

**Etude globale de l'aléa inondation sur le territoire de
Bourbonne-les-Bains
(Vallée de l'Apance et du ruisseau de Borne)
Révision du Plan de Prévention du Risque Inondation**

Rapport de Phase 2.1

Indice	Date	Modifications	Emission	Contrôle
0	16/12/2013	Etablissement du dossier – Version 0	GGD	MLR
A	28/07/2015	Reprise du dossier suite aux remarques formulées par mail en date du 08/01/2014 et en réunion du 14/03/2014	GGD	MLR

SOMMAIRE

1.	Introduction.....	5
2.	Méthodologie proposée pour l'étude.....	7
3.	Analyse pluviométrique.....	10
3.1.	Objectif de l'analyse pluviométrique.....	10
3.2.	Analyse des données issues des pluviomètres.....	10
3.2.1.	Les pluviomètres analysés.....	10
3.2.2.	Cas du pluviomètre de Bourbonne-les-Bains.....	11
3.2.3.	Les données retenues pour l'analyse pluviométrique.....	12
3.2.4.	Traitement des chroniques sur la totalité de la période d'observation.....	14
3.2.5.	Traitement des chroniques sur une période commune.....	15
3.2.6.	Conclusion.....	15
3.3.	Analyse des données SHYPRE.....	17
3.3.1.	Présentation de la méthode SHYPRE.....	17
3.3.2.	Analyse des données SHYPRE.....	18
3.4.	Analyse des données issues du pluviographe de Langres.....	20
3.4.1.	Recensement et acquisition des données.....	20
3.4.2.	Les hauteurs de précipitation.....	20
3.4.3.	Comparaison avec les données SHYPRE.....	20
3.5.	Définition des courbes Intensité-Durée-Fréquence de référence sur le bassin versant de l'Apance.....	21
3.5.1.	Analyse comparative des pluies journalières et des pluies de 24 heures.....	21
3.5.2.	Construction des courbes IDF.....	23
3.6.	Cas des pluies des novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2012.....	25
4.	Analyse hydrologique.....	30
4.1.	Rappel des caractéristiques du bassin versant de l'Apance.....	30
4.2.	Estimation des débits de pointe de l'Apance sur la base des données débitmétriques disponibles.....	33
4.2.1.	Présentation des données disponibles.....	33
4.2.2.	Application au bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains.....	37
4.3.	Détermination du débit décennal par application des formules de l'hydrologie classique... 38	
4.3.1.	La méthode CRUPEDIX.....	38
4.3.2.	La méthode rationnelle.....	38
4.3.3.	Résultats.....	39
4.4.	Détermination des débits centennaux et exceptionnels.....	39
4.4.1.	Formule de Meyer.....	39
4.4.2.	Méthode rationnelle.....	39
4.4.3.	Méthode du Gradex.....	40
4.4.4.	La méthode du Gradex esthétique.....	41
4.4.5.	Résultats de l'application de la méthode du GRADEX et du GRADEX esthétique.....	41
4.4.6.	Synthèse.....	43
5.	Analyse de la crue de décembre 2011.....	44
5.1.	Méthodologie.....	44
5.2.	Reconstitution de l'hydrogramme de la crue de décembre 2011.....	46
5.3.	Bilan.....	48
6.	Suite de l'étude.....	50

Liste des figures

Sauf indication contraire, les figures sont orientées suivant le nord géographique

Figure 1 : Périmètre du secteur d'étude (source : DDT 52)	5
Figure 2 : Localisation des pluviomètres retenus pour l'analyse	11
Figure 3 : Exemple de répartition des quantiles SHYPRE sur le bassin versant de l'Apance - Evènement décennal de 24 heures.....	18
Figure 4 : Comparaison des pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans obtenues par les différentes sources étudiées.....	22
Figure 5 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence du bassin versant de l'Apance.....	24
Figure 6 : Caractérisation de l'évènement pluvieux de novembre 1996 sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres.....	26
Figure 7 : Pluviométrie horaire à Bourbonne-les-Bains lors de l'évènement de décembre 2011 caractérisée sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres.....	27
Figure 8 : Cumul glissant sur 24 h à Bourbonne-les-Bains lors de l'évènement de décembre 2011	27
Figure 9 : Comparaison des cumuls pluviométriques de novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2011.....	28
Figure 10 : Répartition des cumuls pluviométriques le jour de la crue et des 14 jours précédents en novembre 1996 et décembre 2011.....	28
Figure 11 : Schéma hydrologique de l'Apance	31
Figure 12 : Extrapolation des débits de pointe de crue par les méthodes du Gradex et du Gradex esthétique sur la base du Q_{10} obtenu par la formule rationnelle	42
Figure 13 : Extrapolation des débits de pointe de crue par les méthodes du Gradex et du Gradex esthétique sur la base du Q_{10} obtenu par la formule de Meyer	42
Figure 14 : Hydrogrammes mesurés sur l'Apance (à la station hydrométrique) et de la Saône à Monthureux-sur-Saône lors de la crue de décembre 2011	44
Figure 15 : Hydrogrammes reconstitués de la crue de l'Apance à Bourbonne-les-Bains en décembre 2011	47
Figure 16 : Report du débit de pointe supposé de la crue de décembre 2011 sur les courbes d'extrapolation des débits par les méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique sur la base d'un débit pivot correspondant au Q_{10} obtenu par la formule rationnelle.....	49

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des postes pluviométriques existant à proximité de Bourbonne-les-Bains	10
Tableau 2 : Récapitulatif des années incomplètes au pluviomètre de Bourbonne-les-Bains.....	12
Tableau 3 : Les hauteurs de précipitations journalières maximales annuelles (mm) aux pluviomètres retenus pour l'analyse pluviométrique	13
Tableau 4 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières aux différents pluviomètres considérés (ajustement selon la loi de Gumbel sur la totalité de la période d'observation disponible).....	14
Tableau 5 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières aux différents pluviomètres considérés (ajustement selon la loi de Gumbel sur la période d'observation commune)	15
Tableau 6 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières et écarts relatifs entre les différents ajustements statistiques réalisés à partir des données pluviométriques de la station de Bourbonne-les-Bains	16

Tableau 7 : Hauteurs de précipitations journalières et 24 H (en mm) à la station de Bourbonne-les-Bains	16
Tableau 8 : Caractéristiques synthétiques de la méthode SHYPRE.....	17
Tableau 9 : Points d'extraction des données SHYPRE sur le bassin versant de l'Apance	18
Tableau 10 : Hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) et écarts sur le bassin versant de l'Apance - Méthode SHYPRE	19
Tableau 11 : Caractéristiques du pluviographe de Langres	20
Tableau 12 : Quantiles des hauteurs de précipitations au pluviographe de Langres	20
Tableau 13 : Comparaison des hauteur de pluie obtenues par la méthode SHYPRE et au pluviographe de Langres	21
Tableau 14 : Comparaison des pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans obtenues par les différentes sources étudiées.....	22
Tableau 15 : Pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans caractéristiques du bassin versant de l'Apance	22
Tableau 16 : Hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) retenues sur le bassin versant de l'Apance	23
Tableau 17 : Coefficients de Montana caractéristiques du bassin versant de l'Apance calculés à partir des données pluviométriques retenues.....	23
Tableau 18 : Estimation de l'occurrence des évènements pluvieux de novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2011	25
Tableau 19 : Caractérisation de l'évènement pluvieux de décembre 2011 sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres	26
Tableau 20 : Rappel des caractéristiques des sous bassins versants de l'Apance	30
Tableau 21 : Caractéristiques du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains	32
Tableau 22 : Coefficients de ruissellement pour T = 10 ans.....	32
Tableau 23 : Occupation des sols du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains et ruissellement.....	32
Tableau 24 : Résultats de l'ajustement statistique des débits de pointe à la station hydrométrique de l'Apance (BV = 92 km ²)	33
Tableau 25 : Caractéristiques des stations hydrométriques situées dans un rayon de 40 km autour de Bourbonne-les-Bains	34
Tableau 26 : Synthèse de débits de crue caractéristiques aux stations hydrométriques retenues pour l'analyse débitmétrique	34
Tableau 27 : Données débitmétriques SHYREG en différents points du réseau hydrographique de l'Apance.....	36
Tableau 28 : Estimation du débit de pointe de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains par différentes méthodes (BV = 114,3 km ²)	37
Tableau 29 : Débits de pointe décennaux obtenus par les formules d'hydrologie classiques	39
Tableau 30 : Estimation du débit centennal de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains à l'aide de la méthode du Gradex et du Gradex esthétique.....	41
Tableau 31 : Récapitulatif des débits de pointe du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains obtenus par différentes méthodes hydrologiques	43
Tableau 32 : Comparaison de l'évènement de décembre 2011 à la station de Monthureux-sur-Saône et à Bourbonne-les-Bains	45
Tableau 33 : Caractéristiques des hydrogrammes reconstitués de la crue de l'Apance à Bourbonne-les-Bains en décembre 2011 (BV = 114,3 km ²)	46

1. Introduction

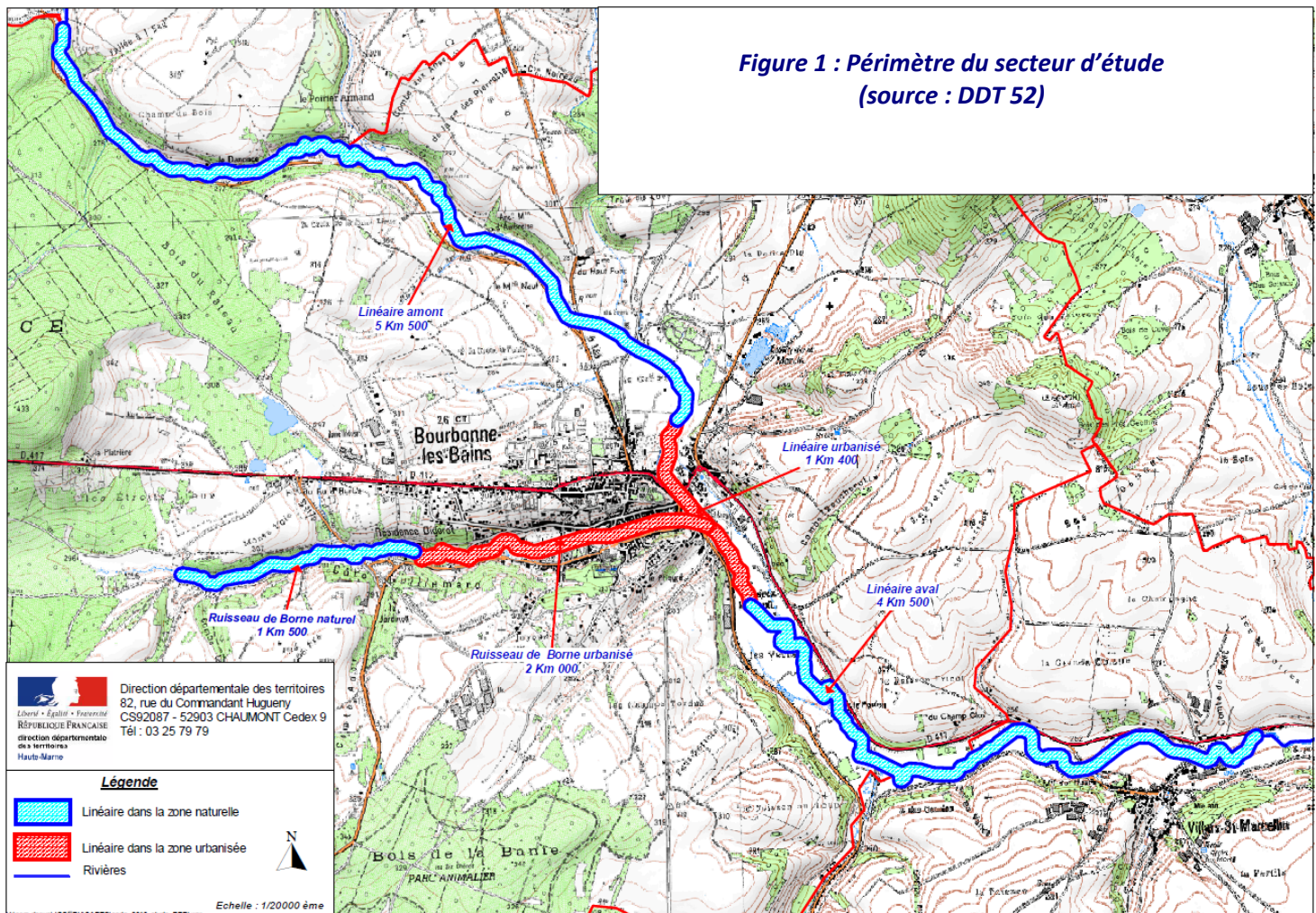
La Direction Départementale de la Haute-Marne a confié à la société INGEROP la révision du Plan de Prévention Risque Inondation de l'Apance sur la commune de Bourbonne-les-Bains.

Le PPRI existant a été approuvé le 28 février 2011. Il a été établi sur la base d'une crue de référence correspondant à une crue centennale de la rivière l'Apance, principal cours d'eau traversant les secteurs urbanisés de Bourbonne-les-Bains.

Hors en décembre 2011, un fort événement pluvieux s'est produit avec pour conséquence des débordements de l'Apance et du ruisseau du Borne ayant entraîné l'inondation de secteurs de la commune de Bourbonne-les-Bains non identifiés par le PPRI.

Le réseau hydrographique concerné par la présente étude est le suivant :

- l'Apance dans sa traversée du territoire de la commune de Bourbonne-les-Bains, soit sur un linéaire de l'ordre de 11,4 km dont 1,4 km en zone urbanisée,
- le ruisseau de Borne sur un linéaire de l'ordre de 3,5 km dont 2 km en zone urbanisée.



L'étude qui sera établie suivra les étapes suivantes :

- *Phase 1* : Evaluation du PPRI actuel sur le plan technique, analyse de l'évènement des 16 et 17 décembre 2011, des études existantes, des recherches historiques et enquêtes de terrain pour l'Apance et le ruisseau de Borne,
- *Phase 2* : Analyse hydrologique du bassin de l'Apance et du ruisseau de Borne,
- *Phase 3* : Modélisation de l'écoulement des crues dans les vallées de l'Apance et de borne et acquisitions de données topographiques,
- *Phase 4* : Cartographie des zones inondables,
- *Phase 5* : Cartographie des aléas d'une crue de référence de l'Apance et de Borne,
- *Phase 6* : Cartographie règlementaire,
- *Phase 7* : Etablissement de la note de présentation du PPRI.

Le présent rapport concerne la phase 2 de l'étude « Analyse hydrologique du bassin de l'Apance et du ruisseau de Borne ».

2. Méthodologie proposée pour l'étude

L'objectif

L'analyse hydrologique doit permettre d'identifier la crue de référence qui servira à l'établissement de la carte des aléas du PPRI et d'établir, pour celle-ci, les débits de pointe caractéristiques de l'Apance et du ruisseau de Borne ainsi que les hydrogrammes de crues associés. **Ces éléments serviront de données d'entrée au modèle hydraulique qu'il est prévu d'établir afin de caractériser l'aléa inondation (phase 3 de l'étude).**

La crue de référence peut être :

- **soit la crue centennale,**
- **soit une crue exceptionnelle connue si l'étendue de sa zone inondable est supérieure** : cette crue peut être la crue de 2011 dont les zones inondées ont dépassé celles des crues précédentes (novembre 1996 et décembre 2001) ainsi que celles définies par le PPRI existant dont la crue de référence est la crue centennale théorique.

Les difficultés

Cette analyse hydrologique du bassin versant de l'Apance est un exercice rendu difficile en raison notamment du manque de données de base fiables :

- **incertitudes sur la pluviométrie du bassin versant** : les données disponibles à la station de Bourbonne-les-Bains sont des données journalières et présentant des incertitudes liées à la fiabilité de l'appareil de mesure,
- **incertitudes liées aux données débitmétriques** : la station hydrométrique existant sur l'Apance n'est a priori pas représentative et l'utilisation de la station hydrométrique de la Saône à Monthureux-sur-Saône comme station de référence pour le bassin versant de l'Apance peut conduire à sous-évaluer ses débits de pointe (cf. § 4.2. page 33).

La connaissance des débits de l'Apance se pose également dans l'optique du calage du modèle hydraulique. Le calage d'un modèle de simulation des écoulements consiste en effet à faire correspondre un évènement simulé avec la réalité observée en terme de débit et de hauteur d'eau. Un véritable calage n'est donc possible que lorsque les débits et les hauteurs d'eau sont connus ce qui implique la présence d'une station de mesure des débits lors de l'évènement. Si des laisses des dernières crues connues (1996, 2001 et 2011) ont été relevées, les débits associés aux évènements de calage ne sont eux pas connus.

Méthode

Afin de pallier les insuffisances des connaissances pluviométriques et débitmétriques sur le bassin versant de l'Apance, l'étude hydrologique qui sera mise en œuvre suivra les étapes suivantes :

- **1. Analyse pluviométrique** avec comme objectif la définition des hauteurs de pluies journalières et des courbes Intensité-Durée-Fréquence représentatives sur le bassin versant de l'Apance.

Cette analyse permettra également d'évaluer l'occurrence des événements pluviométriques de 1996, 2001 et 2011 à l'origine des dernières crues débordantes de l'Apance et du Borne.

Cette étude sera basée sur l'ensemble des données disponibles suivantes : chroniques de pluies aux pluviomètres de Bourbonne-les-Bains mais également des pluviomètres situés à proximité, données du pluviographe de Langres et enfin les données issues de la méthode SHYPRE.

