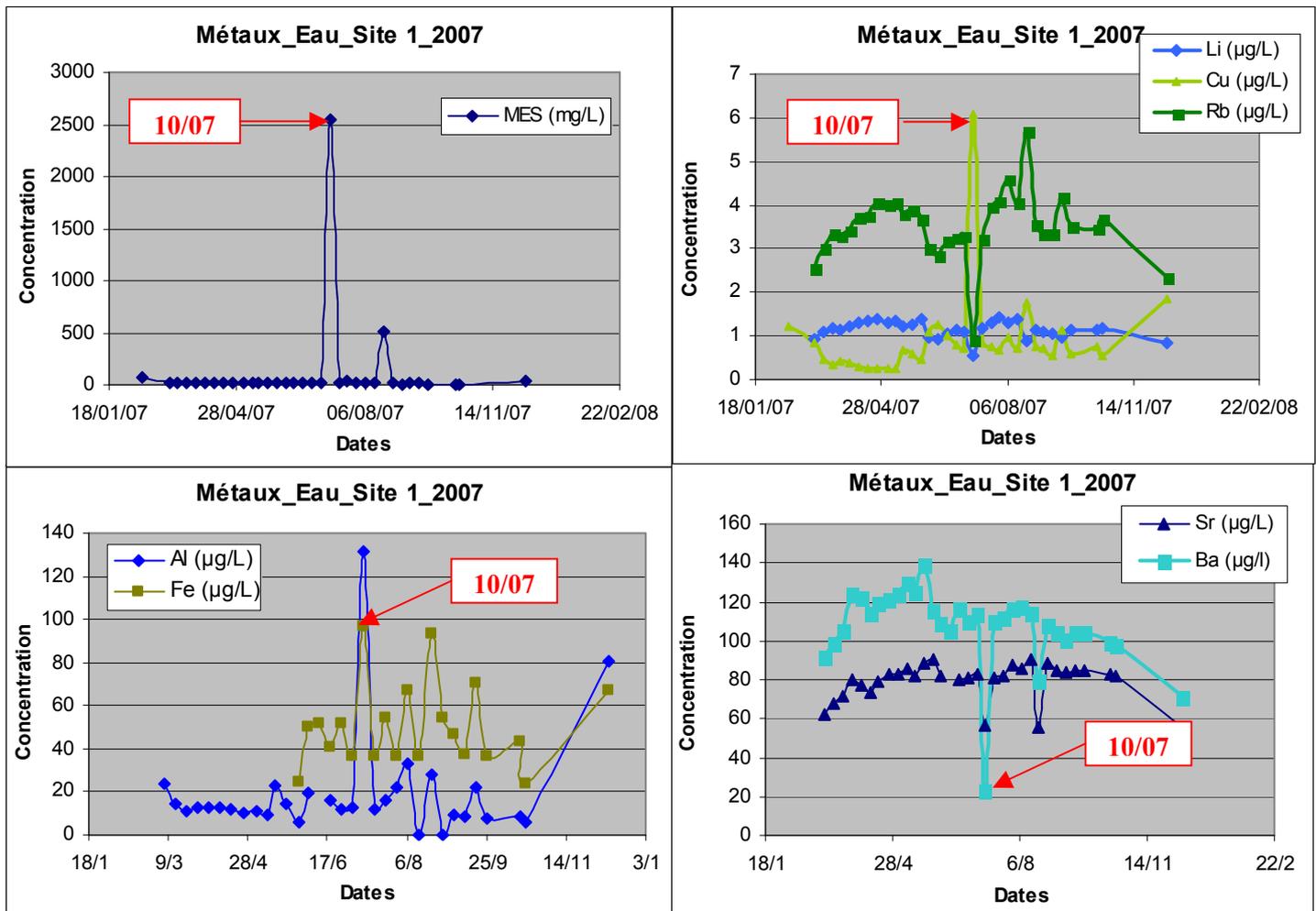


Figure 12 : Evolution de la concentration des métaux dans la rivière en crue (exemple avec la crue du 10/07/2007)

Ainsi, l'**aluminium** et le **fer**, qui ont une forte affinité avec les MES et les colloïdes, auraient tendance à voir leur concentration augmenter en période de crue sous forme de pic du fait du ruissellement et de l'apport massif dans la rivière de MES et de colloïdes. Ceci nous

renseigne également sur l'origine de ces éléments qui semblent provenir de la couche superficielle du sol qui est arraché en période de crue et se retrouve dans la rivière. Ces hypothèses sont confortées par les résultats trouvés dans une étude (*voir annexe 16*) qui montrent que leurs concentrations sont plus élevées dans la rivière que dans la nappe, d'où une origine superficielle et non des couches profondes du sol.

Au contraire, des éléments comme le **strontium**, le **baryum**, le **lithium** et le **rubidium**, qui se retrouvent plutôt sous forme dissoute dans l'eau, subissent un phénomène de dilution en période de crue et voient ainsi leur concentration diminuer dans la rivière. Il semblerait donc que ces métaux proviennent de la nappe qui alimente la rivière en période « normale », hors épisodes de crue, ce qui confirme les résultats trouvés dans une étude (*voir annexe 17*) sur leur comportement tout au long de l'année. En effet, on rappelle que pour ces 4 éléments leur concentration dans la nappe est plus élevée que dans la rivière.

Un calcul a permis de mettre en évidence les parts de Strontium et de Baryum présentes sous forme dissoute dans l'eau et celles sous forme particulaire lors de deux épisodes de crue. Ainsi, le Strontium est présent à 10 % sous forme particulaire (adsorbé par les MES) et à 90 % sous forme dissoute. Le Baryum, quant à lui, est présent à 50 % sous forme particulaire et à 50 % sous forme dissoute. Ceci confirme les hypothèses avancées précédemment.

Le pic de **cuivre** dans la rivière, quant à lui, est certainement lié au phénomène de lessivage des sols durant la crue. En effet, le cuivre est utilisé dans la viticulture et appliqué en surface de sol, sur les vignes. Les résidus de cuivre, non absorbés par la vigne, se retrouvent alors en excès en surface de sol et peuvent être adsorbés par les particules du sol (ce qui peut avoir pour conséquences l'amplification de la pollution par les MES en période de crue) ou peuvent se retrouver en sous-sol, dans la nappe. On note que la valeur atteinte par ce pic, qui est de 6 µg/L, dépasse largement la valeur seuil de la PNEC(Cu) qui est de 1.6 µg/L. On a donc bien ici une accentuation de la pollution en période de crue.

Un calcul a permis de mettre en évidence la part de Cuivre présente sous forme dissoute dans l'eau et celle sous forme particulaire lors de deux épisodes de crue. Ainsi, le Cuivre est présent à 82 % sous forme particulaire (adsorbé par les MES) et à 18 % sous forme dissoute. Ceci confirme les hypothèses avancées précédemment.

Les études qui pourraient se révéler être très intéressantes pour lever certaines incertitudes quant à l'origine des pollutions sont les suivantes :

- Une **étude de la composition des eaux de pluie** : elle permettrait de relever, entre autres, la concentration en plomb dans l'eau de pluie. Ceci permettrait ainsi d'évaluer la part de la pollution atmosphérique et de mieux comprendre l'origine de certaines pollutions.
- Une **étude géologique et géochimique** du bassin versant de la Morcille : ceci permettrait d'avoir une meilleure connaissance de la composition des roches du milieu et donc de mieux discerner, pour chaque élément métallique, si sa présence dans l'eau est d'origine naturelle et dans quelle proportion ou si elle peut être uniquement d'origine anthropique. **Remarque** : Par contre, concernant la pollution à l'Arsenic, il est difficile d'en identifier la provenance (anthropique ou naturelle) puisqu'il n'existe pas d'isotopes permettant cette distinction d'origine.

Synthèse : On a bien une pollution du bassin versant de la Morcille à la fois par la viticulture (Zn, Cu et As) et par les rejets en eaux usées (Fe, B et Co). Par contre, concernant les résultats obtenus sur l'eau du sous-sol provenant des puits, il est très important de se rappeler, comme cela a été signalé au §2-4., que le nombre de données étant trop insuffisant, ils doivent être traités avec un certain recul. Un complément d'études devrait être réalisé à cet égard.

Ces pollutions connaissent une forte accentuation en période de crue. Le temps de réaction du bassin est très court. Les différents comportements des éléments métalliques laissent présager une provenance et des propriétés différentes de ceux-ci : sous forme dissoute, en provenance de la nappe ou sous forme particulaire (affinité avec les MES), en provenance du ruissellement de surface.

Enfin, pour une meilleure compréhension du fonctionnement du bassin versant de la Morcille vis-à-vis des métaux et pour mieux comprendre leur origine (anthropique ou naturelle), il serait intéressant de mener une étude géochimique avec différents traçages isotopiques. En effet, leur origine est certes indéniablement liée à une activité anthropique (en témoigne l'importance des gradients amont/aval) mais elle est également, à une moindre mesure, naturelle, en lien avec les fonds géochimiques du bassin versant de la Morcille.

e) Analyse critique des données disponibles et synthèse sur la qualité de l'eau

Il faut poursuivre de manière intensive le suivi des différents paramètres étudiés précédemment, notamment au niveau de l'eau du sous-sol, mais aussi mettre l'accent sur ceux manquant ou étant insuffisants et faisant ainsi obstacle à l'interprétation de certains phénomènes.

Malgré l'importance des données déjà acquises et mises à disposition, il semble important de proposer des suivis supplémentaires tels que :

- Une augmentation du nombre de puits ainsi qu'une augmentation des prélèvements dans les puits que ce soit pour les métaux, pour la chimie générale et pour les pesticides (avec baisse de la Limite de Quantification LQ pour ces derniers) ;
- Le lancement d'une campagne de mesures sur les concentrations des produits phytosanitaires dans les MES pour permettre une évaluation complète de la pollution : à la fois sous forme dissoute et particulaire ; une intensification des relevés des concentrations en MES pendant les crues ;
- L'implantation de nouveaux piézomètres sur l'ensemble du bassin versant de la Morcille ainsi qu'une étude hydrogéologique et géologique pour une meilleure connaissance du sous-sol ;
- La poursuite de la cartographie du sol ;
- Le lancement d'une étude géochimique et de traçages isotopiques divers pour mieux distinguer la provenance de certains métaux ;
- Une étude précise sur les rejets en eaux usées des habitations pour mieux mesurer l'impact réel de cette pollution sur un tel bassin.

Conclusion sur la qualité de l'eau : En conclusion de ce paragraphe consacré à l'exploitation et à l'interprétation des données relatives à la qualité de l'eau, on note que le bassin versant de la Morcille est bien sujet à des pollutions d'origine agricole (viticole et vinicole) mais aussi d'origine domestique. Ces résultats se retrouvent dans les analyses d'eau étudiées précédemment (chimie générale, métaux et produits phytosanitaires) mais aussi sur le terrain comme en témoignent les photos ci-dessous.



Figure 13 : BV Morcille, Site 1 St Joseph (BE), 19/03/2010, Présence d'écumes violettes en sortie de collecteur d'eaux usées (période de nettoyage des fonds de cuves).

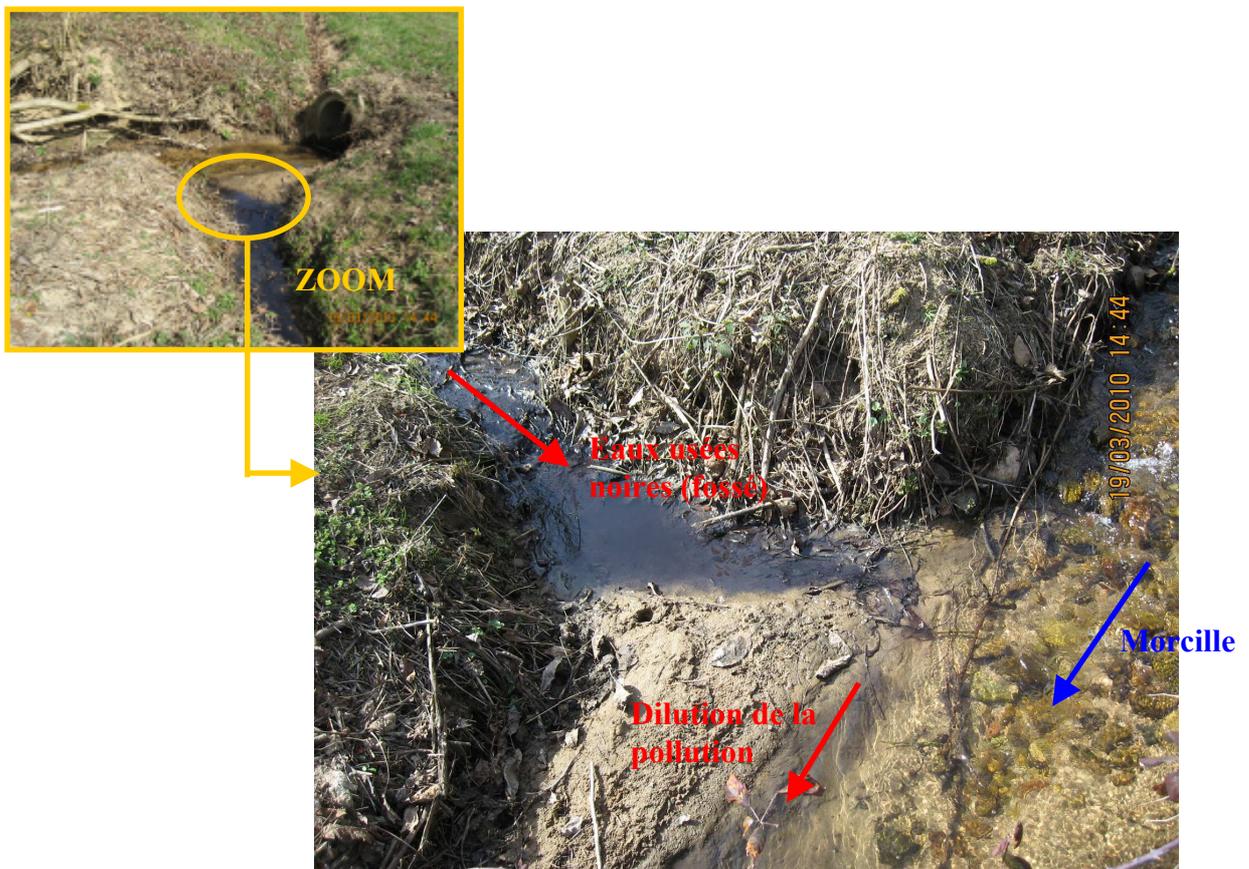


Figure 14 : BV Morcille, Site 1 St Joseph (BE), 19/03/2010, Déversement des eaux usées dans la Morcille par l'intermédiaire d'un fossé, placé juste à l'aval de la sortie du collecteur d'eaux usées précédent (il n'a pas plu depuis longtemps).

4. Proposition d'une typologie de crues

Le but de cette étape, essentielle pour ce stage, est d'établir une typologie de crues sur le bassin versant de la Morcille. Dans un premier temps, cette typologie sera établie par rapport aux caractéristiques hydrologiques des crues (pluie, débit) puis, une fois ces groupes de crues formés, seront mis en corrélation les comportements des MES et des différents polluants (produits phytosanitaires et métaux) selon chaque type de crue identifié. Ainsi, on souhaite mettre au point une typologie de crues dite « complète », c'est-à-dire tenant à la fois compte des paramètres hydrologiques et des paramètres de transfert de la pollution.

4-1. Etude des pluies et des débits : établissement des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) et QDF (Débit-Durée-Fréquence)

Avant de démarrer la mise au point de la typologie, il semblait intéressant, pour encore mieux caractériser les épisodes de crues, d'établir les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) ainsi que les courbes QDF (Débit-Durée-Fréquence), réels outils de base permettant de resituer une crue dans son contexte (période de retour) et pouvant être utile pour le dimensionnement de certains ouvrages également.

Pour l'établissement des courbes IDF, on raisonne sur les intensités moyennes maximales de pluie, que l'on ajuste par une loi exponentielle (*Voir détails en annexe 18*). On obtient le résultat suivant :

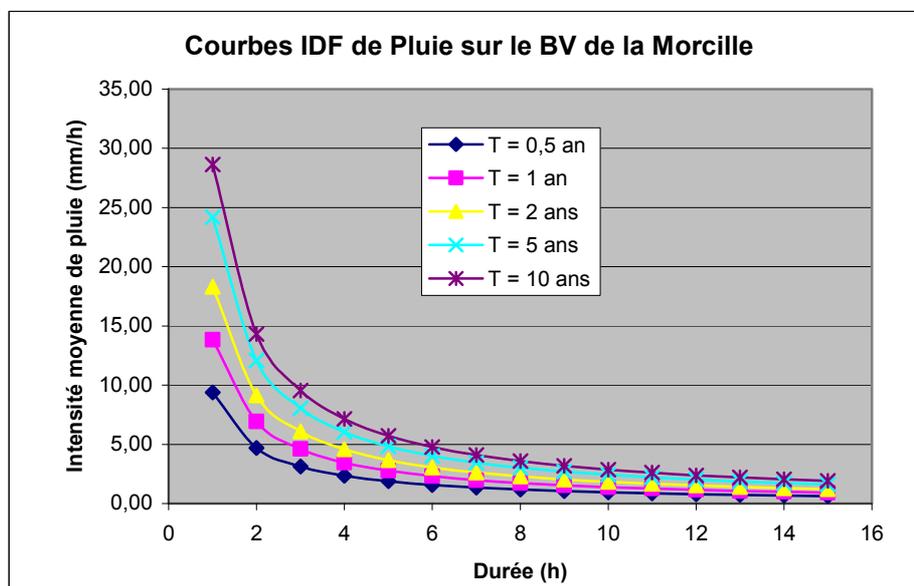


Figure 15 : Résultat des courbes IDF pour le bassin versant de la Morcille

Attention, on attire l'attention sur le fait que ces courbes sont valables pour la majeure partie des événements pluvieux mais sous-estiment les événements extrêmes, ceci étant dû au fait que la période d'études (8 ans : de 2002 à 2009) est trop courte pour tenir compte de ce type d'événement dont la fréquence d'apparition est faible.

Sur le même principe, on obtient les courbes QDF de débit suivantes pour le bassin versant de la Morcille qui pourront être utiles pour estimer les périodes de retour des épisodes de crues étudiés par la suite dans la typologie:

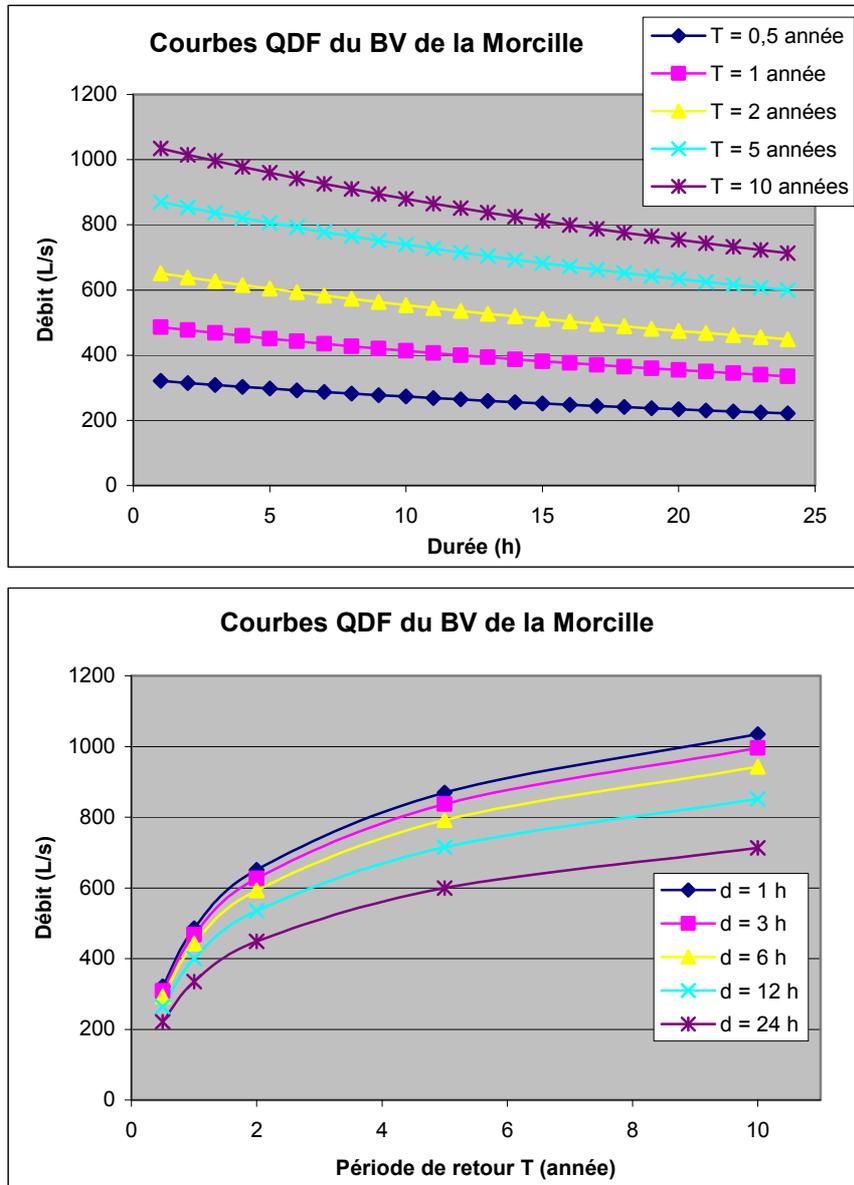


Figure 16 : Résultat des courbes QDF pour le bassin versant de la Morcille

Remarque : la formule utilisée pour approcher les valeurs des quantiles types obtenus (non corrigés par la formule de Weiss, inutile ici) est la suivante (on a raisonné sur les débits moyens maximaux, calage selon la thèse de Pierre Javelle, Cemagref) :

$$Q_{moy}(d, T) = QA + \frac{Q0 - QA}{1 + \frac{d}{Delta}} \quad \text{où} \quad Q0 = Q10 + gr \times Ln(T/10)$$

A l'aide d'une résolution par solveur, on trouve les valeurs suivantes pour les 4 inconnues :

$$\begin{cases} QA = 0 \\ Q10 = 3800 \text{ m}^3/\text{h} \\ Delta = 50 \text{ h} \\ gr = 875 \end{cases}$$

4-2. Typologie de crues selon les caractéristiques hydrologiques

a) Rappels sur les caractéristiques hydrologiques des crues/ Choix des paramètres

Tout d'abord, il est essentiel de déterminer ce que l'on entend par la désignation du terme « crue ». Dans notre cas, sur le bassin versant de la Morcille, on considérera qu'il y a une crue lorsque le débit de pointe dépasse 30 L/s et que sa valeur est supérieure au double de la valeur du débit de base.

Une crue se caractérise par les principaux paramètres hydrologiques suivants qui seront retenus pour l'analyse qui suit (*voir schéma ci-après*) :

Paramètres liés à l'hydrogramme (débit) :

- **Débit initial ou débit de base (L/s)**
- **Débit de fin de crue (L/s)** : On considérera que le débit de fin de crue est atteint lorsque le débit stagne autour d'une valeur moyenne pendant plusieurs heures.
- **Débit de pointe ou débit maximum atteint pendant la crue (L/s)**
- **Volume de crue débité (m³)** : Il correspond au volume total d'eau passé à l'exutoire du bassin entre le début de montée de crue (rupture de pente sur la courbe) et la fin des écoulements rapides qui se caractérise par une rupture de pente de la courbe de débit lors de sa phase de décrue.
- **Temps de base (h)** : Il correspond au temps entre le début de la crue et la fin des apports rapides à la rivière.
- **Temps de montée au pic (h)** : Il est défini comme étant le temps entre le début de la crue, c'est-à-dire le début d'augmentation significative (rupture de pente) du débit et le maximum de la crue.
- **Facteur de forme (h)** : Il correspond au temps durant lequel le débit reste supérieur à la moitié du débit de pointe.

Paramètres liés au hétérogramme (pluie) :

Remarque : la distinction entre deux épisodes de pluie successifs se fait selon différents paramètres : le nombre d'heures sans pluie les séparant doit être supérieur à 3 heures et le pic d'intensité du second épisode ne doit pas être négligeable par rapport à celui du précédent épisode.

- **Cumul de pluie précipitée durant l'épisode considéré (mm)**
- **Durée de l'épisode de pluie (h)**
- **Intensité moyenne de l'épisode de pluie (mm/h)**
- **Intensité maximale atteinte durant cet épisode de pluie (mm/h)**

Paramètres liés à l'hydrogramme et au hétérogramme :

- **Temps de réponse (h)** : Il correspond au temps séparant le pic de pluie du pic de débit.
- **Temps de concentration (h)** : Il caractérise le temps séparant le pic de pluie de la fin de l'apport par les écoulements rapides à la rivière.

Remarque : Selon la crue étudiée et sa régularité, l'ensemble de ces paramètres est plus ou moins facile à établir : rupture de pente plus ou moins visible, stagnation du débit de fin de crue non toujours évidente, présence de plusieurs pics de pluie, etc.

