



HAL
open science

**Étude des crues soudaines sur les bassins versants du
Sichon-Jolan dans l'Allier et de la Couze-Chambon, de
la Couze-Pavin et de la Durolle dans le Puy-de-Dôme :
choix d'un système d'alerte et conception d'outils
d'anticipation des crues**

Anne-Flore Albin

► **To cite this version:**

Anne-Flore Albin. Étude des crues soudaines sur les bassins versants du Sichon-Jolan dans l'Allier et de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle dans le Puy-de-Dôme : choix d'un système d'alerte et conception d'outils d'anticipation des crues. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2016. dumas-01581113

HAL Id: dumas-01581113

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01581113v1>

Submitted on 5 Jan 2022

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.

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES
présenté pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'ENGEES
Stage réalisé du 25 janvier au 29 juillet 2016

Étude des crues soudaines sur les bassins versants du Sichon-Jolan dans l'Allier
et de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle dans le Puy de
Dôme.

Choix d'un système d'alerte et conception d'outils d'anticipation des crues.



Le Jolan à Cusset (03) le 8 août 2013, crédit photo : SDIS Allier

Anne-Flore ALBIN
Promotion Stuttgart (2013-2016)

FORMATION D'INGÉNIEUR
Spécialité GEDET

Remerciements

Je souhaite tout d'abord à remercier mon maître de stage Jean-Nicolas AUDOUY et Nicolas CAVARD le chef du Service de Prévision des Crues (SPC) Allier qui m'ont encadrée ainsi que Julie CHEVRIER la chef du pôle Hydrométrie et Prévision des Crues sans qui ce stage n'aurait pas été possible.

J'aimerais également remercier tous les membres du SPC Allier et de l'Hydrométrie et de la Maintenance pour leur accueil et pour avoir répondu à mes questions tout au long du stage. Les côtoyer a été un vrai plaisir.

Je tiens plus particulièrement à remercier Caroline FORLAY et Geneviève PELIGRY qui m'ont accueillie dans leur bureau durant ces six mois de stage.

Je remercie aussi les agents de la DREAL Auvergne-Rhône Alpes et des DDT du Puy de Dôme et de l'Allier qui m'ont accueillie et qui m'ont fourni de nombreux renseignements et documents dans le cadre de cette étude.

Résumé

Étude des crues soudaines sur les bassins versants du Sichon-Jolan dans l'Allier et de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle dans le Puy de Dôme. Choix d'un système d'alerte et conception d'outils d'anticipation des crues.

Suite aux dernières crues dévastatrices dans le Sud de la France, la prévision de ces crues dites soudaines devient nécessaire. La survenue brusque de ces crues, avec des temps de réponse de 2 à 6h, rend Vigicrues, le système d'alerte « traditionnel », peu adapté. Des systèmes spécifiques sont donc développés : les services d'avertissement automatique (Vigicrues Flash) et expertisé de l'État et les systèmes d'alerte locaux (SAL), instaurés par certaines collectivités.

En Auvergne, le SPC Allier, a recensé plusieurs dizaines de cours d'eau concernés par ces crues. Seule une vingtaine d'entre eux présente des enjeux qui pourraient justifier l'utilisation d'un service expertisé ou d'un SAL. Cependant, pour des raisons techniques et matérielles, ils ne peuvent pas tous être surveillés. Ainsi, suite à un premier classement, les cours d'eau du Sichon-Jolan (03) de la Durolle, la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63) figurent parmi ceux présentant le plus d'enjeux. Ils ont donc été sélectionnés pour cette étude portant sur :

- Un classement par ordre de priorité des bassins : en quantifiant les enjeux en zone inondable (population, emplois, sites touristiques et sensibles) et les temps de réponse.
- L'analyse de la faisabilité et de la pertinence des systèmes existants pour chaque tronçon de cours d'eau.

Pour les bassins versants jaugés :

- La création d'une échelle de gravité basée sur un niveau d'eau aux stations et des outils d'anticipation : un modèle de prévision des crues (GRP) et des abaques et des formules reliant le cumul de pluie, le débit initial, l'humidité des sols et le débit de pointe.

Ces outils ont une fiabilité limitée par le manque de crues importantes enregistrées. Ils sont complémentaires et, utilisés conjointement, améliorent les prévisions. Cependant, seul des outils plus complexes pourraient mieux modéliser le fonctionnement différencié des bassins versants lors d'orages.

Abstract

Study of flash floods on the French watersheds of Sichon-Jolan (Allier), Couze-Chambon, Couze-Pavin, and Durolle (Puy-de-Dome) rivers. Choice of an early warning system and development of flood forecasting tools.

Following the last devastating floods in the South of France, the forecasting of these “flash floods” has become a necessity. The sudden occurrence of these floods (within 2 to 6 hours) prevents Vigicrues (the French main flood warning system) from giving on-time warnings. So specific systems such as an automatic early warning system (Vigicrues Flash), appraised by the state, and local warning systems (SAL) are being implemented by some municipalities.

In the Auvergne region, the Flood Forecasting Service (SPC) of Allier has noticed dozens of rivers prone to these floods. However, an appraised service or a SAL would be justified for only about twenty of them. For technical and material reasons, all of them cannot be watched. After a first ranking, it appears that the Sichon-Jolan (03), the Durolle, the Couze-Chambon, and the Couze-Pavin (63) rivers are among the most at risk.

That’s why they have been chosen for this study which objectives are to:

- Rank watersheds: to quantify the risks in the flooding areas (population, jobs, touristic or sensitive sites) and the response time
- Analyze the feasibility and fit of the existing systems for each segments of the rivers

For gauged watersheds only:

- Create a severity scale based on water levels at the stations and early warning tools: a flood forecasting model (GRP), formulas and charts, linking the rain accumulation, the initial water inflow level, soil moisture and peak flow together.

Due to the lack of heavy floods recorded, the reliability of these tools remains uncertain. They are complementary and, used together, they improve forecasting. Nevertheless, only more complex tools could describe efficiently the specific behavior of these watersheds during stormy rain events.

Sommaire

Index.....	6
Lexique et abréviations.....	7
Introduction.....	9
1.Contexte.....	11
1.1.La prévision des crues, un enjeu et un défi majeur.....	11
1.1.1. La prévision des crues : une nécessité pour réduire leur impact.....	11
1.1.2. Une grande diversité de systèmes de prévision des crues.....	11
1.1.3. Le cas particulier de la prévision des crues soudaines.....	12
1.2.La prévision des crues en France : exemple du bassin versant de l'Allier.....	13
1.2.1. La prévision réglementaire des crues : Vigicrues.....	13
1.2.2. Les systèmes de prévision des crues soudaines gérés par les services de l'État : système automatisé et service expertisé.....	15
1.2.3. Le Système d'Alerte Local (SAL).....	16
1.3.Choix et caractéristiques des bassins versants à étudier.....	17
1.3.1. Le choix des bassins versants à étudier par le SPC Allier.....	17
1.3.2. Le bassin versant de l'Allier : un relief influençant la typologie des crues sur les bassins versants retenus.....	18
1.3.3. Des crues océaniques majoritaires à l'Ouest : les bassins versants de la Couze-Pavin et de la Couze-Chambon.....	20
1.3.4. Des crues orageuses dominantes à l'Est : les bassins versants du Sichon, du Jolan et de la Durolle.....	22
2.Choix d'un système d'alerte de crue.....	25
2.1.Enjeux.....	25
2.1.1. Cartes d'aléa et données de ZI issues d'études antérieures.....	25
2.1.2. Calcul de la population et des emplois en ZI.....	26
2.1.3. Enjeux ponctuels en zone inondable.....	27
2.2.Bilan des enjeux et classement des bassins versants prioritaires selon les enjeux en zone inondable.....	28
2.2.1. Sichon et Jolan.....	28
2.2.2. Couze-Chambon et Couze-Pavin.....	30
2.2.3. Durolle.....	32
2.2.4. Classement des bassins versants prioritaires selon les enjeux en zone inondable.....	34
2.3.Systèmes d'alerte envisageables selon le temps de réponse.....	35
2.3.1. Méthodes de détermination du temps de réponse (Tr).....	35
2.3.2. Mise en cohérence des résultats et temps de réponse retenus.....	37
2.3.3. Détermination des systèmes d'alerte envisageables.....	37
3.Outils de prévision des crues.....	41
3.1.Préalables à l'établissement des outils de prévision de crues.....	41
3.1.1. Définition de niveaux de vigilance reliant débit, hauteur d'eau et enjeux touchés.....	41
3.1.2. Obtention de HU2 : l'humidité initiale du sol.....	43
3.1.3. Correction des chroniques pluie-débit.....	43
3.2.Présentation des outils et méthodologie.....	44
3.2.1. Abaques et formules de prévision.....	44
3.2.2. Modèles de prévision des crues.....	46
3.2.3. Présentation du modèle GRP et méthodologie du calage.....	47
3.3.Résultats et performances des outils.....	49
3.3.1. Abaques et formules de vigilance.....	49
3.3.2. Résultats du calage de GRP.....	54
Conclusion :	57
Bibliographie :	59
Annexes.....	61

Index

Tableaux

Tableau 1 : Comparaison des différents systèmes d'alerte de crue utilisés ou envisagés en France.....	17
Tableau 2 : Extrait du classement EPRI selon les enjeux humains des bassins versants à étudier prioritairement sur le territoire du SPC Allier avec en bleu les bassins versants retenus et en gras ceux pré-identifiés par le SCHAPI.....	18
Tableau 3 : Débits caractéristiques retenus pour la Couze-Pavin et la Couze-Chambon.....	21
Tableau 4 : Débits caractéristiques retenus pour le Sichon, le Jolan et la Durolle.....	24
Tableau 5 : Enjeux touristiques sur le Sichon et le Jolan (03).....	28
Tableau 6 : Enjeux touristiques sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63).....	30
Tableau 7 : Enjeux touristiques sur la Durolle (63).....	32
Tableau 8 : Comparaison entre les premières estimations de population et les calculs réalisés *calculs uniquement sur Cusset et Vichy.....	34
Tableau 9 : Comparaison des enjeux en ZI sur différents bassins versants pour une crue centennale. +/- : enjeu limité, + : enjeu moyen, ++ : enjeu fort.....	34
Tableau 10 : Formules retenues pour le calcul de la pluie de bassin.....	36
Tableau 11 : Coefficients de ruissellement au niveau des stations hydrométriques.....	37
Tableau 12 : Systèmes envisageables pour un système d'alerte en croisant enjeux, zones éligibles et systèmes d'alerte possibles.....	40
Tableau 13 : Critères de définition des niveaux de vigilance aux crues soudaines sur les bassins versants du Sichon et du Jolan.....	41
Tableau 14 : Coefficients de remplacement par le pluviomètre de Saint-Nicolas des Biefs pour les pluviomètres de Vichy-Charmeil et le Mayet-de-Montagne.....	44
Tableau 15 : Tableau de contingence des performances de prévision du modèle GRP.....	49
Tableau 16 : Cumuls de pluies estimés pour le passage en vigilance jaune de la Couze-Chambon lors d'événements intenses.....	50
Tableau 17 : Cumuls de pluies estimés pour le passage en vigilance jaune du Sichon lors d'événements intenses ou de seconds événements.....	52
Tableau 18 : Performances des abaques de niveau jaune sur les bassins versants étudiés sans tenir compte des comportements différenciés des bassins et en en tenant compte *non évalué car aucun événement n'a franchi le niveau jaune.....	54
Tableau 19 : Performances des calages opérationnels du modèle GRP sur les bassins versants du Sichon et du Jolan (03) et comparaison avec les résultats du calage existant sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63).....	56

Figures

Figure 1 : Pont romain sur l'Ouvèze à Vaison la Romaine (84) le 22 septembre 1992 [CEMAGREF Lyon] et Biot (06) le 4 octobre 2015 [AFP, Jean-Christophe MAGNET].....	9
Figure 2 : Schéma type d'un système de prévision des crues.....	12
Figure 3 : Fonctionnement de la procédure de prévision, d'alerte et de vigilance crues sur le bassin versant l'Allier d'après [11] et [12].....	14
Figure 4 : Localisation des bassins versants étudiés par rapport au bassin versant de l'Allier (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013]).....	19
Figure 5 : Bassins versants de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin dans le département du Puy de Dôme (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013]).....	20
Figure 6 : Bassins versants du Sichon et du Jolan dans le département de l'Allier et de la Durolle dans le département du Puy de Dôme (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013]).....	22
Figure 7 : Définition du type d'aléa en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement.....	25
Figure 8 : Enjeux principaux en zone inondable pour une crue centennale du Sichon et du Jolan (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013]).....	29
Figure 9 : Enjeux principaux en zone inondable pour une crue centennale de la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013]).....	31
Figure 10 : Enjeux principaux en ZI par la Durolle pour une crue centennale (fond de carte BD TOPO®	

[IGN, 2013]).....	33
Figure 11 : Comparaison de la population cumulée en ZI en fonction du temps de réponse pour les bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Durolle, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin.....	38
Figure 12 : Comparaison des emplois cumulés en ZI en fonction du temps de réponse pour les bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Durolle, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin.....	39
Figure 13 : Proposition de niveaux d'alerte pour le Sichon-Jolan : maquette d'échelle de gravité.....	42
Figure 14 : Exemples d'utilisation d'un abaque pour le niveau jaune : 1 : P=50mm, HU2=50 et Qbase=2m3/s, niveau vert; 2 : P=50mm, HU2=50 et Qbase=4m3/s, 3 : P=70mm, HU2=50 et Qbase=2m3/s et 4 : P=50mm, HU2=60 et Qbase=2m3/s, au moins niveau jaune.....	45
Figure 15 : Fonctionnement d'un modèle hydrologique conceptuel global.....	47
Figure 16 : Double calage effectué par GRP sur les chroniques disponibles.....	48
Figure 17 : Abaque de vigilance de la Couze-Pavin à Saint-Floret (63) pour le niveau jaune.....	50
Figure 18 : Abaque de vigilance de la Couze-Chambon à Champeix (63) pour le niveau jaune.....	51
Figure 19 : Abaque de vigilance du Sichon pour un comportement « classique » et un niveau jaune....	52
Figure 20 : Abaque de vigilance du Jolan à Cusset (03) pour un niveau jaune.....	53

Lexique et abréviations

AIGA : Adaptation d'Informations Géographiques pour l'Alerte en crue. Brevet Irstea – Météo-France.

ANTILOPE : ANalyse par spaTIALisation hOraire des PrEcipitations.

APIC : Avertissement des Pluies Intenses à l'échelle des Communes.

BV : Bassin versant : surface drainée par un ou des cours d'eau et pour lequel toute goutte d'eau tombant sur sa surface converge vers une unique sortie appelée **exutoire**.

Courbe hypsométrique : graphique donnant le pourcentage du bassin versant dont l'altitude est supérieure à une valeur donnée.

CRISTAL : Centre Régional Informatisé par Système de Télémessures pour l'Aménagement de la Loire.

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement.

EPRI : Évaluation Préliminaire des Risques d'Inondation.

Exutoire : voir **BV**.

Hyétogramme : Représentation graphique de l'intensité de la pluie en fonction du temps.

Hydrogramme : Représentation graphique du débit en fonction du temps.

Indice HU2 : humidité du sol modélisée par la chaîne de modèles SIM de Météo-France.

Karst : Zone essentiellement constituée de roches solubles notamment du calcaire et érodée au fil du temps par l'eau. Elle se caractérise par une grande densité des cavités et du réseau hydrographique souterrain ainsi que par de nombreuses résurgences de ces écoulements à la surface. Des paysages présentant des gouffres, grottes, dolines, avens, ou cheminées de fée en sont caractéristiques.

MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.

MNT : Modèle Numérique de Terrain, représentation numérique du relief dans une zone donnée.

PAPI : Programme d'Action de Prévention des Inondations.

Période de retour : une crue de période de retour X ans a une chance sur X d'avoir lieu chaque année (par exemple une crue décennale a une période de retour 10ans soit 1 chance sur 10 d'avoir lieu chaque année).

PPRI : Plan de Prévention du Risque Inondation, document réglementaire délimitant et caractérisant les zones inondables sur le territoire d'une commune ou d'un groupement de communes et donnant des prescriptions pour limiter les risques liés aux inondations.

SAL : Système d'Alerte Local.

SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations.

SHYPRE : Simulation d'hydrogrammes pour la Prédétermination des crues.

SPC : Service de Prévision des Crues.

Tc : Temps de concentration, temps que met une goutte d'eau pour arriver à l'exutoire depuis la zone du bassin versant la plus éloignée hydrologiquement (temps séparant la fin de la pluie efficace du retour au débit de base).

Tr : Temps de réponse, temps s'écoulant entre le centre de gravité de la pluie et le pic de crue (débit de pointe).

TRI : Territoire à Risque d'Inondation important.

VVA : Vichy Val d'Allier.

ZI : Zone Inondable.

Introduction

Les crues, caractérisées une forte montée de niveau d'eau ou du débit dans un cours d'eau, sont le premier type de catastrophe naturelle affectant de nombreux pays. Causées essentiellement par des pluies d'intensité moyenne mais longues et par des pluies torrentielles brèves, leur surveillance est donc une préoccupation mondiale majeure. En France, le risque de crue est le risque naturel le plus fréquent et de nombreux épisodes ont ainsi marqué les esprits. La crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine (84) le 22 septembre 1992 avec 34 morts sur cette seule commune et 3 milliards de francs de dégâts (460 millions d'euros) est sans doute la plus connue¹. L'une des plus récentes est la crue de la Brague dans les Alpes Maritimes le 3 octobre 2015 avec un bilan de 20 morts et plus de 600 millions d'euros de dommages². Les photographies de la figure 1 témoignent de leur violence.



Figure 1 : Pont romain sur l'Ouvèze à Vaison la Romaine (84) le 22 septembre 1992 [CEMAGREF Lyon] et Biot (06) le 4 octobre 2015 [AFP, Jean-Christophe MAGNET]

Ces deux crues dévastatrices ont un point commun : leur survenue rapide. À peine quelques heures se sont écoulées entre le début de la pluie et le pic de crue. Elles peuvent être qualifiées de crues soudaines. Ce type de crues n'est pas spécifiquement méditerranéen, il survient généralement sur de petits bassins versants suite à un orage ou à de forts cumuls de pluie. La brutalité de la montée du niveau d'eau les rend difficiles à prévoir et peut surprendre la population avec les conséquences graves énoncées précédemment. La prévision de ces crues est donc un enjeu majeur en France.

Cette étude sur les crues soudaines a été réalisée en Auvergne sur le bassin versant de l'Allier au sein du Service de Prévision des crues (SPC) Allier qui prend en charge cette problématique. De nombreux cours d'eau sur son territoire sont soumis aux crues soudaines. Leur nombre rend impossible la mise en place immédiate de systèmes d'alerte pour tous. Un choix doit donc être fait avant de pouvoir développer des méthodes de prévision des crues.

Dans un premier temps, le contexte global de prévision des crues et notamment des crues soudaines sera exposé en lien avec le choix des cours d'eau retenus et de leurs caractéristiques. Puis, dans une deuxième partie, les enjeux seront étudiés sur le Sichon-Jolan, la Durolle, la Couze-Chambon et la Couze-Pavin, en particulier au niveau des agglomérations de Vichy (03), Thiers (63), Champeix (63) et Issoire (63). Leur classement par ordre d'importance déterminera lesquels sont prioritaires pour la mise en place de systèmes d'alerte. La confrontation entre les résultats précédents et les caractéristiques hydrologiques orientera ensuite le choix d'un système d'alerte. Pour finir, des outils de prévision de crue seront créés sur les cours d'eau pour lesquels c'est matériellement possible.

¹ Risques Majeurs. **Vaison-la-romaine, 20 ans après**. 6 mars 2013.

CNRS. **À propos de quelques crues dévastatrices : folie des eaux ou folie des hommes ?**. 2003

² Nice Matin. **On connaît le coût total des inondations d'octobre 2015 dans les Alpes-Maritimes**. 29 avril 2016.

1. Contexte

1.1. La prévision des crues, un enjeu et un défi majeur

1.1.1. La prévision des crues : une nécessité pour réduire leur impact

À l'échelle mondiale, les crues sont majoritairement de deux types : les crues dites de plaines et les crues soudaines. Les crues lentes ou de plaines affectent de grands cours d'eau suite à des phénomènes pluvieux généralisés ou à des remontées de nappe après une saison humide. La hausse du niveau d'eau est lente, s'étend sur de grandes surfaces et peut durer plusieurs semaines. Au contraire, les crues soudaines (ou crues rapides) sont brutales et liées à des pluies intenses orageuses ou à des ruptures de barrages. Ces phénomènes peuvent être localement amplifiés par la fonte des neiges suite à redoux [1]. Elles sont susceptibles de causer des dommages majeurs.

Ainsi, selon le Dartmouth Flood Observatory³, le bilan des crues dans le monde est de plusieurs milliards de dollars de dégâts, 20 millions de personnes déplacées et 7 500 décès par an. À cause de la survenue régulière sur des zones densément construites de phénomènes climatiques violents, l'Europe, l'Asie du Sud-Est et la côte Est-Américaine subissent des dommages matériels importants. En revanche, les problématiques humaines se concentrent surtout dans les pays en voie de développement et sur le pourtour méditerranéen. La présence de nombreuses constructions à proximité des cours d'eau et le manque de systèmes d'alerte est souvent en cause dans ces drames. L'augmentation du nombre de constructions en zone inondable et de la fréquence des événements déclencheurs due au changement climatique risquent d'aggraver ce constat. Réduire l'impact des crues est donc un enjeu mondial majeur.

Il existe divers moyens pour y parvenir. Le premier d'entre eux est la prévention et l'information de la population. L'acquisition de bons réflexes en cas de crues est vital. Des mesures réglementaires notamment en matière d'urbanisme peuvent également être prises (aménagement de zones refuge à l'étage des maisons, restriction des constructions en zone inondable, rétention et infiltration des eaux pluviales sur chaque parcelle...). Des mesures de plus grande ampleur peuvent être entreprises pour réduire localement l'intensité des crues (création de bassins écrêteurs⁴, de champs d'expansion des crues⁵...). Cependant, une partie de ces mesures n'est efficace que si le public et les autorités sont avertis suffisamment à l'avance.

Il a en effet été prouvé que lors de certains événements, un temps très court (quelques minutes) entre l'alerte et la survenue de l'événement suffisait à réduire drastiquement le danger pour la population, mais que, en revanche, il faut un temps bien plus long pour diminuer les dommages matériels [2]. Pour cela, il faut disposer de systèmes donnant l'alerte avant la survenue d'une crue.

1.1.2. Une grande diversité de systèmes de prévision des crues

Un système de prévision des crues doit, à partir des données de base disponibles, permettre de dire où et quand une crue va survenir et si possible donner une estimation du débit et de la hauteur d'eau attendue. Il doit ainsi assurer la réalisation et l'émission de prévisions fiables avec peu de fausses alertes et surtout peu d'alertes manquées. Son échéance de prévision doit également être adaptée au bassin versant étudié. Ils nécessitent donc une bonne connaissance du comportement météorologique et hydrologique de la zone étudiée.

Ces systèmes opérationnels de prévision des crues peuvent être très organisés et hiérarchisés ou au contraire être quasi-inexistants à cause d'un manque de moyens [3]. Le schéma type de fonctionnement de la majorité d'entre eux est présenté en figure 2. Les plus

³ <http://www.dartmouth.edu/~floods/Archives/index.html>

⁴ Bassins écrêteurs : bassins de stockage d'eau, remplis juste avant le pic de crue, le volume d'eau ainsi stocké permet d'éviter ou de diminuer les inondations à l'aval.

⁵ Champs d'expansion des crues : zones à faibles enjeux prévues pour être inondées, elles stockent ainsi de l'eau en cas de crue et diminuent leurs impacts sur les zones à enjeux à l'aval.

simples ne se basent que sur une estimation qualitative de la hausse de débit ou de hauteur d'eau à partir de mesures en rivière. La plupart sont plus complexes et donnent une prévision des crues basée sur des outils de simulation ou des abaques calés à partir de données historiques. Ils quantifient à la fois l'intensité de l'événement et le moment où il surviendra. Ils peuvent être complétés par une carte de vigilance permettant de visualiser les prévisions sur une zone. Il existe également des systèmes plus élaborés qui donnent une prévision des inondations. Ils combinent les modèles précédents à une représentation de la plaine d'inondation. Ils ne sont utilisés que pour des zones à enjeux forts avec des infrastructures sensibles. Ils définissent précisément les zones inondables mais nécessitent des ressources importantes et une bonne connaissance des inondations antérieures [1].

Le choix d'un système se base sur la compatibilité entre le niveau de précision et de service offert, la faisabilité technique et les enjeux qui peuvent être touchés [4]. Son coût doit également rester proportionné aux enjeux. Il arrive donc régulièrement que pour assurer les missions de protection de la population et des biens, plusieurs organismes ou services soient chargés de la prévision de crue sur un même territoire afin de mutualiser les coûts.

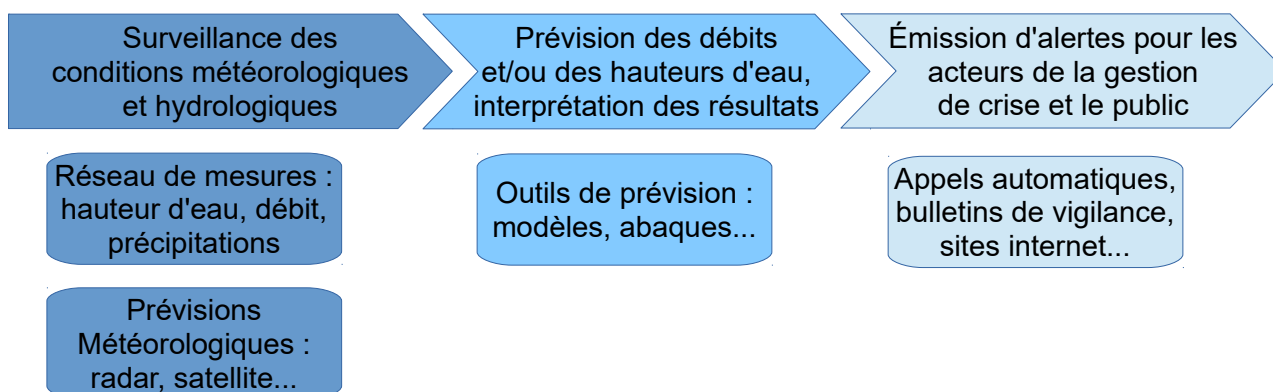


Figure 2 : Schéma type d'un système de prévision des crues

La superposition de différentes structures assurant la prévision des crues peut également être un obstacle lors de la gestion de crise. Le cas des crues de l'Elbe et du Danube en août 2002 qui ont causé 100 morts et près de 15 milliards d'euros de dommages dans plusieurs pays de l'Est de l'Europe en est révélateur. Le manque d'unicité dans les prévisions et leur diffusion a rendu plus difficile l'organisation des secours et l'alerte de la population. Pour pallier à ce problème, depuis 2012, l'European Flood Awareness System (EFAS⁶), placé sous la tutelle de la Commission Européenne, est en charge de la prévision des crues à l'échelle du continent européen en complément de modèles nationaux et régionaux [2].

S'assurer de la cohérence des prévisions réalisées à différentes échelles pour un même territoire est donc nécessaire pour organiser la gestion de crise en cas de crue. Cette problématique est vitale dans le cadre de crues soudaines où en raison de leur survenue rapide, chaque minute compte pour pouvoir alerter la population à temps du danger.

1.1.3. Le cas particulier de la prévision des crues soudaines

La cinétique des crues soudaines est rapide. Le pic de crue est atteint en seulement quelques heures avec une brusque montée du débit suite à une pluie ou à la rupture d'un barrage. Elles sont souvent assimilées aux crues subites ou crues éclair (flash flood) car elles se produisent sur des bassins versants de quelques dizaines à centaines de km². Elles sont dévastatrices. Aux Etats-Unis, il est estimé qu'elles causent 50 % des dégâts liés aux crues et 80 % des décès survenus entre 1995 et 2005. En Europe, entre 1950 et 2006, 40 % des décès liés à des crues majeures l'ont été à cause de crues soudaines, soit 50 par an [5]. Leur mortalité est nettement supérieure à celle des autres types de crues. Elle est de 4 % des personnes affectées à l'échelle

⁶ Pour plus d'informations : <https://www.efas.eu/about-efas.html>

mondiale alors qu'elle est de moins de 1 % pour les autres types de crues [1]. Elles sont difficilement prévisibles plus de quelques heures à l'avance [6] et [7]. Or, dans les circuits traditionnels d'alerte en cas de crue, c'est le temps nécessaire pour prévenir la population. Des circuits et des systèmes d'alerte à la fois plus courts et plus performants doivent donc être promus.

La qualité de prévision de ces crues dépend en grande partie de celle des données météorologiques. Elle nécessite donc des observations en temps réel et des prévisions fiables [8]. Cependant, en raison de la complexité des phénomènes météorologiques, les incertitudes sont fortes et augmentent encore avec l'échéance de la prévision. Ainsi, les services météorologiques tels que le centre européen de prévision météorologiques à moyen terme (ECMWF) utilisent actuellement des modèles numériques de prévision du temps (NWP). Parmi ces modèles, des EPS (Ensemble Prediction System) fournissent des prévisions en tenant compte des incertitudes et donnent des scénarios avec différentes probabilités de survenue. Les services de prévision des crues peuvent les utiliser et tester différentes valeurs de précipitation pour diminuer les incertitudes sur leurs prévisions de débit ou de hauteur d'eau [9] et [10].

Une réaction plus rapide étant nécessaire en cas de crue soudaine, la prévision et l'alerte sont souvent gérées à l'échelon local. De plus, pour gagner du temps, elles peuvent être entièrement automatisées, même si cette solution est de moins en moins privilégiée en raison du taux de fausses alertes. Les réseaux de mesures implantés étant coûteux et ne permettant pas toujours de détecter un événement, des alertes peuvent également être données à partir d'observations de volontaires. Ce système est en place en Suisse et aux États-Unis où 400 000 bénévoles assurent cette veille locale. À défaut, un réseau de mesures performant envoyant des données plus régulièrement et des outils ou modèles simplifiés améliorent les prévisions et réduisent le temps nécessaire pour les obtenir. La prise de décisions directement par les services locaux sans en référer à d'autres autorités diminue aussi le temps de réaction à un risque de crue. Avec toutes ces mesures, il passe de 4h40 en moyenne à 2h04 pour un système optimal [5].

Chaque pays cherche ainsi à développer et optimiser son propre réseau de surveillance et de prévision des crues. Le cas de la France et plus précisément du bassin versant de l'Allier, où s'est déroulé cette étude va maintenant être abordé.

1.2. La prévision des crues en France : exemple du bassin versant de l'Allier

1.2.1. La prévision réglementaire des crues : Vigicrues

En France, le risque d'inondation est le premier risque naturel, il concerne environ 10 000 communes et 5 millions de personnes [11]. Il apparaît donc naturel que l'État ait pris en charge la surveillance, la prévision et l'information du public sur les crues. Le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI) créé en juin 2003 et les 22 Services de Prévision des Crues (SPC) créés en octobre 2002 sont chargés d'assurer ce rôle⁷.

Au sein de la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, le SPC Allier est en charge de la prévision des crues sur le bassin versant (BV)⁸ de l'Allier. La prévision réglementaire est effectuée sur cette rivière de Langogne (48) à la Confluence avec la Loire dans le département du Cher. Pour ses affluents, elle commence à Massiac (15) pour l'Alagnon, à Ambert (63) pour la Dore, à Pontamur (63) pour le Sioulet et à Pontgibaud (63) pour la Sioule. L'organigramme du pôle est présenté en annexe I. Son travail s'effectue en lien étroit avec les activités d'hydrométrie et de maintenance des stations de mesures pluviométriques et limnimétriques⁹ du réseau CRISTAL¹⁰. Son dispositif de prévision et d'alerte en cas de crue est présenté en figure 3.

7 Loi n° 2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

8 Bassin versant (BV) : surface drainée par un ou des cours d'eau et pour lequel toute goutte d'eau tombant sur sa surface converge vers une unique sortie appelée exutoire.

9 Limnimétrie : mesure des hauteurs d'eau.

10 CRISTAL : Centre Régional Informatisé par Système de Télésurveillance pour l'Aménagement de la Loire. Il assure la surveillance des cours d'eau du bassin de la Loire

La prévision des crues est ainsi effectuée par les SPC à partir des données météorologiques et hydrologiques locales. Les informations de vigilance qui en découlent sont transmises au SCHAPI qui les synthétise sous forme d'un bulletin de vigilance national et d'une carte de vigilance. Ils sont diffusés via la plate-forme internet Vigicrues¹¹. Le niveau de vigilance sur les cours d'eau y est alors visible sous forme d'un code couleur. Un niveau vert ne nécessite pas de vigilance particulière, un niveau jaune prévient d'un risque de crues modérées ou localisées, un niveau orange caractérise un risque de crue importante et un niveau rouge caractérise un risque de crue majeure. Mis en place en juillet 2006, ce dispositif surveille 21 700 km de cours d'eau qui totalisent 75 % de la population en zone inondable en France.

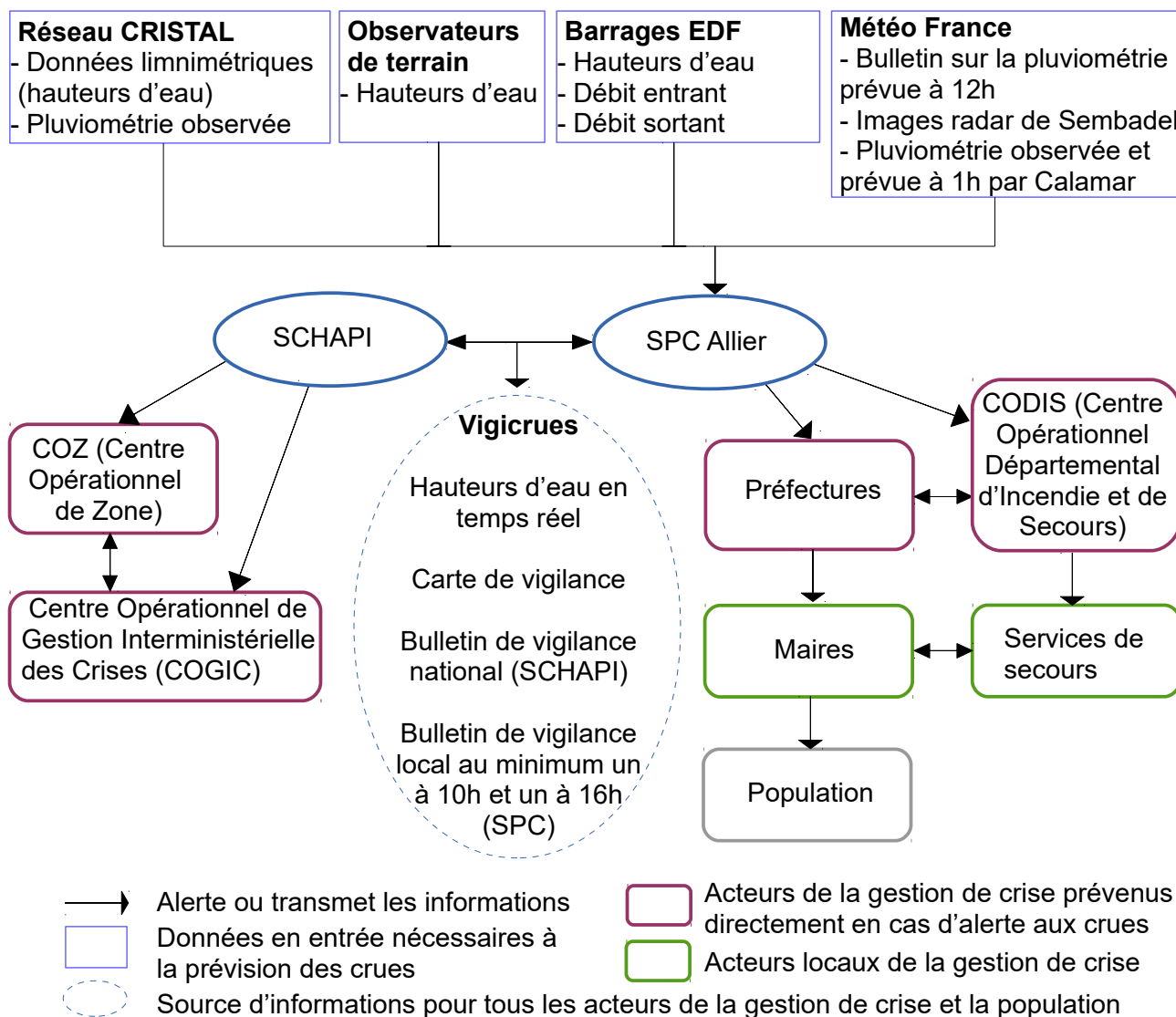


Figure 3 : Fonctionnement de la procédure de prévision, d'alerte et de vigilance crues sur le bassin versant l'Allier d'après [11] et [12]

La possibilité d'une intégration à Vigicrues est dépendante de deux critères¹² : la présence d'enjeux importants et la faisabilité technique. La faisabilité est définie par un **temps de réponse**(Tr)¹³ suffisant pour donner l'alerte en cas de crue soit **4 à 6 heures minimum**. Pour des questions matérielles, tous les cours d'eau ou tronçons de cours d'eau répondant à ces critères ne peuvent pas être intégrés à Vigicrues. Le deuxième critère stipule ainsi que le **coût généré par**

11 <http://www.vigicrues.gouv.fr/>

12 Circulaire DE/SDMAGE/BPIGR-YLT n°4 du 9 mars 2005

13 Tr : Temps de réponse, temps s'écoulant entre le centre de gravité de la pluie et le pic de crue voir 2.3.2

l'intégration au réseau de vigilance doit être proportionné aux enjeux. Il intègre la création d'une station si elle n'existait pas (entre 5 000 et 10 000 euros) ainsi que l'étude et le développement de modèles prédictifs sur les bassins versants. Par ailleurs **un minimum de 200 habitants en ZI** est jugé nécessaire pour une intégration à Vigicrues.

Le délai d'alerte de plusieurs heures implique que le dispositif national de vigilance crues ne couvre pas de nombreux bassins avec des temps de réponse courts et ne donne donc pas l'alerte pour des événements qui ont lieu en dehors de ce réseau réglementaire. Ce fut le cas lors des crues de juin 2010 dans le département du Var. Même si la Nartuby a depuis été intégrée au réseau Vigicrues, ce n'est pas le cas de nombreux cours d'eau, qui tels ceux de la Côte d'Azur en octobre 2015, ont causé des inondations importantes. Ces crues induisent des dégâts matériels lourds et mettent en danger une partie de la population. Ainsi, les inondations de juin 2010 ont causé la mort de 27 personnes et près d'un milliard d'euros de dommages. Celles plus récentes d'octobre 2015 ont provoqué la mort de 20 personnes et des dégâts estimés à plus d'un demi milliard d'euros¹⁴. Il est donc essentiel de mettre en place ou de renforcer les réseaux de surveillance de ce type de cours d'eau et surtout de mettre en place des systèmes d'alerte spécifiques aux crues soudaines.

1.2.2. Les systèmes de prévision des crues soudaines gérés par les services de l'État : système automatisé et service expertisé

En France, les crues soudaines sont définies par le SCHAPI pour cette étude comme étant des crues survenant sur des bassins versants dont le temps de réponse se situe entre 2 et 6h. En deçà de cet intervalle, seuls des dispositifs locaux spécifiques permettent une anticipation, au-delà, la prévision des crues par Vigicrues est généralement mise en place. Actuellement, deux systèmes d'alerte aux crues soudaines sont en projet ou en développement.

Le système d'avertissement hydrologique automatique Vigicrues Flash devrait être mis en place progressivement début 2017 après une phase de tests opérationnels à l'automne 2016. Il utilisera les pluies radar pour déclencher les alertes au-delà de seuils prédéfinis obtenus grâce à SHYREG débit¹⁵. Suite à l'observation d'une lame d'eau radar, le modèle pluie-débit AIGA Hydro¹⁶ sera mis en route pour estimer s'il y a dépassement du débit décennal (Q_{10}) ou cinquantennal (Q_{50}). En cas de dépassement, un avertissement automatique sera émis sur la possibilité de crue rare ($>Q_{10}$) ou exceptionnelle ($>Q_{50}$). Un dispositif similaire est actuellement en fonctionnement : l'Avertissement des Pluies Intenses à l'échelle des Communes (APIC) de Météo France. Il utilise SHYREG pluie pour avertir des pluies observées supérieures aux seuils. Contrairement au système automatisé il utilise des données issues d'observations et non de prévisions. Il met ainsi indirectement en garde contre un risque d'inondations. Les données issues de l'APIC et de Vigicrues Flash seront à terme couplées et envoyées sur une plate-forme commune de visualisation[13].

Selon le SCHAPI, les bassins versants éligibles au système de prévision des crues automatisé sont des cours d'eau ne faisant pas partie du réseau réglementaire et dont les exutoires¹⁷ sont situés en entrée ou sortie d'agglomération. Leurs temps de réponse (T_r) sont compris entre 1h30 et 6h30, ce qui correspond à des superficies comprises entre 10 et 1 000 km². Ils doivent également bénéficier d'une couverture radar supérieure à 80 %. Ces critères favorisent la réalisation de prévisions dans un laps de temps permettant de donner l'alerte en cas de crue. Il

14 GéoConfluences, ENS Lyon. **Les inondations sur le littoral des Alpes-Maritimes : catastrophe et gestion du risque.** Octobre 2015.

15 SHYREG : logiciel calculant des quantiles de pluie et de débit pour une période de retour donnée.

16 AIGA Hydro : Adaptation d'Information Géographique pour l'Alerte en crue, modèle hydrologique développé par l'IRSTEA. Il a pour objectif d'anticiper les crues dans les zones non couvertes par le système Vigicrues. Il s'appuie sur les données des radars météorologiques et les données SHYREG pour évaluer la gravité d'un aléa. Le dépassement des quantiles de pluie ou de débit 2, 10 ou 50 ans est affiché en tout point du territoire et du réseau hydrographique et représente la sévérité de l'aléa prévu.