- **2. Estimation d'un ordre de grandeur du débit centennal de l'Apance** par valorisation des :
 - des caractéristiques physiques du bassin versant de l'Apance et du Borne définies en phase 1,
 - des données pluviométriques définies en premier lieu,
 - des données débitométriques existantes (aux stations hydrométriques sur l'Apance et sur les bassins versants voisins, données SHYREG, données issues des études antérieures, ...),
 - des formules usuelles de l'hydrologie (formules rationnelle, Meyer, méthode du GRADEX,...).
- **3. Caractérisation de la crue de décembre 2011**

L'occurrence de la pluie à l'origine de cette crue est estimée de l'ordre de 20 ans sur 24h contre 100 ans sur 24h pour la pluie à l'origine de la crue de 1996 (cf. Analyse pluviométrique, § 3.6.) alors que l'étendue de ces zones inondées est supérieure à celle de 1996.

Cependant les conditions de ruissellement sur le bassin versant sont des variables aléatoires spécifiques à chaque événement qui peuvent conduire à « transformer » un événement pluvieux d'occurrence donnée en crue d'occurrence supérieure, ou inférieure. Il est à noter que d'autres phénomènes perturbateurs (tels que des embâcles) peuvent conduire à favoriser les débordements et l'extension des zones inondables.

L'ensemble de ces éléments rend complexe la tentative d'associer une occurrence à un événement de crue donné, et cela d'autant plus qu'on ne dispose pas sur le bassin versant de l'Apance de mesures de débits valables.

Ainsi nous prévoyons pour estimer le débit de pointe de la crue de décembre 2011 et évaluer son occurrence de :

- **3.1. Reconstituer la forme de l'hydrogramme de la crue de 2011**
- **3.2. Utiliser le modèle hydraulique pour estimer le débit de pointe de cette crue.** Nous procéderons de la manière suivante :

- 3.2.1. Prise en compte dans le modèle de pertes de charge régulières (rugosité de type Strickler pour le lit majeur et pour le lit mineur) et de pertes de charge ponctuelles (ponts, déversoirs...) représentatives du terrain établies sur la base de l'analyse des cartes IGN et des orthophotos ainsi qu'à partir des observations réalisées lors des visites de site (juin 2013 et décembre 2013).
- 3.2.2. Vérification de la cohérence des pertes de charges prises en compte pour l'évènement de 2006 (sur la base de l'hydrogramme ISL et des laisses de crue relevées) et pour la crue de référence du PPRI existant (sur la base de l'hydrogramme théorique centennal établi par ISL et des côtes de référence du PPRI),
- 3.2.3. Introduction comme donnée d'entrée du modèle de l'hydrogramme reconstitué. Plusieurs tests seront réalisés avec un débit de pointe de l'hydrogramme croissant,
- 3.2.4. Confrontation des résultats du modèle aux laisses de crues relevées et adaptation éventuelle des pertes de charges singulières pour tenir compte des hypothétiques embâcles présents le jour de la crue.

- **4. Définition de la crue de référence**

Le débit de pointe de l'évènement de décembre 2011 ainsi défini sera alors confronté à l'ordre de grandeur estimé pour le débit centennal de l'Apance. Une proposition sera alors faite pour le choix de la crue de référence.

- **5. Modélisation sur cette base de 8 scenarios correspondant à :**

- *une 1^{ère} situation géométrique* correspondant à la situation « réelle » de l'Apance du ruisseau de Borne (cette situation servira d'état de référence) étudiée pour les occurrences de crues suivantes : 10 ans, 50 ans, 100 ans, et crue exceptionnelle.
- *4 situations géométriques théoriques* étudiées pour la crue d'occurrence centennale :
 - l'effacement des ponts en travers de l'Apance et du ruisseau de Borne dans la traversée du Bourbonne-les-Bains,
 - l'effacement du remblai de la zone du Breuil et tout autre remblai dimensionnant identifié lors de l'état des lieux de l'Apance et du Borne,
 - la suppression du canal de dérivation des Vernées,
 - le reméandrage du lit de l'Apance et le redimensionnement du lit mineur permettant les débordements pour une crue d'occurrence 2 ans, en zone naturelle uniquement (situation théorique « naturelle »).

Le présent rapport présente les résultats de l'étude jusqu'à l'étape 3.1.

3. Analyse pluviométrique

3.1. Objectif de l'analyse pluviométrique

La première partie de cette étude a pour objet la définition des paramètres et lois pluviométriques sur le bassin versant de l'Apance en vue de la définition des débits de pointe en période de crue de l'Apance et du Borne et des hydrogrammes associés. Les paramètres concernés sont :

- les hauteurs de pluies journalières,
- les courbes Intensité-Durée-Fréquence.

3.2. Analyse des données issues des pluviomètres

3.2.1. Les pluviomètres analysés

Les 5 pluviomètres retenus pour l'analyse pluviométrique (en raison de leur situation géographique et du nombre d'années d'observation disponibles), ainsi que leurs caractéristiques, sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Code station	Commune	Lieu-dit	Bassin		Altitude	Distance à la commune de Bourbonne-les-Bains	Date de la création de la station	Période d'observation disponible		Nombres d'années d'observations	Années manquantes ou incomplètes
								début	fin		
23336 hm	Bourbonne-les-Bains	Gendarmerie	U004	La Saône de sa source au Coney	302 m	-	02/08/1976	1976	2013	37	1976 - 1982 à 1986 - 2005 à 2012
23274 hm	Terre Natale	Varennnes-sur-Amance	U021	L'Amance	370 m	10,6 km	01/09/1977	1977	2013	36	1977
88258003	Lamarche	Le Rupt du May	B101	le Mouzon	370 m	13 km	01/04/1974	1974	2013	39	1978 à 1983
52332001	Val de Meuse	Maulain	B001	la Meuse de sa source au	380 m	13,5 km	01/01/1957	1957	2013	56	1957 - 1964 - 1968 - 1982
52197003	Fayl-Billot	Parc DDE	U070	Le Salon	350 m	21,5 km	01/09/1991	1992	2013	21	1992

Tableau 1 : Caractéristiques des postes pluviométriques existant à proximité de Bourbonne-les-Bains

Pour chacun de ces postes, les chroniques des maxima mensuels des hauteurs de précipitations journalières ont été fournies par METEO France.

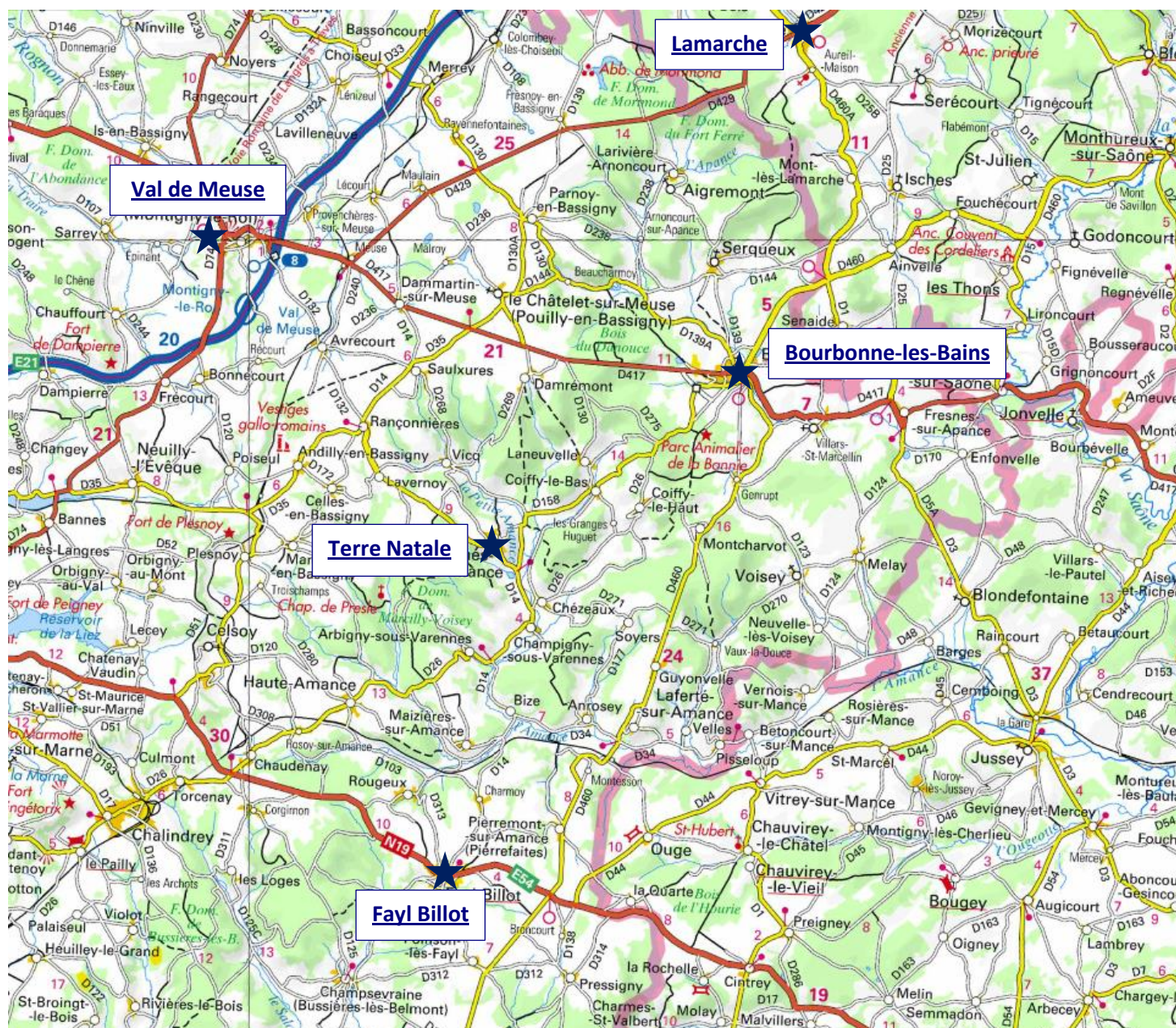


Figure 2 : Localisation des pluviomètres retenus pour l'analyse

3.2.2. Cas du pluviomètre de Bourbonne-les-Bains

La chronique des maxima mensuels des hauteurs de précipitations journalières disponible au pluviomètre de Bourbonne-les-Bains est disponible sur la période 1977-2012 (soit 36 années d'observations). Cette chronique présente cependant

- *des valeurs manquantes* : elles concernent deux périodes : 1982 – 1986 et 2005 – 2012.

	1982	1983	1984	1985	1986	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Nombre de valeurs manquantes par année	6	1	1	1	2	1	4	3	1	1	1	1	4

Tableau 2 : Récapitulatif des années incomplètes au pluviomètre de Bourbonne-les-Bains

- *des incertitudes* : les données fournies sont par ailleurs supposées peu fiables en raison d'un défaut du matériel et des conditions de mesures.

Afin de pouvoir comparer les quantiles de pluie à ce pluviomètre avec ceux des autres pluviomètres identifiés pour l'analyse, il a été décidé de reconstituer les valeurs manquantes sur la base :

- des années précédentes pour lesquelles les valeurs des maxima mensuels sont disponibles au pluviomètre.
- des données disponibles à un pluviomètre privé situé à Fresnes-sur-Apance (soit sur la partie aval de la vallée de l'Apance) et dont les données nous ont été fournies par la commune de Bourbonne-les-Bains. Les données de ce pluviomètre nous ont permis de vérifier notamment que les valeurs manquantes ne correspondaient pas aux maxima annuels des hauteurs de précipitations journalières, valeurs exploitées dans le cadre de l'analyse statistique qui sera réalisée pour caractériser la pluviométrie à Bourbonne-les-Bains (cf. § 3.2.4. page 14)


Il est à noter que les données complétées correspondent :


- à la période 2005-2012 : période pour laquelle nous disposons de points de comparaison avec le pluviomètre privé,
- les écarts de mesures entre les deux pluviomètres sont variables : sur l'ensemble de la période considérée, la moyenne des écarts est de +/- 10 %
- au final les valeurs complétées ne correspondent pas aux maxima annuels des hauteurs de précipitations journalières.


3.2.3. Les données retenues pour l'analyse pluviométrique

Les hauteurs de précipitations journalières maximales annuelles retenues pour l'analyse pluviométrique sont présentées dans le Tableau 3.

*DDT de la Haute-Marne - Révision du PPRI de la commune de Bourbonne-les-Bains
- Rapport de phase 2.1 vA -*

 Période commune sur trois postes (31 années)

 Période commune sur 4 postes (26 années)

 Période commune sur 5 postes (21 années)

35 : valeurs complétées
38.5 : valeurs complétées majorées de 10%

Année	Val de Meuse	Bourbonne les Bains	Bourbonne les Bains-10 %	Terre Natale	Lamarche	Fayl Billot
Nombre d'années d'observation	52	31	31	35	29	21
Hauteur maximale de pluie journalière	75.9 mm	85.2 mm	85.2 mm	68.6 mm	67.0 mm	84.4 mm
1957						
1958	26.5					
1959	29.1					
1960	51.7					
1961	27.4					
1962	33.4					
1963	22.6					
1964						
1965	64					
1966	38.5					
1967	36.5					
1968						
1969	27.4					
1970	31.9					
1971	22.9					
1972	46.5					
1973	19.7					
1974	27					
1975	42.3					
1976	26					
1977	31.5	38.6	38.6			
1978	32.1	29.1	29.1	29.3		
1979	44.2	38	38	35.2		
1980	37.2	48.7	48.7	57.2		
1981	42.5	45	45	36.5		
1982				35.1		
1983	31.5			33.7		
1984	41.6			32.8	55.7	
1985	23.2			32.1	22.3	
1986	43			39.2	47.3	
1987	28.4	32	32	39	30.4	
1988	75.9	35.2	35.2	30.1	40	
1989	29.5	30	30	33.6	25	
1990	33.2	41.5	41.5	35.8	42	
1991	42	40	40	47	40	
1992	36.8	36.2	36.2	30	37	44.2
1993	36.6	45.5	45.5	37.8	51	39.8
1994	29.8	38	38	29.9	44	37.8
1995	28.7	22	22	26.3	37	31
1996	65.2	78.4	78.4	68.6	65	84.4
1997	58.2	55	55	39.8	40	38
1998	38.3	38.3	38.3	41.7	45	43.6
1999	67	60	60	53.4	51	67.2
2000	41	85.2	85.2	49.8	45	59.8
2001	45.2	35	35	29.6	34	47.6
2002	42.2	40	40	26.4	38	51.8
2003	35	36	36	28.2	31	34.2
2004	37	45	45	27.9	50	32.6
2005	36	35	38.5	23.6	45.2	31.6
2006	63.2	65	71.5	63.3	60	45.4
2007	24	38	41.8	27	32	30.2
2008	20.8	62	68.2	44.1	26	54
2009	47.1	41	45.1	36.3	67	42.4
2010	34.8	50	55	27.8	50	35
2011	31	45	49.5	37.3	33.3	35.6
2012	42.8	29.5	32.45	33	35	33.8

Tableau 3 : Les hauteurs de précipitations journalières maximales annuelles (mm) aux pluviomètres retenus pour l'analyse pluviométrique

Pour la station de Bourbonne-les-Bains, nous étudierons deux chroniques :

- la chronique reconstituée telle que présentée au § 3.2.2. (intitulée « Bourbonne »),
- la chronique reconstituée majorée de 10 % sur la période 2005-2012 afin de tenir compte d'une éventuelle minoration des mesures due à un défaut du pluviomètre (intitulée « Bourbonne-10 % »).

3.2.4. Traitement des chroniques sur la totalité de la période d'observation

La loi de Gumbel a été ajustée aux chroniques des hauteurs journalières maxi-annuelles par la méthode des moments et par la méthode du maximum de vraisemblance. La méthode présentant finalement le meilleur ajustement a été retenue.

Les chroniques ont été analysées dans un premier temps sur la totalité des périodes d'observation disponibles aux différents postes pluviométriques.

Le tableau ci-dessous synthétise les quantiles des hauteurs de précipitations journalières pour les durées de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

Station	Période d'observation	Nombre d'années d'observation	Hauteur maximale de pluie journalière (mm)	Hauteurs de précipitations journalières (mm)					
				P ₂	P ₅	P ₁₀	P ₂₀	P ₅₀	P ₁₀₀
Bourbonne-les-Bains	1977 à 1981 + 1987 à 2012	31 années	85,2	41,5	53,9	62,2	70,0	80,3	87,9
Bourbonne-les-Bains – 10 %	1977 à 1981 + 1987 à 2012	31 années	85,2	42,6	55,5	64,1	72,3	82,9	90,9
Terre Natale	1978 - 2012	35 années	68,6	35,4	44,7	50,9	56,9	64,6	70,4
Fayl Billot	1992 - 2012	21 années	84,4	41,6	53,6	61,5	69,1	79,0	86,4
Lamarche	1984 - 2012	29 années	67	40,3	51,2	58,5	65,4	74,5	81,2
Val de Meuse	1958 à 2012 Hormis (1964, 1968, 1982)	37 années	75,9	35,8	47,0	54,4	61,4	70,6	77,5

Tableau 4 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières aux différents pluviomètres considérés (ajustement selon la loi de Gumbel sur la totalité de la période d'observation disponible)

3.2.5. Traitement des chroniques sur une période commune

La période commune aux 5 postes étudiés s'étend entre 1992 et 2012. Cette période s'étend sur 20 années.

Les différentes chroniques ont été ajustées à partir de la Loi de Gumbel.