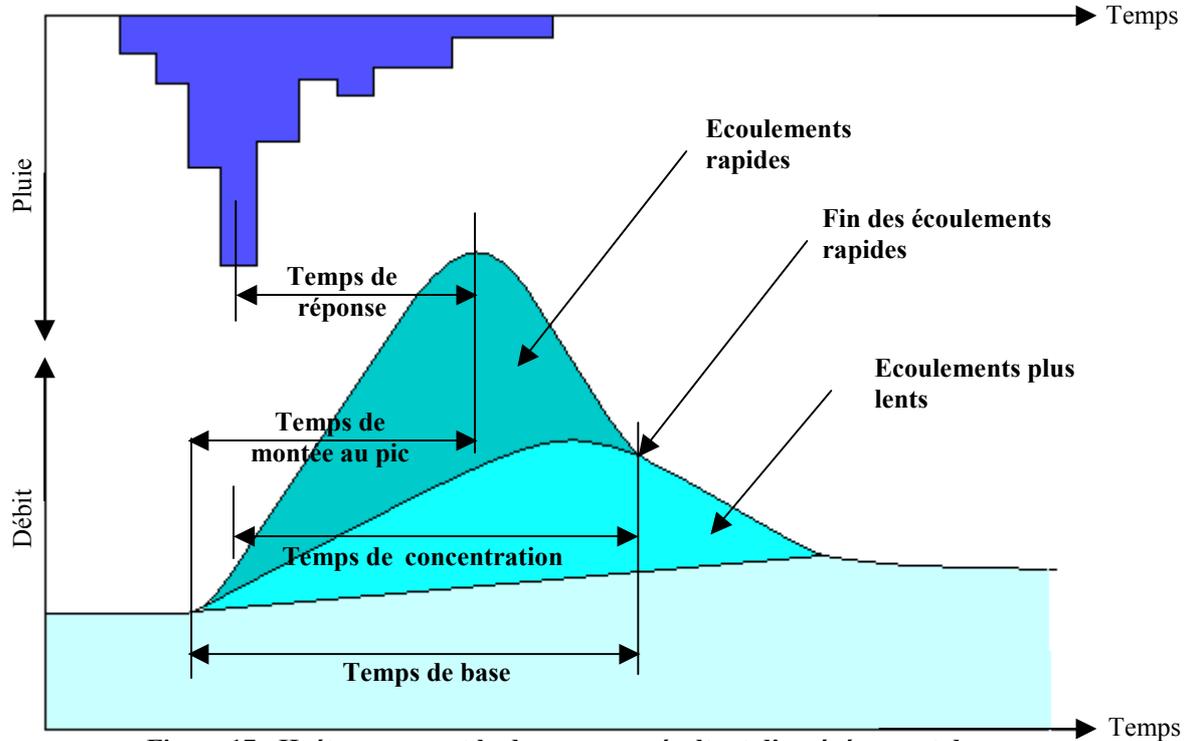


Figure 17 : Hyétogramme et hydrogramme résultant d'un événement de crue

b) Constitution de l'échantillon E de crues

Nous avons sélectionné un certain nombre de crues à partir de la chronique de débits aux Versauds fournie par la DIREN et à partir de la chronique de pluie disponible au lieu-dit « le Calvaire ». La période d'étude s'étend de 2002 à 2009, plage pour laquelle on dispose des données au pas de temps horaire. Pour chaque crue, tous les paramètres définis précédemment ont été déterminés. (*voir exemple de détermination des paramètres hydrologiques d'une crue en annexe 19*)

L'échantillon E, comptant 61 événements, a ainsi été constitué. On a pris en compte des événements dont la détermination des caractéristiques hydrologiques s'est faite sans équivoque. Maintenant que l'on a en possession cet échantillon, on va chercher à analyser sa bonne représentativité tout au long de l'année ainsi que la bonne répartition des valeurs des principaux paramètres.

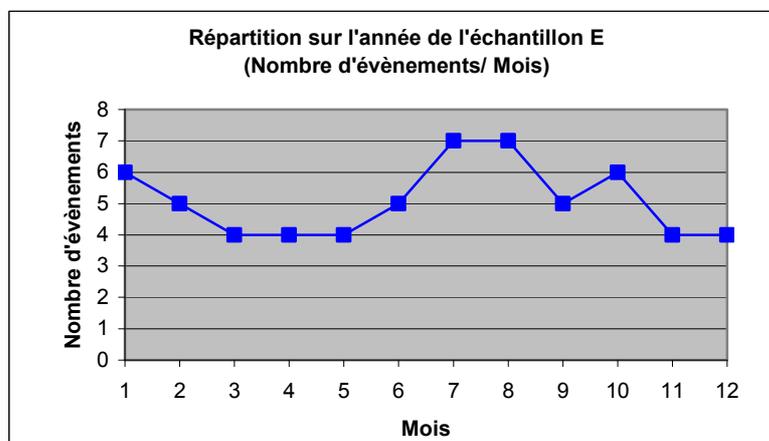


Figure 18 : Répartition des événements de l'échantillon tout au long de l'année

On note que le nombre d'évènements est, en moyenne, plus important en plein été et en hiver, ce qui semble cohérent avec le descriptif du bassin versant de la Morcille qui se caractérise en effet par de multiples orages en été (1 épisode pluvieux sur 2) et par des épisodes pluvieux en hiver, moins violents. On s'est tout de même attaché à réduire l'écart entre les différents nombres d'évènements par mois, pour l'échantillon E, afin qu'il ait une bonne représentativité tout au long de l'année.

Répartition des valeurs des principaux paramètres hydrologiques :

On va s'intéresser ici aux principaux paramètres hydrologiques qui sont : le débit maximum, le volume de crue débité, l'intensité maximale de pluie et le cumul de pluie. On obtient alors, par exemple, pour le cumul des pluies, la courbe de répartition suivante :

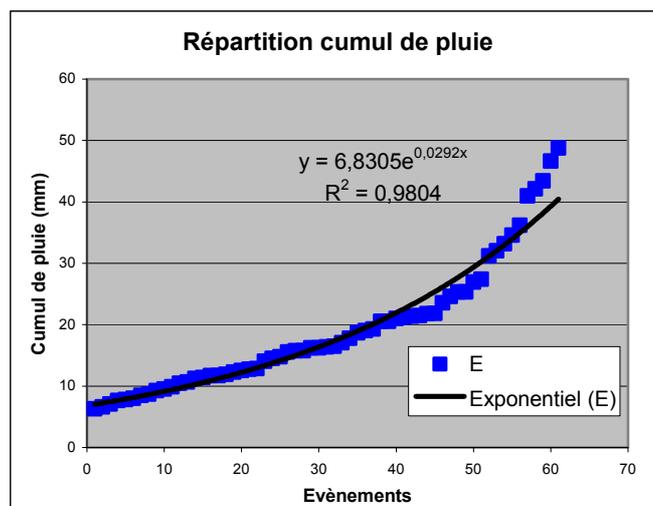


Figure 19 : Courbe de répartition du cumul des pluies

Les résultats sont très intéressants puisque, pour les 4 types de paramètres, on obtient une approximation de la courbe de répartition des valeurs (triées dans l'ordre croissant) par une exponentielle avec un coefficient de détermination R^2 très bon. On note que ces résultats sont très cohérents et sont en accord avec les lois statistiques pour un échantillon de type sup-seuil. En effet, la loi exponentielle fait partie de la famille des lois GPD (Generalized Pareto Distribution) qui se base sur des échantillons aux valeurs supérieures à un seuil fixé.

Remarque : On note que l'on a amélioré quelque peu les R^2 , qui atteignent alors des valeurs comprises entre 0.97 et 0.99, ce qui est excellent, en ôtant quelques évènements de crue aux valeurs « extrêmes » pour chaque paramètre.

Finalement, l'échantillon E, que l'on nommera désormais E', sera constitué de 55 évènements, ce qui correspond à l'échantillon précédent E que l'on a corrigé en ôtant les 6 crues aux valeurs « extrêmes ».

c) Réalisation de la CAH, sous R, avec l'échantillon E'

On procède désormais à une CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) sur l'échantillon E' constitué de 55 évènements, sous R. Pour cette classification, on a retenu les 10 variables suivantes (au lieu de 13 variables) afin de simplifier déjà le problème :

- Débit de fin/ Débit initial
- Temps de réponse
- (Volume de crue débité*100)/ Volume de pluie
- Intensité maximale de pluie
- Durée épisode pluvieux/ Temps de base
- Temps de concentration
- Facteur de forme
- Débit maximum
- Temps de montée au pic
- Intensité moyenne de pluie

On rappelle que la CAH est une méthode statistique qui regroupe les données en classes de telle sorte que l'on ait une très forte ressemblance intra-classes des objets et une très faible ressemblance inter-classes de ces mêmes objets.

On obtient le dendrogramme suivant :

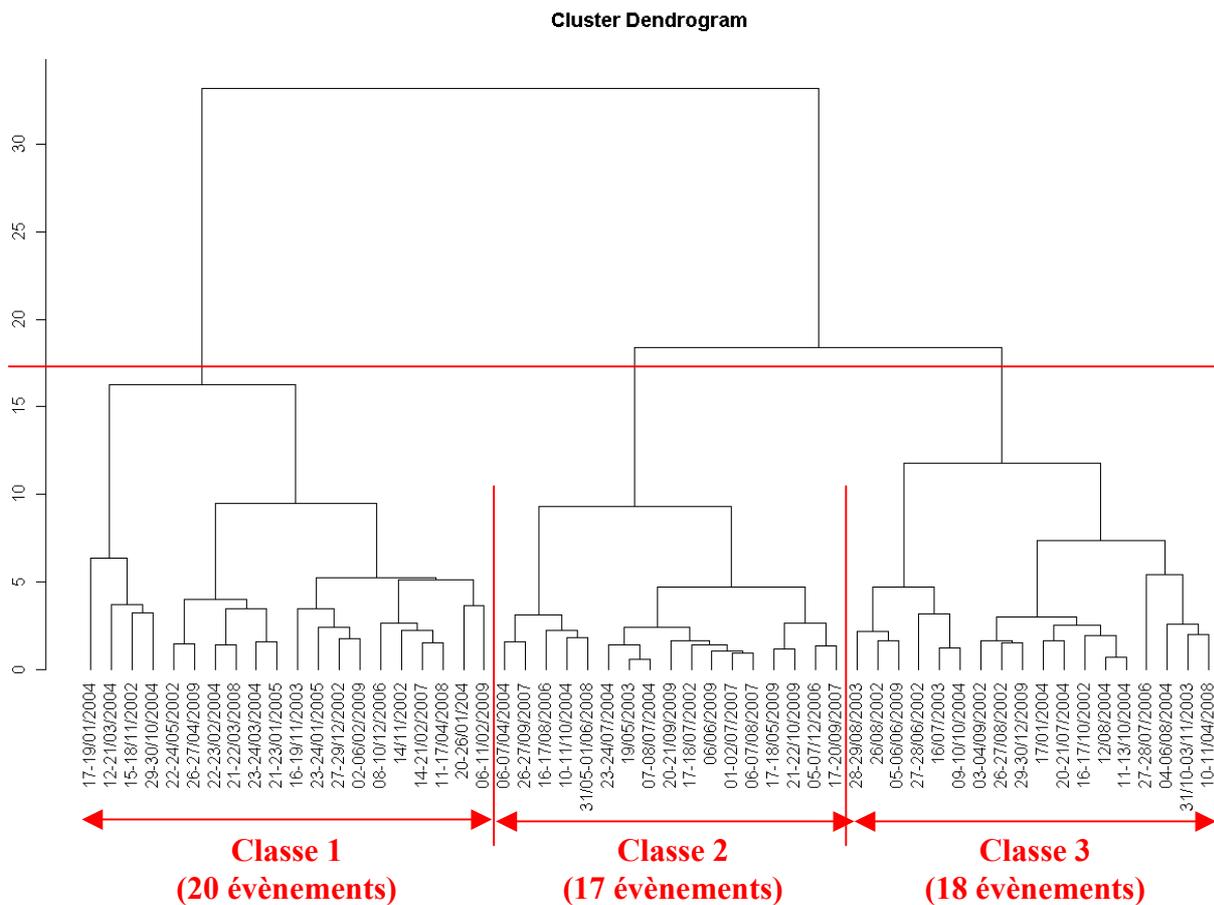


Figure 20 : Résultat de la CAH : mise en évidence de 3 classes de crues

On distingue ainsi 3 classes « équilibrées » (effectifs semblables) avec la partition ci-dessus :

➤ **Classe 1 : « Hiver » (de Novembre à Avril)**

Pour cette classe, on a des temps de réponse, de concentration, de montée au pic et un facteur de forme élevés alors que les intensités maximale et moyenne de pluie sont faibles. De plus, cette classe se caractérise par un pourcentage de $V(\text{crue})/V(\text{pluie})$ et un Q_{max} élevés. On peut donc imaginer que ce type de crue se caractérise par un épisode de pluie peu intense, la plupart de l'eau de pluie étant infiltrée dans le sol (l'ETP est relativement faible à cette époque). De nombreux écoulements de sub-surface, relativement lents, se forment, le sol étant déjà gorgé d'eau (la nappe atteint son plus haut niveau à cette époque), et viennent alimenter la rivière. Même après arrêt de l'épisode pluvieux, le débit de fin de crue reste supérieur au débit initial car il est entretenu par ces écoulements de sub-surface, plus lents.

➤ **Classe 2 : « Eté, type1 de crue » (de Mai à Octobre)**

Pour cette classe, à l'inverse de la classe 1, on a des temps de réponse, de concentration, de montée au pic et un facteur de forme faibles alors que les intensités maximale et moyenne de pluie sont élevées. Ce type de crue pourrait donc se caractériser par un épisode de pluie intense qui engendrerait pour la majeure partie des écoulements rapides (ruissellement de type hortonien ou écoulements en sub-surface rapides). Le début et la fin de cet épisode régissent vraiment le début de crue et la fin des écoulements rapides (avec un décalage de temps correspondant au temps de réponse du bassin) puisque le temps de base est très proche de la durée de l'épisode pluvieux.

➤ **Classe 3 : « Eté, type2 de crue » (de Juin à Octobre)**

Pour cette dernière classe, le pourcentage $V(\text{crue})/V(\text{pluie})$ et Q_{max} sont faibles de même que les intensités maximale et moyenne de pluie sont faibles à moyennes. Ainsi, on peut imaginer que ce type de crue se caractérise par un épisode de pluie peu ou moyennement intense. L'eau s'infiltrant ainsi dans le sol, des écoulements de sub-surface lents ont lieu. Ceci se confirme par le fait que la durée de l'épisode pluvieux est en moyenne une fois et demi plus longue que le temps de base de la crue. Toutefois, le fait que les temps de réponse, de concentration, de montée au pic et le facteur de forme aient des valeurs moyennes à faibles, témoigne de la présence également d'écoulements plus rapides. Le débit de fin de crue, légèrement supérieur au débit initial, est un peu entretenu par quelques écoulements de sub-surface.

Pour chaque classe, on a obtenu les valeurs moyennes de l'ensemble des paramètres, résumées dans le tableau suivant :

Moyenne (variables)	Tps Rép. (h)	Q(fin)/Q(ini)	%V(crue)/V(pluie)	I.max. (mm/h)	T(pluie)/T(base)	Tps montée (h)	Facteur forme (h)	Tc (h)	Q max. (L/s)	I.moy. (mm/h)
Classe 1	2,65	2,06	12,82	4,01	1,19	7,7	24,9	7,2	368,4	1,69
Classe 2	1,25	3,72	3,34	10,3	0,88	2,28	4,14	3,39	234,2	4,37
Classe 3	1,68	1,72	2,31	5,87	1,49	2,82	5,32	4,88	107,9	1,89

Tableau 1 : Caractéristiques des 3 classes de crues

On remarque que, globalement, en été, quelque soit la classe (2 ou 3), les temps de réponse, de concentration, de montée au pic, le facteur de forme et le pourcentage $V(\text{crue})/V(\text{pluie})$ (ETP élevée en été) ont des valeurs faibles en moyenne. En hiver, au contraire, les valeurs moyennes de ces paramètres sont beaucoup plus élevées.

De manière générale, on constate également que la valeur de %V(crue)/V(pluie) reste faible quelque soit la saison, ce qui confirme le fait que le bassin versant de la Morcille est globalement soumis à une forte infiltration de l'eau de pluie du fait de la caractéristique sableuse très filtrante prépondérante de ses sols.

On calcule également pour chaque classe, la valeur des Coefficients de Variation ($CV = \text{Ecart-type} / \text{Moyenne}$) de l'ensemble des paramètres afin de mieux se rendre compte de la dispersion des valeurs (voir le tableau ci-dessous).

CV % (variables)	Tps Rép.	Q(fin)/ Q(ini)	V(crue)/ V(pluie)	I.max.	T(pluie)/ T(base)	Tps montée	Facteur forme	Tps conc.	Q max.	I.moy.
Classe 1	79,2	72,8	68,4	28,4	42,0	41,9	59,2	51,7	54,9	44,4
Classe 2	64,8	81,5	75,7	35,1	44,3	51,8	79,5	41,9	62,7	37,1
Classe 3	43,5	37,8	78,4	39,9	40,9	47,2	79,9	44,7	69,3	36,0

Tableau 2 : Statistiques sur les caractéristiques des 3 classes de crues

Plus le CV est grand, plus grande est la dispersion des valeurs d'un paramètre au sein d'une classe. Ainsi, on constate que pour certains paramètres comme le Facteur de forme, le Débit maximum et le rapport V(crue)/V(pluie), la dispersion de leurs valeurs est grande ($CV > 50\%$, valeurs en rouge dans le tableau ci-dessus) quel que soit la classe de crues. Il faut donc être vigilant vis-à-vis de ces paramètres lors de la classification car même si, en moyenne, leur valeur est caractéristique d'une classe, elle peut aussi fortement varier au sein de celle-ci. En effet, par exemple, concernant le débit maximum atteint, il semble normal que sa valeur puisse fortement varier au sein d'une même classe même si la moyenne de ses valeurs indique une tendance indéniable pour celle-ci.

Par la suite, le choix d'un paramètre supplémentaire tenant compte des « conditions initiales » du bassin versant et étant représentées par le nombre de jours sans pluie précédant l'événement a montré qu'en moyenne le nombre de jours séparant deux épisodes de pluie est plus petit en hiver avec un écart-type plus réduit, ce qui semble tout à fait logique. Au contraire, en été, pour les deux classes confondues, ce nombre de jours est plus grand avec un écart-type plus grand également, donc une plus grande dispersion de ces valeurs (période de sécheresse ou succession de plusieurs orages au contraire). Le rajout d'un tel paramètre n'a donc fait que renforcer la classification établie. Seul le choix d'une classification plus fine engendrerait des changements en rapport avec ce paramètre. En effet, la création de sous classes parmi les 3 classes établies dépend en partie de ce paramètre.

4-3. Typologie de crues complète en regard des MES, des transferts de produits phytosanitaires et de métaux

Maintenant que la typologie de crues dite « hydrologique » a été établie, les comportements des MES (voie de transfert des polluants adsorbés sur les particules) et des différents polluants (transferts de produits phytosanitaires et métaux) vont être mis en corrélation avec chaque type de crues établi afin d'établir la typologie de crues dite « complète ».

- **Les MES (Matières En Suspension) :**

Classe 1 « Hiver » :

En général, les crues d'hiver sont engendrées par des pluies de faible intensité ne suffisant pas à arracher une grande quantité de particules du sol. De plus, les débits d'eau sont importants à cette saison, on peut donc imaginer qu'il y a un phénomène de dilution des MES dans l'eau.

Classe 2 « Eté, crues de type 1 » :

Concernant cette classe de crues, dont l'intensité de pluie est très élevée, la quantité de MES mobilisée semble être très importante. De plus, les courbes $[MES]=f(Q)$ semblent adopter une forme en « huit ».

Classe 3 « Eté, crues de type 2 » :

Pour cette 3^{ème} classe, les courbes $[MES]=f(Q)$ semblent adopter une forme de type hystérésis horaire (ou dextre). En effet, ici, l'intensité de pluie est plus faible (moins de MES à disposition et donc épuisement du stock au cours de la crue) que pour la classe 2.

- **Les produits phytosanitaires :**

Classe 1 « Hiver » :

Globalement, pour cette classe, on ne constate pas de traces de produits phytosanitaires pendant les crues de la Morcille. On note toutefois le début d'apparition de pics d'herbicides (application de mars à mai) fin avril ainsi que des traces de produits phytosanitaires dans l'eau (pics de concentration en période de crue) en Novembre, témoignage de la rémanence de certains produits sur ou dans le sol (phénomène de lessivage en période de pluie).

Classe 2 « Eté, crues de type 1 » :

Durant la saison d'été, on constate beaucoup de pics de concentration en produits phytosanitaires dans l'eau de la Morcille en période de crue. La présence de cette pollution est liée à l'application des produits phytosanitaires sur les parcelles de vignes en début de saison et à la rémanence de ces produits en fin de saison. On distingue toutefois une différence de comportement selon les 2 classes d'été. En effet, pour cette classe 2, caractérisée par des épisodes de pluie de forte intensité (arrachage des particules du sol), on remarque que les pics de concentration en MES et en produits phytosanitaires, qui coïncident, ont lieu avant le pic de débit, ce qui signifie qu'au moment où le débit atteint son maximum on observe déjà un effet de dilution pour les MES et pour les produits phytosanitaires. Il semblerait donc que les produits phytosanitaires soient adsorbés sur les MES (quasiment tous les produits phytosanitaires utilisés sur ce bassin versant ont un Koc élevé) et aient donc le même comportement que celles-ci.

Classe 3 « Eté, crues de type 2 » :

Pour cette 3^{ème} classe de crues d'été, on constate logiquement, comme précédemment, de nombreux pics de pollution en produits phytosanitaires durant les épisodes de crues. Toutefois, ici, on note une distinction quant à l'apparition du pic de produits phytosanitaires

par rapport au pic de débit. En effet, cette fois, ces 2 pics coïncident. Ceci peut s'expliquer par le fait que les crues de classe 3 sont engendrées par des pluies d'intensité faible à moyenne, ne permettant pas ainsi une mise à disposition suffisante de particules du sol : l'apport en MES dans la rivière serait donc faible et seule la part en pollution sous forme dissoute aurait un impact visible. Le pic de pollution en produits phytosanitaires, présents principalement sous forme dissoute dans l'eau, suit donc le comportement du pic de débit.

- **Les métaux :**

Les pollutions en cuivre, arsenic et cobalt sont présentes toute l'année et se manifestent en particulier en période de crues par des pics de concentration. Ceci impacte donc toutes les classes. Une intensification des pollutions de ces métaux se fait ressentir pendant l'été (classes 2 et 3), de mai à octobre. A cette saison, le débit dans la rivière est plus faible, la pollution se concentre donc, l'apport en MES est plus important (affinité des métaux avec les particules), ce qui renforce les voies de transferts. De plus, du cuivre est utilisé en début de cette saison pour la viticulture. On a également un effet de rémanence pour le cuivre et l'arsenic pendant tout l'été. Le cobalt (traceur d'eaux usées), quant à lui, est en permanence déversé dans la rivière. D'autre part, on note également, concernant la pollution liée aux rejets en eaux usées des habitants, une forte augmentation de la concentration en fer (forte affinité avec les MES et les colloïdes) dans l'eau de la Morcille en été et principalement en septembre et en octobre.

- **La chimie générale :**

La pollution en orthophosphates est présente tout au long de l'année sur le bassin versant de la Morcille, son origine étant liée aux rejets en eaux usées des habitants. Elle se traduit ainsi par des pics de concentration en période de crues. Ce paramètre impacte donc toutes les classes de crues.

Sinon, globalement, la saison d'hiver (classe 1) ne présente pas de problème particulier quant à la chimie générale de l'eau. Par contre, concernant les 2 classes d'été (classes 2 et 3), on constate une pollution notable en ammonium en période de crues tout au long de la saison avec tout de même une accentuation en septembre et en octobre (forte activité vinicole/vendanges). De même une augmentation non négligeable de la concentration en potassium (effluents vinicoles) est constatée aux mois de septembre et d'octobre.

