

**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 2.2

Modélisation Pluie-Débit du bassin versant de l'Apance

| Indice | Date | Modifications | Emission | Contrôle |
|---------------|-------------|--|-----------------|-----------------|
| 0 | 04/05/2015 | Etablissement du rapport – Version 0 | GGD | MLR |
| A | 28/07/2015 | Prise en compte des observations formulées dans votre courrier du 27/05/2015 | GGD | MLR |

SOMMAIRE

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 1. | Introduction | 5 |
| 2. | Constitution du modèle Pluie - Débit du bassin versant de l'Apance..... | 8 |
| 2.1. | Principe | 8 |
| 2.1.1. | Le logiciel utilisé | 8 |
| 2.1.2. | Le modèle hydrologique..... | 8 |
| 2.1.3. | Le modèle hydraulique..... | 9 |
| 2.2. | Découpage en sous bassins versants..... | 10 |
| 3. | Ajustement du modèle Pluie - Débit | 13 |
| 3.1. | Données d'entrée..... | 13 |
| 3.2. | Paramètres ajustés | 14 |
| 3.3. | Limites et validités des ajustements | 14 |
| 3.4. | Résultat des ajustements..... | 15 |
| 3.5. | Analyse des résultats | 16 |
| 3.6. | Bilan de l'ajustement du modèle Pluie-Débit de l'Apance..... | 18 |
| 4. | Exploitation du modèle pour la caractérisation de la crue de référence de l'Apance . | 19 |
| 4.1. | Principe | 19 |
| 4.2. | Les scénarios modélisés | 19 |
| 4.2.1. | Les pluies étudiées | 19 |
| 4.2.2. | Les conditions de saturation des sols..... | 22 |
| 4.2.3. | Présentation des scénarios | 24 |
| 4.3. | Résultats des scénarios modélisés pour la crue de décembre 2011..... | 25 |
| 4.3.1. | Résultats..... | 25 |
| 4.3.2. | Analyse | 26 |
| 4.4. | Résultats des scénarios modélisés pour les pluies de projet d'occurrence centennale | |
| | 30 | |
| 4.4.1. | Résultats..... | 30 |
| 4.4.2. | Analyse | 32 |
| 5. | Bilan | 34 |
| 6. | Autres périodes de retour | 36 |
| 6.1. | T = 10 ans..... | 36 |
| 6.2. | T = 50 ans..... | 36 |
| 6.3. | Crue exceptionnelle..... | 36 |

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 : Schéma hydrologique de l'Apance | 11 |
| Figure 3 : Architecture du modèle Pluie-Débit constitué..... | 12 |
| Figure 4 : Comparaison des hydrogrammes calculé et mesuré à la station hydrométrique pour l'évènement du 02/11/2012 au 04/11/2012 | 15 |
| Figure 5 : Comparaison des hydrogrammes calculé et mesuré à la station hydrométrique pour l'évènement du 20/12/2012 au 23/12/2012 | 15 |
| Figure 6 : Comparaison des hydrogrammes calculé et mesuré à la station hydrométrique pour l'évènement du 01/02/2013 au 03/02/2013 | 16 |
| 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..... | 20 |
| Figure 8 : Pluie double triangle de période de retour 100 ans, de durée totale 24 h et de durée intense 3h..... | 21 |
| Figure 9 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en entrée de Bourbonne-les-Bains - Pluie de décembre 2011 / Différentes conditions de saturation des sols | 25 |
| Figure 10 : Illustration de la variation de la forme de l'hydrogramme de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains pour la crue de décembre 2011 en fonction de la répartition horaire appliquée au cumul pluviométrique journalier mesuré à Bourbonne-les-Bains..... | 27 |
| Figure 11 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en entrée de Bourbonne-les-Bains - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols..... | 30 |
| Figure 12 : Hydrogrammes modélisés du Borne à la confluence avec l'Apance - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols..... | 30 |
| Figure 13 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols..... | 31 |
| Figure 14 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique en différents nœuds du réseau hydrographique pour la crue de référence proposée (Q_p en sortie de Bourbonne-les-Bains = 210 m^3/s)..... | 35 |
| Figure 15 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique en différents nœuds du réseau hydrographique pour la crue exceptionnelle proposée (Q_p en sortie de Bourbonne-les-Bains = 315 m^3/s)..... | 37 |

Liste des tableaux

| | |
|--|----|
| Tableau 1 : Caractéristiques des sous bassins versants de l'Apance | 10 |
| Tableau 2 : Présentation des caractéristiques des évènements valorisés pour l'ajustement du modèle Pluie-Débit..... | 13 |
| Tableau 3 : Valeurs des paramètres ajustés sur les évènements de novembre 2012, décembre 2012 et février 2013..... | 16 |
| Tableau 4 : Rappel des hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) retenues sur le bassin versant de l'Apance..... | 21 |
| Tableau 5 : Caractéristiques des pluies double-triangulaires modélisées | 21 |
| Tableau 6 : Valeurs des paramètres retenues pour la prise en compte des différentes conditions de saturation des sols par le modèle Pluie-Débit | 23 |
| Tableau 7 : Scenarios modélisés pour l'évènement de décembre 2011 | 24 |
| Tableau 8 : Scenarios modélisés pour la pluies projet d'occurrence centennale..... | 24 |
| Tableau 9 : Débits de pointe et volumes des hydrogrammes calculés par le modèle Pluie-Débit en sortie de Bourbonne-les-Bains pour la crue de décembre 2011 | 25 |
| Tableau 10 : Comparaison des ordres de grandeurs des hydrogrammes calculés et reconstitué de la crue de décembre 2011 | 29 |
| Tableau 11 : Débits de pointe des hydrogrammes calculés en différents nœuds du bassin versant par le modèle Pluie-Débit pour la pluie de projet centennale | 31 |

1. Introduction

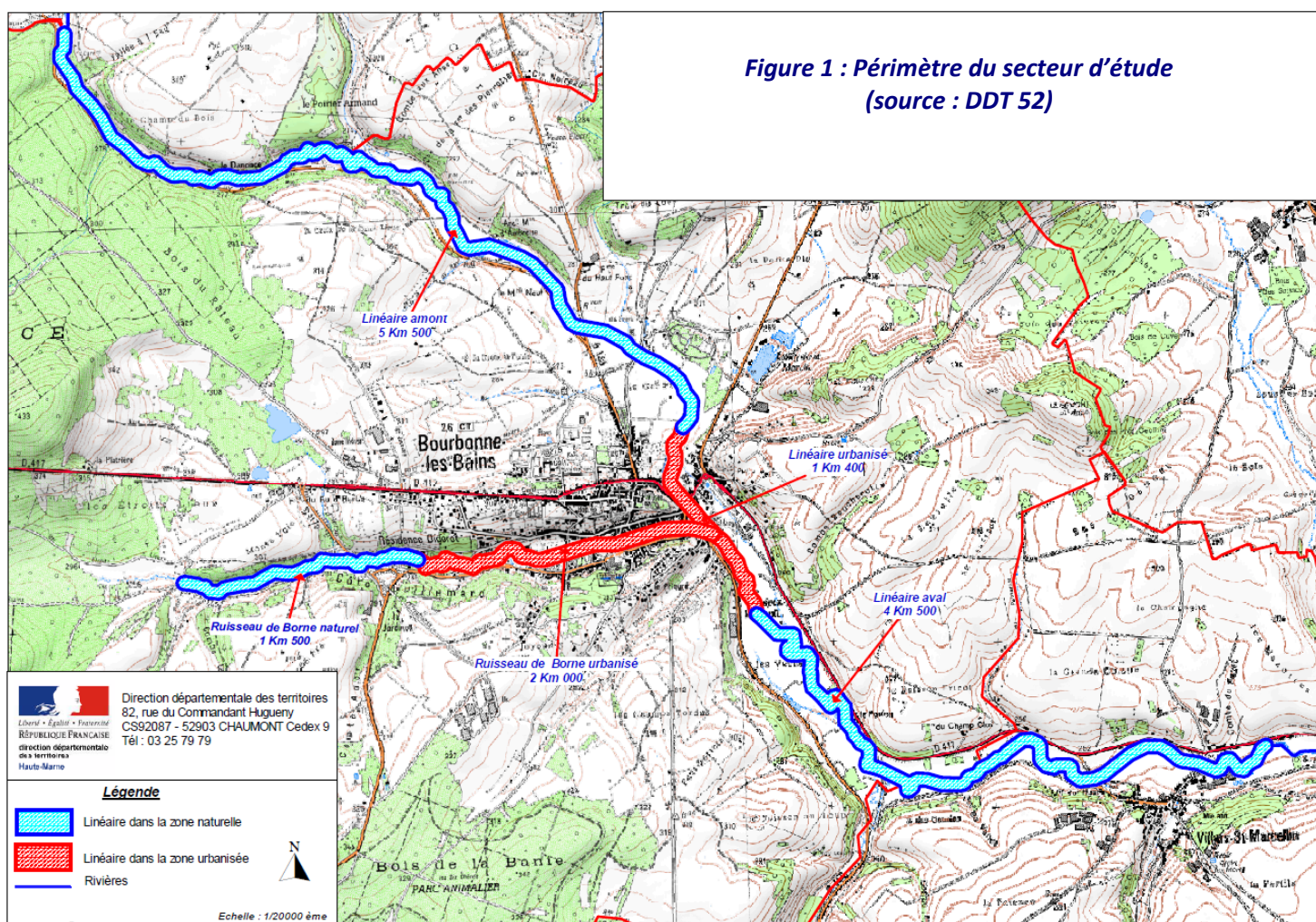
La Direction Départementale de la Haute-Marne a confié à la société INGEROP la révision du Plan de Prévention Risque Inondation de l'Apance sur la commune de Bourbonne-les-Bains.

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 s'inscrit en phase 2 de l'étude « Analyse hydrologique du bassin de l'Apance et du ruisseau de Borne ».

Dans le cadre de l'étude de révision du PPRI de Bourbonne-les-Bains se pose la question de la connaissance du débit de pointe de la crue centennale (crue de référence envisagée pour l'établissement de la carte des aléas et du zonage règlementaire du PPRI).

Il a été dans un premier temps réalisé une étude hydrologique basée sur les formules de l'hydrologie classiques (notamment formules du GRADEX et du GRADEX esthétique) (cf. Rapport de phase 2 du 18/03/2014). Cette étude a permis d'établir un intervalle probable pour le débit centennial 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 :

- concernant les formules de l'hydrologie classiques : limite de validité des formules, application d'un coefficient de ruissellement moyen à l'ensemble du bassin versant ne permettant pas forcément de prendre en compte l'évolution de la saturation des sols en fonction de l'évènement pluvieux, difficile représentation de la propagation des hydrogrammes le long du réseau hydrographique ...
- concernant l'estimation des débits de pointes des crues historiques : le modèle hydraulique a été utilisé pour approcher le débit de la crue de 2011 mais l'approche ne peut être retenue pour valider sur la crue de 1996 au regard de l'absence de données (peu de lasses de crues, pas de connaissances sur le déroulement de l'évènement,...),

- interrogation également sur la présence d'embâcle en 2011 laissant planer une incertitude sur la relation débit / hauteur d'eau.

Afin de poursuivre la réflexion, il a été décidé la mise en œuvre d'un modèle hydrologique de ruissellement de type « pluie-débit ». Ce modèle représentant l'ensemble du bassin versant permettra 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.

Le modèle permettra également de calculer, au niveau de tous les nœuds du réseau hydrographique, les hydrogrammes de la crue de référence qui seront par la suite injectés dans le modèle hydraulique de simulation des écoulements de l'Apance et du ruisseau de Borne.

2. Constitution du modèle Pluie - Débit du bassin versant de l'Apance

2.1. Principe

2.1.1. Le logiciel utilisé

La modélisation a été réalisée grâce au logiciel **HEC-HMS** développé par l'US Army Corps of Engineers.

Le logiciel HEC-HMS contient deux modules :

- hydrologique,
- hydraulique.

Ils permettent de simuler le ruissellement d'une pluie de projet sur un ensemble de bassins versants avec ses phénomènes d'infiltration et d'atténuation (module hydrologique), puis l'écoulement des débits dans des talwegs naturels ou artificiels (canaux, fossés, conduites), ainsi que le stockage dans des ouvrages aux débits de fuite fixes ou progressifs (module hydraulique).

Les méthodes de calcul de chacun des phénomènes (infiltration, ruissellement, écoulement...) sont multiples et choisies pour correspondre au mieux à la réalité et aux méthodes de calcul classiques.