Le tableau ci-dessous synthétise les quantiles des hauteurs de précipitations journalières pour les durées de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.

Station	Période d'observation	Nombre d'années d'observation	Hauteur maximale de pluie journalière (mm)	Hauteurs de précipitations journalières (mm)					
				P ₂	P ₅	P ₁₀	P ₂₀	P ₅₀	P ₁₀₀
Bourbonne-les-Bains	1992-2012	20 années	85,2	44,1	58,1	67,4	76,3	87,8	96,4
Bourbonne-les-Bains – 10 %	1992-2012	20 années	85,2	45,7	60,1	69,6	78,8	90,6	99,4
Terre Natale	1992-2012	20 années	68,6	35,3	45,5	52,2	58,6	67,0	73,2
Fayl Billot	1992-2012	20 années	84,4	41,6	53,6	61,5	69,1	79,0	86,4
Lamarche	1992-2012	20 années	67	40,3	50,2	56,8	63,1	71,2	77,4
Val de Meuse	1992-2012	20 années	75,9	38,8	51,2	59,4	67,3	77,5	85,1

Tableau 5 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières aux différents pluviomètres considérés (ajustement selon la loi de Gumbel sur la période d'observation commune)

3.2.6. Conclusion

Le pluviomètre de Bourbonne-les-Bains est celui présentant les quantiles des hauteurs de précipitations journalières les plus importants par rapport aux autres stations.

Les quantiles obtenus à la station de Fayl-les-Billot sont du même ordre de grandeur mais légèrement inférieurs (de 0 à 11 %).

Les quantiles des stations de Terre Natale, Lamarche et Val de Meuse sont nettement inférieurs aux valeurs de la station de Bourbonne-les-Bains avec des écarts allant de 5 % à 26 % suivant le pluviomètre considéré et l'occurrence de l'évènement.

Les écarts entre les différents ajustements statistiques réalisés à partir des chroniques pluviométriques étudiées à la station de Bourbonne-les-Bains sont présentés dans le tableau suivant. Ces écarts sont compris entre 4,2 mm et 11,5 mm, soit globalement de l'ordre de 10 %.

Station	Bourbonne-les-Bains	Bourbonne-les-Bains – 10 %	Bourbonne-les-Bains	Bourbonne-les-Bains – 10 %	Ecart période 31 années/20 années	Ecart maxi/min
Période	31 années		20 années			
P ₂	41,5	42,6	44,1	45,7	6%	10%
P ₅	53,9	55,5	58,1	60,1	8%	11%
P ₁₀	62,2	64,1	67,4	69,6	8%	12%
P ₂₀	70,0	72,3	76,3	78,8	9%	12%
P ₅₀	80,3	82,9	87,8	90,6	9%	13%
P ₁₀₀	87,9	90,9	96,4	99,4	10%	13%

Tableau 6 : Quantiles (en mm) des hauteurs de précipitations journalières et écarts relatifs entre les différents ajustements statistiques réalisés à partir des données pluviométriques de la station de Bourbonne-les-Bains

Au regard de ces éléments, il est décidé de retenir pour la suite de l'analyse les hauteurs de précipitations journalières obtenues par ajustement statistique à la station de Bourbonne-les-Bains, sur une période de 20 années, en tenant compte d'une majoration de 10 % sur la période 2005-2012 :

- cette station donne des quantiles de pluie journalière supérieurs à ceux des autres stations considérées,
- de par sa localisation elle est la plus représentative de la pluviométrie sur le bassin versant de l'Apance,
- la correction de 10 % apportée à la chronique des maximas annuels sur la période 2005-2012 permet de prendre en compte (dans une certaine mesure difficile à évaluer) des insuffisances de la station de mesure existante.

Les hauteurs de précipitation en 24 heures sont estimées des hauteurs de précipitation journalières par application de la correction de WEISS, permettant le passage d'une pluie journalière non centrée (mesurée au pluviomètre) à une pluie centrée de durée 24 heures (mesurée au pluviographe) :

$$\text{Pluie centrée en 24 heures} = \text{Pluie journalière non centrée} \times 1,14.$$

	Hauteurs de précipitations journalières (pluies non centrées)	Hauteurs de précipitations 24h (pluies centrées)
P ₂	45,7	52,1
P ₅	60,1	68,5
P ₁₀	69,6	79,4
P ₂₀	78,8	89,8
P ₅₀	90,6	103,3
P ₁₀₀	99,4	113,4

Tableau 7 : Hauteurs de précipitations journalières et 24 H (en mm) à la station de Bourbonne-les-Bains

3.3. Analyse des données SHYPRE

3.3.1. Présentation de la méthode SHYPRE

Les données SHYPRE sont des *valeurs de précipitations maximales cumulées sur 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24, 48 et 72 heures pour des durées de retour 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans*. Ces données sont disponibles sur la France à la résolution kilométrique.

SHYPRE (SHYREG), acronyme de Simulation d'HYdrogrammes pour la PREdétermination des crues, est une méthode statistique développée conjointement par le CEMAGREF et Météo France.

Elle est basée sur la constitution de séries fictives de pluviométrie générées à partir de séries réellement mesurées sur plusieurs dizaines d'années. Les hauteurs de pluie correspondant aux différentes durées de retour sont estimées par calcul de fréquence à partir de la série multiséculaire fictive obtenue. Ces calculs ont été réalisés sur plusieurs centaines de séries pluviométriques représentatives en France. Les hauteurs de pluie de référence ainsi obtenues ont ensuite été interpolées à l'échelle de l'hexagone à la résolution kilométrique en tenant compte du relief (pente, exposition, altitude etc...). Cette méthode SHYPRE donne des résultats généralement cohérents avec les calculs classiques réalisés à partir des relevés pluviographiques des stations de Météo France.

La méthode SHYPRE permet ainsi d'obtenir des hauteurs de pluies correspondant aux pas de temps de 1h à 72 h pour des durées de retour de 2 à 100 ans pour chaque point de référence du projet. Pour les pluies de durée inférieure à 1h, les quantiles de pluie peuvent être estimés par extrapolation des données SHYREG pour une pluie d'une heure en appliquant un coefficient $b=0.5$ (coefficient de Montana), selon les préconisations du CEMAGREF.

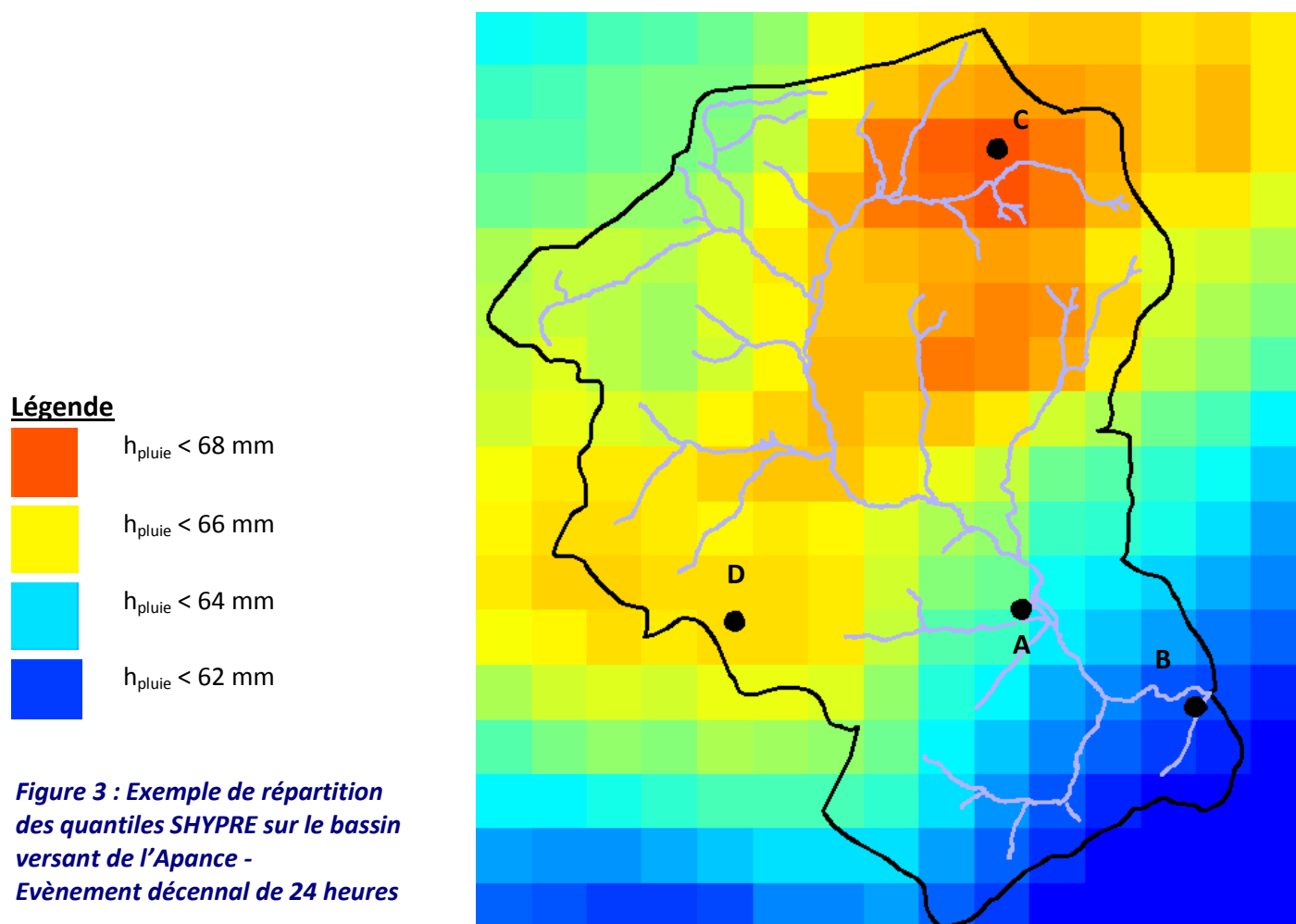
Le tableau ci-dessous synthétise les principales caractéristiques de la méthode SHYPRE :

Paramètre traité	Cumuls maxima de précipitations de 1 à 72 heures calculés sur des chroniques simulées de précipitations horaires.
Durées de retour traitées	2, 5, 10, 20, 50, 100 ans
Disponibilité spatiale	en points de grille (1 km) avantage d'une densité régulière
Mise à jour	Non prévue à ce jour
Limitations	- <i>pas d'intervalles de confiance</i> - <i>pas de prise en compte des évènements récents : la période de calage de la méthode s'étend de 1977 à 2002 avec au moins 20 années d'observations sur les postes pluviométriques utilisés.</i>
Avantages	Disponibilité en tout point

Tableau 8 : Caractéristiques synthétiques de la méthode SHYPRE

3.3.2. Analyse des données SHYPRE

Les données SHYPRE nous ont été fournies par la DDT 52. Elles couvrent l'ensemble du bassin versant de l'Apance avec une résolution de l'ordre du km². La figure suivante présente à titre d'exemple la répartition des hauteurs de pluie pour un évènement pluvieux d'occurrence décennale et de durée 24 heures.



Il est possible de constater que les quantiles pluviométriques issus de la méthode SHYPRE présentent globalement un gradient nord-ouest/sud-est. Cette répartition spatiale se retrouve de la même manière pour les pluies d'autres occurrences.

Quatre points correspondant à des positions caractéristiques sur le bassin versant de l'Apance ont été sélectionnés et les données SHYPRE (fournies à la résolution kilométrique sur l'ensemble du bassin versant) y ont été extraites :

	Localisation
A	Centre-ville de Bourbonne-les-Bains
B	Villars Saint Marcellin (soit en aval du bassin versant de l'Apance)
C	Lieu-dit Bois Brulé sur la partie amont du bassin versant de l'Apance
D	Lieu-dit Bois de Chagnon sur la partie amont du bassin versant du Borne

Tableau 9 : Points d'extraction des données SHYPRE sur le bassin versant de l'Apance

Les tableaux suivants synthétisent les quantiles des hauteurs de précipitations et les écarts pluviométriques sur le bassin versant.

T = 10 ans	Hauteur de pluie moyenne				<u>Ecart relatif mini / maxi</u>	<u>Ecart absolu mini / maxi</u>
	<u>Lieu-dit Bois Brulé (C)</u>	<u>Bois de Chagnon (D)</u>	<u>Centre-ville (A)</u>	<u>Villars-Saint- Marcellin (B)</u>		
1 h	26,4	26,3	25,0	24,7	1,7	7%
2 h	32,0	31,7	30,4	29,9	2,1	7%
3 h	36,7	36,3	34,9	34,2	2,5	7%
4 h	40,3	39,8	38,3	37,4	2,9	8%
6 h	45,6	44,9	43,3	42,2	3,4	8%
12 h	55,7	54,8	52,8	51,5	4,2	8%
24 h	67,4	66,3	63,9	62,3	5,1	8%
48 h	83,5	82,1	79,1	77,0	6,5	8%
72 h	97,1	95,1	91,7	89,1	8,0	9%

T = 100 ans	Hauteur de pluie moyenne				<u>Ecart relatif mini / maxi</u>	<u>Ecart absolu mini / maxi</u>
	<u>Lieu-dit Bois Brulé</u>	<u>Bois de Chagnon</u>	<u>Centre-ville</u>	<u>Villars-Saint- Marcellin</u>		
1 h	40,8	40,9	39,4	38,6	2,3	6%
2 h	47,6	47,3	45,8	44,7	2,9	6%
3 h	53,3	52,9	51,4	50,0	3,3	7%
4 h	57,7	57,2	55,5	54,0	3,7	7%
6 h	64,4	63,8	61,9	60,1	4,3	7%
12 h	8,1	77,3	74,7	72,7	5,4	7%
24 h	92,0	90,9	87,9	85,4	6,6	8%
48 h	109,3	108,0	104,3	101,6	7,7	8%
72 h	123,9	122,5	118,3	115,3	8,6	7%

Tableau 10 : Hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) et écarts sur le bassin versant de l'Apance - Méthode SHYPRE

De l'analyse des données SHYPRE et de leur répartition sur le bassin versant de l'Apance, il ressort les points suivants :

- les parties amont du bassin versant de l'Apance et du ruisseau du Borne sont plus arrosées que le centre-ville de Bourbonne-les-Bains, secteur recevant lui-même plus que le bourg de Villars-Saint-Marcellin, situé à l'extrême sud-est du secteur d'étude.
- cependant, les écarts pluviométriques entre les quantiles les plus faibles et les plus forts sont compris entre 2 et 9 mm environ, soit entre 6 et 9 %. Ils sont par conséquent faibles. La pluviométrie peut être considérée comme globalement constante sur le bassin versant de l'Apance.

Pour la suite de l'analyse, les hauteurs de pluie sur la partie amont du bassin versant de l'Apance (au lieu-dit Bois Brulé) sont retenues comme hauteurs de pluie caractéristiques issues de la méthode SHYPRE.

3.4. Analyse des données issues du pluviographe de Langres

3.4.1. Recensement et acquisition des données

Le pluviographe de Langres est le plus proche de la commune de Bourbonne-les-Bains. Il est situé à environ 33 km à l'est de la commune.

Code station	Commune	Bassin	Altitude	Date de la création de la station	Période d'observation disponible		Nombres d'années d'observations
					début	fin	
52269001	Langres	F500 La Marne de sa source au confluent de la Suize (inclus)	466 m	01/01/1937	1977	2011	34 années

Tableau 11 : Caractéristiques du pluviographe de Langres

Les durées de retour de précipitations pour les épisodes de durée 1h, 2h, 3h, 6h, 12h et 24h, obtenues par la méthode du renouvellement, ont été fournies par METEO-France sur la période 1977-2011 (soit 35 années d'observations).

3.4.2. Les hauteurs de précipitation

Dans le tableau ci-dessous, nous avons synthétisé les quantiles des hauteurs de précipitations pour les durées de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans pour les épisodes pluvieux de durée 1h, 2h, 3h, 6h, 12h et 24h.

Durée de la pluie \ Période de retour	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h	48 h	72 h
5 ans	20,9 mm	26,8 mm	31,8 mm	39,5 mm	47,5 mm	56,1 mm	73,0 mm
10 ans	24,3 mm	29,5 mm	34,6 mm	43,3 mm	53,7 mm	61,9 mm	79,6 mm
20 ans	27,4 mm	31,7 mm	36,7 mm	46,5 mm	59,5 mm	67,2 mm	85,2 mm
30 ans	29,2 mm	32,7 mm	37,7 mm	48,1 mm	63,0 mm	70,2 mm	88,2 mm
50 ans	31,3 mm	33,9 mm	38,8 mm	49,9 mm	67,2 mm	73,7 mm	91,7 mm
100 ans	34,2 mm	35,3 mm	40,1 mm	52,0 mm	73,0 mm	78,4 mm	95,9 mm

Tableau 12 : Quantiles des hauteurs de précipitations au pluviographe de Langres

3.4.3. Comparaison avec les données SHYPRE

Le tableau suivant permet de comparer les résultats des deux méthodes : d'une part les données à la station de Langres obtenues par la méthode de renouvellement et les données obtenues par la méthode SHYPRE :

T = 10 ans	Hauteur de pluie maxi (mm)			
	<u>Méthode SHYPRE</u>	<u>Méthode du renouvellement</u>	<u>Ecart relatif</u>	<u>Ecart absolu</u>
1 h	26,4 mm	24,3 mm	2,1 mm	8%
3 h	36,7 mm	29,5 mm	7,2 mm	20%
6 h	45,6 mm	34,6 mm	11,0 mm	24%
12 h	55,7 mm	43,3 mm	12,4 mm	22%
24 h	67,4 mm	53,7 mm	13,7 mm	20%
48 h	83,5 mm	61,9 mm	21,6 mm	26%

T = 100 ans	Hauteur de pluie maxi (mm)			
	<u>Méthode SHYPRE</u>	<u>Méthode du renouvellement</u>	<u>Ecart relatif</u>	<u>Ecart absolu</u>
1 h	40,8 mm	34,2 mm	6,6 mm	16%
3 h	53,3 mm	35,3 mm	18,0 mm	34%
6 h	64,4 mm	40,1 mm	24,3 mm	38%
12 h	78,1 mm	52,0 mm	26,1 mm	33%
24 h	92,0 mm	73,0 mm	19,0 mm	21%
48 h	109,3 mm	78,4 mm	30,9 mm	28%

Tableau 13 : Comparaison des hauteurs de pluie obtenues par la méthode SHYPRE et au pluviographe de Langres

De cette analyse, il ressort les constatations suivantes pour les durées de 1h à 24h :

- dans tous les cas, les hauteurs de pluies estimées par la méthode SHYPRE sont supérieures aux quantiles estimés au pluviographe de Langres,
- les écarts pluviométriques entre les deux méthodes sont importants : ils peuvent monter jusqu'à 34 %.