Pour mieux caractériser chaque type de crues, on a recoupé les données obtenues précédemment avec celles en référence à la saisonnalité du bassin versant de la Morcille. Le tableau suivant synthétise l'ensemble de ces données :

Tableau 3 : Tableau des différentes classes de crues et saisonnalité du bassin versant de la Morcille :

	Classe 1			Classe 2			Classe 3		
Saison	Hiver (Novembre-Avril)			Été (Mai-Octobre)			Été (Mai-Octobre)		
Intensité max. de pluie	Faible (4 mm/h)			Élevé (10 mm/h)			Faible à moyenne (6 mm/h)		
Intensité moy. de pluie	Faible (1,5 mm/h)			Élevé (4,5 mm/h)			Faible à moyenne (2 mm/h)		
Temps de réponse	Élevé (2 h 30 min)			Faible (1 h 15 min)			Faible à moyenne (1 h 30 min)		
Temps de concentration	Élevé (7 h)			Faible (3 h 30 min)			Faible à moyenne (5 h)		
Temps de montée au pic	Élevé (7 h 30 min)			Faible (2 h 30 min)			Faible à moyenne (3 h)		
Facteur de forme	Élevé (25 h)			Faible (4 h)			faible (5 h)		
Débit max.	Élevé (350 L/s)			Moyen à élevé (250 L/s)			Faible (100 L/s)		
V(Crue)/V(Pluie)	Élevé (12 %)			Faible (3 %)			Faible (2 %)		
Type(s) d'écoulement(s) majoritaire(s)	Lent (sub-surface)			Rapide (ruissellement hortonien et sub-surface)			Rapide (sub-surface)		
Sous-saisons	Novembre-Janvier	Février	Mars-Avril	Mai-Juillet	Août	Septembre-Octobre	Mai-Juillet	Août	Septembre-Octobre
Application produits phytosanitaires	/	/	Herbicides	Fongicides et Insecticides	/	/	Fongicides et Insecticides	/	/
Rejets effluents vinicoles	Beaucoup	Un peu		/	/	Pic (très élevés)	/	/	Pic (très élevés)
Recharge/Décharge de la ressource en eau du sol	Sol chargé	Début tarissement/ressuyage		Déchargé		Recharge	Déchargé		Recharge
Comportement des MES	Effet de dilution			Beaucoup de MES (forme en « 8 »)			Epuisement des MES (hystérésis horaire)		
Pollution aux produits phytosanitaires	En Novembre (rémanence)	/	Fin avril (application)	Application (suit le pic de MES)	Rémanence (suit le pic de MES)		Application (suit le pic de débit)	Rémanence (suit le pic de débit)	
Pollution aux métaux	Cu, As, Co			Cu, As, Co (très élevé)		Cu, As, Co, Fe (très élevé)	Cu, As, Co (élevé)		Cu, As, Co, Fe (élevé)
Eléments polluant en chimie générale	PO ₄ ³⁻			PO ₄ ³⁻ NH ₄ ⁺		PO ₄ ³⁻ NH ₄ ⁺ (élevé) K ⁺	PO ₄ ³⁻ NH ₄ ⁺		PO ₄ ³⁻ NH ₄ ⁺ (élevé) K ⁺

Conclusion : Une typologie dite « complète » de crues a été établie sur le bassin versant de la Morcille, mettant ainsi en exergue 3 types de crues (classes de 1 à 3) se répartissant sur 2 saisons principales (été et hiver). On note également que chacune de ces saisons a pu être scindée en 3 sous-saisons. Ce travail a également permis d'identifier les caractéristiques de ce bassin versant comme : la mise au point des courbes IDF de pluie pour des périodes de retour variant de 0,5 à 10 ans, la mise en évidence d'un temps de réponse plutôt court (fortes pentes), etc..

L'établissement de cette typologie va permettre, par la suite, de mieux identifier les éventuels différents scénarii possibles de fonctionnement du bassin versant de la Morcille. En effet, la réalisation d'un tel travail a permis l'analyse des caractères spécifiques de l'ensemble des crues. Cette démarche, visant à décrire l'ensemble des crues sur ce bassin versant et à en établir une classification, permettra pour la suite de l'étude une meilleure exploitation des données, plus ciblée et plus ordonnée.

Il faut bien mettre l'accent sur le fait que certains des éléments descriptifs d'une classe, notamment concernant les MES (courbes $[MES]=f(Q)$), ne se basent que sur un nombre de données parfois insuffisant, ne permettant pas ainsi de faire de ces classes une référence. Toutefois, cette typologie constitue déjà une bonne base de travail pour la suite de l'étude et ne demande qu'à être vérifiée au fur et à mesure de l'acquisition de données supplémentaires dans les années qui suivront.

5. Proposition d'un schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille

Pour cette partie, l'utilisation d'un SIG (Système d'Information Géographique) s'est révélée indispensable. Le logiciel ArcGIS et ses extensions (ArcScene, ArcHydroTools, 3D Analyst, etc.) ont été utilisés. On décrit les différentes couches SIG, géoréférencées en Lambert_Zone_II, déjà à disposition pour le sous-bassin versant de la Morcille (exutoire « les Versauds ») :

- mnt_res_10 (Modèle Numérique de Terrain de résolution 10m)
- photographies aériennes
- carte des sols
- limite hydrographique du bassin versant
- réseau hydrographique
- cadastre des parcelles de vignes
- réseau routier (petites et grosses voies)
- réseau de fossés
- bâtiments/habitations

Attention : la partie qui suit porte uniquement sur le sous-bassin versant de la Morcille dont l'exutoire se situe aux Versauds et qui a pour superficie 4.8 km². En effet, il y a beaucoup moins de données disponibles au delà de ce site 2.

Maintenant que l'on a déterminé une typologie de crues pour ce bassin versant, l'étape suivante va consister à comprendre son fonctionnement pour chacune de ces classes d'évènements. Le fonctionnement d'un tel bassin versant, au regard des transferts de polluants, est quelque peu complexe à déterminer au vue du grand nombre de paramètres à prendre en compte et du manque de certaines données, notamment et principalement sur le sous-sol. En effet, voici quelques exemples des principaux paramètres à prendre en compte :

Les paramètres liés à l'homme et ses activités :

- ✓ **Pratiques agricoles** (périodes d'application, type d'intrants, part de culture biologique et/ou raisonnée, pratiques culturales, etc.)
- ✓ **Activités humaines** (peu d'habitations et dispersées : rejet des eaux pluviales et des eaux individuelles dans les fossés, etc.)
- ✓ **Occupation du sol** (fossés pour la lutte contre l'érosion, zones « tampon », zones enherbées, chemins, 70 % de vigne, etc.)

Les paramètres liés à la nature du bassin-versant et à la région :

- ✓ **Climat** (T°C, pluie, vent, évapotranspiration, etc.)
- ✓ **Topographie** (pentes, etc.)
- ✓ **Sols** (porosité, perméabilité, granulométrie, texture, discontinuités, teneur en eau, pression capillaire, conductivité hydraulique, saturation, etc.)
- ✓ **Hydrologie/hydrogéologie** (débit, crues, temps de réponse du bassin, nappe d'accompagnement et nappes perchées, etc.)
- ✓ **Géologie** (fond géochimique, discontinuités de couches, etc.)

Le schéma suivant traduit également la complexité des différentes relations et interdépendances des paramètres entre eux dont les caractéristiques dépendent évidemment de la saisonnalité du bassin versant, des événements de pluie précédents, etc. :

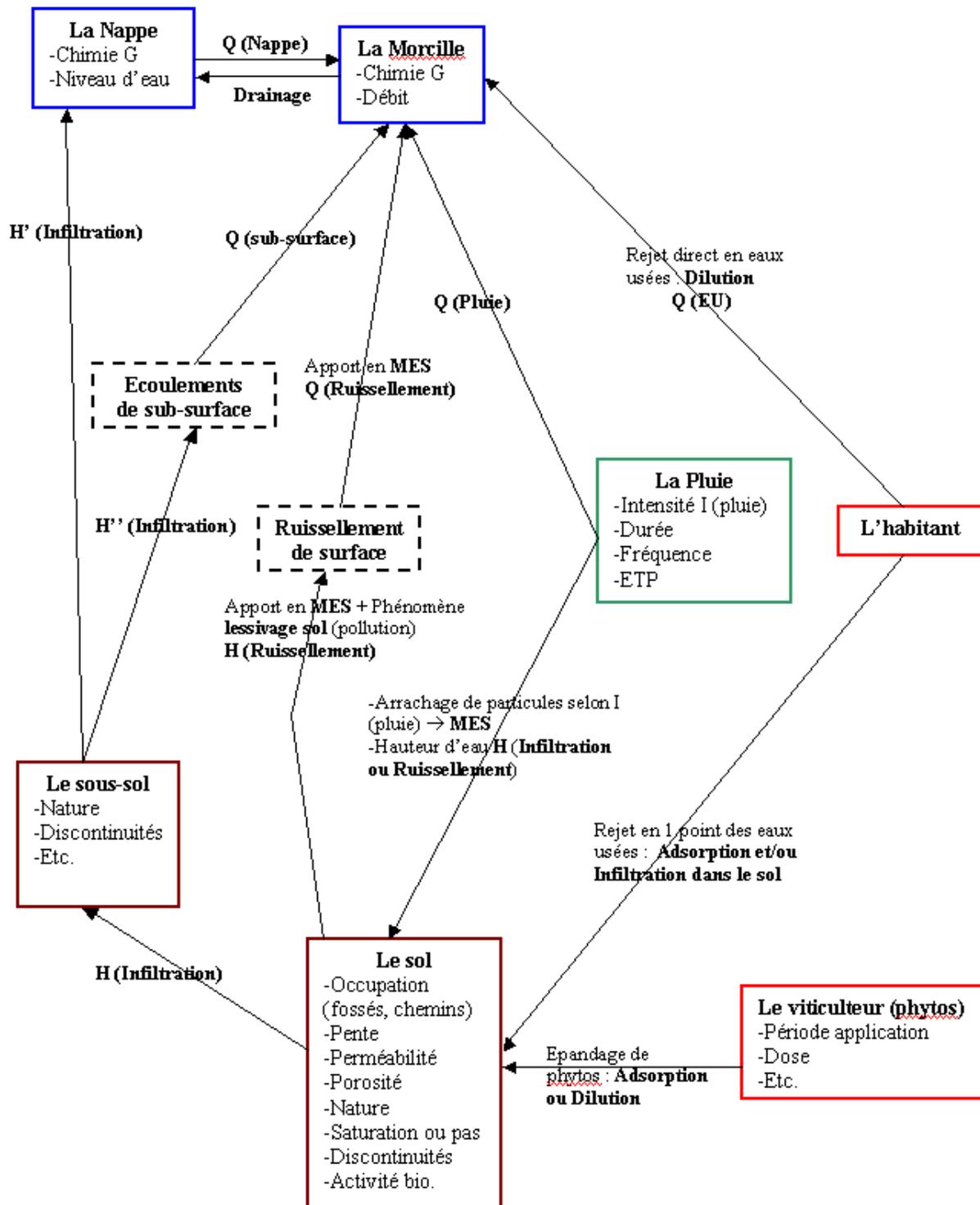


Figure 21 : Schéma global de fonctionnement du bassin versant de la Morcille

Toutefois, cette partie de l'étude va tenter d'apporter des éléments de réponse (proposition d'hypothèses) quant au transfert des polluants de la parcelle agricole jusqu'au cours d'eau en établissant un schéma de fonctionnement du bassin versant de la Morcille, dégageant notamment l'importance respective du ruissellement et des écoulements de proches sub-surfaces pendant les crues. L'idée serait de pouvoir recouper ces résultats avec la typologie de crues établie précédemment.

On rappelle que les modes de transfert en surface et dans le sol/sous-sol sont de plusieurs types :

- **Transfert par écoulements de surface sur le sol/les parcelles (ruissellement hortonien, c'est-à-dire dépassement de la capacité d'infiltration du sol, ou ruissellement par saturation du sol)**
- **Transfert par écoulement dans les fossés et sur les routes ou chemins**
- **Transfert par écoulements de sub-surface, appelés aussi écoulements hypodermiques (en dessous de la surface mais proche de celle-ci)**
- Transport par écoulement dans la nappe alluviale permanente
- Transport hydrodynamique dans la phase aqueuse du sol, c'est-à-dire dans les zones non saturées

Remarque 1 : comme très peu de données sur le sous-sol sont disponibles, on note que les deux derniers points ne pourront être distingués du reste des écoulements de sub-surface.

Remarque 2 : on ne s'intéresse pas ici aux modes de transfert par voie aérienne qui, on le rappelle, sont les suivants : volatilisation sous forme gazeuse à partir du sol ou des plantes, dérive (vapeur résultante du traitement) et érosion éolienne des sols.

5-1. Parts respectives du ruissellement et des écoulements de proche sub-surface pendant les crues : utilisation du modèle hydrologique « TopModel »

(Référence : [18] : Georges-Marie SAULNIER, 1996)

L'objectif dans cette partie est de déterminer l'importance respective du ruissellement et des écoulements de proches sub-surfaces pendant les crues.

Introduction au modèle hydrologique Topmodel

Pour cela, on va procéder à une simulation avec le modèle hydrologique **TopModel sous R** (version de 1995) qui est un modèle pluie/débit « conceptuel semi-distribué » et qui se base sur le concept de génération de ruissellement sur des surfaces contributives (ou temporairement saturées). L'idée maîtresse de ce modèle repose sur le rôle de la topographie dans la variabilité spatiale des états hydriques des sols.

Détermination de l'indice topographique (ou indice de Beven)

Il est d'ailleurs nécessaire d'introduire la notion d'indice topographique avec l'indice de BEVEN (1986) qui permet de mettre en évidence la notion de points hydrologiquement semblables. Ainsi, 2 points du bassin présentant le même rapport $\frac{a}{Tg(\beta)}$ (où a est l'aire à l'amont du point considéré et Tgβ est le gradient hydraulique, souvent approché par la pente de la surface du sol), auront à chaque pas de temps la même valeur de déficit local en eau (sous réserve des hypothèses de recharge spatialement uniforme et de sol homogène). La carte suivante représente les différentes valeurs de l'indice de Beven obtenues sur le sous-bassin versant de la Morcille ayant pour exutoire le site 2 « les Versauds » :

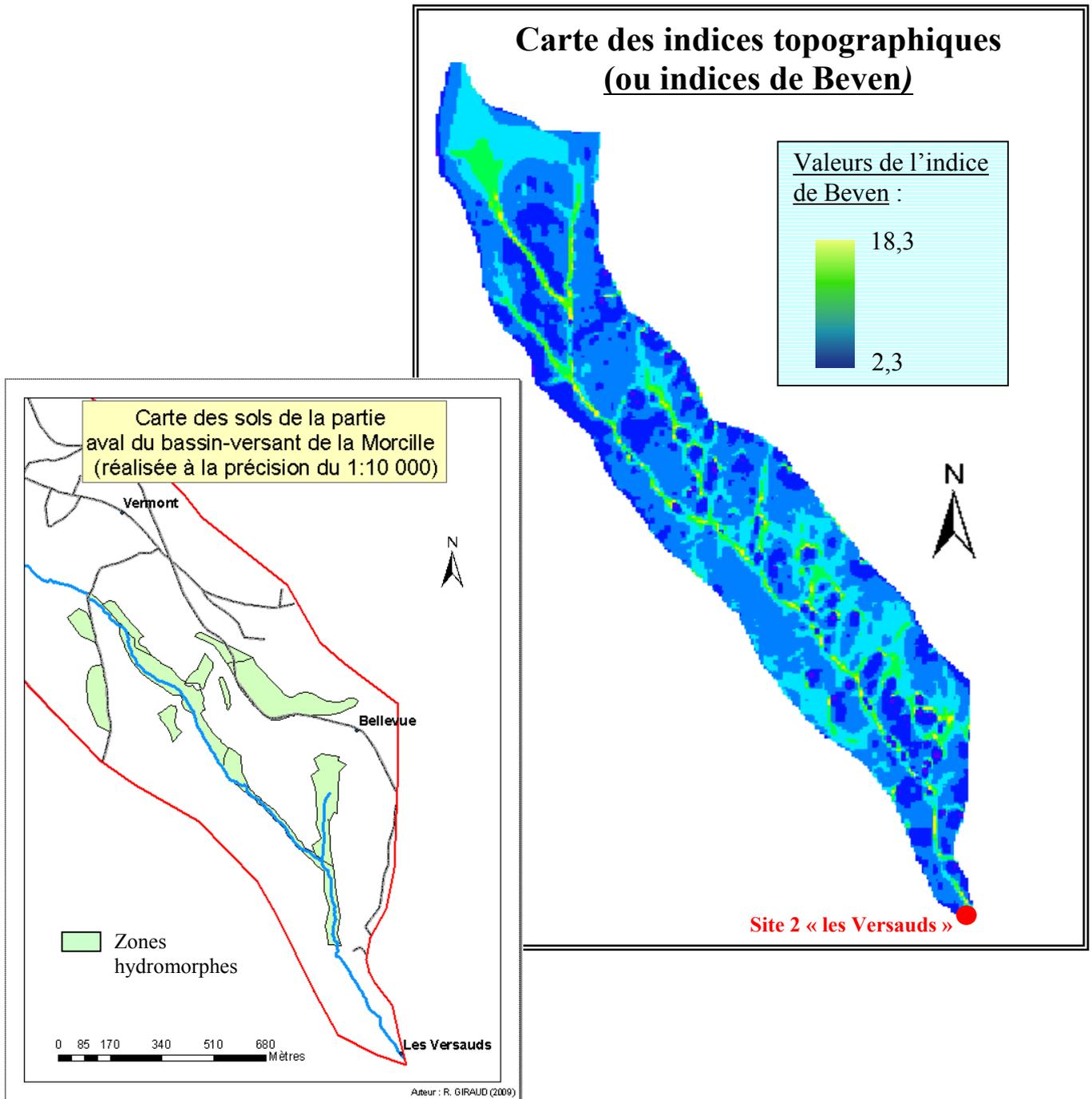


Figure 22 : Carte de l'indice de Beven et carte de Romain Giraud (zones hydromorphes)

On remarque le fait que plus l'indice topographique est grand (en vert fluo sur la carte), plus le sol est saturé. Les résultats obtenus semblent donc pertinents et cohérents puisqu'on voit apparaître le cours d'eau et quelques zones hydromorphes relevées sur la carte de Romain Giraud (*voir cartes ci-dessus*). Sur ces points, où le déficit en eau est parfois nul, on peut constater un ruissellement de surface. Sur les autres points du bassin versant, deux cas seront à distinguer selon les épisodes de crues :

- Soit, l'intensité de pluie est inférieure à la conductivité à saturation du sol K et l'eau s'infiltré complètement,
- Soit, une partie de l'eau de pluie s'infiltré et l'excédent ruissellera : c'est la génération de ruissellement par refus d'infiltration (ou ruissellement hortonien).

Les étapes de modélisation sous Topmodel : fonctionnement du modèle

Le fonctionnement de ce modèle se base sur une subdivision en bassins versants élémentaires du bassin versant étudié, dont la production est ensuite composée et transférée à l'exutoire principal.

Les données d'entrée sont constituées par une série chronologique de précipitations et d'ETP (EvapoTranspiration Potentielle) correspondant à un pas de temps fixe. Le modèle donne en sortie une série chronologique de débits avec le même pas de temps qui sera alors comparée à la série de débits observés sur le terrain pour la série de précipitations choisie, selon le critère de Nash.

Remarque : on rappelle que le critère proposé par Nash (1969), qui est le plus communément employé, est de la forme suivante :

$$CNash = 1 - \frac{\sum (Q_o - Q_c)^2}{\sum (Q_o - mQ_o)^2}$$

où :

{	<p>Q_o, débit observé à un pas de temps</p> <p>Q_c, débit calculé au même pas de temps</p> <p>mQ_o, moyenne des débits observés de l'échantillon</p>
---	---

La valeur de ce critère doit se rapprocher au mieux de 1.

Les différentes étapes de la modélisation sur Topmodel consistent en :

1. Remplissage par les précipitations d'un réservoir d'interception dans lequel la reprise de l'évapotranspiration potentielle est autorisée.
2. Alimentation d'un réservoir de proche surface (zone racinaire) de volume maximal S_{rmax} , où l'on autorise également une certaine évaporation. Ce réservoir se vidange dans un réservoir profond susceptible de se saturer. On admet que, dans ce dernier réservoir, la conductivité décroît exponentiellement avec un coefficient m.
3. Production d'écoulement de surface (aire contributive variable) si le réservoir profond est saturé. C'est dans cette étape qu'intervient la distribution de l'indice topographique.
4. Production d'écoulement de base selon une loi exponentielle.
5. Transfert de l'écoulement de surface sur le bassin élémentaire.
6. Convolution et transfert des écoulements de chaque bassin élémentaire.

Calage du modèle hydrologique

Le calage de ce modèle repose sur la meilleure approximation possible de la série de débits simulée par la série des débits observés. Celle-ci est évaluée par le critère de Nash dont la valeur doit s'approcher de 1. Tant que l'opération n'est pas jugée satisfaisante, on modifie les paramètres de réglage du modèle, répertoriés et décrits ci-dessous :

- **qs0**: débit de sub-surface initial (initial subsurface flow per unit area) [**m/h**]
- **lnTe**: moyenne surfacique de Ln(T) (areal average of ln(T)) [**ln(m²/h)**], où T correspond à la transmissivité
- **m**: paramètre intervenant dans la décroissance de la conductivité dans le sol (model parameter controlling the rate of decline of transmissivity in the soil profile) [**m**]
- **Sr0**: déficit initial en eau de la zone racinaire (initial root zone storage deficit) [**m**]
- **Srmax**: déficit maximal en eau de la zone racinaire (maximum root zone storage deficit) [**m**]
- **td**: temps de ressuyage (unsaturated zone time delay per unit storage deficit) [**h**]
- **vch**: vitesse de l'eau du cours d'eau principal (main channel routing velocity) [**m/h**]
- **vr**: vitesse de l'eau au sein du sous bassin versant (internal subcatchment routing velocity) [**m/h**]
- **K0**: conductivité hydraulique en surface (surface hydraulic conductivity) [**m/h**]
- **CD**: conductivité capillaire (capillary drive)
- **dt**: pas de temps (timestep) [**h**]

Après calage sur la série de données de l'année 2008, on obtient un Nash d'une valeur de 0.60. On note que cette valeur obtenue n'est pas très optimale, ceci étant probablement dû au fait que ce modèle n'est pas complètement bien adapté au bassin versant de la Morcille. Toutefois, l'exploitation des résultats de ce modèle peut nous permettre d'avoir une idée (ordres de grandeur) de la part en ruissellement et en écoulements de sub-surface en crue.

Validation du modèle

Une fois ces paramètres fixés, on fait désormais tourner le modèle avec des nouvelles séries de précipitations pour les années civiles 2003, 2004, 2006 et 2007. On remarque que l'année 2005 n'a pas été exploitée car ses données de pluie et de débit présentent des incohérences. Les valeurs du critère de Nash obtenues sont comprises entre 0.55 et 0.65. On peut donc considérer l'opération de modélisation comme correcte et valider ainsi le modèle obtenu.

Exploitation des résultats

Dans une première approche, on peut raisonner sur la valeur des paramètres obtenus notamment concernant les valeurs de transmissivité. En effet, suite au calage du modèle, on a obtenu la valeur suivante : $\text{Ln}(T_e) = -1.55$, soit $T_e = 0.21 \text{ m}^2/\text{h}$. On rappelle que T_e correspond à la moyenne de la transmissivité T sur l'ensemble du sous bassin versant considéré. Or, on sait que :

la conductivité hydraulique moyenne $K = \frac{T_e}{b}$ où b correspond à l'épaisseur de l'aquifère. Sur le bassin versant de la Morcille, on retrouve la couche imperméable de granite entre -5 et -10 mètres. La valeur de conductivité hydraulique obtenue varie donc entre 20 mm/h et 40 mm/h (ces valeurs concordent avec celles trouvées dans la littérature). Or, on retrouve plusieurs événements de crues de la classe 2 (pluies intenses) pour lesquelles l'intensité de pluie dépasse les 20 mm/h. On aurait donc, pour certains événements de la classe 2, une génération de ruissellement par refus d'infiltration de plusieurs mm/h.

Dans une seconde approche, on va récupérer un certain nombre de données calculées au cours de la simulation, comme : le débit de sub-surface, le débit ruisselé et le débit dans la rivière.