2.1.2. Le modèle hydrologique

Le logiciel HEC HMS propose différents type de modèles hydrologiques. Le modèle retenu dans le cadre de l'étude est le modèle basé sur la méthode du **SCS**, Soil Conservation Service, reprise en partie par la méthode SOCOSE. Ce modèle permet de représenter des bassins versants, à partir d'un nombre relativement réduit de paramètres.

Ces paramètres sont les caractéristiques générales des bassins versants, notamment la surface, mais également des paramètres permettant de caractériser la réaction des bassins versants aux précipitations :

- *le temps de réponse* (ou lag-time) qui correspond au temps écoulé entre le pic de pluie et le pic de ruissellement en aval du bassin versant considéré,
- *les pertes initiales* qui correspondent à la perte en eau initiale via les phénomènes d'interception, d'infiltration et de stockage de surface (micro-dépression),
- *le Curve Number* : il s'agit d'un coefficient représentatif du ruissellement sur les bassins versants. Il est déterminé par croisement de l'occupation du sol et des caractéristiques pédologiques du sol (groupe hydrologique des sols) selon des tables établies par l'USDA (United States Department of Agriculture, 1986). Tous les sols sont classés selon leur capacité à drainer l'eau verticalement. Les classes évoluent de A à D, du plus drainant au plus imperméable. Plus le Curve Number est élevé, plus le ruissellement est important.

Le Curve Number est par conséquent un coefficient intermédiaire lié au coefficient de ruissellement C des sols, aux pertes initiales, à la quantité et aux paramètres du ruissellement (vitesse, temps de décalage, et atténuation).

Dans le cadre de notre étude, les Curve Number seront déterminés par ajustement du modèle sur la base d'évènements réels pour lesquels on connaît la pluviométrie et les débits mesurés à la station hydrométrique de l'Apance.

2.1.3. Le modèle hydraulique

Le modèle utilisé pour la propagation des écoulements le long des talwegs en direction des talwegs d'ordre supérieur est basé sur la méthode Muskingum-Cunge pour un canal trapézoïdal ou circulaire (buse).

Les données d'entrée sont pour ce modèle les caractéristiques géométriques des talwegs et cours d'eau à modéliser : largeur, pente, longueur, forme, coefficient de rugosité.

Cette méthode, très utilisée dans les simulations en transitoire, est basée sur l'équation de continuité incluant un débit latéral et sur la forme diffusive de l'équation de quantité de mouvement. Ces équations sont combinées, approximées linéairement et discrétisées dans le temps et l'espace afin d'obtenir les débits en sortie de canal. Aux jonctions de talwegs, les hydrogrammes calculés sont alors sommés.

2.2. Découpage en sous bassins versants

Le découpage du bassin versant de l'Apance en sous bassins versants a été établi sur la base du découpage réalisé en phase 1. Celui-ci a été reprécisé afin de décrire les sous bassins versants homogènes en termes d'occupation des sols. Les caractéristiques des sous bassins versants définis pour la constitution du modèle sont présentées dans le tableau suivant :

| | | Surface du BV (km ²) | Plus long chemin hydraulique (km) | Pente moyenne |
|--------|---|----------------------------------|-----------------------------------|---------------|
| AP1.1 | - | 14.7 | 6 | 2.8% |
| AP1.1 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre Larivière Amoncourt et le ruisseau de Roteux | 8.6 | 5.8 | 2.3% |
| AP2 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre le ruisseau de Roteux et la RD144 | 8 | 4.9 | 0.4% |
| AP3 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre la RD144 et le ruisseau de Paillard | 6.1 | 4.9 | 0.3% |
| AP4a.1 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance en amont de la station hydrométrique | 2.3 | 3 | 0.4% |
| AP4a.2 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance en amont de Bourbonne-les-Bains | 1.1 | 2.1 | 1.5% |
| AP4b | Bassin versant intermédiaire de l'Apance dans la traversée de Bourbonne-les-Bains | 1.9 | 2.9 | 0.4% |
| AP5 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance en aval de Bourbonne-les-Bains | 3 | 3.2 | 0.3% |
| AP6 | Bassin versant intermédiaire de l'Apance entre le ruisseau de Genrupt et Villars-Saint-Marcellin | 3.8 | 2.4 | 0.1% |
| ROT 1 | Ruisseau de Roteux - Bassin versant amont | 5.3 | 2.8 | 1.5% |
| ROT 2 | Ruisseau de Roteux - Bassin versant intermédiaire jusqu'au ruisseau de Boise | 3 | 2.9 | 3.1% |
| ROT 3 | Ruisseau de Roteux - Bassin versant intermédiaire jusqu'à la confluence avec l'Apance | 7.5 | 7.5 | 2.1% |
| BEAU | Bassin versant du ruisseau de Beauharnoy | 15.6 | 7.3 | 2.9% |
| BOR 1 | Ruisseau de Borne - Bassin versant amont (forêt majoritaire) | 4.6 | 3.8 | 2.3% |
| BOR 2 | Ruisseau de Borne - Bassin versant intermédiaire en amont de Bourbonne-les-Bains (prairies / cultures majoritaires) | 6.8 | 3.9 | 2.6% |
| BOR 3 | Ruisseau de Borne - Bassin versant aval jusqu'à la confluence avec l'Apance (secteurs urbanisés) | 1 | 1.7 | 1.2% |
| CHI | Bassin versant du ruisseau de Chien Vau | 1.8 | 3 | 2.8% |
| GEN | Bassin versant du ruisseau de Genrupt | 15.4 | 7.6 | 2.3% |
| PIN | Bassin versant du ruisseau de Pintelle | 2.5 | 2.5 | 4.3% |
| PAI | Bassin versant du ruisseau Paillard | 5.8 | 4.9 | 3.9% |
| ETA | Bassin versant du ruisseau de l'Etang | 13.9 | 8.2 | 3.0% |
| MAZ | Bassin versant du ruisseau de la Mazelle | 3.3 | 3.6 | 2.5% |

| | |
|---|------------|
| Superficie de l'Apance à l'entrée de Bourbonne-les-Bains | 97 |
| Superficie du BV du ruisseau de Borne | 12 |
| Superficie de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains | 113 |
| Superficie de l'Apance à Villars-Saint-Marcellin | 136 |

Tableau 1 : Caractéristiques des sous bassins versants de l'Apance

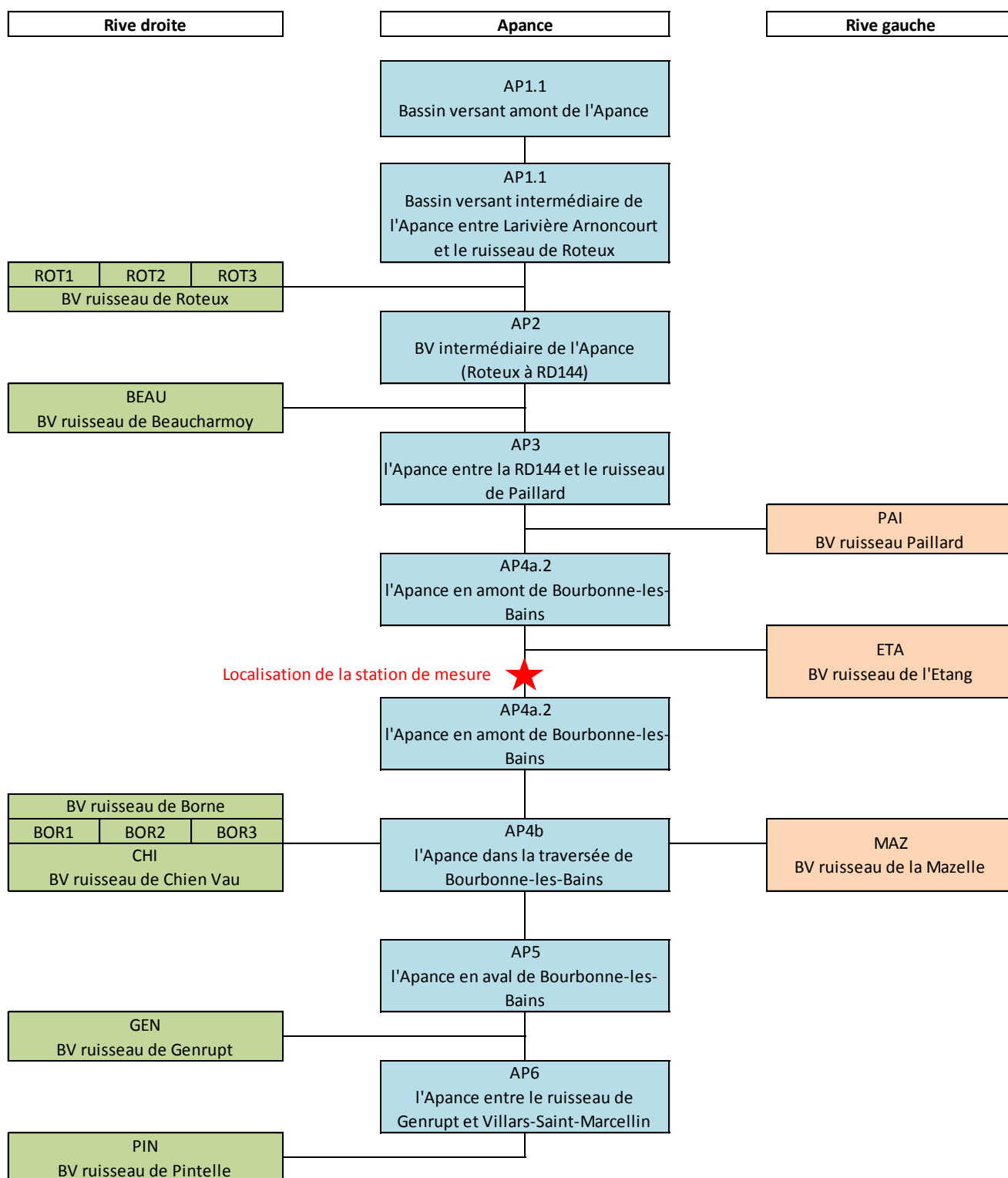


Figure 2 : Schéma hydrologique de l'Apace

Précisions sur les codes tronçons utilisés :

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

La figure ci-dessous présente l'architecture du modèle Pluie-Débit constitué :

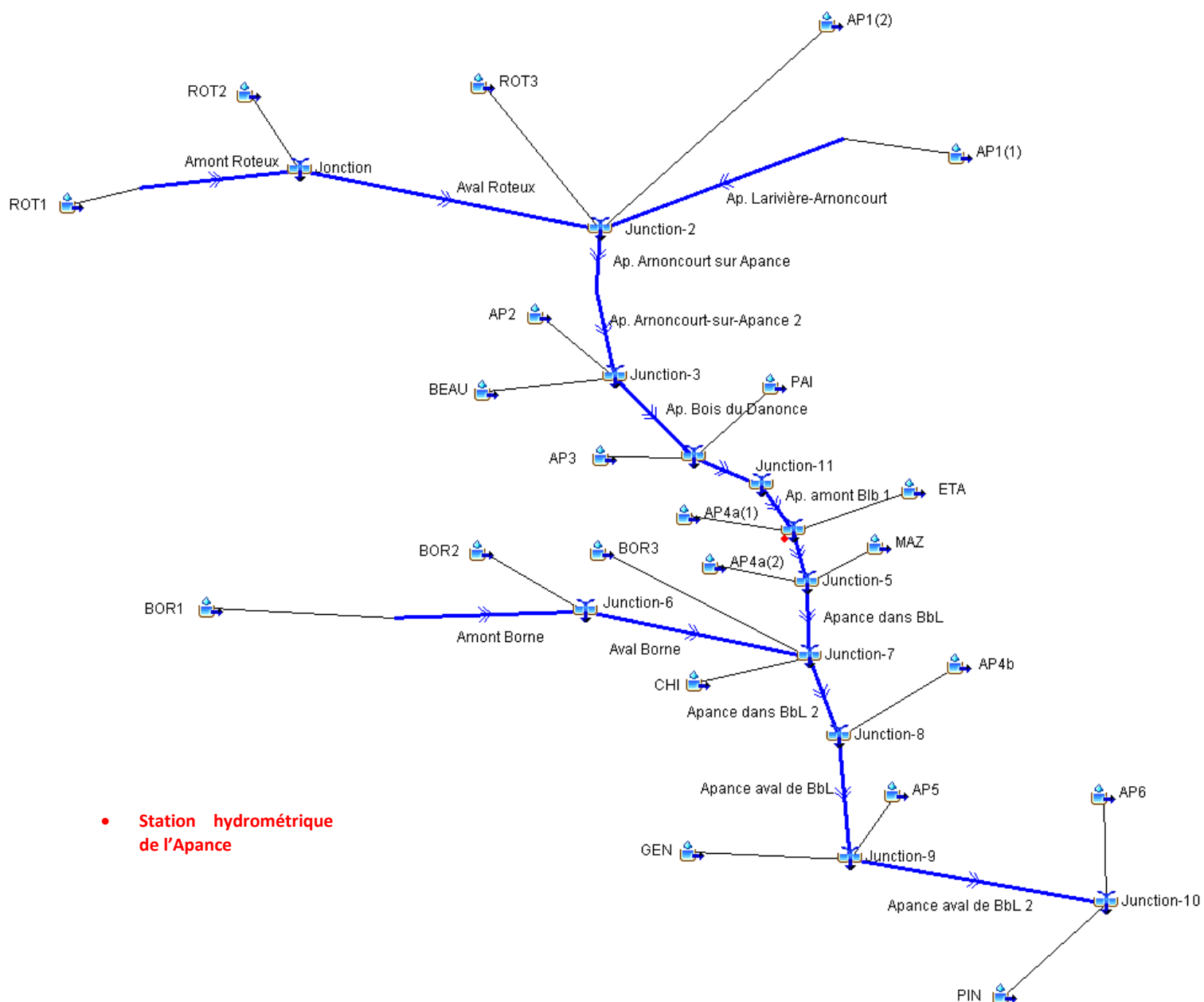


Figure 3 : Architecture du modèle Pluie-Débit constitué

3. Ajustement du modèle Pluie - Débit

3.1. Données d'entrée

Le calage du modèle Pluie - Débit du bassin versant de l'Apance a été réalisé en comparant :