<http://www.irstea.fr/la-recherche/unites-de-recherche/ohax/hydrologie/aiga>

17 Exutoire : sortie unique vers laquelle convergent tous les écoulements de surface d'un bassin versant.

existe également six types de limitations liées au modèle : l'influence des ouvrages hydrauliques, la présence fréquente de neige (la limite pluie/neige n'est pas prise en compte par le modèle), les zones karstiques¹⁸, les larges zones d'expansion de crues et les bassins situés en partie à l'étranger ou mal modélisés. Dans ces cas particuliers, les résultats donnés par la modélisation seraient peu fiables. Néanmoins, même en tenant compte de cela, le principal problème de ce système serait un taux de fausses alertes élevé [14].

Pour remédier à ce problème, le deuxième système d'alerte en projet est un service d'avertissement hydrologique expertisé. Il répondrait à la problématique des crues soudaines sur des bassins à enjeux forts où le taux élevé de fausses alertes de Vigicrues Flash serait difficilement acceptable. Un prévisionniste affinerait les prévisions à l'aide d'abaques et d'outils adaptés au bassin versant étudié. La prévision et la transmission des informations ne seraient pas systématiques, les différents acteurs ne seraient avertis que lors d'un risque de crue. Ce système aurait ainsi une anticipation moins grande et des fausses alertes plus nombreuses que Vigicrues mais serait plus fiable que le système automatisé.

Néanmoins, un suivi par ce service expertisé n'est pas possible pour des raisons matérielles sur tous les bassins versants soumis aux crues soudaines. À l'échelle de la France, 200 bassins versants ont donc été présélectionnés par le SCHAPI parmi ceux figurant dans le projet AIGA et situés à proximité de zones urbaines ou à enjeux. Ils ont été choisis sur la base d'indicateurs sur l'hydromorphologie et la vulnérabilité des bassins versants. Leurs **temps de réponse est compris entre 2 et 6h** avec une tolérance d'une demi-heure pour prendre en compte les incertitudes sur le calcul de Tr. **Les enjeux touchés doivent également être importants.** Les BV retenus par le SCHAPI sur le territoire du SPC Allier sont par ordre de priorité : le Bedat (63), l'Andelot (03), l'Artière (63), la Durole (63), la Couze Chambon (63), l'Eau mère (63), la Couze Pavin (63), le Litroux (63), le Sichon (03) et la Morge (63).

Si ces systèmes d'alerte répondent en grande partie aux problèmes de prévision des crues soudaines, ils peuvent ne pas être totalement adaptés ou suffisants compte tenu des enjeux très localisés sur certains bassins versants. Une alternative locale aux systèmes d'alerte gérés par les services de l'État est ainsi possible et parfois souhaitable.

1.2.3. Le Système d'Alerte Local (SAL)

Le Système d'Alerte Local des crues (SAL) est un système d'alerte mis en place et géré par des collectivités. Son équivalent aux Etats-Unis, le Local Flood Warning System (LFWS), est largement répandu. Il a pour principe de détecter suffisamment à l'avance les précipitations qui excèdent des niveaux prédéfinis pour pouvoir minimiser les effets des crues. Il peut être automatique avec des capteurs reliés à une sirène (flash flood alarm systems, ALERT¹⁹, ou IFLOWS²⁰) ou à déclenchement manuel. Il utilise des seuils de pluie généralement définis par la méthode Flash Flood Guidance (FFG). Elle donne une estimation de l'intensité et de la durée de la pluie qui induira les premiers débordements à partir de l'humidité initiale du sol. Les valeurs mesurées par des pluviomètres, les prévisions météorologiques ou la pluie radar sont ensuite comparées à ces seuils afin de déterminer le risque et de donner ou non l'alerte [15].

En France, les SAL sont indépendants du réseau national Vigicrues. **Il n'y a donc aucun prérequis en termes d'enjeux ou de temps de réponse pour mettre en place ce système.** Les collectivités demandeuses l'instaurent avec l'appui du SCHAPI et des SPC [16]. Elles sont généralement d'une taille assez importante, car elles doivent se doter des équipements et du personnel nécessaire à la mise en place, à la maintenance et à la surveillance de ce système. Il

18 Karst : Zone au fonctionnement hydrologique complexe essentiellement constituée de roches solubles notamment de calcaire et érodée au fil du temps par l'eau. Elle se caractérise par une grande densité des cavités et du réseau hydrographique souterrain ainsi que par de nombreuses résurgences de ces écoulements à la surface. La problématique de ces zones est liée au fait que le bassin versant topographique couramment utilisé est différent du bassin versant hydrographique réel ce qui peut induire des erreurs importantes dans les prévisions effectuées.

19 Automated Local Evaluation in Real Time <https://www.alertsystems.org/>

20 Integrated Flood Observing and Warning System http://water.weather.gov/afws/afws_about.php

s'agit souvent d'une volonté locale de collectivités bien équipées et ayant une bonne connaissance de leurs réseaux. Aucun SAL n'est à ce jour opérationnel sur le bassin de l'Allier, le plus proche est géré par Saint-Étienne Métropole (42) pour les bassins versants du Furan, du Gier et de l'Ondaine.

Le tableau 1 résume et compare les caractéristiques des différents systèmes de prévision de crues en activité ou envisagés en France.

	Vigicrues	Vigicrues Flash	Service expertisé	Système d'Alerte Local
Type de cours d'eau et de bassin	Réglementaire et vulnérable	Non réglementaire	Non réglementaire et vulnérable	Non réglementaire et vulnérable
Cours d'eau concernés	221	≈3000-4000	≈100-200	-
Temps de réponse (Tr)	>6h	2h<Tr<6h	2h<Tr<6h	2h<Tr<6h
Échéance	24h	Quelques heures	Quelques heures	Quelques heures
Circuit d'information	Vers les préfectures qui avertissent les maires	Direct vers les acteurs de crise et maires abonnés	Direct vers les acteurs de crise et maires abonnés	Direct vers les services des collectivités concernées
Type d'avertissement	Risque de crue et dangerosité	Rareté du phénomène (rare ou exceptionnel)	Risque d'atteinte aux biens et aux personnes	Risque d'atteinte aux biens et aux personnes
Outils utilisés	Abaques, modèles hydrologiques et hydrauliques	Automatiques (AIGA hydro)	Automatiques, abaqes et modèles hydrologiques	Dépend de la collectivité qui le met en place

Tableau 1 : Comparaison des différents systèmes d'alerte de crue utilisés ou envisagés en France

Il existe ainsi différents types de systèmes d'alerte possibles pour les crues soudaines. Chaque système doit donc être choisi en fonction des caractéristiques du bassin versant.

1.3. Choix et caractéristiques des bassins versants à étudier

1.3.1. Le choix des bassins versants à étudier par le SPC Allier

Parmi les systèmes d'alerte présentés, le SCHAPI souhaite mettre en place un service expertisé sur 5 à 10 bassins versants en moyenne par SPC. Pour le SPC Allier, le premier classement réalisé par le SCHAPI n'offre pas une répartition spatiale homogène des bassins versants et ne correspondant également pas exactement aux bassins identifiés « à priori ». Par ailleurs, tous les bassins versants qui peuvent avoir été identifiés ne seront pas intégrés au service expertisé. D'autres systèmes pourrait se révéler mieux adaptés à leurs caractéristiques et, de plus, pour des raisons matérielles, seuls 2 ou 3 bassins seront choisis et suivis par le SPC Allier pour faire partie du service expertisé. Dans un premier temps, il faut donc affiner cette liste afin de choisir les bassins versants qui seront étudiés.

Une deuxième liste a donc été établie en utilisant la méthode de classement du SPC Seine aval-Côtiers normands. Elle se base sur le calcul de plusieurs indicateurs dont le coefficient de pointe r , considéré comme étant représentatif de la dynamique de crue par le SCHAPI. Il se détermine en effectuant le rapport entre le débit de pointe instantané (Q_iX) et le débit de pointe journalier (Q_jX) sur les 25 plus fortes crues enregistrées. Une valeur supérieure à 1,5 est considérée comme étant révélatrice de crues rapides avec des pics de débit marqués. L'utilisation

de ce critère est contestable, car il dépend de la taille du BV. D'autres paramètres doivent donc être pris en compte. L'instrumentation et le jaugeage du BV, les enjeux, l'état de la connaissance du BV (études, CATNAT, ...), la couverture radar et APIC Météo France ainsi que la population en Zone Inondable doivent être étudiés.

Parmi ces critères, les enjeux et en particulier la population en Zone Inondable (ZI) caractérisent les risques liés à une crue sur un bassin versant. La population en ZI est donc déterminante pour le choix des BV à étudier. Un classement a ainsi été réalisé par Nicolas Cavard et Caroline Forlay pour le SPC Allier à partir des données des Évaluations Préliminaires des Risques d'Inondation (EPRI). Il est présenté dans le tableau 2 et s'appuie essentiellement sur une première estimation de la population pour des crues de période de retour 100 ans pour l'estimation basse et de 300 à 1 000 ans pour l'estimation haute.

Cours d'eau	Département	Estimation basse		Estimation haute	
		Population en ZI (hab)	Classement	Population en ZI (hab)	Classement
Artière-Tiretaine-Bédât	63	18 000	1	80 000	1
Jolan-Sichon	03	4 200	2	4 200	3
Ambène-Mirabel-Sardon	63	2 700	3	6 300	2
Andelot	03	2 000	4	2 000	5
Couze-Chambon	63	1 250	5	1 500	8
Bouble	03	1 000	6	1 000	13
Jauron	63	900	7	1 460	10
Auzon	63	700	8	990	15
Durolle	63	650	9	2 100	4
Couze-Pavin	63	600	10	1 750	7

Tableau 2 : Extrait du classement EPRI selon les enjeux humains des bassins versants à étudier prioritairement sur le territoire du SPC Allier avec en bleu les bassins versants retenus et en gras ceux pré-identifiés par le SCHAPI

L'Artière, la Tiretaine et le Bédât traversant l'agglomération clermontoise et l'Ambène, le Mirabel et le Sardon pour Riom sont actuellement l'objet d'études pour un système d'alerte local (SAL), ils ne seront donc pas traités ici. Les autres bassins ont été pour l'instant écartés soit en raison d'un manque de réseau de mesure pouvant permettre la mise en place d'outils ou d'abaques, soit à cause de fortes incertitudes sur des enjeux probablement surestimés.

Les bassins versants du Sichon-Jolan dans l'Allier, de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle dans le Puy de Dôme seront donc étudiés dans la suite de cette étude. Leurs caractéristiques et celles de leurs crues sont très liées à celles du bassin versant de l'Allier.

1.3.2. Le bassin versant de l'Allier : un relief influençant la typologie des crues sur les bassins versants retenus

Les bassins versants retenus appartiennent tous au bassin versant de l'Allier. Ils sont donc soumis aux mêmes influences climatiques que celui-ci. L'Allier draine un bassin versant de 14 000 km² sur 425 km entre ses sources en Lozère au Moure de la Gardille (1485 m d'altitude) et sa confluence avec la Loire au Bec d'Allier à proximité de Nevers (170 m environ). Ses principaux affluents sont la Dore en rive droite et la Sioule et l'Alagnon en rive gauche. Le positionnement des bassins versants étudiés est présenté en figure 4. L'étendue du bassin versant de l'Allier et son positionnement au cœur du Massif Central induisent des influences climatiques variées qui se ressentent sur la typologie de crue de ses affluents.

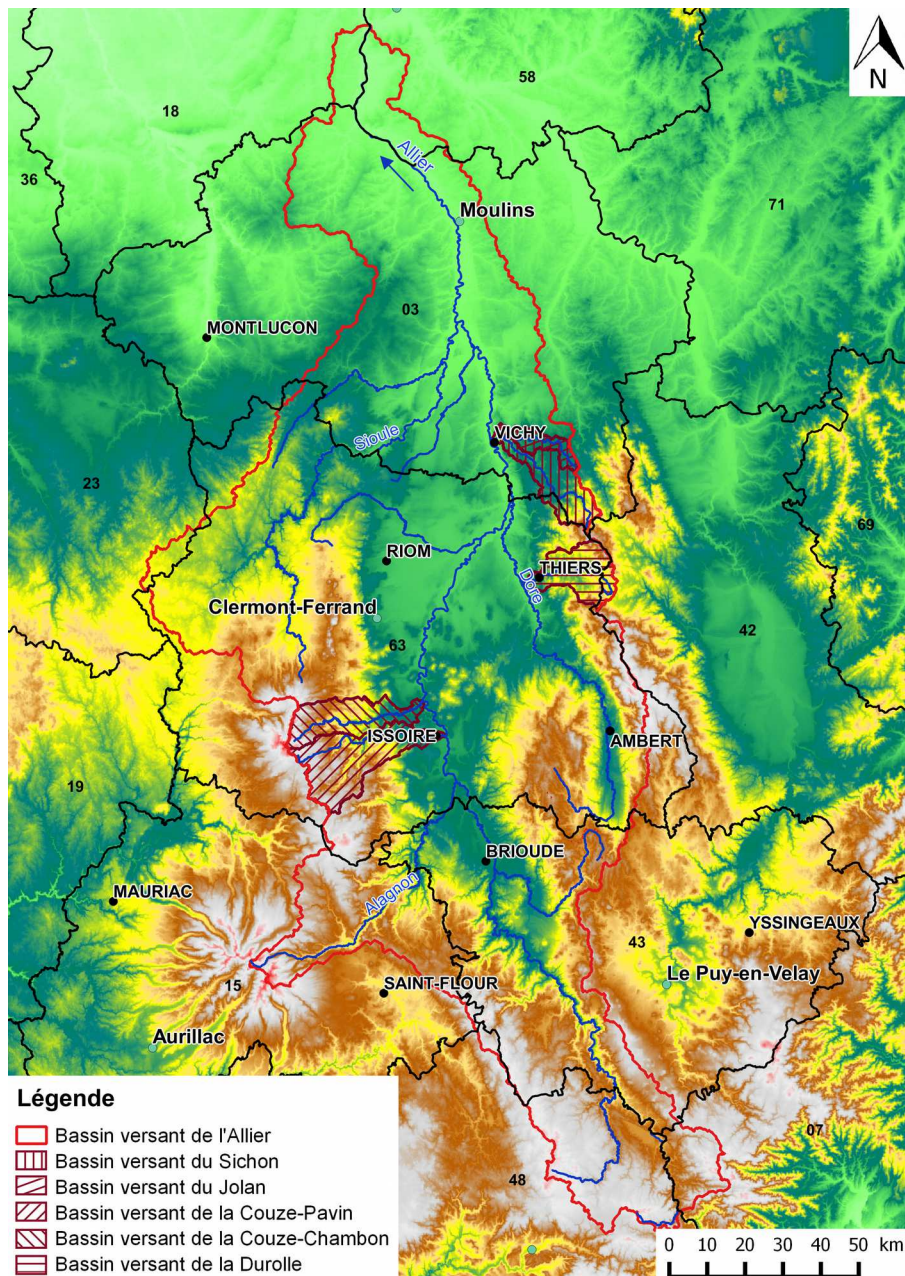


Figure 4 : Localisation des bassins versants étudiés par rapport au bassin versant de l'Allier (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

Les plus fortes **crues** enregistrées sur l'Allier sont dites **mixtes** (ou méditerranéennes extensives). Elles sont issues de la conjonction d'un épisode pluvieux cévenol s'étendant vers le nord et d'un front pluvieux océanique sur l'ensemble des affluents. Elles se traduisent par une montée brusque et généralisée des eaux sur l'ensemble du bassin. La crue historique du 25 septembre 1866 sur l'Allier est issue de ce phénomène. Le débit estimé à Moulins était compris entre 4 000 et 4 500 m³/s. Une crue encore plus importante a eu lieu en novembre 1790, elle aurait induit des hauteurs d'eau de 7,2 m à Langeac, 5,9 m à Pont-du-Château et 6,6 m à Moulins [17].

Les **crues cévenoles** sont rapides et brutales et s'atténuent rapidement à l'aval si elles ne sont pas soutenues par les apports d'une crue océanique. Elles se produisent essentiellement de début septembre à début décembre et plus rarement en mai ou juin sur les hauts bassins versants de l'Allier et parfois de l'Alagnon. Elles affectent le Sud-Est du bassin versant : le Haut-Allier et les Cévennes. Les pluies y sont intenses et atteignent parfois 200mm sur 24h.

Les bassins versants qui ont été retenus sont situés plus à l'aval et ne sont donc pas soumis à ces influences méditerranéennes. En revanche, ils peuvent être influencés par d'autres

caractéristiques climatiques du bassin de l'Allier conjuguant un climat **océanique**, la présence fréquente de **neige** et des **effets d'abri**²¹. Ces différentes zones d'influence impactent les caractéristiques hydrologiques et la typologie de crue des différents bassins versants [18].

1.3.3. Des crues océaniques majoritaires à l'Ouest : les bassins versants de la Couze-Pavin et de la Couze-Chambon

Les reliefs du Massif du Sancy, du Cantal et de la Chaîne des Puys à l'Ouest sont sous influence océanique. Le climat est caractérisé par des précipitations abondantes (1000 à 1500 mm/an) mais d'intensités plutôt faibles (rarement plus de 100 mm/24 h). Les **crues océaniques** y sont les plus fréquentes, elles ont principalement lieu en hiver et sont issues de fronts pluvieux provenant de l'océan Atlantique. Elles se forment dans le secteur du Val d'Allier Brivadois (entre Brioude et Issoire) et s'amplifient jusqu'à la confluence avec la Loire avec les apports de l'Alagnon, la Dore et la Sioule. Localement, des débordements violents de cours d'eau secondaires peuvent être dus à des orages ce qui est notamment le cas sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin.

La Couze-Chambon et la Couze-Pavin prennent leur source dans la zone décrite et traversent le département du Puy-de-Dôme, ce sont deux affluents de l'Allier. Leur localisation géographique est présentée en figure 5.

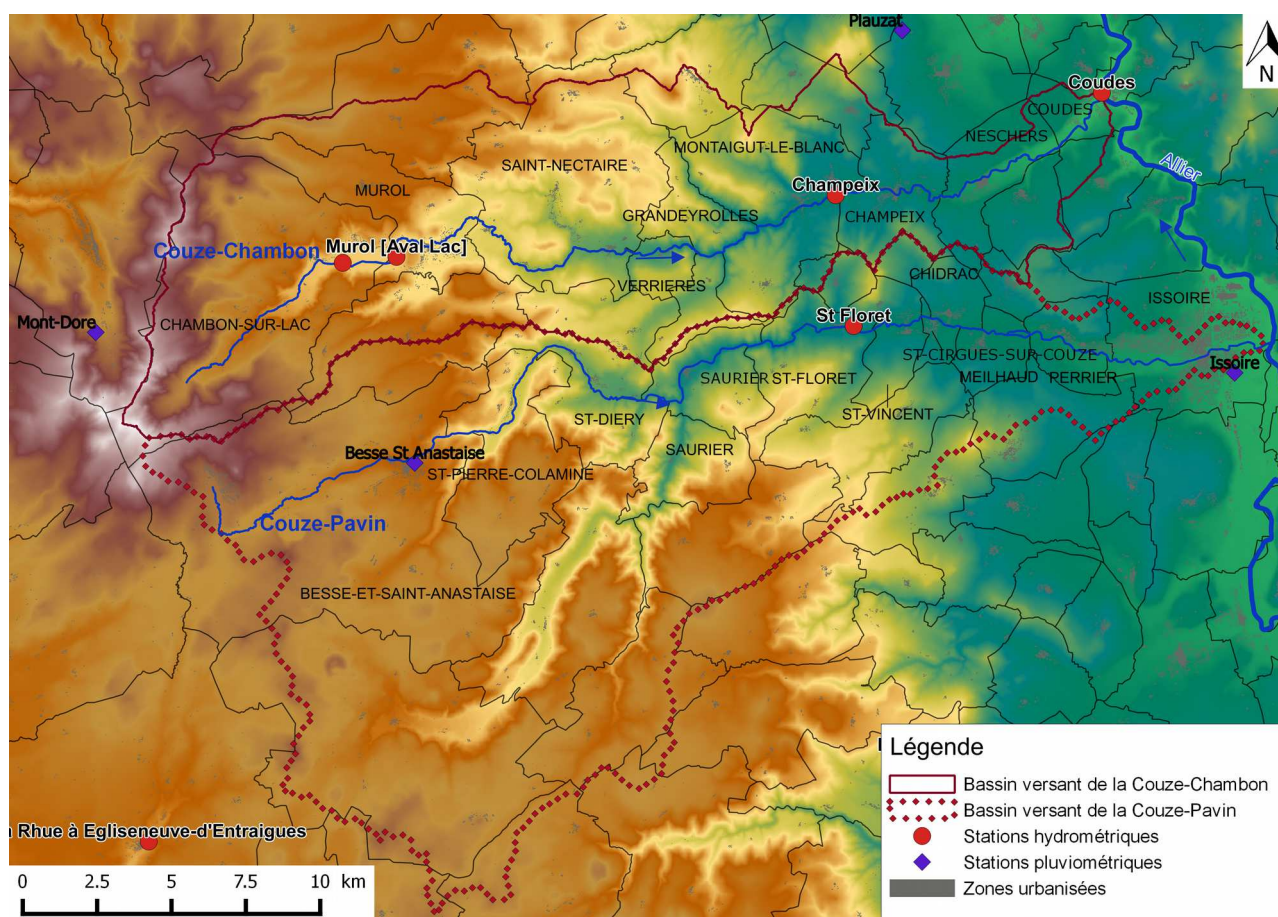


Figure 5 : Bassins versants de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin dans le département du Puy de Dôme (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

La Couze-Chambon ou Couze-Champeix est issue de la confluence de deux cours d'eau torrentiels : la Couze de Surains et la Couze de Chaudefour prenant leurs sources au Puy de Surains (1520 m) et au Puy Ferrand (1854 m). Elle s'écoule d'Ouest en Est sur 42 km et draine un

²¹ Une zone soumise à un effet d'abri présente une pluviométrie plus faible que celle attendue. Elle est protégée des perturbations pluvieuses par le relief qui les arrête avant qu'elles atteignent ces zones.

bassin versant de 195 km² jusqu'à sa confluence avec l'Allier à Coudes. Elle traverse le lac Chambon entre les communes de Chambon-sur-Lac et Muroi. Ses principaux affluents sont les ruisseaux de la Planchette, la Chadeyre, Fredet, Treuil, Combes, Rivalet et Quinsat [19]. Son débit moyen est de 2,6 m³/s [banque hydro].

La Couze-Pavin ou Couze d'Issoire prend sa source à 1 580 m d'altitude près de Notre-Dame de Vassivière et se jette dans l'Allier au niveau d'Issoire. Elle draine un bassin versant de 288 km² sur une longueur de 46 km². Ses principaux affluents sont : le ruisseau de Malvoissières en rive gauche et le ruisseau de Vaucoux, la Couze de Valbeleix, le ruisseau de Chavelle et le ruisseau d'Antaillat en rive droite [20]. Son débit moyen est de 4,6 m³/s [banque hydro].

La Couze-Chambon et la Couze-Pavin ont des fonctionnements hydrologiques similaires. Leurs hautes eaux ont lieu entre décembre et avril et leurs basses eaux entre juillet et octobre avec des fluctuations saisonnières marquées. Leur proximité géographique les soumet fréquemment aux mêmes événements pluvieux et donc à des crues concomitantes. L'évolution des crues est généralement identique et leurs pics quasiment simultanés. Les crues de janvier 1955, janvier 1982, novembre 1994 et décembre 1999 ont ainsi affecté les deux bassins versants. Rares sont les crues marquantes qui générées par des orages très localisés, telles la crue cinquantennale de juin 1992 sur la Couze-Chambon, n'ont affecté qu'un seul bassin versant. Les crues marquantes de ces bassins versants sont présentées en annexe II.

Le recueil des estimations de débits de crue effectué lors de précédentes études est présenté en annexe III. Les débits de crue estimés lors d'études précédentes sont proches pour des faibles périodes de retour, en revanche ils divergent fortement pour des périodes de retour plus élevées et sont peu fiables à l'aval. Cela s'explique en grande partie par des difficultés de quantification du volume de sédiments et d'embâcles²² charriés par le cours d'eau qui gonflent la hauteur d'eau relevée lors des crues. Un autre biais est lié à l'utilisation de repères de crue pour estimer le débit. Ils reposent sur des témoignages rapportés parfois plusieurs semaines après les crues et sont donc potentiellement inexacts. De plus, les débits sont obtenus à partir de la zone de forte incertitude des courbes de tarage, ils présentent donc les mêmes biais. Les débits caractéristiques de l'étude du CETE [20] sont retenus pour la Couze-Chambon, car ils prennent en compte les particularités du bassin versant. Pour la Couze-Pavin, les résultats de l'étude Silène 2007 sont choisis, l'étude CETE 2004 complétera les valeurs manquantes. Leurs résultats sont regroupés dans le tableau 3.

	Surface du bassin (km ²)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)
Couze-Chambon						
Chambon sur Lac (station Lac amont)	31,5	20	25	32	44	58
Muroi (station Lac aval)	36	10	12	13	16	-
Montaigut-le-Blanc (station Champeix)	159	42	52	61	73	-
Couze-Pavin						
St-Floret (station)	216	60	80	85	110	150

Tableau 3 : Débits caractéristiques retenus pour la Couze-Pavin et la Couze-Chambon

À l'amont des deux vallées, les terrains sont constitués de roches volcaniques, la vallée est étroite et les pentes y sont fortes (0,04-0,05 m/m en moyenne) et les cours d'eau torrentiels. L'alternance de très fortes pentes et de vallées plus larges en faux-plat, dans lesquelles sont implantés des bâtiments et des habitations, y induit des variations hydrauliques et des risques de montée rapide des eaux. Ce phénomène est marqué dans les secteurs de Saint-Pierre-Colamine et de Saurier pour la Couze-Pavin et de Saint-Nectaire, Montaigut-le-Blanc et Champeix pour la Couze-Chambon. À l'aval de Saint-Vincent pour la Couze-Pavin et de Neschers pour la Couze-Chambon, les terrains deviennent granitiques voire sédimentaires. La vallée s'élargit et la pente

²² Embâcle : accumulation de débris charriés par un cours d'eau (végétation, branchages,...)

devient plus faible (0,005-0,01 m/m en moyenne). Le risque d'inondation y est augmenté dans les zones de rupture de pente par la présence d'embâcles qui font barrage à l'écoulement et induisent une hausse du niveau d'eau. L'arrivée avec des pentes faibles à la confluence permet à l'Allier en crue de remonter ces cours d'eau sur des centaines de mètres [20] [19].

1.3.4. Des crues orageuses dominantes à l'Est : les bassins versants du Sichon, du Jolan et de la Durolle

À l'Est, le Livradois et le Forez sont en situation d'abri (900 à 1 200 mm/an et 1 200 à 1 500 mm/an) de même que les plaines et vallées (de 600 mm/an à Clermont-Aulnat à 800mm/an). Des **épisodes orageux** courts et intenses sont cependant fréquents en été. Ils induisent des crues sur de petits bassins versants ou en tête de bassin. Le Sichon, le Jolan et la Durolle sont caractéristiques de cette zone (voir figure 6). Même s'ils sont moins fréquents, des épisodes océaniques affectent également cette partie du bassin de l'Allier en automne, en hiver et au printemps.

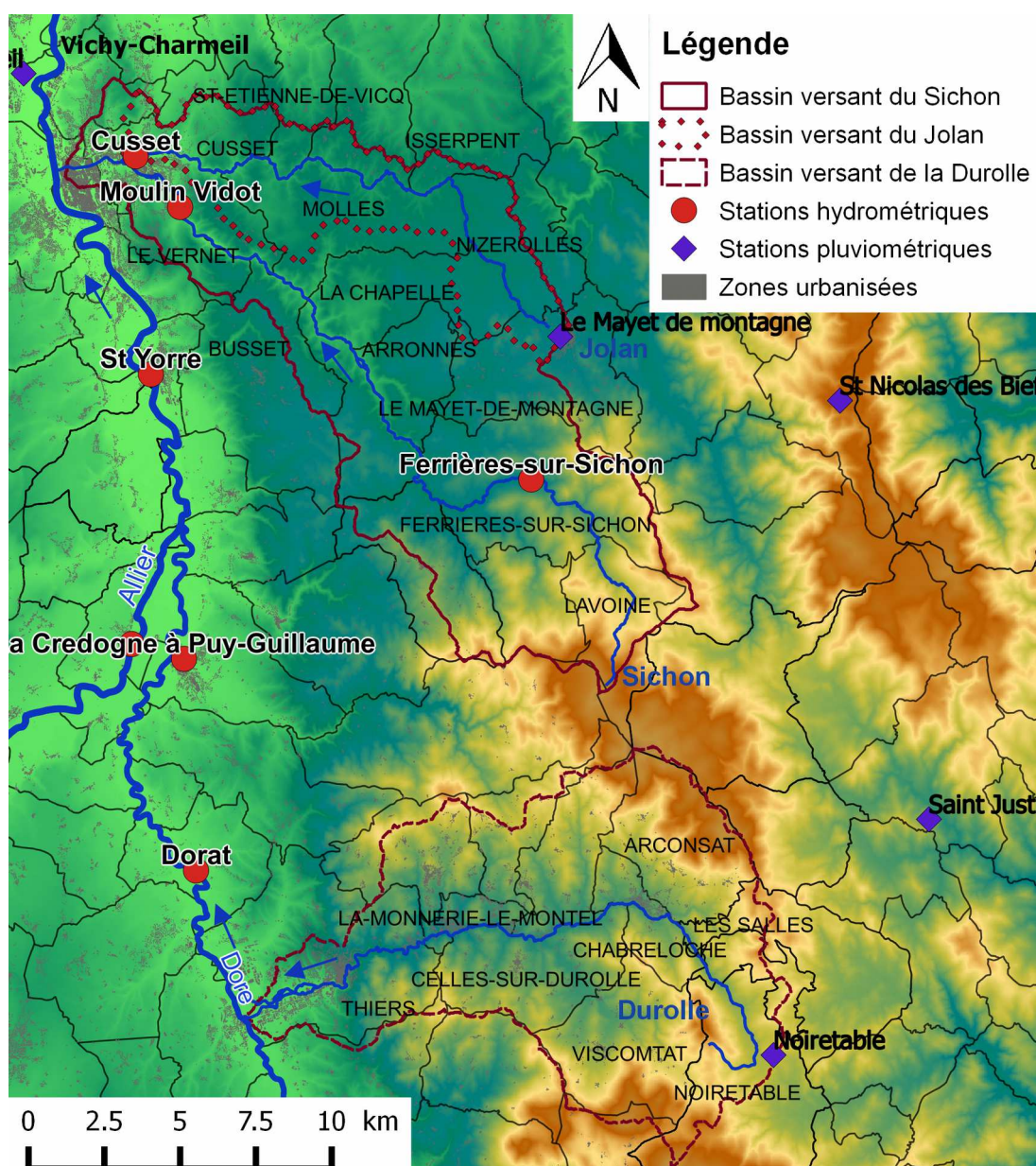


Figure 6 : Bassins versants du Sichon et du Jolan dans le département de l'Allier et de la Durolle dans le département du Puy de Dôme (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

Le Sichon prend sa source à 1 150 m d'altitude au niveau du puy de Montoncel dans le massif des Bois Noirs sur la commune de Lavoine (03). Il se jette au bout de 42 km dans l'Allier à Vichy. Son bassin versant s'étend sur 235 km². Il a pour affluent principal le Jolan qui draine 64 km². D'une longueur de 27km, il prend sa source au Mayet de Montagne (03) à 614 m d'altitude et rejoint le Sichon à l'aval de Cusset [21]. Située plus au Sud, la Durolle prend sa source à Noirétable (42) et se jette dans la Dore à l'aval de Thiers (63). Longue de 33km, son bassin versant a une superficie de 172 km². Son affluent principal, la Semaine, draine 36 km² en rive gauche [22] [23]. Son débit moyen estimé entre 1970 et 2006 au niveau d'une micro-centrale hydroélectrique à La Monnerie-le-Montel est de 2,9 m³/s.

Le Sichon se caractérise par des hautes eaux de décembre à avril son débit moyen est de 2,4 m³/s à la station de Moulin-Vidot sur la commune de Cusset. Les basses eaux sont atteintes entre juillet et octobre avec des débits moyens de 0,8m³/s en août et septembre [banque hydro]. Il faut ajouter à ces débits, après la confluence, le débit moyen de 0,7m³/s du Jolan à Cusset. Le Jolan présente par ailleurs les mêmes variations saisonnières que le Sichon mais avec des débits compris entre 1,2 et 0,2 m³/s. Le débit instantané maximal enregistré à Moulin-Vidot a été de 83,9 m³/s le 22 mai 2012 et celui à Cusset de 53,3 m³/s le 8 août 2013 [17].

Le type de crue orageuse courte et intense du Sichon et du Jolan rend assez rare une concomitance avec les crues de l'Allier majoritairement dues à des pluies plus longues océaniques et/ou cévenoles. En revanche, les bassins versants du Sichon et du Jolan sont semblables en termes de morphologie et d'événements déclencheurs des crues, leur survenue simultanée est donc possible [17]. D'avantages soumises à l'influence du relief, les crues importantes de la Durolle sont essentiellement causées par des combinaisons entre pluie et fonte des neiges ou par des orages violents dus au blocage par le relief. Les crues torrentielles qui en résultent se caractérisent par des montées d'eau et des décrues très rapides avec un charriage important induisant des dégâts supplémentaires [23].

Les crues historiques du Sichon, du Jolan et de la Durolle ainsi que les commentaires sur les inondations relevés dans différentes études sont présentés en annexe IV. Les deux crues les plus marquantes de ces dernières années sont ainsi la crue presque cinquantennale sur le Sichon de mai 2012 et celle quasiment centennale d'août 2013 sur le Jolan, la Durolle a également été soumise à ces événements, mais de façon moins marquante. La dernière crue importante ayant justifié l'état de catastrophe naturelle sur la Durolle date de décembre 2003 avant elle, la crue la plus importante notée était celle de mars 1988 qui a été estimée comme étant proche d'une cinquantennale. Cette synthèse des crues marquantes montre dans la plupart des cas une coïncidence des crues du Sichon et du Jolan du fait de la proximité géographique des têtes de bassin versant soumises à des influences climatiques similaires. Du fait de la proximité de la Durolle avec le Sichon et le Jolan, elle peut être soumise aux mêmes orages et donc à des crues en même temps que le Sichon et le Jolan. Elles sont généralement atténuées sur un bassin lorsqu'elles touchent les autres.

Un recueil des estimations de débits de crue réalisées dans le cadre d'études est présenté en annexe V pour le Sichon-Jolan et en annexe VI pour la Durolle. Les estimations réalisées pour les études anciennes sur le Sichon et le Jolan sont peu fiables : les chroniques de données ne sont pas suffisantes pour calculer des débits pour des périodes de retour élevées et les caractéristiques pluviométriques utilisées sont anciennes et ne tiennent pas compte des variations actuelles. Les valeurs retenues seront donc celles de l'étude la plus récente, l'étude ANTEA 2014 même si l'incertitude sur les périodes de retour élevées reste forte [24]. Pour la Durolle, la méthode de comparaison avec d'autres bassins versants a été choisie, car elle présente un compromis entre les valeurs des autres méthodes [23][22]. Cependant, en l'absence d'une station limnimétrique sur la Durolle, ces débits estimés ont une fiabilité limitée surtout en ce qui concerne les périodes de retour élevées. Les débits retenus pour ces bassins versants sont présentés dans le tableau 4.

	Surface du bassin (km ²)	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₃₀ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀₀ (m ³ /s)
Sichon-Jolan								
Sichon à la station de Ferrières-sur-Sichon	27	9	11	12	-	15	-	-
Sichon à la station de Moulin-Vidot (Cusset)	159	39	47	63	72	83	98	148
Jolan à la station de Cusset	64	23	29	36	41	53	59	91
Confluence Sichon-Allier	235	55	66	89	103	119	142	217
Durolle								
Chabreloche (Pont de la Goutte Noire)	35	12	15	26	40	51	62	76
Amont de la confluence avec la Semaine	73	22	29	46	68	85	101	123
Aval de la confluence avec la Semaine	115	33	43	66	95	118	140	170
Confluence avec la Dore	172	47	60	86	121	146	172	206

Tableau 4 : Débits caractéristiques retenus pour le Sichon, le Jolan et la Durolle

La vallée amont du Sichon et du Jolan est en grande partie encaissée et granitique. En dehors d'Arronnes et de Ferrières-sur-Sichon où elle s'élargit, les zones impactées par les inondations sont restreintes. La pente du Sichon est forte dans cette zone (entre 0,02 et 0,04 m/m), celle du Jolan est plus modeste et est comprise entre 0,01 et 0,02 m/m. À l'aval, en entrant dans la plaine alluviale de l'Allier au niveau de Cusset et de Vichy, la vallée s'élargit et la pente diminue, elle est alors proche de 0,005 m/m. Les zones inondables sont alors plus importantes et l'Allier en crue peut remonter le Sichon sur plusieurs centaines de mètres.

À l'amont de la Durolle, la vallée est large mais se rétrécit jusqu'à former des gorges entre La Monnerie-le-Montel et Thiers, sa vallée ne dépasse généralement pas 50m de large alors qu'à l'aval de Thiers, elle s'élargit et peut être large de plus d'1 km. La D2089 (ancienne RN89) ainsi que le chemin de fer délimitent le lit majeur sur une grande partie du tracé, lorsqu'ils se retrouvent dans le lit majeur, ces ouvrages sont en remblai et peuvent parfois être vulnérables aux inondations.

Les crues provoquées par tous les phénomènes climatiques exposés précédemment sont régulièrement grossies par la fonte des neiges. Le bassin versant de l'Allier est ainsi soumis à des crues dévastatrices mais ses affluents ne sont pas non plus épargnés et subissent des crues qui peuvent induire un bilan matériel lourd pour des villes comme Vichy pour le Sichon, Thiers pour la Durolle, Issoire pour la Couze-Pavin et Champeix pour la Couze-Chambon. Une estimation précise des enjeux touchés et des caractéristiques hydrologiques permettra de justifier la nécessité de la mise en place de systèmes de prévision des crues sur ces bassins versants. Cela orientera également le choix d'un système selon les critères nécessaires à leur mise en place présentés précédemment.

2. Choix d'un système d'alerte de crue

2.1. Enjeux

2.1.1. *Cartes d'aléa et données de ZI issues d'études antérieures*

La détermination des enjeux établira la priorité dans la mise en place d'un système d'alerte sur les bassins versants. Les enjeux sont obtenus en confrontant une cartographie les regroupant au tracé des zones inondables.

Les zones inondables sont regroupées dans différents documents réglementaires et issues d'études successives. Sur les bassins versants étudiés, elles proviennent à la fois de Plan de Prévention du Risque Inondation (PPRI)²³ et de Territoire à Risque important d'Inondation (TRI). Les Plan de Prévention du Risque Inondation les plus anciens réalisés sur les bassins versants étudiés : ceux de la Durolle, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin suivent une approche hydrogéomorphologique. Mise au point dans les années 1980, elle est devenue à partir de 1996 la référence pour l'élaboration des PPRI et des Atlas de Zones Inondables. Elle se base sur l'étude de la plaine alluviale et notamment sur son analyse hydrologique et historique. Elle s'intéresse particulièrement aux différents lits topographiques que la rivière a modelé au cours de crues successives par érosion et sédimentation. Cette étude repose sur des visites de terrain et de la photo-interprétation afin de délimiter les différentes entités, de décrire leur fonctionnement et leur extension spatiale et donc de tracer les limites des différentes zones inondables [25].

Les cartes obtenues regroupent les ZI en 3 catégories : aléa faible, aléa moyen et aléa fort. Les critères de classification sont présentés en figure 7 et se basent sur des vitesses et des hauteurs d'eau estimées à partir de calculs hydrauliques et d'observation des crues historiques par le biais de témoignages de riverains et de laisses de crue.

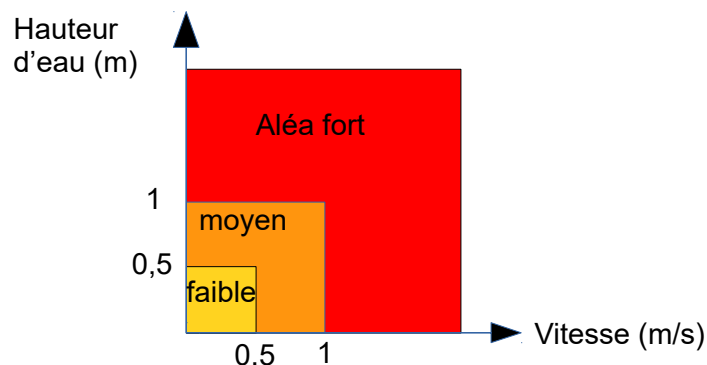


Figure 7 : Définition du type d'aléa en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement

Pour les études plus récentes telles que l'étude pour le ou dans le diagnostic des risques réalisé sur le TRI de Vichy Val d'Allier (VVA) réalisée sur l'aval du Sichon et du Jolan, les cartes sont réalisées à partir de modélisations hydrauliques et en utilisant un Modèle Numérique de Terrain (MNT)²⁴.

Pour chacun de ces bassins versants, la crue de référence utilisée est la crue centennale car aucune crue historique pour laquelle les données sont disponibles ne dépasse cette période de retour. La précision des limites de ZI est variable. Elle dépend de la méthode et du support utilisés pour leur réalisation mais aussi de la fiabilité des données recueillies, notamment en ce qui concerne les laisses de crue. Les données sont parfois imprécises et les délimitations entre les couches peuvent présenter des lacunes dues à des tracés manuels (c'est notamment le cas pour

23 PPRI : Plan de Prévention du Risque d'Inondation, document réglementaire délimitant et caractérisant les zones inondables sur le territoire d'une commune ou d'un groupement de communes et donnant des prescriptions pour limiter les risques liés aux inondations

24 MNT : Modèle Numérique de Terrain, représentation numérique du relief dans une zone donnée.

la Couze-Pavin). Ces incertitudes sur le tracé des couches devront être prises en compte par la suite. Les commentaires sur ces tracés et sur les incertitudes sont regroupés en annexe VII.

Afin de déterminer les enjeux en zone inondable, il faut établir une carte regroupant les différents enjeux qui va être croisée avec celle des zones inondables.