3.5. Définition des courbes Intensité-Durée-Fréquence de référence sur le bassin versant de l'Apance

3.5.1. Analyse comparative des pluies journalières et des pluies de 24 heures

Le tableau ci-dessous présente un comparatif des estimations des hauteurs des hauteurs de précipitations en 24 heures obtenues par l'analyse des différentes sources disponibles dans le cadre de l'étude (chroniques de pluies aux pluviomètres situés à proximité, données du pluviographe de Langres et enfin les données issues de la méthode SHYPRE).

A titre indicatif les valeurs retenues par ISL dans son étude hydrologique de 2004 sont reprises également dans ce tableau.

	Hauteurs de précipitations 24h à Bourbonne-les-Bains	Méthode SHYPRE	ISL - 2004	Pluviographe de Langres	Ecart hauteur P24h à Bourbonne / SHYPRE	Ecart hauteur P24h à Bourbonne / Langres	Ecart hauteur P24h à Bourbonne / ISL 2005
P ₂	52,1	51,9	43,3	47,5	0%	9%	17%
P ₅	68,5	60,7	66,1	53,7	11%	22%	4%
P ₁₀	79,4	67,4	79,8	59,5	15%	25%	-1%
P ₂₀	89,8	74,3	-	63,0	17%	30%	
P ₅₀	103,3	84,1	110,6	67,2	19%	35%	-7%
P ₁₀₀	113,4	92,0	114,0	73,0	19%	36%	-1%

Tableau 14 : Comparaison des pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans obtenues par les différentes sources étudiées

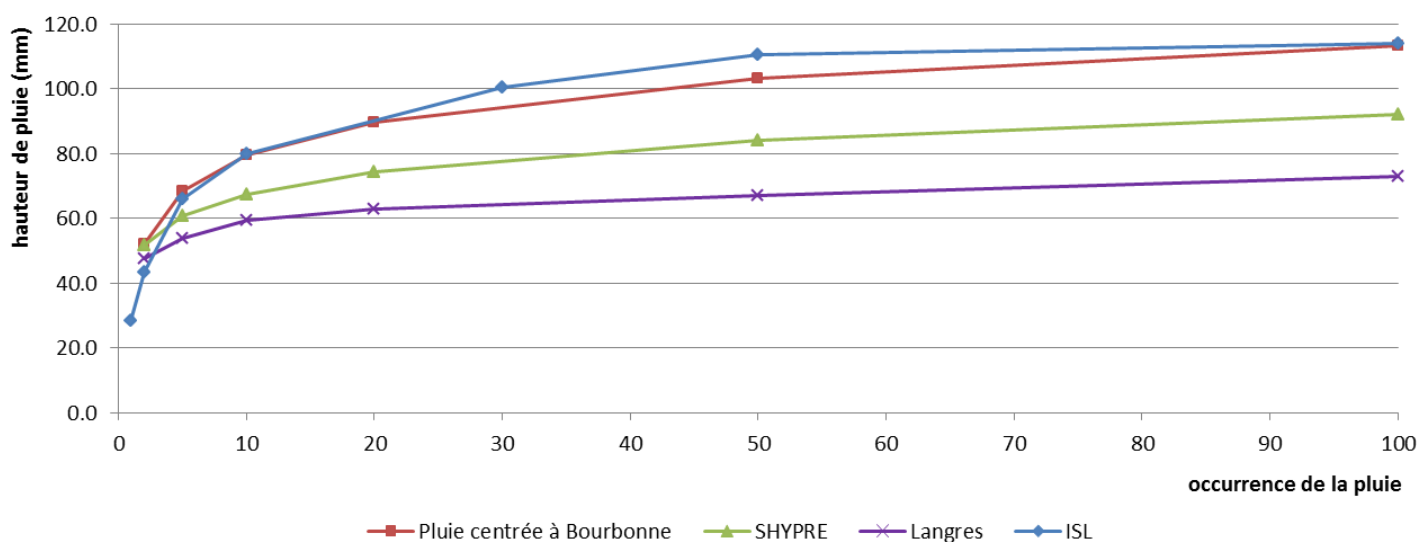


Figure 4 : Comparaison des pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans obtenues par les différentes sources étudiées

Au regard de ces résultats, les constatations suivantes peuvent être établies :

- les pluies 24h à Bourbonne-les-Bains sont supérieures aux valeurs issues de la méthode de SHYPRE ou du pluviographe de Langres,
- les hauteurs de pluie 24h estimées à Bourbonne-les-Bains sont globalement du même ordre de grandeur que les valeurs définies par ISL dans son étude hydrologique de 2004.

Il est par conséquent choisi de retenir les hauteurs caractéristiques déterminées à la station de Bourbonne-les-Bains comme hauteurs caractéristiques de pluie 24h sur le bassin versant de l'Apance :

	2	5	10	20	50	100
P24h	52,1 mm	68,5 mm	79,4 mm	89,8 mm	103,3 mm	113,4 mm

Tableau 15 : Pluies 24 heures d'occurrence 2 à 100 ans caractéristiques du bassin versant de l'Apance

3.5.2. Construction des courbes IDF

Une fois les hauteurs de précipitations 24 h d'occurrence 2 à 100 ans fixées sur le bassin versant de l'Apance, une répartition horaire de ces quantiles a été établie sur la base de la répartition horaire des données SHYPRE. Le tableau ci-dessous synthétise ainsi les quantiles des hauteurs de précipitations retenues pour les durées de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans pour les épisodes pluvieux de durée 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 24h, 48 h et 72 h.

Durée de la pluie Période de retour	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	12 h	24 h	48 h	72 h
	2 ans	17,9	22,3	26,1	29,0	33,3	41,7	52,1	66,3
5 ans	25,4	31,1	36,1	39,8	45,4	55,9	68,5	85,9	100,1
10 ans	31,1	37,7	43,2	47,5	53,7	65,6	79,4	98,4	114,4
20 ans	37,0	44,1	50,3	54,9	61,6	75,1	89,8	110,0	127,0
50 ans	44,6	52,4	59,2	64,4	72,0	87,1	103,3	124,2	142,1
100 ans	50,3	58,7	65,7	71,1	79,4	96,3	113,4	134,7	152,7

Tableau 16 : Hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) retenues sur le bassin versant de l'Apance

Ces quantiles permettent de calculer les coefficients de la formule de Montana qui est une représentation mathématique reliant l'intensité de la pluie à la durée de l'évènement considéré.

$$i(T) = a(T) \times t^{-b(T)}$$

avec i : intensité pluviométrique (mm/h)
 t : durée de la pluie (mn)
 T : période de retour de l'évènement

Le tableau ci-après présente, pour les périodes de retour de 2 à 100 ans, les coefficients a et b de la formule de MONTANA :

Période de retour	Durée de la pluie					
	1h < t < 6h		6h < t < 24h		24h < t < 72h	
	a	b	a	b	a	b
2 ans	258,0	0,65	300,0	0,68	235,6	0,64
5 ans	404,5	0,68	473,2	0,70	333,7	0,65
10 ans	535,2	0,69	613,4	0,72	425,0	0,67
20 ans	690,6	0,71	748,4	0,73	542,5	0,68
50 ans	895,5	0,73	931,5	0,74	750,2	0,71
100 ans	1063,3	0,75	1047,5	0,74	948,3	0,73

Tableau 17 : Coefficients de Montana caractéristiques du bassin versant de l'Apance calculés à partir des données pluviométriques retenues

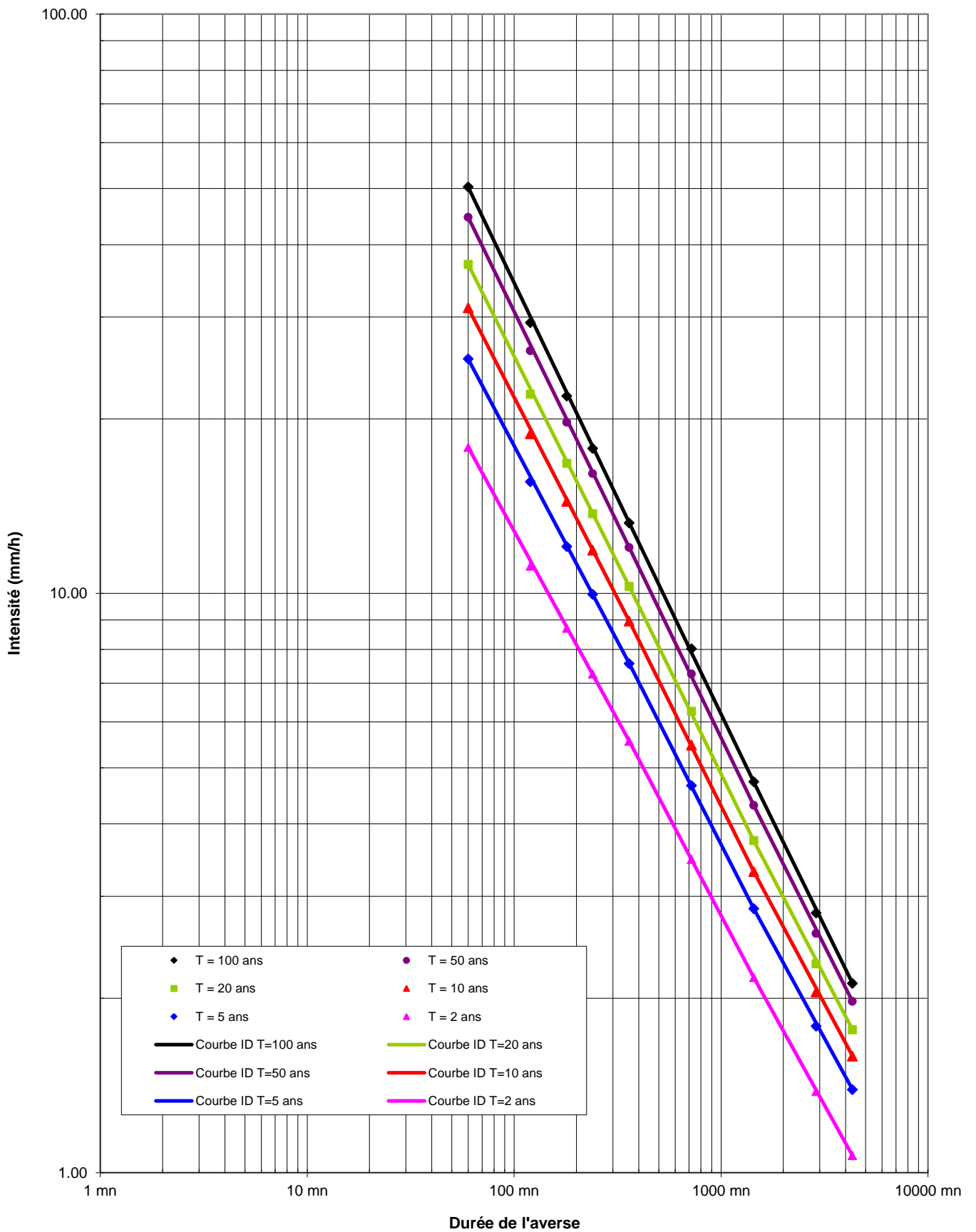


Figure 5 : Courbes Intensité-Durée-Fréquence du bassin versant de l'Apance

3.6. Cas des pluies des novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2012

- a) Estimation de l'occurrence des événements pluvieux à l'origine des dernières crues remarquables de l'Apance

Sur la base de la répartition horaire des pluies à Bourbonne-les-Bains définie précédemment (cf. Tableau 16 page 23), il est proposé ci-après une analyse de l'occurrence des événements pluvieux ayant conduit aux dernières inondations, à savoir novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2011. Cette analyse est proposée dans le tableau ci-dessous :

	date	Hauteur de pluie relevée	Occurrence estimée
1^{er} jr	10/11/1996	12 mm	< 5 ans
2^{ème} jr	11/11/1996	48 mm	< 5 ans
3^{ème} jr	12/11/1996	78,4 mm	~ 10 ans
Cumul 1 jr	12/11/1996	78,4 mm	~ 10 ans
Cumul 2 jrs	11-12/11/1996	126,4 mm	~ 50 ans
Cumul 3 jrs	10-12/11/1996	137,4 mm	~ 50 ans
Cumul sur les 15 jours précédents la crue	28/10 au 12/11	193,6 mm	-

	date	Hauteur de pluie relevée	Occurrence estimée
1^{er} jr	27/12/2001	9 mm	< 5 ans
2^{ème} jr	28/12/2001	10 mm	< 5 ans
3^{ème} jr	29/12/2001	35 mm	< 5 ans
Cumul 1 jr	29/12/2001	35 mm	< 5 ans
Cumul 2 jrs	28-29/12/2001	45 mm	< 5 ans
Cumul 3 jrs	27-29/12/2001	54 mm	< 5 ans
Cumul sur les 15 jours précédents la crue	14/12 au 29/12	83 mm	-

	date	Hauteur de pluie relevée	Occurrence estimée
1^{er} jr	14/12/2011	9,7 mm	< 5 ans
2^{ème} jr	15/12/2011	37 mm	< 5 ans
3^{ème} jr	16/12/2011	45 mm	< 5 ans
Cumul 1 jr	16/12/2011	45 mm	< 5 ans
Cumul 2 jrs	15-16/12/2011	82 mm	< 5 ans
Cumul 3 jrs	14-16/12/2011	91,7 mm	< 10 ans
Cumul sur les 15 jours précédents la crue	01/12 au 16/12	193,2 mm	-

Tableau 18 : Estimation de l'occurrence des événements pluvieux de novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2011

Il est à noter que ces hauteurs pluviométriques correspondent aux hauteurs mesurées à la station de Bourbonne-les-Bains. Elles peuvent par conséquent être sous-estimées, notamment en 2011, où il est connu que le pluviomètre présentait des dysfonctionnements.

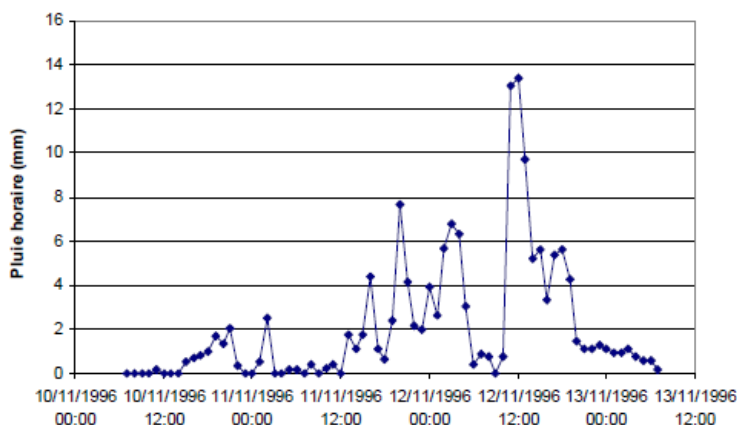
b) Analyse

- Précision concernant l'occurrence des évènements pluvieux de novembre 1996 et décembre 2011

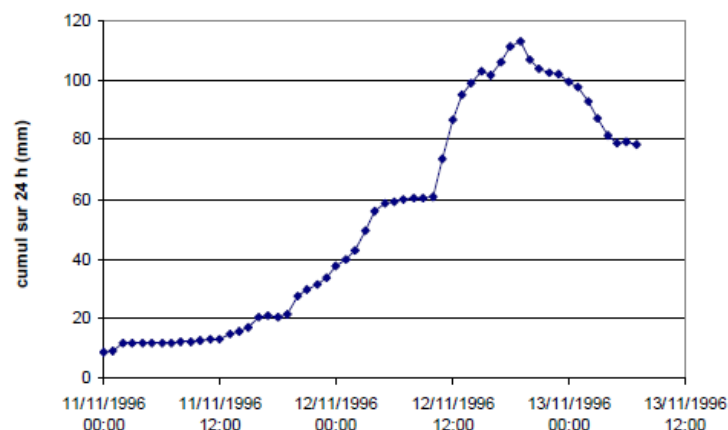
Les occurrences indiquées dans le Tableau 18 ont été estimées sur la base de la pluviométrie journalière mesurée à la station de Bourbonne-les-Bains. Une répartition de ces cumuls sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres lors de ces évènements permet de préciser dans une certaine mesure cette occurrence.