- les résultats obtenus pour des pluies réelles enregistrées au pluviomètre de Bourbonne-les-Bains (adaptées suivant la répartition horaire de l'évènement correspondant mesuré à la station de Langres),
- les débits mesurés à la station de mesure des débits de l'Apance implantée sur le pont de la route de Maynard.

Différents tests ont été réalisés pour des évènements pluvieux ayant générés un pic des débits de l'Apance mais sans débordement afin de rester dans la plage de validité des mesures de la station hydrométrique (cf. § 3.3. page 14).

Les évènements étudiés ont été les suivants :

- 02 novembre 2012 au 04 novembre 2012,
- 20 décembre 2012 au 23 décembre 2012,
- 01 février 2013 au 03 février 2013.

Le tableau suivant présente succinctement les caractéristiques des évènements valorisés pour l'ajustement du modèle Pluie-Débit :

| | | Novembre 2012 | Décembre 2012 | Février 2013 |
|--|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| Cumul pluviométrique de l'évènement pluvieux considéré | 48 h | 49 mm | 22 mm | 27 mm |
| | 24h | 29 mm | 22 mm | 26 mm |
| | 6 h | 14 mm | 14 mm | 16 mm |
| | 1 h | 5 mm | 3.4 mm | 5.3 mm |
| Débit de pointe observé dans l'Apance à la station hydrométrique | Débit de pointe | 9 m ³ /s | 12,8 m ³ /s | 28,1 m ³ /s |

Tableau 2 : Présentation des caractéristiques des évènements valorisés pour l'ajustement du modèle Pluie-Débit

Les 3 pluies modélisées présentent globalement des cumuls pluviométriques du même ordre de grandeur sur 24 h, 6 h et 12 h. L'occurrence estimée de ces pluies est inférieure à T = 2 ans (cf. Tableau 4).

Les débits de pointe de l'Apance mesurés à la station hydrométrique, pour ces évènements de pluviométrie globalement équivalente, présentent des valeurs croissantes au fur et à mesure de l'avancée dans la période hivernale. Cette évolution traduit une saturation des sols de plus en plus importante et donc une augmentation du ruissellement sur le bassin versant.

3.2. Paramètres ajustés

Les paramètres ajustés sont les caractéristiques des bassins versants présentant des incertitudes, à savoir principalement :

- le Curve Number,
- les pertes initiales.

3.3. Limites et validités des ajustements

Les mesures (pluies et débits) dont nous disposons ont servi de base pour s'assurer de la cohérence des résultats obtenus.

Il est à noter cependant que le nombre de paramètres à ajuster est important par rapport aux données disponibles et les incertitudes restent conséquentes.

La première source d'incertitude est la connaissance de la **pluviométrie du bassin versant** :

- les données disponibles à la station de Bourbonne-les-Bains sont des données présentant des incertitudes liées à la fiabilité de l'appareil de mesure,
- ces données pluviométriques disponibles sont des cumuls pluviométriques journaliers : une **répartition horaire** de ces cumuls a été établie sur la base de la pluviométrie horaire connue à la station pluviométrique de Langres. En pratique, cette répartition peut varier. Il existe par ailleurs vraisemblablement un décalage horaire entre les pluies tombant à Langres et celles tombant à Bourbonne-les-Bains. Au regard des éléments disponibles, celui-ci n'est cependant pas quantifiable. Il ne sera pas représenté dans le modèle,
- la répartition **spatiale des pluies** sur le bassin versant n'est pas non plus connue : il est fait l'hypothèse que celle-ci est homogène sur l'ensemble du bassin versant de l'Apance.

L'autre source d'incertitude **est liée aux données débitmétriques** : Il est en effet estimé qu'au-delà d'un certain seuil de hauteur d'eau dans l'Apance au droit de la station, les débits estimés ne sont pas représentatifs du débit de la rivière. Le calage du modèle sera par conséquent réalisé sur la base d'évènement non débordant. Sa représentativité pour la caractérisation des crues débordantes ne pourra pas être validée.

La station de mesure sur l'Apance est située en amont de la commune de Bourbonne-les-Bains, soit en aval du sous bassin versant AP4a.1. Le bassin versant contrôlé est de l'ordre de 92 km². **Ainsi le modèle pourra être ajusté seulement sur la partie du bassin versant en amont de la station hydrométrique, soit sur les sous bassins versants : AP1.1, AP1.2, AP2, AP3, AP4a.1, ROT 1 à 3, BEAU et PAI.** Pour les autres sous bassins versants, et notamment le ruisseau de Borne, une extrapolation des valeurs des paramètres d'ajustement devra être établie entre l'amont et l'aval.

3.4. Résultat des ajustements

Les figures ci-dessous permettent de comparer les hydrogrammes calculés par le modèle pluie-débit à la station hydrométrique et les hydrogrammes mesurés pour les 3 événements pluvieux étudiés :

Figure 4 :
Comparaison
des
hydrogrammes
calculé et
mesuré à la
station
hydrométrique
pour
l'évènement
du 02/11/2012
au 04/11/2012

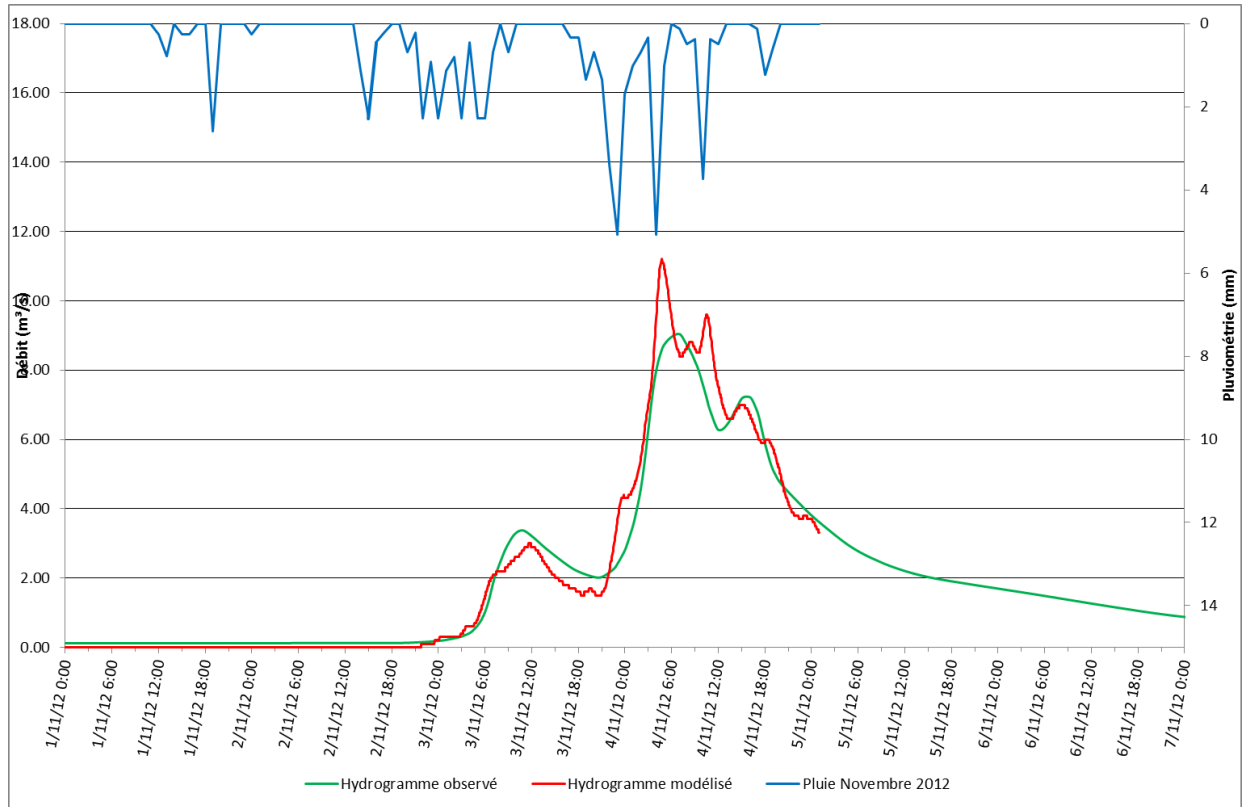
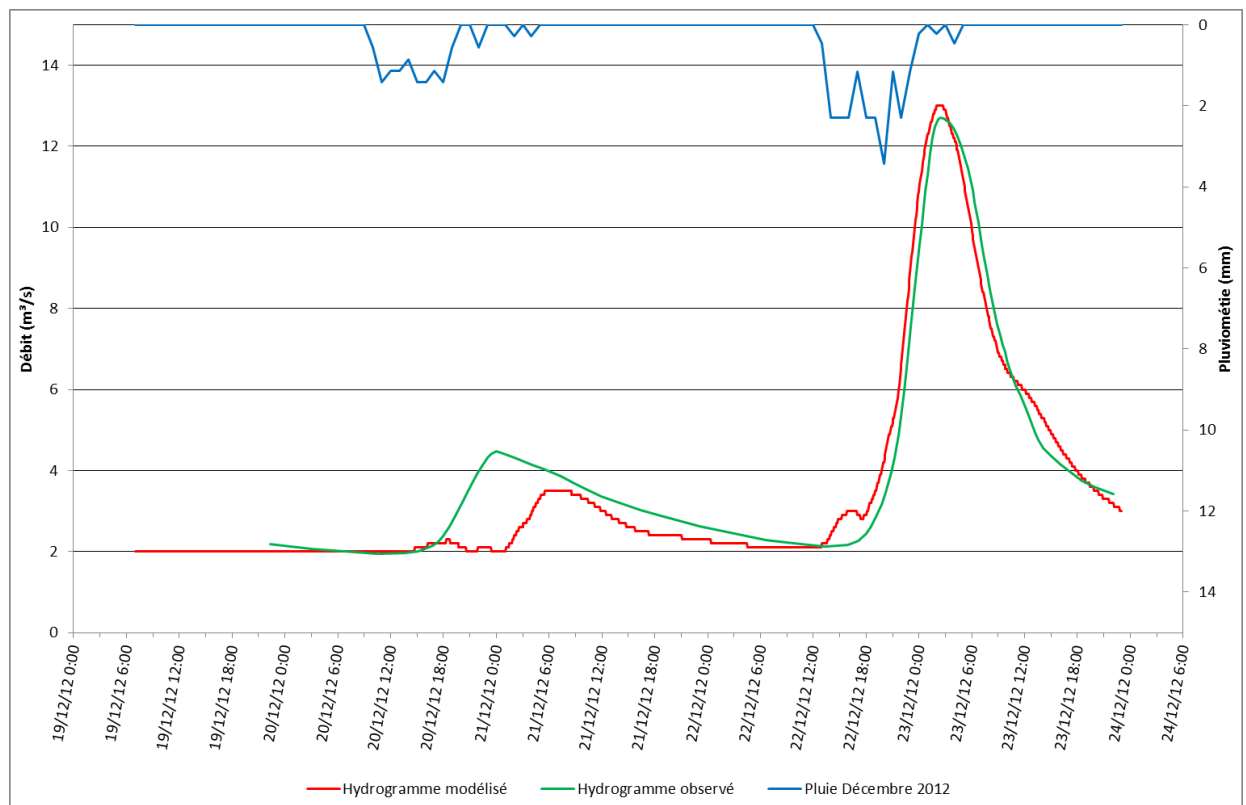