Ce modèle hydrologique a bien montré que, pour chaque année étudiée, en période de crues (pics des valeurs de débits simulés et observés), on a une augmentation du ruissellement (qui passe de 0 à une valeur non négligeable) avec à la fois une diminution de la part des écoulements de sub-surface. On note donc une corrélation entre la part des écoulements de sub-surface et la part du ruissellement : lorsque l'on note une forte contribution du ruissellement dans la génération du débit de rivière, la part en écoulement de sub-surface chute. Ces résultats sont illustrés sur le graphique ci-dessous (exemple avec l'année 2004) :

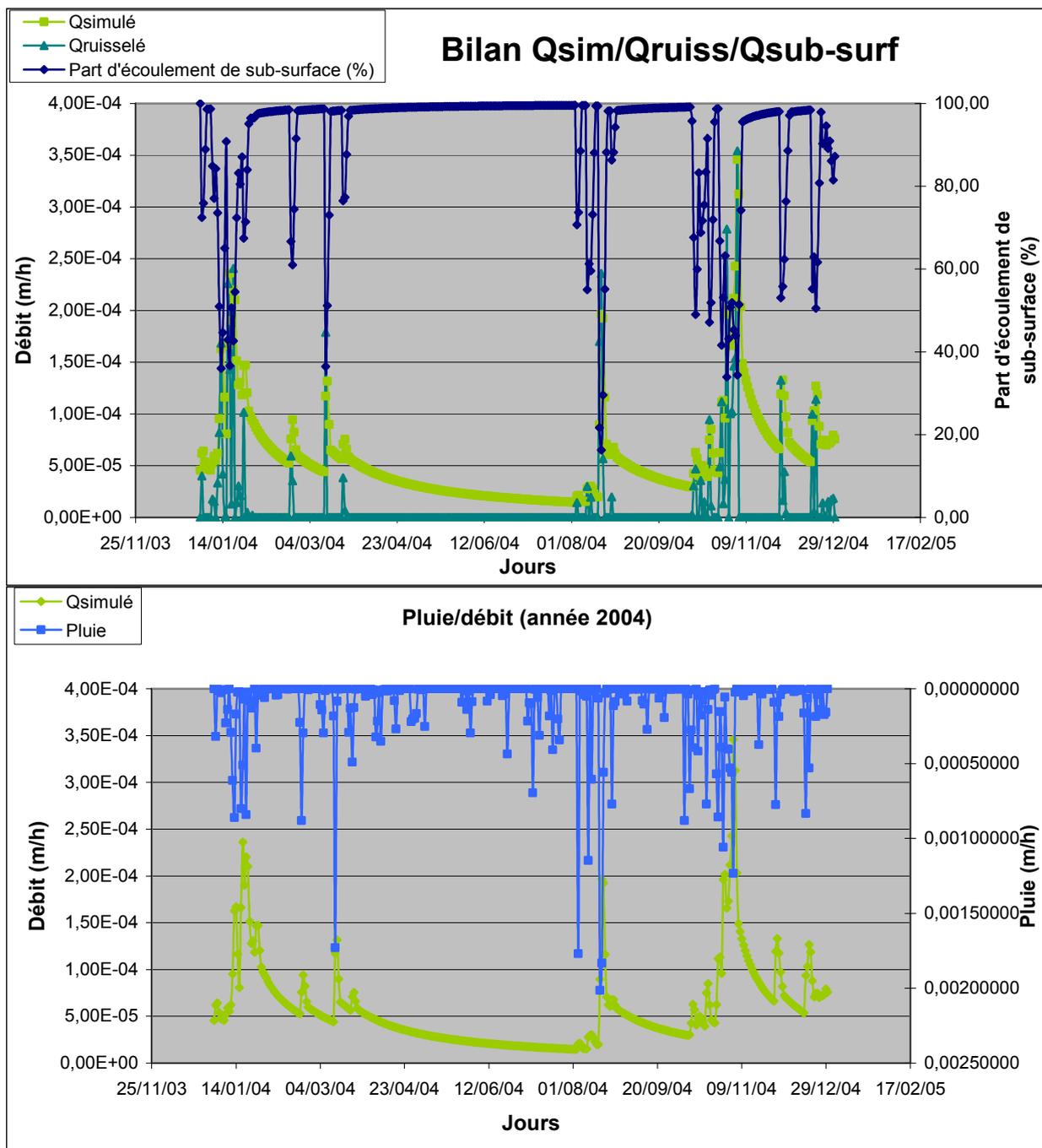


Figure 23 : Graphiques présentant les résultats obtenus avec Topmodel (1/2)

On remarque qu'en été, saison durant laquelle les crues de classe 2 sont engendrées par des épisodes de pluie de forte intensité, le retour après crue à une part des écoulements de sub-surface de 100 %, ou presque, est très rapide. Au contraire, ce retour se fait plus lent en hiver. Ceci est en cohérence avec le fait que pour des crues de classe 1 (hiver), on a beaucoup plus d'écoulements lents, en proportion, qu'en été (classe 2 et 3) et un phénomène de drainage de la nappe par la rivière en période de décrue (voir ci-dessous), d'où des temps de réponse plus longs, des facteurs de forme plus élevés, etc.

Hors période de crues, on note que la totalité du débit transitant dans la rivière est généré par des écoulements de sub-surface, ce qui est en cohérence avec la caractéristique très filtrante des sols de la Morcille, majoritairement sableux.

Topmodel considère ici que le ruissellement a lieu pour tous les épisodes de crues et non uniquement pour des crues engendrées par des épisodes de pluie dont l'intensité dépasserait la capacité d'infiltration du sol. On pourrait donc imaginer ici deux causes dans l'apparition d'un ruissellement conséquent, c'est-à-dire qui participe à une majeure partie de la génération du débit dans la rivière:

- en été : un dépassement de la capacité d'infiltration du sol : l'intensité de pluie est trop forte (orage de classe 2) ;
- en hiver : le sol est déjà gorgé d'eau et saturé par les événements précédents.

Concernant le phénomène de stockage/déstockage de l'eau dans le sou-sol, Topmodel fournit les résultats sur le graphique suivant (exemple avec l'année 2004) :

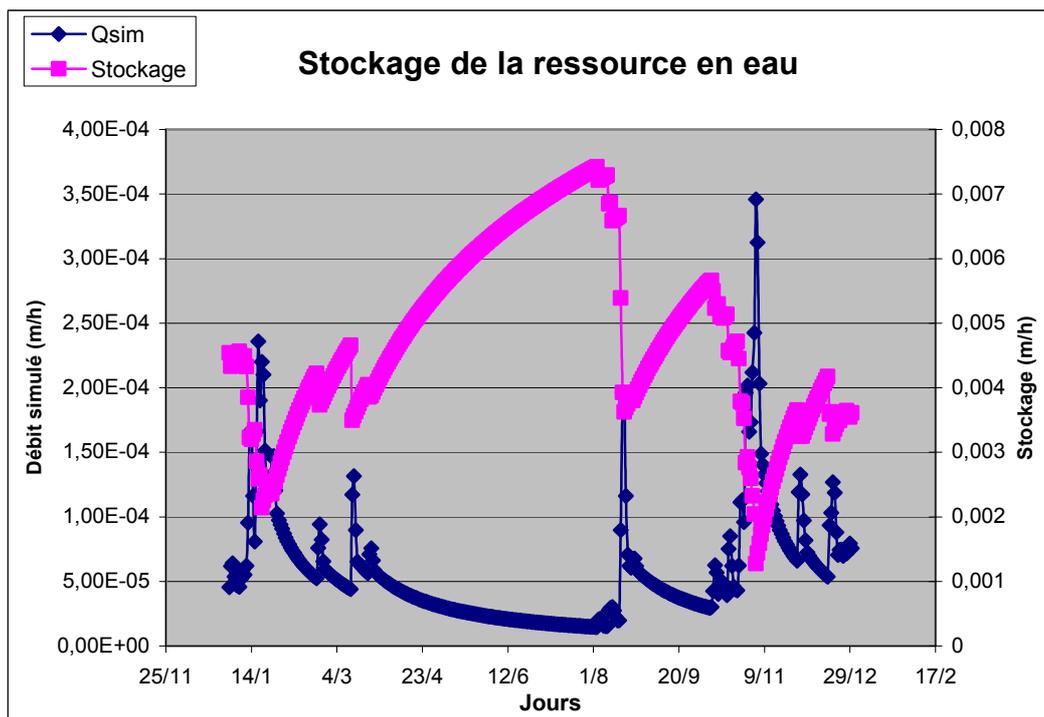


Figure 24 : Graphiques présentant les résultats obtenus avec Topmodel (2/2)

On remarque qu'après chaque crue, on observe un phénomène de stockage de l'eau dans le sous-sol, les épisodes de crue permettant une recharge en eau de la nappe. Néanmoins, de manière ponctuelle, pendant chaque épisode de crue, on observe également un phénomène de déstockage de l'eau qui doit avoir certainement lieu en période de décrue. On retrouve bien sinon le fait que la recharge en eau du sous-sol se fasse principalement en hiver.

Hors période de crue, on constate bien que, globalement, la rivière est alimentée par l'eau du sous-sol.

5-2. Ecoulements de surface et transfert de pollution

Identification des parcelles « à risques »

Pour une meilleure visualisation des mécanismes de transfert mis en jeu, on utilise le logiciel ArcGIS et ses extensions, dont ArcHydroTools qui propose des fonctionnalités de calculs hydrologiques automatisées.

On va s'intéresser en particulier au réseau de fossés, dense, mis en place sur ce bassin versant pour lutter contre l'érosion. En effet, ils constituent des voies de transfert privilégiées, directes et rapides des polluants de la parcelle de vigne jusqu'à la rivière. L'eau charriant ainsi ces polluants par le biais de ces fossés, certaines parcelles ont été identifiées dans une étude précédente ([1] V. GOUY, 2001) comme des parcelles dites « contributives » et donc « à risques », c'est-à-dire pour lesquelles le ruissellement est acheminé à la rivière, de manière plus ou moins directe, par le biais du réseau de fossés. On note que, dans ces conditions, aucune biodégradation des polluants n'est possible.

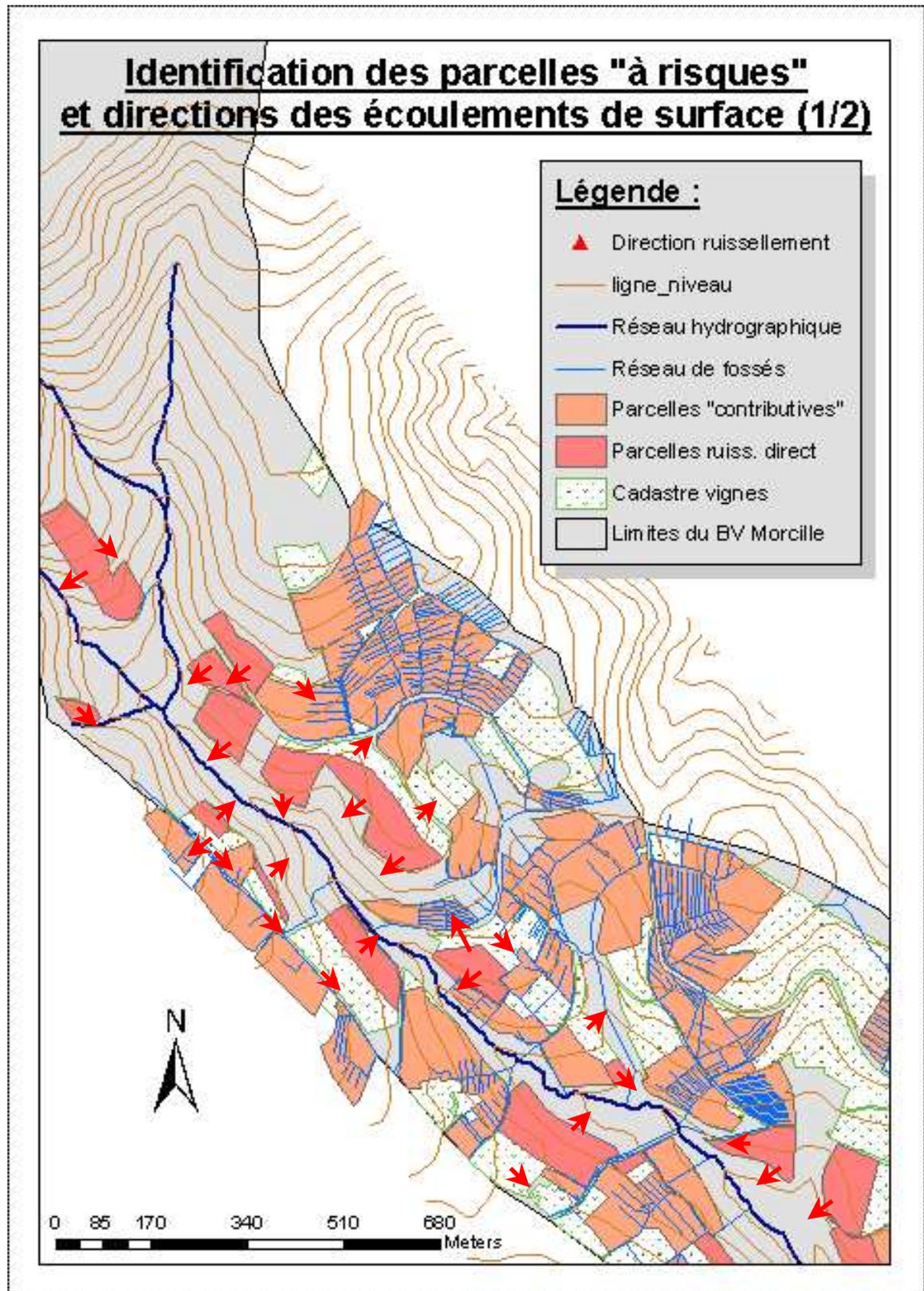
Sur ArcHydroTools, après avoir procédé à une correction (fonctions de pré traitement : comblement des cuvettes, rectification de la position réelle du cours d'eau, etc.) du MNT de résolution de 10 mètres dont nous disposons, on va déterminer le chemin d'écoulement d'une goutte d'eau, quelque soit son point de départ, sur le bassin versant en tenant compte du réseau de fossés.

Les étapes de réalisation sont les suivantes :

- Création d'une nouvelle couche tenant compte à la fois du réseau hydrographique et du réseau de fossés : « Réseau hydro + fossés ».
- Creusement du MNT en fonction de cette nouvelle couche : « MNT creusé ».
- Calcul des directions d'écoulements de surface et de l'accumulation de ceux-ci.
- Définition et segmentation du réseau, délimitation des sous-bassins versants et génération de réseaux de drainage.
- Traçage automatique du chemin d'écoulement de surface de l'eau à partir d'une cellule sur une parcelle.

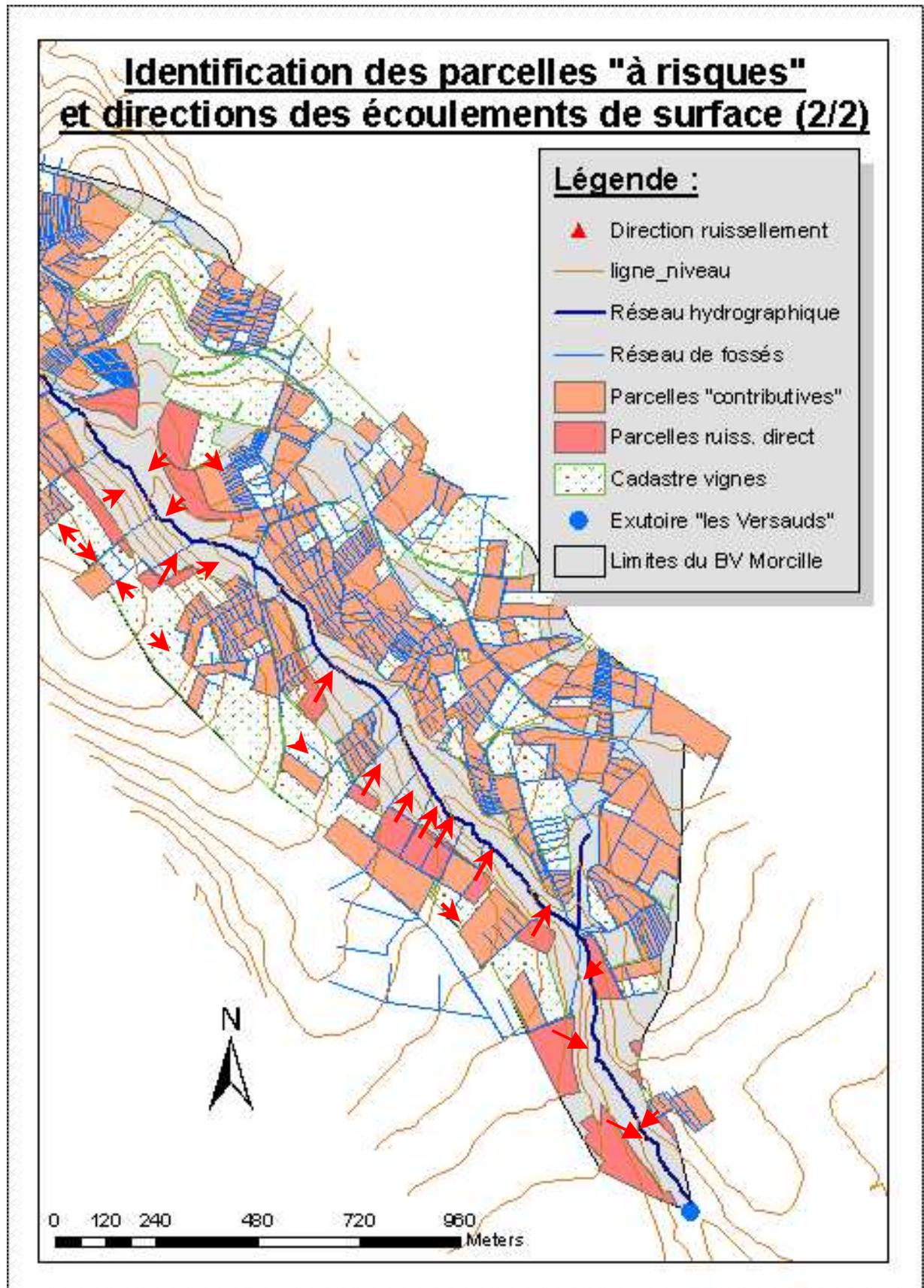
Ayant déjà en possession les parcelles dites « contributives », il restait à déterminer un deuxième type de parcelles potentiellement « à risques » : celles pour lesquelles le ruissellement ne transite pas par le réseau de fossés, ou alors sur une très courte distance, et va plus ou moins directement à la rivière. Ces parcelles bordent en règle générale le cours d'eau.

L'extension ArcHydroTools a donc permis d'établir ce résultat et de mettre également en évidence les directions d'écoulements de surface des parcelles vers la rivière. On a obtenu les 2 cartes suivantes (le bassin versant a été scindé en deux pour des questions de clarté) :



(Auteur : M. ORQUEVAUX)

Figure 25 : Carte des parcelles "à risques" (1/2)



(Auteur : M. ORQUEVAUX)

Figure 26 : Carte des parcelles "à risques" (2/2)

Globalement, on remarque que beaucoup de parcelles (plus de 50 %) font partie des parcelles « à risque » : les écoulements de surface potentiels les traversant et se chargeant ainsi en pesticides se retrouvent très rapidement dans la rivière. Le temps de transit étant trop court, aucun effet d'autoépuration ou de dégradation n'est possible.

Toutefois, concernant ces parcelles dites « à risques », il faut les distinguer selon que le type de sol retrouvé entre la parcelle et la rivière absorbe les polluants (bande enherbée) ou au contraire favorise le ruissellement (bande enherbée mal entretenue, etc.). En effet, lorsque le sol situé entre celle-ci et le cours d'eau est imperméable, elle présente vraiment un risque majeur. Pour les identifier, une étude complémentaire de terrain devrait être réalisée. Au contraire, lorsque l'on note la présence d'une bande enherbée bien entretenue et correctement dimensionnée, le risque est nettement amoindri.

5-3. Ecoulements de sub-surface et transfert de pollution

(Références : [6], [7], Rapports de Romain Giraud, 2009)

Dans cette partie, l'étude du sol, réalisée en 2009 par Romain Giraud, sur la partie aval du sous-bassin versant (exutoire : « les Versauds ») de la Morcille, se révèle être essentielle dans la compréhension des mécanismes qui régissent les écoulements de sub-surface et les modes de transferts des polluants par ces voies de circulation de l'eau. La caractérisation de ces sols s'est faite à l'échelle de la parcelle, ce qui semble suffisant pour l'étude qui va suivre.

Les paramètres qui ont été pris en compte pour le descriptif des sols sont les suivants :

- Concernant la capacité d'infiltration :
 - La perméabilité : la texture et la structure du sol ;
 - L'état hydrique : il dépend de la texture, de la structure et de la profondeur du substratum ;
 - L'activité biologique : la présence de macrofaune (rongeurs, taupes, vers de terres) favorise la formation de voies d'écoulements rapides (macropores en général tubulaires) vers les horizons de profondeur des sols. Enfin, une forte activité biologique accélère la dégradation des pesticides dans le temps.
 - La pente : la pente favorise le ruissellement direct.
 - L'état de surface du sol : un sol nu favorise le ruissellement hortonien alors qu'une densité importante de végétation favorise l'infiltration.
 - Le sol et la morphologie locale : une dépression ou un replat favorise la rétention des eaux et une hydromorphie plus ou moins marquée. Des sols de plateau sont quant à eux possiblement hydromorphes.
 - L'hydromorphie : elle permet de diagnostiquer un engorgement ou passage temporaire de l'eau dans le sol.

- Concernant la capacité d'adsorption :
 - Le taux de matière organique : premier constituant adsorbant dans le sol, il concerne les flux infiltrés et la capacité des pesticides à être adsorbés par les particules solides du sol. Plus la teneur en M.O est importante et plus le sol possède des capacités d'adsorption (à relier avec la teneur en argile, deuxième constituant adsorbant).
 - Le pH : le pH a un rôle important dans le processus d'adsorption, un pH acide facilitera la désorption des pesticides.

Le résultat de cette étude est représenté sur la carte ci-dessous :

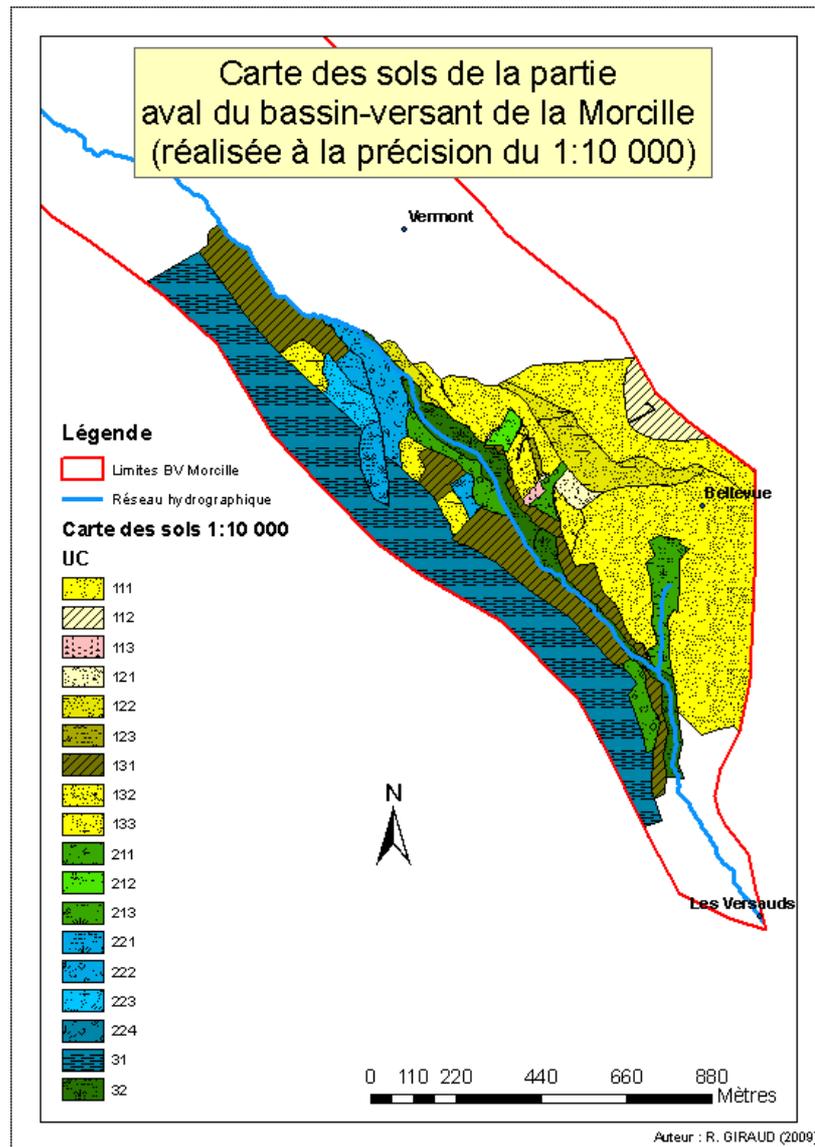


Figure 27 : Carte des sols de Romain Giraud

A partir de cette carte, on a donc repéré les différentes Unités Cartographiques (UC) susceptibles de présenter des sols favorables aux écoulements de sub-surface. On a alors retenu les 3 catégories de parcelles suivantes qui sont présentées dans la carte qui suit :

- **Couche « parcelles_sub-surf_proche surf »** : parcelles pour lesquelles le sol est tel que, des écoulements de sub-surface, proches de la surface du sol (de 0 à 50 cm en dessous de la surface du sol), sont susceptibles d'apparaître. Ceci correspond aux UC 112 et 31.
- **Couche « parcelles_sub-surf_moyen »** : parcelles pour lesquelles des écoulements de sub-surface peuvent être constatés en profondeur moyenne (de 0 à 50/80 cm en dessous de la surface du sol). Ceci correspond aux UC 111, 121, 212 et 223.
- **Couche « parcelles_sub-surf_profond »** : parcelles pour lesquelles des écoulements de sub-surface sont susceptibles d'apparaître en profondeur (de 50 à plus de 100 cm en dessous de la surface du sol). Ceci correspond aux UC 222 et 32.

Remarque : les autres UC non évoquées ne présentent pas d'écoulements de sub-surface ou sont difficiles à diagnostiquer.