Dans son étude hydrologique de 2004, ISL a ainsi analysé l'évènement pluvieux de novembre 1996. La conclusion de cette analyse est la suivante :

« Un cumul sur 24 heures consécutives en glissant dans le temps indique que, durant une période d'environ 12 heures, la pluie journalière peut être considérée supérieure à 100 mm. Elle atteint même **110 mm, c'est-à-dire la valeur de la pluie centennale** à Bourbonne-les-Bains. »



Pluviométrie horaire à Bourbonne-les-Bains



Cumul glissant sur 24 heures à Bourbonne-les-Bains

Figure 6 : Caractérisation de l'évènement pluvieux de novembre 1996 sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres

(Source : ISL 2004)

Le même exercice est réalisé pour l'évènement pluvieux de décembre 2011, afin d'avoir une meilleure idée de son déroulement et d'identifier le pic de pluie :

Durée de la pluie	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	12 h	24 h	48 h	72 h
Cumul pluviométrique glissant	15 mm	24 mm	28 mm	30 mm	38 mm	68 mm	86 mm	95 mm	106 mm
Occurrence estimée	2 ans	2 ans	2 ans	2 ans	< 5 ans	10 ans	~ 20 ans	~ 10 ans	~ 10 ans

Tableau 19 : Caractérisation de l'évènement pluvieux de décembre 2011 sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres

En cumul glissant, la pluie 24 h de l'évènement pluvieux de décembre 2011 est de l'ordre de 86 mm, ce qui correspond à une occurrence de l'ordre de 20 ans.

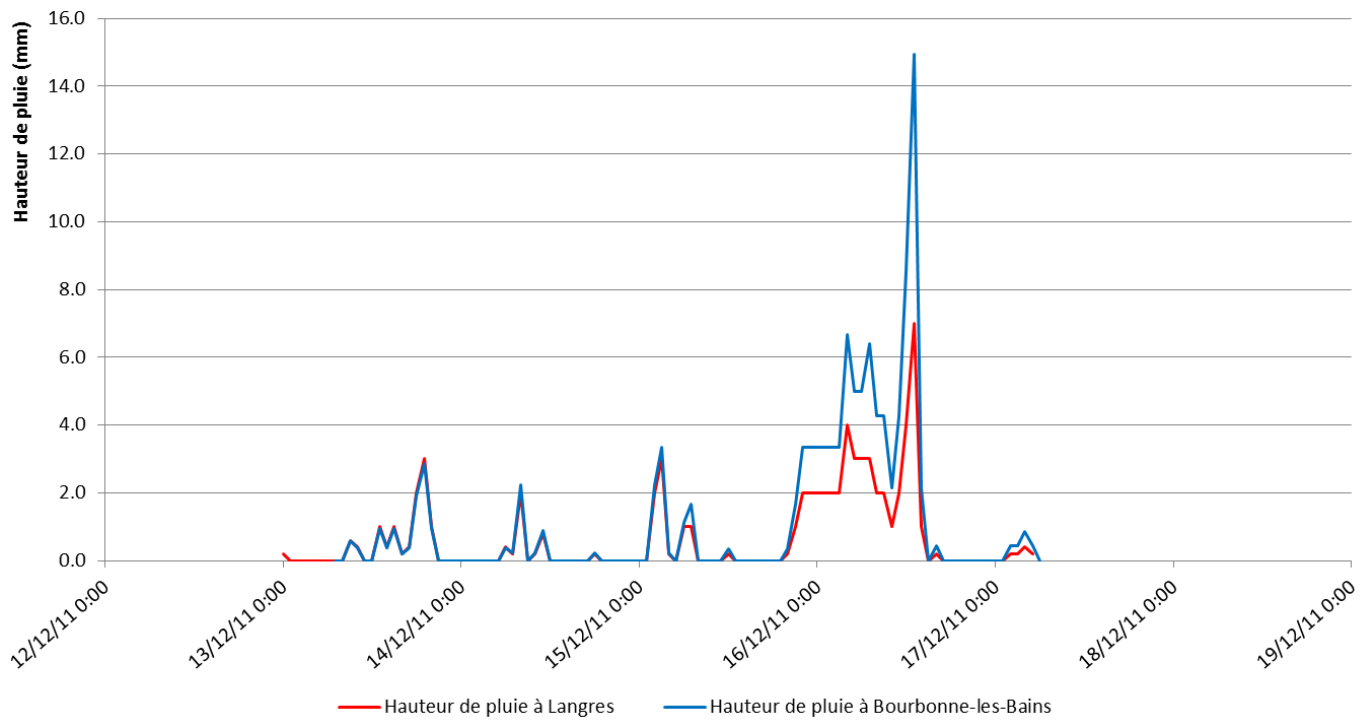


Figure 7 : Pluviométrie horaire à Bourbonne-les-Bains lors de l'évènement de décembre 2011 caractérisée sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres

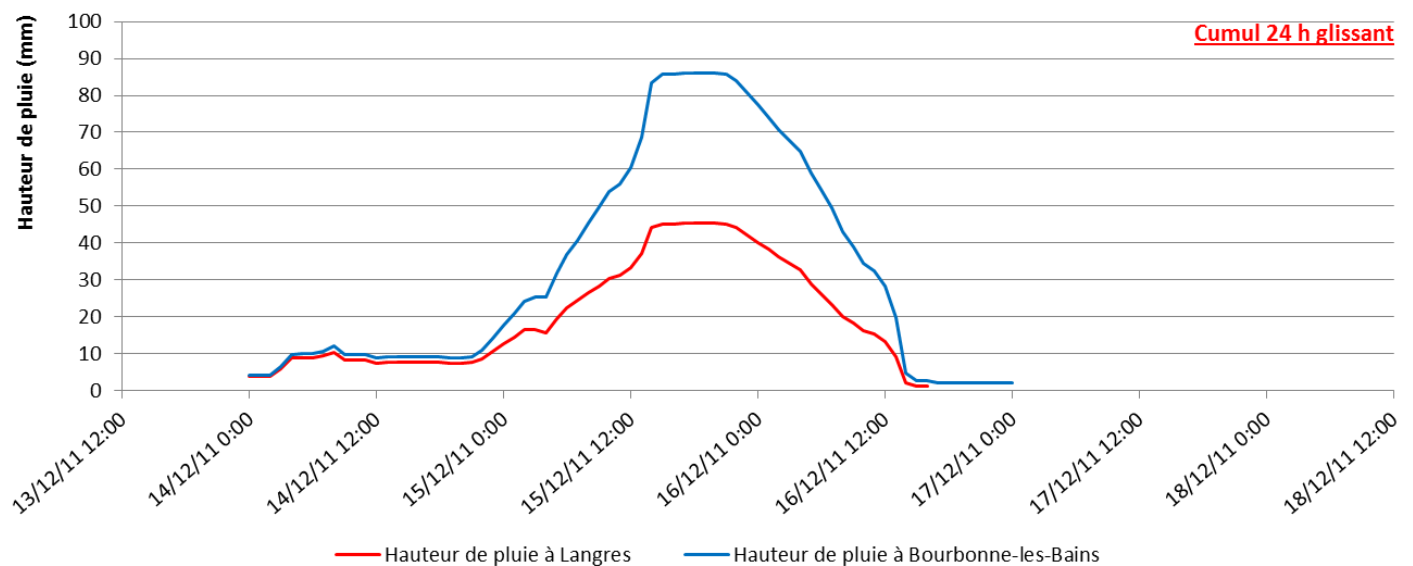


Figure 8 : Cumul glissant sur 24 h à Bourbonne-les-Bains lors de l'évènement de décembre 2011

- Comparaison des cumuls pluviométriques des 3 évènements sur les 15 jours précédents les crues

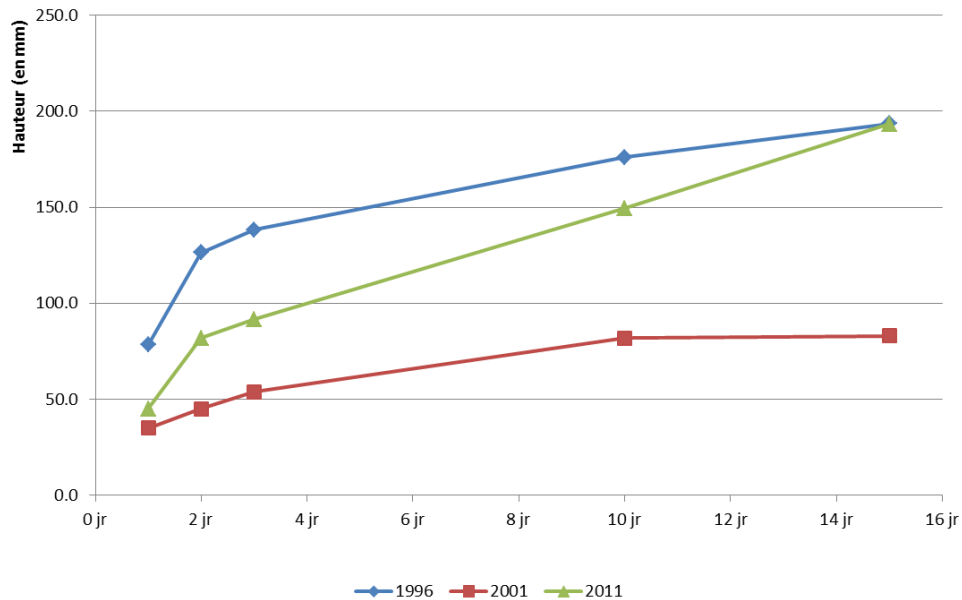


Figure 9 : Comparaison des cumuls pluviométriques de novembre 1996, décembre 2001 et décembre 2011

Les évènements pluvieux de 1996 et 2011 présentent des cumuls pluviométriques sur 15 jours du même ordre de grandeur (respectivement 194 mm et 193 mm). Par contre, les cumuls pluviométriques sur 1, 2 et 3 jours ont été nettement supérieurs en 1996.

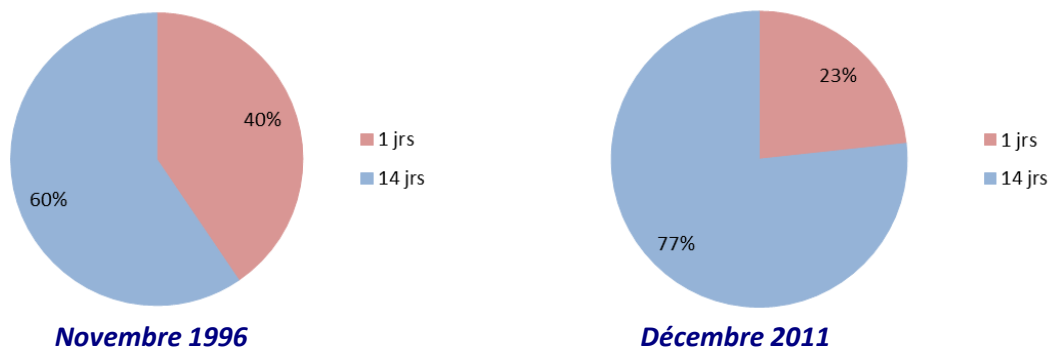


Figure 10 : Répartition des cumuls pluviométriques le jour de la crue et des 14 jours précédents en novembre 1996 et décembre 2011

En décembre 2011, les pluies importantes ayant précédé la crue ont contribué à saturer les sols du bassin versant en profondeur. En cumul glissant, il est estimé que la pluie 24 h à l'origine de la crue est de l'ordre de 86 mm, ce qui correspond à une occurrence de l'ordre de 20 ans. L'ensemble de la pluie a vraisemblablement ruisselé sur le bassin versant sans infiltration.

En novembre 1996, les sols étaient a priori saturés seulement en surface. En cumul glissant, il est estimé que la pluie 24 h à l'origine de la crue est de l'ordre de 110 mm, ce qui correspond à une occurrence de l'ordre de 100 ans. Une partie de la pluviométrie a pu s'infiltrer avant d'être reprise par l'Apance.

En cumul glissant, l'écart estimé entre les pluies 24 h des deux évènements est de l'ordre d'une vingtaine de mm. La différence réside dans une différence de réaction du bassin versant en rapport notamment avec les conditions d'infiltrations vraisemblablement plus favorables en 1996 qu'en 2011. D'autres phénomènes, tels que la présence d'embâcles au droit des ponts de l'Apance, ont par ailleurs pu contribuer à la formation d'une zone inondable plus étendue en 2011 qu'en 1996.

Le cumul pluviométrie de l'évènement de 2001 a été nettement inférieur alors que l'étendue des zones inondables a été supérieure à 1996 mais inférieure à 2011. Cet évènement présente la particularité d'avoir été précédé par la fonte d'une couche de neige de l'ordre de 30 à 40 cm. Les sols étaient quasiment saturés et rendus imperméables par le gel. La combinaison de ces deux phénomènes a conduit à contribuer à augmenter le ruissellement sur le bassin versant et gonfler les débits de l'Apance. En terme de débit, l'évènement de 2001 présente vraisemblablement une occurrence nettement supérieure à l'occurrence de la pluie qui l'a généré.

4. Analyse hydrologique

4.1. Rappel des caractéristiques du bassin versant de l'Apance

Les caractéristiques physiques des sous bassins versants le composant sont rappelées dans le tableau suivant :

N°		Description	Surface du BV (km ²)	Plus long chemin hydraulique (km)	Point haut (m NGF)	Point bas (m NGF)	Pente moyenne
AP1	-	Bassin versant amont de l'Apance	23.3	8.6	480	290	2.2%
AP2	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre le ruisseau de Roteux et la RD144	8.0	3.7	290	277	0.4%
AP3	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre la RD144 et le ruisseau de Paillard	6.1	2.9	277	267	0.3%
AP4a	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance en amont de Bourbonne-les-Bains	3.4	2.5	267	261	0.2%
AP4b	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance dans la traversée de Bourbonne-les-Bains	1.9	1.9	261	254	0.4%
AP5	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance en aval de Bourbonne-les-Bains	3.0	1.1	254	251	0.3%
AP6	-	Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre le ruisseau de Genrupt et Villars-Saint-Marcellin	3.8	2.4	251	249	0.1%
ROT	RG	Bassin versant du ruisseau de Roteux	15.8	7.1	396	290	1.5%
BEAU	RG	Bassin versant du ruisseau de Beaucharmoy	15.6	5.8	445	277	2.9%
BOR	RG	Bassin versant du ruisseau de Borne	12.4	6.8	445	259	2.7%
CHI	RG	Bassin versant du ruisseau de Chien Vau	1.8	2.8	340	259	2.9%
GEN	RG	Bassin versant du ruisseau de Genrupt	15.4	7.6	426	251	2.3%
PIN	RG	Bassin versant du ruisseau de Pintelle	2.5	2.6	365	249	4.4%
PAI	RD	Bassin versant du ruisseau Paillard	5.8	4.8	457	267	4.0%
ETA	RD	Bassin versant du ruisseau de l'Etang	13.9	7.5	485	261	3.0%
MAZ	RD	Bassin versant du ruisseau de la Mazelle	3.3	3.0	337	261	2.5%
Superficie du BV à la station hydrométrique			92 km²	-	-	-	-
Superficie du BV à l'entrée de Bourbonne-les-Bains			95 km²	-	-	-	-
Superficie du BV en amont de la confluence avec le Borne			96 km²	-	-	-	-
Superficie du BV en sortie de Bourbonne-les-Bains			111 km²	-	-	-	-
Superficie totale du bassin versant de l'Apance			136 km²	-	-	-	-

Tableau 20 : Rappel des caractéristiques des sous bassins versants de l'Apance

(Source : Rapport de phase 1)

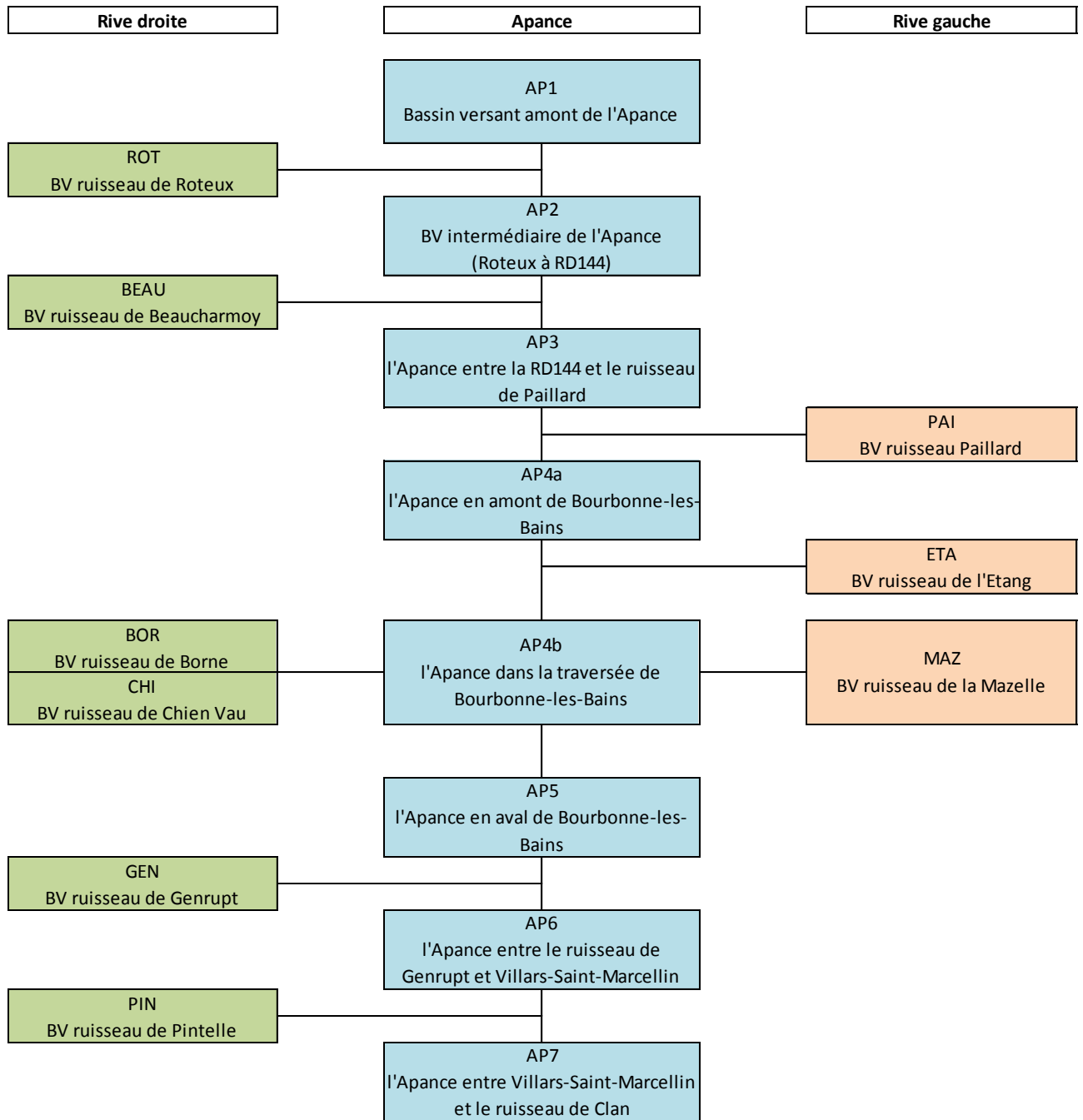


Figure 11 : Schéma hydrologique de l'Apace

Précisions sur les codes tronçons utilisés :

2-3 premières lettres du cours d'eau + 1 chiffre croissant de l'amont vers l'aval

Les caractéristiques du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains sont récapitulées dans le tableau suivant. Le temps de concentration du bassin versant a été calculé par différentes formules usuelles.