Figure 5 :
Comparaison
des
hydrogrammes
calculé et
mesuré à la
station
hydrométrique
pour
l'évènement
du 20/12/2012
au 23/12/2012



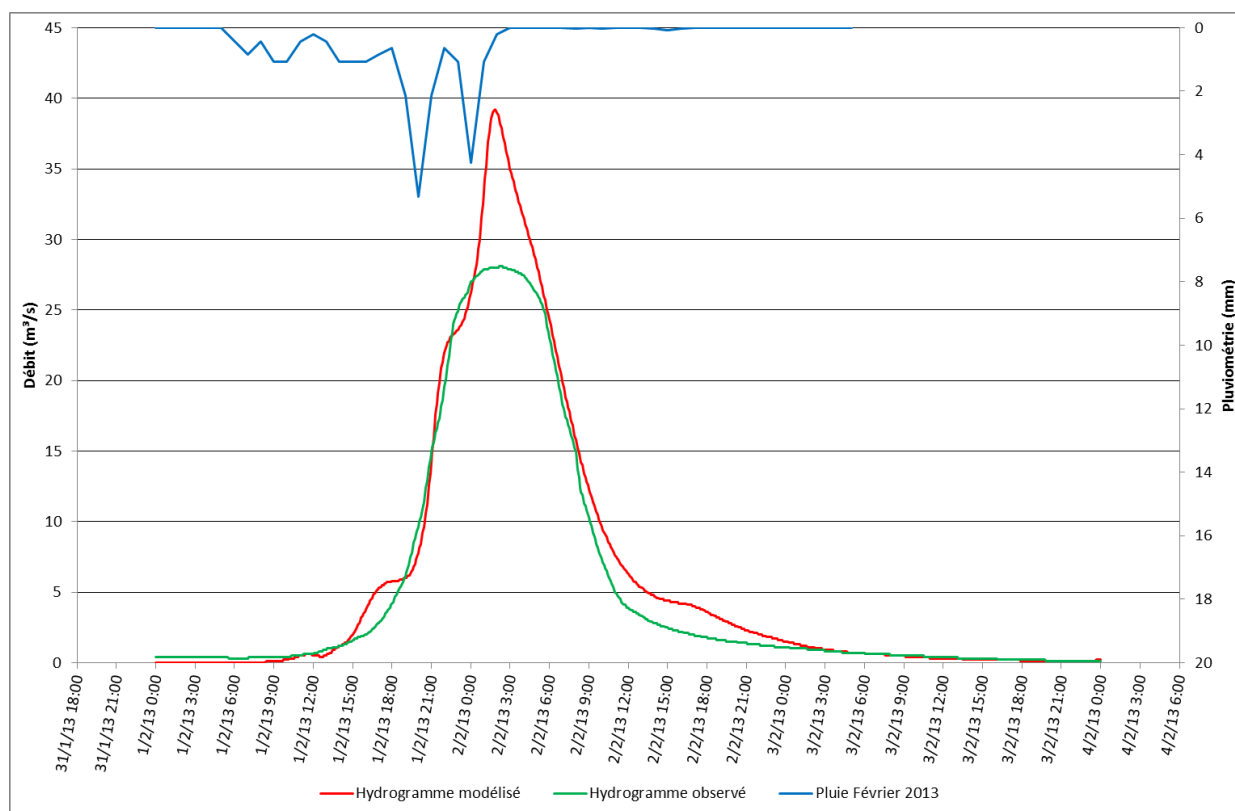


Figure 6 : Comparaison des hydrogrammes calculé et mesuré à la station hydrométrique pour l'évènement du 01/02/2013 au 03/02/2013

3.5. Analyse des résultats

Les valeurs des paramètres retenus pour l'ajustement du modèle sont récapitulées dans le tableau suivant :

| | Novembre 2012 | | Décembre 2012 | | Février 2013 | | Temps de réponse du BV (min.) |
|----------|---------------|---------|---------------|---------|--------------|---------|-------------------------------|
| | CN (-) | la (mm) | CN (-) | la (mm) | CN (-) | la (mm) | |
| AP1 (1) | 56 | 11,8 | 72 | 9,5 | 80 | 7,1 | 53 |
| AP1 (2) | 44 | 4,0 | 44 | 3,2 | 95 | 2,4 | 48 |
| AP2 | 65 | 5,6 | 65 | 4,5 | 96 | 0,6 | 48 |
| AP3 | 61 | 10,0 | 61 | 8,0 | 91 | 6,0 | 36 |
| AP4a (1) | 71 | 4,2 | 71 | 3,3 | 95 | 0,4 | 57 |
| ROT1 | 49 | 1,6 | 95 | 1,3 | 98 | 0,2 | 45 |
| ROT2 | 44 | 5,6 | 82 | 4,4 | 95 | 0,6 | 23 |
| ROT3 | 62 | 2,9 | 93 | 2,4 | 97 | 1,8 | 45 |
| BEAU | 66 | 1,7 | 66 | 1,3 | 99 | 0,2 | 71 |
| PAI | 41 | 3,6 | 41 | 2,9 | 99 | 0,4 | 34 |
| ETA | 41 | 10 | 41 | 3 | 85 | 0,4 | 64 |

Tableau 3 : Valeurs des paramètres ajustés sur les évènements de novembre 2012, décembre 2012 et février 2013

✓ **Concernant l'évènement de novembre 2012**

L'ajustement proposé aboutit à un débit de pointe de l'hydrogramme calculé légèrement supérieur à celui observé (écart de seulement 2 m³/s). L'hydrogramme calculé suit cependant les mêmes évolutions que l'hydrogramme mesuré et le volume véhiculé par les deux hydrogrammes sont du même ordre de grandeur.

La concordance observée entre les résultats fournis par le modèle et l'hydrogramme mesuré à la station hydrométrique est considérée comme globalement satisfaisante. Les écarts observés peuvent être vraisemblablement imputés à la répartition horaire retenue.

La situation modélisée correspond au début de l'automne. La pluviométrie réduite de la période estivale et les températures positives des mois précédents impliquent des sols globalement perméables. Les Curve Number et pertes initiales ajustés sont représentatifs de l'occupation des sols et de la pédologie du bassin versant, dans des conditions de sols pouvant être qualifiées de sèches.

✓ **Concernant l'évènement de décembre 2012**

La concordance observée entre les résultats fournis par le modèle et l'hydrogramme mesuré à la station hydrométrique est globalement satisfaisante.

Pour atteindre l'ajustement, les pertes initiales ajustées ont été diminuées par rapport à l'évènement de novembre 2012 et les Curve Number des sous bassins versants les plus amont de l'Apance (AP1.1 et ruisseau du Roteux : ROT 1 à 3) ont été augmentés.

La situation modélisée correspond ainsi à un début de saturation des sols sur le bassin versant de l'Apance notamment sur les parties les plus amont, là où l'altimétrie est également la plus haute.

✓ **Concernant l'évènement de février 2013**

L'ajustement proposé aboutit à un débit de pointe modélisé supérieur à celui estimé à la station hydrométrique de l'Apance (40 m³/s calculé contre 28 m³/s observé). La forme de l'hydrogramme observé (aplatie au niveau de la pointe) laisse cependant supposer que des débordements se sont produits au niveau de la station de mesure : le débit de pointe estimé à la station de mesure est par conséquent vraisemblablement sous-estimé. Par ailleurs, l'ajustement proposé permet d'obtenir une bonne concordance sur la forme des hydrogrammes modélisé et mesuré en ce qui concerne la montée et la descente.

L'ajustement réalisé sur l'évènement de février 2013 apparaît par conséquent acceptable.

Les valeurs des paramètres ajustés sur l'évènement de février 2013 sont représentatives de sols gelés. La saturation des sols forte est alors favorable au ruissellement important sur le bassin versant.

L'évènement de février 2013 intervient en dernière partie de la période hivernale et fait suite à une période de gel dans le secteur : les températures mesurées à Langres ont été négatives sur l'ensemble de la 2^{ème} quinzaine du mois (élément confirmé par les mesures de températures réalisées sur la même période au pluviomètre privé de Bourbonne-les-Bains). Un léger redoux accompagné de pluie s'est produit sur les 2-3 jours précédant l'évènement de février 2013.

Ces conditions très défavorables sur le bassin versant expliquent pourquoi l'Apance a réagi aussi fortement à un évènement pluvieux pourtant équivalent en terme de cumul pluviométrique à ceux de novembre et décembre 2012.

3.6. Bilan de l'ajustement du modèle Pluie-Débit de l'Apance

Le modèle ainsi ajusté semble fournir des résultats réalistes pour les évènements pluviométriques étudiés malgré :

- **les incertitudes connues sur la pluviométrie et les débits mesurés à la station hydrométriques,**
- **les hypothèses prises pour la construction et l'exploitation du modèle Pluie-Débit (cf. § 3.3. page 14).**

Le modèle est par conséquent considéré comme exploitable pour la caractérisation de la crue de référence du PPRI.

4. Exploitation du modèle pour la caractérisation de la crue de référence de l'Apance

4.1. Principe

La crue de référence du PPRI est au minimum la crue d'occurrence centennale ou bien la crue historique la plus importante si celle-ci dépasse la crue centennale.

La crue de décembre 2011 est la plus forte crue connue sur la commune de Bourbonne-les-Bains en termes d'étendue des zones inondables constatées.

Il s'agit par conséquent ici de valoriser le modèle Pluie-débit du bassin versant de l'Apance afin d' :

- évaluer le débit de pointe de la crue de décembre 2011 sur la base de la pluviométrie connue de l'évènement,
- estimer le débit de pointe d'une crue générée par une pluie théorique d'occurrence centennale.

La comparaison des hydrogrammes modélisés pour la pluie de décembre 2011 et la pluie théorique d'occurrence centennale permettra de conclure sur l'évènement de crue à retenir comme crue de référence.

4.2. Les scénarios modélisés

Les scénarios modélisés correspondront à des couples {Pluie - Conditions de saturation des sols}. Leurs modélisations permettront ainsi d'illustrer l'influence de la saturation des sols sur les débits véhiculés de l'Apance pour les différents évènements pluvieux étudiés.

4.2.1. Les pluies étudiées

a) Pluie réelle de décembre 2011

La répartition horaire des cumuls pluviométriques journaliers mesurés à la station pluviométrique de Bourbonne-les-Bains pour l'évènement de décembre 2011 (sur la base toujours de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres) est représentée sur la figure ci-après.