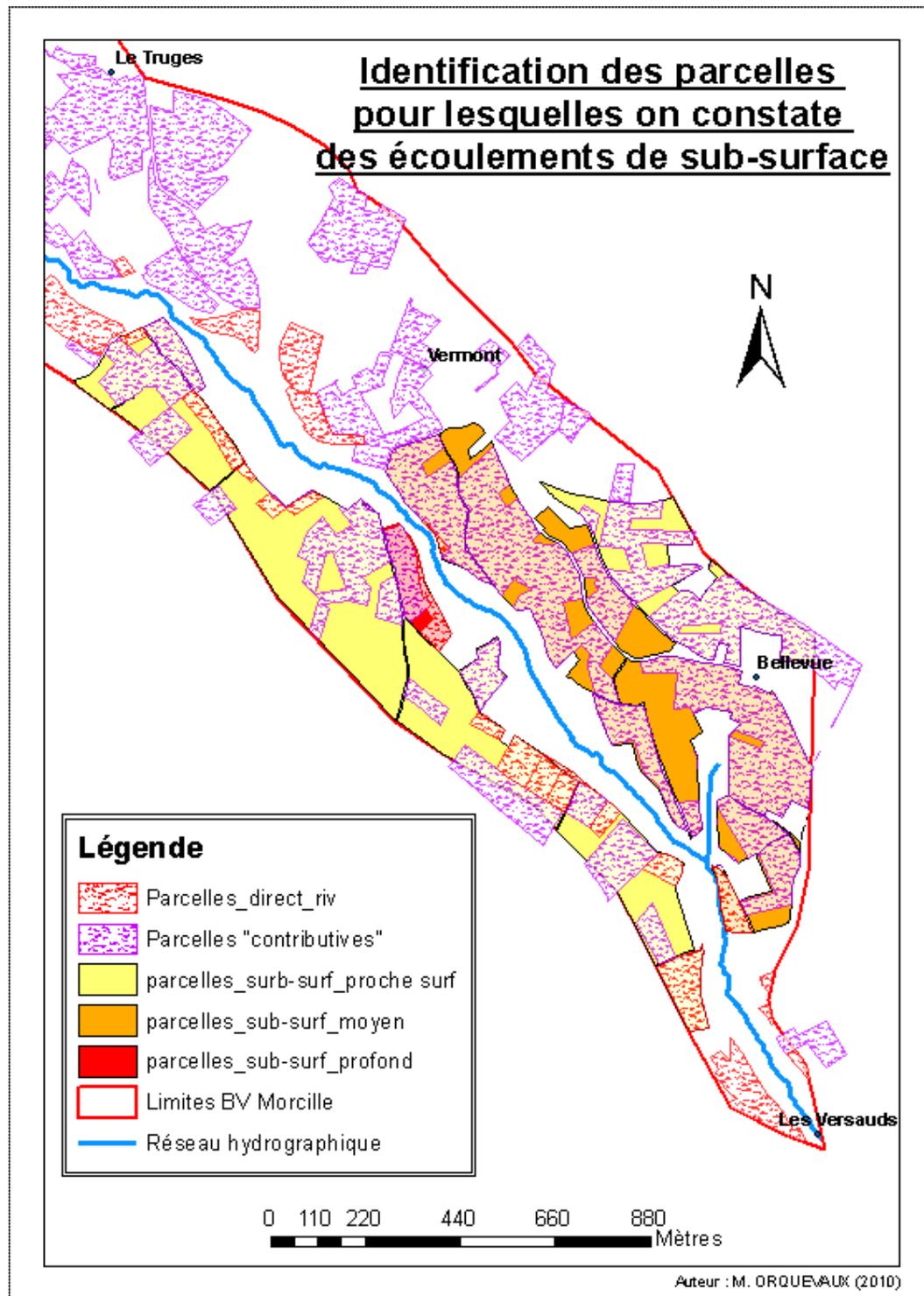


Figure 28 : Parcelles présentant des écoulements en sub-surface

D'après cette carte, sur cette partie aval du sous-bassin versant de la Morcille qui a pour exutoire le site 2 « les Versauds », le nombre de parcelles pour lesquelles on constate des écoulements de sub-surface (toutes profondeurs confondues) est élevé. On note de plus que certaines de ces parcelles ont déjà été qualifiées de parcelles « à risques » en ce qui concerne leur ruissellement de surface.

A l'aide du logiciel ArcGIS et de son extension ArcHydroTools, on a également localisé les aires de drainage et leur segment hydrographique associé pour les écoulements de sub-surface en faisant l'hypothèse que le socle du bassin versant était parallèle à la surface du sol. Il s'agit certes d'une hypothèse forte mais elle seule peut permettre de déterminer la directions des flux ainsi que leurs zones d'accumulation en sub-surface.

Voir cartes ci dessous :

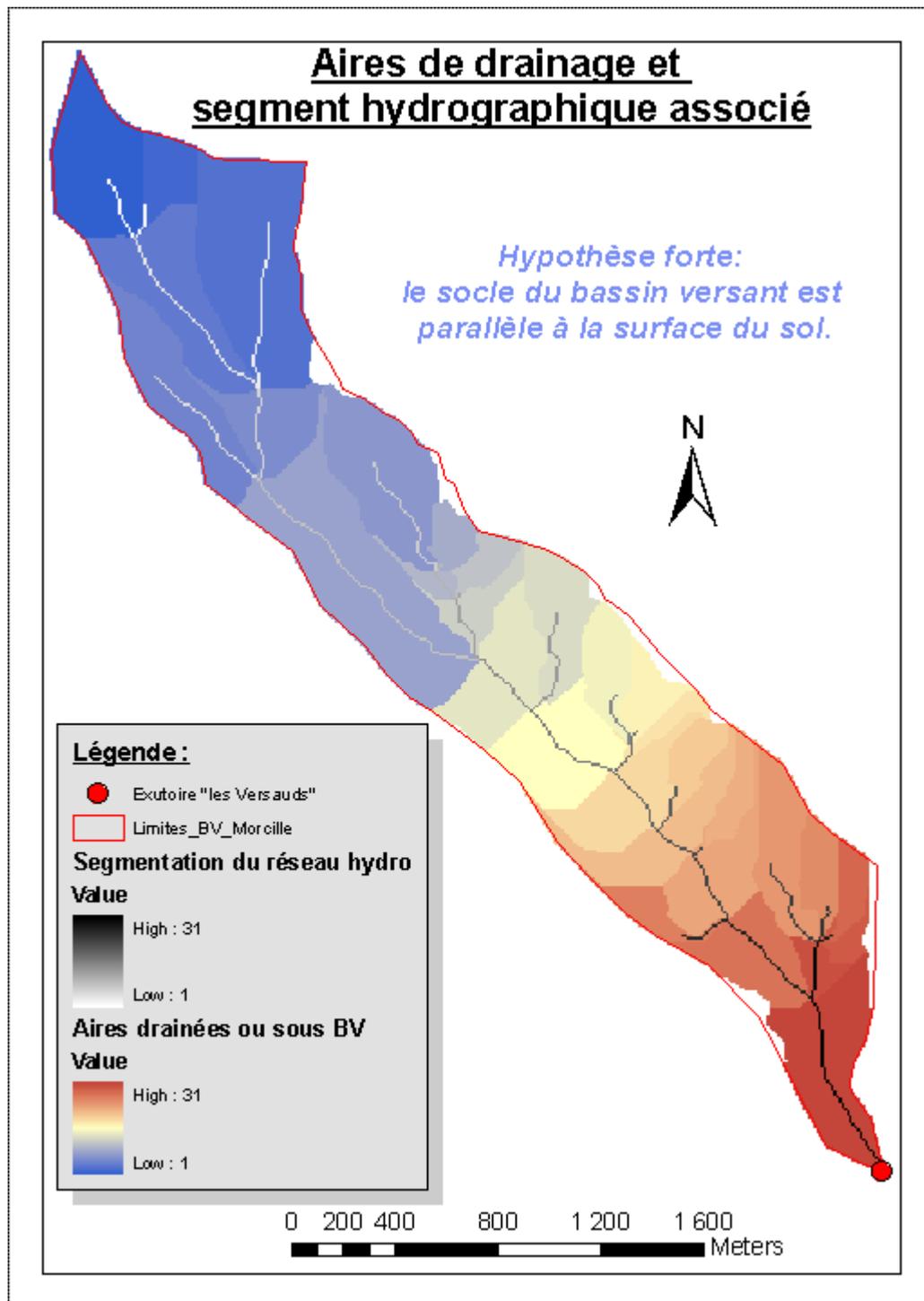


Figure 29 : Carte des aires de drainage et segment hydrographique associé

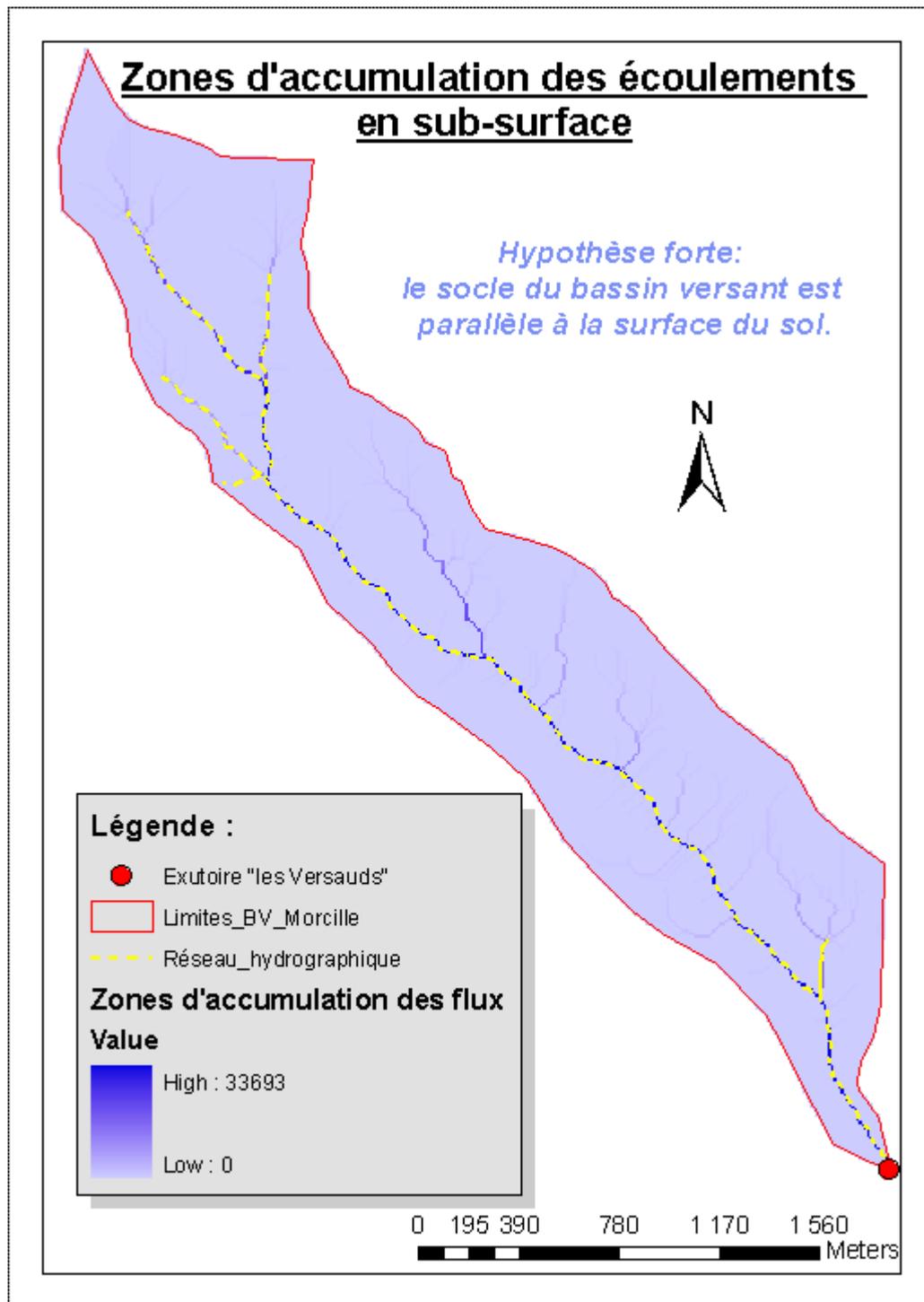


Figure 30 : Zones d'accumulation des flux

5-4. Quelques indications sur le sous-sol

Même si les informations disponibles sur le sous-sol du bassin versant de la Morcille sont insuffisantes pour permettre une bonne compréhension de son fonctionnement, quelques éléments peuvent toutefois être apportés même si ceux-ci restent purement théoriques et se basent uniquement sur la localisation géographique de ce bassin en zone de socle de la bordure orientale du Massif-Central, dans le Haut-Beaujolais.

On souligne le fait que ces informations ont été obtenues de **Monsieur Laurent VERNAY, hydrogéologue à la DREAL** (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement).

Les formations majoritairement en place sur le bassin versant de la Morcille sont constituées :

- de dépôts sédimentaires, constitués d'alluvions résiduelles, concentrées dans les talwegs et en épandages sur le piémont, récentes (=alluvions de fond de vallée de la Morcille) ou plus anciennes (=anciens cônes de déjections torrentiels, parfois perchés), ainsi que de colluvions de bas de versants (=éboulis, alluvions anciennes remaniées ou dépôts de ruissellements) ;
- d'altérites (grès et sables quartzeux principalement, que l'on désignera par le terme "arène granitique") issues de la dégradation des roches cristallines originelles (granites porphyroïdes à biotites et leucogranites à micas) ;
- de formations cristallophylliennes constituant le substratum plus en profondeur.

D'un point de vue hydrogéologique, se développent dans ces formations :

1. une nappe superficielle dans l'arène granitique (altérites), en relation avec le cours d'eau qu'elle alimente majoritairement (soutien en quasi-totalité du débit en étiage) ;
2. des petites nappes perchées, peu étendues et peu productives, à l'occasion de conditions très locales favorables, pouvant alimenter la rivière et la nappe des altérites par le biais de sources et réinfiltrations. Leur présence s'explique par le fait que les sur-épaisseurs de sable constituent des poches capables de renfermer de l'eau et vraisemblablement alimentées par infiltration et par l'écoulement sub-surfacique.
3. des écoulements hypodermiques, de sub-surface, peuvent également donner naissance à des petites infiltrations et alimentation de sources et captages très superficiels lors de pluies.

Remarque : Il est difficile de pouvoir préciser la puissance et l'extension de chacune des petites nappes perchées, ainsi que leurs relations exactes (connexions et sens de circulations) mais il est probable que les infiltrations rejoignent majoritairement la nappe des altérites, puis la rivière qui en est l'exutoire.

Or, ces éléments de réponse semblent complètement concorder avec des résultats retrouvés sur le terrain lors de l'étude menée par des étudiants de l'INAPG (**[16] : Julie ESTIVAL, Romain HUBERT, 2007**). En effet, des sondages ont été réalisés à la tarière le long de différents transects pour en évaluer le fonctionnement hydrogéologique. Différentes configurations, dépendant de conditions locales particulières et confirmant les hypothèses précédentes, ont été mises en exergue. Elles sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

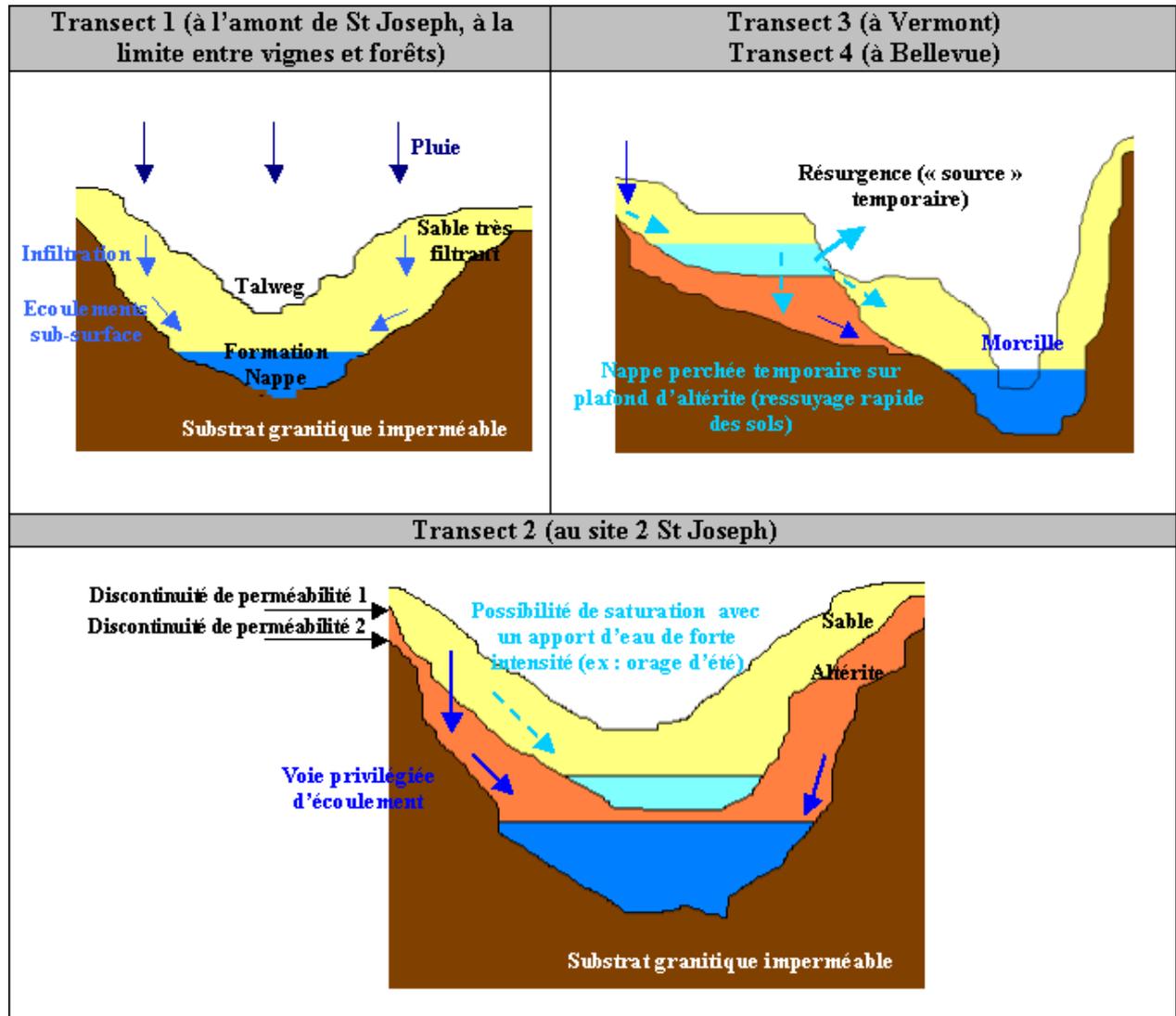


Figure 31 : Quelques fonctionnements types hydrologiques

Remarque 1 : on retrouve bien systématiquement les formations majoritairement en place sur le bassin versant de la Morcille décrites ci-dessus (dépôts sédimentaires sous forme de sable très filtrant, altérites et substratum granitique).

Remarque 2 : l'épaisseur du sol diminue fortement en haut de crête.

Remarque 3 : cette étude prouve la présence d'un réseau complexe de nappes diffuses rejoignant la Morcille.

Remarque 4 : le temps de ressuyage des sols de ce bassin est souvent court (sols sableux filtrants) ce qui explique qu'en cas de pluie, les nappes temporaires disparaissent rapidement de l'horizon de surface.

L'utilisation de traceurs (circulation des eaux), l'emploi de bougies poreuses (teneurs en eau des sols) et les analyses physico-chimiques et isotopiques des eaux et des sols (datation sur traceurs à faible cycle) pourraient être utiles pour une meilleure compréhension des phénomènes de transfert des polluants au sein du sous-sol, de la nappe ainsi que des nappes perchées.

5-5. Conclusion sur le fonctionnement du bassin versant de la Morcille

Concernant les évolutions des concentrations en polluants, il est plus que vraisemblable que les modalités de transferts des pesticides à l'occasion des phénomènes de précipitations et de crues aient un rôle très important à jouer (effet de chasse ou lessivage).

D'autre part, on peut distinguer, selon le mode de transfert, différents degrés de contamination :

- Degré très élevé (temps de transit trop court pour permettre une dégradation des polluants) : le transfert a lieu en surface (ruissellement hortonien ou réseau de fossés) sur les parcelles de vigne « à risques ». On note que la présence de bandes enherbées, correctement dimensionnées et bien entretenues, comme zone tampon entre la parcelle et la rivière, diminue considérablement ce risque.
- Degré moyen à élevé : le transfert se fait par le biais d'écoulements rapides en sub-surface : une amorce de dégradation, des phénomènes d'adsorption sont possibles dans le sol.
- Degré moyen : le transfert se fait par le biais d'écoulements lents en sub-surface : le temps de séjour dans le sol est allongé, favorisant ainsi les phénomènes décrits au point précédent.
- Degré plus faible : le transfert a lieu dans le réseau de nappes, dans la nappe et dans le sous-sol : le temps de séjour est en général très grand assurant ainsi une bonne biodégradation des polluants.

On voit bien qu'en fonction du type de crues, le fonctionnement du bassin versant diffère : certaines voies d'écoulement sont privilégiées selon leur type. On rappelle que le bassin versant de la Morcille est globalement soumis à une forte infiltration de l'eau de pluie du fait de la caractéristique sableuse très filtrante prépondérante de ses sols.

Synthèse : Par rapport à la typologie de crues établie précédemment, on a les tendances suivantes qui se confirment :

a) Classe 1 : Hiver

Cette classe de crues est caractérisée par des épisodes de pluie peu intenses favorisant ainsi l'infiltration de l'eau dans le sol, en général composé en majorité de sable très filtrant, à moins que le sol ne soit déjà saturé en eau (enchaînement de nombreux épisodes) et que l'on ait alors des phénomènes de ruissellement sur les parcelles ou dans les talwegs. Cette infiltration de l'eau dans le sol entraîne la formation de nappes (au niveau des talwegs) ainsi que l'apparition d'un réseau complexe de nappes perchées temporaires, créant ainsi par endroit des sources elles-mêmes temporaires ou alimentant la nappe alluviale de la Morcille.

Globalement, sauf si le sol est saturé en eau, d'un point de vue du transfert des pesticides, dont la part rémanente sur les parcelles de vignes et dans les sols est faible à cette époque, cela se traduit par un plus long temps de séjour dans le sol et donc par une meilleure biodégradabilité de ceux-ci. Les écoulements majoritaires se font en sub-surface de manière plutôt lente. Il existe aussi des écoulements en proche surface, plus rapides, mais dans une proportion moindre.

Finalement, cette classe de crues, de part les caractéristiques de ces événements et de part son occurrence en hiver (aucun traitement phytosanitaire à cette époque et peu de produits rémanents dans le sol), présente peu de risques quant à la contamination de l'eau. Seule une saturation du sol en eau peut entraîner un transfert plus rapide des pesticides rémanents à la rivière.

b) Classe 2 : Eté, type 1

Cette classe de crues se caractérise, quant à elle, par des épisodes de pluie très violents qui engendrent du ruissellement hortonien (dépassement de la capacité d'infiltration du sol) sur les parcelles de vignes. On constate également toujours un phénomène d'infiltration de l'eau dans le sol (sableux, très filtrant) qui peut constituer, par endroit, des zones de saturation locale (si on a par exemple une discontinuité de perméabilité entre du sable et des altérites). Toutefois, le temps de ressuyage étant très court, cette accumulation d'eau locale disparaît très vite.

Globalement, concernant le transfert des pesticides, dont les concentrations rémanentes sur les parcelles de vignes sont très élevées (application récente), on constate le fait que ces produits se retrouvent très rapidement dans la rivière (de l'ordre de l'heure, temps de concentration moyen = 3 heures). En effet, ils sont véhiculés pour la majeure partie depuis les parcelles « à risques » jusqu'à la rivière par le biais du réseau de fossés (parcelles « contributives ») ou par arrivée directe du ruissellement de surface pour les parcelles les plus proches du cours d'eau. On note qu'en plus du ruissellement, il existe des écoulements en sub-surface rapides. Les temps de transfert étant bien trop courts en général, aucune biodégradation n'est possible.

Cette classe de crues, de part les caractéristiques de ses événements et de part son occurrence (pendant et juste après la période d'application des produits phytosanitaires), constitue une classe « à risques » pour la qualité de l'eau.

c) Classe 3 : Eté, type 2

Cette dernière classe de crues présenterait plutôt des caractéristiques à la fois de la classe 1 (intensité de pluie plutôt faible à moyenne ne générant pas de ruissellement hortonien et favorisant une bonne infiltration de l'eau dans le sol) mais aussi de la classe 2 (période à risques d'application des pesticides et temps de réponse court du bassin versant). Ceci laisserait donc à penser que des écoulements rapides en sub-surface sont privilégiés, contrairement à la classe 1 pour laquelle ils sont plutôt lents (saturation du sol en eau).

Ainsi, globalement, cette classe de crues, tout comme la classe 2, présente des risques de transfert élevés des polluants de la parcelle jusqu'à la rivière, même si le temps de séjour dans le sol est un peu plus long (meilleure biodégradation ou adsorption). En effet, les caractéristiques de réaction du bassin versant sont généralement un peu plus grandes que celles de la deuxième classe, s'expliquant principalement par une majorité d'écoulements en sub-surface.

Remarque : on note bien que toute cette conclusion est basée sur des hypothèses et que pour lever certaines incertitudes ou confirmer les tendances avancées, il faudrait procéder à des études complémentaires en géochimie, utiliser des traceurs pour la circulation des eaux, etc.

Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en exergue la complexité de la mise au point d'un schéma de fonctionnement pour le bassin versant de la Morcille. En effet, beaucoup de paramètres, souvent interdépendants, sont à prendre en compte et trop peu de données sont disponibles sur le sous-sol. De plus, son fonctionnement présente une saisonnalité, comme cela a été montré. La mise au point d'un modèle informatique semble donc indispensable pour mieux illustrer cette complexité et obtenir des données complémentaires.

Toutefois, une typologie de crues, composée de trois classes différentes, a pu être établie et a permis de mettre en évidence, concernant le fonctionnement du bassin versant en regard des transferts de pesticides et de métaux, l'importance respective du ruissellement et des écoulements de proche sub-surface pendant les crues. Même si, globalement, le bassin versant de la Morcille est soumis à une forte infiltration de l'eau de pluie du fait de la caractéristique sableuse très filtrante de ses sols, il arrive qu'au cours de certains événements intenses (orages d'été par exemple), un phénomène de ruissellement hortonien apparaisse, provoquant ainsi des pics de pollution dans la rivière. Des zones à risques (exemple : parcelles contributives) ainsi qu'une période à risques (de Mars à Juillet) ont été identifiées.

D'autre part, cette étude a aussi permis d'avoir une vision relativement exhaustive des données disponibles sur ce bassin versant et ainsi donc, de mettre en évidence des comportements particuliers concernant les MES, les produits phytosanitaires et les métaux. A l'issue de cette phase, l'analyse des données a révélé une pollution avérée du cours d'eau à la fois d'origine viticole et vinicole mais aussi d'origine domestique, les effluents d'eaux usées étant directement rejetés dans la rivière. De plus, des caractéristiques du bassin versant de la Morcille ont été mises en exergue comme, par exemple, son temps de réponse qui est plutôt court (fortes pentes), ses courbes IDF et QDF qui nous renseignent sur la période de retour de ses événements, ses sols perméables, etc.

En conclusion de cette étude et pour une meilleure compréhension du fonctionnement de ce petit bassin versant, lieu de genèse des eaux, des études complémentaires doivent être réalisées afin de lever certaines incertitudes, évoquées dans ce rapport, notamment concernant l'hydrogéologie (réseau complexe de nappes perchées, etc.) et la géochimie (origine anthropique ou naturelle de certains métaux, etc.).

Concernant la mise en place d'actions correctives, en parallèle d'une réduction de la quantité d'intrants utilisés en viticulture, l'idée majeure pour limiter les transferts de la pollution de la parcelle jusqu'à la rivière et favoriser la biodégradation serait de procéder à des aménagements locaux, comme : la mise en place de zones tampons ou de zones humides artificielles comme interfaces entre les rejets en eaux usées et la rivière; la réduction des chemins privilégiés de l'eau (correction des ravines en diffusant dès l'amont l'écoulement de l'eau qui a tendance à se concentrer dans les chemins, la correction des fossés mis en place pour lutter contre l'érosion); la mise en place de bandes enherbées autour des parcelles et la pratique de l'enherbement des inter-rangs ; etc. Un des problèmes qui se pose concerne l'entretien de ces aménagements. A qui incombe la tâche de la maintenance de ceux-ci ?

Bibliographie

Références des études et des thèses réalisées sur le bassin versant de la Morcille ou pouvant aider à la compréhension de son fonctionnement :

- [1] GOUY V., 2001, Diagnostic des circulations superficielles de l'eau sur un petit bassin versant du Haut-Beaujolais. Volet 2 : Diagnostic du bassin versant pilote de la Morcille à Villié Morgon. Définition d'un plan d'action de l'opération « Protection des Eaux en Beaujolais Viticole », Rapport d'étude du Cemagref (France), 58 p.
- [2] RABIET M., MARGOUM C., GOUY V., CARLUER N., COQUERY M., 2006, Transfert de pesticides et métaux dans un petit bassin versant viticole. Etude préliminaire de l'influence des conditions hydrologiques sur le transport de ces contaminants, Cemagref (France), Ingénierie n° spécial, p.65 à 75.
- [3] GOUY V., NIVON C., 2001-2006, Protection des eaux dans le Beaujolais Viticole. Caractérisation et suivi de la qualité de l'eau sur le bassin versant de la Morcille sur la période 2001-2006, Cemagref et Chambre d'Agriculture du Rhône, 81 p.
- [4] TAILLANDIER P., 2007-2008, Traitement de données et étude du fonctionnement hydrologique du bassin versant de la Morcille, Rapport de stage d'assistant ingénieur au Cemagref, 85 p.
- [5] LACAS J. G., 2005, Processus de dissipation des produits phytosanitaires dans les zones tampons enherbées. Etude expérimentale et modélisation en vue de limiter la contamination des eaux de surface. Thèse préparée au sein du Cemagref de Lyon, 307 p.
- [6] GIRAUD R., 2009, Cartographie des sols du bassin-versant de la Morcille en appui à l'évaluation du risque de contamination des eaux par les pesticides. Notice de la carte des sols., Stage réalisé au Cemagref de Lyon, 66 p.
- [7] GIRAUD R., 2009, Développements méthodologiques pour l'enrichissement et la validation d'une base d'information sur les sols en Beaujolais viticole, en appui à l'évaluation du risque de contamination des eaux par les pesticides., Stage réalisé au Cemagref de Lyon, 25 p.
- [8] RABIET M., MARGOUM C., GOUY V., CARLUER N., COQUERY M., 2010, Assessing pesticide concentrations and fluxes in the stream of a small vineyard catchment – Effect of sampling frequency, Publication dans la revue "Environmental pollution", 12 p.
- [9] RABIET M., 2007, Evaluation des transferts et de la spéciation (dissous/particulaire) des contaminants dans un cours d'eau de bassin versant agricole, Cemagref, 24 p.
- [10] LAVIEILLE D., 2009, Evaluation de la qualité chimique des cours d'eau : pertinence, atouts, limites et domaine de validité d'un panel de méthodes d'échantillonnage in situ, Cemagref, 65 p.

[11] ARALEP, 2009, Suivi de la qualité des cours d'eau du Nord Beaujolais – Etude 2008, Syndicat Mixte des Rivières du Beaujolais, 64 p.

[12] TAGHAVI L., MERLINA G., DURBE G., PROBST A., PINELLI E., PROBST J.-L., 2009, Dynamique de transfert des pesticides en périodes de crue sur le bassin-versant de la Save (Sud-Ouest de la France), Résumé du XXXIXème Congrès du Groupe Français des Pesticides- 13-15 mai 2009, à Toulouse, 1 p.

[13] FREDON Rhône-Alpes, 2008, Caractérisation et suivi de la qualité de l'eau. Mise en forme et analyse des résultats bruts – Données 2007. Bilan des trois campagnes de suivi des pesticides., Chambre d'Agriculture du Rhône, 50 p.

[14] LEFRANCOIS Julie, 2007, Dynamiques et origines des matières en suspension sur de petits bassins versants agricoles sur schiste., Thèse préparée à l'INRA de Rennes, 255 p.

[15] SIGG L., STUMM W., BEHRA P., 1992, Chimie des milieux aquatiques. Chimie des eaux naturelles et des interfaces dans l'environnement., MASSON Paris Milan Barcelone Bonn, 391 p.

[16] : ESTIVAL J., HUBERT R., 2007, Etude hydrologique du bassin versant de la Morcille (Beaujolais Nord – 69), INAPG, 15p.

[17] : GOUY V., 2003, Rôle combiné des fossés et des zones tampons dans le diagnostic de la pollutions diffuse par les produits phytosanitaires, CEMAGREF, 57 p.

[18] : SAULNIER G.-M., 1996, Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TopModel, Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, 275 p.

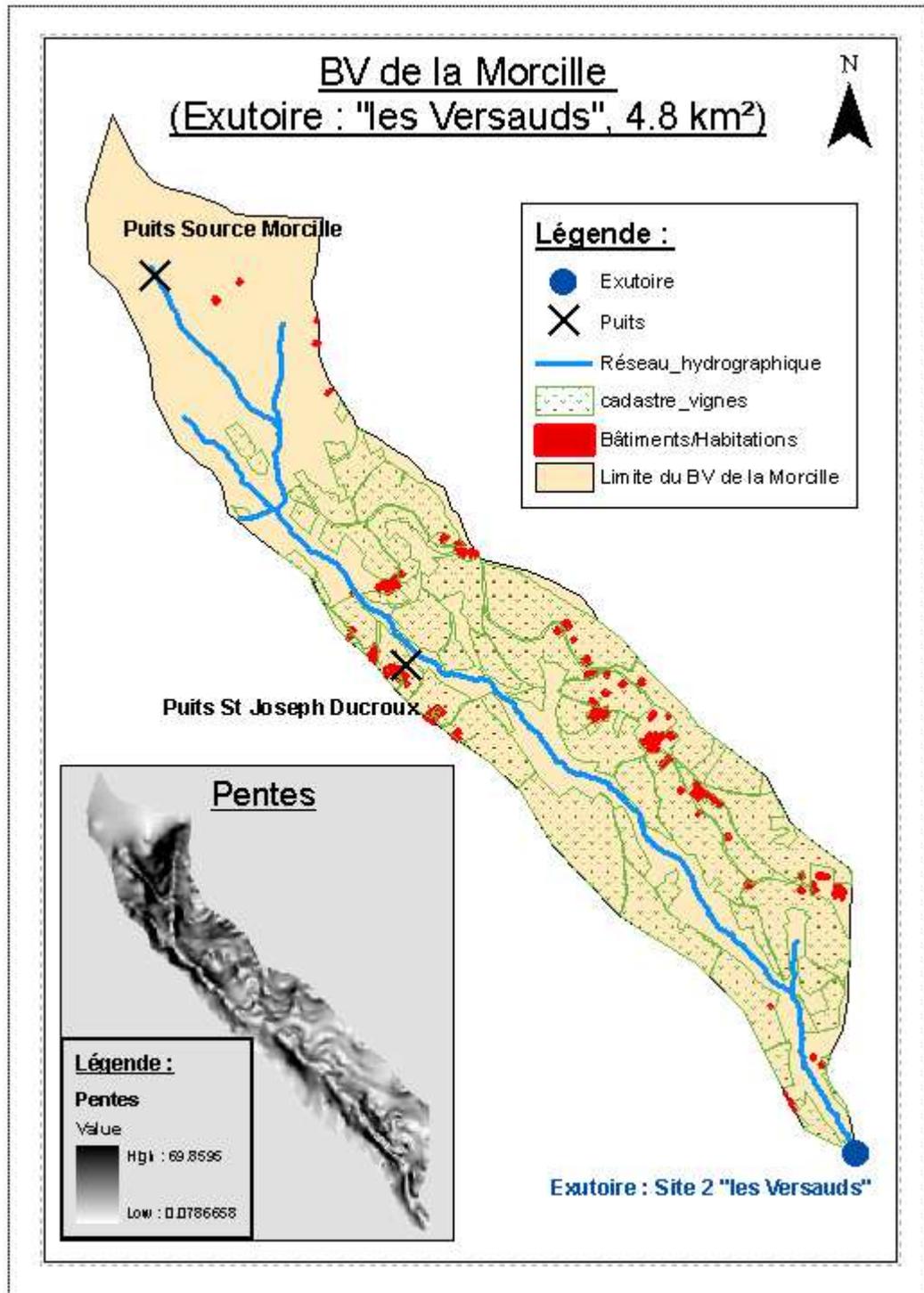
Sites Internet :

Catalogue des produits phytosanitaires et des substances actives (propriétés du Diuron par exemple, etc.) : <http://e-phy.agriculture.gouv.fr/>.

Annexes

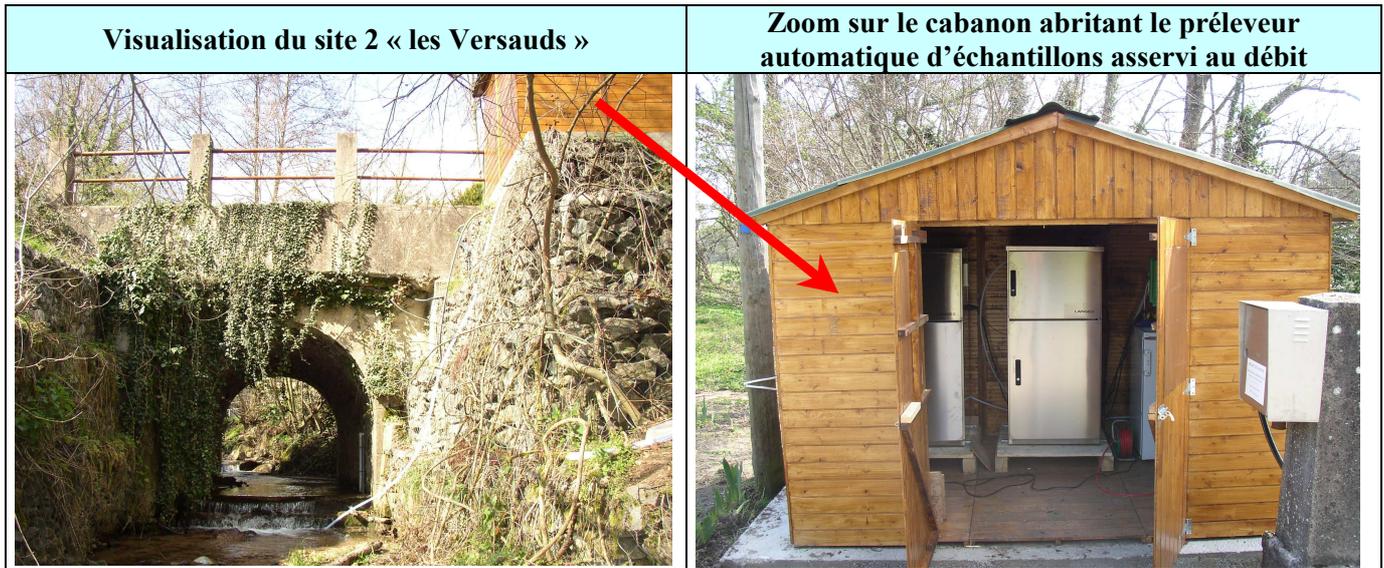
Annexe 1 : Carte du sous-bassin versant de la Morcille (Exutoire « les Versauds »)	74
Annexe 2 : Photos du site 2 "les Versauds" et des équipements du Cemagref, 2007	75
Annexe 3 : Photos des 4 principaux puits, 2010	75
Annexe 4 : Photos des piézomètres sur la bande enherbée (source : J.-G. Lacas), 2005	76
Annexe 5 : Histogramme des pluies annuelles (de 1992 à 2009), site « le Calvaire »	76
Annexe 6 : Tableau présentant les valeurs mensuelles d'ETP obtenues à Liergues	77
Annexe 7 : Variation des débits annuels du mois de Novembre aux Versauds	77
Annexe 8 : Pollution du bassin versant de la Morcille aux orthophosphates PO43-	77
Annexe 9 : Courbes [MES]=f(Q) : récapitulatif de la relation intensité de pluie et recharge en particules/forme de courbe pour chaque évènement de crues	78
Annexe 10 : Illustration des pics de concentration en pesticides en période de crues	78
Annexe 11 : Evolution de l'utilisation des produits phytosanitaires dans le Beaujolais	80
Annexe 12 : Rémanence du Norflurazon dans l'eau, interdit depuis 2003 (concentrations moyennes annuelles)	81
Annexe 13 : Propriétés des principaux produits phytosanitaires utilisés	81
Annexe 14 : Valeurs seuil de référence (PNEC ou NQE) pour les métaux	82
Annexe 15 : Gradient amont/aval des concentrations en métaux dans l'eau de la Morcille, signe d'une pollution d'origine anthropique	82
Annexe 16 : Etude de la provenance de l'Aluminium et du Fer : naturelle ou anthropique ? de la nappe ou de la rivière ?	83
Annexe 17 : Etude du comportement du Li, Ba, Sr, Rb et de l'U	84
Annexe 18 : Détail des calculs pour la réalisation des courbes IDF de pluies	85
Annexe 19 : Exemple de détermination des paramètres hydrologiques d'une crue de l'échantillon E' : évènement du 14/11/2002	88

Annexe 1 : Carte du sous-bassin versant de la Morcille (Exutoire « les Versauds »)

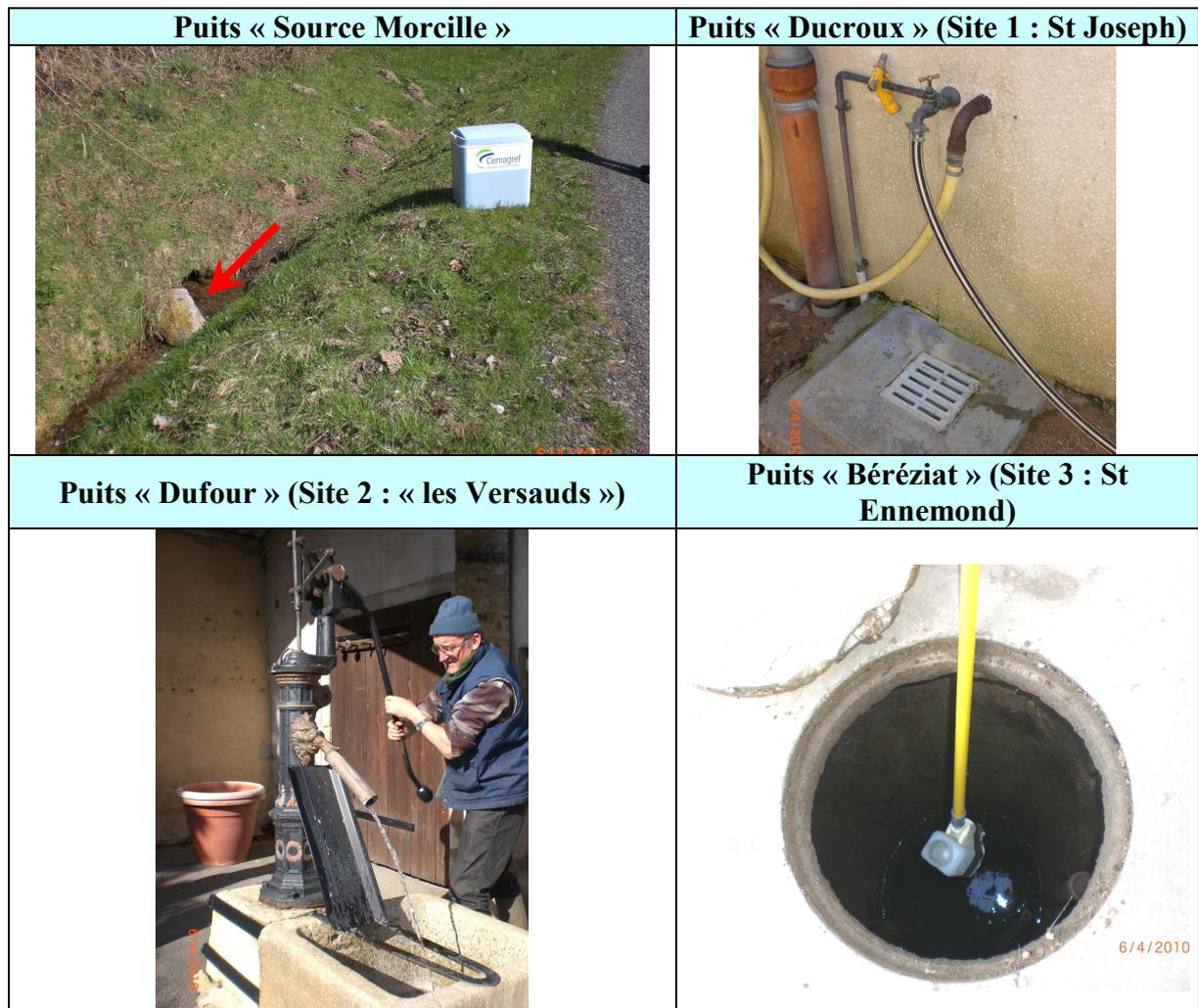


(Auteur : M. ORQUEVAUX)

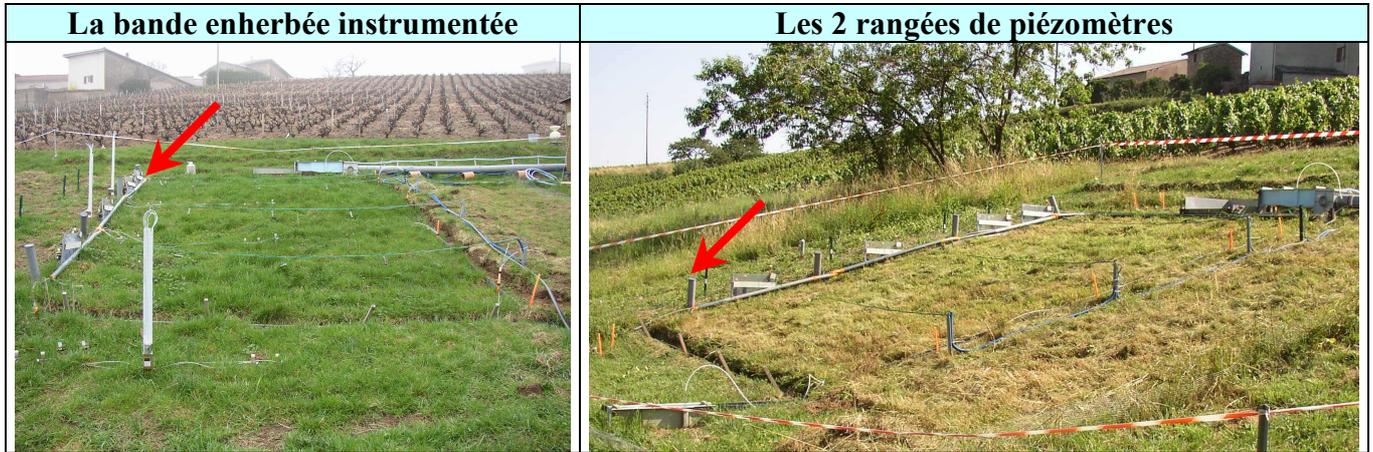
Annexe 2 : Photos du site 2 "les Versauds" et des équipements du Cemagref, 2007



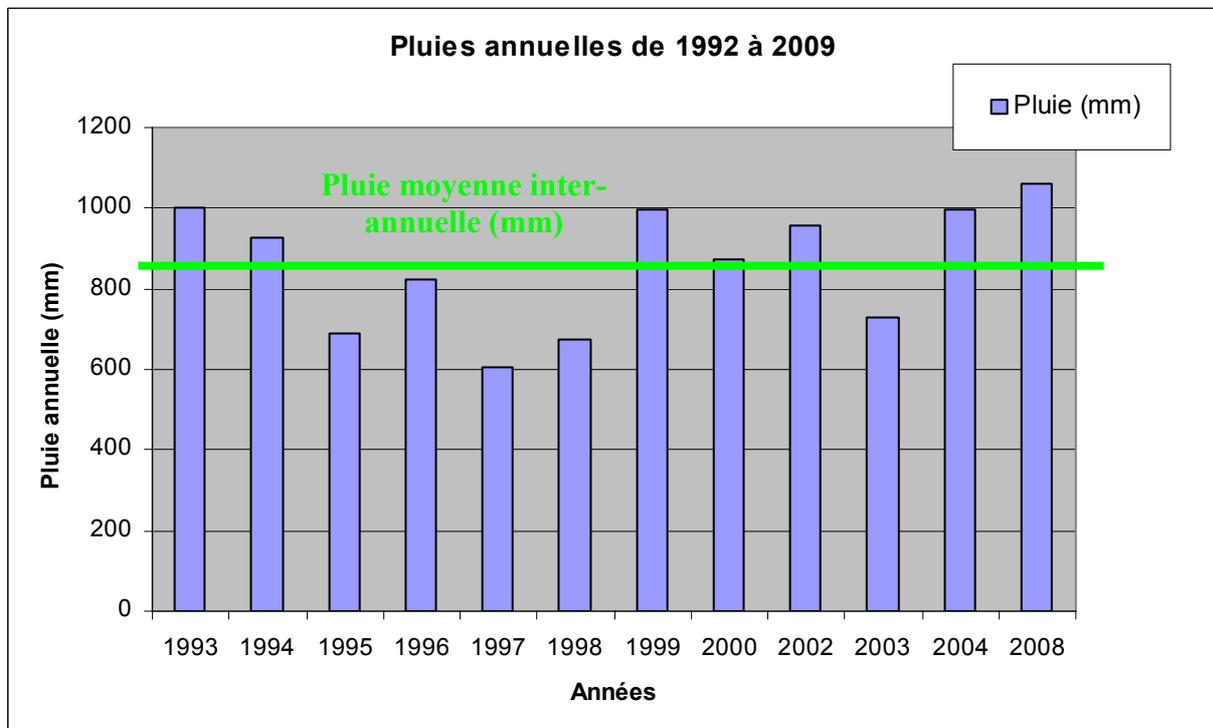
Annexe 3 : Photos des 4 principaux puits, 2010