	Caractéristiques du bassin versant	Temps de concentration en heure				Moyenne
		Ventura	Kirpich	SCS	Estimation directe	
Surface du BV	114,3 km ²	12 h	4 h	4 h	7 h	7 h
Plus long chemin hydraulique	20,8 km					
Point haut	480 m NGF					
Point bas	251 m NGF					
Pente moyenne	1,1 %					

Tableau 21 : Caractéristiques du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains

Les temps de concentration calculés sont globalement cohérents avec les observations de terrain, qui font état de quelques heures pour la montée des eaux de l'Apance. En 2011, celle-ci a été de 12 heures environ.

En ce qui concerne, le ruissellement sur le bassin versant, il est caractérisé sur la base de l'occupation des sols, des pentes et de la géologie des terrains. Les coefficients de ruissellement de base considérés sont ceux proposés par le SETRA :

Couverture végétale	Morphologie	Pente %	Terrain sable grossier	Terrain limoneux	Terrain argileux
Bois	presque plat ondulé montagneux	p < 5	0,10	0,30	0,40
		5 ≤ p < 10	0,25	0,35	0,50
		10 ≤ p < 30	0,30	0,50	0,60
Pâturage	presque plat ondulé montagneux	p < 5	0,10	0,30	0,40
		5 ≤ p < 10	0,15	0,36	0,55
		10 ≤ p < 30	0,22	0,42	0,60
Culture	presque plat ondulé montagneux	p < 5	0,30	0,50	0,60
		5 ≤ p < 10	0,40	0,60	0,70
		10 ≤ p < 30	0,52	0,72	0,82

Tableau 22 : Coefficients de ruissellement pour T = 10 ans

(Source : SETRA)

	Superficie	Coefficient de ruissellement
Surface urbanisée	3,1 km ²	0,8
Culture et prairies	60,1 km ²	0,6
Forêt	51,1 km ²	0,6
Total	114,3 km²	0,62

Tableau 23 : Occupation des sols du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains et ruissellement

4.2. Estimation des débits de pointe de l'Apance sur la base des données débitmétriques disponibles

4.2.1. Présentation des données disponibles

a) Débits de pointe issus de l'ajustement statistique des données à la station hydrométrique sur l'Apance

Depuis 2001, l'Apance est dotée d'une station hydrométrique implantée sur le pont de la route Maynard. Le bassin versant contrôlé à cette station située en amont de Bourbonne-les-Bains représente une superficie de l'ordre de 92 km². Un ajustement statistique à l'aide d'une loi de Gumbel des débits maximaux annuels disponibles à la station a été réalisé (cf. phase 1). Pour rappel, Le résultat est présenté dans le tableau suivant :

Période de retour (ans)	Quantile Xp (m ³ /s)	Intervalle de confiance	
		XP1	XP2
2	20,1	15,5	24,8
5	28,8	20,9	36,6
10	34,5	23,9	45,0
20	39,9	26,6	53,3
50	47,0	29,9	64,1
100	52,3	32,4	72,2

Tableau 24 : Résultats de l'ajustement statistique des débits de pointe à la station hydrométrique de l'Apance (BV = 92 km²)

Les valeurs sont cependant à prendre avec circonspection dans la mesure où :

- la longueur de la chronique des mesures est faible (seulement 9 ans),
- La validité des débits de crues est sujette à caution : en effet, une partie des eaux de l'Apance, lorsqu'elle atteint un certain niveau, passe de part et d'autre du pont de la route Maynard. La zone de débordement est alors large, à une faible variation de hauteur peut correspondre une forte variation de débit difficilement quantifiable. Il est ainsi estimé qu'au-delà un certain seuil de hauteur, les débits à la station ne sont pas représentatifs du débit de la rivière. Ce seuil correspond globalement à un Q₂.

b) Débits caractéristiques disponibles autres stations hydrométriques existantes

La station de Monthureux-sur-Saône (référence Banque HYDRO : U00020010) est traditionnellement considérée comme la station hydrométrique de référence pour l'Apance.

En plus de cette station, un recensement auprès de la Banque HYDRO des stations hydrométriques existant sur des bassins versants voisins et présentant globalement des caractéristiques similaires à celui de l'Apance été établi. 3 stations hydrométriques ont plus particulièrement été retenues :

Code station	Dénomination	Département	Distance à Bourbonne-les-Bains (km)	Gestionnaire	Altitude (m NGF)	S BV (km ²)	Date début	Période des données disponibles (années)	Qualité des mesures		
									basses eaux	moyennes eaux	hautes eaux
U0020010	La Saône à Monthureux-sur-Saone	88	18	DREAL Franche Comté	245	228	1986	26	douteuse	bonne	bonne
B1052010	Le Mouzon à Sommerécourt	52	32	DREAL Lorraine	311	212	1995	17	bonne	bonne	bonne
U0715010	La Resaigne à Coublanc	52	35	DREAL Franche Comté	242	54	1996	16	bonne	bonne	bonne

Tableau 25 : Caractéristiques des stations hydrométriques situées dans un rayon de 40 km autour de Bourbonne-les-Bains

Pour rappel les débits caractéristiques de pointe à ces 3 stations sont récapitulés dans le Tableau 26.

Code station	Dénomination	S BV (km ²)	QIX (m ³ /s)					Débit spécifique (l/s/km ²)					
			2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	Qsp 2	Qsp 5	Qsp 10	Qsp 20	Qsp 50	
B1052010	Le Mouzon à Sommerécourt	212	54	94	120	150	-	255	443	566	708	-	
U0020010	La Saône à Monthureux-sur-Saone	228	72	110	130	150	180	316	482	570	658	789	
U0715010	La Resaigne à Coublanc	54	20	28	32	37	-	370	519	593	685	-	
								moyenne	314	481	576	684	789
								min	255	443	566	658	789
								max	370	519	593	708	789

Tableau 26 : Synthèse de débits de crue caractéristiques aux stations hydrométriques retenues pour l'analyse débitmétrique

Les débits de crue spécifiques sur les 3 stations considérés sont globalement du même ordre de grandeur. Il est à noter qu'à la station de Monthureux-sur-Saône, les débits maximaux instantanés ont été revus à la hausse depuis l'étude ISL de 2004 : +10 m³/s pour Q₅, Q₁₀ et Q₂₀.

c) Débits issus de la méthode SHYREG

La méthode SHYREG été développée pour permettre une première estimation rapide des débits de référence dans le cadre d'élaboration des Plans de Prévention du Risque Inondation.

La méthode a été calée sur les quantiles de débits de pointe et journalier des bassins versants jaugés, dans une gamme de superficie de 10 à 1000 km². Son domaine d'application doit être limité à cette gamme de superficies et aux cours d'eau qui ne présentent pas de spécificités hydrologiques et hydrauliques marquées : bassins excessivement karstiques, bassins avec des champs d'inondation importants...

SHYREG est une application régionale de la méthode SHYPRE, qui associe un générateur de pluies horaires et une modélisation de la pluie en débit pour générer des scénarios de crue.

Le développement de SHYREG a nécessité la régionalisation du générateur de pluies horaires et une approche régionale de la modélisation de la pluie en débit. SHYREG aboutit à l'élaboration de bases de données pixelisées au km² des pluies et des débits qui sont utilisées pour estimer, en tout point du réseau hydrographique, les débits de différentes durées et de différentes fréquences.

Les données SHYPRE nous ont été fournies par la DDT 52 en différents points du réseau hydrographique de l'Apance. Elles sont récapitulées dans le Tableau 27.

DDT de la Haute-Marne - Révision du PPRI de la commune de Bourbonne-les-Bains
- Rapport de phase 2.1 vA -

	Surface du BV au point considéré (km ²)	1000 ans (m ³ /s)	500 ans (m ³ /s)	100 ans (m ³ /s)	20 ans (m ³ /s)	10 ans (m ³ /s)	5 ans (m ³ /s)	2 ans (m ³ /s)
<i>Amont BV</i>	5	15.2	12.8	8.3	5.2	4.2	3.4	2.4
<i>En amont de Larivière-Arnoncourt</i>	10.7	27.3	22.9	14.9	9.5	7.7	6.2	4.5
<i>En aval de Larivière-Arnoncourt</i>	18.6	42.8	36.2	23.9	15.4	12.5	10.1	7.4
<i>En amont de la confluence avec le ru Roteux</i>	23.2	52.5	44.3	29.4	19	15.5	12.5	9.2
<i>En amont de la confluence avec le ru Beaucharmoy (RD144)</i>	47	81.8	69.2	46.3	30.3	24.9	20.3	14.9
<i>En amont de la confluence avec le ru Paillard</i>	68.3	104	88.3	59.4	39.2	32.4	26.4	19.5
<i>Au droit de la route du Maynard</i>	77.4	117.5	99.9	67.4	44.7	36.9	30.2	22.4
<i>En entrée de Bourbonne-les-Bains</i>	95.8	136.7	116.3	78.9	52.6	43.6	35.7	26.6
<i>En aval de la confluence avec le ruisseau de Borne</i>	110.6	147	125.1	85	56.8	47.2	38.7	28.9
<i>En aval de Bourbonne-les-Bains</i>	113.8	150	127.7	86.8	58.1	48.3	39.6	29.5
<i>En aval Villars-Saint-Marcellin</i>	135.4	162	137.9	94	63.1	52.6	43.2	32.3
<i>En amont de la confluence avec le ruisseau de Clan</i>	136.6	162.9	138.7	94.6	63.5	52.9	43.5	32.5
<i>Le Grand Moulin - En amont du ru de Ferrières</i>	158.2	178.8	152.3	104.2	70.2	58.6	48.3	36.1
<i>Moulin de l'Achat</i>	189.3	200.9	171.4	117.8	79.8	66.8	55.2	41.4
<i>En amont de Chatillon sur Saône</i>	196.1	204.4	174.4	119.9	81.3	68.1	56.3	42.3
<i>En amont de la confluence avec la Saône</i>	197.4	205.3	175.2	120.5	81.7	68.4	56.5	42.5

Tableau 27 : Données débitmétriques SHYREG en différents points du réseau hydrographique de l'Apance

(Source : CEMAGREF)

4.2.2. Application au bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains

a) Méthode

La superficie du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains est estimée de l'ordre de 114,3 km².

Pour évaluer le débit de l'Apance à partir des données débitométriques disponibles, nous appliquerons pour cela la **formule de Meyer** qui indique que le rapport de débits entre 2 bassins versants est égal au rapport de la surface des bassins versants, pondéré par un coefficient α , coefficient qui prend en compte les caractéristiques hydrogéomorphologiques du bassin.

$$Q_1 = Q_2 \times (S_1 / S_2)^\alpha$$

avec Q : débit

C : coefficient de ruissellement moyen

S : superficie du bassin versant

α : exposant variant de 0,5 à 1 suivant les régions, le climat et type de sol. Pour les études en France Métropolitaine, une valeur de 0,8 est généralement retenue.

• Résultats

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
<i>Estimation à partir des débits de pointe estimés à la station hydrométrique de l'Apance</i>	24 m ³ /s [18 ; 30]*	34 m ³ /s [25 ; 45]	41 m³/s [28 ; 55]	47 m ³ /s [32 ; 63]	56 m ³ /s [36 ; 76]	62 m³/s [39 ; 86]
<i>Estimation à partir des débits de pointe de la Saône à Monthureux-sur-Saône</i>	41 m ³ /s [35 ; 50]*	63 m ³ /s [55 ; 75]	75 m³/s [65 ; 90]	86 m ³ /s [75 ; 110]	104 m ³ /s [80 ; 135]	115 m³/s [85 ; 145]
<i>Données SHYREG</i>	30 m ³ /s	40 m ³ /s	48 m³/s	58 m ³ /s	73 m ³ /s	87 m³/s

(*) Intervalles de confiance à 90 %

Tableau 28 : Estimation du débit de pointe de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains par différentes méthodes (BV = 114,3 km²)

b) Bilan

Les estimations réalisées à partir des données de la station hydrométrique sur l'Apance et les débits SHYREG sont du même ordre de grandeur. Or on sait que les débits à cette station hydrométrique sont sous-évalués en raison de la mauvaise configuration du site d'implantation de la station.

Par ailleurs, les débits SHYREG ont été évalués sur la base de la pluviométrie issue de la méthode SHYPRE. Or l'analyse pluviométrique menée au § 2. a permis de mettre en évidence une probable sous-évaluation des hauteurs de pluies obtenus par cette méthode sur le bassin versant de l'Apance.

Ces estimations sont par conséquent considérées comme sous-évaluées.

Les estimations obtenues à partir de la station hydrométrique de la Saône à Monthureux-sur-Saône donnent un débit de pointe décennal de l'ordre de 75 m³/s et un débit de pointe centennal de l'ordre de 115 m³/s avec comme intervalle de confiance à 90 % l'intervalle suivant : [85 m³/s - 145 m³/s].

La prise en compte de cette station permet d'approcher l'ordre de grandeur des débits de l'Apance mais conduit vraisemblablement à les sous-estimer. En effet, le bassin versant de la Saône à Monthureux-sur-Saône est constitué de formations géologiques plus perméables que celles présentes sur le bassin versant de l'Apance.

4.3. Détermination du débit décennal par application des formules de l'hydrologie classique

4.3.1. La méthode CRUPEDIX

La formule de Crupedix est la suivante :

$$Q_{10} = R \times S^{0,8} \times (P_{10}/80)^2$$

avec Q : débit (m³/s)

S : superficie du bassin versant (km²)

P₁₀ : la pluie journalière maximale annuelle décennale P₁₀ = 70 mm

R : un coefficient régional pris égal à 2,2. Ce coefficient a été retenu par inversion de la formule de CRUPEDIX et application aux stations de la Saône à Monthureux-sur-Saône et du Mouzon à Sommerécourt pour le débit de pointe décennal. Le coefficient ainsi obtenu à ces deux stations est du même ordre de grandeur.

Le domaine de validité de cette formule est le suivant :

- à partir de 10 km², sauf pour la façade méditerranéenne (50 km²), et jusqu'à 100 km²
- formule valable pour le seul débit décennal
- l'intervalle (Q/2,2Q) représente un intervalle de confiance qui a une probabilité de plus de 80 % d'encadrer la valeur calculée

4.3.2. La méthode rationnelle

La formule rationnelle est la suivante :

$$Q_{10} = K C_{10} I_p S$$

avec Q₁₀: débit (m³/s)

K : constante pour homogénéiser les unités (K = 1/3.6)

I_p : intensité de la pluie de durée égale au temps de concentration du BV considéré (mm/h)

S : superficie du bassin versant (km²)

C₁₀ : coefficient de ruissellement de pointe (0 < C < 1) pour une occurrence décennale

Bien que le domaine de validité usuel de cette formule concerne les bassins versants inférieurs à 10 km², il peut exceptionnellement être étendu aux BV allant jusqu'à 100 km². Cette formule est utilisée ici à titre indicatif.

4.3.3. Résultats

Le tableau suivant récapitule les débits décennaux obtenus par les différentes méthodes envisagées et leur intervalle de confiance associé.

	Formule de Meyer	CRUPEDIX	Rationnelle
Q_{10} (m ³ /s)	75 m ³ /s [65 ; 90]	75 m ³ /s [38 ; 150]	97 m ³ /s -

Tableau 29 : Débits de pointe décennaux obtenus par les formules d'hydrologie classiques

4.4. Détermination des débits centennaux et exceptionnels

4.4.1. Formule de Meyer

cf. § 4.2.2. en page 37.