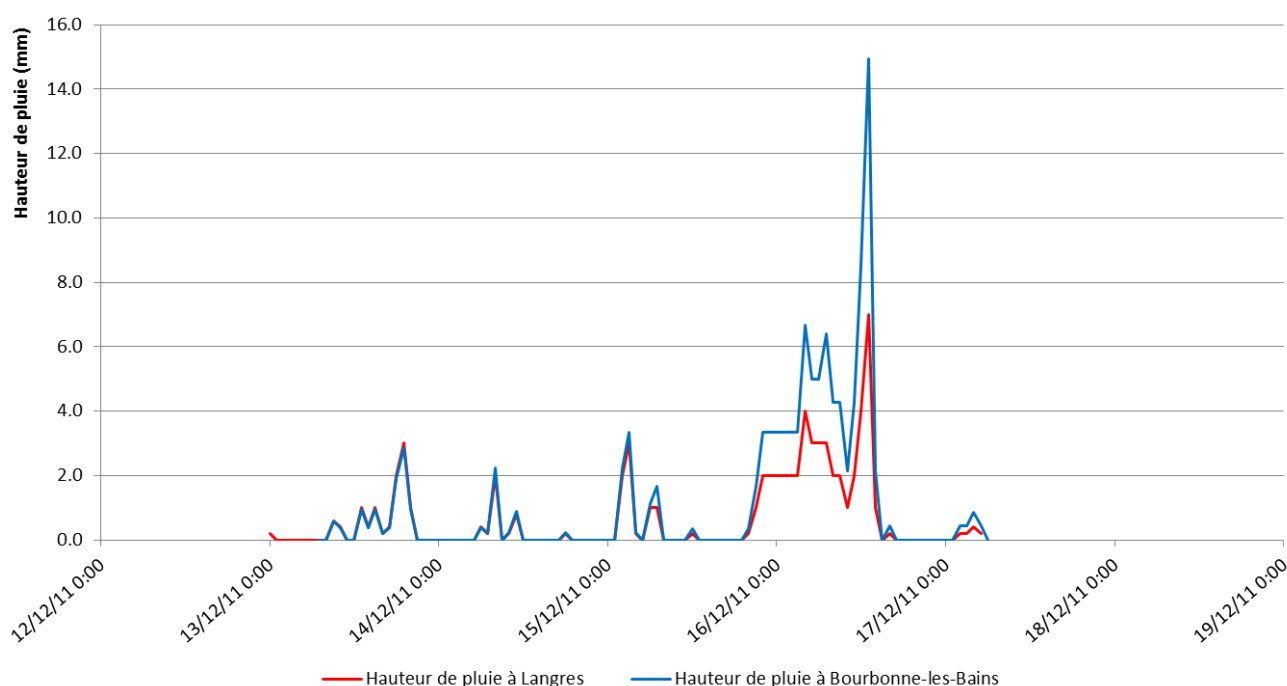


Figure 7 : Pluviométrie horaire à Bourbonne-les-Bains lors de l'évènement de décembre 2011 caractérisée sur la base de la pluviométrie horaire connue au pluviographe de Langres

L'évènement pluvieux à l'origine de la crue de décembre 2011 présente un cumul pluviométrique sur 24 h de l'ordre de 86 mm, ce qui correspond à une occurrence vingtennale (cf. Tableau 4).

b) Pluies de projet d'occurrence centennale

Les pluies de projet qui ont été modélisées sont des pluies de type double triangle d'occurrence **100 ans** de durée totale **48 heures, 24 heures et 12 heures** et de période intense respectivement de **6 h, 3 h, 2 h**.

Les pluies retenues sont des pluies longues afin de représenter les pluies hivernales généralement à l'origine des crues de l'Apance. Il a également été introduit un décalage horaire sur le pic intense pour que la période le précédent soit plus pluvieuse que la période le suivant. Les pluies ainsi construites, bien que théoriques, se veulent représentatives des pluies à l'origine des crues de l'Apance.

Les cumuls de précipitations sur la durée totale de la pluie et sur la période intense ont la même occurrence.

Les pluies de projet ont été construites sur la base des hauteurs pluviométriques caractéristiques du bassin versant déterminées lors de l'analyse hydrologique établie en première approche. Le tableau ci-dessous rappelle 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 | 77,0 |
| 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 4 : Rappel des hauteurs de pluie caractéristiques (en mm) retenues sur le bassin versant de l'Apance
 (Source : Rapport de phase 2.1)

Les caractéristiques des pluies étudiées sont présentées dans le tableau ci-dessous :

| Occurrence | Evènement global | | Période intense | |
|------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| | Durée | Hauteur de pluie | Durée | Hauteur de pluie |
| 100 ans | 48 h | 136 mm | 6 h | 77 mm |
| | 24 h | 116 mm | 6 h | 77 mm |
| | | | 3 h | 65 mm |
| | 12 h | 97 mm | 2 h | 59 mm |

Tableau 5 : Caractéristiques des pluies double-triangulaires modélisées

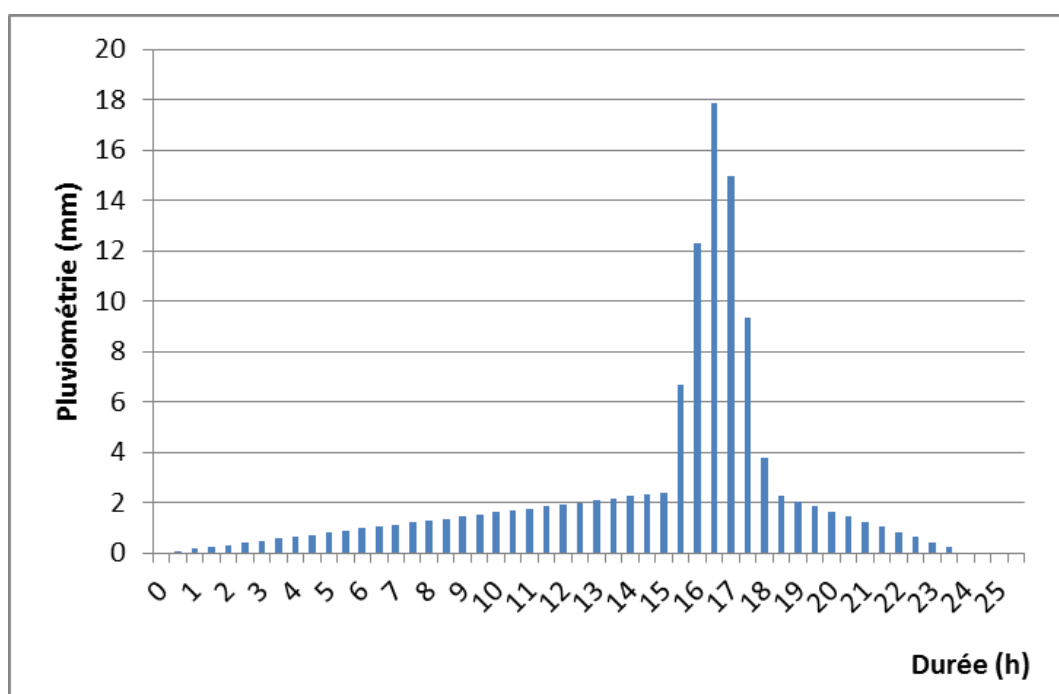


Figure 8 : Pluie double triangle de période de retour 100 ans, de durée totale 24 h et de durée intense 3h

4.2.2. Les conditions de saturation des sols

L'ajustement du modèle sur la base des évènements pluvieux de novembre 2012, décembre 2012 et février 2013 a permis de mettre en évidence différentes conditions de saturation des sols sur le bassin versant de l'Apance. Ces conditions, fonctions de l'avancée dans la saison hivernale et de la perte de la capacité des sols à l'infiltration et à l'atténuation, sont les suivantes

- **Situation « Sols secs »** (correspond à l'évènement de novembre 2012) : les sols sont globalement perméables. Les sols du bassin versant sont favorables à l'infiltration et à l'atténuation.
- **Situation « Sols humides - Amont »** (correspond à l'évènement de décembre 2012) : La capacité d'infiltration initiale des sols est globalement diminuée et notamment sur les sous bassins versants les plus amont de l'Apance où le ruissellement est important.
- **Situation « Sols gelés »** (correspond à l'évènement de février 2013) : les sols gelés en profondeur empêchent l'infiltration et favorisent un fort ruissellement des eaux pluviales.

Ces trois conditions seront valorisées dans le modèle Pluie-Débit.

Afin de compléter ces différentes situations, il sera également considéré une situation complémentaire correspondant à la situation « Sols humides - Amont » généralisée à l'ensemble du bassin versant. Il s'agira de la situation « **Sols humides - Etendue** ». Elle représentera ainsi une situation du bassin versant de l'Apance avec des sols humides sur l'ensemble du bassin versant, et pas seulement sur les bassins versants amont. Cette situation est favorable au ruissellement mais sans cependant atteindre la situation extrême correspondant à des sols gelés empêchant quasiment toute infiltration.

Les valeurs des paramètres pour la prise en compte de ces différentes conditions de saturation des sols dans le modèle Pluie-Débit sont récapitulées dans le tableau suivant :

| | | Sols secs | | Sols humides - Amont | | Sols humides - Etendue | | Sols gelés | | Temps de réponse du BV (min.) |
|---|----------|-----------|---------|----------------------|---------|------------------------|---------|------------|---------|-------------------------------|
| | | CN (-) | la (mm) | CN (-) | la (mm) | CN (-) | la (mm) | CN (-) | la (mm) | |
| Sous bassins versants repris directement par l'Apace | AP1 (1) | 56 | 11,8 | 72 | 9,5 | 72 | 9,5 | 80 | 7,1 | 53 |
| | AP1 (2) | 44 | 4,0 | 44 | 3,2 | 69 | 2,8 | 95 | 2,4 | 48 |
| | AP2 | 65 | 5,6 | 65 | 4,5 | 80 | 2,5 | 96 | 0,6 | 48 |
| | AP3 | 61 | 10,0 | 61 | 8,0 | 76 | 7,0 | 91 | 6,0 | 36 |
| | AP4a (1) | 71 | 4,2 | 71 | 3,3 | 78 | 1,9 | 85 | 0,4 | 57 |
| | AP4a (2) | 48 | 1,7 | 93 | 1,4 | 93 | 1,4 | 97 | 0,2 | 22 |
| | AP4b | 53 | 1,1 | 99 | 0,9 | 99 | 0,9 | 99 | 0,1 | 28 |
| | AP5 | 72 | 3,9 | 72 | 3,2 | 79 | 1,8 | 86 | 0,4 | 46 |
| | AP6 | 72 | 1,0 | 72 | 0,8 | 80 | 0,5 | 87 | 0,1 | 50 |
| Sous bassins versants correspondant aux talwegs et ruisseaux alimentant l'Apace | ROT1 | 49 | 1,6 | 95 | 1,3 | 95 | 1,3 | 98 | 0,2 | 45 |
| | ROT2 | 44 | 5,6 | 82 | 4,4 | 82 | 4,4 | 95 | 0,6 | 23 |
| | ROT3 | 62 | 2,9 | 93 | 2,4 | 93 | 2,4 | 97 | 1,8 | 45 |
| | BEAU | 66 | 1,7 | 66 | 1,3 | 82 | 0,8 | 99 | 0,2 | 71 |
| | PAI | 41 | 10,0 | 41 | 2,9 | 70 | 1,6 | 99 | 0,4 | 31 |
| | ETA | 41 | 10,0 | 41 | 3,0 | | 1,7 | 85 | 0,4 | 64 |
| | MAZ | 67 | 5,0 | 67 | 4,0 | 83 | 2,3 | 99 | 0,5 | 29 |
| | BOR1 | 53 | 13,2 | 68 | 10,6 | 68 | 10,6 | 76 | 7,9 | 34 |
| | BOR2 | 67 | 5,0 | 67 | 4,0 | 83 | 2,3 | 99 | 0,5 | 37 |
| | BOR3 | 90 | 1,5 | 95 | 1,2 | 95 | 1,2 | 99 | 0,2 | 15 |
| | CHI | 43 | 3,1 | 43 | 2,5 | 71 | 1,4 | 99 | 0,3 | 40 |
| | GEN | 64 | 1,8 | 64 | 1,4 | 80 | 0,8 | 96 | 0,2 | 80 |
| | PIN | 42 | 3,3 | 42 | 2,7 | 71 | 1,5 | 99 | 0,3 | 31 |

En grisé : Rappel des valeurs obtenues sur les sous bassins versants amont par ajustement sur les évènements réels étudiés

En blanc : Extrapolation des ajustements réalisés aux sous bassins versants aval

En orangé : Valeurs obtenues par extrapolation de la situation « Sols humides - Amont » afin de généraliser la saturation des sols constatée sur les sous bassins versants amont à l'ensemble du bassin versant de l'Apace. En pratique :

- pour les BV ayant vu leur CN augmenter entre la situation « Sols secs » et la situation « Sols humides - Amont » : les paramètres de la situation « Sols humides - Amont » sont appliqués à la situation « Sols humides - Etendue ». Les BV concernés sont AP1(1), AP4a(2), AP4b, ROT1à3, BOR1 et BOR3.
- pour les autres BV : les CN et pertes initiales appliqués correspondent à la moyenne des valeurs retenues pour chaque BV pour les situations « Sols humides - Amont » et « Sols gelés ».

Tableau 6 : Valeurs des paramètres retenues pour la prise en compte des différentes conditions de saturation des sols par le modèle Pluie-Débit

4.2.3. Présentation des scénarios

✓ Concernant l'évènement de décembre 2011

Les scénarios modélisés ont été les suivants :

| | Pluie projet modélisée | Conditions de saturation des sols |
|-----------------|-------------------------------|-----------------------------------|
| Scenario 2011-1 | Pluie réelle de décembre 2011 | Sols secs |
| Scenario 2011-2 | | Sols humides - Amont |
| Scenario 2011-3 | | Sols humides - Etendue |
| Scenario 2011-4 | | Sols gelés |

Tableau 7 : Scénarios modélisés pour l'évènement de décembre 2011

✓ Concernant les pluies projet d'occurrence centennale

Différents tests sur les pluies ont été réalisés : il apparaît que la pluie la plus préjudiciable est la pluie de durée globale 24h et de période intense 3 h. C'est par conséquent la pluie de projet qui est retenue pour la modélisation de la pluie centennale pour différentes conditions de saturation des sols sur le bassin versant.