2.1.2. Calcul de la population et des emplois en ZI

Le calcul de la population et des emplois en zone inondable (ZI) est effectué grâce à l'utilisation du logiciel QGis²⁵. Il permet de croiser les couches de ZI disponibles issues des PPRI ou TRI à celles donnant une estimation bâtiment par bâtiment de la population [26] ou des emplois. Afin de faciliter les calculs, les limites des BV ont été obtenues automatiquement grâce au logiciel Hydrokit²⁶. Les exutoires des cours d'eau étudiés ont été positionnés légèrement en amont de la confluence avec un cours d'eau principal (Allier ou Dore) afin de ne pas prendre en compte des zones affectées par les débordements du cours d'eau principal souvent intégrées aux PPRI. La méthode d'obtention des résultats est présentée en annexe VIII.

Les estimations de population issues d'une précédente étude de la DREAL Auvergne sont soumises à plusieurs incertitudes liées aux couches SIG, aux données utilisées, à leur mode d'obtention et à la méthode de calcul.

La couche donnant la population par bâtiment est à ce jour la plus précise disponible. L'obtention de données plus fines semble impossible pour des raisons de confidentialité des données fiscales. Elle est basée sur les foyers fiscaux, la surface et le nombre d'étages des bâtiments et utilise un facteur de correction pour obtenir la population légale. Il apparaît difficile de faire mieux avec les données utilisables. Elle présente néanmoins des biais liés au carroyage 200mx200m de la population fiscale, très imprécis par rapport à l'usage qui en est fait. Elle prend également en compte une grande variété de bâtiments non industriels de plus de 20 m² auxquels elle attribue une valeur de population. Cette méthode ne reflète pas toujours la réalité : les bâtiments pris en compte peuvent être des habitations, des villages de vacances, des bâtiments publics mais aussi des bureaux voire certains bâtiments agricoles.

Des différences entre les données cadastrales et les données fiscales créent des biais. C'est le cas lorsqu'une donnée de population fiscale existait dans le carroyage mais qu'aucun bâtiment n'était présent pour ce carreau dans la BD TOPO®. Pour mettre en lumière ce problème, les concepteurs de la couche ont créé un bâtiment fictif auquel a été affecté la population restante. La valeur de population dont on ne connaît pas la localisation exacte représentée par ces bâtiments fictifs donne donc une source d'incertitude pour la population en ZI.

L'évolution de population entre les données utilisées (recensement 2009) et celles actuellement disponibles (recensement 2012) est intégrée au calcul de population. En revanche, l'évolution de la population entre le dernier recensement et la situation présente n'est pas prise en compte. Les variations de population d'une année sur l'autre peuvent être très fluctuantes. La différence entre les valeurs de population en ZI en 2009 et en 2012 donne néanmoins un ordre de grandeur de l'évolution possible. Elle peut donc faire office de marge d'incertitude.

La dernière source majeure d'incertitude est l'enveloppe de ZI utilisée. Elle provient des dernières études réglementaires en vue de l'établissement d'un TRI ou d'un PPRI pour chaque bassin versant. Son tracé a généralement une erreur de 5 à 20 m due à la fois à la largeur du trait, à l'échelle, la résolution ou la précision de la carte utilisée, mais également à l'incertitude sur la hauteur d'eau estimée pour la crue. Cette erreur peut varier le long du tracé car une erreur moyenne de 20 cm sur le niveau d'eau n'aura pas le même impact sur une vallée encaissée que sur un fond de vallée plus large. En l'absence de données sur la surface de ZI et pour simplifier l'estimation, elles seront obtenues à l'échelle du bassin versant en multipliant la densité moyenne de population par la marge d'erreur du tracé de l'enveloppe de ZI et par la longueur du cours d'eau considéré.

Le nombre d'emplois en ZI est moins simple à obtenir, car il n'existe pas de données pour

²⁵ Quantum GIS : <http://www.qgis.org/fr/site/>

²⁶ Logiciel créé par Strategis et fonctionnant avec QGis

les emplois bâtiment par bâtiment. Seule une couche SIG donnant le nombre d'emplois par commune est utilisable depuis 2012. Même si la situation a pu évoluer, elle peut donner une estimation globale des emplois en ZI. Il est donc possible d'affecter un nombre d'emplois à un bâtiment en effectuant plusieurs hypothèses simplificatrices.

Les zones industrielles, artisanales et commerciales et les grands magasins présentent des densités d'emplois plus fortes, c'est pourquoi elles sont traitées à part. Elles appartiennent majoritairement aux secteurs industriel et commercial. Il sera donc considéré ici que ces zones regroupent 100 % des emplois industriels et 50 % des emplois relevant du commerce, des transports et des services divers de la commune. Les emplois restants sont affectés aux bâtiments en dehors de ces zones. Les derniers bilans économiques du Comité d'Expansion Économique de l'Allier²⁷ (pour l'année 2014) et de la Chambre de Commerce et d'Industrie (CCI)²⁸ du Puy de Dôme (pour l'année 2012) donnent une répartition des emplois pour ces secteurs d'activité. Respectivement 16 % et 12 % des emplois appartiennent au secteur industriel dans l'Allier et dans le Puy de Dôme et 38 % et 45 % sont liés au commerce, aux transports et aux services divers. Ces emplois sont répartis entre les bâtiments des zones définies proportionnellement à leur surface au sol issue du cadastre. La méthode de calcul est présentée en annexe IX.

Ne disposant pas de données supplémentaires sur la surface de plancher des bâtiments et sur la répartition des emplois au sein des communes, cette méthode ne peut donner qu'un ordre de grandeur de la population touchée. Les biais sur les valeurs obtenues sont estimés à 10 %.

En plus de ces enjeux répartis le long des cours d'eau, des enjeux ponctuels sont à prendre en compte et à étudier.

2.1.3. Enjeux ponctuels en zone inondable

Il existe différents types d'enjeux ponctuels : sites industriels, bâtiments publics, zones touristiques et lieux d'hébergement ou d'accueil du public.

Certaines des données nécessaires à leur recensement sont déjà répertoriées. Une couche mise à jour en janvier 2016 répertorie les ICPE, elle pourra être utilisée telle quelle. Les couches localisant les bâtiments publics, les écoles, les terrains et bâtiments de sport, les musées et les monuments historiques sont des extraits de la BD TOPO® IGN de 2012. Elles sont récentes et concernent des bâtiments pour lesquels il y a eu peu de changements, elles sont directement utilisables. En revanche, la base de données des campings doit être complétée et vérifiée à partir des données des pages jaunes et des données des offices du tourisme. Aucune couche répertoriant les autres types d'hébergement touristique n'est disponible. Elle sera donc créée et vérifiée à partir des données des sites des offices du tourisme, des pages jaunes mais aussi du site Atout France donnant un registre des hébergements collectifs classés²⁹.

Ces données sont nécessaires afin d'identifier les zones où les risques sont les plus importants. Les zones et les lieux d'hébergement touristiques induisent des risques supplémentaires : cette population peut être touchée au même titre que la population « locale » mais est souvent moins bien informée et moins consciente des risques, elle y est donc plus vulnérable. Il faut ainsi attacher une importance particulière aux campings, souvent situés au bord de l'eau et donc durement touchés à chaque inondation.

Certains enjeux sont difficilement représentables sur une carte : les chemins de randonnée, les zones de pêche et certains circuits ou lieux touristiques, ils devront être pris en compte séparément. La fréquentation touristique est fluctuante et dépendante de beaucoup de paramètres tels que la saison et la météo et les estimations chiffrées sont rares pour des sites touristiques de petite ou de moyenne taille. Toutes ces informations seront listées séparément et obtenues essentiellement à partir des informations des offices du tourisme³⁰.

Les administrations et les bâtiments publics sont doublement sensibles aux inondations : ce

27 <http://www.ceea-allier.com/> Comité d'Expansion Économique de l'Allier

28 <http://www.auvergne.cci.fr/> Portail économique du Puy de Dôme

29 <http://atout-france.fr/> l'Agence du développement touristique de la France

30 Puy de Dôme : <http://www.planetepuydedome.com> Allier : <http://www.allier-auvergne-tourisme.com/>

sont des lieux de gestion de crise et de coordination des secours et ils accueillent du public et des employés. Les terrains de sport voire certains bâtiments sportifs sont régulièrement construits en zone inondable et même à proximité immédiate des cours d'eau, ils sont donc, dans ce cas, les premiers touchés en cas d'inondation. De plus, certains bâtiments sportifs tels que les gymnases sont également des lieux d'accueil de la population sinistrée. Il faut de même attacher une importance particulière aux écoles, car elles accueillent en nombre un public vulnérable. Tous ces enjeux devront donc être localisés et pris en compte pour la suite de l'étude.

Les enjeux ainsi déterminés vont permettre de délimiter des zones prioritaires pour la mise en place d'un système d'alerte de crue et classer les bassins versants selon leurs enjeux.

2.2. Bilan des enjeux et classement des bassins versants prioritaires selon les enjeux en zone inondable

2.2.1. Sichon et Jolan

À l'amont, la vallée du Sichon est encaissée, la zone inondable et les enjeux y sont réduits. Il est en revanche canalisé et ses berges beaucoup plus urbanisées dans Cusset et Vichy. Les enjeux se concentrent donc essentiellement au niveau de ces deux communes [27].

Il n'existe pas actuellement d'étude donnant des zones inondables sur l'amont du Sichon et du Jolan. Il faut donc estimer l'emprise de cette zone. Dans un premier temps, une couche tampon de 200 m autour du Sichon et de 100m autour du Jolan est créée, elle correspond à la largeur maximale du fond de vallée. Elle est ensuite ajustée manuellement afin de suivre la topographie du fond de la vallée et d'éviter de prendre en compte des bâtiments qui seraient sur les hauteurs et donc hors d'eau. L'emprise de la zone inondable ainsi créée est volontairement surestimée afin d'obtenir des estimations sécuritaires de population touchée. Elle donne cependant des estimations avec des ordres de grandeur réalistes. Malgré cette surestimation, les valeurs obtenues restent faibles par rapport à la population touchée à l'aval.

Suite à une réunion avec les services de la DDT de l'Allier, les promeneurs et les pêcheurs sur les berges des cours d'eau ont été identifiés comme un enjeu supplémentaire. Le nombre est difficilement quantifiable, car il varie selon l'heure, le jour, le mois, la saison... Ce sont néanmoins les premières personnes touchées en cas de crues soudaines. Il faut donc délimiter les zones potentiellement touristiques et les spots de pêche et les prendre en compte lors de la définition des niveaux d'alerte. Ils sont présentés dans le tableau 5.

Commune	Monuments Historiques	Musées	Chemins de randonnée	Spots de pêche	Zones de baignade ou d'activités nautiques
Ferrières-sur-Sichon	1	-	-	3	-
Arronnes	1	1	1	-	-
Busset	-	-	1	-	-
Cusset	-	-	-	-	1

Tableau 5 : Enjeux touristiques sur le Sichon et le Jolan (03)

Malgré l'attractivité touristique de Vichy et de Cusset, les berges sont peu aménagées et l'accès difficile, le risque est donc plutôt faible d'y rencontrer des promeneurs. Un programme de réhabilitation et d'aménagement des berges du Sichon dans l'agglomération vichyssoise est à l'étude ce qui pourrait changer l'attractivité du Sichon.

Les enjeux calculés ou obtenus à partir des couches SIG sont présentés dans la figure 8, et détaillés en annexes X et XI. Les différences entre les estimations réalisées et celles obtenues par des études précédentes sont liées aux méthodes de calcul et aux données desquelles est extraite la population en zone inondable. Elles proviennent également de la délimitation choisie pour les calculs entre la zone inondable par l'Allier, et celle par le Sichon et le Jolan.

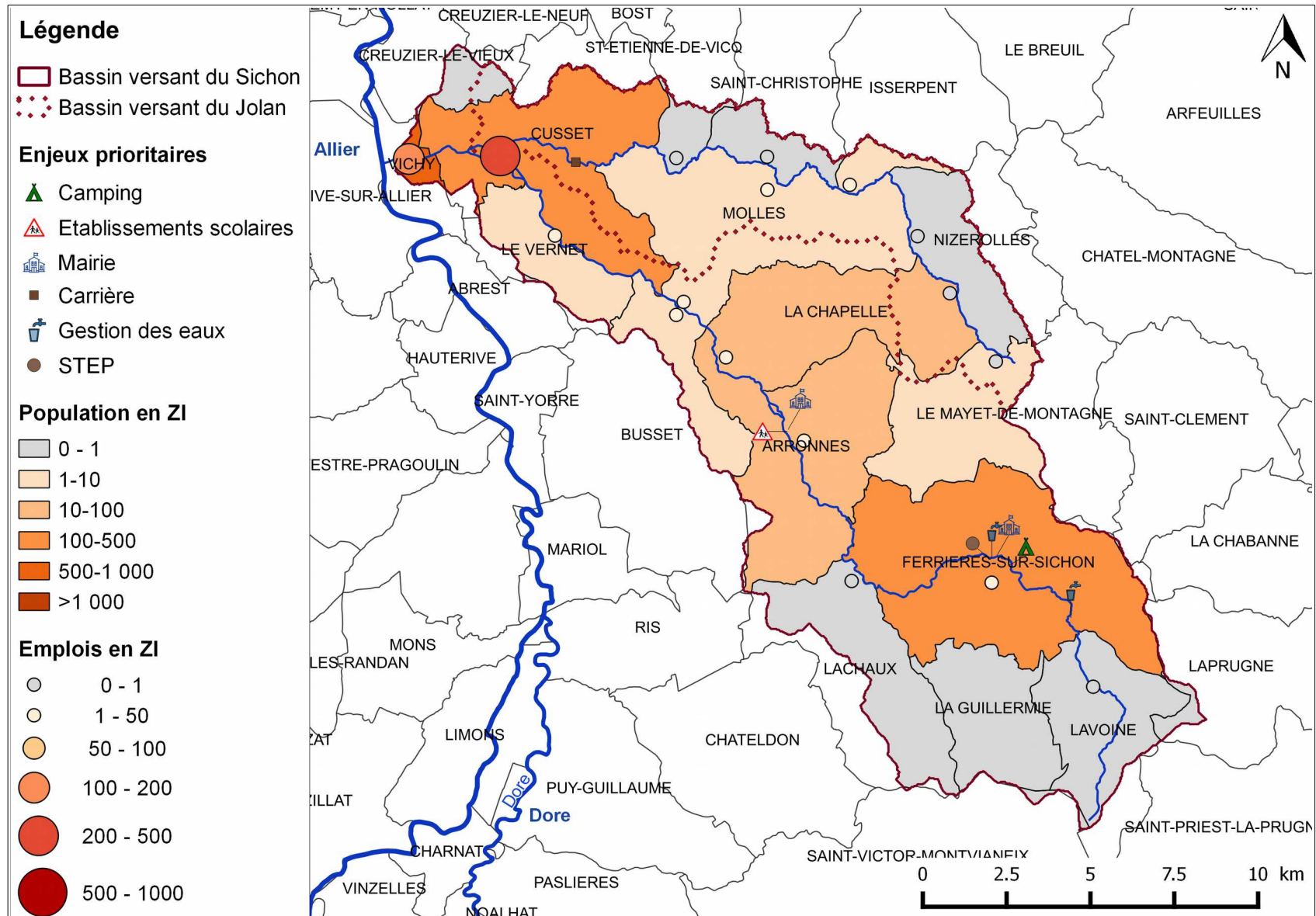


Figure 8 : Enjeux principaux en zone inondable pour une crue centennale du Sichon et du Jolan (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

Au total, 1 300 habitants et 620 emplois sont susceptibles d'être impactés par une crue centennale du Sichon et du Jolan (avec des incertitudes de l'ordre de 200 habitants et 60 emplois). Près des 4/5ème l'est par le Sichon. Les enjeux sont concentrés quasi exclusivement à Cusset pour le Jolan et également majoritairement à l'aval pour le Sichon. Si pour le Sichon, les enjeux sont en grande partie concentrés à Cusset et Vichy, des enjeux ponctuels importants sont également présents au niveau de Ferrières-sur-Sichon et d'Arronnes. En dehors de la population et des emplois touchés, les enjeux ponctuels restent limités. L'école d'Arronnes, un camping à Ferrières-sur-Sichon et les mairies d'Arronnes et Ferrières-sur-Sichon sont les points essentiels à surveiller dans le cadre de crues soudaines du fait de leur vulnérabilité et de l'utilisation fréquente des mairies comme centre de gestion de crise.

La zone principale à surveiller dans le cadre d'un dispositif de prévision des crues se situe à Cusset pour le Jolan, elle est plus étendue pour le Sichon où l'état de catastrophe naturelles déclaré par le passé à Ferrières-sur-Sichon et à Arronnes montre la nécessité de les intégrer. Il s'étendra donc pour le Sichon de Ferrières-sur-Sichon à la confluence avec l'Allier à Vichy.

2.2.2. Couze-Chambon et Couze-Pavin

Les communes riveraines de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin sont touristiques et appréciés des pêcheurs. Les sites correspondants sont regroupés dans le tableau 6.

Commune	Monuments Historiques	Musées	Chemins de randonnée	Spots de pêche	Zones de baignade ou d'activités nautiques
Couze-Chambon					
Chambon sur Lac	1	-	2	1	1
Murol	1	1			
Verrières	-	-	1	-	-
Montaigut le Blanc	-	-	1	-	-
Champeix	-	-		-	-
Coudes	-	1	-	-	-
Couze-Pavin					
Besse et St-Anastaise	-	-	2	1	1
Saurier	2	-	1	-	-
St-Floret	-	-		1	-
St-Vincent	-	-		-	-
Chidrac	-	-	-	1	-

Tableau 6 : Enjeux touristiques sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63)

À proximité de la Couze-Chambon, le château de Murol visité par 102 000 personnes en 2014 et deux autres sites d'importance sont répertoriés sur les communes riveraines de la Couze-Chambon : les Fontaines pétrifiantes (49 000 visiteurs par an) et les Mystères de Farges (21 000 visiteurs par an) à Saint-Nectaire. De même, à proximité de la Couze-Pavin : les grottes de Jonas à Saint-Pierre-Colamine et la Tour de l'horloge à Issoire attirent respectivement 27 000 et 15 000 visiteurs par an. Il faut également noter que Saint-Floret était classé plus beau village de France jusqu'au mois de janvier 2016 et accueillait 7 000 visiteurs chaque été. Bien que ces sites ne soient pas directement inondables, ils drainent assez de visiteurs pour qu'il faille en tenir compte pour la présence de promeneurs sur les berges.

Les enjeux sont présentés en figure 9 et détaillés en annexes XI, XII et XIII.

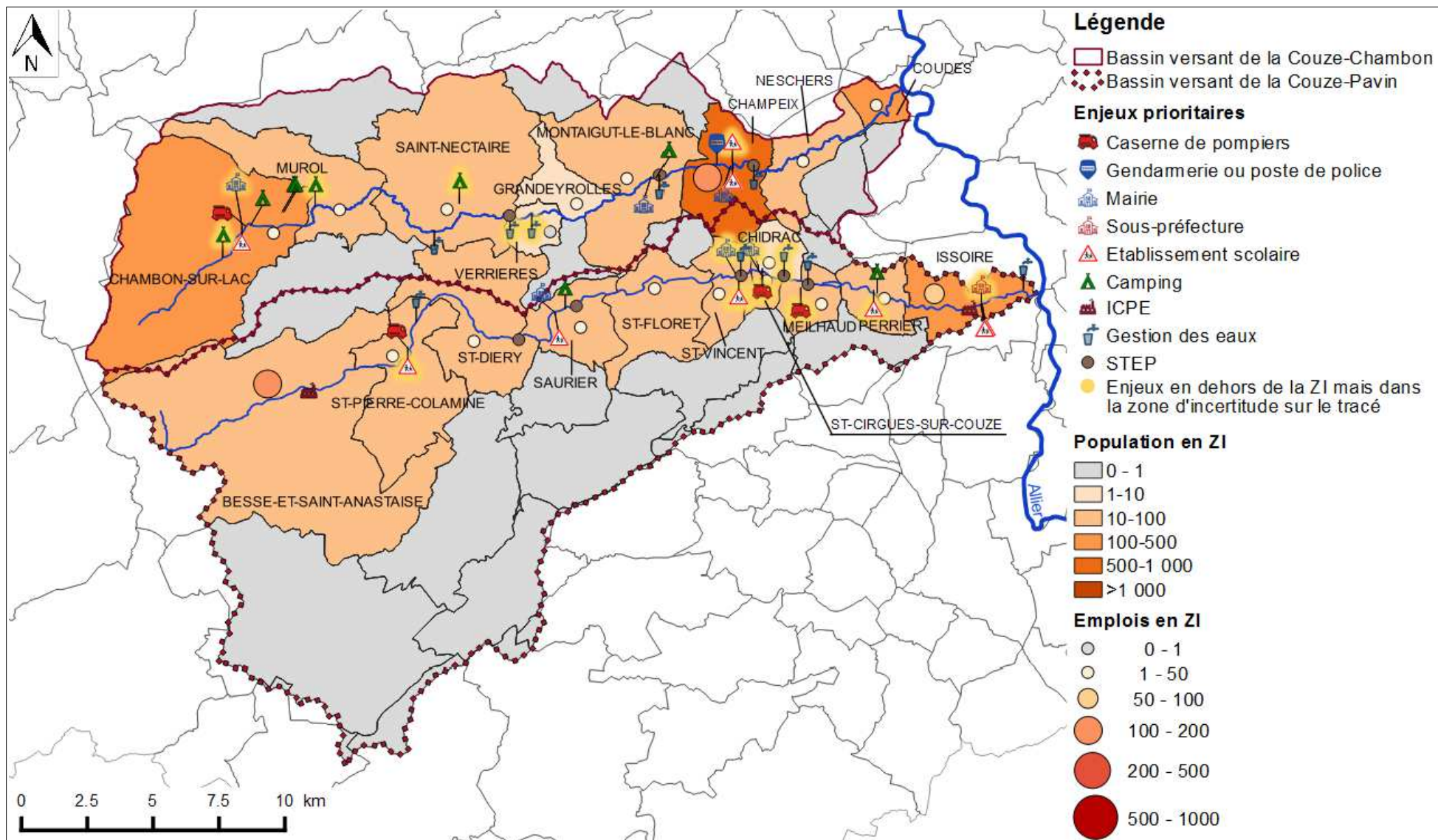


Figure 9 : Enjeux principaux en zone inondable pour une crue centennale de la Couze-Chambon et la Couze-Pavin de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

(fond

Au total ce sont 1 200 habitants et 180 emplois qui sont en ZI pour une crue centennale de la Couze-Chambon. Pour la Couze-Pavin, 800 habitants et 240 emplois sont menacés dans le cadre des inondations liées à une crue centennale (avec des incertitudes de 100 habitants et de 20 emplois pour les deux cours d'eau). Les enjeux sont majoritairement concentrés au niveau de Champeix et secondairement de Chambon-sur-Lac et de Coudes pour la Couze-Chambon. Ils sont répartis de façon plus uniforme le long de la Couze-Pavin avec néanmoins des enjeux de population et d'emplois touchés plus marqués à Besse-et-Saint-Anastaise, liés à l'activité touristique, et à Issoire liés à la densité de population.

De nombreux enjeux ponctuels sont situés en zone inondable ou en limite de zone inondable et beaucoup sont utilisés dans le cadre de la gestion de crise. Pour la Couze-Pavin, de les mairies de Saurier, Chidrac et St-Vincent, les casernes de pompiers de St-Pierre-Colamine, Chidrac et Meilhaud, la sous-préfecture d'Issoire, 2 campings et 7 écoles sont en ZI ou en limite de ZI. Le bilan n'est pas moins inquiétant pour la Couze-Chambon avec 7 campings, 3 écoles, les mairies de Chambon-sur-Lac, Montaigut-le-Blanc et de Champeix, la caserne de pompiers de Chambon-sur-Lac et la gendarmerie de Champeix.

Ainsi la zone prioritaire à protéger au vu des enjeux se situe entre Montaigut-le-Blanc et la confluence avec l'Allier à Coudes pour la Couze-Chambon et entre Saurier et la confluence avec l'Allier à Issoire pour la Couze-Pavin.

2.2.3. Durolle

Les communes de Noirétable et Les Salles à proximité des sources de la Durolle sont situées dans le département de la Loire, en dehors du territoire historique de la DREAL Auvergne, il n'y a donc que peu de données à disposition sur ces communes. Un tracé grossier d'une enveloppe de zone inondable a dû être créé sur ces communes. Dix bâtiments sont ainsi potentiellement en zone inondable à Noirétable, un à Cervières et cinq à Brissay sur la commune des Salles. Il n'y a pas de données de population par bâtiment à disposition. Ces communes sont rurales, les habitations sont donc essentiellement individuelles, afin de prendre une hypothèse sécuritaire, le nombre d'habitant par bâtiment est donc fixé à 2 et le nombre d'emplois à 1.

L'activité touristique se concentre à l'aval au niveau de Thiers et de la Monnerie-le-Montel (voir tableau 7).

Commune	Monuments Historiques	Musées	Chemins de randonnée
La Monnerie-le-Montel	-	-	3
Thiers	3	1 : Musée de la Coutellerie 26 000 visiteurs par an	

Tableau 7 : Enjeux touristiques sur la Durolle (63)

Les autres enjeux sont présentés dans la figure 10 et détaillés en annexe XIV.

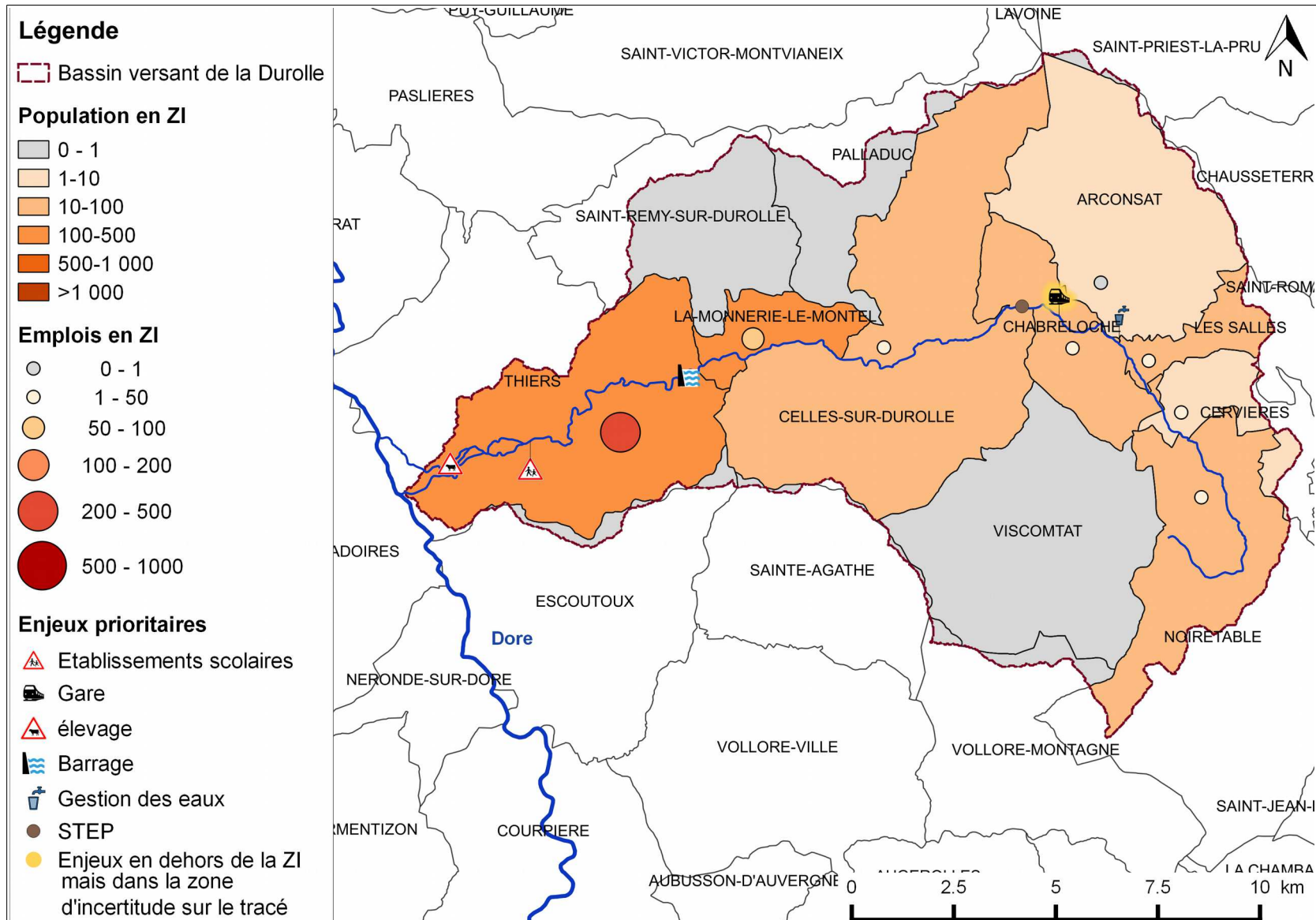


Figure 10 : Enjeux principaux en ZI par la Durolle pour une crue centennale (fond de carte BD TOPO® [IGN, 2013])

Au total, 550 personnes et 620 emplois (avec des incertitudes de plus ou moins 60 personnes et 60 emplois) sont situés en zone inondable par la Durolle avec des enjeux majoritairement concentrés au niveau de Thiers et de la-Monnerie-le-Montel. Le détail de ces chiffres est présenté en annexe XI. **Pour un système d’alerte des crues, au vu des enjeux, la zone à protéger s’étend de Celles-sur-Durolle à la confluence avec la Dore à Thiers.**

2.2.4. Classement des bassins versants prioritaires selon les enjeux en zone inondable

Le tableau 8 récapitule les estimations de population réalisées et les compare aux estimations préalables au choix des bassins versants à étudier. Les couches d’aléa sont différentes, elles peuvent être très surestimées (EPRI) ou assez anciennes (certains PPRI). Les valeurs de population en ZI obtenues peuvent donc être différentes et parfois contradictoires.

Cours d’eau	Population en ZI pour Q ₁₀₀				Population en ZI pour Q ₁₀₀₀	
	EPRI	PPRI	DI	Nouveaux calculs	EPRI	Nouveaux calculs
Sichon-Jolan	4 200	1060*	2080	1300±200	4 200	3500±200
Couze-Chambon	1 250	1210	1340	1200±100	1 500	-
Durolle	650	720	720	560±60	2 100	-
Couze-Pavin	600	-	580	800±100	1 750	-

*Tableau 8 : Comparaison entre les premières estimations de population et les calculs réalisés
calculs uniquement sur Cusset et Vichy

Les premières valeurs données pour le Sichon et le Jolan sont surestimées par rapport à celles recalculées. La délimitation difficile entre les zones inondables par l’Allier et celles par le Sichon semble en être la cause majeure d’autant plus que dans ce secteur de Vichy l’urbanisation et la densité de population sont importantes. De plus, les données issues des enveloppes de ZI de EPRI sont très approximatives et surestimées, ce qui explique ces résultats. Les valeurs obtenues pour les autres bassins versants sont assez proches de celles estimées précédemment.

Le tableau 9 résume tous les enjeux en ZI sur les bassins versants étudiés. Ils ont été classés en trois catégories selon leur importance.

Cours d’eau	Population en ZI	Emplois en ZI	Enjeux ponctuels en ZI	Tourisme en ZI
Sichon-Jolan (03)	1300±200 (++)	620±60 (++)	+/-	+/-
Couze-Chambon (63)	1200±100 (++)	180±20 (+/-)	++	++
Couze-Pavin (63)	800±100 (+)	240±20 (+/-)	++	++
Durolle (63)	560±60 (+/-)	620±60 (++)	+/-	+

Tableau 9 : Comparaison des enjeux en ZI sur différents bassins versants pour une crue centennale. +/- : enjeu limité, + : enjeu moyen, ++ : enjeu fort

L’ordre dans lequel les systèmes d’alerte vont être implantés dépend de l’importance accordée aux critères de classement du tableau 9. La population en ZI est le critère traditionnellement utilisé. Il ne tient cependant compte que de la population résidentielle sans considérer les travailleurs et les touristes de passage et sans étudier la capacité du bassin versant à faire face à une crue (en partie conditionnée par le nombre de structures de gestion de crise en ZI). Si elles sont touchées, la réponse à une crise peut être différée et certains dommages n’auront

pu être évités. Au-delà des enjeux humains, les enjeux matériels et économiques peuvent aussi être importants en termes d'emplois et de potentiel touristique touchés. Ces impacts peuvent être directs (par inondation du site) ou indirects (fournisseurs impactés, routes coupées...).

Sur tous les bassins versants, l'activité touristique a lieu essentiellement au printemps et en été. Les crues affectant le Sichon-Jolan et la Durolle sont majoritairement des crues orageuses durant l'été mais les enjeux touristiques sont restreints. De plus, les crues affectant la Couze-Chambon et la Couze-Pavin sont à dominante océanique et ont lieu en hiver. Pour réaliser le classement, l'enjeu touristique semble donc être secondaire même si certaines crues orageuses sont estivales. Les enjeux ponctuels en ZI sont, quant à eux, à prendre en compte lorsque l'émission d'une alerte permet d'évacuer le personnel et les usagers (écoles et campings notamment). Il faut également prendre en compte la désorganisation des secours suite à l'inondation de bâtiments tels qu'une caserne de pompiers. Les emplois en ZI représentent des enjeux économiques et humains importants. Néanmoins, les personnes concernées le sont pour la plupart entre 8h et 18h et l'existence de plans d'évacuation au sein des entreprises diminue la vulnérabilité des employés. Le critère primordial de classement, est donc la population, les emplois étant le second critère et les enjeux ponctuels le troisième.

Il faut également savoir que certaines enveloppes de zones inondables utilisées sont potentiellement surestimées, c'est notamment le cas pour la Durolle et la Couze-Chambon. Même s'il est préférable que ce soit le cas pour déterminer les enjeux inondables, cela pourrait poser problème pour le classement par ordre de vulnérabilité des bassins versants. Ce n'est cependant pas le cas ici, car les valeurs de population présentées prennent en compte ces incertitudes.

Le classement par enjeux pour la mise en place d'un système d'alerte est donc : Sichon-Jolan, Couze-Chambon, Couze-Pavin et Durolle. Suite à ces premières constatations, les zones d'intérêt définies doivent être confrontées à la faisabilité de la mise en place d'un système d'alerte. Cette possibilité est essentiellement liée au temps de réponse du bassin versant.

2.3. Systèmes d'alerte envisageables selon le temps de réponse

2.3.1. Méthodes de détermination du temps de réponse (T_r)

Calcul à partir de formules empiriques

Il existe différentes formules pour calculer le temps de concentration (T_c) d'un bassin versant. Celles utilisées par le SPC Allier sont présentées avec leurs limites de validité en annexe XV. Les données nécessaires aux calculs sont obtenues à l'aide du logiciel Hydrokit (Strategis) qui extrait un bassin versant à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) et donne ses principales caractéristiques. Il calcule également automatiquement des temps de concentration, néanmoins, ils ne seront pas utilisés, car certaines des formules sont inexactes. Le coefficient de ruissellement (C_r) des formules traduit la fraction des précipitations qui va être ruisselée (pluie nette) et ainsi contribuer à l'écoulement de surface et à la formation de la crue. Dans un premier temps, il est fixé à 0,3, valeur généralement utilisée pour des bassins versants ruraux [28].

Pour chaque bassin versant ou sous bassin versant, les formules de T_c applicables sont calculées. Les valeurs extrêmes sont retirées et la moyenne des valeurs restantes permet d'obtenir le temps de concentration du bassin versant. Le temps de réponse (T_r) est souvent considéré comme étant égal à 50 ou à 60 % du temps de concentration. Dans le cadre du projet crues soudaines, la formule retenue est celle utilisée par la DDTM30 : $T_r = 50\%T_c$.

Un moyen de vérifier les calculs effectués est de confronter les valeurs obtenues par les formules à celles observées lors de crues. Il faut donc disposer de chroniques de pluie et de débit. Elles sont généralement regroupées pour pouvoir être exploitées, car elles mettent en évidence la réaction hydrologique d'un bassin versant suite à un événement pluvieux.

Utilisation des chroniques pluie-débit

Pour les bassins versants de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin, du Sichon et du Jolan, des chroniques pluie-débit sont disponibles, il est donc possible d'obtenir des temps de

réponse et de concentration pour des événements réels. La méthode d'obtention graphique et les distributions statistiques des temps de réponse et de concentration sont illustrées en annexe XVI.

Les débits sont obtenus à partir des données des stations hydrométriques CRISTAL. Elles disposent d'un ou plusieurs capteurs mesurant la hauteur d'eau. La conversion en débit est permise par la réalisation de jaugeages reliant hauteur d'eau dans la rivière et débit. Des lois de correspondance sont ainsi obtenues et matérialisées par des courbes de tarage. Elles permettent, par lecture graphique ou par une formule, l'obtention du débit grâce à une mesure de hauteur d'eau dans le cours d'eau. Elles peuvent être modifiées de façon importante lors d'un changement de morphologie du lit de la rivière (érosion, bancs de sable...) notamment après de fortes crues. Par ailleurs, il n'y a que peu de jaugeages pour des crues importantes. Au-delà d'une hauteur d'eau fixée, la courbe est donc extrapolée et la relation hauteur-débit devient ainsi plus incertaine. À ces biais, s'ajoutent des doutes sur la validité des données les plus anciennes ainsi que des lacunes allant de quelques heures à plusieurs jours.

Actuellement, sur la Durole, seule une station provisoire avec une échelle d'essai est en test au niveau de Pont de Celles entre Celles-sur-Durole et la-Monnerie-le-Montel. Elle ne dispose donc pas de chroniques de données. Les stations hydrométriques des autres bassins versants et leurs caractéristiques sont présentées en annexe XVII.

Les données pluviométriques généralement utilisées par la plupart des outils de prévision des crues sont des pluies de bassin. Il s'agit d'une pluie moyenne calculée sur la surface du bassin versant à partir de pluies mesurées ponctuellement par des pluviomètres. Il existe différentes façons de l'estimer à partir des pluviomètres du réseau CRISTAL ou de MétéoFrance disponibles.

La méthode la plus simple est d'effectuer une moyenne arithmétique des valeurs relevées par les pluviomètres du secteur (voir annexe XVIII). Elle n'est pas envisageable pour les bassins versants étudiés : le relief et les conditions climatiques ont une variabilité spatiale trop forte et les stations sont trop irrégulièrement réparties. La représentativité spatiale d'une station et les spécificités pluviométriques du bassin versant ne sont donc pas prises en compte.

L'utilisation d'une moyenne pondérée (méthode des polygones de Thiessen voir annexe XVIII) affecte à chaque station un poids (un coefficient) correspondant à la portion du bassin versant qui lui est rattachée. Elle est constituée des points qui sont plus près de cette station que de tout autre pluviomètre. Même si cette méthode est plus fiable, elle ne tient pas compte de la variabilité climatique induite par le relief. Elle devra donc être couplée à l'attribution d'un poids à chaque station en fonction de la courbe hypsométrique³¹ [29]. Il faudra néanmoins faire attention à la représentativité de stations situées en dehors du bassin versant : à une altitude identique, deux stations situées sur les flancs opposés d'un relief pourront avoir des pluviométries très différentes. Les différents coefficients retenus sont présentés dans le tableau 10.

Station	Formule de la pluie de bassin
Sichon à Moulin-Vidot (03)	$0,4 * \text{Vichy-Charmeil} + 0,6 * \text{Le Mayet-de-Montagne}$
Jolan à Cusset (03)	$0,2 * \text{Vichy-Charmeil} + 0,8 * \text{Le Mayet-de-Montagne}$
Couze-Pavin à St-Floret (63)	$0,1 * \text{Issoire} + 0,3 * \text{Mont-Dore} + 0,6 * \text{Besse}$
Couze-Chambon à Champeix (63)	$0,1 * \text{Plauzat} + 0,3 * \text{Besse} + 0,6 * \text{Mont-Dore}$

Tableau 10 : Formules retenues pour le calcul de la pluie de bassin

Malgré cette méthode, des biais sont inévitables. La surveillance de bassins versants soumis aux crues soudaines nécessite des estimations de pluie à une échelle très fine (inférieure au km²) et à des pas de temps courts (de l'ordre de 15 à 30min maximum). Les réseaux de mesures conventionnels ne sont pas adaptés à ces particularités. Lors de pluies orageuses, l'espacement et la répartition spatiale des pluviomètres peuvent donc induire une non détection de fortes intensités de pluie. Par ailleurs, pour ces événements, la pluie de bassin risque également

31 Courbe hypsométrique : : graphique donnant le pourcentage du bassin versant dont l'altitude est supérieure à une valeur donnée.

d'être minimisée par la méthode de calcul en raison du poids accordé aux différentes stations. De plus, des erreurs de comptage ou des sous-estimations de la pluie surviennent lorsque les pluviomètres sont implantés en zone abritée, sont bouchés par des feuilles ou sont gelés. Dans ces conditions, le moyen le plus fiable d'obtenir les données nécessaires est d'avoir recours aux radars météorologiques. Ces données sont cependant encore peu collectées et exploitées [8].

2.3.2. Mise en cohérence des résultats et temps de réponse retenus

Les différentes valeurs obtenues sont présentées en annexe XIX. Les temps de concentration observés et calculés peuvent différer, dans ce cas, la valeur observée à une station est retenue et le ratio entre la valeur observée et calculée permet d'extrapoler les valeurs qui pourraient être mesurées en d'autres points du bassin versant.

Les temps de concentration et les temps de réponse calculés sont systématiquement sous-estimés par rapport aux relevés de terrain. Les coefficients de correction entre les valeurs calculées et les valeurs observées y sont compris entre 1,4 et 1,5. Cela peut être dû aux limites de validité des formules (surestimation si les bassins versants sont plus petits que ceux sur lesquels a été développée la formule et sous-estimation dans le cas contraire) ou dû à des hypothèses « sécuritaires » tendant à préférer une sous-estimation de ces valeurs plutôt qu'une sur-estimation. Une mauvaise estimation du coefficient de ruissellement (Cr) pourrait aussi être en cause. Il est possible de le recalculer à partir des hydrogrammes de crue et du logiciel SACHA (voir annexe XX). Le tableau 11 donne les coefficients de ruissellement moyens observés.