Annexe 4 : Photos des piézomètres sur la bande enherbée (source : J.-G. Lacas), 2005



Annexe 5 : Histogramme des pluies annuelles (de 1992 à 2009), site « le Calvaire »

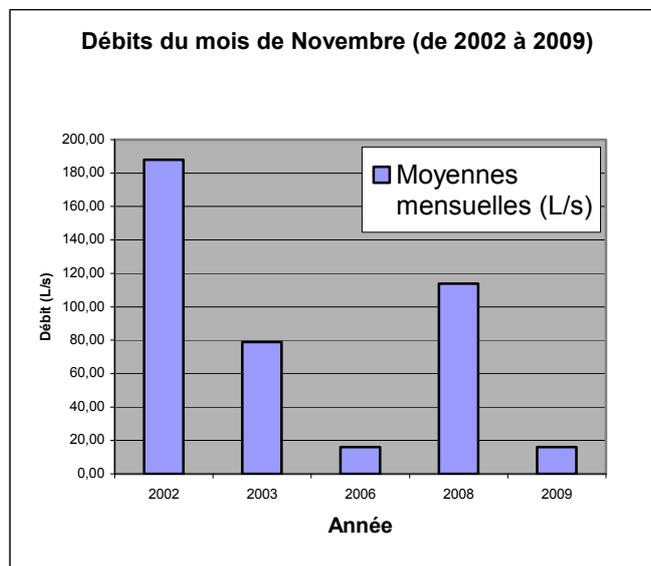


Annexe 6 : Tableau présentant les valeurs mensuelles d’ETP obtenues à Liergues

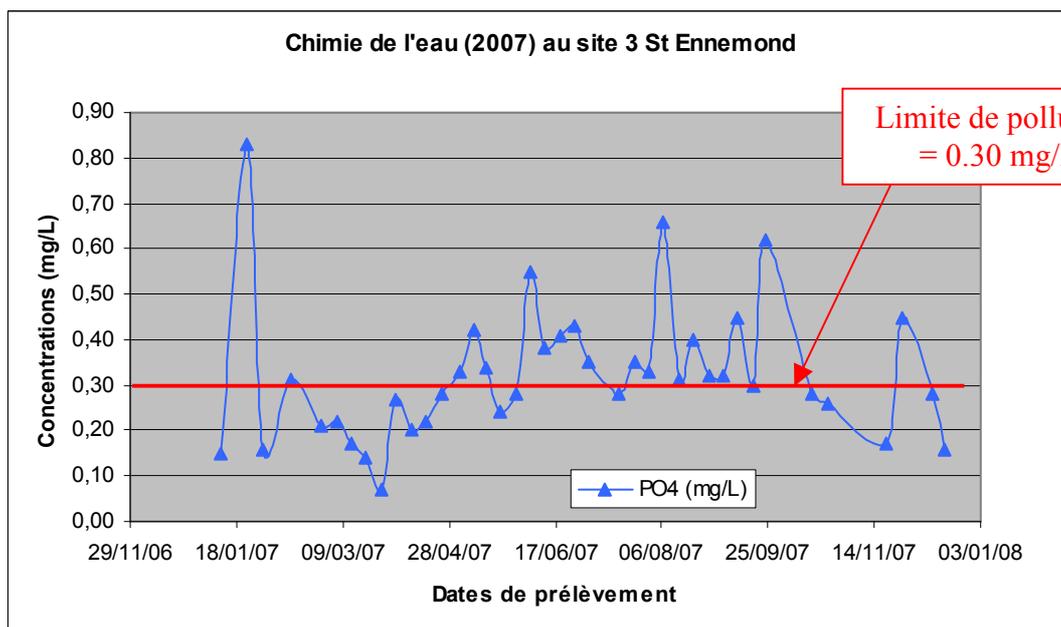
Année :	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
2002	14,1	NE*	63,9	90,4	90,8	132,6	123,1	97,1	65,0	40,1	24,3	16,2
2003	24,2	32,0	72,7	106,1	117,1	180,9	156,1	159,8	84,0	35,1	17,4	NE*
2005	22,3	27,4	49,9	73,9	113,0	132,4	144,8	118,0	73,5	50,3	24,5	21,5
2006	15,4	25,6	51,2	75,0	98,9	136,2	145,3	101,5	81,5	48,1	30,3	21,1
2007	23,4	32,8	58,8	95,7	99,9	101,1	118,6	90,1	72,3	42,4	29,2	16,9
Moyenne mensuelle (mm)	19,9	29,4	59,3	88,2	103,9	136,7	137,6	113,3	75,3	43,2	25,2	18,9

*NE = Non Exploitable

Annexe 7 : Variation des débits annuels du mois de Novembre aux Versauds



Annexe 8 : Pollution du bassin versant de la Morcille aux orthophosphates PO43-



Récapitulatif des résultats obtenus de l'amont vers l'aval du bassin, moyennés tout au long de l'année (une eau est polluée par les Phosphates si $[\text{PO}_4^{3-}] > 0,30 \text{ mg/L}$) :

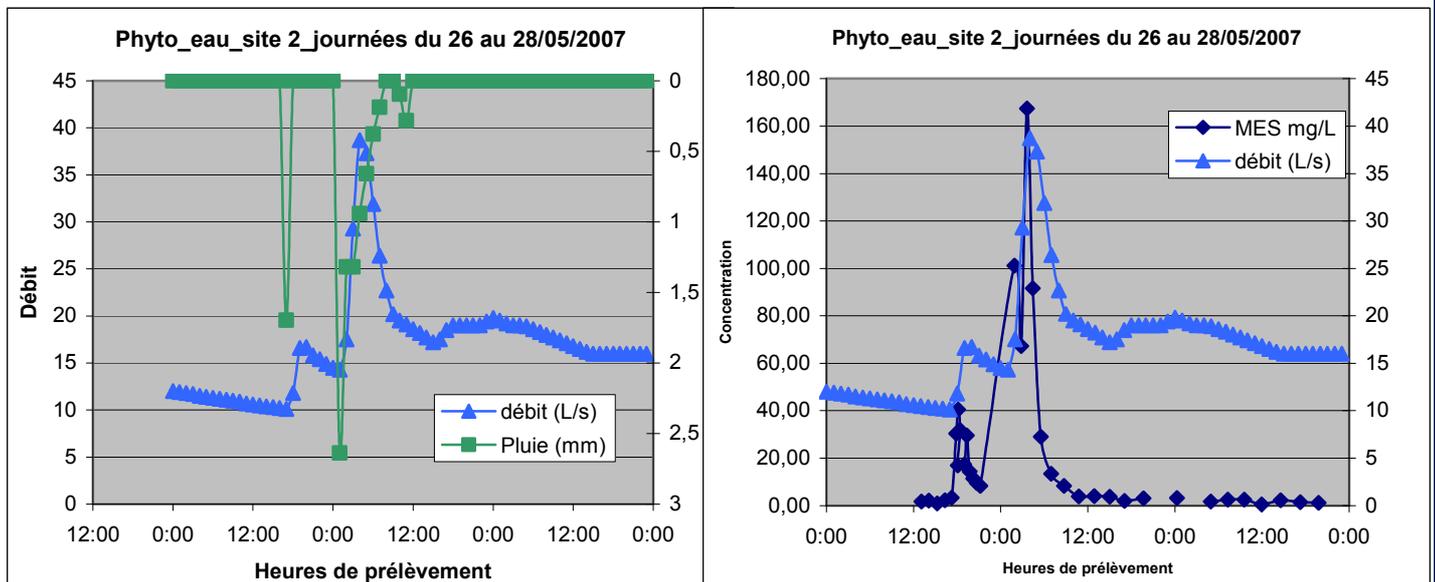
Site	L'eau du sous-sol		L'eau de la Morcille	
	Anomalie	Concentration	Anomalie	Concentration
Source de la Morcille	aucune	/	aucune	/
St Joseph (Puits Ducroux)	pollution PO_4^{3-}	0,60 mg/L	pollution PO_4^{3-}	0,10 mg/L
Versauds (Puits Dufour)	pollution PO_4^{3-}	0,45 mg/L	quasi pollution PO_4^{3-}	0,25 mg/L
St Ennemond (Puits Béréziat)	pollution PO_4^{3-}	0,38 mg/L	pollution PO_4^{3-}	0,30 mg/L

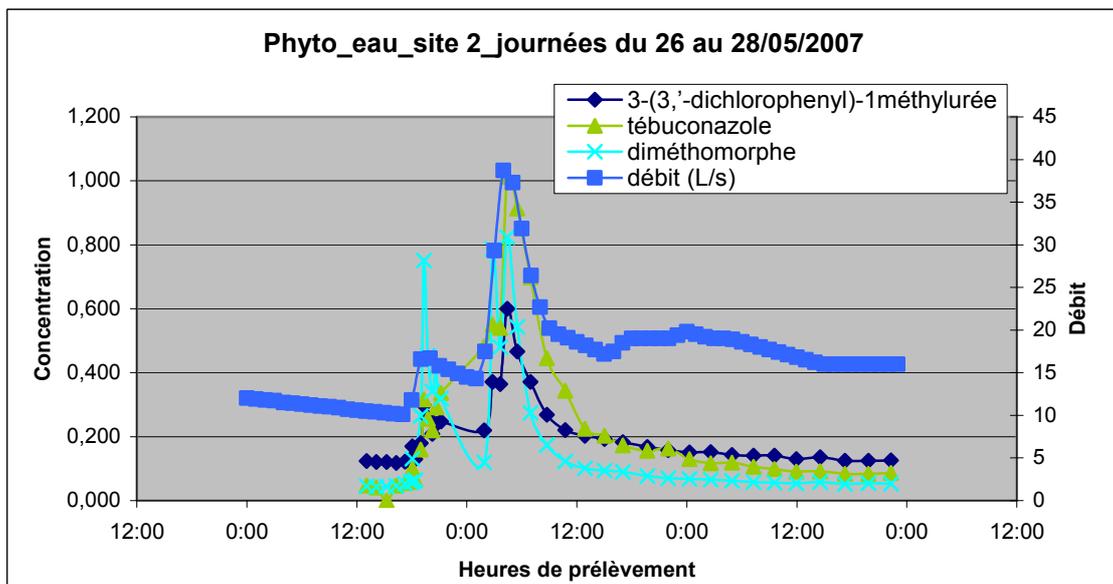
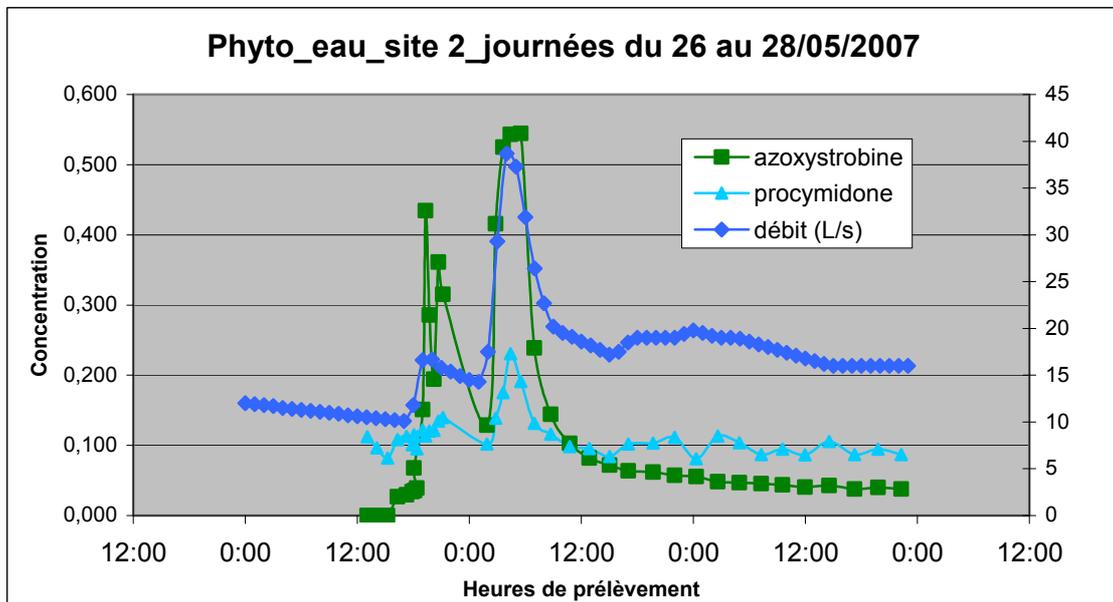
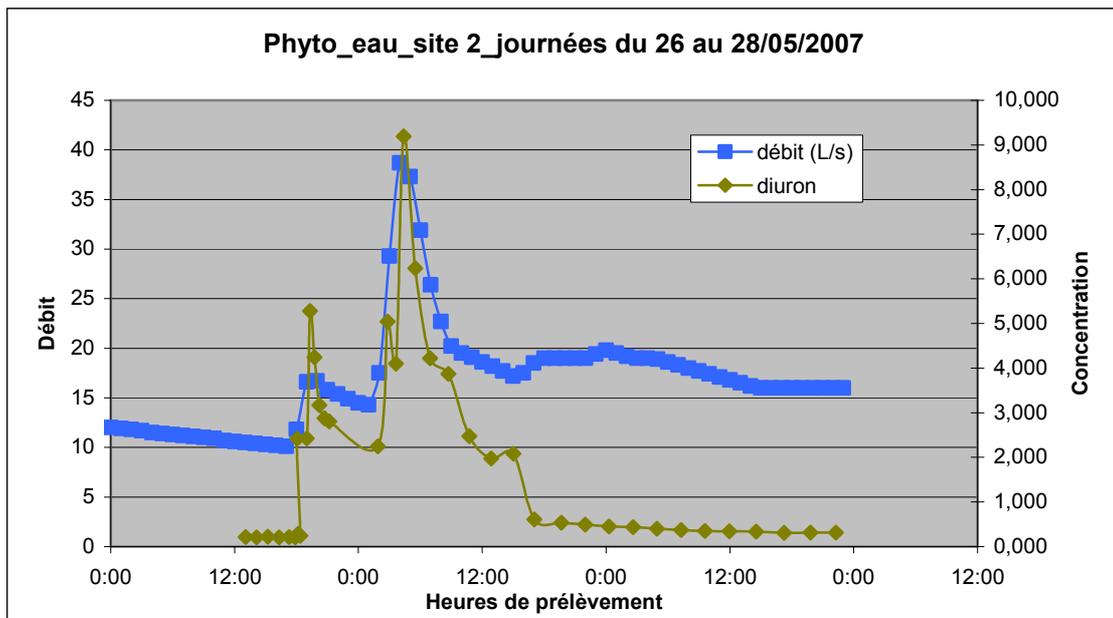
Annexe 9 : Courbes [MES]=f(Q) : récapitulatif de la relation intensité de pluie et recharge en particules/forme de courbe pour chaque évènement de crues

Date de l'évènement de crues	Intensité moyenne (mm/h)	Type de courbe	Recharge en particules
06/07/2006	3.77	Forme en huit	oui
16/08/2006	3.60	Forme en 8/ Hystérésis horaire	oui
14/05/2007	1.68	?	oui/non
06 au 07/08/2007	1.12	Hystérésis horaire	non
17/09/2007	2.26	? (proche hystérésis horaire)	oui
26 au 27/09/2007	0.85	Hystérésis horaire	non
01 au 02/07/2007	1.34	Hystérésis horaire	non

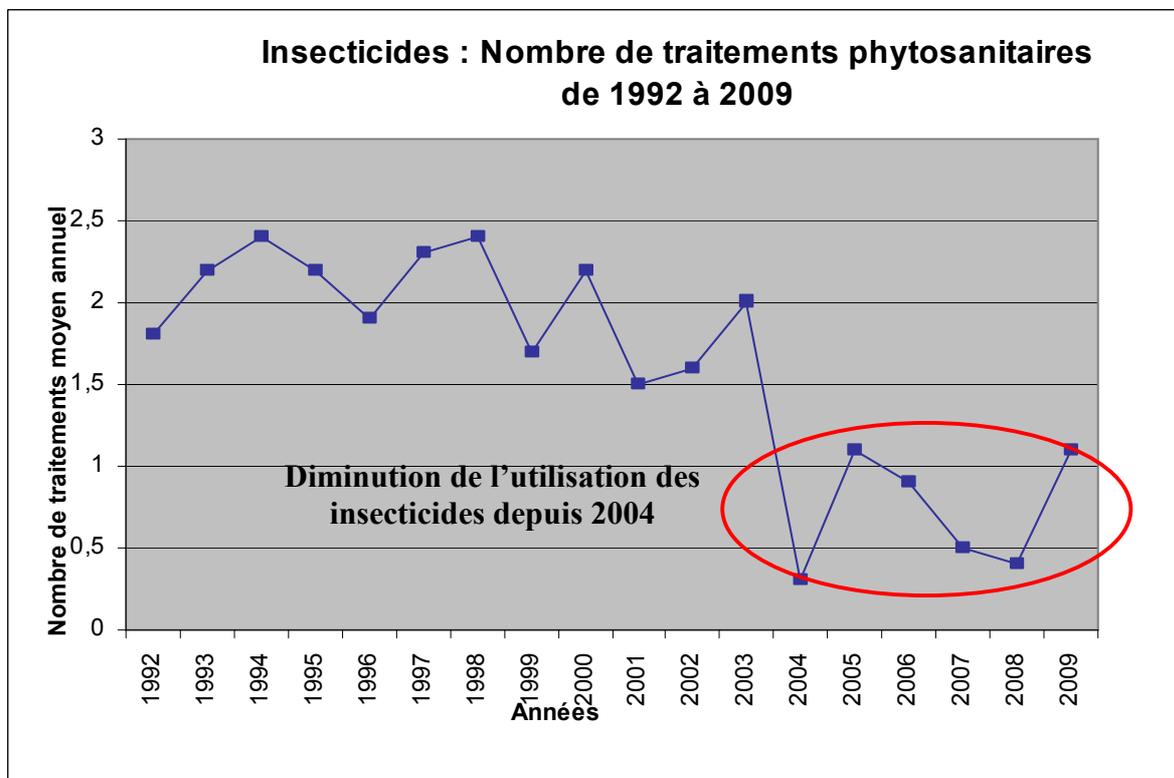
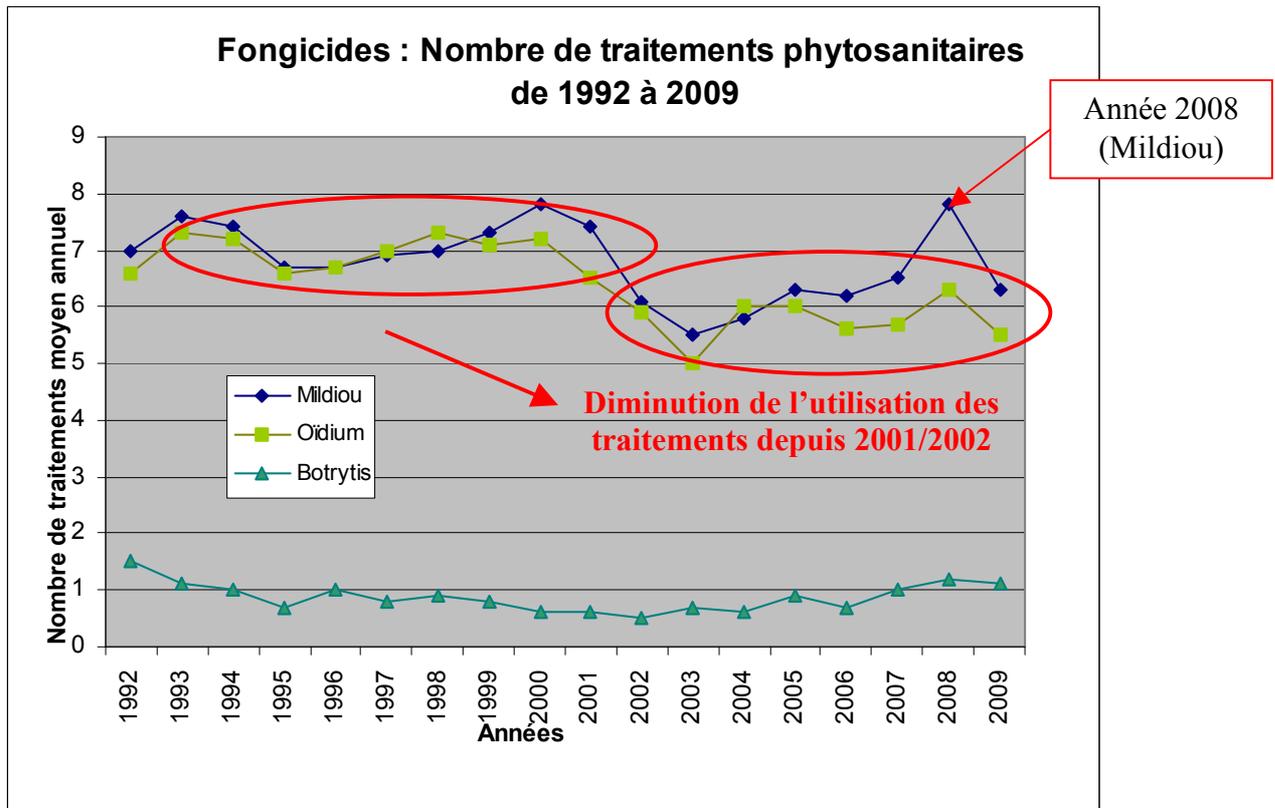
Annexe 10 : Illustration des pics de concentration en pesticides en période de crues

Exemple avec l'évènement du 26 au 28/05/2007 (dans la phase dissoute):



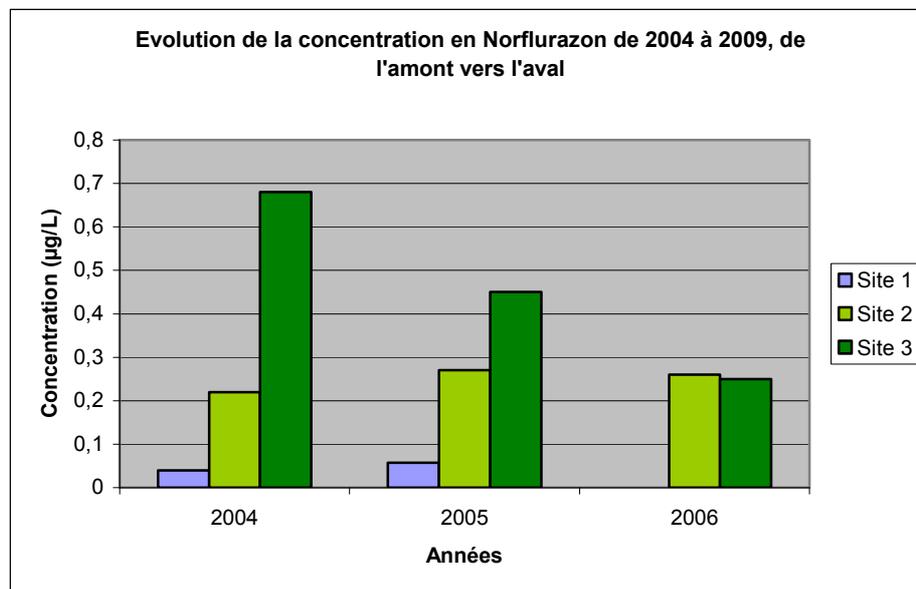


Annexe 11 : Evolution de l'utilisation des produits phytosanitaires dans le Beaujolais



(Source : Données CDA69-CDB : Groupes Protection Raisonnée (Beaujolais))

Annexe 12 : Rémanence du Norflurazon dans l'eau, interdit depuis 2003 (concentrations moyennes annuelles)



Annexe 13 : Propriétés des principaux produits phytosanitaires utilisés

Produit Phytosanitaire	Norflurazon	Diuron	Terbutylzine	Oxadixyl	Simazine	Diméthomorphe	Tébuconazole	Procydone
Type	Herb.	Herb.	Herb.	Fong.	Herb.	Fong.	Fong.	Fong.
Métabolite	Norflurazon desmethyl	DCPMU DCA		Oxadixyl acid				
Milieu de formation	Sol	Sol	Sol	Sol	Sol	Plantes/ Animaux	Sol	Sol
Solubilité dans l'eau à 20°C (mg/L)	34	35,6	6,6	3400	5	28,95	36	2,46
Densité (g/mL)	1,45	1,5	1,19	0,5	1,3	1,32	1,25	1,43
DT50 typique (jours)	90	75,5	76,7	75	60	57	62	7
DT50 au champ (jours)	225	89	31	75	90	44	55,8	208,3
Koc (mL/g)	700	1067	219	36	130	348	769	378
Commentaires sur le Koc	Légèrement mobile	Légèrement mobile	Mobilité modérée	Mobile	Mobilité modérée	Mobilité modérée	Légèrement mobile	Mobilité modérée