Les scénarios modélisés ont été les suivants :

| | Pluie projet modélisée | Conditions de saturation des sols |
|-----------------|--|-----------------------------------|
| Scenario 100A-1 | Pluie 100 ans durée globale 24H - durée intense 3 H | Sols secs |
| Scenario 100A-2 | | Sols humides - Amont |
| Scenario 100A-3 | | Sols humides - Etendue |
| Scenario 100A-4 | | Sols gelés |

Tableau 8 : Scénarios modélisés pour la pluies projet d'occurrence centennale

4.3. Résultats des scénarios modélisés pour la crue de décembre 2011

4.3.1. Résultats

Les hydrogrammes de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains ($S_{BV} = 112 \text{ km}^2$) obtenus pour les différents scénarios modélisés pour la crue de décembre 2011 sont présentés en figure ci-dessous :

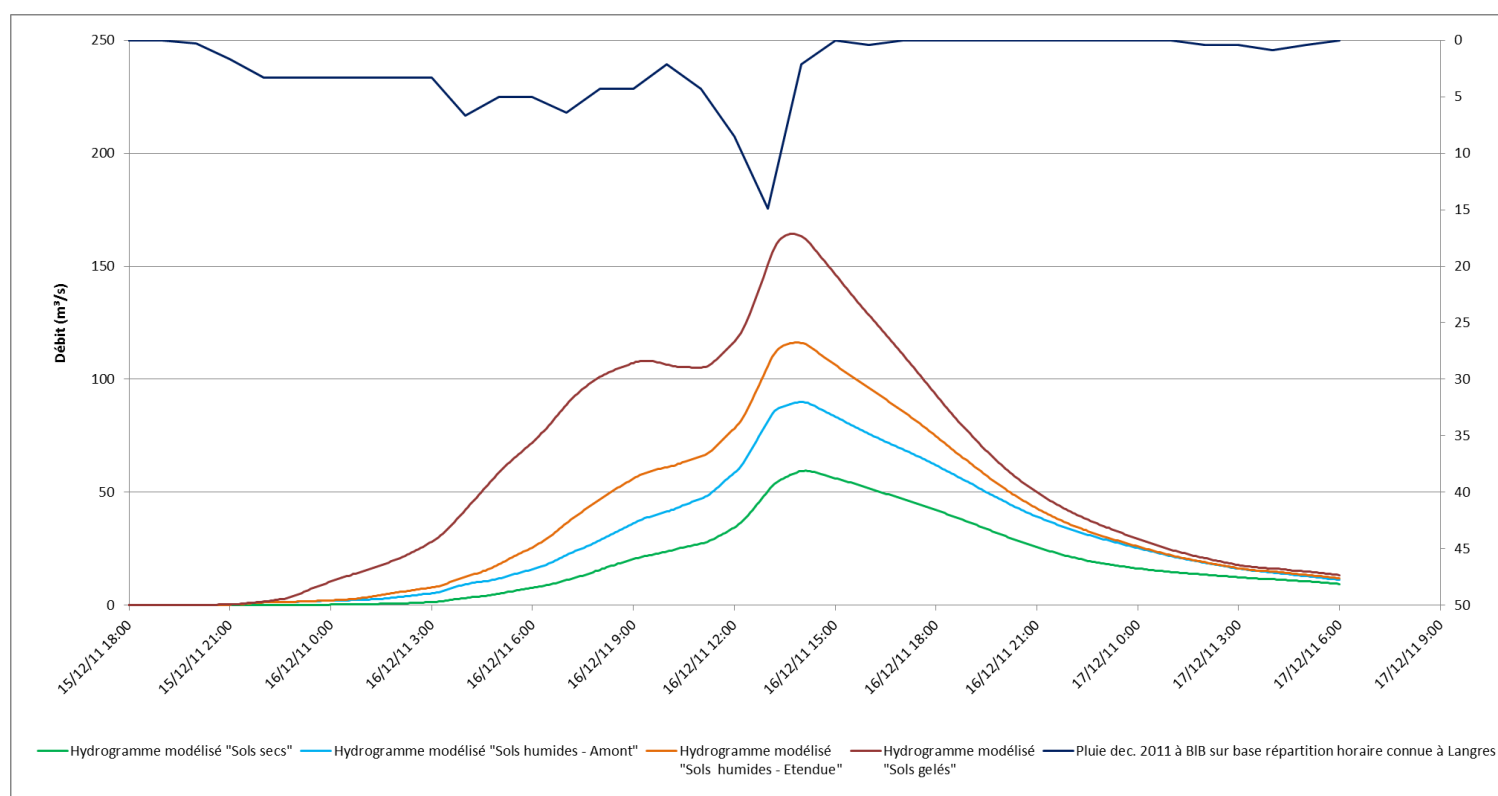


Figure 9 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en entrée de Bourbonne-les-Bains - Pluie de décembre 2011 / Différentes conditions de saturation des sols

| Conditions de saturation des sols | Débits de pointe des HY modélisés | Volumes véhiculés par les HY modélisés |
|-----------------------------------|-----------------------------------|--|
| Sols secs | 60 m ³ /s | 1,5 Mm ³ |
| Sols humides - Amont | 90 m ³ /s | 2,3 Mm ³ |
| Sols humides - Etendue | 115 m ³ /s | 3,3 Mm ³ |
| Sols gelés | 165 m ³ /s | 5,3 Mm ³ |

Tableau 9 : Débits de pointe et volumes des hydrogrammes calculés par le modèle Pluie-Débit en sortie de Bourbonne-les-Bains pour la crue de décembre 2011

4.3.2. Analyse

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les calculs effectués lors de l'analyse hydrologique établie en première approche, *l'analyse établie est basée sur les débits de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains.*

En fonction des conditions de saturation des sols prises en compte dans le modèle Pluie-Débit, le débit de pointe de l'évènement pluvieux de décembre 2011 varie, en sortie de Bourbonne-les-Bains, entre 60 m³/s (condition de saturation des sols la plus favorable) et 165 m³/s (condition de saturation des sols la plus défavorable).

En pratique, le contexte climatique dans lequel s'est inscrite la crue de décembre 2011 est le suivant (caractérisation effectuée par METEO France, cf. rapport de Phase 1.1) :

- températures relativement douces sans gelées sous abri,
- vent fort du 13 au 16/12/2011 avec un maxi de 98 km/h à Langres le 16 décembre,
- pas de chutes de neige et absence de couche de neige au sol au moment de la crue,
- sol non gelé en profondeur,
- sols saturés depuis la fin de la première décennie du mois de décembre 2011.

Au regard de ces éléments de contexte connus de la crue de décembre 2011, la condition de saturation des sols vraisemblablement la plus représentative des conditions réelles connues est la condition « **Sols humides - Etendue** » correspondant à un bassin versant dont les sols sont globalement saturés. Le débit de pointe serait alors de 115 m³/s pour un volume véhiculé de 3,4 Mm³.

Lors de l'analyse hydrologique réalisée en 1^{ère} approche, une estimation du débit de pointe de la crue de 2011 a été réalisée à l'aide du modèle hydraulique. Il a alors 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 serait de 145 m³/s, pour un volume véhiculé de 4,9 Mm³.

L'écart entre les débits de pointe estimés par les deux méthodes (de l'ordre de 30 m³/s) est cependant à relativiser au regard des incertitudes connues et des hypothèses prises pour l'établissement du modèle (cf. § 3.3. page 14). Il faut notamment tenir compte :

✓ des incertitudes liées à la pluviométrie et à sa répartition horaire :

La forme et le débit de pointe de l'hydrogramme calculé par le modèle sont directement liés à la forme et à l'intensité de la pluie modélisée.

La pluie de décembre 2011 à Bourbonne-les-Bains a été définie sur la base de la répartition horaire à Langres. Elle présente une première phase globalement constante, de faible intensité, pendant une douzaine d'heure suivie d'un pic intense de 4 h environ. En gardant

cette même forme pour la pluie mais en diminuant l'intensité de la 1^{ère} phase au profit du pic, l'hydrogramme calculé présente alors une forme plus compacte mais avec un débit de pointe plus fort :

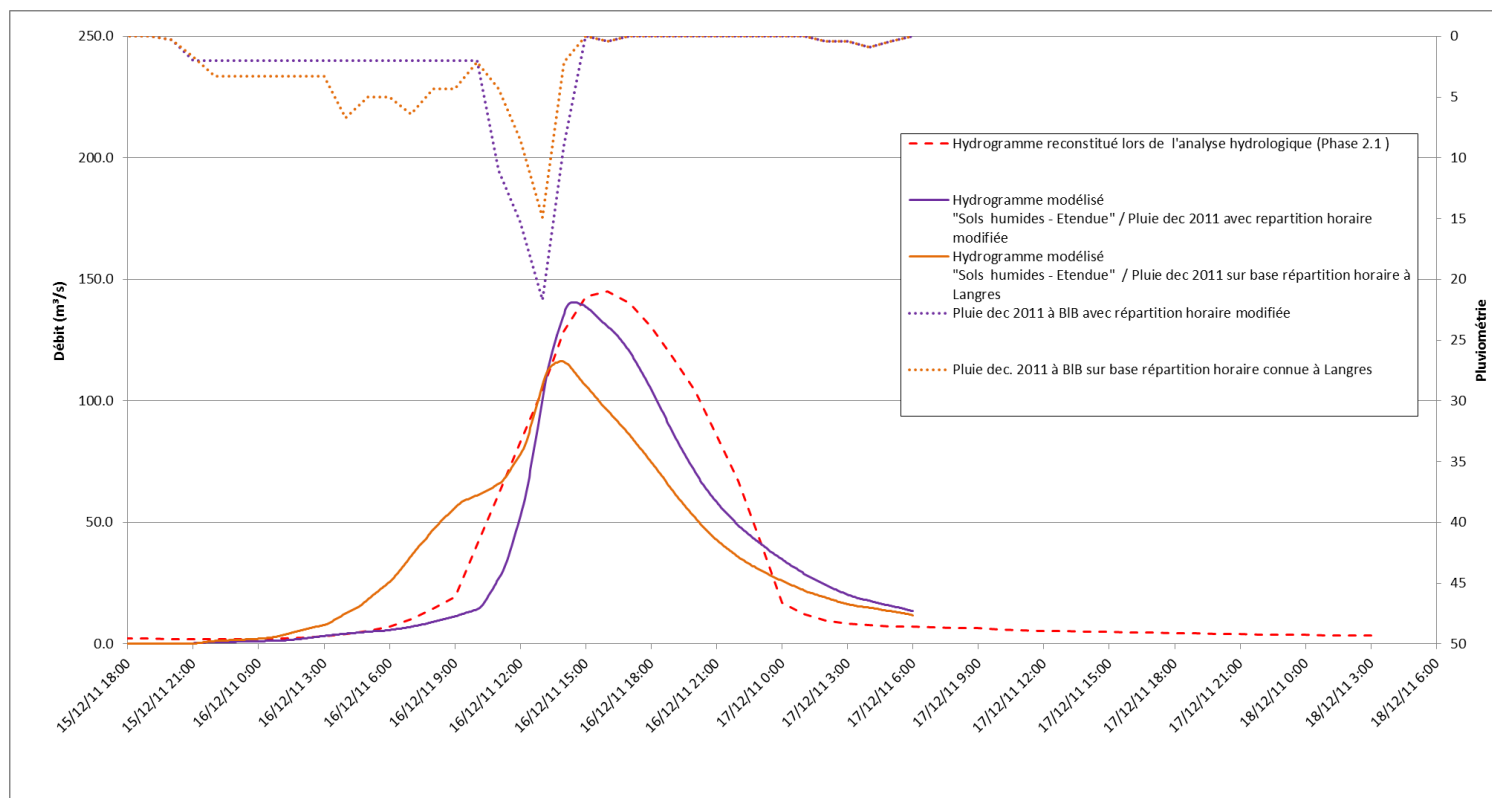


Figure 10 : Illustration de la variation de la forme de l'hydrogramme de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains pour la crue de décembre 2011 en fonction de la répartition horaire appliquée au cumul pluviométrique journalier mesuré à Bourbonne-les-Bains

Les temps caractéristiques des différents hydrogrammes étudiés sont globalement cohérents avec les observations effectuées sur le terrain lors de la survenue de l'évènement.