Bassin versant	Sichon à Moulin-Vidot	Jolan à Cusset	Couze-Pavin à St-Floret	Couze-Chambon à Champeix
Coefficient de ruissellement (Cr)	0,3±0,1	0,34±0,07	0,15±0,05	0,15±0,04

Tableau 11 : Coefficients de ruissellement au niveau des stations hydrométriques

Les valeurs obtenues sont assez proches de la valeur estimée a priori de 0,3 et les variations observées ici ont peu d'influence sur le temps de concentration. Si ces valeurs moyennes observées permettent de donner une idée du comportement du bassin versant suite à une pluie, en réalité, Cr n'est pas constant. Il dépend des paramètres du bassin versant (pente, type de sol, occupation du sol...) qui restent inchangés au cours d'une crue mais peuvent présenter des variations saisonnières liées à l'évolution du couvert végétal. Il dépend également de paramètres qui peuvent se modifier au fil du temps tels que l'humidité initiale du sol et surtout de facteurs dépendants de la pluie : de son intensité et de sa durée.

La corrélation entre temps de réponse et temps de concentration est vérifiée pour les bassins versants. En moyenne le rapport entre le temps de réponse et le temps de concentration est de 0,5±0,1. La formule de la DDTM30 donnant $Tr=50\%Tc$ est donc bien valable ici.

Aucune chronique de débit n'étant disponible pour la Durolle, appliquer un coefficient correcteur de 1,5 (la moyenne des valeurs relevées sur les autres bassins) aux valeurs théoriques obtenues sur ce bassin peut donner une bonne estimation des Tc et Tr réels. Les Tc et Tr retenus sont présentés en annexe XIX et peuvent être lus sur les figures 11 et 12.

Les temps de réponse calculés doivent être confrontés aux enjeux pour indiquer les zones sur lesquelles doivent être établis des systèmes d'alerte et lesquels choisir.

2.3.3. Détermination des systèmes d'alerte envisageables

Tracer un graphique reliant les enjeux aux temps de réponse pourra mettre en lumière les zones à enjeux forts et les BV les plus sensibles au risque inondation. Il permet aussi de délimiter les tronçons de BV qui ne seront pas intégrés au service crues soudaines et ceux qui pourraient faire partie de Vigicrues. Ainsi, la figure 11 compare la population en ZI en fonction du temps de réponse pour chaque bassin et la figure 12 les emplois en ZI en fonction du temps de réponse.

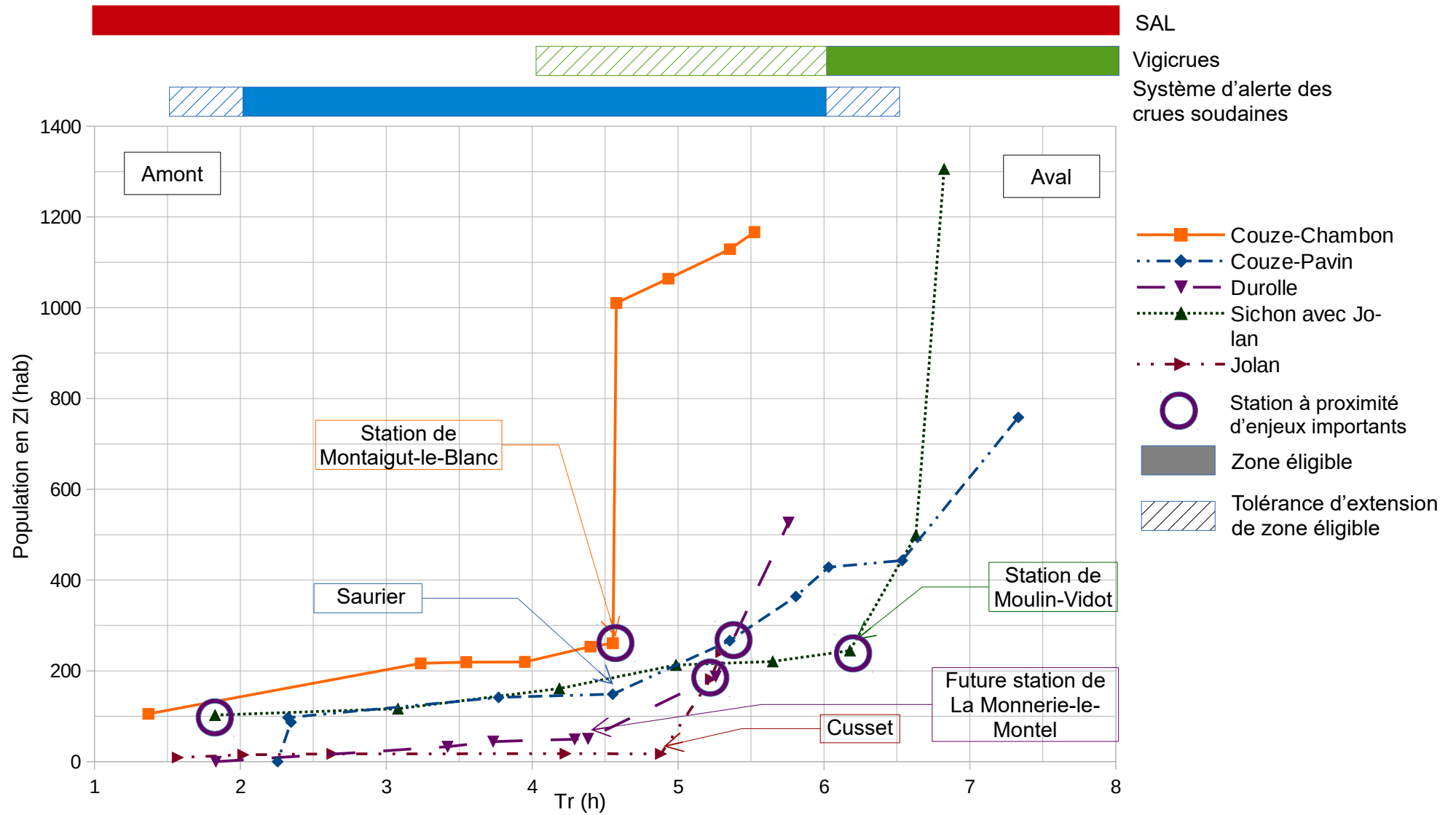


Figure 11 : Comparaison de la population cumulée en ZI en fonction du temps de réponse pour les bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Durole, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin

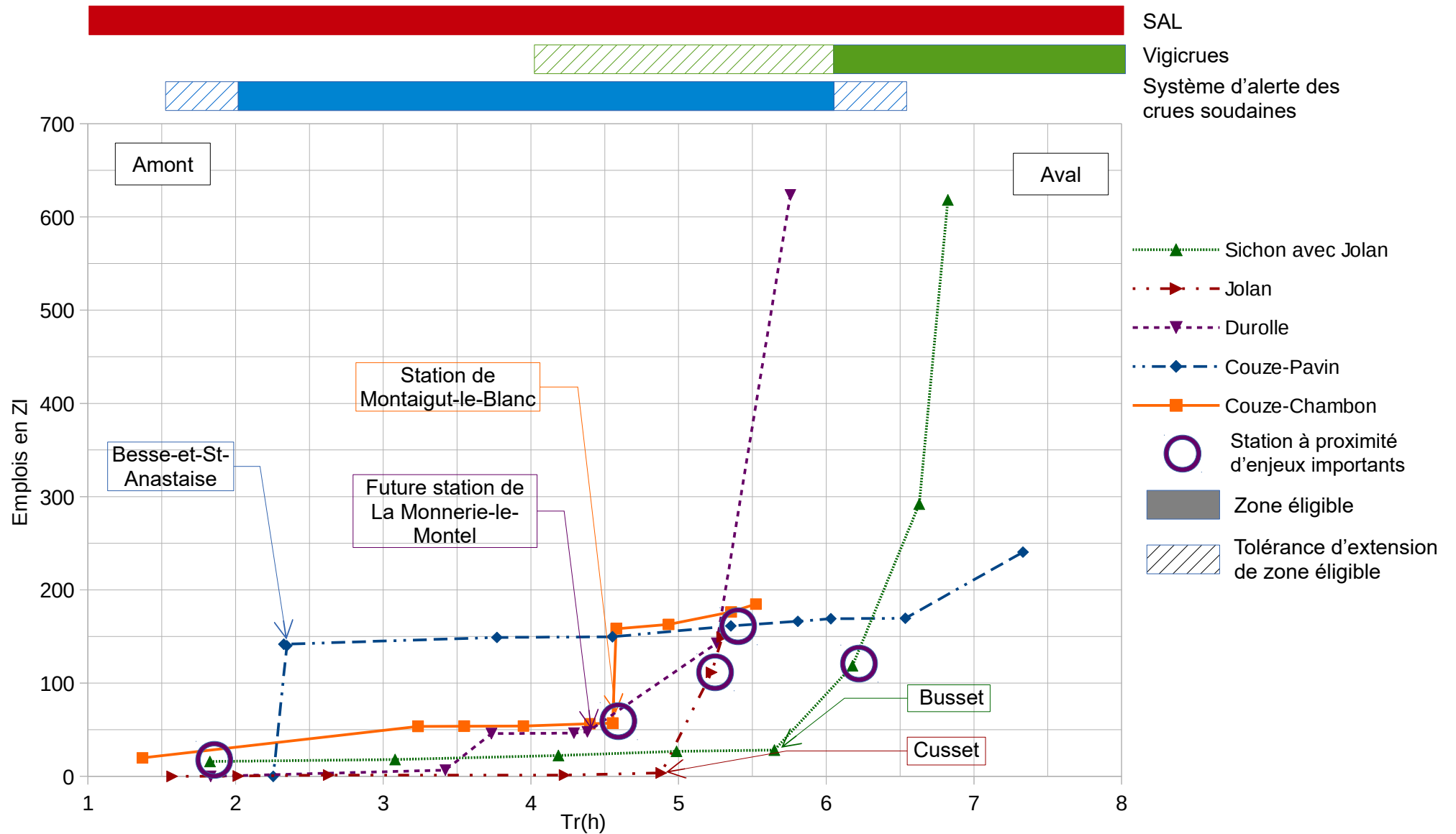


Figure 12 : Comparaison des emplois cumulés en ZI en fonction du temps de réponse pour les bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Durolle, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin

En plus de la faisabilité liée au temps de réponse, il faut prendre en compte le coût d'un système. La préexistence de stations limite les coûts de mise en place, tous les bassins, à l'exception de la Durolle, sont déjà équipés de stations de mesure à proximité des enjeux et l'implantation d'une station sur la Durolle est envisagée prochainement. L'amont de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin n'est pas couvert par l'APIC (avertissement des pluies intenses à l'échelle des communes) et la couverture radar est moins bonne à l'aval du Sichon et du Jolan. En revanche, sur la Couze-Pavin, la Couze-Chambon et le Sichon-Jolan, il existe déjà des données LIDAR³², c'est-à-dire une représentation numérisée de la topographie du bassin versant par une méthode de détection laser du relief. Même si elle n'est pas nécessaire et est trop lourde d'utilisation pour un modèle simple comme GRP, elle peut être utile pour établir des cartes de zones inondables et être nécessaire à certains modèles hydrologiques complexes (distribués ou semi-distribués).

Par ailleurs, un SAL est envisagé sur l'aval du Sichon-Jolan sur le territoire de la communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier. Un SAL serait également souhaitable pour la Couze-Chambon notamment à cause des problématiques d'inondation à Chambon-sur-Lac qui, en raison du temps de réponse faible ne peuvent être efficacement prises en compte que par un système local. Si une collectivité souhaite et a les moyens techniques et financiers de se doter d'un SAL, l'intégration à Vigicrues ou à un autre système d'alerte doit alors être écartée.

Le tableau 12 résume les systèmes possibles en fonction des enjeux et de la faisabilité technique.

	Vigicrues	Service expertisé	Système d'Alerte Local
Sichon	D'Arzonnes à la confluence avec l'Allier	De Ferrières-sur-Sichon à la confluence avec l'Allier	Envisagé
Jolan	De Cusset à la confluence avec le Sichon	De Cusset à la confluence avec le Sichon	Envisagé
Couze-Chambon	De Montaignut-le-Blanc à la confluence avec l'Allier	De Montaignut-le-Blanc à la confluence avec l'Allier	Souhaitable à partir de Chambon-sur-Lac
Couze-Pavin	De Saurier à la confluence avec l'Allier	De Saurier à la confluence avec l'Allier	-
Durolle	De Celles-sur-Durolle à la confluence avec la Dore	De Celles-sur-Durolle à la confluence avec la Dore	-

Tableau 12 : Systèmes envisageables pour un système d'alerte en croisant enjeux, zones éligibles et systèmes d'alerte possibles

Pour la Durolle, si seuls les enjeux sont pris en compte, un service expertisé pourrait être mis en place de Celles-sur-Durolle à la confluence avec la Dore à Thiers. Néanmoins, la Durolle pose des problèmes pour les prévisions en cas de crue sur la Dore. De plus, des études seront déjà réalisées dans le cadre de l'installation de la future station à la Monnerie-le-Montel. Une intégration à Vigicrues paraît donc souhaitable.

Pour la Couze-Pavin et la Couze-Chambon des services expertisés semblent préférables, respectivement, à partir de Saurier et de Montaignut-le-Blanc.

Tous les scénarios demeurent possibles pour le Sichon et le Jolan. La communauté d'agglomération de Vichy Val d'Allier semble intéressée par la mise en place d'un SAL et doit se prononcer prochainement à ce sujet. Si elle ne le choisit pas cette solution, il pourrait être souhaitable de mettre en place un tronçon Vigicrues sur l'aval à partir de Cusset et de le compléter sur le Sichon par un service expertisé depuis Ferrières-sur-Sichon.

En revanche, quel que soit le système d'alerte choisi, la création d'outils de prévision des crues reste incontournable.

³² LIDAR : Light Detection and Ranging ou télédétection par laser

3. Outils de prévision des crues

3.1. Préalables à l'établissement des outils de prévision de crues

3.1.1. Définition de niveaux de vigilance reliant débit, hauteur d'eau et enjeux touchés

L'un des préalables à la conception d'outils de prévision des crues est l'établissement de niveaux de vigilance. Ils permettront de définir l'intensité et les risques liés à un événement. Pour cela, il faut disposer de données de débit ou de hauteur d'eau assez fiables pour être reliées aux inondations relevées. L'absence de stations hydrométriques sur la Durolle implique que ce bassin versant soit écarté de cette partie de l'étude.

Une des méthodes les plus utilisées pour déterminer les niveaux de vigilance est d'établir un graphique reliant les enjeux touchés à différentes hauteurs d'eau ou débits. Il mettra en évidence des valeurs au-delà desquelles les enjeux touchés augmenteront plus fortement. La détermination de ces niveaux correspond à ceux de passage d'un niveau de vigilance à un autre. Les critères choisis pour la définition des niveaux sont analogues avec ceux de Vigicrues, ils sont présentés dans le tableau 13.

Niveau	Périodes de retour indicatives	Critères de définition du niveau
Vert	-	Situation normale.
Jaune	Entre 2 et 10 ans	Niveau des premiers débordements. Impact faible sur la population.
Orange	Entre 10 et 50 ans	Débordements importants. Quelques enjeux ponctuels touchés. Impacts forts sur la population.
Rouge	Supérieure à 50 ans	Débordements généralisés. Plusieurs enjeux importants touchés. De très nombreux emplois et habitants impactés.

Tableau 13 : Critères de définition des niveaux de vigilance aux crues soudaines sur les bassins versants du Sichon et du Jolan

Cette méthode nécessite des études et données complètes. Pour le Sichon et le Jolan, l'étude réalisée par ANTEA dans le cadre du TRI de Vichy [17] répond à cette problématique. Elle donne des couches de zones inondables pour des périodes de retour de 5, 10, 20, 30, 50, 100 et 1 000ans pour l'aval du Sichon (à l'aval de Le Vernet) et du Jolan (à l'aval de Cusset). Les débits de crue utilisés sont connus, il est alors possible d'obtenir les hauteurs d'eau correspondantes grâce aux courbes de tarage aux stations de Cusset et Moulin-Vidot. Leurs imprécisions conduisent à prendre des valeurs de hauteur d'eau arrondies au décimètre.

À l'aval de la confluence entre le Sichon et le Jolan, la relation entre les enjeux et la hauteur d'eau à une seule station ne peut pas être effectuée, car les débordements sont dus aux eaux apportées par les deux cours d'eau. La relation doit donc être établie à partir d'un débit à la confluence approximé par la somme des débits aux stations de Cusset et Moulin-Vidot. Pour obtenir ce débit, il faut tenir compte du retard d'une heure de la pointe de crue de Moulin-Vidot par rapport à celle de Cusset à l'arrivée à la confluence entre le Sichon et le Jolan à Cusset.

Le tracé des enjeux touchés en fonction de la hauteur d'eau ou du débit (voir annexe XXII) a permis de mettre en évidence des niveaux d'alerte au niveau des stations. La figure 13 résume ces différents niveaux et positionne les crues historiques mesurées dans les différentes catégories. Ces résultats sont cohérents avec les dommages relevés lors de ces crues et résumés en annexe IV. Les deux derniers événements majeurs de mai 2012 et août 2013 ayant donné lieu à des états de catastrophe naturelle figurent bien dans le niveau orange.

Sichon-Jolan			STATIONS													
Échelle de gravité	Définition et conséquences attendues	STATION Cusset		STATION Moulin-Vidot		Confluence Sichon-Jolan										
		Crués historiques	Hauteur / Débit	Crués historiques	Hauteur / Débit	Crués historiques	Hauteur / Débit									
ROUGE	Niveau 4 : ROUGE Risque de crue majeure. Menace directe et généralisée de la sécurité des personnes et des biens.							<i>Crue rare et catastrophique, nombreuses vies humaines menacées, débordements généralisés, évacuations généralisées et concomitantes, paralysie à grande échelle du tissu urbain, agricole et industriel.</i>								
ORANGE	Niveau 3 : ORANGE Risque de crue génératrice de débordements importants susceptibles d'avoir un impact significatif sur la vie collective et la sécurité des biens et des personnes.							<i>Crue majeure et dommageable, vies humaines menacées, nombreuses évacuations, paralysie d'une partie de la vie sociale, agricole et économique.</i>								
JAUNE	Niveau 2 : JAUNE Risque de crue ou de montée rapide des eaux n'entraînant pas de dommages significatifs, mais nécessitant une vigilance particulière dans le cas d'activités saisonnières et/ou exposées.							<i>Perturbation des activités liées au cours d'eau, premiers débordements localisés, coupures ponctuelles de routes secondaires, maisons isolées touchées, caves inondées, activité agricole perturbée.</i>								
VERT	Niveau 1 : VERT Pas de vigilance particulière requise							<i>Situation normale.</i>								

Figure 13 : Proposition de niveaux d'alerte pour le Sichon-Jolan : maquette d'échelle de gravité

Les niveaux déterminés ne correspondent pas exactement à ceux qui pourraient être mis en place dans le cadre d'une intégration à Vigicrues. Ainsi, pour le Sichon et du Jolan un niveau rouge ne serait pas défini. Il induirait une mobilisation nationale des secours ce qui serait excessif. Elle n'est envisageable que pour des bassins avec des enjeux très importants, subissant des crues généralisées avec des évacuations de centaines ou de milliers de personnes.

En l'absence de données suffisantes, le même type d'étude ne peut pas être réalisé pour les bassins versants de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin. La détermination de niveaux doit donc se faire à partir des données d'inondations disponibles pour les crues historiques. Pour la Couze-Chambon et la Couze-Pavin, le débit seuil du niveau jaune sera donc celui de la crue quinquennale qui est proche du niveau des premiers débordements. Au-delà de cette valeur, les crues décennales ont induit des débordements beaucoup plus importants (voir annexe II). Ces seuils de débit vont être utilisés par la suite pour les outils de prévision des crues.

3.1.2. Obtention de HU2 : l'humidité initiale du sol

L'humidité initiale du sol est un des facteurs à prendre en compte pour estimer le risque de crue. Une variable la caractérisant doit être disponible facilement pour pouvoir être intégrée à des outils de prévision. Elle peut être obtenue à partir d'une chaîne de modèles développée en 2003 par le Centre National de Recherches Météorologiques et par le centre de géosciences de Mines ParisTech : Safran-Isba-Modcou³³ (SIM). Cette suite de trois modèles calcule les flux d'eau et d'énergie à la surface, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des principales nappes. Le premier modèle, SAFRAN, analyse et regroupe les paramètres météorologiques et les projette sur une grille avec des carreaux de 8 x 8 km que va utiliser un second modèle : ISBA (Interaction sol-biosphère-atmosphère). ISBA simule les échanges entre le sol et l'atmosphère à un pas de temps de 5 minutes. Il divise le sol en trois couches : surface, zone racinaire et zone profonde. Les résultats de ruissellement et de drainage d'ISBA sont utilisés par le modèle hydrologique distribué MODCOU. Il calcule à un pas de temps de 3h l'évolution des grandes nappes et le débit des rivières avec une maille de calcul variant de 64 à 1 km².

Le paramètre d'humidité initiale du sol utilisé pour la prévision de crue est HU2 : l'humidité de la couche racinaire issue du modèle ISBA. Ses valeurs sont extraites sous forme de cartes avec des pixels de 8km de côté. Une valeur moyenne par bassin versant doit ensuite être calculée à partir de celle des pixels le recoupant [30]. En raison des variations observées, elle doit être comparée à des valeurs saisonnières et non annuelles. L'humidité du sol peut ainsi être classée par catégories pour chaque saison : sol très sec, sec, humidité moyenne, humide et très humide correspondant aux deuxième, quatrième, sixième et huitième déciles, seuils pour lesquels respectivement, 20, 40, 60 et 80 % des valeurs de HU2 leur seront inférieures. Les résultats des calculs sur plus de 28 ans sont regroupés en annexe XXIII.

3.1.3. Correction des chroniques pluie-débit

Les chroniques de pluie et de débit doivent être réétudiées et vérifiées afin de correspondre aux particularités des outils de prévision des crues. Même lorsqu'il n'y a pas de lacunes, certaines valeurs pluviométriques peuvent être erronées. Ainsi, en 2002 et 2003, il y a eu des problèmes de collecte des données pluviométriques CRISTAL. Elles se caractérisent par des intensités très élevées (supérieures à 10mm/h) et surtout constantes pendant plusieurs heures, ce qui est assez peu probable dans la réalité. Il faut donc pouvoir corriger la valeur de la pluie de bassin. C'est possible grâce au plugin LAMEDO du SCHAPI qui permet de visualiser sous QGis les lames d'eau radar³⁴ à une date donnée. Les incohérences sont ensuite corrigées manuellement.

Les coefficients de pluie de bassin sont ensuite entrés dans un script codé avec Python par le SPC Allier qui calcule automatiquement la pluie à chaque pas de temps. Il peut arriver que des données soient manquantes sur de longues périodes dans les chroniques, lors de maintenances ou de travaux sur les pluviomètres. Malgré cela, il faut pouvoir continuer à estimer une pluie de

³³ <http://www.cnrm-game-meteo.fr/spip.php?article424>

³⁴ Ce sont les lames d'eau Antilope depuis le 1^{er} juillet 2006 et Comephore avant cette date.

bassin. Le script intègre donc une matrice de remplacement regroupant les pluviomètres qui peuvent être utilisés pour les calculs en cas de lacune. Il faut donc déterminer les coefficients permettant d'ajuster au mieux les pluies enregistrées sur les postes secondaires à celles des postes principaux. Ils sont présentés dans le tableau 14.

	Moyenne	Écart type	Médiane	Valeur retenue
Vichy-Charmeil	0,8	0,7	0,6	0,6
Le Mayet-de-Montagne	1,3	0,9	1,1	1,1

Tableau 14 : Coefficients de remplacement par le pluviomètre de Saint-Nicolas des Biefs pour les pluviomètres de Vichy-Charmeil et le Mayet-de-Montagne

Par ailleurs, les pluies de bassin déterminées suite au remplacement des pluviomètres peuvent encore présenter des lacunes. Il faut alors les identifier et si possible les remplacer. En effet, une absence de valeur implique un temps durant lequel le modèle ne sera pas opérationnel (temps de « chauffe » dû au recalage du réservoir de routage). Si possible, ces valeurs isolées seront remplacées par 0 si la période a été sèche pendant plusieurs heures autour de ce point problématique. Au total ce sont 21 valeurs qui sont ainsi rajoutées sur l'ensemble des chroniques.

3.2. Présentation des outils et méthodologie

3.2.1. Abaques et formules de prévision

Les outils de prévision des crues les plus simples utilisés par les SPC sont des outils graphiques : les abaques. Ils donnent une première estimation rapide du débit ou du dépassement d'un niveau de vigilance. Ils sont obtenus à partir de formules de vigilance, des formules empiriques qui permettent de relier le débit de pointe de la crue au contexte hydro-météorologique auquel est soumis le bassin versant (humidité du sol, débit initial, cumul et intensité de la pluie...).

Les crues sur les bassins versants étudiés ont essentiellement lieu suite à une pluie. Lorsque le débit de base est stable et les précipitations faibles depuis 48h, une hypothèse peut être émise : les variations de débit seront uniquement dues aux précipitations en cours ou à venir. L'augmentation de débit entre le débit de base et le débit de pointe est donc proportionnelle au ruissellement. Seule une partie des précipitations va l'alimenter. Son importance dépend de plusieurs paramètres : le cumul de pluie, l'intensité moyenne et maximale de la pluie et l'humidité initiale du bassin versant. Ce sont donc les paramètres intervenant dans les formules. Il s'agira ainsi de choisir une formule simple d'utilisation et adaptée au bassin versant. Les deux relations généralement utilisées sont :

$$Q_{\text{pointe}} = A \times [Q_{\text{base}} + a \times P \times HU2^b \times I_{\text{moy}}^c] + B \quad \text{et} \quad Q_{\text{pointe}} = A \times [Q_{\text{base}} + a \times P + b \times HU2 + c \times I_{\text{max}}] + B$$

Avec a, A, b, B et c des constantes dépendant du comportement du bassin versant, Q_{pointe} le débit de pointe en m^3/s et Q_{base} le débit de base en m^3/s , P le cumul de pluie en mm sur une durée T en h, I_{moy} l'intensité moyenne de la pluie en mm/h sur T, I_{max} l'intensité maximale de la pluie en mm/h et HU2 l'humidité initiale du bassin versant [30]. Ces formules empiriques sont basées sur la mesure et l'ajustement des différents paramètres à ceux des bassins versants.

Par ailleurs, l'utilisation de l'intensité maximale pour la prévision du débit de crue est assez difficile, car elle n'est pas ou peu prévisible. La première formule, actuellement utilisée par le SPC Allier, est donc retenue. Les différents paramètres seront ainsi obtenus en traçant le graphique :

$$Q_{\text{pointe}} = f(Q_{\text{base}} + a \times P \times HU2^b \times I_{\text{moy}}^c)$$

Pour chaque bassin, la droite de corrélation entre les points issus des crues enregistrées a pour équation $y = Ax + B$. Les constantes A, a, b, B et c propres aux bassins versants seront déterminées à l'aide d'un solveur. Il s'agira de faire varier a, b et c pour avoir la meilleure corrélation possible et obtenir ainsi les coefficients A et B de la droite de corrélation.

La formule peut être simplifiée en calculant le cumul de pluie sur une durée T définie. Elle est de 24h pour le Sichon et le Jolan soumis à des phénomènes pluvieux courts souvent orageux et de 48h pour la Couze-Chambon et la Couze-Pavin impactées par des pluies plus longues souvent océaniques. L'intensité moyenne de la pluie est donc égale au cumul de pluie divisé par T.

D'où, en posant $I_{moy} = \frac{P}{T}$, $Q_{pointe} = A \times [Q_{base} + a \times (\frac{1}{T})^c \times P^{c+1} \times HU2^b] + B$

Et, en posant $a' = \frac{a}{T^c}$ et $c'=c+1$, $Q_{pointe} = A \times [Q_{base} + a' \times P^{c'} \times HU2^b] + B$

Cette formule comporte encore trop de variables pour tracer des graphiques. Un abaque pourra être tracé pour chaque seuil de passage d'un état de vigilance à un autre en égalant le débit de pointe (Q_{pointe}) au débit nécessaire au changement de niveau (Q_{seuil}). Il faut cependant encore fixer une variable. Le cumul de pluie et l'humidité initiale du bassin versant ont une gamme de variations plus large que celle du débit de base, c'est donc ce paramètre qui est choisi.

$$Q_{seuil} = A \times [Q_{base} + a' \times P_{seuil}^{c'} \times HU2^b] + B \text{ d'où } P_{seuil} = \left(\frac{Q_{seuil} - B}{A \times a'} - \frac{Q_{base}}{a'} \right)^{\frac{1}{c'}} \times HU2^{\frac{-b}{c'}}$$

En posant $d = \left(\frac{Q_{seuil} - B}{A \times a'} - \frac{Q_{base}}{a'} \right)^{\frac{1}{c'}}$ et $e = \frac{-b}{c'}$, $P_{seuil} = d \times HU2^e$.

Le graphique obtenu donne le dépassement ou non d'un seuil de débit. Il est matérialisé par une courbe pour chaque débit de base. Elle est tracée en fonction des valeurs d'humidité initiale HU2 du bassin versant (en abscisse) et de P_{seuil} (en ordonnée) le cumul de pluie nécessaire au dépassement du niveau de vigilance. La figure 14 présente l'utilisation de cet abaque.

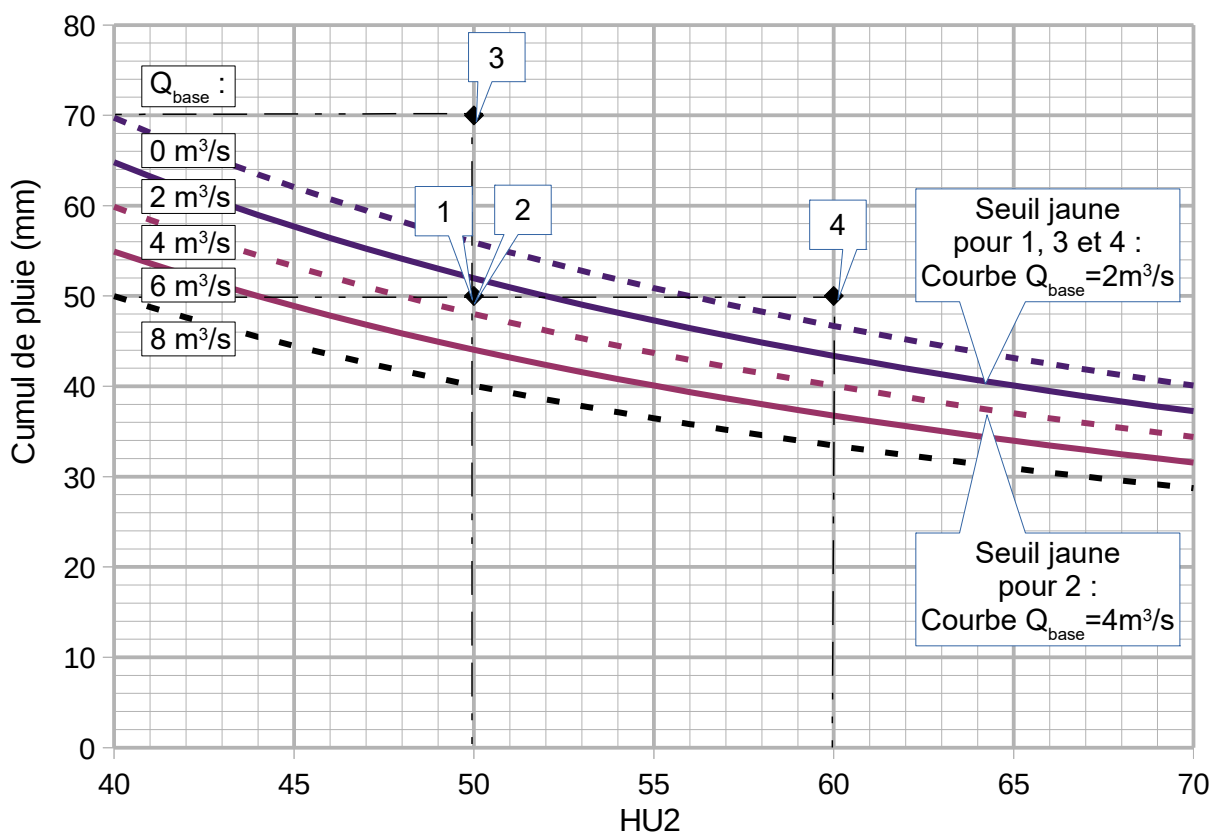


Figure 14 : Exemples d'utilisation d'un abaque pour le niveau jaune : 1 : $P=50\text{mm}$, $HU2=50$ et $Q_{base}=2\text{m}^3/\text{s}$, niveau vert; 2 : $P=50\text{mm}$, $HU2=50$ et $Q_{base}=4\text{m}^3/\text{s}$, 3 : $P=70\text{mm}$, $HU2=50$ et $Q_{base}=2\text{m}^3/\text{s}$ et 4 : $P=50\text{mm}$, $HU2=60$ et $Q_{base}=2\text{m}^3/\text{s}$, au moins niveau jaune

Une fois le point placé en fonction de son cumul de pluie et de son humidité initiale (HU2), il faut regarder son positionnement par rapport à la courbe de niveau jaune. Elle est choisie en fonction de Q_{base} dans le cours d'eau. Si le point est au-dessus de cette courbe, alors, le niveau de vigilance est au moins celui du niveau dépassé (dans cet exemple, jaune). Il faudrait alors comparer avec les abaques des autres niveaux, si elles existent, pour estimer si le niveau est bien jaune et ne dépasse pas les niveaux orange ou rouge. S'il est en dessous de la courbe, alors, le niveau de vigilance est au maximum celui du niveau de vigilance inférieur.

Dans le cadre de la prévision des crues avoir plusieurs estimations est nécessaire pour éviter les fausses alertes et confirmer et améliorer les prévisions. Les formules et abaques sont des méthodes opérationnelles simples et rapides, mais elles sont peu précises. L'utilisation de modèles pour la prévision des crues leur est donc un complément indispensable.

3.2.2. Modèles de prévision des crues

Il existe une grande diversité de modèles de prévision de crue. L'échéance des prévisions, la résolution, la fiabilité et l'automatisation ou non des prévisions et des alertes sont les principaux facteurs de choix d'un modèle [2]. Ils ont tous des caractéristiques et des limites d'utilisation spécifiques dépendant des données utilisées pour les prévisions et des caractéristiques morphologiques, climatiques et hydrologiques de la zone étudiée. Ils peuvent être groupés en catégories dépendant de la méthode de prévision des crues.

Les modèles les plus élaborés sont dits « hydro-géo-agro-météorologiques ». Ils prennent en compte le relief, la géologie, les sols et leur occupation, la pluviométrie passée et prévue ainsi que les échanges hydriques à différentes échelles. Ils sont très complexes et coûteux à mettre en place et à utiliser. Ils sont donc rares et élaborés essentiellement à l'échelle nationale ou internationale. En Europe, le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) et le Joint Research Center (JRC) de la Commission Européenne les développent[7]. Il est donc peu envisageable d'en utiliser à l'échelle des bassins étudiés.

Les modèles hydrauliques et hydrologiques sont plus répandus. Les modèles hydrauliques ou « débit-débit », reposent sur la propagation d'un débit amont vers l'aval. Ils nécessitent au moins une station de mesure des débits en amont de la zone à protéger et supposent que les apports d'affluents soient faibles ou connus entre le point de mesure et la zone à étudier. Ils sont difficilement utilisables sur les bassins versant étudiés qui sont de taille modeste et où les affluents apportent parfois en crue autant voire plus de débit que le cours d'eau principal (voir crue des 2 et 3 juillet 2008 du Sichon et du Jolan en annexe III). Par ailleurs, l'absence dans certains cas de stations de mesures amont rendrait impossible la réalisation de prévisions par cette méthode.

Les modèles hydrologiques ou « pluie-débit » prennent en compte le rôle des précipitations dans la formation du ruissellement générateur de la crue. Ce sont des représentations simplifiées des processus de transformation de la pluie en débit. Ils sont généralement classés selon la définition faite des processus liés à l'écoulement. Ils sont dits à base physique (issus de lois mathématiques et physiques), conceptuels (simplifiant la représentation des processus souvent sous forme réservoirs) ou empiriques (basés sur des lois expérimentales). Ils nécessitent un calage sur de longues chroniques pluie-débit mais leur délai de prévision est plus grand que celui des modèles hydrauliques sur les petits bassins versants. Ils sont souvent couplés à des prévisions météorologiques ou hydrauliques pour augmenter l'anticipation du risque de crue [31].

Les modèles hydrologiques semblent les plus adaptés aux bassins versants étudiés. Néanmoins, leur transposition à des bassins non jaugés est difficilement envisageable ici, car les caractéristiques hydrologiques des bassins versants auvergnats sont très variables et rendent difficile l'extension d'un modèle calé sur un bassin versant à un autre [32]. De plus, elle nécessite une connaissance très fine des bassins versants et des processus de transformation de pluie en débit [33]. En raison des particularités liées aux crues soudaines et aux modifications de comportement de certains bassins versants au cours d'un événement, les problèmes posés pour la prévision de crues sur des bassins non jaugés sont amplifiés pour les crues soudaines [8]. Le bassin versant de la Durolle est donc écarté de la phase de modélisation. Les modèles

hydrologiques conceptuels sont les plus utilisés. Ils sont surtout les mieux adaptés aux bassins versants étudiés. Ils présentent en effet l'avantage de se baser sur les caractéristiques et les processus physiques propres aux bassins versants tout en restant assez fiables et simples d'utilisation. Ils répondent à un schéma global identique présenté en figure 15.

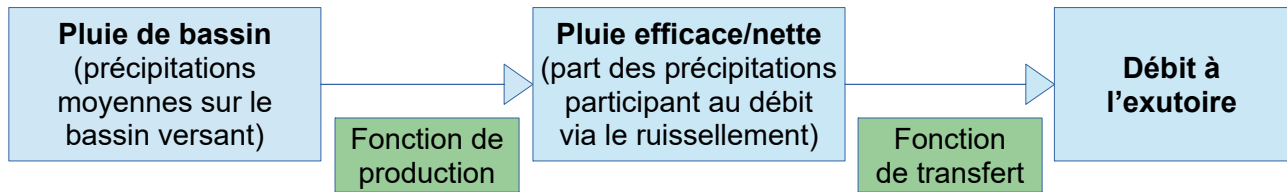


Figure 15 : Fonctionnement d'un modèle hydrologique conceptuel global

Les fonctions de production les plus répandues pour la transformation de la pluie brute en pluie nette sont celles mise au point par le SCS (Soil Conservation Service) ou celles se basant sur l'évolution de coefficients de ruissellement. La fonction de transfert la plus fréquente est l'application de la méthode des hydrogrammes unitaires. Ils représentent l'évolution théorique du débit sous l'effet d'une averse unitaire (une lame d'eau d'1mm de pluie nette répartie de façon uniforme sur le bassin versant durant un pas de temps défini). Elle est généralement retenue pour des bassins versants de quelques dizaines à centaines de km² tels que ceux étudiés [34].

Actuellement, GRP (Génie Rural pour la Prévision)³⁵ est l'un des modèles hydrologiques les plus utilisés dans le cadre de la prévision opérationnelle des crues en France. C'est celui qui sera retenu pour réaliser une estimation des débits sur le Sichon et le Jolan. Il a déjà été calé sur la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin et sera bientôt intégré à la prévision opérationnelle des crues.

3.2.3. Présentation du modèle GRP et méthodologie du calage

Le modèle hydrologique GRP a été développé par le Cemagref en 2005. Il est conçu pour la prévision des débits à court terme au pas de temps horaire. Il est utilisé dans plus de la moitié des Services de Prévision des Crues (SPC). Il fonctionne en continu à partir des données des réseaux de mesures disponibles et représente le fonctionnement du bassin versant par une suite de réservoirs. Ils modélisent l'eau stockée par la neige, le sol et les nappes phréatiques ainsi que leur transfert vers l'exutoire du bassin versant. Sa fonction de production se base sur un réservoir non-linéaire qui prend en compte l'humidité du sol et utilise un coefficient d'ajustement pour déterminer le ruissellement. Elle est suivie par une fonction de transfert composée d'un hydrogramme unitaire et d'un réservoir de routage non linéaire. Il utilise également deux fonctions ajustant le réservoir sur le dernier débit observé et le débit en sortie en fonction des erreurs passées du modèle [35]. Le schéma de fonctionnement de GRP est présenté en annexe XXI.

Trois paramètres sont utilisés pour le calage : X1, X2, X3. Ils sont optimisés pour chaque bassin versant. X1=CORR représente le coefficient de correction de la pluie nette, X2=Rout est la capacité à un jour de son réservoir de transfert (ou de routage) R et X3=TB est le temps de montée de son hydrogramme unitaire. Le calage est réalisé sur l'ensemble des données disponibles. Il nécessite des chroniques de pluie, de débit et d'évapotranspiration (ETP). L'utilisateur peut ajuster certaines modalités de calage : horizon de prévision, niveau de vigilance, présence ou non d'un module neige et de corrections des débits dites de TANGARA [36] ou par un réseau neuronal artificiel (RNA)³⁶. Ces corrections recalent le niveau du réservoir de routage à

35 Pour plus d'informations sur GRP : <http://webgr.irstea.fr/modeles/modele-de-prevision-grp/>

36 Un réseau neuronal est composé d'une multitude de nœuds interconnectés au niveau desquels s'effectuent des calculs élémentaires jusqu'à ce qu'une solution unique soit trouvée. L'adaptation du RNA au bassin versant nécessite une phase « d'apprentissage ». Il « étudie » les différents types de réponse du bassin versant suite à événement pluvieux et aligne ensuite son comportement sur celui du bassin versant en changeant le poids accordé à chaque connexion.

partir de l'assimilation du dernier débit enregistré, ils utilisent également la dernière erreur observée entre débit estimé et débit observé pour ajuster la prévision de débit [36].

Avant le calage, les chroniques sont divisées en deux. Le calage s'effectuera séparément sur chaque partie. Il comporte deux phases : une phase de calage « pur » et une phase de contrôle des résultats. La première phase effectuée sur une moitié de la chronique porte sur l'optimisation d'un critère de calage en faisant varier les paramètres du modèle. Lors de la phase de contrôle, les simulations sont effectuées sur la deuxième moitié des chroniques avec les paramètres optimum de calage déterminés précédemment. L'écart entre débits estimés et débits observés permet de vérifier les performances du modèle en comparant les paramètres des deux calages ainsi que sa robustesse si les performances demeurent similaires entre le calage et le contrôle. Il peut alors être envisagé de l'utiliser pour la prévision des débits. Ces deux phases sont appliquées sur chacune des deux parties des chroniques (voir figure 16).