4.4.2. Méthode rationnelle

La formule rationnelle peut être appliquée pour déterminer des débits de pointe d'occurrence supérieure à une période de retour 10 ans sur la base de la formule suivante :

$$Q_T = K C I_p S$$

avec Q_T : (m³/s)

K : constante pour homogénéiser les unités (K = 1/3.6)

I_p : intensité de la pluie d'occurrence T et de durée égale au temps de concentration du BV considéré (mm/h)

S : superficie du bassin versant (km²)

C : coefficient de ruissellement de pointe (0 < C < 1)

- Les coefficients de ruissellement sont estimés à partir de la pluviométrie et des coefficients de ruissellement estimés pour T = 10 ans selon la formule suivante issue du Guide Technique Assainissement Routier du SETRA :

$$C_T = 0,8 \times (1 - P_0/P_T)$$

avec P_T : pluie journalière de période de retour T (mm)

P_0 : rétention initiale (mm) si $C_{10} < 0,8$: $P_0 = (1 - C_{10}/0,8) \times P_{10}$

si $C_{10} \geq 0,8$: $P_0 = 0$ et $C_T = C_{10}$

- Le temps de de concentration est estimé à partir de la formule suivante issue du Guide Technique Assainissement Routier du SETRA :

$$t_{C(T)} = t_{C10} \times (P_T - P_0) / (P_{10} - P_0)]^{-0.23}$$

avec $t_{C(T)}$: temps de concentration pour la période de retour considérée (mm)

t_{C10} : temps de concentration décennal (mm)

$P_{(T)}$: pluie journalière de période de retour T (mm)

P_{10} : pluie journalière décennale (mm)

4.4.3. Méthode du Gradex

La méthode du GRADEX a été conçue, mise au point, testée et validée par le groupe de recherche d'EDF (Guillot and Duband, 1967). Elle a pour but de rechercher les débits maximaux de crues pour des fréquences d'apparition rares à très rares (temps de retour de plus de 100 ans).

Cette méthode repose sur le fait que, à partir du moment où un bassin versant est saturé, tout supplément de pluie provoquera un supplément égal de ruissellement. Le principe est ainsi de considérer qu'à partir d'une certaine période de retour (en général la décennale) tout incrément de pluie se traduit par un incrément de débit équivalent. En d'autres termes, au-delà de la crue décennale, la loi d'extrapolation des débits est la même que celle des pluies au droit des stations pluviométriques locales.

Cette méthode est par conséquent particulièrement adaptée au bassin de versant de l'Apance dont les épisodes de crues correspondent dans une majorité des cas à des sols saturés et gelés. Dans le cas du bassin versant de l'Apance, le point pivot retenu est le débit d'occurrence décennale. Au regard des chroniques de débits disponibles sur la Saône à Monthureux-sur-Saône, ce débit semble être déjà le débit pivot à cette station.

- Estimation du Gradex des pluies de durée D

La formule permettant de déterminer le Gradex des pluies de durée D est la suivante :

$$G_p(D) = [P_T(D) - P_{10}(D)] / (u_{100} - u_{10})$$

avec $G_p(D)$: Gradex des pluies de durée D (mm)
D : temps de concentration du bassin versant (h)
 $P_T(D)$: Pluie de période de retour T et de durée D (mm)
 $P_{10}(D)$: Pluie décennale de durée D (mm)
 u_T et u_{10} : variables réduites de Gumbel pour les périodes de retour T et 10 ans

- Estimation du Gradex des débits de durée D

La formule permettant de déterminer le Gradex des pluies de durée D est la suivante :

$$G_q(D) = S \times G_p(D) / (3,6 \times D)$$

avec $G_q(D)$: Gradex des débits de durée D (m^3/s)
D : temps de concentration du bassin versant (h)
S : superficie du bassin versant (km^2)
 $G_p(D)$: Gradex des pluies de durée D (mm)

- La méthode du Gradex

La formule du Gradex pour déterminer le débit centennal est la suivante :

$$Q_{100} = Q_{10} + \alpha \times (u_T - u_{10}) \times G_q(D)$$

Avec Q_{100} : débit centennal (m^3/s)
 $Gq(D)$: Gradex des débits de durée D (m^3/s)
 α : coefficient d'affinité (rapport entre le débit de pointe des crues et le débit moyen journalier des crues) estimé de l'ordre de 1,5 à la station hydrométrique de la Saône à Monthureux-sur-Saône
 u_T et u_{10} : variables réduites de Gumbel pour les périodes de retour T et 10 ans

4.4.4. La méthode du Gradex esthétique

Dans la méthode du GRADEX, précédemment décrite, la brusque cassure qui affecte la loi des débits au point pivot (démarrage de la loi des pluies) conduit à une surestimation des débits de fréquence intermédiaire (périodes de retour de l'ordre de 50 à 100 ans). Différents développements de la méthode du GRADEX ont été proposés pour élargir son domaine fréquentiel d'application aux événements de période de retour inférieure à 1 000 ans. Parmi ceux-ci, on peut mentionner le modèle du GRADEX esthétique :

$$Q_T = Q_{10} + \alpha \times Gq(D) \times \ln [1 + Gq'(D)/Gq(D) \times (T - T_{10})/T_{10}]$$

avec Q_T : débit de pointe d'occurrence T et de durée D (m^3/s)
 $Gq(D)$: Gradex des débits de durée D (m^3/s)
 α : coefficient d'affinité
 T et T_{10} : les périodes de retour T et $T=10$ ans (pivot),
 $Gq'(D)$: Gradex des débits de durée D et d'occurrence inférieure à 10 ans :

$$Gq'(D) = (Q_{10} - Q_2) / (u_{10} - u_2)$$

 u_T et u_{10} : variables réduites de Gumbel pour les périodes de retour T et 10 ans

4.4.5. Résultats de l'application de la méthode du GRADEX et du GRADEX esthétique

Débit pivot	Débit décennal issu de la méthode rationnelle $Q_{10} = 97 \text{ m}^3/\text{s}$	Débit décennal issu de la formule de Meyer $Q_{10} = 75 \text{ m}^3/\text{s}$
Temps de concentration	7 heures	
P_{10}	54 mm	
P_{100}	80 mm	
Gradex des pluies pour $T > 10$ ans	10,9 mm	
Gradex des débits pour $T > 10$ ans	49,5 m^3/s	
Gradex des débits pour $T < 10$ ans	15,3 m^3/s	49,5 m^3/s
Q_{100} - Méthode du Gradex	270 m^3/s	250 m^3/s
Q_{100} - Méthode du Gradex esthétique	195 m^3/s	185 m^3/s

Tableau 30 : Estimation du débit centennal de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains à l'aide de la méthode du Gradex et du Gradex esthétique

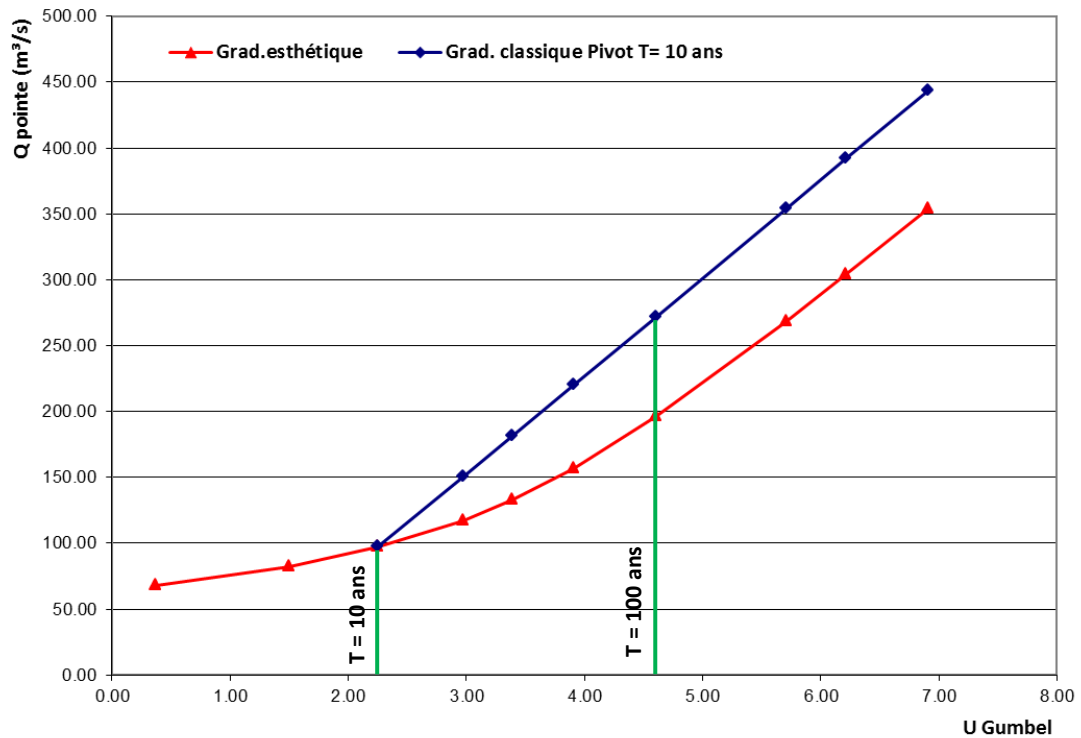


Figure 12 : Extrapolation des débits de pointe de crue par les méthodes du Gradex et du Gradex esthétique sur la base du Q_{10} obtenu par la formule rationnelle

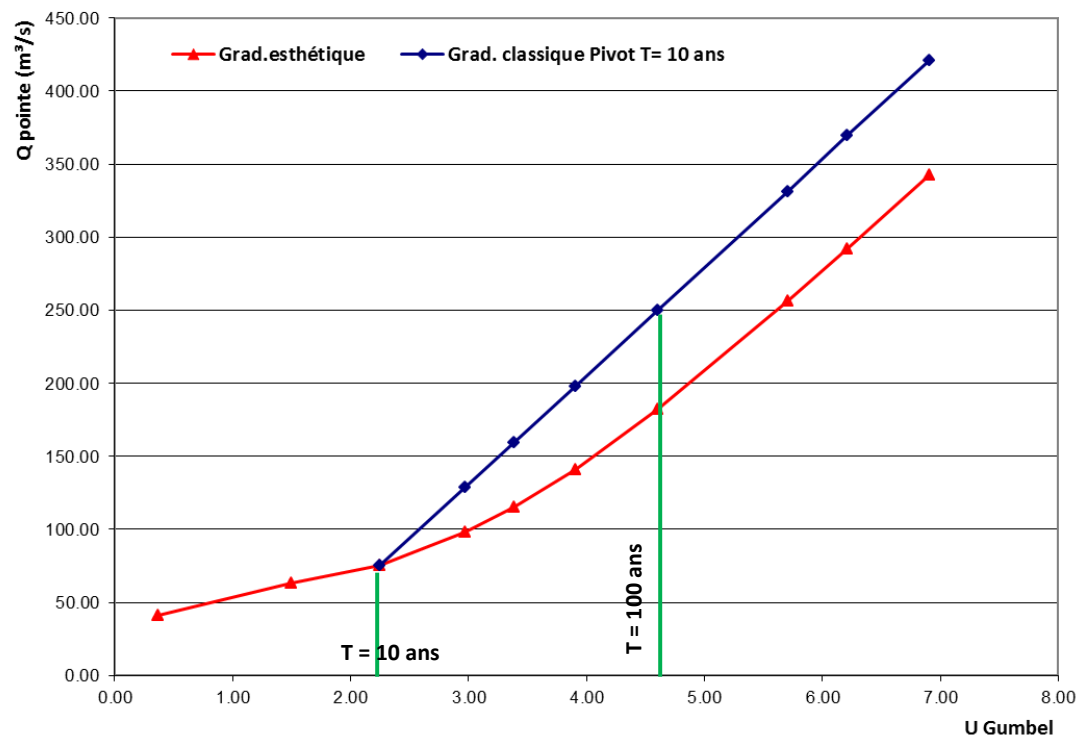


Figure 13 : Extrapolation des débits de pointe de crue par les méthodes du Gradex et du Gradex esthétique sur la base du Q_{10} obtenu par la formule de Meyer

4.4.6. Synthèse

	Formule de Meyer	Rationnelle	Gradex		Gradex esthétique		ISL
10 ans	75 m ³ /s	97 m ³ /s	Q pivot = 75 m ³ /s	Q pivot = 97 m ³ /s	Q pivot = 75 m ³ /s	Q pivot = 97 m ³ /s	-
100 ans	115 m ³ /s	180 m ³ /s	250 m ³ /s	270 m ³ /s	185 m ³ /s	195 m ³ /s	130 m ³ /s
Ratio Q ₁₀₀ /Q ₁₀	1,5	1,9	3,3	2,8	2,4	2	-

Tableau 31 : Récapitulatif des débits de pointe du bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains obtenus par différentes méthodes hydrologiques

La formule de Meyer permet d'évaluer à partir des débits de la Saône à Monthureux-sur-Saône un débit centennal de l'ordre de 115 m³/s (soit Q₁₀₀/Q₁₀ = 1,5). Il est considéré qu'au regard des différences géologiques entre les bassins versants de l'Apance et de la Saône à Monthureux-sur-Saône, le débit estimé par cette formule est vraisemblablement sous-estimé. Cette valeur est par conséquent écartée.

Pour la même raison, il est vraisemblable que le Q₁₀ évalué par cette méthode est également sous-évalué. Il est par conséquent décidé de ne pas retenir les résultats des méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique obtenus sur la base d'un débit de pivot de 75 m³/s.

La fourchette des débits centennaux obtenus par les méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique sur la base du débit pivot obtenu par la méthode rationnelle (Q₁₀ = 97 m³/s) est comprise **entre 195 et 270 m³/s** soit des ratios Q₁₀₀/Q₁₀ de l'ordre de 2 à 2,8. La méthode du GRADEX donne logiquement des débits nettement supérieurs à ceux obtenus par la méthode du GRADEX esthétique, de l'ordre de 28 %. Par ailleurs, les débits obtenus par cette dernière méthode sont du même ordre de grandeur que le débit de pointe estimé à l'aide de la formule rationnelle.

Les valeurs avancées sont globalement supérieures au débit de pointe centennal retenu par ISL dans l'établissement du PPRI en vigueur, à savoir 130 m³/s.

5. Analyse de la crue de décembre 2011

5.1. Méthodologie

Pour reconstituer l'hydrogramme de la crue de 2011, les données suivantes seront exploitées :

- la description du déroulement de l'évènement établi par la commune,
- l'hydrogramme de crue mesuré à la station hydrométrique sur l'Apance : cet hydrogramme tronqué permet d'avoir une idée du début de la montée des débits et du retour à la normale,
- l'hydrogramme de la crue de la Saône à Monthureux-sur-Saône.

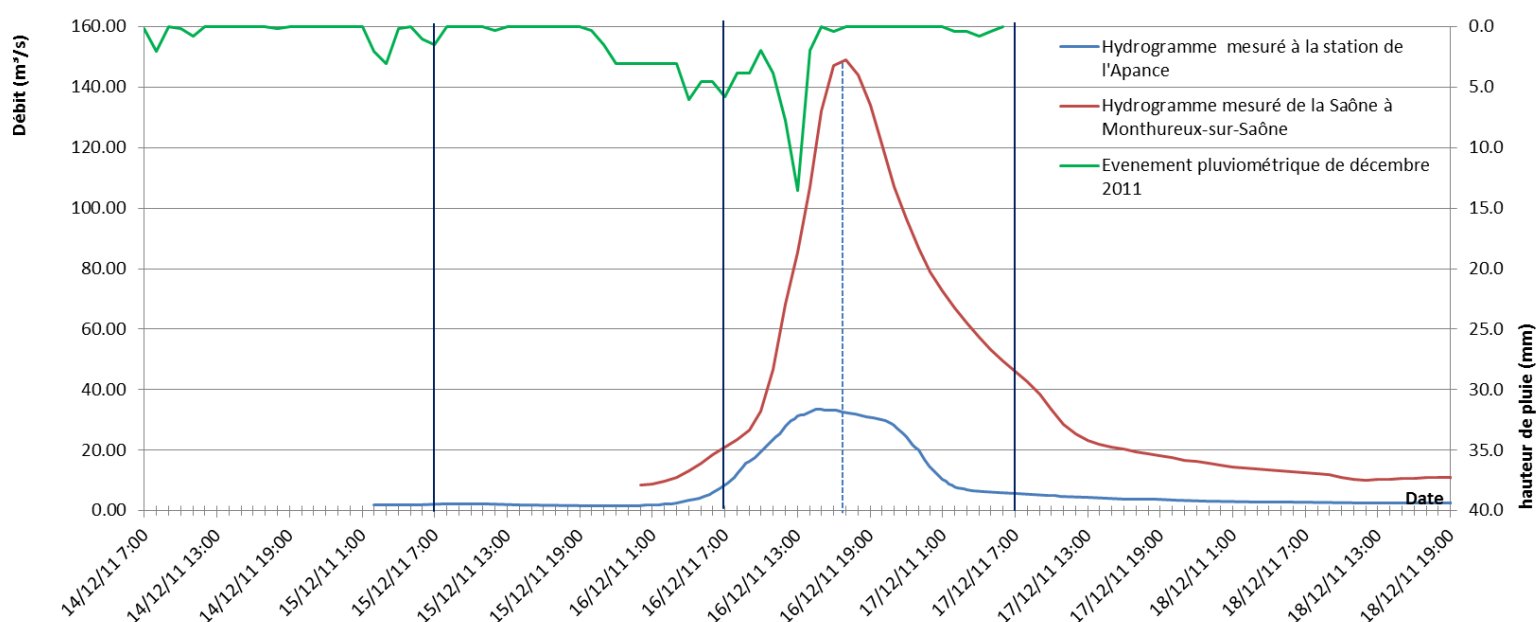


Figure 14 : Hydrogrammes mesurés sur l'Apance (à la station hydrométrique) et de la Saône à Monthureux-sur-Saône lors de la crue de décembre 2011

Comme le laissait pressentir l'analyse a priori de la station de l'Apance (cf. § 4.2.1. a) page 33), le débit de pointe de la crue de décembre 2011 est vraisemblablement sous-estimé. A partir d'un certain seuil, les débits de crue n'ont pu être reconstitués à partir des mesures de hauteur et on constate un « plafonnement » de l'hydrogramme, ce qui nous a été confirmé par le gestionnaire de la station. Cependant, les mesures de hauteurs sont valides et les différentes sources disponibles permettent d'appréhender le déroulement de la crue de décembre 2011 :

- début de la montée des eaux : celui-ci a été enregistré à la station hydrométrique sur l'Apance le 16 décembre à 3 h du matin. La hauteur moyenne dans l'Apance au droit de la station était de l'ordre de 50 cm pour un débit de base de l'ordre de 2-3 m³/s. (Au regard du niveau d'eau dans l'Apance, on suppose que les valeurs fournies par la station sont dans leur plage de validité).