La forme de l'hydrogramme calculé à partir de la pluie de décembre 2011 modifiée présente cependant une forme moins étalée que l'hydrogramme calculé à partir de la pluie de décembre 2011 définie suivant la répartition horaire à Langres. Cette forme est globalement plus proche de celle de l'hydrogramme reconstruit qui a été défini lors de l'analyse hydrologique de la Phase 2.1.

Les débits de pointe de l'hydrogramme calculé à partir de la pluie de décembre 2011 modifiée et de l'hydrogramme reconstruit à partir des données de la station hydrométrique sont du même ordre de grandeur (140 - 145 m³/s).

✓ **des conditions de saturations des sols :**

La saturation des sols joue également un rôle important sur la forme des hydrogrammes calculés.

La condition de saturation des sols est cependant une inconnue difficilement quantifiable. Concernant le mois de décembre 2011 sur le bassin versant de l'Apance :

- le cumul pluviométrique sur les 15 jours précédents l'évènement de décembre 2011 est de l'ordre de 195 mm ce qui a contribué à saturer fortement les sols,
- les températures sur les 15 derniers jours du mois de décembre ont variées autour de 0 (cf. mesures réalisées au pluviomètre privé situé dans la vallée à Fresnes-sur-Apance, soit sur la partie aval du bassin versant). Ainsi les sols ont pu être gelés en surface, notamment sur les parties amont du bassin versant situées à une altimétrie nettement supérieure à celle de la vallée.

La saturation des sols du bassin versant en décembre 2011, vraisemblablement très importante, a pu par conséquent être supérieure à celle décrite par la situation « Sols humides - Etendue ». Le débit de pointe serait alors supérieur au débit de 115 m³/s calculé par le modèle pour cette condition de saturation des sols. Sa valeur « réelle » peut ainsi varier dans un intervalle compris entre 115 m³/s et 165 m³/s (correspondant au débit de pointe calculé par le modèle pour la situation « Sols gelés »).

En conclusion

L'analyse des résultats du modèle pour la crue de décembre 2011 au regard des incertitudes mises en évidence sur la pluviométrie et sur les conditions de saturation des sols laisse supposer que le débit de pointe de l'évènement est vraisemblablement compris entre à 115 m³/s et 165 m³/s.

Lors de l'analyse hydrologique réalisée en première approche, il a été reconstitué un hydrogramme à partir des mesures effectuées à la station hydrométrique de l'Apance. Cet hydrogramme présentant un débit de pointe de 145 m³/s a été « validé » par le modèle hydraulique : son injection dans le modèle MIKE FLOOD a en effet permis de retrouver les laisses de crues recensées à la suite de la crue de décembre 2011.

Le déroulement de cet hydrogramme est cohérent avec les observations de terrain réalisées lors de la crue et ses ordres de grandeur globalement cohérents avec les résultats du modèle Pluie-Débit :

| | Hydrogramme calculé - Pluie de déc. 2011 selon répartition horaire de Langres / Situation « Sols humides - Etendue » | Hydrogramme reconstitué lors de l'analyse hydrologique (Phase 2.1) | Hydrogramme calculé - Pluie de déc. 2011 selon répartition horaire de Langres / Situation « Sols gelés » |
|---|--|---|--|
| Débit de pointe | 115 m ³ /s | 145 m ³ /s | 165 m ³ /s |
| Volumes véhiculés par les HY | 3,3 Mm ³ | 4,9 Mm ³ | 5,3 Mm ³ |

Tableau 10 : Comparaison des ordres de grandeurs des hydrogrammes calculés et reconstitué de la crue de décembre 2011

Au regard de ces éléments, Il est donc proposé de retenir comme caractéristiques pour la crue de décembre 2011 les caractéristiques suivantes : Qp = 145 m³/s pour un volume véhiculé de l'ordre de 4,9 Mm³.

4.4. Résultats des scénarios modélisés pour les pluies de projet d'occurrence centennale

4.4.1. Résultats

Les hydrogrammes de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains ($S_{BV} = 112 \text{ km}^2$) obtenus pour les différents scénarios modélisés pour la pluie projet d'occurrence centennale sont présentés en figures ci-dessous :

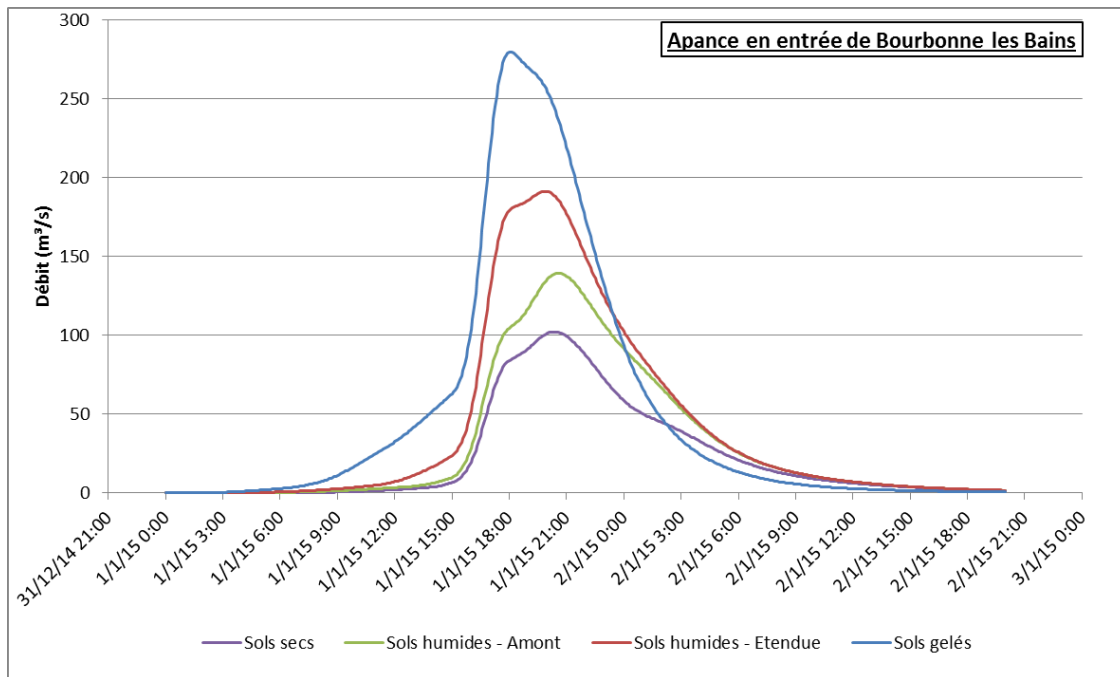


Figure 11 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en entrée de Bourbonne-les-Bains - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols

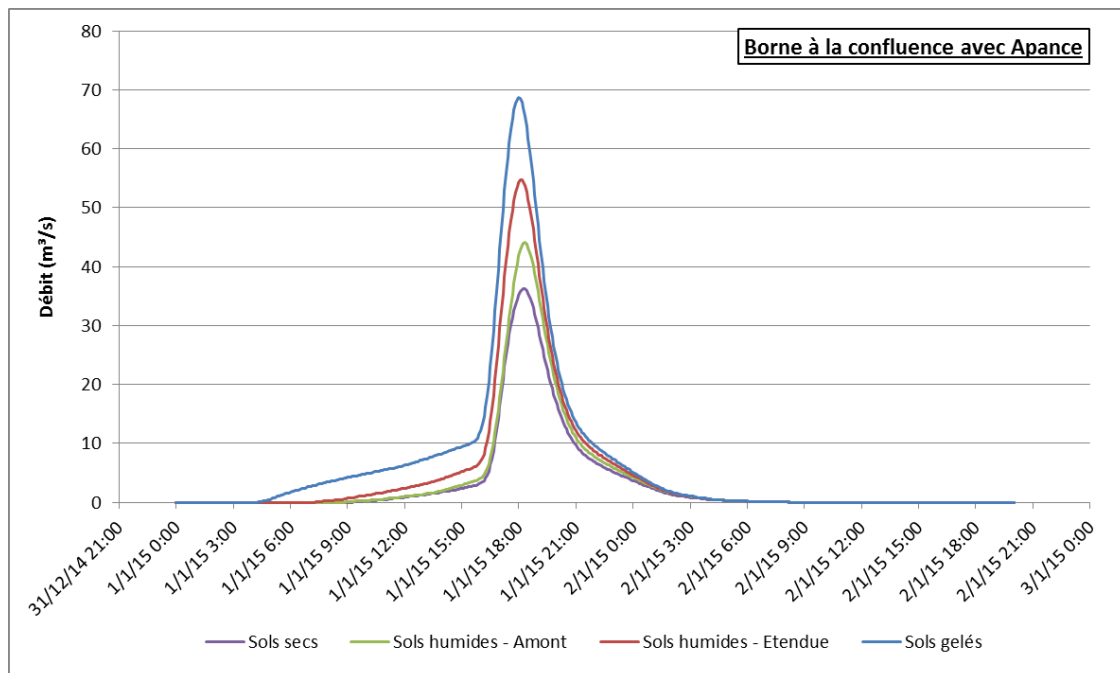


Figure 12 : Hydrogrammes modélisés du Borne à la confluence avec l'Apance - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols

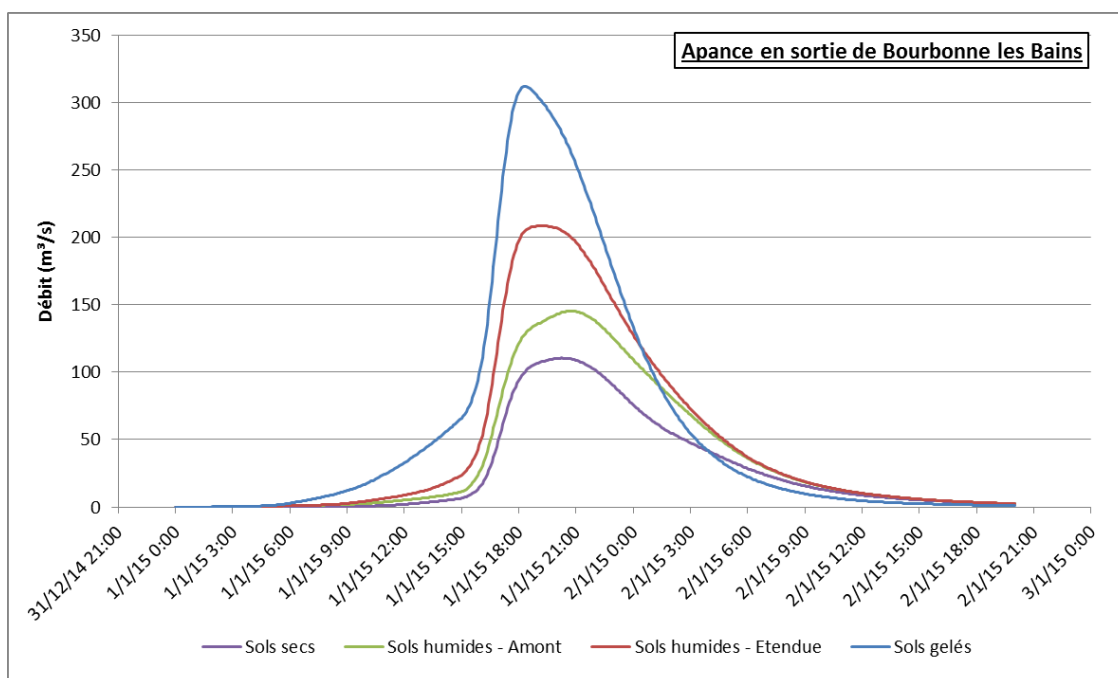


Figure 13 : Hydrogrammes modélisés de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains - Pluie projet d'occurrence 100 ans / Différentes conditions de saturation des sols

| Conditions de saturation des sols | Débit de pointe | | |
|-----------------------------------|---|---|--|
| | l'Apance en entrée de Bourbonne-les-Bains $S_{BV} = 95 \text{ km}^2$ | Borne à la confluence avec l'Apance $S_{BV} = 12,4 \text{ km}^2$ | l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains $S_{BV} = 112 \text{ km}^2$ |
| Sols secs | 100 m ³ /s | 35 m ³ /s | 110 m ³ /s |
| Sols humides - Amont | 140 m ³ /s | 45 m ³ /s | 145 m ³ /s |
| Sols humides - Etendue | 190 m ³ /s | 55 m ³ /s | 210 m ³ /s |
| Sols gelés | 280 m ³ /s | 70 m ³ /s | 315 m ³ /s |

Tableau 11 : Débits de pointe des hydrogrammes calculés en différents nœuds du bassin versant par le modèle Pluie-Débit pour la pluie de projet centennale

4.4.2. Analyse

Afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec les calculs effectués lors de l'analyse hydrologique établie en première approche, *l'analyse établie est basée sur les débits de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains.*

Pour rappel, la fourchette des débits centennaux obtenus lors de l'analyse hydrologique, par les méthodes du GRADEX et du GRADEX esthétique sur la base du débit pivot obtenu par la méthode rationnelle ($Q_{10} = 97 \text{ m}^3/\text{s}$), est comprise entre 195 et 270 m^3/s .