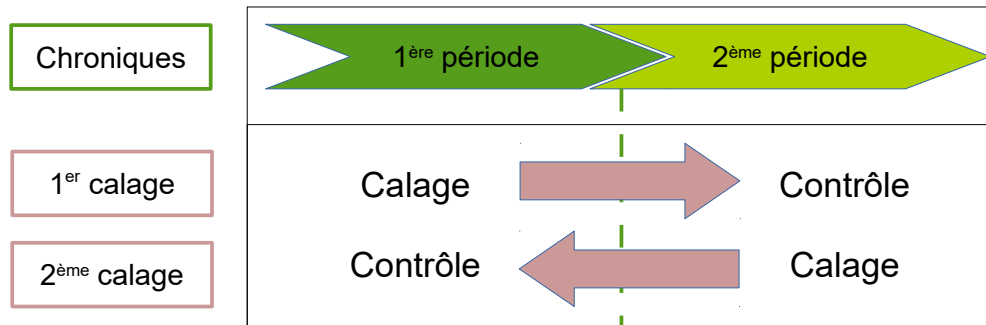


Figure 16 : Double calage effectué par GRP sur les chroniques disponibles

L'erreur quadratique moyenne ou Root Mean Square Error (RMSE) est historiquement le critère le plus utilisé en hydrologie. Son inconvénient majeur est de ne pas permettre de comparer les performances de deux périodes temporelles ou de deux bassins différents [35]. Avec C_{i+L} le débit simulé à l'instant $i+L$ avec L l'horizon de prévision et O_{i+L} le débit observé à l'instant $i+L$:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n (O_{i+L} - C_{i+L})^2}$$

La méthode la plus utilisée pour évaluer les performances d'un modèle hydrologique est le calcul du critère de Nash et Sutcliffe (NSE) [36]. Avec \bar{O} le débit moyen observé :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Il compare les performances du modèle à un modèle « naïf » basé donnant le débit moyen comme prévision. Il est peu utilisé en prévision surtout pour des horizons courts, car la valeur du critère est alors très élevée et ne reflète plus la qualité réelle du modèle.

Dans ce cas, c'est le modèle de persistance (Eff) qui est utilisé. Il considère que le débit observé O_i reste inchangé entre les instants i et $i+L$ où L est l'horizon de prévision.

$$Eff = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_{i+L} - C_{i+L})^2}{\sum_{i=1}^n (O_{i+L} - O_i)^2}$$

Il est dépendant de l'horizon de prévision choisi et ne permet pas de comparer les résultats avec deux horizons de prévision différents [35]. Le critère de calage utilisé par GRP dérive de cette

dernière formule. Il s'agit d'un critère de persistance borné : C_{2MP} . Il quantifie les performances de la simulation par le calcul des différences rencontrées entre débit calculé et débit observé. Il est calculé de la manière suivante :

$$C_{2MP} = \frac{Eff}{2 - Eff}$$

Il varie entre -1 et 1. Plus il est proche de 1, plus la simulation est bonne sur la période testée. Une valeur positive indique que le modèle fournit de meilleures prévisions que le modèle de persistance, si elles sont négatives, c'est l'inverse, 0 indique que le modèle testé équivaut au modèle de persistance.

À la fin du calage, le logiciel rassemble ces critères dans une fiche récapitulative produite par le logiciel. Les prévisions du modèle sur les 24 événements majeurs de la période test sont illustrés dans une fiche comparant les hydrogrammes prévus et observés. Il affiche également des indicateurs sur la performance des estimations par rapport au niveau de vigilance retenu :

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad , \quad FAR = \frac{b}{a+b} \quad \text{et} \quad CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad ^{37}, \quad a, b \text{ et } c \text{ sont présentés dans le tableau 15.}$$

FAR est le taux de fausses alerte et POD la probabilité de détection d'un événement. CSI (Critical Success Index) est le critère de performance du modèle qui synthétise les deux indicateurs précédents. Il varie de 0 à 1, 1 correspondant à un modèle idéal sans fausses alertes et sans alertes manquées.

		Dépassements observés du niveau de vigilance	
		OUI	NON
Dépassements prévus du niveau de vigilance	OUI	Alertes valables (a)	Fausses alertes (b)
	NON	Alertes manquées (c)	Non-alerte valables (d)

Tableau 15 : Tableau de contingence des performances de prévision du modèle GRP

Les bassins versants du Sichon et du Jolan sont peu influencés par la neige. GRP sera donc calé sans l'apport du module neige. Ainsi, le calage nécessitera seulement des chroniques de pluie, de débit et d'évapotranspiration (ETP de MétéoFrance). La période sur laquelle à la fois les débits et les pluies de bassin sont disponibles est celle sur laquelle va être calé GRP. Elle s'étend du 1^{er} janvier 1999 au 30 avril 2016 (date d'export des données présentes dans la Banque Hydro et le logiciel SACHA).

3.3. Résultats et performances des outils

3.3.1. Abaques et formules de vigilance

Les abaques et les formules de vigilance ne sont établis sur les bassins versants étudiés que pour le passage du niveau jaune. Les données à disposition ne comportent pas assez d'événements intenses pour pouvoir en définir pour les niveaux orange et rouge.

La **Couze-Pavin** ne semble présenter qu'un seul type de comportement suite à une pluie. Il est marqué par une influence un peu plus forte du cumul de pluie que de l'humidité initiale sur le débit de pointe (voir annexe XXIV). La chronique ne contient que très peu d'événements forts. La validité de l'abaque de la figure 17 est donc limitée, il faudra sans doute la refaire lorsque des événements plus forts auront été enregistrés.

³⁷ Une erreur d'écriture dans la page de résultat du calage lui fait afficher $FAR=b/(a+c)$, les valeurs présentées sont cependant celles obtenues par la bonne formule

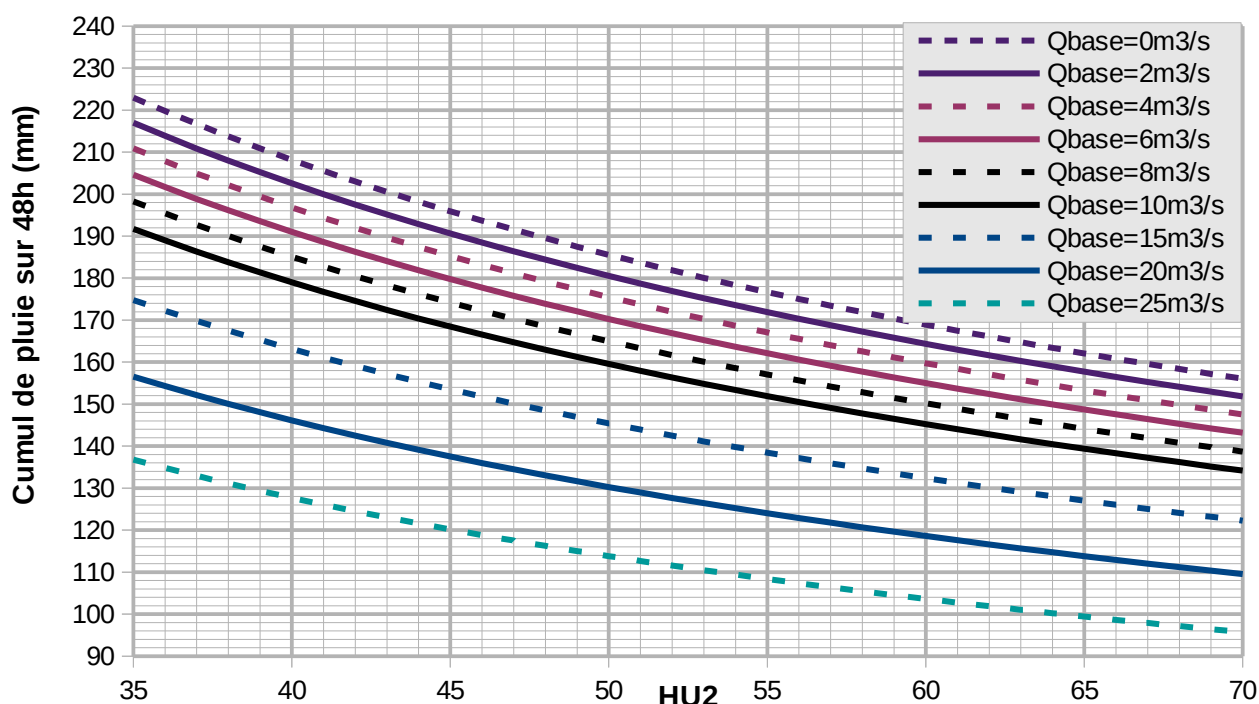


Figure 17 : Abaque de vigilance de la Couze-Pavin à Saint-Floret (63) pour le niveau jaune

Le bassin versant de la Couze-Pavin est peu réactif. Pour avoir une vigilance jaune, il faut au moins 100mm de pluie cumulée sur 48h et dans des conditions hydrologiques moyennes (débit et HU2 moyens), il faut au moins 160 ou 180 mm de pluie cumulée sur 48h selon la saison.

La **Couze-Chambon** présente deux comportements différents suite à une pluie. Un comportement « normal » et une sur-réaction à une pluie (annexe XXV). Une réaction plus forte que la normale est ainsi observée lors d'événements hivernaux avec une intensité moyenne sur 6h supérieure à 6mm/h et courts avec cette intensité qui chute sur 12h à moins de 4mm/h. Le sol est déjà très humide et des intensités assez importantes sur un laps de temps court n'ont pas la possibilité de s'infiltrer et ruissellent assez rapidement. De plus, tous les événements intenses relevés ont eu lieu sur des sols déjà très humides, ce qui peut expliquer le fait que l'influence d'HU2 soit négligeable dans la formule (voir annexe XXIV). Les cumuls de pluie estimés pour le passage en vigilance jaune lors d'événements intenses sont présentés dans le tableau 16.

Q _{base} (m ³ /s)	0	2	4	6	8	10	12
Cumul de pluie (mm)	74	70	67	63	59	55	50

Tableau 16 : Cumuls de pluies estimés pour le passage en vigilance jaune de la Couze-Chambon lors d'événements intenses

HU2 et le débit de base étant lié et les conditions décrites étant très spécifiques, il n'est pas aberrant que l'humidité initiale n'ait pas d'influence sur le cumul induisant un dépassement de niveau. Il est en fait pris en compte par l'utilisation de Qbase.

Lorsque cette pluie est plus longue, ce phénomène s'atténue. L'infiltration augmentant avec l'intensité de la pluie, elle est progressive [37] et il est possible que ce phénomène prenne quelques heures pour ce bassin versant ce qui expliquerait ces résultats. L'abaque de vigilance du niveau jaune pour un comportement « habituel » du bassin versant est présentée en figure 18.

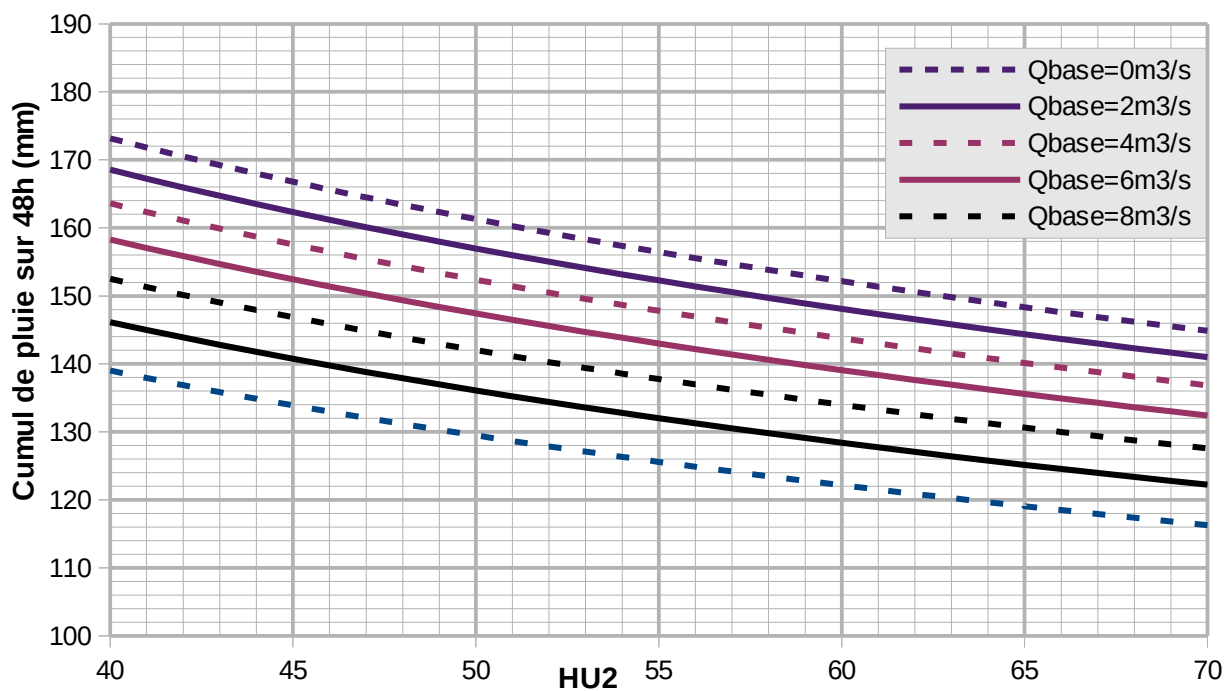


Figure 18 : Abaque de vigilance de la Couze-Chambon à Champeix (63) pour le niveau jaune

Le bassin versant de la Couze-Chambon est peu réactif lorsqu'il réagit « normalement ». Il lui faut au moins 120mm de pluie cumulée sur 48h pour atteindre le niveau jaune et dans des conditions hydrologiques moyennes, il lui en faut, selon la saison, au moins 150 ou 160 mm.

Le bassin versant du **Sichon** semble avoir trois comportements différents en fonction des conditions initiales. Un comportement avec des réactions « normales » du bassin versant suite à une pluie et deux catégories de surréactions à une pluie (annexe XXV). La figure 19 présente l'abaque établi pour un comportement « classique » du bassin versant.

Le bassin versant du Sichon est assez réactif. Une vigilance jaune est possible à partir d'un cumul de pluie sur 24h de 50 ou 60mm minimum mais dans des conditions hydrologiques moyennes, il faut, selon la saison, au moins 120 ou 160 mm de pluie cumulée sur 24h. L'influence de HU2 dans la formation d'une crue est donc importante pour une crue « classique ».

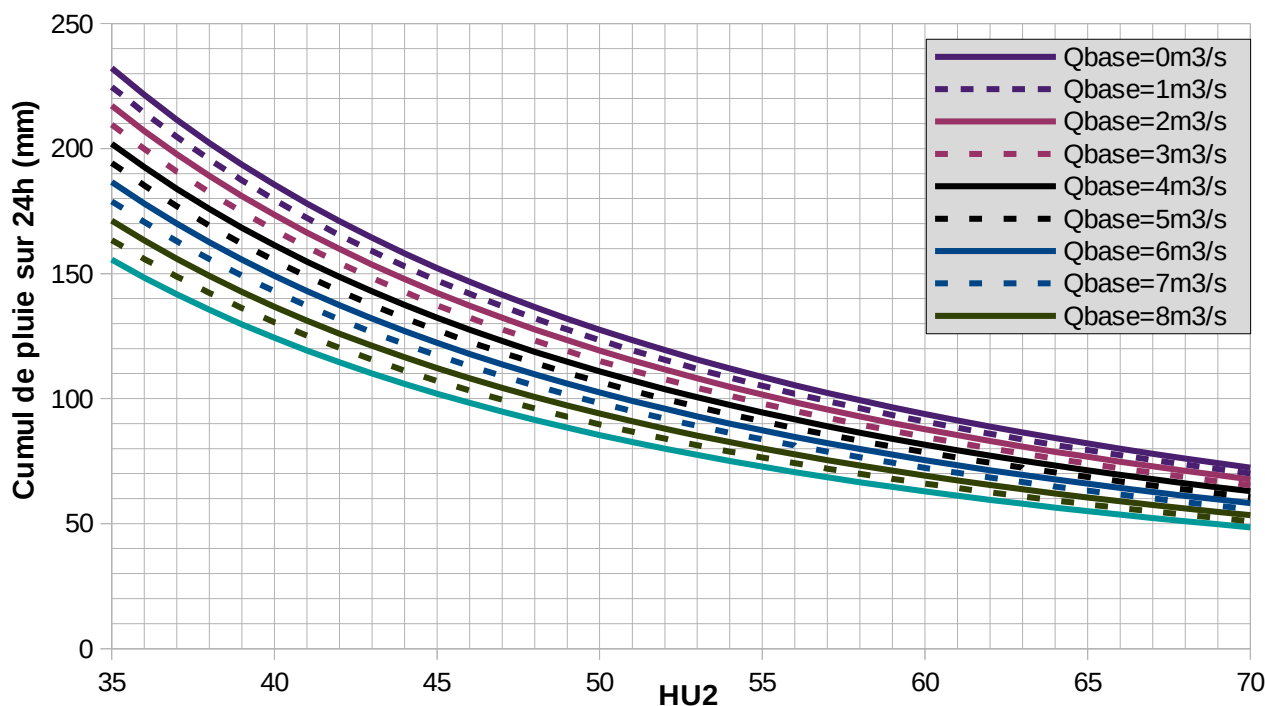


Figure 19 : Abaque de vigilance du Sichon pour un comportement « classique » et un niveau jaune

Les valeurs seuils obtenues pour des sur-réactions du bassin versant sont présentées dans le tableau 17. Un premier type de sur-réaction a lieu en été et à la fin du printemps. Il est marqué par une réaction très forte du bassin versant à des pluies orageuses courtes et intenses. Soit plus de 10mm/h sur 3 à 6h. Il est aussi dû à des pluies plus longues et moins intenses (5-8mm/h) mais faisant suite un événement de même intensité dans les 72h précédentes sur un débit de base supérieur à 1,5m³/s. Ce primo-événement aurait « activé » le bassin versant en saturant les couches superficielles du sol et l'aurait rendu très réactif aux pluies en favorisant le ruissellement. Il doit s'agir du même type de phénomène qui induit lors de pluies intermittentes (une suite d'averses entrecoupées d'accalmies) un ruissellement plus abondant pour les dernières pluies que lors de pluies continues de même cumul total [37].

Un deuxième comportement de sur-réaction se détache en dehors de la période orageuse estivale. Il se caractérise par une réaction forte du bassin versant suite à une pluie d'intensité moyenne (3 à 5 mm/h sur 3 à 6h). Elle est précédée par un événement de même intensité dans les dernières 72h n'ayant déclenché qu'une faible réponse du bassin versant.

Q _{base} (m³/s)	0	2	4	6	8	10
Seuil de pluie (mm) Événements intenses	36	34	33	31	28	26
Seuil de pluie (mm) Seconds événements	72	63	54	45	36	27

Tableau 17 : Cumuls de pluies estimés pour le passage en vigilance jaune du Sichon lors d'événements intenses ou de seconds événements

L'exposant affecté à l'intensité moyenne de la pluie (voir annexe XXIV) montre qu'elle a une influence négligeable dans le processus de génération des écoulements lors de seconds événements. C'est également le cas pour l'humidité initiale lorsque le bassin versant sur-réagit. Cela s'explique par le fait que la couche superficielle du sol est saturée par le primo-événement et que des intensités très fortes (supérieures à 10 mm/h) agissent de la même manière, le sol n'étant pas en mesure d'infiltrer normalement la pluie, un ruissellement de surface important va se créer.

Dans ce cas, l'intensité moyenne de la pluie joue un rôle prépondérant dans la génération du débit (et est bien affectée d'un fort coefficient voir annexe XXIV).

Pour le **Jolan**, en raison du faible nombre d'événements importants relevés, il n'a pas été mis clairement en évidence de comportements différenciés suite à une pluie. Cependant, la crue du 8 août 2013 se détache clairement du comportement des autres événements (annexe XXV). Plusieurs explications peuvent être avancées. La première cause possible serait un problème d'estimation de la pluie de bassin. Les pluviomètres sont situés en limite de bassin versant et peuvent ne pas détecter des pluies orageuses localisées ayant induit cet événement. Cette hypothèse est confirmée par une lame d'eau radar donnant un cumul de pluie compris entre 50 et 60mm sur 24h alors que la pluie de bassin n'est que de 42mm. Cela ne suffit cependant pas à tout expliquer. Une autre particularité est mise en évidence pour ce phénomène : moins de 48h avant la crue, le bassin versant a été soumis à un épisode pluvieux de même intensité qui n'a cependant causé qu'une faible hausse du débit sur un sol très sec. La première pluie intense aurait saturé la couche superficielle du sol sans permettre une infiltration optimale (faible hausse du HU2 sur les 48h précédant et suivant l'événement) et ainsi favorisé un ruissellement fort lors de la pluie suivante. Cet événement a donc les mêmes caractéristiques que les événements intenses décrits pour le Sichon. Le Jolan pourrait donc présenter le même type de comportement différencié que le Sichon. Ces particularités seraient amplifiées par la formule de vigilance qui accorde un poids très important au HU2 (exposant 7 voir annexe XXIV) ce qui en fait le facteur principal conduisant à la transformation pluie-débit. Le HU2 était alors de 36, parmi les plus faibles enregistrés pour le Jolan (voir annexe XXII) ce qui explique également que ce point soit aberrant.

En l'absence de crues enregistrées avec le même comportement, un seul abaque a donc été déterminé. Il est présenté en figure 20.

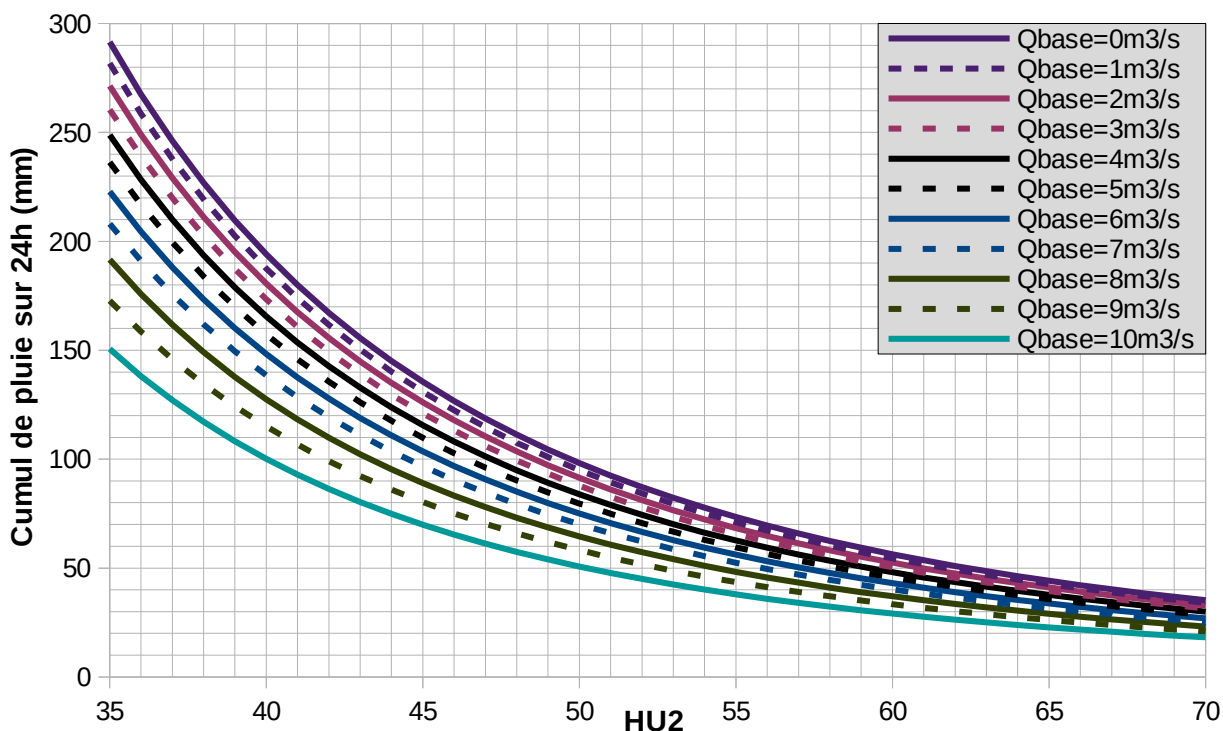


Figure 20 : Abaque de vigilance du Jolan à Cusset (03) pour un niveau jaune

Le bassin versant du Jolan est très réactif. Un risque de vigilance jaune est possible à partir d'un cumul de pluie sur 24h de 20-30mm lorsque le bassin est très humide. De plus, dans des conditions hydrologiques moyennes, il faut, selon la saison, au moins 90 ou 160 mm de pluie cumulée sur 24h. L'influence de HU2 est donc très marquée pour ce bassin versant.

Le tableau 18 regroupe les résultats de performance des abaques. La probabilité de détection d'un événement supérieur au seuil (POD), le taux de fausses alertes (FAR) et l'indicateur global de performance (CSI) ont les mêmes définitions que ceux utilisés pour le modèle GRP.

	a	b	c	d	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)
Sichon (03)	0-3	0-1	3-0	52-51	0-75	0-25	0-75
Jolan (03)	2	0	2	35	50	0	50
Couze-Chambon (63)	1-3	0-0	2-0	47-47	33-100	0	33-100
Couze-Pavin (63)	0	0	0	58	*	*	*

*Tableau 18 : Performances des abaques de niveau jaune sur les bassins versants étudiés sans tenir compte des comportements différenciés des bassins et **en en tenant compte** *non évalué car aucun événement n'a franchi le niveau jaune*

Les deux événements non détectés par l'abaque du Jolan présentent les mêmes caractéristiques que ceux pour lesquels le Sichon a sur-réagi, il apparaît donc de plus en plus probable que le Jolan ne présente pas un mais plusieurs types de réaction suite à une pluie.

Les valeurs de performance n'ont été obtenues qu'à partir d'un très petit nombre d'événements, elles ne sont donc qu'indicatives et sont peu représentatives de la fiabilité réelle des abaques. Par ailleurs, aucun événement correspondant à un franchissement de niveau de vigilance jaune n'a été détecté pour la Couze-Pavin. La performance des abaques est donc jugée séparément à partir des événements s'approchant le plus du niveau jaune fixé à 60m³/s. En étudiant les crues supérieures à 41 m³/s (correspondant à une crue biennale), il est possible de se faire une idée sommaire des performances de l'abaque. Sur les trois crues concernées, deux sont assez proches du niveau jaune, la troisième qui est pourtant la plus forte enregistrée en est très loin. Elle présente les mêmes caractéristiques que celles issues d'une sur-réaction du bassin versant de la Couze-Chambon. De plus, le nombre d'événements importants est trop faible pour pouvoir séparer la chronique et effectuer le calage sur une partie et un contrôle sur l'autre. Il n'y a donc aucune garantie que les résultats demeurent aussi bons par la suite.

Peu d'événement importants (dépassant le niveau jaune fixé précédemment) ont été enregistrés aux stations. Les formules et les abaques établies ont donc une fiabilité et une représentativité limitée par ce manque de données dû à des stations implantées assez récemment (il y a 20 ans). L'abaque établi pour la Couze-Pavin n'a ainsi pas pu être vérifié car aucune crue d'importance n'a été relevée. De plus, les abaques pour la Couze-Pavin et le Jolan semblent indiquer que ces bassins versants ne présentant en apparence qu'un seul type de réponse à une pluie auraient en réalité le même type de comportement complexe que la Couze-Chambon et le Sichon. Il n'aurait juste pas été formellement identifié en raison du faible nombre de crue importantes relevées. Ces abaques devront donc évoluer et être affinés lorsque plus d'événements d'importance auront été enregistrés. Ils permettront d'obtenir des abaques plus fiables que celles-ci basées sur un faible nombre d'événements. Elles peuvent néanmoins donner une première estimation des risques de crue mais devront être confrontées à d'autres méthodes d'estimation.

3.3.2. Résultats du calage de GRP

Dans un premier temps, l'horizon de calage est fixé comme étant égal au temps de réaction des bassins versants au niveau des stations (6h). Le débit de calage est au plus égal à celui de vigilance. Dans un premier temps, les débits de calage seront de 34m³/s pour le Sichon et de 24 m³/s pour le Jolan. Les deux types de correction : RNA et Tangara seront testées en parallèle pour déterminer le plus adapté. Les résultats sont peu satisfaisants (voir annexe XXVI). Il est donc nécessaire de modifier soit l'horizon de prévision et/ou les débits de calage.

Les fiches résultats du modèle mettent en évidence une sous-réaction suite à des orages.

L'horizon de prévision pourrait jouer un rôle dans ces mauvaises performances. Les événements orageux étant courts et intenses, leur prise en compte pourrait être meilleure s'il était raccourci. Un calage sera donc effectué avec un horizon de 3h. Les résultats sont globalement moins bons que pour un horizon de 6h pour les deux bassins versants (voir annexe XXVI). Il prend légèrement mieux en compte les événements orageux mais surestime alors fortement la réaction du bassin versant suite à une pluie de type océanique plus longue et moins intense ce qui explique l'augmentation de la performance globale de GRP (CSI) pour le Jolan et la diminution de l'efficacité pour les deux bassins. Les écarts entre débits estimés et observés augmentent mais une meilleure estimation des événements orageux permet de passer le niveau d'alerte pour certains événements ce qui explique l'augmentation de la probabilité de détection (POD). La diminution des fausses alertes (FAR) Le comportement différencié du bassin versant à ces deux types d'événements empêche d'avoir un bon calage sur la totalité de la chronique. Les pluies de type océanique étant plus fréquentes et le calage étant meilleur pour un horizon de 6h, cet horizon est choisi.

Il reste donc à fixer un seuil de débit optimal. Un calage antérieur effectué sur la Couze-Pavin et la Couze-Chambon pour un autre choix de seuils a donné de très bons résultats (voir tableau 19). Ils ont été fixés à $30\text{m}^3/\text{s}$ soit respectivement à une crue biennale et à une crue annuelle à biennale. Ils sont inférieurs aux niveaux de vigilance estimés dans cette étude. Par analogie, un calage test pourrait être effectué avec des débits seuils biennaux soit $30\text{m}^3/\text{s}$ pour le Sichon et $15\text{m}^3/\text{s}$ pour le Jolan. Ce changement améliore nettement les performances : abaisser le seuil permet de détecter plus d'événements et de réaliser les calculs de performance sur plus d'événements et donc d'améliorer la représentativité des calculs. Un seuil plus bas est également préférable, car il permet d'être en alerte lorsque le débit commence à devenir important et de surveiller le cours d'eau. L'alerte sera donc donnée plus rapidement s'il risque de passer ultérieurement le niveau jaune réellement fixé. Ces seuils abaissés sont donc retenus.

Le modèle sous-estime toujours fortement les débits suite à des orages. Le modèle GRP n'a pas été développé pour simuler des événements orageux et est donc peu performants dans ce cas. Néanmoins, il faut quand même envisager que les pluies de bassin disponibles pourraient être mal-estimées. Si le problème vient des pluies enregistrées aux pluviomètres, en l'état actuel des choses, rien ne peut être fait pour améliorer la situation mais si le problème venait des coefficients choisis des améliorations sont possibles. Les méthodes de calcul de la pluie de bassin donnent des coefficients très différents comme l'atteste l'annexe XVIII, modifier les coefficients utilisés peut mettre en évidence leur poids dans l'efficacité du calage de GRP. Au vu des différentes valeurs estimées et pour limiter les temps de calage du modèle, il est choisi d'inverser les pluies de bassin du Sichon et du Jolan, c'est-à-dire : Sichon : $P_{\text{bassin}}=0,2*\text{Vichy}+0,8*\text{Mayet}$; Jolan $P_{\text{bassin}}=0,4*\text{Vichy}+0,6*\text{Mayet}$. Les différences entre les résultats de ce calage et le précédent ne sont pas significatives. Le problème doit donc venir du positionnement des pluviomètres ne détectant que partiellement certains événements orageux mais surtout du modèle en lui-même ne prenant pas en compte le comportement différencié du bassin versant à un orage.

La correction RNA présente généralement de meilleurs résultats sur le territoire du SPC Allier et c'est le cas ici (voir annexe XXVI), elle sera donc retenue.

Les modalités de calage choisies sont donc les suivantes :

Pour le Sichon : $\text{HOR}=6\text{h}$, $Q_{\text{seuil}}=30\text{m}^3/\text{s}$ $P_{\text{bassin}}=0,4*\text{Vichy}+0,6*\text{Mayet}$ et correction RNA.

Pour le Jolan : $\text{HOR}=6\text{h}$, $Q_{\text{seuil}}=15\text{m}^3/\text{s}$ $P_{\text{bassin}}=0,2*\text{Vichy}+0,8*\text{Mayet}$ et correction RNA.

Le tableau 19 présente les performances du modèle GRP sur les différents bassins versants étudiés. Elles sont issues du scénario retenu précédemment pour le calage sur le Sichon et le Jolan et des résultats pré-existants sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin. Les différences entre les calages effectués précédemment et les calages opérationnels résident dans le fait que les seconds soient effectués sur toute la chronique et non séparément sur deux moitiés de celle-ci.

Le scénario qui a été retenu pour la Couze-Chambon et la Couze-Pavin est : l'utilisation du module neige en raison de l'altitude de leurs sources les soumettant à l'influence nivale, un seuil de débit à $30\text{m}^3/\text{s}$, un horizon de calage de 6h et l'utilisation de la correction RNA.

	Eff	Rout (mm)	CORR	TB (h)	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)
Sichon	0,517	2 149,64	0,99	3,16	51,9	26,3	43,8
Jolan	0,563	1339,43	0,84	5,58	39,4	18,8	36,1
Couze-Chambon	0,644	868,38	0,38	2,19	52,2	0,0	52,2
Couze-Pavin	0,783	2 649,15	0,53	2,10	70,2	15,4	62,3

Tableau 19 : Performances des calages opérationnels du modèle GRP sur les bassins versants du Sichon et du Jolan (03) et comparaison avec les résultats du calage existant sur la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63)

Les résultats sont très bons pour la Couze-Pavin, les estimations restent en moyenne assez bonnes jusqu'à un horizon de 12h, elles deviennent ensuite légèrement sur-estimées. Les résultats sont un peu moins stables pour la Couze-Chambon et deviennent très rapidement largement sous-estimés. La forte correction (CORR) appliquée diminue fortement la valeur des pluies prises en compte et peut expliquer ce phénomène. L'influence du lac sur la Couze-Chambon peut expliquer que les performances du calage soient moins bonnes pour ce bassin que pour celui de la Couze-Pavin. Les résultats sont moins bons pour le Sichon et le Jolan pour les raisons évoquées précédemment. L'annexe XXVII présente les résultats des calages retenus. La stabilité du calage sur les deux sous-périodes y apparaît également plus faible, mais elle reste acceptable. La sous-estimation des crues orageuses se répercute sur la qualité des prévisions à plus de 6h qui alors sont bien plus faibles que la valeur observée.

Les performances du modèle sont plus faibles pour les orages (voir hydrogrammes en annexe XXVIII). Le modèle sous-estime la réaction du bassin versant pour les mêmes raisons que celles citées lors de la création des abaques. Il simule en revanche plutôt bien les événements plus longs ou de type océanique. La fiabilité de GRP reste cependant limitée pour les fortes crues, car bien que les chroniques utilisées soient assez longues pour effectuer un bon calage, elles comportent peu d'événements intenses.

L'utilisation des abaques reste complémentaire de l'utilisation de GRP et permettrait d'identifier des événements peu pris en compte par le modèle (seconds événements ou événements intenses) et d'estimer s'ils représentent un risque de crue. Par ailleurs, une intégration des lames d'eau radar prévue aux prévisions en cas de crue pourrait permettre de s'affranchir du problème de la répartition spatiale des pluviomètres pour la prise en compte de la pluie de bassin. Cela améliorerait certainement les performances de GRP mais ne réglerait pas le problème de leur sous-estimation systématique. Seule l'utilisation d'un modèle plus complexe pourrait apporter des estimations plus fines. Néanmoins, il pourrait être plus cher et plus difficile à utiliser en temps réel. En effet, ses temps de calcul pourraient être plus longs et sa manipulation peu aisée pour des prévisionnistes n'ayant pas forcément tous des connaissances approfondies en hydrologie et en modélisation numérique. L'utilisation combinée des abaques lorsqu'elles auront été vérifiées pour d'autres épisodes de crue et du modèle GRP formera néanmoins une bonne base pour la prévision de crue sur les bassins versants étudiés en attendant des outils plus performants.

Conclusion :

Les crues soudaines sont caractérisées par leur survenue brusque, avec des temps de réponse de 2 à 6h et des dégâts pouvant être importants. Le système d'alerte réglementaire Vigicrues n'est pas adapté à des temps aussi courts qui sont inférieurs à celui nécessaire à la mise en place de la chaîne d'alerte associée à Vigicrues. Des systèmes spécifiques sont donc développés par l'État : les services d'avertissement automatique (Vigicrues Flash) et expertisé, mais aussi par certaines collectivités : le système d'alerte local. Chaque système a ses particularités et des critères de mise en place spécifiques. Ils sont essentiellement basés sur les enjeux impactés par les crues et sur les caractéristiques hydrologiques des bassins versants.

Sur le territoire du SPC Allier, plusieurs dizaines de cours d'eau sont concernés par les crues soudaines. Le service automatisé (Vigicrues Flash) prévu pour être opérationnel d'ici à fin 2016-début 2017 permettra d'en couvrir un grand nombre. De plus, seule une vingtaine d'entre eux présentent des enjeux qui pourraient justifier l'utilisation d'un système plus ciblé : un service expertisé ou un SAL. Cependant, pour des raisons techniques et matérielles liées aux moyens humains et financiers de l'État et des collectivités, ils ne peuvent pas tous être surveillés de cette manière. Le SPC Allier a alors réalisé en 2015 un premier classement. Les cours d'eau du Sichon-Jolan dans l'Allier de la Durolle, la Couze-Chambon et la Couze-Pavin dans le Puy-de-Dôme figuraient en haut de ce classement, ils ont donc été sélectionnés pour cette étude.

Dans un premier temps, la détermination des enjeux en zone inondable (population, emplois, lieux touristiques et sites ou bâtiments sensibles) a permis de classer les bassins versants par ordre de priorité. Puis un ou des systèmes d'alerte ont été proposés suite à l'étude du bassin versant et des temps de réponse.

Les estimations pour les bassins versants étudiés mettent en évidence des enjeux forts sur la population et les emplois. Pour une crue centennale ce sont ainsi 1 300 habitants et 620 emplois qui sont en zone inondable pour le Sichon-Jolan, 1 200 habitants et 180 emplois pour la Couze-Chambon, 800 habitants et 240 emplois pour la Couze-Pavin et 560 habitants et 620 emplois pour la Durolle. De nombreux enjeux ponctuels (campings, écoles, mairies, casernes de pompiers, gendarmerie...) sont également concernés sur la Couze-Chambon, la Couze-Pavin et l'amont du Sichon. Les enjeux touristiques y sont également importants, mais cette activité est moins impactée en raison de la survenue des crues essentiellement en dehors des périodes touristiques. En conséquence, l'ordre de priorité pour la mise en place de systèmes d'alerte est le suivant : Sichon-Jolan, Couze-Chambon, Couze-Pavin et Durolle.

Cette première phase a également permis d'écarter des zones où les faibles enjeux ne rendaient pas une surveillance nécessaire (amont du Jolan). Restreindre l'étendue des systèmes d'alerte permet de limiter les coûts et de concentrer les moyens où ils sont nécessaires. Confronter les enjeux et les caractéristiques des bassins versants aux critères définis par chaque système d'alerte (population en ZI, temps de réponse, stations présentes...) oriente ensuite le choix d'un système ainsi que son périmètre de surveillance. Si les services expertisés se détachent pour la Couze-Chambon et la Couze-Pavin, le choix reste plus ouvert pour le Sichon-Jolan. Parmi les options envisagées pour ce bassin, la mise en place d'un SAL est la plus étudiée. La communauté d'agglomération de Vichy-Val d'Allier doit se prononcer sur son choix avant le mois de septembre. Pour la Durolle, une intégration à Vigicrues permettrait d'améliorer les prévisions des crues de la Dore, ce sera sûrement le système choisi. Quel que soit le bassin versant, le choix sera effectué en concertation entre les collectivités et les services de l'État. Par ailleurs, même si le choix d'un système s'effectue rapidement, sa mise en place prendra du temps.

Indépendamment du système choisi, des outils de prévision spécifiques doivent être conçus. Ils nécessitent l'existence de données assez complètes sur les bassins versants. L'absence de mesures de débit sur la Durolle l'a donc écartée de cette partie de l'étude. Des abaques et des formules reliant le cumul de pluie sur 24 ou 48h, le débit initial et l'humidité des sols au débit de pointe ont en revanche été créées sur les autres bassins versants. Ils sont

complétés par le calage d'un modèle de prévision des crues : GRP.

Pour ces bassins versants, les abaques et GRP ont une fiabilité limitée par le manque de crues importantes enregistrées. De plus, les événements orageux induisent un comportement différencié du bassin versant qui n'est pas pris en compte par GRP. Les abaques en tiennent compte, mais les relations obtenues n'ont pas pu être vérifiées. Ces deux outils sont donc complémentaires et, utilisés conjointement, ils améliorent les prévisions. Ils devront être vérifiés voire adaptés lorsque plus d'événements intenses auront eu lieu. Cependant, il est vraisemblable que GRP n'ayant pas été conçu pour modéliser des crues orageuses, seul des outils plus complexes pourraient mieux modéliser ces crues. Il faudrait alors trouver un compromis entre la qualité des prévisions, leur échéance et le coût et surtout le temps de calcul de cet outil pour répondre à la problématique des crues soudaines.