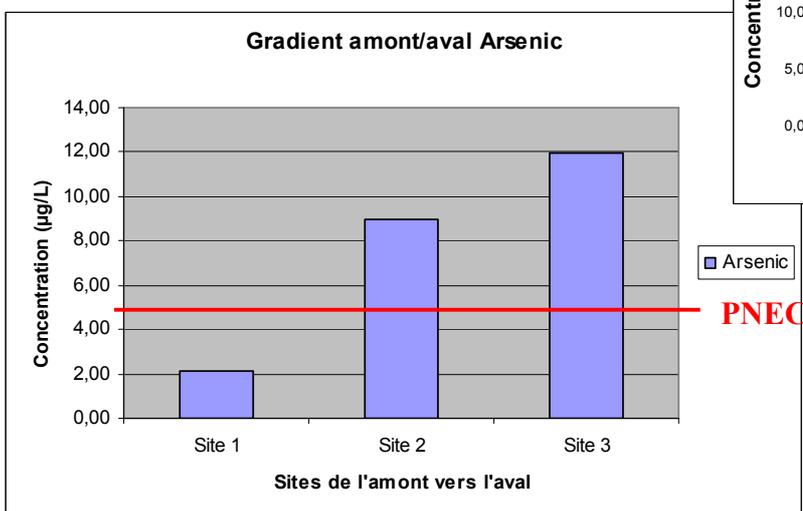
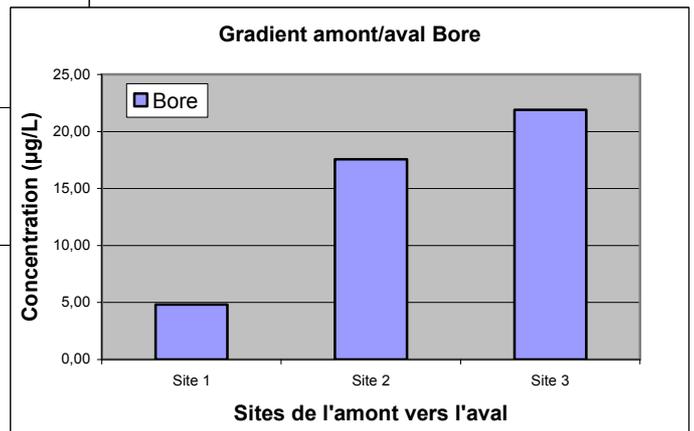
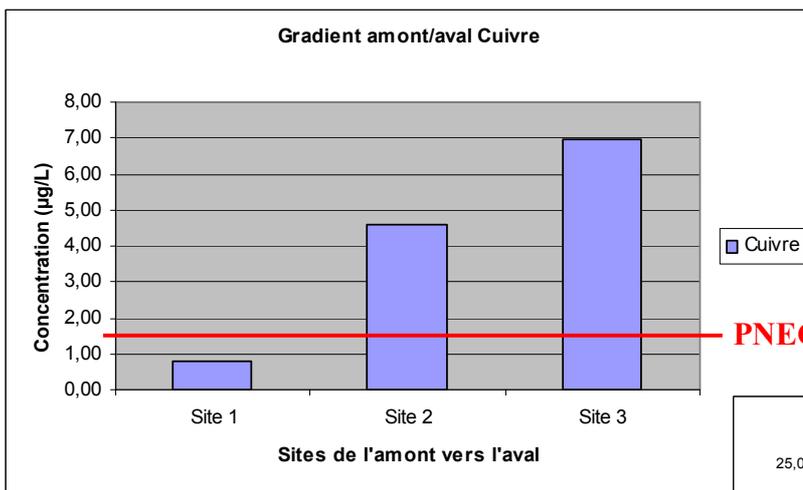
*Herb. = Herbicide
*Fong. = Fongicide

Annexe 14 : Valeurs seuil de référence (PNEC ou NQE) pour les métaux

Le tableau suivant donne la valeur de la PNEC (concentration prévisible sans effet sur l'environnement) ou de la NQE (Norme de Qualité Environnementale, DCE) pour les principaux éléments étudiés :

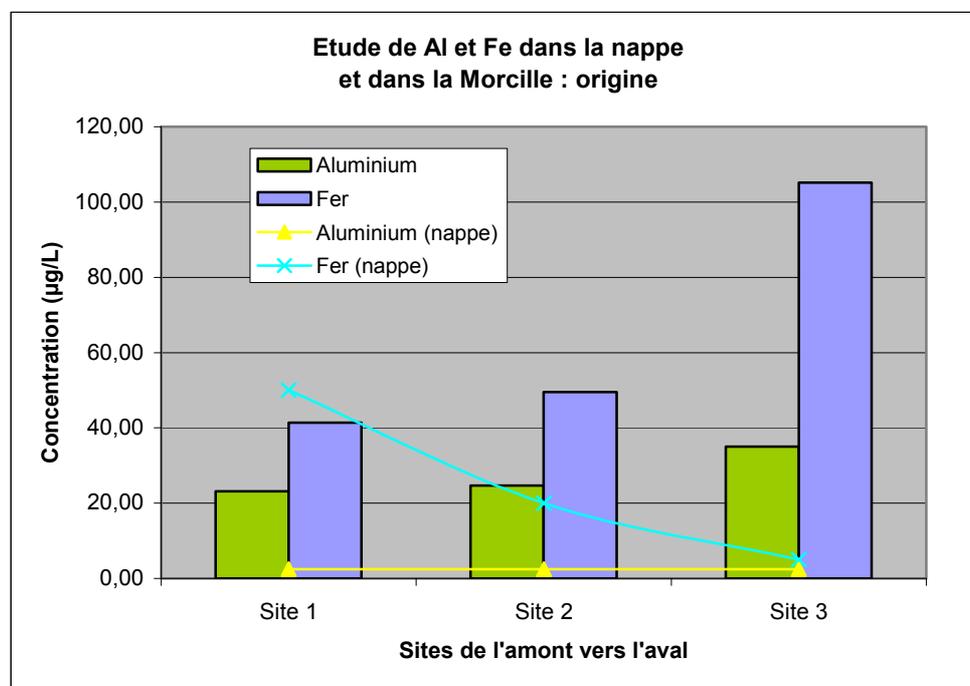
Eléments métalliques	PNEC (µg/L)	NQE (µg/L)
Plomb Pb	2.1	/
Nickel Ni	4.95	/
Zinc Zn	7.8	/
Cuivre Cu	1.6	/
Arsenic As	4.4	/
Cadmium Cd	/	0.08
Cobalt Co	0.3	/

Annexe 15 : Gradient amont/aval des concentrations en métaux dans l'eau de la Morcille, signe d'une pollution d'origine anthropique



Annexe 16 : Etude de la provenance de l'Aluminium et du Fer : naturelle ou anthropique ? de la nappe ou de la rivière ?

On rappelle que l'Aluminium fait partie des traceurs géologiques alors que le Fer peut être le constituant de rejets d'eaux usées.



Globalement, on remarque ici que le Fer et l'Aluminium présentent des concentrations plus faibles dans la nappe que dans la rivière. On constate pour ces deux éléments un gradient amont/aval de leur concentration dans l'eau de la Morcille, ce qui signifie qu'on a un apport régulier en Fer et en Aluminium tout au long de la rivière, sans toutefois provenir de la nappe nécessairement.

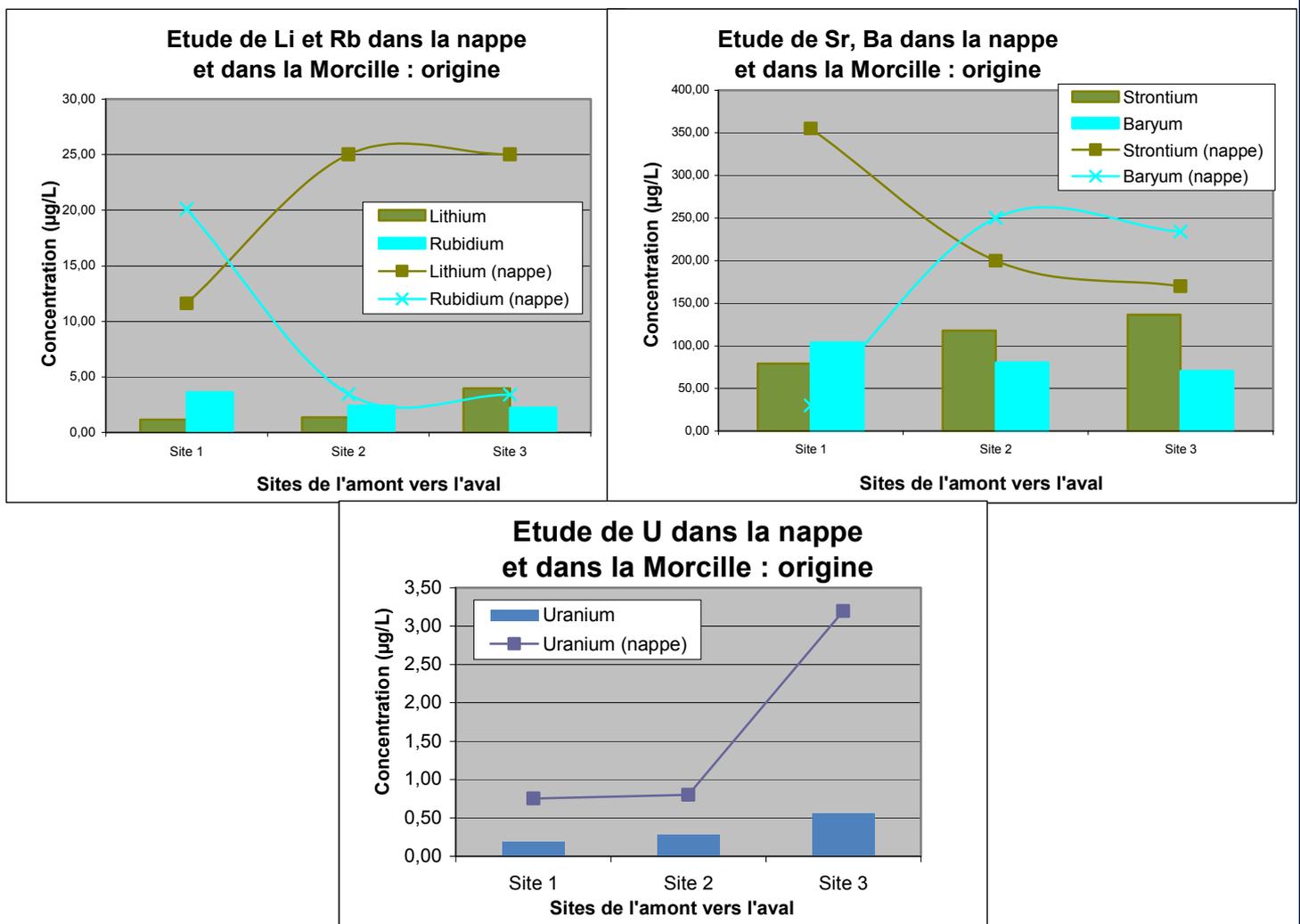
Concernant le Fer, qui peut émaner des rejets en eaux usées, il semble logique que sa concentration croisse en allant vers l'aval puisque le nombre d'habitations augmente dans ce sens. Sa provenance est à la fois d'origine anthropique et à la fois d'origine naturelle. En effet, la concentration « ambiante » de cet élément dans les eaux de surface de la région est de 30 µg/L, ce qui contribue à un certain apport en Fer dans l'eau de la Morcille, mais qui ne peut expliquer la présence de concentrations si élevées, notamment au site 3.

Concernant l'Aluminium, il semblerait que ceci soit dû à une caractéristique de la composition géologique du bassin versant. En effet, il existe un fond géochimique en Aluminium. De plus, l'augmentation de la concentration de ces deux éléments peut être également due au fait que la concentration en MES, avec lesquelles ils ont une forte affinité, augmente également en allant vers l'aval. Ainsi, ces deux éléments proviendraient plutôt des couches superficielles du sol que de la nappe.

Annexe 17 : Etude du comportement du Li, Ba, Sr, Rb et de l'U

Le Lithium Li, le Baryum Ba, le Strontium Sr, l'Uranium U et le Rubidium Rb, étant des traceurs géologiques, l'évolution de leur concentration dans l'eau de la Morcille et l'eau de la nappe ne peut se justifier par l'activité humaine. Par contre, ces évolutions peuvent nous renseigner sur une partie du fonctionnement du bassin versant de la Morcille (voir graphiques et commentaires ci-dessous) et également sur la composition géologique de celui-ci. En effet, les concentrations de ces éléments dites « ambiantes » relevées dans les eaux de surface de la région prouvent bien la présence de fonds géochimiques comportant ces 5 éléments.

Pour le strontium, le baryum, le lithium, l'uranium et le rubidium, on a les graphiques suivants qui permettent de comparer les différentes concentrations retrouvées dans la nappe avec celles retrouvées dans la rivière :



Globalement, on remarque que les concentrations sont plus élevées dans la nappe que dans la rivière pour ces 5 éléments, ce qui peut indiquer le fait que la nappe ait tendance à alimenter la rivière avec ces métaux. Au niveau des interactions entre la nappe et la rivière, suivant les 5 éléments, on distingue 4 comportements différents :

-Pour le Strontium : alors que sa concentration augmente de l'amont vers l'aval dans la rivière, elle diminue dans la nappe. On peut penser qu'il existe des interactions spécifiques entre la rivière et la nappe.

-Pour le Baryum, il s'agit de l'inverse : alors que sa concentration diminue de l'amont vers l'aval dans la rivière, elle augmente dans la nappe. On peut penser qu'il existe des interactions spécifiques entre la rivière et la nappe.

-Pour le Lithium et l'Uranium : leur concentration augmente de l'amont vers l'aval à la fois dans la nappe et dans la rivière. On peut donc supposer que le sol s'enrichit en Lithium et en Uranium de l'amont vers l'aval.

-Pour le Rubidium : sa concentration diminue de l'amont vers l'aval à la fois dans la nappe et dans la rivière. On peut donc supposer que le sol s'appauvrit en Rubidium de l'amont vers l'aval.

Remarque : une étude géochimique et géophysique plus poussée permettrait de mieux identifier les comportements précédents.

Annexe 18 : Détail des calculs pour la réalisation des courbes IDF de pluies

On travaille, pour cette partie, sur l'intensité moyenne de pluie I_{moy} exprimée en mm/h, cette valeur étant la plus représentative de l'épisode de pluie sur toute sa durée.

On procède d'abord à un ajustement de ces valeurs par une loi exponentielle, loi de la famille des GPD, et tenant compte de tous les événements de pluie à partir d'une valeur seuil fixée ici à 1.00 mm/h.

On rappelle les formules utiles suivantes :

- On utilise une période de retour expérimentale fixée notamment en fonction du rang i de l'évènement (les évènements sont classés dans l'ordre décroissant) :

$$T \exp(i) = \frac{na + 0.4}{i - 0.3} \quad (\text{na correspond aux nombres d'années sur lesquelles porte l'étude ; ici l'étude porte sur 8 ans, de 2002 à 2009}).$$

- Expression du quantile x associé à la période de retour T avec la loi exponentielle: $x = x_0 + gr \times Ln(T)$ où x_0 est le paramètre de position et gr est le gradex.

Dans notre cas, cette expression se traduit par la formule suivante :

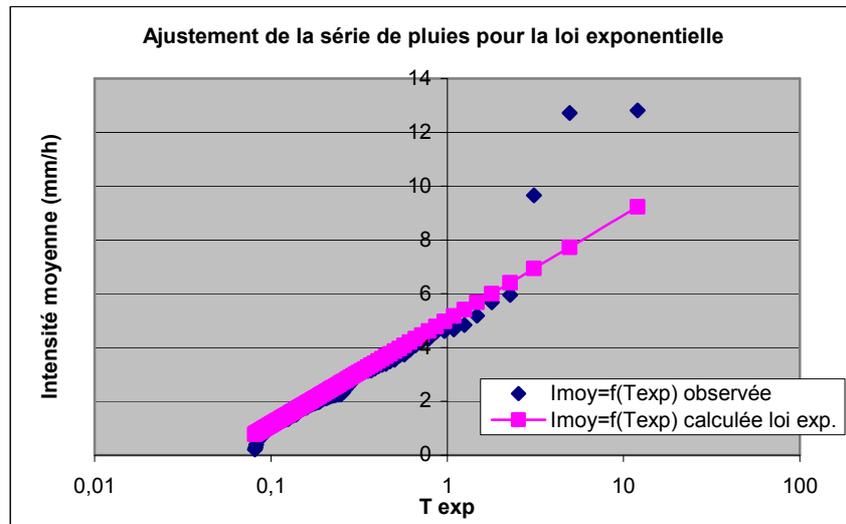
$$I_{moy}(i) = x_0 + gr \times Ln(T \exp(i))$$

- Expression des 2 paramètres de la loi exponentielle :

$$gr = \left(1 + \frac{1}{nc}\right)(m - \min) \quad \text{et} \quad x_0 = \min + gr \left(\ln\left(\frac{nc}{na}\right) - \frac{1}{nc} \right) \quad \text{où } nc \text{ correspond à la taille}$$

de l'échantillon étudié (on a 87 évènements avec une intensité moyenne supérieure à 1.00 mm/h), m correspond à la valeur moyenne de cette échantillon qui est de 2.68 mm/h et \min correspond à la valeur minimum de l'échantillon, soit 1.01 mm/h ici.

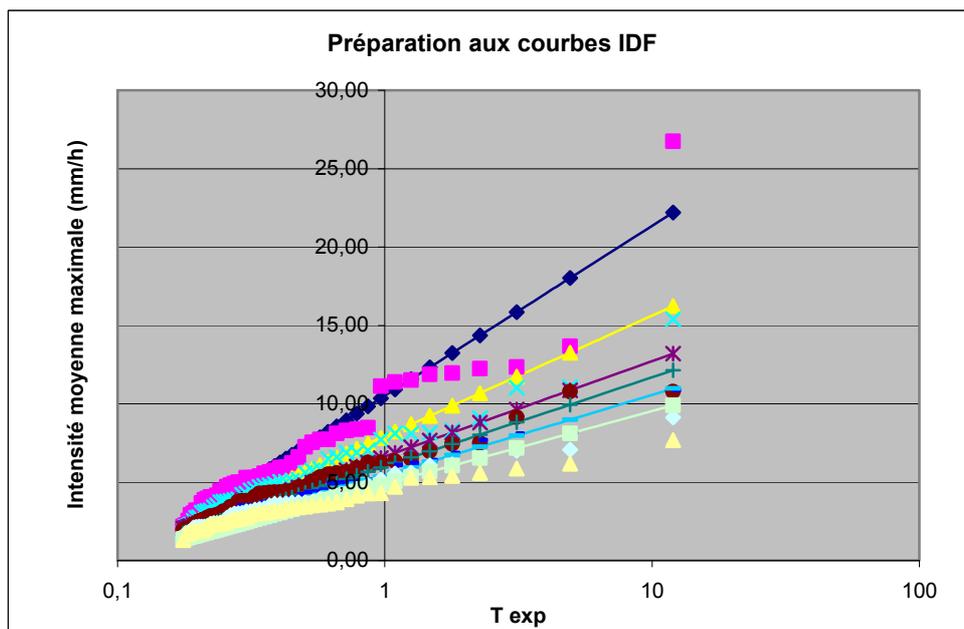
Pour cet ajustement, on obtient alors le graphique suivant :



On note que l'on a une bonne représentativité de l'échantillon par la loi exponentielle excepté pour les 3 événements d'intensité extrême. On obtient également les quantiles « types » suivants :

T (année)	Imoy Pluie (mm/h)
0,5	3,85
1	5,03
2	6,20
5	7,75
10	8,92

Pour établir les courbes IDF, on procède de la même manière mais pour des intensités moyennes calées sur des durées fixes allant de 1 à 6 heures. On obtient les différentes courbes suivantes :



On obtient les quantiles « types » suivants :

T (année)	Imoy Pluie (mm/h)					
	Durée = 1h	Durée = 2h	Durée = 3h	Durée = 4h	Durée = 5h	Durée = 6h
0,5	7,24	5,62	4,80	4,30	3,88	3,48
1	10,51	7,93	6,63	6,01	5,42	4,88
2	13,77	10,25	8,46	7,72	6,97	6,28
5	18,08	13,30	10,89	9,98	9,02	8,14
10	21,34	15,62	12,72	11,69	10,56	9,54

Or, une correction doit être apportée ici afin d'ajuster au mieux les valeurs des quantiles obtenues à la réalité. En effet, l'étude de l'intensité des pluies ayant été réalisée à heures civiles rondes est quelque peu biaisée puisque, évidemment, ces épisodes de pluie ne débutent pas forcément à heure civile ronde. Ce problème a été étudié dans les années 1964 par Weiss qui a proposé d'introduire la correction suivante :

si le dépouillement des valeurs est réalisé sur un pas de temps dt et que les pluies sont estimées sur une durée δ , il faut multiplier les quantiles obtenus ci-dessus par le coefficient W suivant :

$$W = \frac{1}{1 - \frac{dt}{8 \times \delta}}$$

où ici, $dt = 1$ heure et δ varie de 1 à 6 heures.

On obtient finalement les quantiles « types » corrigés suivants :

T (année)	Imoy Pluie (mm/h)					
	Durée = 1h	Durée = 2h	Durée = 3h	Durée = 4h	Durée = 5h	Durée = 6h
0,5	8,28	6,00	5,01	4,44	3,98	3,56
1	12,01	8,46	6,92	6,21	5,56	4,99
2	15,73	10,93	8,83	7,97	7,15	6,42
5	20,66	14,19	11,36	10,30	9,25	8,31
10	24,39	16,66	13,27	12,06	10,83	9,74

On cherche maintenant à approcher ces valeurs par la formule suivante qui permettra par la suite de représenter les courbes IDF :

$$Imoy = \frac{CoefA + CoefB \times Ln(T)}{CoefC \times Durée}$$

où $CoefA$, $CoefB$ et $CoefC$ sont 3 coefficients à

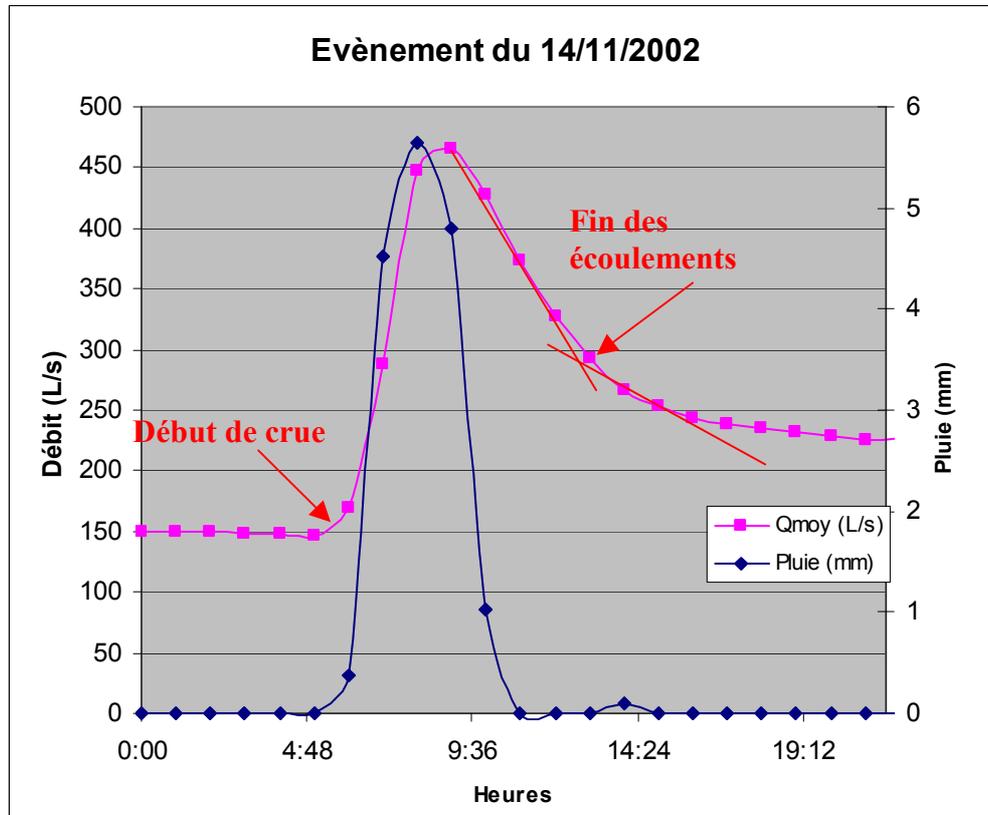
déterminer.

A l'aide d'une résolution par solveur, on trouve alors les 3 valeurs suivantes :

$$\begin{cases} CoefA = 3.600 \\ CoefB = 1.670 \\ CoefC = 0.260 \end{cases}$$

Il est désormais possible de tracer l'ensemble des courbes IDF de pluies pour chaque période de retour T .

Annexe 19 : Exemple de détermination des paramètres hydrologiques d'une crue de l'échantillon E' : événement du 14/11/2002



Paramètres hydrologiques :

- ✓ $Q_{ini} = 149 \text{ L/s}$
- ✓ $Q_{fin} = 227 \text{ L/s}$
- ✓ $Q_{max} = 465 \text{ L/s}$
- ✓ Temps de base = 8 heures
- ✓ Temps de montée au pic = 4 heures
- ✓ Facteur de forme = 15 heures
- ✓ $I_{max} = 5.65 \text{ mm/h}$
- ✓ Temps de réponse = 1 heure
- ✓ Temps de concentration = 7 heures