- montée des eaux : le pic de la crue a été constaté vers 15h-17h au niveau du centre urbanisé de la commune, soit un temps de montée de l'hydrogramme pouvant être estimé de l'ordre d'une dizaine d'heures.
- décrue : les niveaux d'eau ont baissés a priori de façon lente mais régulière. A la station hydrométrique de l'Apance, le retour à la normale des niveaux d'eau est mesuré :
 - *le 17/12 à 3 h* : le niveau d'eau dans l'Apance passe en dessous de 1 m ($Q \sim 7 \text{ m}^3/\text{s}$), soit 24 heures environ après le début de l'évènement
 - *le 18/12 à 18h* : le niveau d'eau dans l'Apance passe en dessous de 50 cm ($Q \sim 2,5 \text{ m}^3/\text{s}$) (soit retour au niveau d'eau pré-crue dans l'Apance), soit 2,5 jours environ après le début de l'évènement.

En comparaison avec l'hydrogramme mesuré sur la Saône à la station de Monthureux-sur-Saône :

	la Saône à la station de Monthureux-sur-Saône	l'Apance sur la commune de Bourbonne-les-Bains
Début de la montée des eaux	16/12/2011 à 03 h $Q = 8 \text{ m}^3/\text{s}$	16/12/2011 à 03 h $Q = 2-3 \text{ m}^3/\text{s}$
Pic de la crue	16/12/2011 à 17 h (soit 14 h après le début de la montée des eaux) $Q_p = 149 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit une occurrence vingtennale)	16/12/2011 à 15 h - 17 h (soit 12 h après le début de la montée des eaux) $Q_p = ??$
Descente de l'hydrogramme	$Q < 20 \text{ m}^3/\text{s}$: à partir du 17/12/2011 17 h soit 24 h après le pic et 1,5 jrs après le début de la crue $Q < 10 \text{ m}^3/\text{s}$: à partir du 19/12/2011 0 h	$Q < 7 \text{ m}^3/\text{s}$: à partir du 17/12/2011-3 h soit 10 h après le pic et 24 h après le début de la crue $Q < 2-3 \text{ m}^3/\text{s}$: à partir du 18/12/2011-18 h

Tableau 32 : Comparaison de l'évènement de décembre 2011 à la station de Monthureux-sur-Saône et à Bourbonne-les-Bains

En résumé :

- les temps de montée de l'Apance et la Saône à Monthureux-sur-Saône sont globalement du même ordre de grandeur,
- la décrue a a priori été plus rapide à Bourbonne-les-Bains : une dizaine d'heures contre 2,5 jours pour la Saône à Monthureux-sur-Saône.

5.2. Reconstitution de l'hydrogramme de la crue de décembre 2011

L'hydrogramme reconstitué de la crue de 2011 correspond à la synthèse de :

- l'hydrogramme mesuré sur l'Apance pour la base de l'hydrogramme,
- l'hydrogramme de la Saône à Monthureux-sur-Saône pour la montée : le temps de montée sur les deux bassins versants étant a priori du même ordre de grandeur sur les deux bassins versants considérés.

Afin de pouvoir effectuer l'exercice qui conduira à évaluer le débit de pointe de la crue de l'Apance à Bourbonne-les-Bains à l'aide du modèle hydraulique et des laisses de la crue de 2011 connues, cet hydrogramme a été défini avec plusieurs débits de pointe compris dans l'intervalle [$86 \text{ m}^3/\text{s}$; $260 \text{ m}^3/\text{s}$] :

- fourchette basse = $86 \text{ m}^3/\text{s}$: ce débit correspond à la transposition du débit de pointe de la Saône à Monthureux-sur-Saône lors de la crue de 2011 au bassin versant de l'Apance par la formule de Meyer,
- fourchette haute = $260 \text{ m}^3/\text{s}$: pour ce débit, le volume véhiculé par l'hydrogramme correspond au volume de la pluie sur le bassin versant de l'Apance le 16/12/2011 soit un coefficient de ruissellement égal à 1.

Les hydrogrammes ainsi définis sont présentés en Figure 15. Leurs caractéristiques sont récapitulées dans le tableau suivant :

Volume pluviométrique du 15/02/2011 20h au 16/12/2011 16 H	8,9 Mm³					
Débit de pointe considéré	86 m³/s	115 m³/s	145 m³/s	165 m³/s	190 m³/s	260 m³/s
Volume véhiculé par l'hydrogramme reconstitué	2,9 Mm ³	3,9 Mm ³	4,9 Mm ³	5,6 Mm ³	6,5 Mm ³	8,9 Mm ³
Lame d'eau ruisselée	25 mm	34 mm	43 mm	49 mm	56 mm	77 mm
C moyen (Pluviométrie / Volume véhiculé)	0,32	0,44	0,55	0,62	0,72	1

Tableau 33 : Caractéristiques des hydrogrammes reconstitués de la crue de l'Apance à Bourbonne-les-Bains en décembre 2011 (BV = 114,3 km²)

DDT de la Haute-Marne - Révision du PPRI de la commune de Bourbonne-les-Bains
- Rapport de phase 2.1 vA -

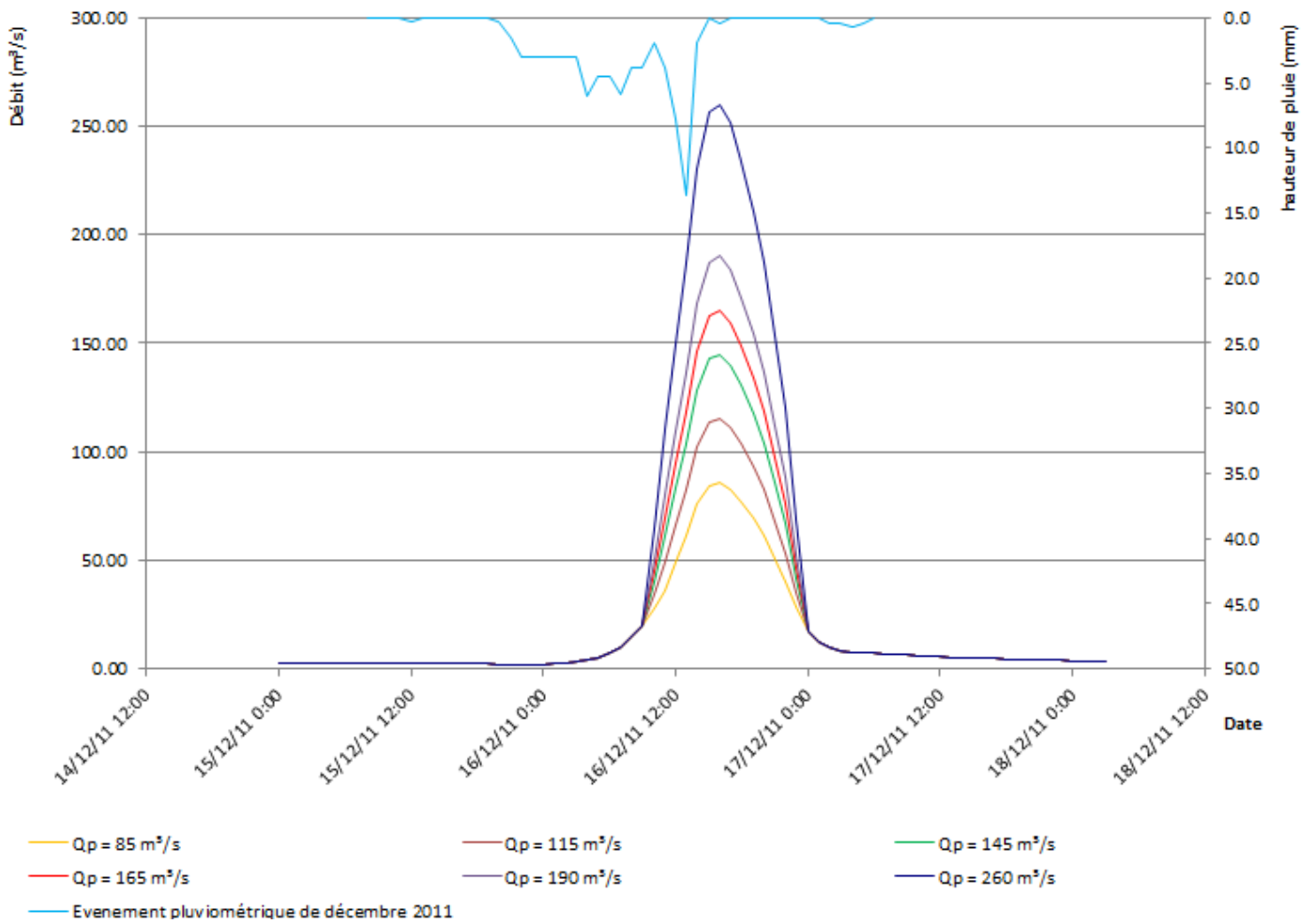


Figure 15 : Hydrogrammes reconstitués de la crue de l'Apance à Bourbonne-les-Bains en décembre 2011

5.3. Bilan

Les différents hydrogrammes de la crue de 2011 construits précédemment ont été introduits dans le modèle hydraulique de l'Apance et du ruisseau de Borne mis en œuvre à l'aide du logiciel MIKE FLOOD (Le modèle sera présenté de façon plus détaillée dans le rapport de phase 3).

Cette étape correspond au 3.2.3 de la méthodologie développée pour l'étude présentée au § 2. page 7. Pour rappel :

« 3.2. Utiliser le modèle hydraulique pour estimer le débit de pointe de cette crue. Nous procéderons de la manière suivante :

- 3.2.1. *Prise en compte dans le modèle de pertes de charge régulières (rugosité de type Strickler pour le lit majeur et pour le lit mineur) et de pertes de charge ponctuelles (ponts, déversoirs...) représentatives du terrain établies sur la base de l'analyse des cartes IGN et des orthophotos ainsi qu'à partir des observations réalisées lors des visites de site (juin 2013 et décembre 2013).*
- 3.2.2. *Vérification de la cohérence des pertes de charges prises en compte pour l'évènement de 2006 (sur la base de l'hydrogramme ISL et des laisses de crue relevées) et pour la crue de référence du PPRI existant (sur la base de l'hydrogramme théorique centennal établi par ISL et des côtes de référence du PPRI),*
- 3.2.3. *Introduction comme donnée d'entrée du modèle de l'hydrogramme reconstitué. Plusieurs tests seront réalisés avec un débit de pointe de l'hydrogramme croissant,*
- 3.2.4. *Confrontation des résultats du modèle aux laisses de crues relevées et adaptation éventuelle des pertes de charges singulières pour tenir compte des hypothétiques embâcles présents le jour de la crue. »*

Il a été mis en évidence que pour retrouver les laisses de crues relevées suite aux inondations de 2011 sur la base de coefficients de Manning-Strickler réalistes, le débit de pointe de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains à considérer est de l'ordre de 145 m³/s (cf. Tableau 33).

En reportant ce débit de pointe sur les courbes représentant l'extrapolation des débits de pointe par les méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique sur la base d'un débit pivot correspondant au Q₁₀ obtenu par la formule rationnelle, alors son occurrence peut être estimée de l'ordre de :

- 20 ans en considérant la méthode du GRADEX,
- 50 ans en considérant du GRADEX esthétique.

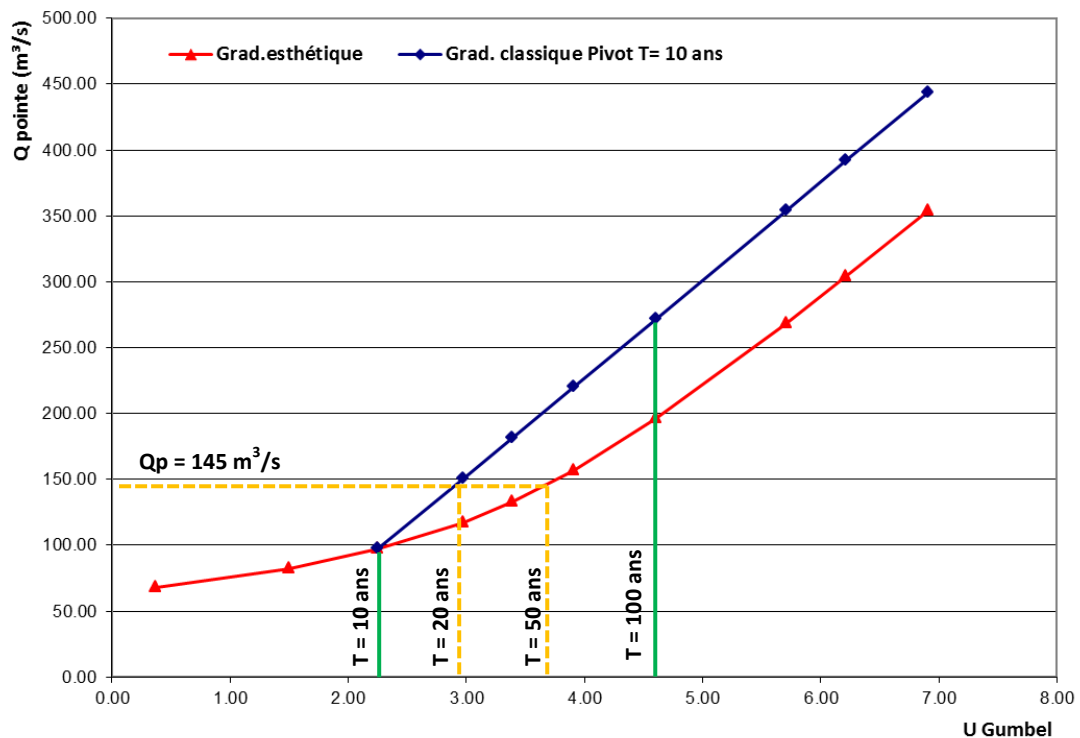


Figure 16 : Report du débit de pointe supposé de la crue de décembre 2011 sur les courbes d'extrapolation des débits par les méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique sur la base d'un débit pivot correspondant au Q_{10} obtenu par la formule rationnelle

(Il a été retenu les méthodes du GRADEX classique et esthétique basées sur un débit pivot correspondant au Q_{10} rationnel dans la mesure où le Q_{10} obtenu par la formule de Meyer sur la base des débits de la Saône à Monthureux-sur-Saône est vraisemblablement sous-estimé au regard des différences existantes entre les bassins versants : différence de formations géologiques, de configuration du réseau hydrographique,..)

Par ailleurs, l'occurrence de l'évènement pluvieux à l'origine de la crue de décembre 2011 a elle été estimée au maximum de l'ordre de 20 ans en considérant le cumul pluviométrique glissant sur 24 h mais seulement de l'ordre de 5 ans pour le cumul pluviométrique glissant sur 6 h, durée correspondant globalement au temps de concentration du bassin versant de l'Apance (cf. Tableau 19 page 26).

Cet évènement pluvieux d'occurrence estimée 5 ans pour le temps de concentration pertinent peut avoir engendré un évènement d'inondation d'occurrence plus rare en considérant les facteurs aggravants possibles suivant :

- pluviométrie dans les heures/jours précédents réduisant la capacité d'infiltration des sols,
- concomitance de la crue du ruisseau de Borne avec la crue de l'Apance,
- possibles embâcles.

6. Suite de l'étude

L'analyse hydrologique menée ici a permis de d'établir un intervalle probable pour le débit centennal de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains (pour rappel : [195 m³/s - 270 m³/s]), ainsi qu'une estimation du débit de pointe de la crue de décembre 2011 (Q_p estimé de l'ordre de 145 m³/s, également en sortie de Bourbonne-les-Bains).

L'étude n'a cependant pas permis de conclure sur le débit de pointe à retenir pour la caractérisation de l'aléa de référence en raison des nombreuses incertitudes portant, entre autres, sur la pluviométrie du bassin versant de l'Apance ainsi que sur les débits mesurés à la station hydrométrique, mais également en raison des limites inhérentes à la méthodologie employée.

Il a donc été décidé la mise en œuvre une modélisation Pluie-Débit du bassin versant de l'Apance afin de modéliser la genèse des crues sur les bassins versants amont, puis leur propagation dans le réseau hydrographique jusqu'à Bourbonne-les-Bains pour différents types de pluie (réelles ou de projet) ainsi que dans différentes conditions de saturation des sols.

Cette étude de modélisation Pluie-Débit fait l'objet du rapport de phase 2.2.