Bibliographie :

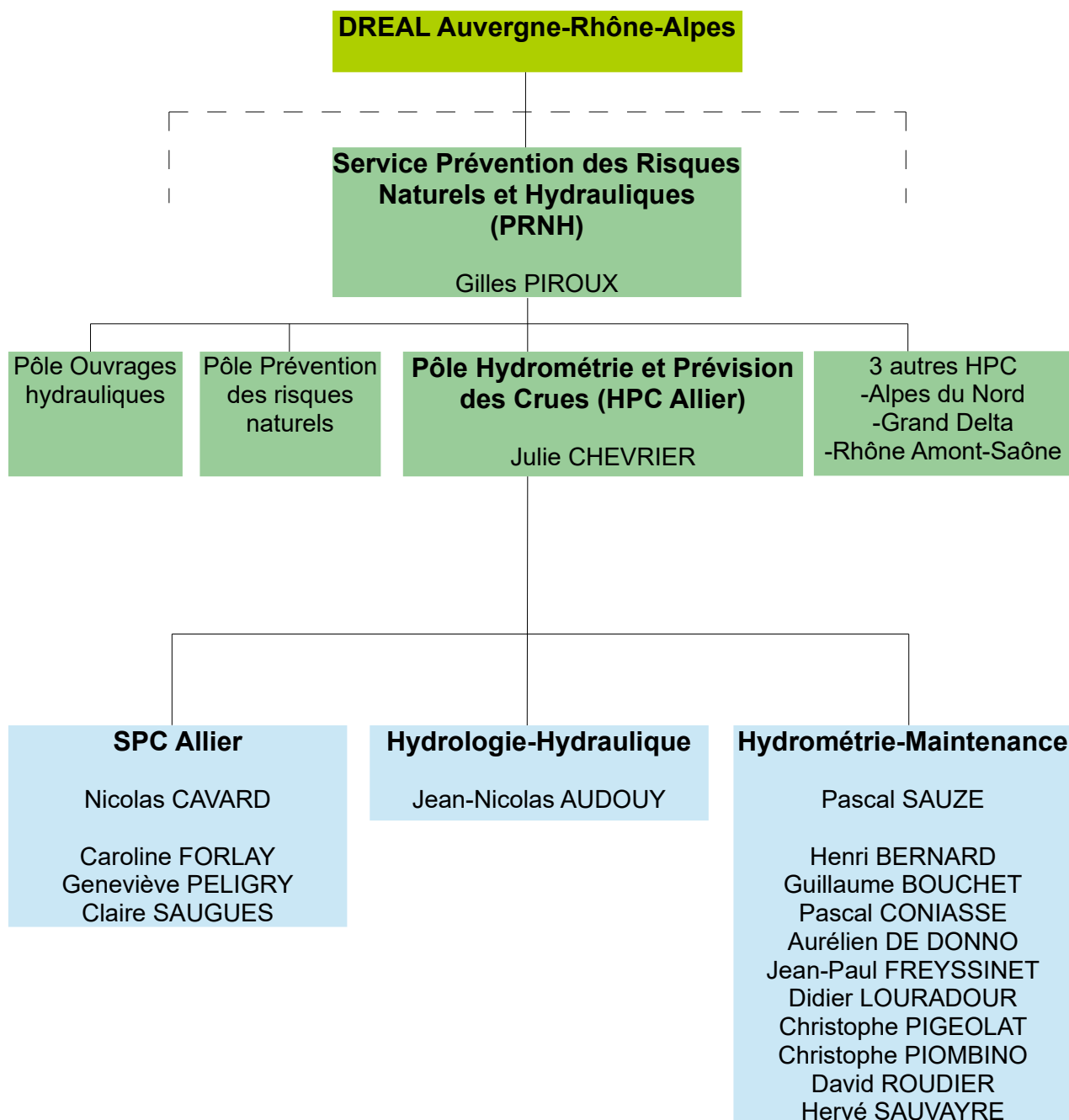
- [1] World Meteorological Organization (WMO). **Manual on flood forecasting and warning**. WMO, 2011, n°1072. ISBN 978-92-63-11072-5.
- [2] T. E. ADAMS, T. C. PAGANO, **Flood Forecasting : A Global Perspective**. Academic Press, 2016. 478p. ISBN : 978-0-12-801884-2.
- [3] K. SENE. **Flood Warning, Forecasting and Emergency Response**. Springer Science & Business Media, août 2008. 303 p. ISBN 978-3-540-77852-3.
- [4] United Nations. **Guidelines for Reducing Flood Losses**. UN, 2002. Chapitre 3, **Integrated Flood Forecasting, Warning and Response System**.
- [5] K. SENE. **Flash Floods : Forecasting and Warning**. Springer Science & Business Media, décembre 2012. 386p. ISBN 978-94-007-5163-7. <<http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-5164-4>>.
- [6] D. DEFRANCE. **Adaptation et évaluation d'un système d'anticipation de crues éclair sur des bassins de montagne non-jaugés, Valorisation de relevés de dégâts**. Thèse de doctorat en hydrologie, Université Pierre et Marie Curie, 2014. 244p.
- [7] Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, J.-Y. CHAUVIERE, J.-J. LAFITTE, M. LE QUENTREC, J.-L. RAVARD, C. TRUCHOT, P. VERDEAUX. **Prévision des crues et hydrométrie, Évaluation des réseaux et perspectives**. Conseil général de l'Environnement et du Développement durable, rapport n° 005620-01, 2010.
- [8] M. SANGATI. **Flash flood analysis and modelling in mountain regions**. Thèse de doctorat, Idronomia Ambientale, Università degli Studi di Padova, 2009. 141p.
- [9] C. G. COLLIER. **Flash flood forecasting : What are the limits of predictability?**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, Vol 133, n°622, p3-23.
- [10] H. A. P. HAPUARACHCHI, Q. J. WANG, T. C. PAGANO. **A review of advances in flash flood forecasting**. *Hydrological Processes*, 2011, Vol 25, n°18, p2771-2784. <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8040>>.
- [11] SPC Alpes du Nord, SCHAPI, MEEDDM. **Le dispositif de l'État pour la surveillance et la prévision des crues. De la collecte des informations à l'alerte des populations**. 2010.
- [12] SPC Allier, DREAL Auvergne. **Service de Prévision des Crues du bassin de l'Allier. Règlement de surveillance, de prévision et de transmission de l'Information sur les Crues (RIC)**. 2013.
- [13] MétéoFrance. **APIC : Avertissement Pluies Intenses à l'échelle des Communes**. 2011.
- [14] C. DE SAINT AUBIN, SCHAPI. **Service Automatique : Principe et performances de la modélisation support**. Réunion Crues Soudaines, Toulouse, 26 juin 2014.
- [15] University Corporation for Atmospheric Research, NOAA, COMET. **Flash Flood Early Warning System Reference Guide**. NOAA, 2010. Chapitre 5, **Flash Flood Forecasting Subsystems**. ISBN 978-0-615-37421-5.
- [16] V. HUET, Institut des Risques Majeurs. **Le système d'alerte de crue du bassin versant de la Siagne : un Service de Prévision des Crues (SPC) territorial**. *Risques Infos*, 2010, n°25, p19-20.
- [17] ANTEA, Agence Rhône-Alpes Méditerranée, DDT Allier. **TRI de l'Agglomération Vichyssoise. Définition et cartographie de l'aléa inondation de l'Allier, du Sichon et du Jolan sur l'agglomération Vichyssoise**. 2014.
- [18] Egis Eau, Vichy Val d'Allier. **Diagnostic eaux pluviales et inondation**. 2011.
- [19] SOMIVAL Clermont-Ferrand, Ministère de l'Environnement, Préfecture du Puy-de-Dôme. **Programme de prévention contre les inondations liées au ruissellement pluvial urbain et aux crues torrentielles**. 1995.
- [20] CETE Lyon, Syndicat intercommunal d'aménagement de la vallée de la Couze Pavin. **Diagnostic hydrologique et environnemental du bassin versant de la Couze Pavin**. 2004.
- [21] DDE Allier. **Plan de Prévention des Risques Naturels Prévisibles. Ruisseaux : Sichon et Jolan. Cusset-Vichy. Risque Inondation**. 2001.
- [22] Hydratec, DDE Puy de Dôme. **Étude préliminaire à l'élaboration d'un plan de prévention des risques d'inondation de la rivière Durole**. 1999.
- [23] Préfecture du Puy de Dôme. **Plan de Prévention des Risques inondation du bassin de la Durole et de la Dore au droit de Thiers. Note de présentation**. 2008.
- [24] DREAL Auvergne. **Éléments d'analyse hydrologique de la crue du Jolan à Cusset du 8 août 2013**. 2013.

- [25] BCEOM, Préfecture du Puy de Dôme. **Plan de prévention des risques naturels. Inondation du bassin de la Couze-Chambon. Note de présentation. et PPRi de la Couze Chambon et de la Veyre. Expertises complémentaires.** 2008.
- [26] DREAL Auvergne, Service Territoires, Évaluation, Logement, Énergie et Paysages, Mission Géomatique Statistiques Données, J.-Y. POUYET, P. GELY, Y. MAJOREL. **Évaluation des populations résidentielles infracommunales en Auvergne.** Août 2014.
- [27] DREAL Auvergne. **Directive Inondation. Bassin Loire-Bretagne. Rapport de présentation de la cartographie du risque d'inondation sur le secteur de Vichy.** Novembre 2013.
- [28] R. BOURRIER. **Réseaux d'assainissement Calculs, applications, perspectives.** Tec et Doc – Lavoisier, 2008. 810 p. ISBN : 2-7430-1051-7.
- [29] M. BOURQUI. **Impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques.** Thèse de doctorat en sciences de l'eau, École Doctorale Géosciences et Ressources Naturelles, École Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts, avril 2008. 333p.
- [30] L. R. RAZAFIMANANTSOA. **Analyse des crues passées pour l'établissement des abaques d'aide à la prévision des crues et proposition de formules de vigilance crues sur les bassins versants de la Sarre et de la Bruche.** Mémoire de Mastère Spécialisé en Eau Potable et Assainissement, ENGEES, 2009. 109p.
- [31] L. MOULIN. **Prévision des crues rapides avec des modèles hydrologiques globaux. Applications aux bassins opérationnels de la Loire supérieure : évaluation des modélisations, prise en compte des incertitudes sur les précipitations moyennes spatiales et utilisation de prévisions météorologiques.** Thèse de doctorat en Hydrologie, AgroParisTech, 2007. 639p.
- [32] V. ESTUPINA BORRELL. **Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair Application à de petits bassins versants du sud de la France.** Thèse de doctorat en Hydrologie, Institut National polytechnique de Toulouse, 2004. 254p.
- [33] D. MARÉCHAL. **A soil-based approach to rainfall-runoff modelling in ungauged catchments for England and Wales.** Thèse de doctorat, Water and Environment, 2004, Cranfield University. 145p.
- [34] D. M. GRAY, J. M. WIGHAM. **Manuel des principes d'hydrologie portant une attention spéciale aux conditions canadiennes dans les discussions, les applications et la présentation des données.** Ottawa, Canada, Comité national canadien de la décennie hydrologique internationale, Conseil National de Recherches du Canada, 1972. Chapitres 7 et 8, **Étude générale du ruissellement et de la précipitation et Précipitations à l'origine des débits de pointe.**
- [35] L. BERTHET. **Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique.** Thèse de doctorat en hydrologie, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, AgroParisTech. Février 2010. 606p.
- [36] M. TANGARA. **Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global.** Thèse de doctorat spécialité Milieux, Organismes et Evolution, novembre 2005, École Pratique des Hautes Études de Paris. 374p.
- [37] M. NICOLAS. **Étude expérimentale et numérique du ruissellement de surface : effets des variations d'intensité de la pluie. Application à une parcelle de vigne en Cévennes-Vivarais.** Thèse de doctorat spécialité Terre, Univers, Environnement, 2010, Université de Grenoble. 217p.
- [38] DDE 63, LRPC. **Plan de prévention du risque inondation. Rivière Couze-Chambon.** 1997.
- [39] J. N. AUDOUY, DDE Puy de Dôme. **Note sur l'analyse hydrologique remise par Ingé Conseils pour la Couze-Chambon.** 2008.
- [40] Silène, DDE Puy de Dôme. **Étude hydraulique préalable au PPRi de la Couze Pavin.** 2007.
- [41] DREAL Auvergne. **Demande de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle. Rapport d'analyse sur la crue du SICHON le 22 mai 2012. Commune de Ferrières sur Sichon.** 2012.
- [42] L. W. MAYS. **Water resources engineering.** John Wiley & Sons, 2011. 890p. ISBN 978-0-470-46064-1.
- [43] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. **National Engineering Handbook.** Mai 2010. Part 630, **Hydrology**, Chapitre 15, **Time of Concentration.**
- [44] S. GRIMALDI, A. PETROSELLI, F. TAURO, M. PORFIRI. **Time of concentration : a paradox in modern hydrology.** *Hydrological Sciences Journal*, 2012, Vol 57, n°2, p217-228. <<http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2011.644244>>.

Annexes

Annexe I : Organigramme du SPC Allier.....	62
Annexe II : Crues historiques de la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63) d'après [38] [19] et [25]...	63
Annexe III : Débits pour plusieurs périodes de retour en différents points de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin (63).....	65
Annexe IV : Crues historiques dans l'Allier du Sichon et du Jolan et de la Durolle dans le Puy de Dôme D'après [23] et [22] [21] [17] et [18] [24] [41] [27] avec QC le débit à Cusset, QFS le débit à Ferrières sur Sichon et QMV le débit à Moulin-Vidot.....	67
Annexe V : Débits pour différentes périodes de retour pour le Sichon et le Jolan.....	69
Annexe VI : Débits pour différentes périodes de retour de la Durolle (63)[23] [22].....	70
Annexe VII : Incertitudes et commentaires sur les tracés des couches de zones inondables issues d'études antérieures.....	71
Annexe VIII : Méthode d'obtention de la population en ZI.....	72
Annexe IX : Méthode d'obtention du nombre d'emplois en ZI.....	73
Annexe X : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par le Sichon et le Jolan[27][18].....	74
Annexe XI : Population et nombre d'emplois en ZI pour une crue centennale.....	75
Annexe XII : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable ou en limite de ZI par la Couze-Pavin [20] [19].....	76
Annexe XIII : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par la Couze-Chambon [38] [25].....	77
Annexe XIV : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par la Durolle [22] [23].	78
Annexe XV : Formules du temps de concentration et limites de validité [42], [43] et [44].....	79
Annexe XVI : Méthode d'obtention et distribution des temps de réponse obtenus par lecture graphique grâce au logiciel SACHA.....	80
Annexe XVII : Stations hydrométriques des bassins versants étudiés [Banque Hydro].....	81
Annexe XVIII : Coefficients pour l'obtention de la pluie de bassin respectivement par la méthode des polygones de Thiessen, la méthode hypsométrique et les valeurs retenues pour le calcul de la pluie de bassin.....	82
Annexe XIX : Temps de concentration et temps de réponse en différents points des bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle.....	83
Annexe XX : Méthode de calcul du coefficient de ruissellement.....	85
Annexe XXI : Schéma de fonctionnement du modèle GRP d'après [35] et [36].....	86
Annexe XXII : Détermination des niveaux de vigilance pour le Sichon et le Jolan.....	87
Annexe XXIII : Statistiques annuelles et saisonnières sur les valeurs d'humidité des sols (HU2).....	90
Annexe XXIV : Coefficients de la formule d'estimation du débit de pointe d'une crue pour les bassins versants étudiés.....	91
Annexe XXV : Résultats de la détermination graphique des coefficients A et B des formules de vigilance et mise en évidence des différents comportements des bassins versants.....	92
Annexe XXVI : Performances de différents calage du modèle GRP sur le Sichon et le Jolan (03).....	94
Annexe XXVII : Fiches de résultats et de performance des calages opérationnels retenus.....	95
Annexe XXVIII : Fiches résultat de GRP, exemples de comparaison entre hydrogrammes de crue réels et simulés.....	97

Annexe I : Organigramme du SPC Allier



Annexe II : Crues historiques de la Couze-Chambon et la Couze-Pavin (63) d'après [38] [19] et [25]

Dates de la crue	Cours d'eau	Débits de pointe estimé en m³/s	Commentaires sur les inondations et l'événement
26 septembre 1787	Couze-Chambon	Crue dite « extraordinaire »	Le grand chemin est inondé à Champeix
3 mars 1886	Couze-Chambon	32 à Chambon sur Lac	-
1943	Couze-Chambon	-	Inondations à la confluence avec l'Allier à Coudes Dégâts importants à Montaigut-le-Blanc
8 décembre 1944	Couze-Pavin	100<Q<125 à St-Floret Q ₁₀₀	Inondations au niveau du château et route coupée à St-Cirgues-sur-Couze 1m d'eau dans St-Floret, inondations au niveau de l'actuel lotissement Bony Cisternes à St-Cirgues sur Couze, inondations dans le bourg de Meilhaud (une digue existe actuellement)
18 janvier 1955	Couze-Chambon	-	Entre 5 et 10cm dans un restaurant et un magasin proches du lac, 1m dans des maisons au Sud-est du lac à Chambon, 50cm au niveau du moulin de Neschers, charriage important (jusqu'à 0,8 m sous les piles des ponts)
	Couze-Pavin	135 à Issoire Q ₁₀₀	Inondation de la mairie et de l'école, 0,5m d'eau place de la mairie, 1,5m d'eau dans la rue longeant la Couze à Saurier, 1m d'eau dans St-Floret, destruction partielle d'une digue à Meilhaud, plus importante crue du siècle à Issoire
Janvier 1958	Couze-Chambon	-	4 à 5m d'eau dans les gorges
1973	Couze-Chambon	-	Le pont des « Ballats » a été submergé à Murol
16 décembre 1981	Couze-Pavin	106 à St-Floret	Inondation place de la Fontaine à St-Vincent, 1m d'eau dans St-Floret
6 janvier 1982	Couze-Chambon	67 à Champeix	-
	Couze-Pavin	106 à St-Floret	Inondation place de la Fontaine à St-Vincent Route et stade inondés à Perrier, le château de Siorac est cerné par les eaux, 1m d'eau dans St-Floret, inondations du lotissement Bony Cisternes à St-Cirgues sur Couze, 0,6m rue de la Couze à Meilhaud, 1m d'eau jardin de la préfecture à Issoire et cours de l'Institut St-Louis

15-22 mars 1988	Couze-Chambon	-	Arrêté CATNAT pour Chambon sur Lac et Murol La mairie de Chambon sur Lac est inondée, inondation de garages à Murol
12-17 février 1990	Couze-Chambon	44 à Champeix >Q ₅	Arrêté CATNAT pour Chambon sur Lac et Murol, Inondation du chemin d'accès au cimetière de Murol et de quelques maisons. Sur la commune de St-Nectaire, à Saillant la plaine des Carettes, l'école et une maison sont inondés.
1-12 juin 1992	Couze-Chambon	86 à Champeix >Q ₅₀	Arrêté CATNAT pour Coudes, Champeix, Montaigut-le-blanc, Neschers, Saint-Nectaire et Verrières
31 juillet 1994	Couze-Chambon	30 <Q<35 >Q ₁₀ à la station lac Chambon amont	Arrêté CATNAT pour Chambon sur Lac Le bourg de Chambon est submergé sous 1m d'eau et 2 campings ont été inondés, charriage important, peu de dégâts à l'aval du lac de Chambon
4-6 novembre 1994	Couze-Chambon	24 à Chambon sur Lac 111 à Coudes	Arrêté CATNAT pour Coudes, Grandeyrolles, Neschers, Saint-Nectaire et Verrières Inondation de l'école de Saillant et jusqu'à 60 cm d'eau dans les moulins de Neschers, 1,5m d'eau sur la place de la mairie, inondation de la place de la Halle et de ses commerces, 0,5m quai de Beaugeix à Champeix, inondation des terrains de football de Coudes
	Couze-Pavin	74 à St-Floret 95 à Issoire >Q ₁₀	Arrêté CATNAT pour St-Floret, St-Cirgues-sur-Couze, Chidrac, Meilhaud, Perrier, Issoire Routes coupées à St-Vincent, Perrier et Meilhaud, charriage important, 0,8m dans la cour du moulin de Pont l'Estrade à Meilhaud, 0,7m au stade de Perrier, débordement à Issoire dans la cour de l'Institut St-Louis et les jardins de la préfecture
25-29 décembre 1999	Couze-Chambon	65 à Champeix	Tempêtes Lothar et Martin Arrêtés CATNAT sur toutes les communes
	Couze-Pavin	81 à St-Floret 105 à Issoire	
3 février 2003	Couze-Chambon	65 à Champeix	-
1-5 décembre 2003	Couze-Chambon	51 à Champeix	Arrêté CATNAT pour Coudes
13 janvier 2004	Couze-Pavin	51 à St-Floret	-
23 janvier 2009	Couze-Pavin	52 à St-Floret	-
15-17 juin 2010	Couze-Chambon	50 à Champeix	-

Annexe III : Débits pour plusieurs périodes de retour en différents points de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin (63)

En **gras**, valeurs retenues.

Couze-Chambon

	Étude	Chambon sur Lac (station Lac amont)	Murol (station Lac aval)	St-Nectaire	Montaigut-le-Blanc (station Champeix)	Champeix	Neschers	Coudes
Q ₅ (m ³ /s)	CETE 2008 [39]	20	-	-	-	-	-	-
	Banque Hydro	20	10	-	42	-	-	-
Q ₁₀ (m ³ /s)	CETE 2008 [39]	25	-	-	-	-	-	-
	Banque Hydro	25	12	-	52	-	-	-
	LRPC 1997 [38]	21	22	43	56	59	61	62
	Ingé Conseils 2008 [39]	21	-	-	-	-	-	-
Q ₂₀ (m ³ /s)	CETE 2008 [39]	32	-	-	-	-	-	-
	Banque Hydro	29	13	-	61	-	-	-
Q ₅₀ (m ³ /s)	CETE 2008 [39]	44	-	-	-	-	-	-
	Banque Hydro	-	16	-	73	-	-	-
	Ingé Conseils 2008 [39]	29	-	-	-	-	-	-
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	CETE 2008 [39]	58	-	-	-	-	-	-
	LRPC 1997 [38]	139	121	217	268	269	278	264
	Ingé Conseils 2008 [39]	34	-	-	-	-	-	-

Couze-Pavin

Étude	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)				Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)		Q ₁₀₀ (m ³ /s)	
	Banque Hydro	Gradex [40]	Silène 2007 [40]	CETE 2004 [20]	Banque Hydro	Banque Hydro	CETE 2004 [20]	Banque Hydro	Gradex [40]	Silène 2007 [40]
Besse-et-St-Anastaise	-	10	10	-	-	-	-	-	46	60
St-Pierre-Colamine	-	25	25	-	-	-	-	-	101	135
St-Diéry	-	40	40	-	-	-	-	-	146	145
Saurier	-	-	75	-	-	-	-	-	-	150
St-Floret (station)	60	84	80	79	73	85	110	101	246	150
St-Vincent	-	-	85	-	-	-	-	-	-	160
St-Cirgues-Chidrac	-	-	90	-	-	-	-	-	-	160
Meilhaud	-	-	90	-	-	-	-	-	-	165
Perrier	-	-	100	-	-	-	-	-	-	180
Issoire	-	-	100	-	-	-	-	-	-	190

L'étude BCEOM 2008 [25] reprend les résultats de l'étude LRPC 1997 [38].

Les résultats donnés par la Banque Hydro sont issus d'un ajustement statistique de Gumbel sur les chroniques disponibles.

Le débit de la crue centennale calculé par le LRPC est surestimé, car il est issu de l'extension de la méthode rationnelle selon la formule de Bressand-Golossoff qui est adaptée aux Cévennes mais pas au bassin versant de la Couze-Chambon.

Les résultats obtenus par l'étude IngéConseils sont issus de la prolongation de l'ajustement de la Banque Hydro, ils sont donc peu fiables et ont été estimés comme étant des valeurs constituant la limite basse pour le débit centennial dans une note d'analyse critique des résultats d'IngéConseils réalisée par J. N. Audouy pour la DDE 63 [39].

L'étude du CETE donne des valeurs issues d'un ajustement statistique de Gumbel sur les données de la Banque Hydro.

L'étude Silène estime les Q₁₀₀ par la méthode du Gradex de Besse à St-Diéry et par transfert des estimations de la crue centennale à la station de St-Floret pour les estimations de Saurier à Issoire. Les débits décennaux (Q₁₀) sont calculés à partir de débit pseudo-spécifiques ³⁸.

38 Le débit centennial (Q₁₀₀) en un point est calculé de la façon suivante $Q_{100} = q_{\text{St-Floret}} \times (S_{\text{Commune}} / S_{\text{St-Floret}})^{0,8}$ avec $q_{\text{St-Floret}} = 2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ et S la surface drainée par la Couze-Pavin au droit de la commune. Les débits décennaux (Q₁₀) sont calculés à partir des débits pseudo-spécifiques décennaux (q₁₀), débits ramenés à une unité de surface du bassin versant et estimés sur trois stations. Ces débits étant proches de $1,1 \text{ m}^3/\text{s}/(\text{km}^2)^{0,8}$, c'est cette valeur qui est retenue pour le calcul suivant la formule : $Q_{10} = S \cdot q_{10}$

Annexe IV : Crues historiques dans l'Allier du Sichon et du Jolan et de la Durolle dans le Puy de Dôme D'après [23] et [22] [21] [17] et [18] [24] [41] [27] avec QC le débit à Cusset, QFS le débit à Ferrières sur Sichon et QMV le débit à Moulin-Vidot

Dates de la crue	Cours d'eau	Débits de pointe estimé en m³/s	Commentaires sur les inondations et l'événement
3-4 janvier 1657	Durolle	-	Dégâts importants dans les usines, moulins et tanneries
2-4 mai 1707 novembre 1710	Durolle	-	Destruction d'écluses et quartier du Moûtier très impacté
Septembre 1733	Durolle	-	Dégâts importants sur les chemins proches de la Durolle
14 juillet 1951	Jolan	-	0,3m rue Simonard à Cusset (03)
	Sichon	-	0,3m rue Baillon à Cusset (03)
9 novembre 1958	Jolan	-	Inondations quartier de l'Avenue de l'Industrie, rue Simonard (niveau du 1 ^{er} étage), rues de la Source Radieuse, de la Perception, Olivier Grasset et de Bodesson et sur les terrains du Centre des Impôts et du Tribunal de commerce
	Sichon	-	Inondations rue Mesdames, 0,5m square de la source Mesdames, Darcin, 0,2-0,25m au niveau de la piscine et de la salle Omnisports, submersion du pont de la rue Combe Bessay, quartier Presle (centre EDF-GDF)
Juillet 1977	Sichon	-	1m route de Ferrières à Cusset (03), inondation des terrains de la Source, des jardins en rive gauche rue Andreau, rue Champ d'Auger, espace Chambon, submersion de la passerelle basse
10 juin 1984	Durolle	-	Arrêté CATNAT pour La Monnerie-le-Montel et Thiers
Mai 1985	Durolle	-	Inondation des ateliers au niveau des Forges à la Monnerie-le-Montel
17-19 mars 1988	Durolle	>Q30 voire Q50	Arrêté CATNAT pour Chabreloche, Celles-sur-Durolle, La Monnerie-le-Montel et Thiers Charriage important et inondations de Noirétable à Thiers, 50cm d'eau vers la Poste à Celles sur Durolle, à Thiers 20cm d'eau en moyenne dans la rue des usines et le quartier du Moûtier
14 mai 1988	Durolle	-	Arrêté CATNAT pour Thiers
1989-1991	Sichon-Jolan	-	Faibles débordements dans Cusset
14-16 février 1990	Sichon-Jolan	-	Faibles débordements dans Cusset
	Durolle	-	Arrêté CATNAT pour Chabreloche, La Monnerie-le-Montel et Thiers

12 juin 1992	Sichon-Jolan	-	Faibles débordements dans Cusset
	Durolle	-	Inondation des ateliers au niveau des Forges à la Monnerie le Montel
27 avril 1998	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=33$ $Q_C=23,1$	Faibles débordements dans Cusset
4-5 mai 2001	Jolan	$Q_C=30,9$	-
2-3 décembre 2003	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=35,7$ $Q_C=21,3$	-
	Durolle	-	Arrêté CATNAT pour Thiers
16-17 avril 2005	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=41,8$ $Q_C=22,6$	-
10-14 juin 2007	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=48,8$ $Q_C=17,8$	-
2-3 juillet 2008	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=33,5$ $Q_C=46,1$	-
19-22 mai 2012	Sichon	$Q_{FS}=27,1$ $Q_{MV}=82,9$ > Q_{20} proche Q_{50}	CATNAT à Arronnes et à Ferrières sur Sichon (03) Inondations dans la zone du Chambon : 10cm dans la maison de l'enfance et l'accès à la salle des fêtes 10 bâtiments impactés à Arronnes et un élevage piscicole à Ferrières-sur-Sichon
	Jolan	$Q_C=37,2$ > Q_{20}	10cm rues des Champs, du Jolan Brûlé et de la Perception à Cusset
	Durolle	-	-
8 août 2013	Sichon	$Q_{MV}=47,6$	-
	Jolan	$Q_C=53,3$ proche de Q_{100}	CATNAT à Cusset Inondations rues de l'Industrie, P. Simonard et impasse Jolan brûlé, une quarantaine de pavillons, trois entreprises et un entrepôt ont été touchés
	Durolle	-	-
28-29 mai 2016	Sichon-Jolan	$Q_{MV}=39,1$ $Q_C=23,3$ proche de Q_5	-

Annexe V : Débits pour différentes périodes de retour pour le Sichon et le Jolan

	Q ₅ (m ³ /s)	Q ₁₀ (m ³ /s)	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₃₀ (m ³ /s)	Q ₅₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀₀ (m ³ /s)
Sichon à la station de Ferrières sur Sichon							
Banque Hydro	9 [8-12]	11 [9-15]	12 [10-18]	-	15 [12-21]	-	-
CATNAT [41]	-	6,4	-	-	-	-	-
Sichon à la station de Moulin-Vidot (Cusset) à l'amont de la confluence avec le Jolan							
Banque Hydro	43 [36-62]	52 [43-78]	60 [49-93]	-	-	-	-
CATNAT [41]	-	43	-	-	-	-	-
LRPC 1996 [21]	-	55	-	89	-	96	-
EGIS 2011 [18]	-	66	-	103	-	136	-
ANTEA 2014 [17]	39	47	63	72	83	98	148
Jolan à la station de Cusset							
LRPC 1996 [21]	-	26	-	43	-	62	-
EGIS 2011 [18]	-	27,5	-	45	-	69	-
Banque Hydro	25 [20-35]	31 [26-45]	38 [31-55]	-	46 [37-68]	-	-
SHYREG	-	29	-	41	-	59	113
ANTEA 2014 [17]	23	29	36	41	53	59	91
Confluence Sichon-Allier							
LRPC 1996 [21]	-	73	-	120	-	170	-
EGIS 2011 [18]	-	82	-	129	-	176	-
ANTEA 2014 [17]	55	66	89	103	119	142	217

En **gras**, valeurs retenues.

L'étude du LRPC calcule Q₁₀ par la méthode Crupédix et Q₃₀ et Q₁₀₀ grâce au Gradex. L'étude EGIS 2011 donne les débits issus du modèle pluie/débit SIREA transformant les pluies en débit par une méthode de type rationnelle sans donner plus de précisions sur le calcul effectué. Les résultats donnés par la Banque Hydro sont issus d'un ajustement statistique de Gumbel sur les chroniques disponibles et sont présentés avec un intervalle de confiance de 95 %.

Annexe VI : Débits pour différentes périodes de retour de la Durolle (63)[23] [22]

	Étude	Chabreloche (Pont de la Goutte Noire)	Amont de la confluence avec la Semaine	Aval de la confluence avec la Semaine	Confluence avec la Dore
Q ₅ (m ³ /s)	Comparaison	12	22	33	47
Q ₁₀ (m ³ /s)	Méthode Crupedix	13	23	34	47
	Abaques SOGREAH	17	31	53	70
	Comparaison	15	29	43	60
Q ₂₀ (m ³ /s)	Comparaison	26	46	66	86
Q ₅₀ (m ³ /s)	Comparaison	40	68	95	121
Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Comparaison	51	85	118	146
Q ₂₀₀ (m ³ /s)	Comparaison	62	101	140	172
Q ₅₀₀ (m ³ /s)	Comparaison	76	123	170	206

En **gras**, valeurs retenues

La méthode de comparaison avec d'autres bassins versants compare les débits décennaux d'autres bassins versants proches géographiquement et ayant des comportements et des superficies proches. La moyenne de ces débits rapportés à la surface du bassin versant et multiplié par la surface du bassin versant de la Durolle donne une estimation de son débit décennal. Elle s'effectue ici à partir des valeurs de débit des bassins de la Besbre, le Couzon et la Faye [23][22].

La méthode Crupedix utilise la formule suivante : $Q_{10} = R \times S^{0,8} \times \left(\frac{P_{10}}{80}\right)^2$

Avec Q₁₀ le débit décennal en m³/s avec R le coefficient régional choisi égal à 1, S la surface en km² et P₁₀ la pluie décennale journalière en mm de l'ordre de 70mm.

Les abaques SOGREAH ont été utilisées dans ces études en prenant en compte une pluie journalière décennale de 70mm et un sol de perméabilité moyenne à faible et en sachant que les limites de validité sont atteintes pour les bassins versants de plus de 100 km².

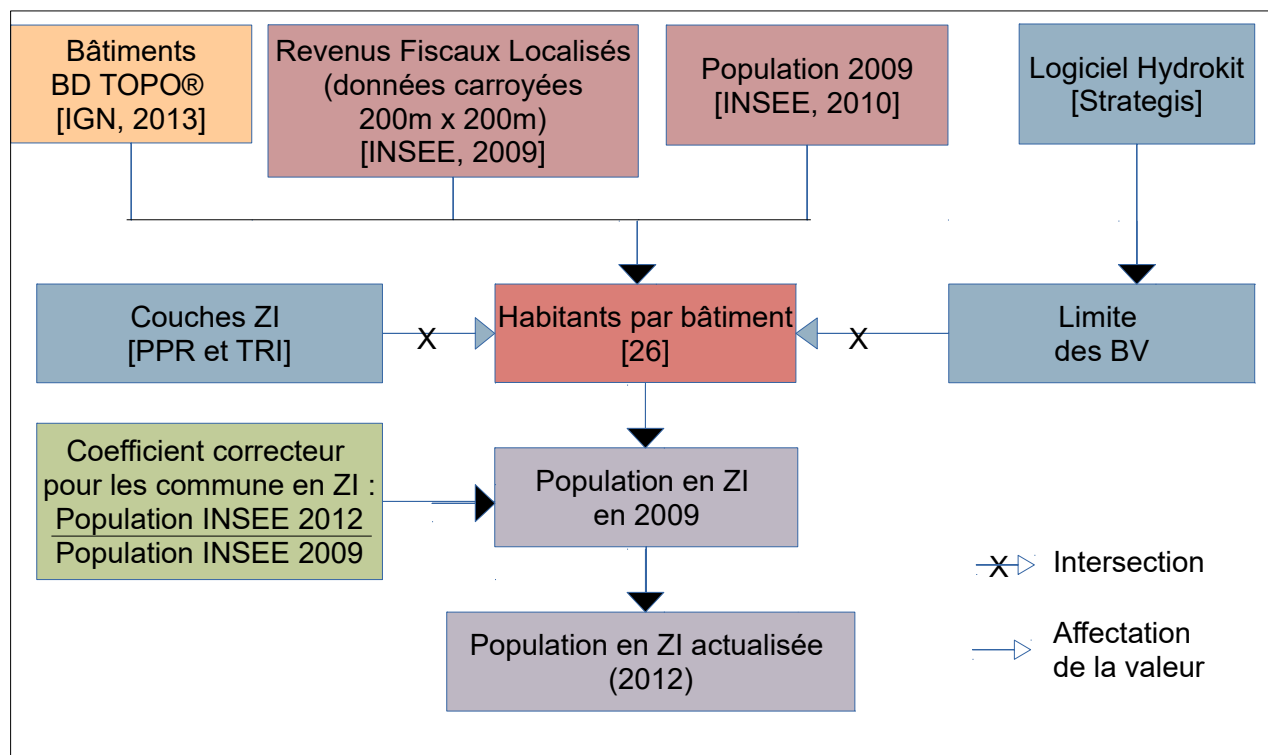
Annexe VII : Incertitudes et commentaires sur les tracés des couches de zones inondables issues d'études antérieures

	Incertitudes liées au support utilisé pour le tracé*	Précision de la hauteur d'eau et du débit utilisés pour le tracé	Commentaires	Incertitudes sur le tracé **
Sichon[17]	LIDAR avec une incertitude de 15 cm	Incertitude de 10 cm sur la ligne d'eau pour des crues fréquentes. La marge d'incertitude sur le débit dépend fortement de la période de retour choisie.	Les résultats donnés par cette étude sont fiables mais peuvent présenter une marge d'incertitude assez élevée pour l'utilisation de fortes périodes de retour à cause de l'insuffisance de chroniques de données (15 ans).	15 m
Jolan[17]				10 m
Couze-Chambon [38]	Cartes au 1/10000ème avec zoom au 1/2500ème en zone urbaine, l'incertitude sur le trait est de 10 m sur la plupart du BV et de 2,5 m en zone urbaine.	Le débit utilisé est surestimé, (à Coudes, la zone d'aléa fort mesure à elle seule 160 m de large et représente donc un débit d'au moins 160 m ³ /s).	Un aléa faible n'a été défini qu'au niveau de Neschers et de Coudes. Le tracé reprend des enveloppes de crue anciennes et moins précises que ce qui peut exister actuellement. L'enveloppe de ZI est surestimée.	20 m
Couze-Pavin	Fond de plan cadastral au 1/5000ème, l'incertitude sur le trait est de 5 m.	-	Les couches d'aléa sont disjointes par endroits, les aléas moyen et fort sont confondus entre St-Diéry et Perrier et aucun aléa faible n'a été défini lorsque la vallée devient étroite.	15 m
Durolle	Cartes au 1/5000ème, l'incertitude sur le trait est donc de 5m.	Hauteurs d'eau très fortement surestimées mais ayant peu d'influence sur le tracé de ZI car la vallée est étroite et encaissée.	La majorité des habitations est hors d'eau sur les hauteurs mais proche à vol d'oiseau de la Durolle. Une incertitude élevée sur le tracé surestimerait donc les incertitudes sur la population en ZI.	5m

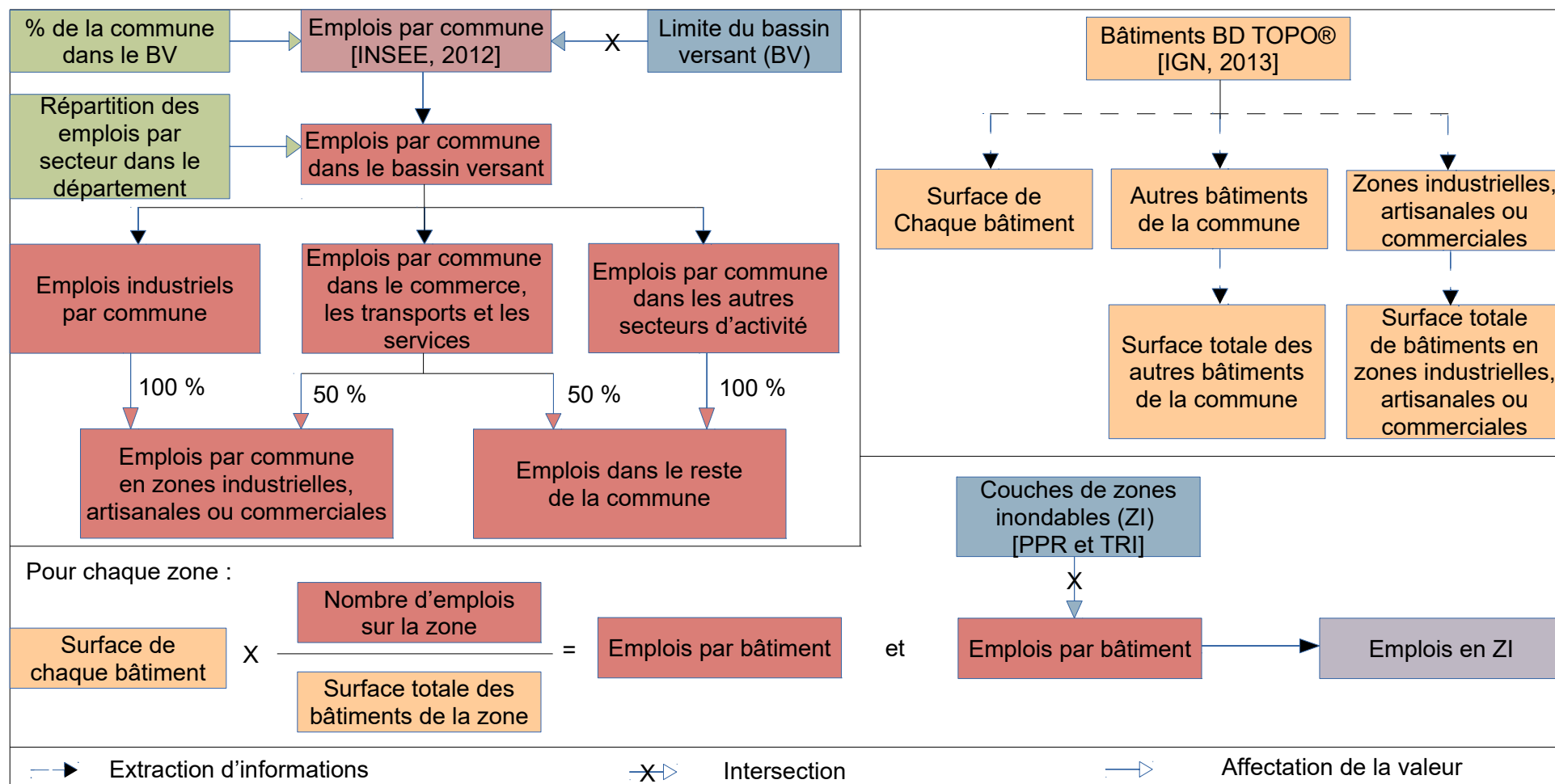
* L'incertitude sur le trait est obtenue en multipliant l'échelle par la largeur d'un trait (1 mm)

** Le tracé réalisé à l'amont des BV lorsqu'il n'existait pas dans les études est très imprécis. Néanmoins, cette population restant très faible par rapport à l'aval, prendre une valeur d'incertitude sur le tracé élevée à cause de l'amont du BV conduirait à surestimer très fortement les incertitudes. Le choix de l'incertitude pour le BV ne considérera donc que les incertitudes sur l'aval où se concentrent les enjeux.

Annexe VIII : Méthode d'obtention de la population en ZI



Annexe IX : Méthode d'obtention du nombre d'emplois en ZI



Annexe X : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par le Sichon et le Jolan[27][18]

Commune	Infrastructures de gestion de crise	Écoles	Zones d'hébergement	Autres	Exploitations agricoles
Le Mayet-de-Montagne	D62*	-	-	-	Champs
Nizerolles	D121*	-	-	-	Champs et bâtiments
Isserpent	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Saint-Christophe	D208*	-	-	-	Champs
Saint-Etienne-de-Vicq	-	-	-	-	Champs
Lavoine	D422*	-	-	-	Champs et bâtiments
Ferrières-sur-Sichon	Mairie, D995, D178, D122*	-	1 camping	STEP	Champs et bâtiments, 2 piscicultures
Lachaux	-	-	-	-	-
Arronnes	Mairie, D995, D121	École primaire	-	-	Champs et bâtiments
La Chapelle	D995, D421, D121*	-	-	-	Champs et bâtiments
Molles	D995, D508*	-	-	-	Champs et bâtiments
Busset	D995*	-	-	-	Champs et bâtiments
Le Vernet	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Cusset	D995, D906B, D508, D2209, D186, D175*	-	-	Nombreuses entreprises, ICPE Granulats Bourgogne Auvergne	Champs et bâtiments
Vichy	Tronçons de voie ferrée traversant ou longeant le Sichon*	-	-	-	-

*les infrastructures routières et ferroviaires présentées sont en ZI mais ne sont pas forcément inondables, certaines d'entre elles étant en remblai ou protégées par des digues

Annexe XI : Population et nombre d'emplois en ZI pour une crue centennale

Couze-Pavin	Population en ZI	Emplois en ZI	Sichon	Population en ZI	Emplois en ZI
Besse-et-Saint-Anastaise	90±10	140±10	Lavoine	0±1	0±1
Saint-Pierre-Colamine	26±2	3±1	Ferrières-sur-Sichon	117±4	18±2
Saint-Diéry	32±4	6±1	Lachaux	0±1	0±1
Saurier	59±6	5±1	Arronnes	85±7	7±1
Saint-Floret	71±2	12±1	La Chapelle	17±5	2±1
Saint-Vincent	50±5	2±1	Molles	1±1	1±1
Saint-Cirgues-sur-Couze	41±7	2±1	Busset	1±1	1±1
Chidrac	8±3	1±1	Le Vernet	2±1	1±1
Meilhaud	66±7	3±1	Cusset	270±70	260±30
Perrier	24±8	1±1	Vichy	570±70	180±20
Issoire	300±60	71±7			
Total	800±100	240±20	Total	1100±100	470±50
Durolle	Population en ZI	Emplois en ZI	Jolan	Population en ZI	Emplois en ZI
Noirétable	20±4	10±1	Le Mayet de Montagne	9±1	0±1
Cervièrès	2±1	1±1	Nizerolles	0±1	0±1
Les Salles	10±2	5±1	La Chapelle	0±1	0±1
Arconsat	1±1	0±1	Molles	6±2	1±1
Chabreloche	29±3	6±1	Isserpent	2±1	1±1
Celles sur Durolle	43±3	50±5	Saint-Christophe	0±1	0±1
La Monnerie-le-Montel	110±20	80±8	Saint Etienne de Vicq	0±1	0±1
Thiers	340±40	490±50	Cusset	220±30	150±10
Total	550±60	620±60	Total	240±40	150±10
Couze-Chambon	Population en ZI	Emplois en ZI			
Chambon sur Lac	122±5	24±2			
Murol	61±4	20±2			
Saint-Nectaire	36±3	9±1			
Verrières	1±1	0±1			
Grandeyrolles	1±1	1±1			
Montaigut le blanc	45±7	4±1			
Champeix	750±40	100±10			
Neschers	30±10	1±1			
Coudes	100±20	21±2			
Total	1200±100	180±20			

Annexe XII : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable ou en limite de ZI par la Couze-Pavin [20] [19]

Commune	Infrastructures de gestion de crise	Écoles	Zones d'hébergement	Autres	Exploitations agricoles
Besse et St-Anastaise	D978, D5*	-	-	2 ICPE : VILLETOUR et Cie des Fromages et Richesmots	-
St-Pierre-Colamine	Caserne de pompiers, D619*	<u>École primaire</u>	-	-	Champs et bâtiments
St-Diéry	D978, D621*	-	-	STEP	Champs et bâtiments
Saurier	Mairie, D621, D26*	École primaire	Camping de la Colombière et hôtel Magne	STEP	Champs et bâtiments
St-Floret	D28, D26*	-	<u>Hôtel le Dristan</u>	-	-
St-Vincent	D629*, <u>mairie</u>	<u>École primaire</u>	-	STEP	Champs et bâtiments
St-Cirgues sur Couze	D620*, <u>mairie</u>	-	-	-	-
Chidrac	D620, D26*, <u>caserne de pompiers</u>	-	-	Moulin et <u>STEP</u>	-
Meilhaud	D23*, <u>caserne de pompiers</u>	-	-	STEP	Champs et bâtiments
Perrier	-	<u>École primaire</u>	Camping des grottes	-	Champs et bâtiments
Issoire	D996, D716, D716A*, <u>sous-préfecture</u>	École primaire, collège et lycée Sévigné Saint-Louis	-	ICPE SICTOM Issoire-Brioude	Champs et bâtiments

*les infrastructures routières et ferroviaires présentées sont en ZI mais ne sont pas forcément inondables, certaines d'entre elles étant en remblai ou protégées par des digues

Annexe XIII : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par la Couze-Chambon [38] [25]

Commune	Infrastructures de gestion de crise	Écoles	Zones d'hébergement	Autres	Exploitations agricoles
Chambon sur Lac	Caserne des pompiers, D996, D637*, <u>mairie</u>	École primaire	3+1 campings et 1 gîte	Plage de Varenne Maison des associations	Champs et bâtiments
Murol	D996*	-	2 hôtels, <u>1 camping</u> , <u>1 hôtel</u>	STEP et plage	Champs
St-Nectaire	D996, D642, D622, D150*	-	1 chambre d'hôtes et 1 camping	-	Champs et élevages piscicoles
Verrières	-	-	-	Station d'épuration (STEP) Usine hydroélectrique	Champs
Grandeyrolles	D978*	-	<u>Hôtel le Rivalet</u>	-	Champs
Montaigut le Blanc	Mairie, D996, D71*	-	1 camping	STEP et salle des fêtes	Champs
Champeix	Mairie, gendarmerie, D996, D978, D630, D28, D229*	École primaire, <u>école maternelle</u>	1 gîte	STEP, supermarché, zone commerciale, locaux d'entreprises et l'église	-
Neschers	D229*	-	-	2 moulins	Champs
Coudes	D797*	-	1 chambre d'hôtes	-	Champs

*les infrastructures routières et ferroviaires présentées sont en ZI mais ne sont pas forcément inondables, certaines d'entre elles étant en remblai ou protégées par des digues

Annexe XIV : Infrastructures, bâtiments publics et activités en zone inondable par la Durolle [22] [23]

Commune	Infrastructures de gestion de crise	Écoles	Zones d'hébergement	Autres	Exploitations agricoles
Noirétable	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Cervières	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Les Salles	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Arconsat	-	-	-	-	Champs et bâtiments
Chabreloche	D86, D2089*	-	-	Usines, STEP, <u>Gare</u>	Champs et bâtiments
Celles sur Durolle	D7, D323, D2089*	-	-	Entreprises de la zone industrielle	Champs et bâtiments
La Monnerie-le-Montel	D320, D323, D2089*	-	-	Ateliers et commerces aux lieux-dits les Forges et la Grande-Roulière	-
Thiers	D906, D45, D45B, D320, D2089 et D102*	École maternelle du Moûtier	1 hôtel et 1 gîte	Nombreuses entreprises, déchetterie, barrage de Château-Gaillard-Membrun	Élevage (ICPE GAEC des prés)

*les infrastructures routières et ferroviaires présentées sont en ZI mais ne sont pas forcément inondables, certaines d'entre elles étant en remblai ou protégées par des digues

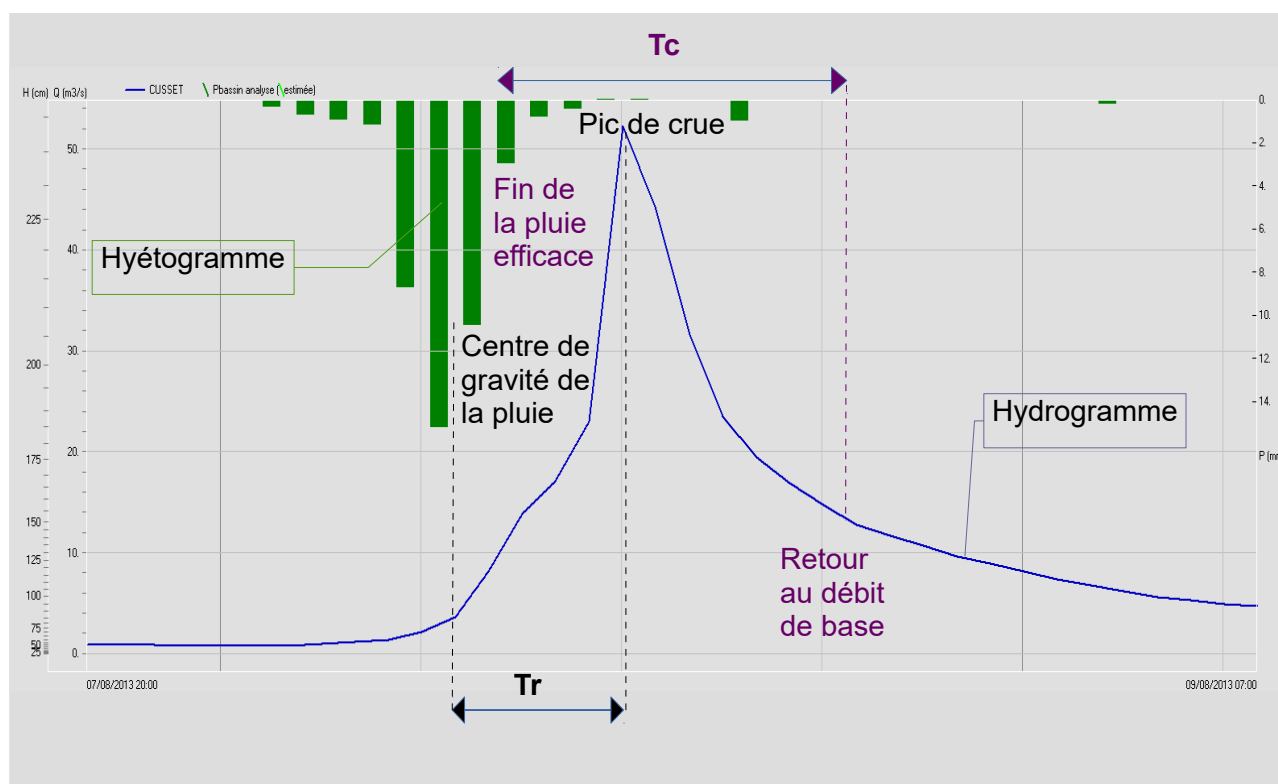
Annexe XV : Formules du temps de concentration et limites de validité [42], [43] et [44]

Formule	Expression	Validité
Ventura	$tc = 7,63 \times \sqrt{\frac{S}{P}}$	Varie selon les auteurs : BV à pente faible BV > 10 km ² ou 1 < BV < 20 km ²
Passini/Turazza	$tc = \frac{6,48 \times (L \times S)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{P}}$	BV ruraux > 40 km ²
Ventura-Passini	$TC = \frac{\beta \times (L \times S)^{\frac{1}{3}}}{\sqrt{P}}$ avec $\beta = \frac{1}{C^{\frac{5}{3}} \times a^{\frac{2}{3}}}$	BV ruraux < 400 km ²
Giandotti (1934)	$TC = \frac{4 \times \sqrt{S} + 1,5 \times L}{0,8 \times \sqrt{H}}$	Varie selon les auteurs : BV ruraux 500 < BV < 700 km ² ou 170 < BV < 70 000 km ²
Kirpich (1940)	$tc = \frac{0,0195 \times l_0^{0,77}}{P^{0,385}}$	BV urbain 0,4 < BV < 81 ha
SOGREAH	$tc = \frac{0,9 \times s^{0,35}}{C^{0,35} \times \sqrt{P}}$	BV semi-ruraux
Espagnole	$TC = 0,3 \times \left(\frac{L}{P^{0,25}}\right)^{0,77}$?
Dujardin	$tc = \frac{1,78 \times s^{0,35}}{C^{0,2} \times P^{0,4}}$?
Johnstone et Cross (1949)	$TC = 5,66 \cdot 10^{-3} \times \left(\frac{l_0}{P}\right)^{0,5}$	64 < BV < 4 200 km ²
Bressand-Golossoff (1995)	$tc = \frac{1000 \times L}{60 \times V}$ V la vitesse en m/s telle que si P < 0,01, V = 1 ; si 0,01 < P < 0,1, V = (100P + 8)/9 ; et si P > 0,1, V = 2	BV à réponse rapide de type cévenol ou du Gard
Méthode des vitesses	$TC = \frac{L}{3,6 \times V}$ Avec V vitesse en m/s dépendant de la pente P et de la nature de l'impluvium	Formule physique
Richards	$\frac{TC^3}{TC+1} = \frac{9,81 \times K \times L^2}{CR \times P \times k}$ avec $R = i \times (1 + TC)$ avec $i = a \times (60 \times TC)^{-b}$ et avec $K = f(CR)$ donné par une abaque	Formule implicite
SCS (1975)	$TC = \frac{0,023 \times L^{0,8} \times ((1000/CN) - 9)^{0,7}}{P^{0,5}}$	BV < 2000 acres soit environ 8 km ²

Avec : tc et TC : temps de concentration (min) et (h)
S et s : surface du bassin versant (km²) et (ha)
L et l₀ : longueur du plus long talweg (km) et (m)
H : dénivelé du plus long talweg (altitude maximale du BV - altitude de l'exutoire) (m)
P : pente moyenne du plus long talweg (m/m)
C : coefficient de ruissellement

Annexe XVI : Méthode d'obtention et distribution des temps de réponse obtenus par lecture graphique grâce au logiciel SACHA

Hydrogramme et hyétogramme de la crue du Jolan à Cusset (03) le 7 août 2013 et détermination graphique des temps de réponse et de concentration



	Nombre d'événements	Temps de réponse en h			
		Moyenne	1 ^{er} décile (10%*)	Médiane (50%*)	9 ^e décile (90%*)
Sichon (Moulin-Vidot)	28	6,1	4,1	6,2	8,0
Jolan (Cusset)	22	5,3	3,7	5,0	7,6
Couze-Pavin (Saint-Floret)	26	5,4	3,6	5,3	7,1
Couze-Chambon (Champeix)	31	4,8	3,5	4,7	6,1

* pourcentage des valeurs inférieures à celle-ci

Annexe XVII : Stations hydrométriques des bassins versants étudiés [Banque Hydro]

Cours d'eau surveillé	Code HYDRO 2	Localisation	Superficie du bassin versant en km ²	Date de début des mesures
Sichon	K3053100	Ferrières-sur-Sichon (03)	27	1994
	K3060310	Moulin-Vidot à Cusset (03)	159	1997
Jolan	K3074010	Cusset (03)	64	1994
Couze-Chambon	K2674010	Champeix (63)	159	Débit : 1961 Hauteur d'eau : 1951
	K2674030	Chambon-sur-Lac (63) [amont Lac]	31,5	1992
	K2674040	Murol (63) [aval Lac]	36	1992
Couze-Pavin	K2654010	St-Floret (63)	216	Débit : 1946 Hauteur d'eau : 1951

Annexe XVIII : Coefficients pour l'obtention de la pluie de bassin respectivement par la méthode des polygones de Thiessen, la méthode hypsométrique et les valeurs retenues pour le calcul de la pluie de bassin

Cours d'eau	Sichon	Jolan	Couze-Pavin	Couze-Chambon
Station	Moulin-Vidot	Cusset	St-Floret	Champeix
Anzat le Luguet	-	-	0,03-0,10*	-
Besse	-	-	0,91-0,45-0,6	0,40-0,35-0,3
Col de la Loge	-	-	-	-
Courpière	-	-	-	-
Issoire	-	-	0,1	-
Le Mayet de Montagne	0,91-0,45-0,6	0,63-0,8-0,8	-	-
Mont-Dore	-	-	0,02-0,3-0,3	0,22-0,25-0,6
Noirétable	-	-	-	-
Plauzat	-	-	-	0,25-0,30-0,1
St-Just en Chevalet	0,00-0,20*	-	-	-
St-Nicolas des Biefs	0,02-0,15*	-	-	-
Vernines	-	-	-	0,12-0,10*
Vichy-Charmeil	0,07-0,20-0,4	0,37-0,2-0,2	-	-

*stations en dehors du bassin versant pouvant poser des problèmes de représentativité des pluies

La pluie de bassin (P_{bassin}) se calcule de la manière suivante par la méthode des polygones de Thiessen :

$$P_{bassin} = \frac{1}{A} \times \sum A_i \times P_i$$

Avec P_i la pluie au pluviomètre i , A_i l'aire du polygone de Thiessen rattaché à i en km^2 et A la superficie totale du bassin versant en km^2 .

Annexe XIX : Temps de concentration et temps de réponse en différents points des bassins versants du Sichon, du Jolan, de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durolle

	Superficie du BV (km ²)	Temps de concentration calculé (h)	Temps de réponse calculé (h)	Temps de concentration observé (h)	Temps de réponse observé (h)
Couze-Chambon					
Chambon sur Lac (station lac amont)	32	1,8±0,5	0,9±0,2	2,8±0,7*	1,4±0,2*
Chambon sur Lac (station lac aval)	37	2,4±0,8**	1,2±0,4**	**	**
Murol	38	2,4±0,5**	1,2±0,3**	**	**
St-Nectaire	91	4±1	2,1±0,6	7±2	3,2±0,6
Verrières	103	5±1	2,3±0,6	7±2	3,5±0,6
Grandeyrolles	115	5±1	2,6±0,7	8±2	3,9±0,7
Montaigut-le-blanc	149	6±2	2,9±0,8	9±2	4,4±0,8
Montaigut-le-blanc (station)	159	6±2	3,0±0,8	9±3*	4,6±0,9*
Champeix	174	6±2	3±1	9±3	5±1
Neschers	180	6±2	3±1	10±3	5±1
Coudes	192	7±3	4±1	11±4	5±1
Confluence avec l'Allier	195	7±3	4±1	11±4	6±1
Couze-Pavin					
Besse amont	17	3,2±0,8	1,6±0,4	4,3±0,6	2,3±0,4
Besse aval	22	3,3±0,8	1,7±0,4	4,5±0,5	2,3±0,4
St-Pierre-Colamine	26	3,3±0,7	1,7±0,4	4,4±0,5	2,3±0,4
St-Diéry	78	5±1	2,7±0,6	7,2±0,8	3,8±0,6
Saurier	200	6±2	3±1	9±2	5±1
St-Floret (station) -St Vincent	216	8±3	4±1	10±2*	5±1*
St-Cirgues-Chidrac	232	8±3	4±1	11±2	6±1
Meilhaud	241	9±3	4±2	12±2	6±1
Perrier	275	9±3	5±2	12±2	7±2
Issoire (confluence avec l'Allier)	288	10±4	5±2	14±3	7±2

*valeurs calculées à partir des chroniques pluie-débit disponibles

**valeurs non représentatives du fait de l'influence du lac Chambon

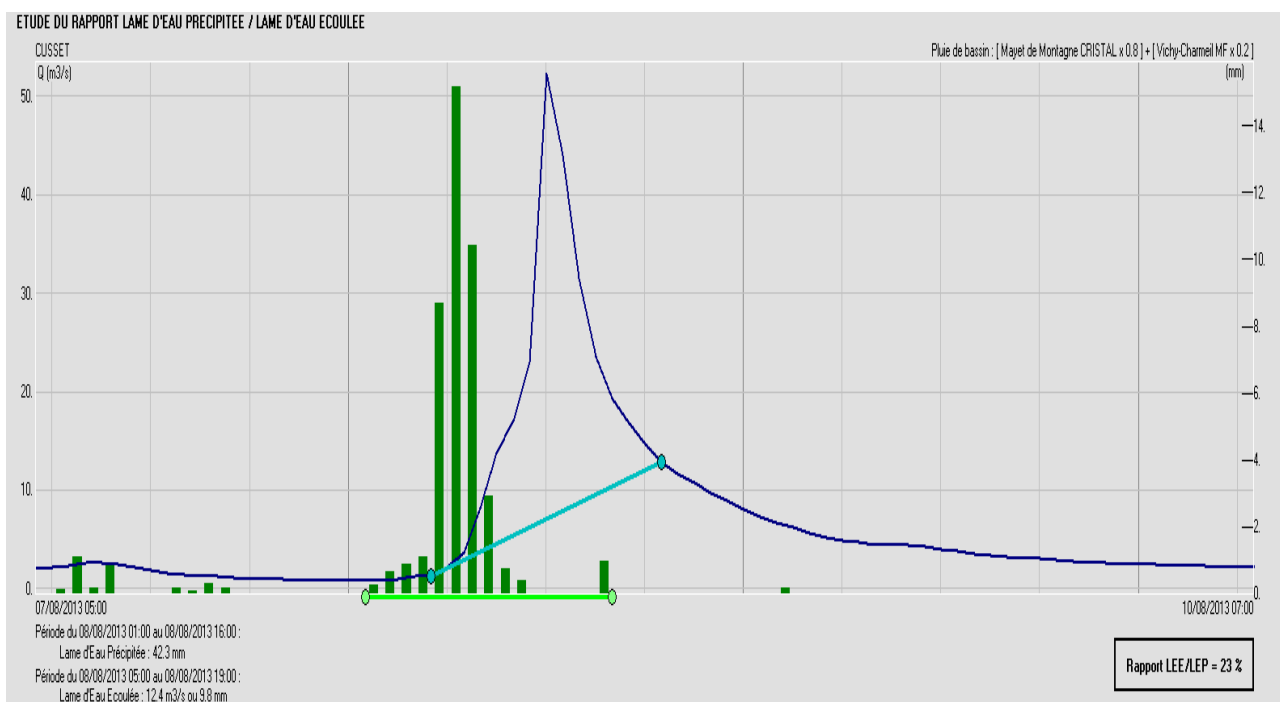
	Superficie du BV (km ²)	Temps de concentration calculé (h)	Temps de réponse calculé (h)	Temps de concentration observé (h)	Temps de réponse observé (h)
Sichon					
Ferrières-sur-Sichon (station)	27	2,4±0,5	1,2±0,2	3,3±0,5	1,8±0,3
Ferrières-sur-Sichon (le Moulin Piat)	63	4±1	2,0±0,5	6±1	3,1±0,7
Arronnes	108	5±1	2,7±0,7	8±2	4±1
La Chapelle (le Roc)	132	6±2	3,2±0,8	9±2	5±1
Busset	150	7±2	4±1	10±2	6±1
Cusset (station de Moulin-Vidot)	159	8±2	4±1	11±2*	6±2*
Confluence avec le Jolan	164	9±2	4±1	12±3	7±2
Vichy (confluence avec l'Allier)	234	9±3	4±2	12±3	7±2
Jolan					
La Chapelle	14	2,3±0,4	1,1±0,2	3,0±0,5	1,6±0,3
Molles	18	2,9±0,6	1,5±0,3	3,9±0,9	2,0±0,5
Saint Christophe	26	3,8±0,8	1,9±0,4	5±1	2,6±0,6
St-Étienne-de-Vicq	41	6±2	3,1±0,8	8±2	4±1
Cusset amont	56	7±2	3,5±0,9	9±3	5±1
Cusset (station)	63	8±2	4±1	10±3*	5±2*
Confluence avec le Sichon	64	8±2	4±1	10±3	5±2
Durolle					
Chabreloche (Brissay)	16	2,5±0,2	1,3±0,1	3,7±0,3	1,8±0,2
Chabreloche (le Pas du Pire)	53	4,7±0,8	2,3±0,4	7±1	3,4±0,6
Amont Semaine	73	5±1	2,6±0,7	7±2	4±1
Celles sur Durolle	115	6±2	3±1	9±3	4±2
La-Monnerie-le-Montel (future station)	116	6±2	3±1	9±3	4±2
Thiers	156	7±2	4±1	11±3	5±2
Confluence avec la Dore	172	8±3	4±1	12±4	6±2

*valeurs calculées à partir des chroniques pluie-débit disponibles

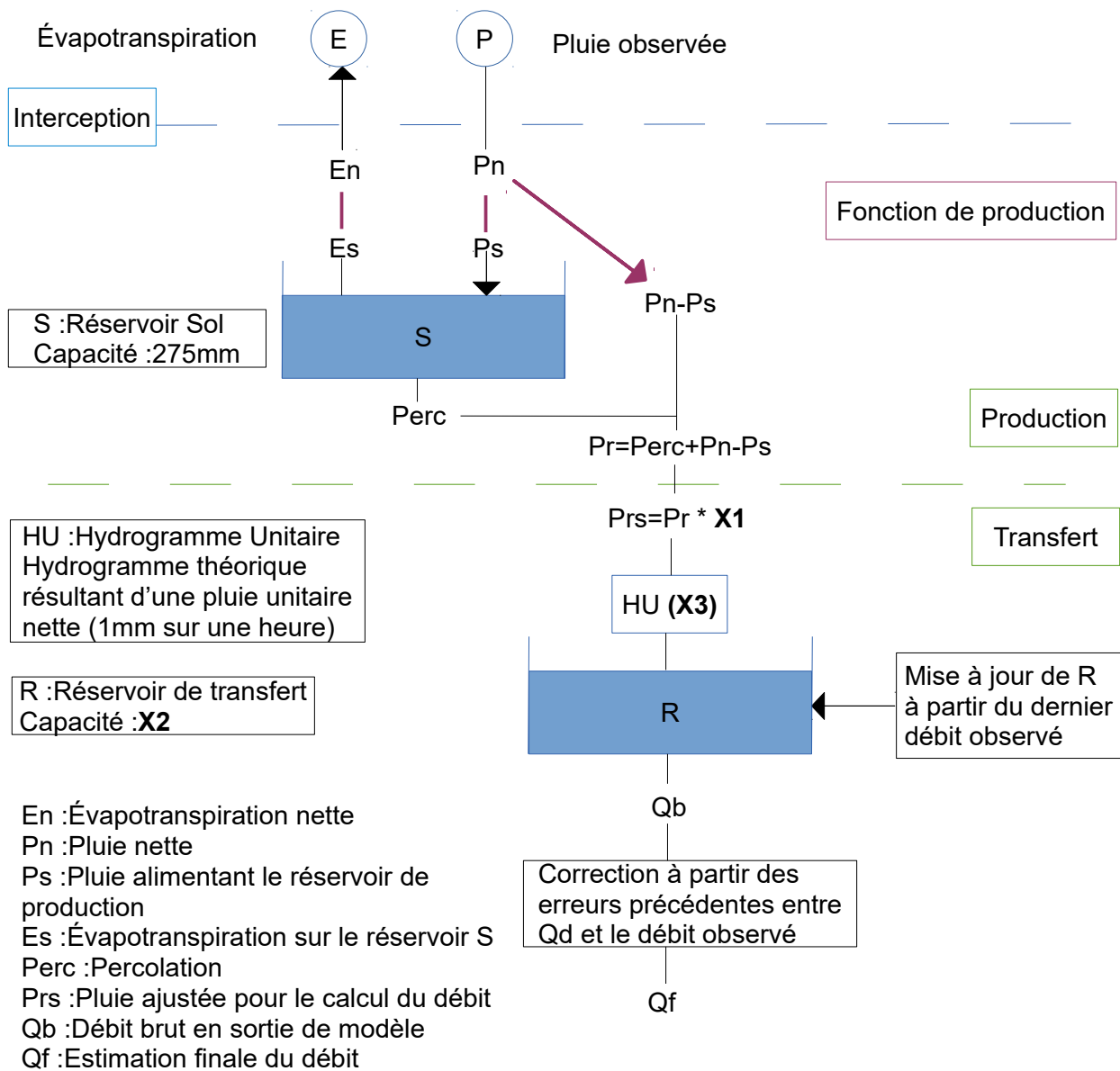
Annexe XX : Méthode de calcul du coefficient de ruissellement

Les Cr sont obtenus grâce au logiciel SACHA qui calcule la lame d'eau précipitée (LEP : cumul des précipitations sur la durée de la crue) et la lame d'eau écoulée (LEE : lame d'eau moyenne ruisselée sur le bassin versant). La LEE est issue du rapport entre le volume d'eau V compris entre le début de la montée de la crue et le retour au débit de base divisé par la surface du bassin versant.

Exemple de calcul à partir de l'hydrogramme de la crue du Jolan à Cusset le 8 août 2013



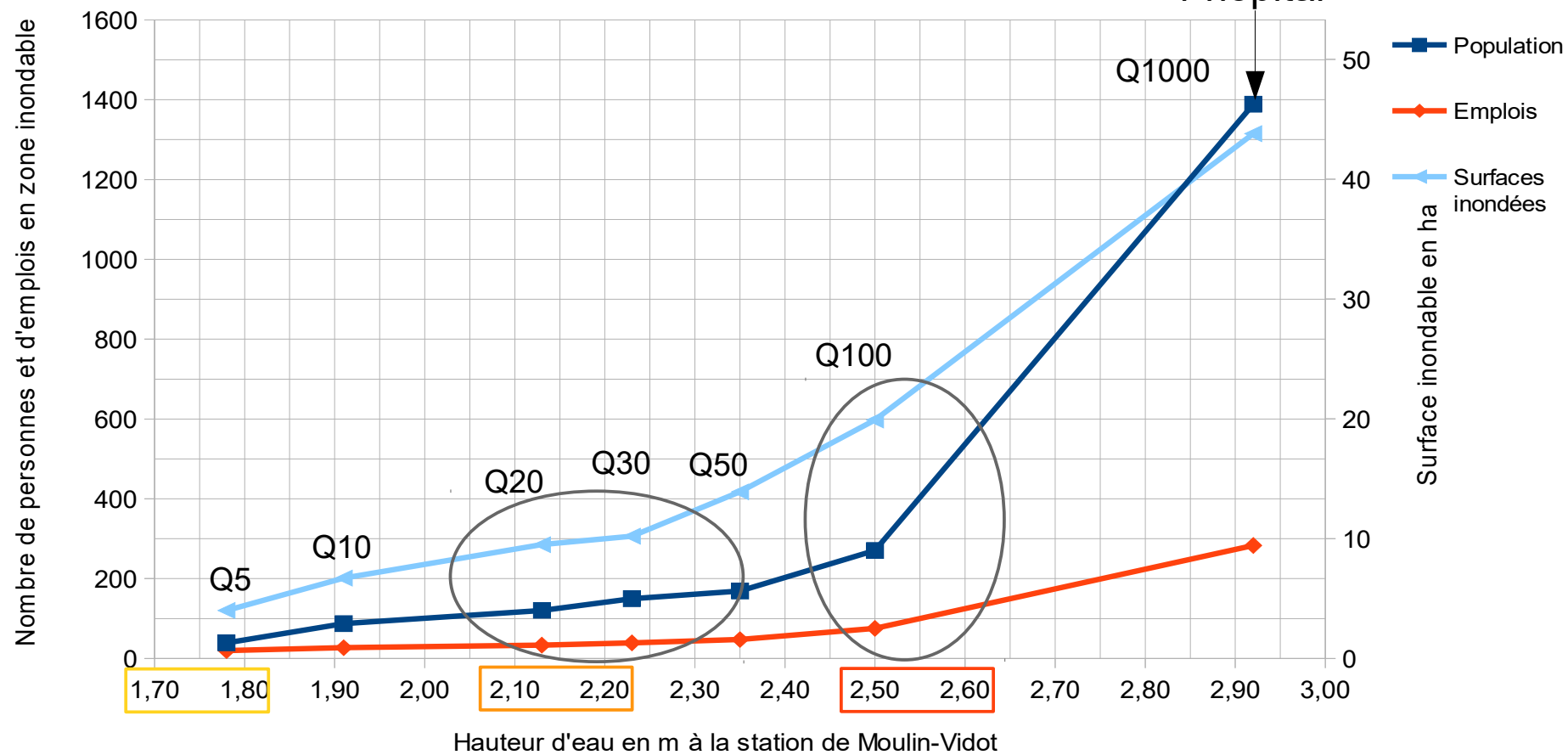
Annexe XXI : Schéma de fonctionnement du modèle GRP d'après [35] et [36]



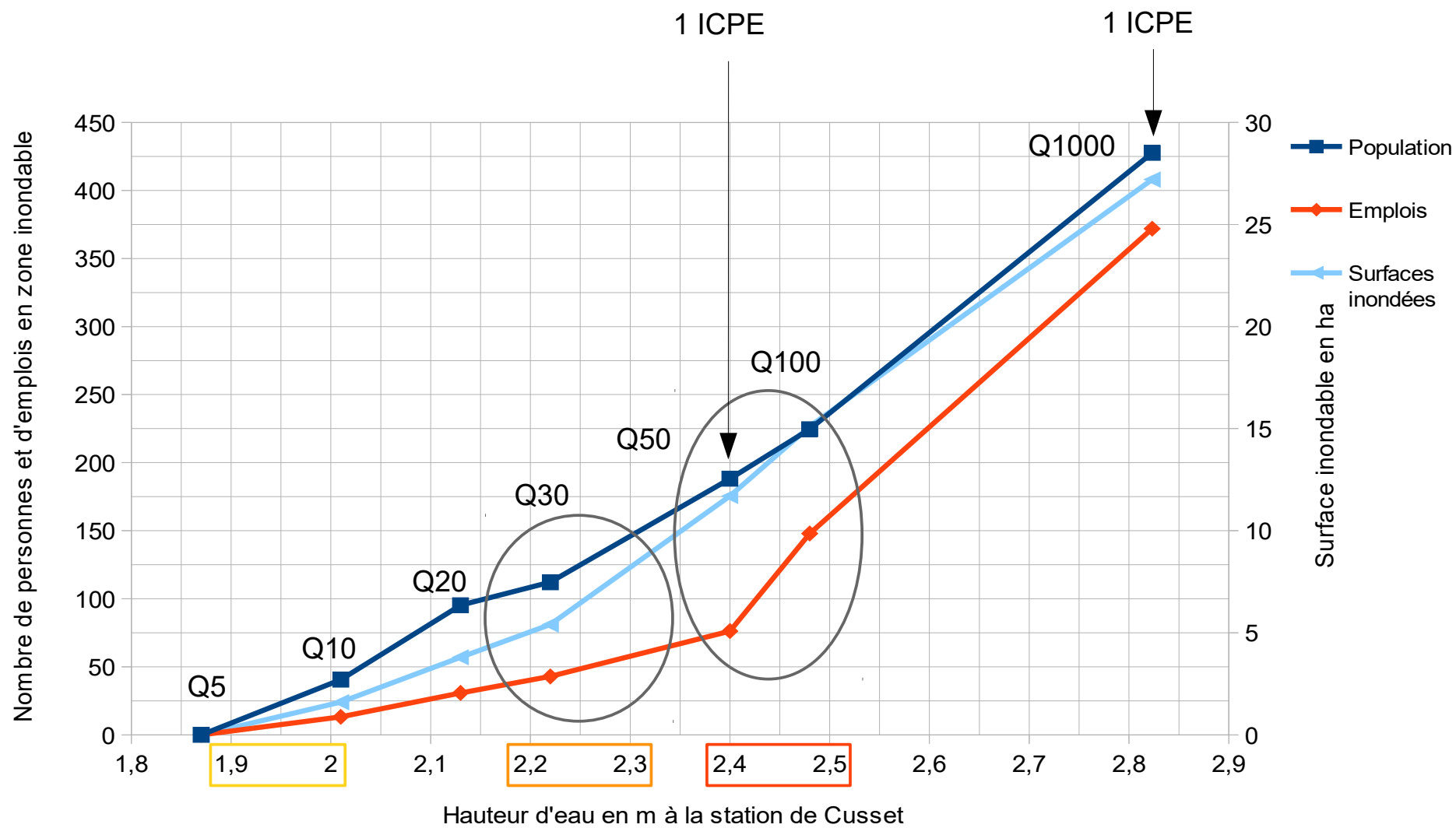
Annexe XXII : Détermination des niveaux de vigilance pour le Sichon et le Jolan

Sichon à l'amont de la confluence avec le Jolan

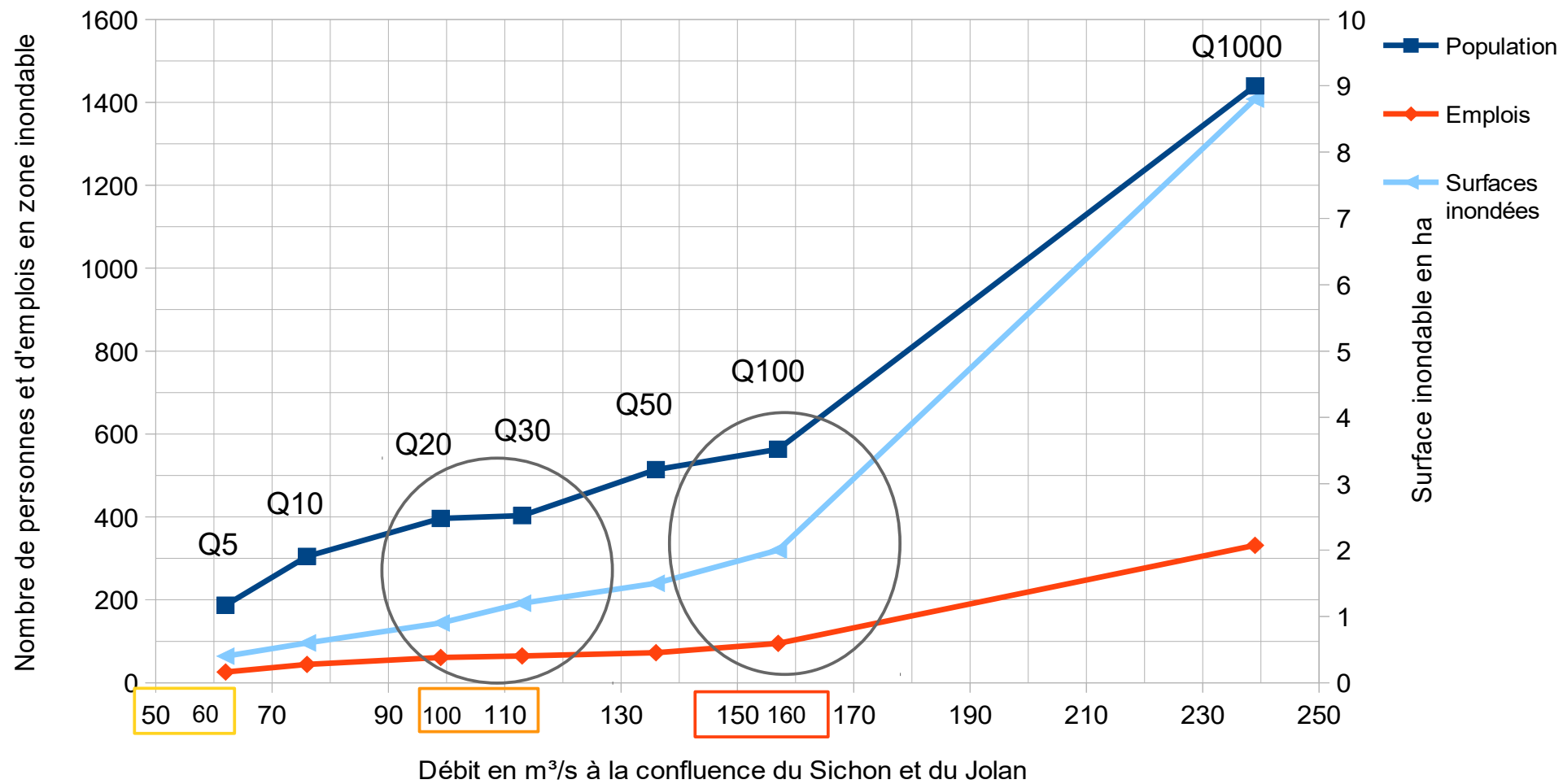
1 école
1 mairie
1 hôpital



Jolan à l'amont de la confluence avec le Sichon



Sichon à l'aval de la confluence



Annexe XXIII : Statistiques annuelles et saisonnières sur les valeurs d'humidité des sols (HU2)

	Minimum	Maximum	Moyenne	20 %	40 %	60 %	80 %
Sichon							
Hiver	41	59	51	50	51	52	53
Printemps	36	60	50	45	49	51	54
Été	33	55	41	38	40	42	45
Automne	33	60	49	47	49	51	52
Année	33	60	48	46	47	49	50
Jolan							
Hiver	43	60	54	53	53	54	55
Printemps	36	62	51	45	51	53	56
Été	35	57	42	39	40	42	45
Automne	35	62	51	48	50	53	54
Année	35	62	50	47	49	51	52
Couze-Chambon							
Hiver	47	70	58	56	57	58	60
Printemps	45	70	57	53	56	58	61
Été	41	64	49	46	47	49	52
Automne	40	70	57	54	56	58	59
Année	40	70	55	53	54	56	58
Couze-Pavin							
Hiver	47	69	57	55	56	57	59
Printemps	44	69	55	51	54	57	59
Été	40	63	48	45	46	48	51
Automne	39	70	56	53	55	57	59
Année	39	70	54	52	53	55	57

Annexe XXIV : Coefficients de la formule d'estimation du débit de pointe d'une crue pour les bassins versants étudiés

d jaune	0	2	4	6	8	10	12	15	20	25
Jolan	1,5.10 ⁷	1,4.10 ⁷	1,3.10 ⁷	1,1.10 ⁷	9,8.10 ⁶	7,7.10 ⁶	-	-	-	-
Sichon	91 447	85 497	79 509	73 477	67 398	61 268	55 078	-	-	-
Sichon intenses	36	35	33	31	29	26	-	-	-	-
Sichon seconds	73	64	55	46	36	27	-	-	-	-
Couze-Pavin	1 392	1 355	1 317	1 278	1 238	1 197	1 156	1 091	977	854
Couze-Chambon intense	75	71	67	63	59	55	51	-	-	-
Couze-Chambon	562	547	531	513	495	474	451	-	-	-

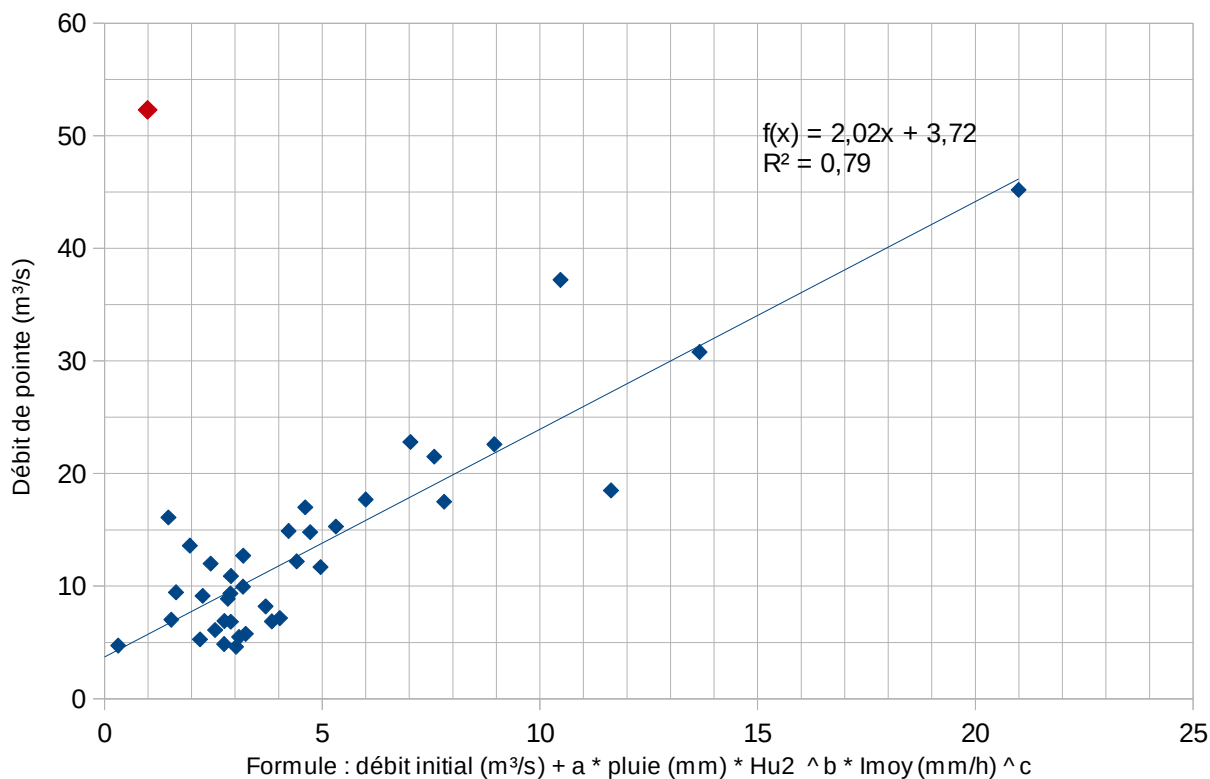
	a	A	b	B	c	a'	c'	e
Jolan	4,47.10 ⁻¹⁵	2,02	7,40	3,72	1,43	4,79.10 ⁻¹⁷	2,43	-3,05
Sichon	1,42.10 ⁻⁴	1,31	1,84	3,08	0,09	1,05.10 ⁻⁴	1,09	-1,68
Sichon intenses	0,24	0,88	3,55.10 ⁻¹³	24,58	1,64	1,31.10 ⁻³	2,64	-1,34.10 ⁻¹³
Sichon seconds	0,22	2,19	3,33.10 ⁻¹⁴	5,01	2,26.10 ⁻¹³	0,22	1,00	-3,33.10 ⁻¹⁴
Couze-Pavin	3,25.10 ⁻³	1,2	0,87	6,42	0,68	2,34.10 ⁻⁴	1,68	-0,51
Couze-Chambon intense	0,34	1,27	8,09.10 ⁻¹²	4,70	0,36	0,08	1,36	-5,93.10 ⁻¹²
Couze-Chambon	1,16.10 ⁻⁴	1,59	1,08	5,60	2,38	1,15.10 ⁻⁸	3,38	-0,32

Avec : $Q_{pointe} = A \times [Q_{base} + a \times P \times HU2^b \times I_{moy}^c] + B$, $Q_{pointe} = A \times [Q_{base} + a' \times P^{c'} \times HU2^b] + B$ et $P_{seuil} = d \times HU2^e$

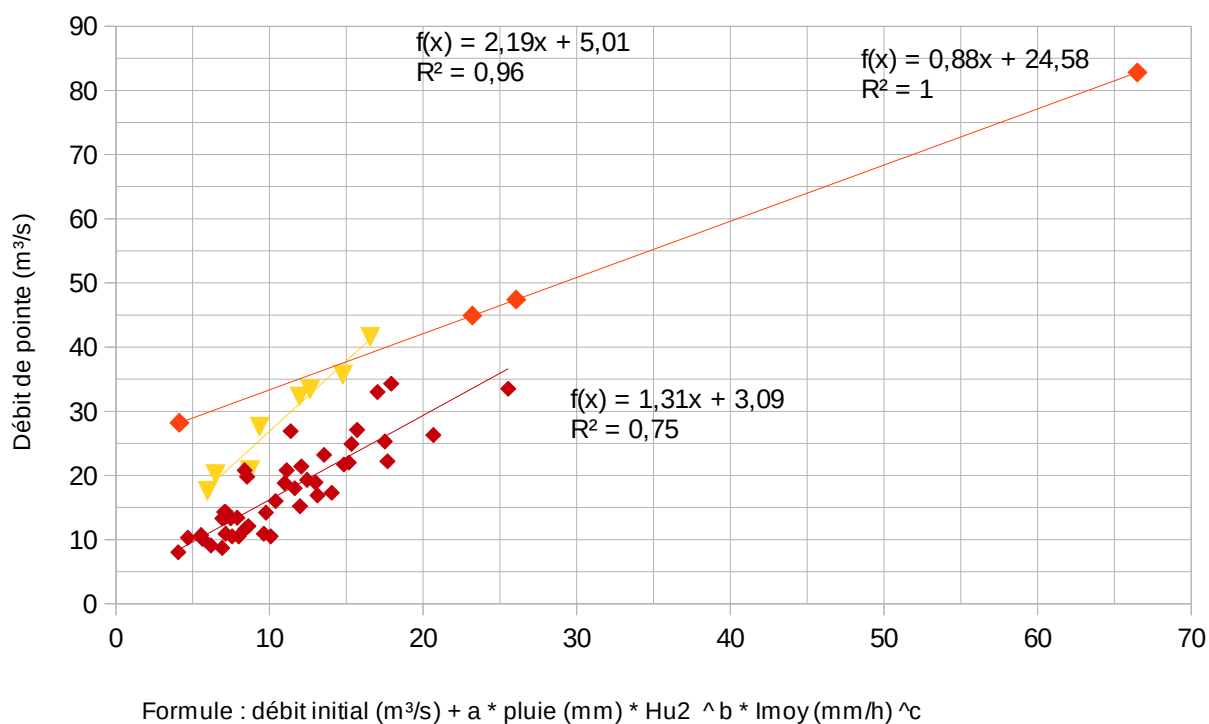
	a'	A	b	B	c'
Jolan	4,79.10 ⁻¹⁷	2,02	7,40	3,72	2,43
Sichon « normal »	1,05.10 ⁻⁴	1,31	1,84	3,08	1,09
Sichon événements intenses	1,31.10 ⁻³	0,88	3,55.10 ⁻¹³	24,58	2,64
Sichon seconds événements	0,22	2,19	3,33.10 ⁻¹⁴	5,01	1,00
Couze-Pavin	2,34.10 ⁻⁴	1,20	0,87	6,42	1,68
Couze-Chambon « normal »	1,15.10 ⁻⁸	1,59	1,08	5,60	3,38
Couze-Chambon événements intenses	0,08	1,27	8,09.10 ⁻¹²	4,70	1,36

Annexe XXV : Résultats de la détermination graphique des coefficients A et B des formules de vigilance et mise en évidence des différents comportements des bassins versants

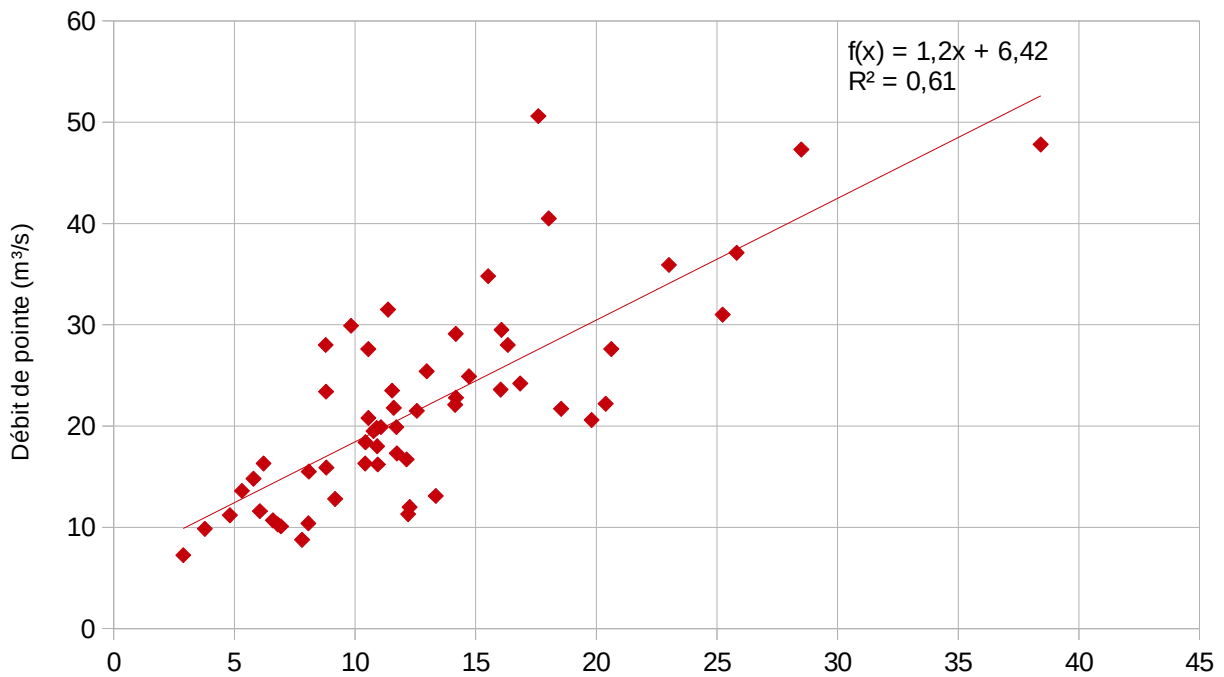
Jolan :



Sichon :

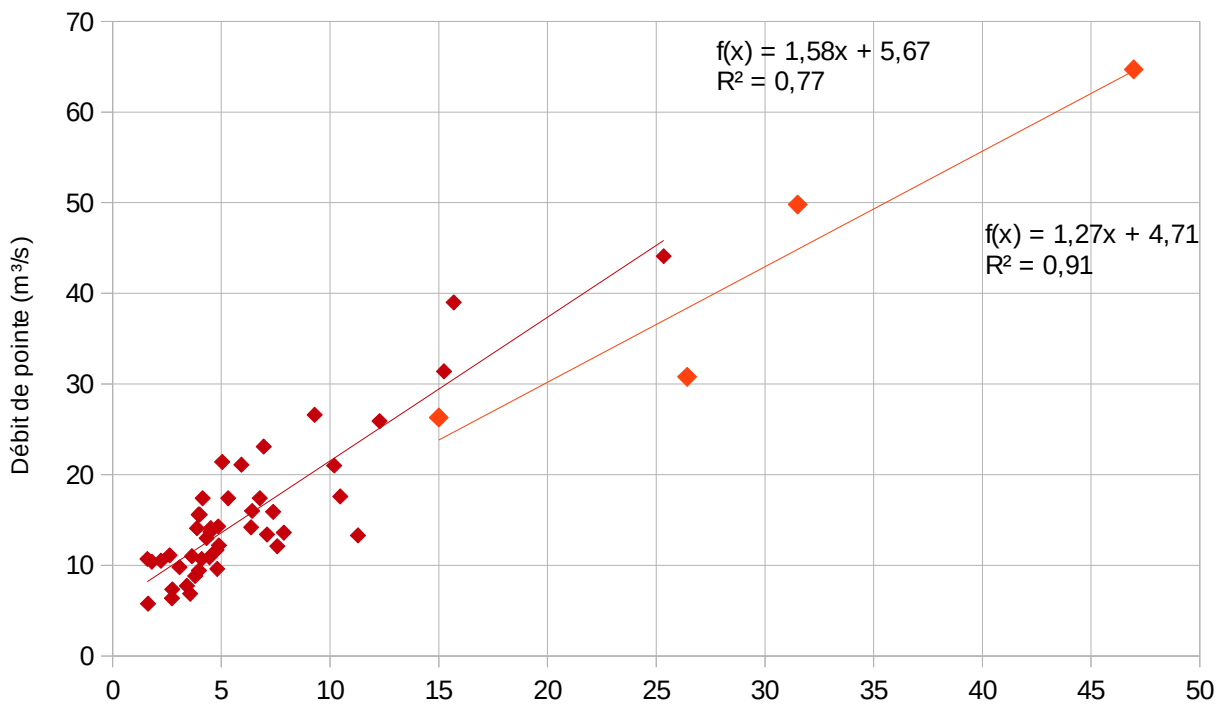


Couze-Pavin :



Formule : débit initial (m³/s) + a * pluie (mm) * Hu2 ^b * Imoy (mm/h) ^c

Couze-Chambon :



Formule : débit initial (m³/s) + a * pluie (mm) * Hu2 ^b * Imoy (mm/h) ^c

Annexe XXVI : Performances de différents calage du modèle GRP sur le Sichon et le Jolan (03)

			Eff	C _{2MP}	POD (%)	FAR (%)	CSI (%)
Sichon	(1)	SMN_RNA	0,478	0,31	34,4	57,7	23,4
		SMN_TAN	0,502	0,33	43,8	53,3	29,2
	(2)	SMN_RNA	0,431	0,27	35,3	62,5	22,2
		SMN_TAN	0,412	0,26	41,2	61,1	25,0
	(3)	SMN_RNA	0,495	0,33	50,0	25,0	42,9
		SMN_TAN	0,509	0,34	50,0	30,8	40,9
	(4)	SMN_RNA	0,530	0,36	48,1	25,7	41,3
		SMN_TAN	0,552	0,38	48,1	27,8	40,6
Jolan	(1)	SMN_RNA	0,477	0,31	37,5	18,2	34,6
		SMN_TAN	0,500	0,33	29,2	30,0	25,9
	(2)	SMN_RNA	0,386	0,24	41,7	0,0	41,7
		SMN_TAN	0,438	0,28	41,7	0,0	41,7
	(3)	SMN_RNA	0,522	0,35	37,9	10,7	36,2
		SMN_TAN	0,525	0,36	36,4	25,0	32,4
	(4)	SMN_RNA	0,510	0,34	39,4	13,3	37,1
		SMN_TAN	0,506	0,34	37,9	21,9	34,2

(1) HOR=6h, QCusset=24m³/s, Qmoulin-Vidot=34m³/s ;

Sichon : Pbassin=0,4*Vichy+0,6*Mayet et Jolan : Pbassin=0,2*Vichy+0,8*Mayet

(2) HOR=3h, QCusset=24m³/s, Qmoulin-Vidot=34m³/s ;

Sichon : Pbassin=0,4*Vichy+0,6*Mayet et Jolan : Pbassin=0,2*Vichy+0,8*Mayet

(3) HOR=6h, QCusset=15m³/s, Qmoulin-Vidot=30m³/s ;

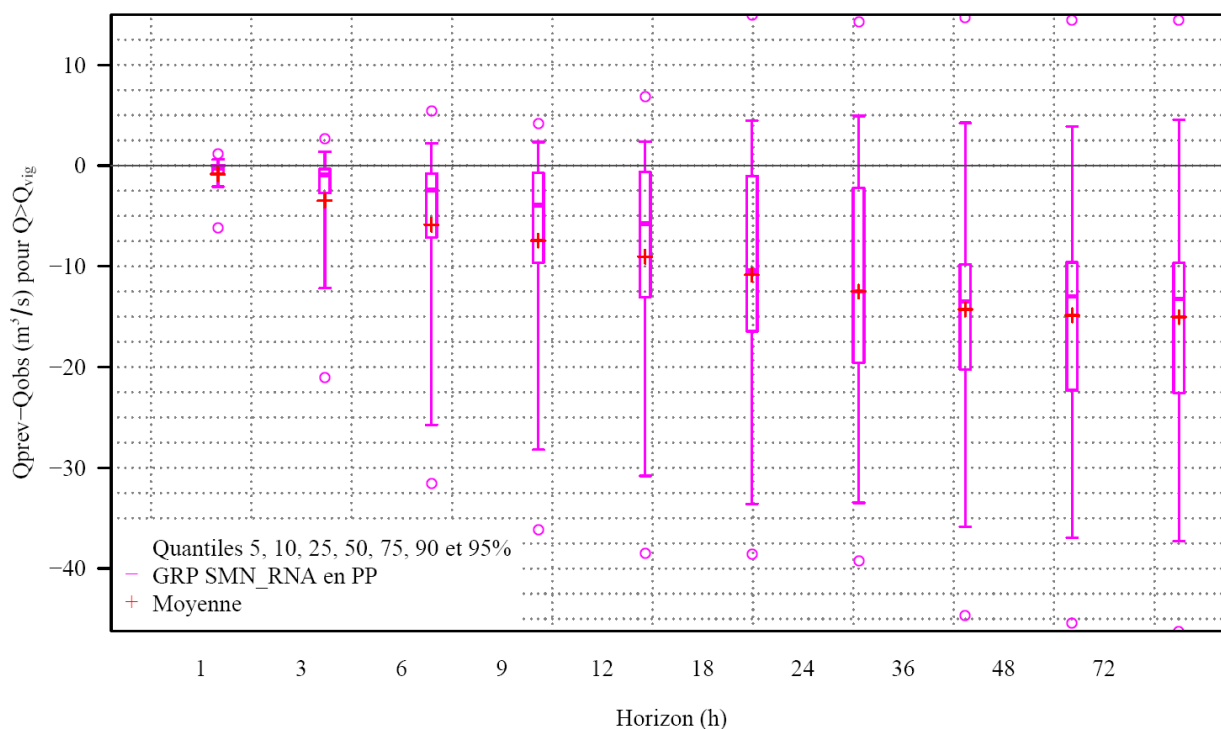
Sichon : Pbassin=0,4*Vichy+0,6*Mayet et Jolan : Pbassin=0,2*Vichy+0,8*Mayet

(4) HOR=6h, QCusset=15m³/s, Qmoulin-Vidot=30 m³/s, Sichon : Pbassin=0,2*Vichy+0,8*Mayet et Jolan : Pbassin=0,4*Vichy+0,6*Mayet

Annexe XXVII : Fiches de résultats et de performance des calages opérationnels retenus

K3060310 Le Sichon à Cusset [M. Vidot]		GRP SMN_RNA	
Chronique disponible	2000–2016	Q_{moy}	2.4 m ³ /s
Surface du bassin	159 km ²	Q_{95}	7.1 m ³ /s
Horizon de prévision utilisé pour le calage	6 h	$Q_{moy}(Q > Q_{95})$	10.9 m ³ /s
Calage effectué sur tous les débits			
Eff ($Q > Q_{vig}$, ref=modèle de persistance) 0.517			
Période :	2000–2016	Rout :	2149.64 mm CORR : 0.99 TB : 3.16 h
Détail des valeurs des paramètres sur les deux sous-périodes du calage			
Eff ($Q > Q_{vig}$, ref=modèle de persistance) 0.495		Temps de réaction estimé 3 h	
Sous période 1 :2000–2007	Rout : 2252.96 mm	CORR : 0.95	TB : 2.95 h
Sous période 2 :2008–2016	Rout : 1772.24 mm	CORR : 0.95	TB : 3.19 h

Tableau d'analyse de dépassement du seuil SPC de 30 m³/s à 6 h			
	Dépassement observé		Non-dépassement observé
Dépassement prévu	28	a	10
Non-dépassement prévu	26	c	142910
			$POD = \frac{a}{a+c} = 51.9$ % $FAR = \frac{b}{a+c} = 26.3$ % $CSI = \frac{a}{a+b+c} = 43.8$ %



K3074010 Le Jolan à Cusset

GRP SMN_RNA

Chronique disponible	2000–2016	Q_{moy}	0.8 m ³ /s
Surface du bassin	64 km ²	Q_{95}	2.5 m ³ /s
Horizon de prévision utilisé pour le calage	6 h	$Q_{moy} (Q > Q_{95})$	4.5 m ³ /s

Calage effectué sur tous les débits

Eff ($Q > Q_{vig}$, ref=modèle de persistance) **0.563**

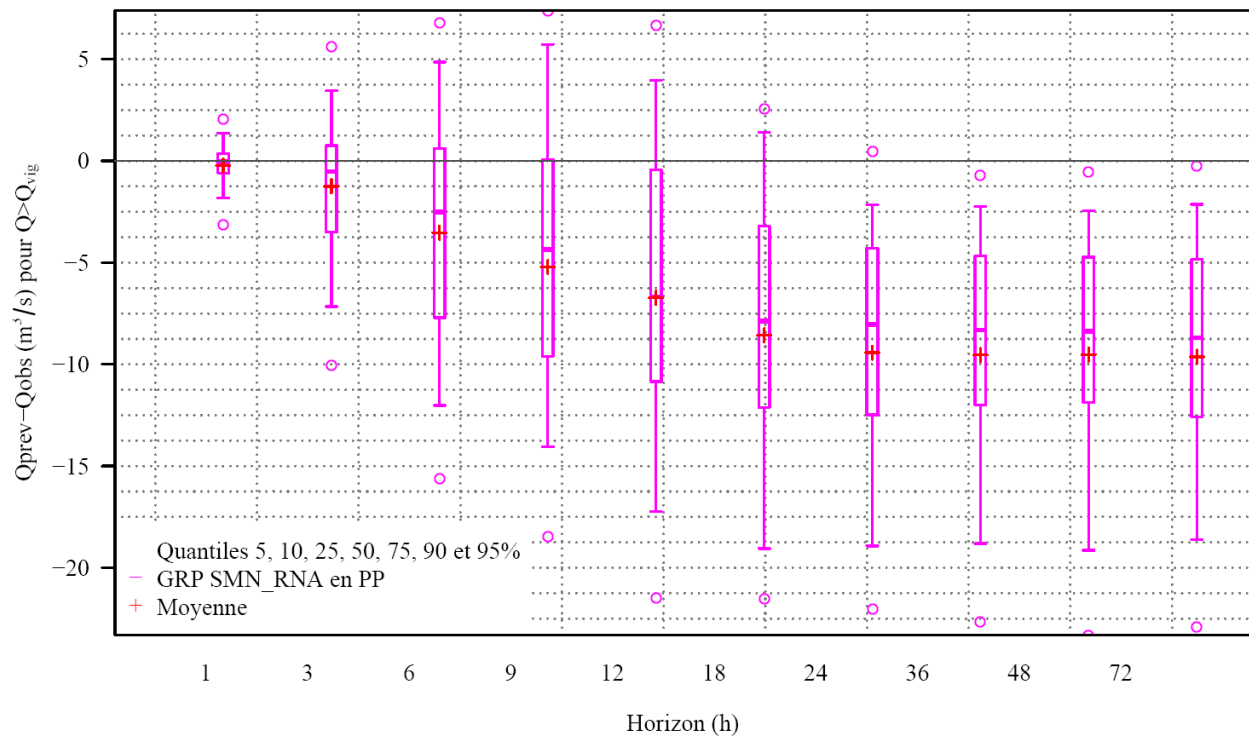
Période : 2000–2016 Rout : **1339.43** mm CORR : **0.84** TB : **5.58** h

Détail des valeurs des paramètres sur les deux sous-périodes du calage

Eff ($Q > Q_{vig}$, ref=modèle de persistance)	0.522	Temps de réaction estimé	6 h
Sous période 1 :2000–2007	Rout : 2174.51 mm	CORR : 0.91	TB : 5.51 h
Sous période 2 :2008–2016	Rout : 1053.63 mm	CORR : 0.82	TB : 5.34 h

Tableau d'analyse de dépassement du seuil SPC de 15 m³/s à 6 h

	Dépassement observé	Non-dépassement observé		
Dépassement prévu	26 a	6 b	POD = $\frac{a}{a+c} =$	39.4 %
Non-dépassement prévu	40 c	142638 d	FAR = $\frac{b}{a+c} =$	18.8 %
			CSI = $\frac{a}{a+b+c} =$	36.1 %

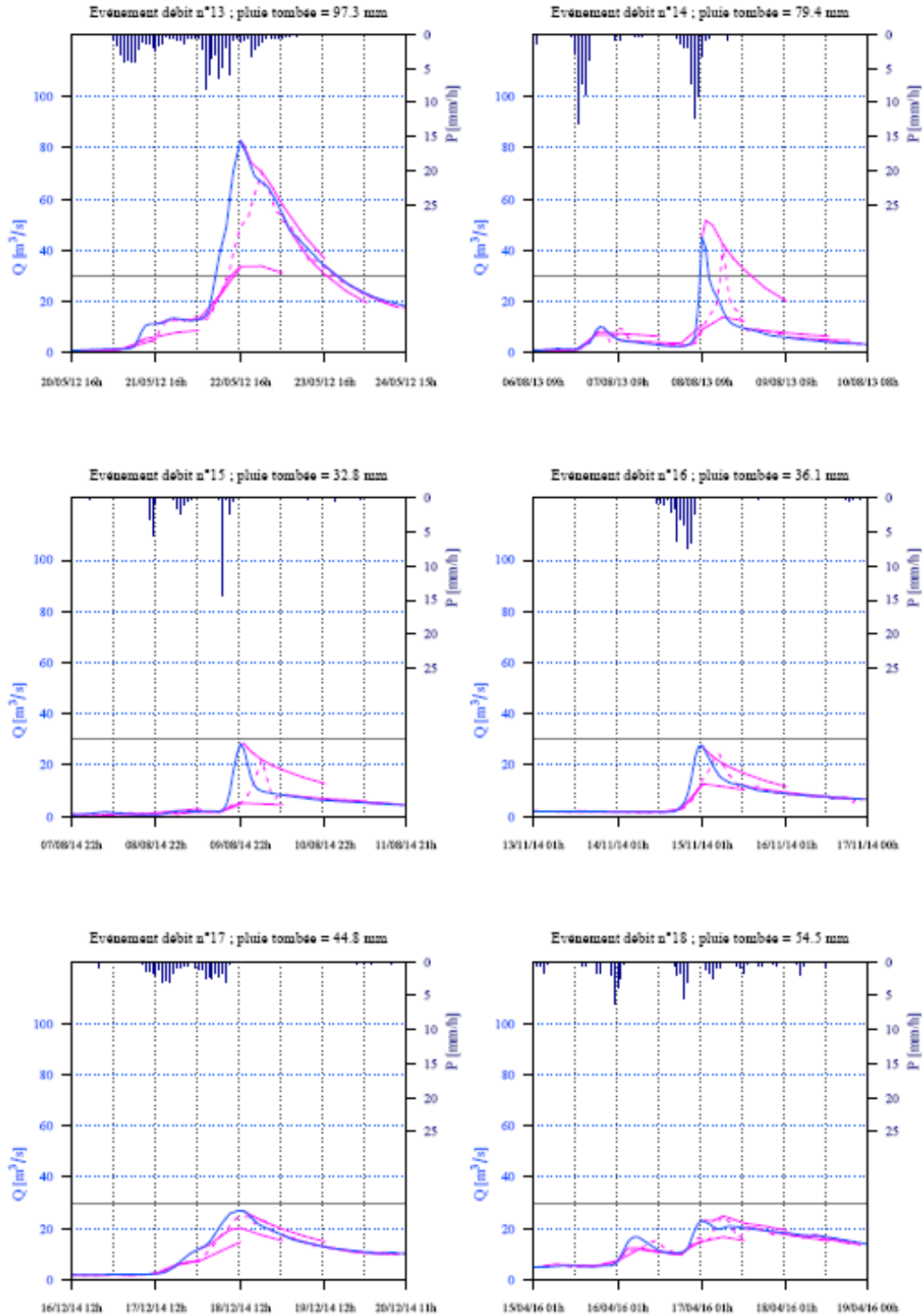


Annexe XXVIII : Fiches résultat de GRP, exemples de comparaison entre hydrogrammes de crue réels et simulés

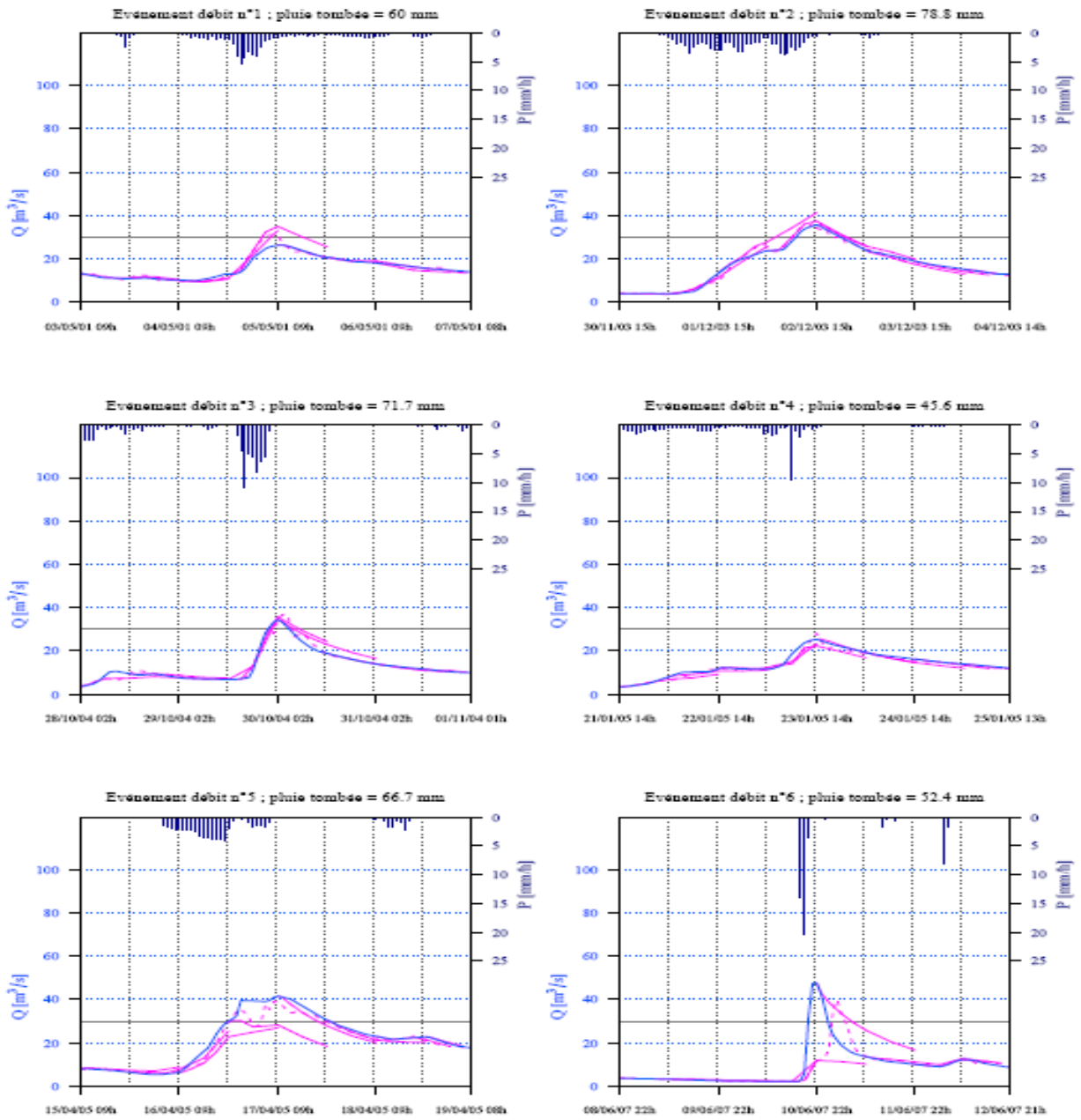
Sichon

K3060310 Le Sichon à Cusset [M. Vidot] (Superficie=159 km², Hc=6 h, GRP)

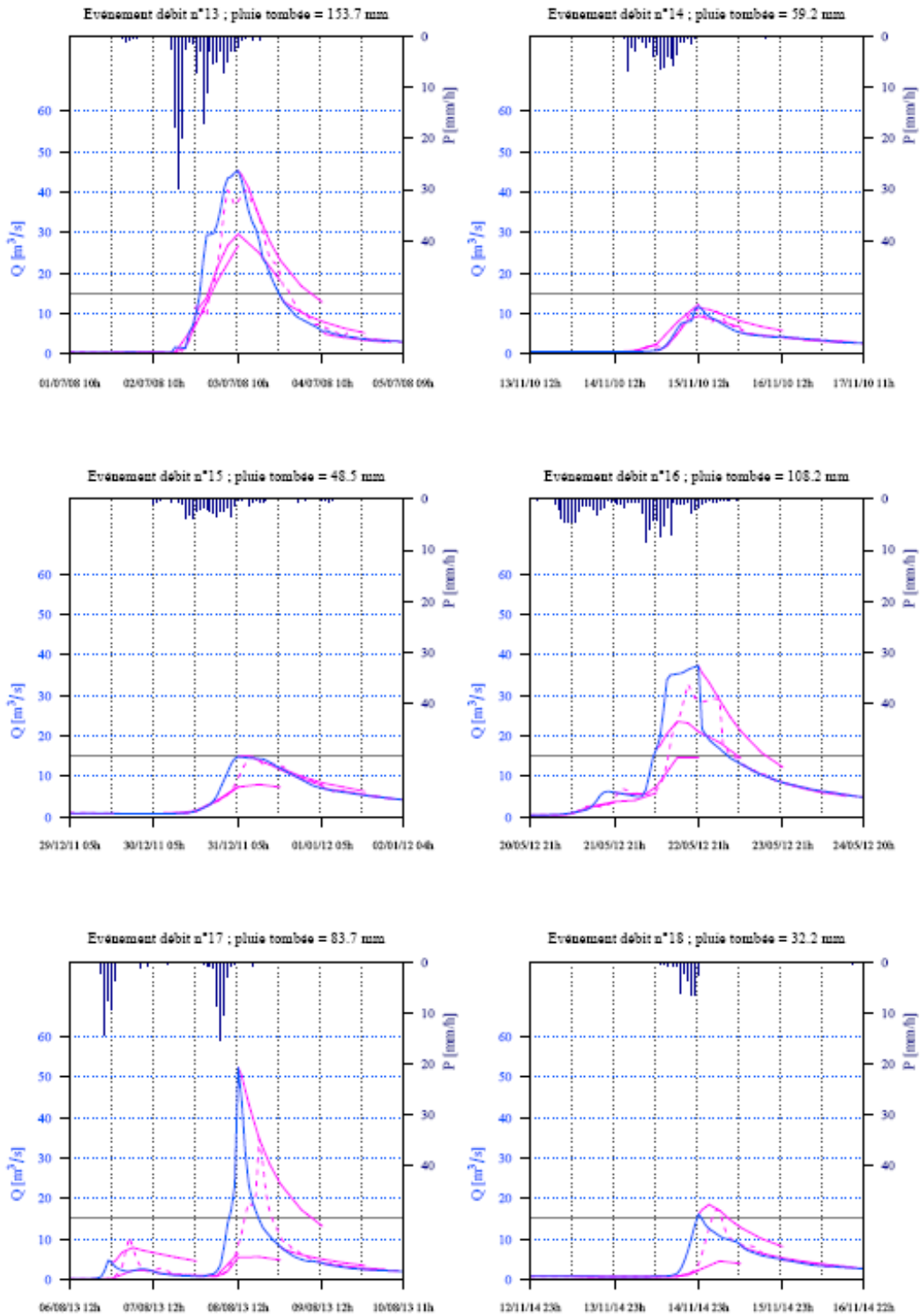
Débit observé (bleu), prévisions jusqu'à 24 h, série des prévisions à 6 h avec les modèles GRP SMN_RNA (violet)



K3060310 Le Sichon à Cusset [M. Vidot] (Superficie=159 km², Hc=6 h, GRP)
 Débit observé (bleu), prévisions jusqu'à 24 h, série des prévisions à 6 h avec les modèles
 GRP SMN_RNA (violet)

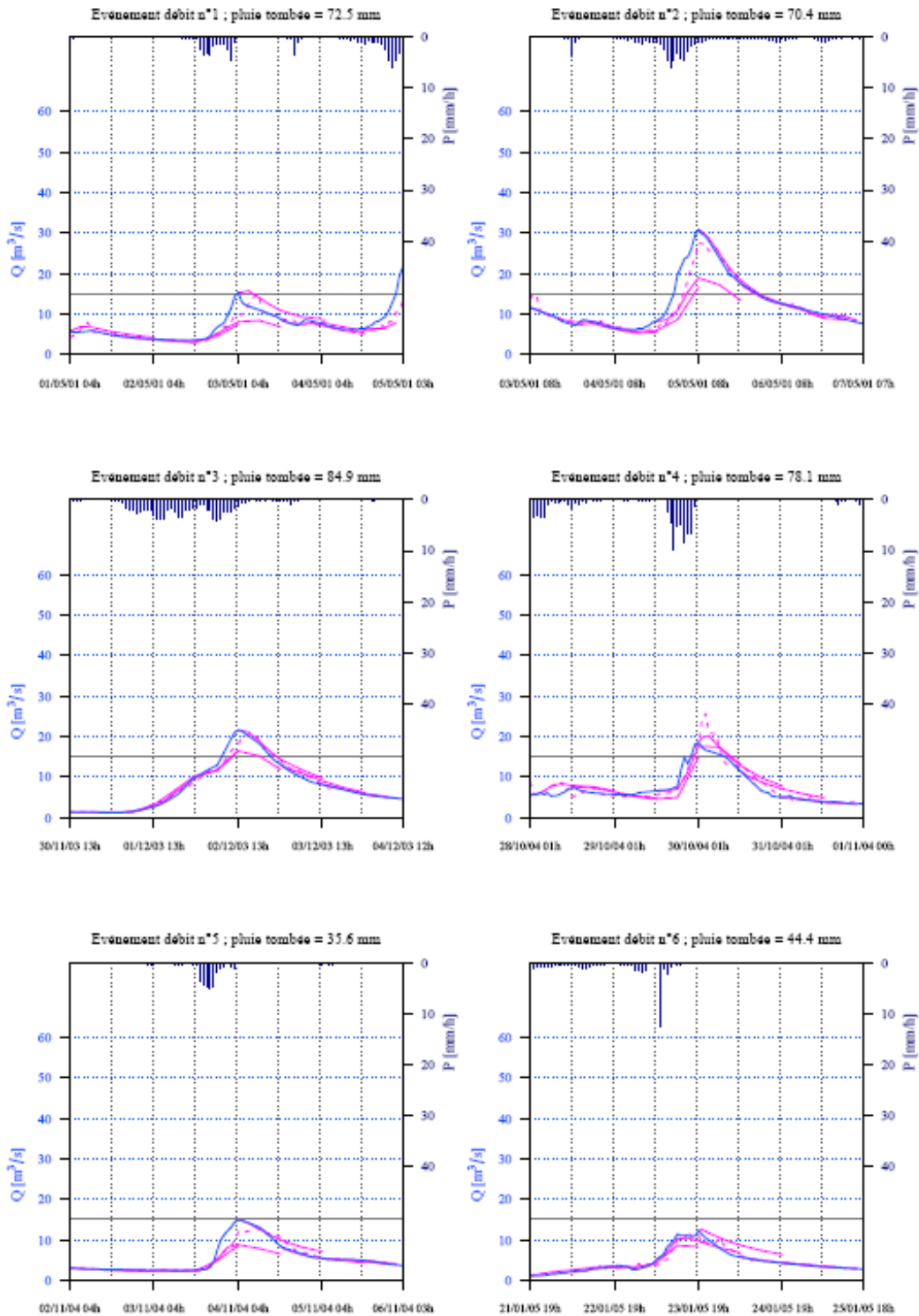


K3074010 Le Jolan à Cusset (Superficie=64 km², Hc=6 h, GRP)
 Débit observé (bleu), prévisions jusqu'à 24 h, série des prévisions à 6 h avec les modèles
 GRP SMN_RNA (violet)



K3074010 Le Jolan à Cusset (Superficie=64 km², Hc=6 h, GRP)

Débit observé (bleu), prévisions jusqu'à 24 h, série des prévisions à 6 h avec les modèles GRP SMN_RNA (violet)



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Diplôme(s) : Ingénieur ENGEES

Spécialité : GEDET-GEstion Durable de l'Eau dans les Territoires

Auteur : Anne-Flore ALBIN

Année : 2015-2016
Promotion Stuttgart

Titre : Étude des crues soudaines sur les bassins versants du Sichon-Jolan dans l'Allier et de la Couze-Chambon, de la Couze-Pavin et de la Durole dans le Puy de Dôme.

Choix d'un système d'alerte et conception d'outils d'anticipation des crues.

Nombre de pages : 100 **texte :** 60 **annexes :** 40

Nombre de références bibliographiques : 44

Structure d'accueil : DREAL Auvergne-Rhône-Alpes / Clermont-Ferrand / Puy-de-Dôme

Maître de stage : Jean-Nicolas AUDOUY

Résumé :

En Auvergne, au sein du Service de Prévision des Crues de l'Allier, les bassins versants du Sichon-Jolan (03), de la Durole, de la Couze-Chambon et de la Couze-Pavin (63) sont soumis aux crues soudaines. La survenue brusque de ces crues rend les systèmes d'alerte « traditionnels » peu adaptés. Un système d'alerte spécifique est donc choisi pour chaque bassin versant après avoir évalué sa faisabilité, par le biais des temps de réponse, et sa pertinence grâce aux enjeux. La création d'abaques et le calage du modèle de prévision des crues GRP complète cette étude.

Mots-clés :

Crues soudaines - Prévision des crues - GRP - Abaques pluie-débit - Enjeux en zone inondable