En sortie de Bourbonne-les-Bains, les débits de pointe de l'Apance calculés par le modèle Pluie-Débit sont compris entre $110 \text{ m}^3/\text{s}$ et $315 \text{ m}^3/\text{s}$, selon les conditions de saturation des sols allant de favorables à très défavorables.

En pratique, les crues remarquables de l'Apance se produisent généralement en période hivernale. Le scénario basé sur la condition de saturation « sols secs » a par conséquent peu de probabilité de se produire.

Inversement la probabilité qu'un évènement pluvieux d'occurrence centennale survienne alors que les sols du bassin versant de l'Apance sont gelés, soit dans les conditions de saturation les plus défavorables, relève de l'évènement exceptionnel.

Ces considérations réduisent l'intervalle probable pour le débit de pointe de la crue d'occurrence centennale entre $145 \text{ m}^3/\text{s}$ et $210 \text{ m}^3/\text{s}$ soit respectivement pour des situations de sols saturés seulement sur les parties amont du bassin versant et saturés sur l'ensemble du bassin versant.

Les crues exceptionnelles de l'Apance sont des crues hivernales. Elles surviennent à une période de l'année où la saturation des sols est importante. Par exemple, l'analyse de l'évènement de décembre 2011 laisse envisager des conditions de saturation des sols vraisemblablement plus pénalisantes que celles décrites par la situation modélisée « Sols humides-Etendue » correspondant déjà à un bassin versant globalement saturé.

En l'absence de données débitométriques permettant d'estimer le débit de pointe de la crue d'occurrence centennale de l'Apance, il est par conséquent considéré ici que la crue centennale est générée par **une pluie d'occurrence centennale tombant sur un bassin versant présentant une condition de saturation des sols considérée comme représentative de l'état des sols en période hivernale, soit une situation correspondant un bassin versant globalement saturé** (situation modélisée « Sols humides-Etendue »).

Dans ces conditions, la crue envisagée comme crue d'occurrence centennale de l'Apance présente un débit de pointe de $210 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $6,7 \text{ Mm}^3$ en sortie de Bourbonne-les-Bains. Ce débit de pointe centennal estimé est compris dans l'intervalle défini lors de l'analyse hydrologique établie en 1^{ère} approche. Il correspond à la fourchette basse.

Cette crue est plus forte que la crue de décembre 2011 dont les caractéristiques estimées sont : $Q_p = 145 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume transité de $4,9 \text{ Mm}^3$.

La crue de référence qu'il est par conséquent proposé de retenir pour la caractérisation de l'aléa inondation dans le cadre du PPRI est donc la crue présentant un débit de pointe de $210 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $6,7 \text{ Mm}^3$ en sortie de Bourbonne-les-Bains. Cette crue correspond à une pluie d'occurrence centennale tombant sur un bassin versant dont les sols sont globalement saturés.

La crue exceptionnelle proposée est la crue présentant un débit de pointe de $315 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $8,2 \text{ Mm}^3$ en sortie de Bourbonne-les-Bains. Cette crue correspond à une pluie d'occurrence centennale tombant sur un bassin versant dont les sols sont gelés, ce qui correspond à un évènement exceptionnel.

5. Bilan

Afin de lever les interrogations sur la crue de référence à prendre en compte pour l'établissement du PPRI de l'Apance et du ruisseau de Borne sur la commune de Bourbonne-les-Bains (crue d'occurrence centennale ou bien crue historique la plus importante si celle-ci dépasse la crue centennale), il a été établi un modèle Pluie-Débit du bassin versant de l'Apance à l'aide du logiciel HEC-HMS.

Ce modèle a été calé sur la base de 3 pluies réelles pour lesquels des mesures de débits étaient disponibles à la station hydrométrique. Le modèle ajusté ainsi semble fournir des résultats réalistes pour ces événements pluviométriques étudiés. Il a par conséquent été considéré comme exploitable pour la caractérisation de la crue de référence du PPRI.

Il est à noter cependant que le nombre de paramètres qui ont été ajustés pour le calage du modèle est important par rapport aux données disponibles, données sur lesquelles portent par ailleurs des incertitudes conséquentes :

- les incertitudes connues sur la pluviométrie : cumul pluviométrique, répartition horaire et spatiale,
- les incertitudes connues sur les débits mesurés à la station hydrométriques : en raison de cette incertitude, le calage du modèle a été réalisé sur la base d'évènement non débordant. Sa représentativité pour la caractérisation des crues débordantes n'a par conséquent pas pu être validée.

Le modèle Pluie-Débit a été exploité par la suite pour différents types de pluie (réelles ou de projet) et dans différentes conditions de saturation des sols afin de mettre en évidence l'influence de la saturation des sols sur les débits véhiculés de l'Apance.

✓ Concernant la crue de décembre 2011

L'analyse des résultats du modèle pour la crue de décembre 2011, au regard des incertitudes mises en évidence sur la pluviométrie et sur les conditions de saturation des sols, laisse supposer que le débit de pointe de l'évènement est vraisemblablement compris entre à 115 m³/s et 165 m³/s selon les conditions de saturation des sols.

Lors de l'analyse hydrologique réalisée en première approche, il a été reconstitué un hydrogramme à partir des mesures effectuées à la station hydrométrique de l'Apance. Cet hydrogramme présentant un débit de pointe de 145 m³/s a été « validé » par le modèle hydraulique : son injection dans le modèle MIKE FLOOD a en effet permis de retrouver les lasses de crues recensées à la suite de la crue de décembre 2011.

Le déroulement de cet hydrogramme est cohérent avec les observations de terrain réalisées lors de la crue et ses ordres de grandeur globalement cohérents avec les résultats du modèle Pluie-Débit :

Il est donc proposé de retenir comme caractéristiques pour la crue de décembre 2011 les caractéristiques suivantes : $Q_p = 145 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $4,9 \text{ Mm}^3$.

✓ **Concernant la crue générée par une pluie d'occurrence centennale**

En l'absence de données débitmétriques permettant d'estimer le débit de pointe de la crue d'occurrence centennale de l'Apance, il a été considéré que la crue centennale est la crue générée par **une pluie d'occurrence centennale tombant sur le bassin versant présentant une condition de saturation des sols considérée comme représentative de l'état des sols en période hivernale, soit une situation correspondant un bassin versant globalement saturé** (situation modélisée « Sols humides-Etendue »). Les caractéristiques de cette crue calculées par le modèle Pluie-Débit sont : $Q_p = 210 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $6,7 \text{ Mm}^3$. Cette crue est par conséquent plus forte que la crue de décembre 2011.

En conclusion : Proposition de choix pour la crue de référence du PPRI

La crue de référence qu'il est par conséquent proposé de retenir pour la caractérisation de l'aléa inondation dans le cadre du PPRI est la crue présentant un débit de pointe de $210 \text{ m}^3/\text{s}$ pour un volume véhiculé de l'ordre de $6,7 \text{ Mm}^3$ en sortie de Bourbonne-les-Bains. Cette crue correspond à une pluie d'occurrence centennale tombant sur un bassin versant dont les sols sont globalement saturés.

Les hydrogrammes qu'il est proposé de retenir pour la caractérisation de l'aléa de référence dans le cadre du PPRI sont les suivants :

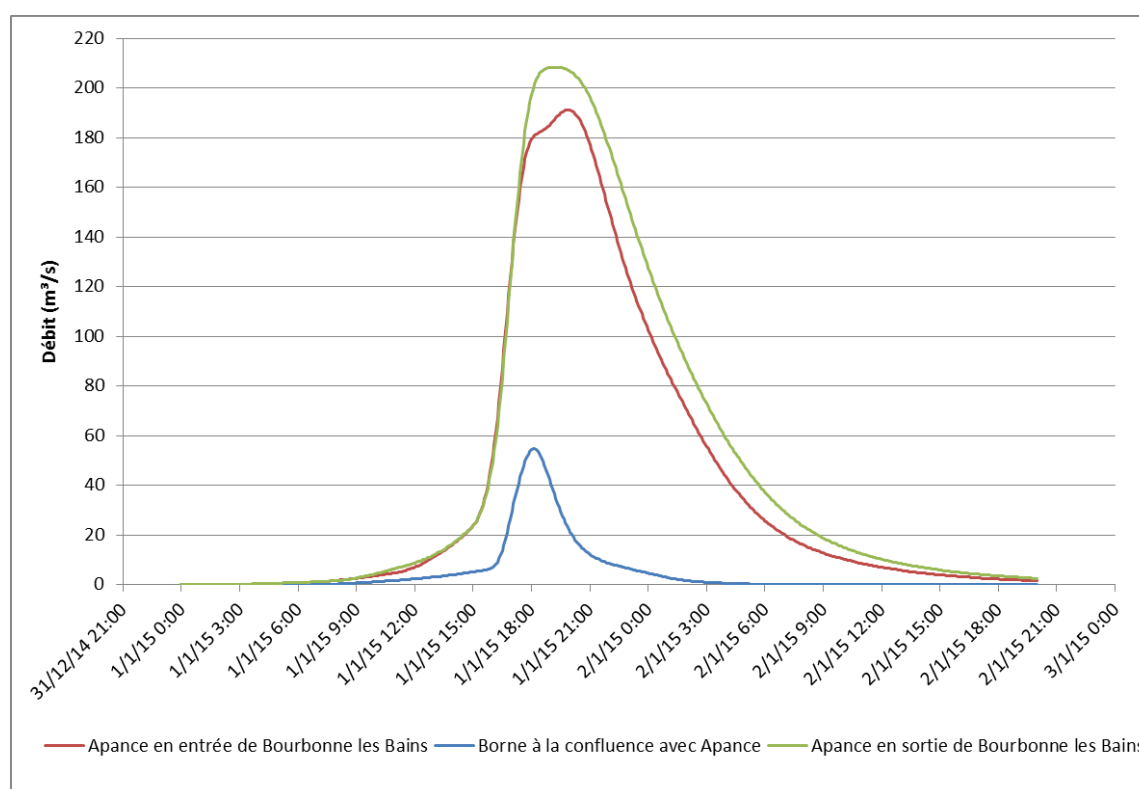


Figure 14 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique en différents nœuds du réseau hydrographique pour la crue de référence proposée (Q_p en sortie de Bourbonne-les-Bains = $210 \text{ m}^3/\text{s}$)

6. Autres périodes de retour

6.1. T = 10 ans

Le débit de pointe de la crue d'occurrence décennale retenu pour le bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains est le débit obtenu à l'aide de la méthode rationnelle tel que présentée dans le rapport 2.1 :

$$Q_{10} = 97 \text{ m}^3/\text{s}$$

6.2. T = 50 ans

Le débit de pointe de la crue d'occurrence cinquantiennale retenu pour le bassin versant de l'Apance en sortie de Bourbonne-les-Bains est obtenu par application au débit de pointe de la crue de référence (210 m³/s) du ratio Q_{100}/Q_{50} issu de l'application de la méthode du GRADEX Esthétique (méthode aboutissant à une valeur de débit centennal proche du débit retenu). Il est ainsi retenu le débit de pointe d'occurrence 50 ans suivant :

$$Q_{10} = 155 \text{ m}^3/\text{s}$$

6.3. Crue exceptionnelle

La crue exceptionnelle proposée est la crue présentant un débit de pointe de 315 m³/s pour un volume véhiculé de l'ordre de 8,2 Mm³ en sortie de Bourbonne-les-Bains. Cette crue correspond à une pluie d'occurrence centennale tombant sur un bassin versant dont les sols sont gelés.

Les hydrogrammes issus de la modélisation Pluie-Débit correspondant à cette crue exceptionnelle sont les suivants :

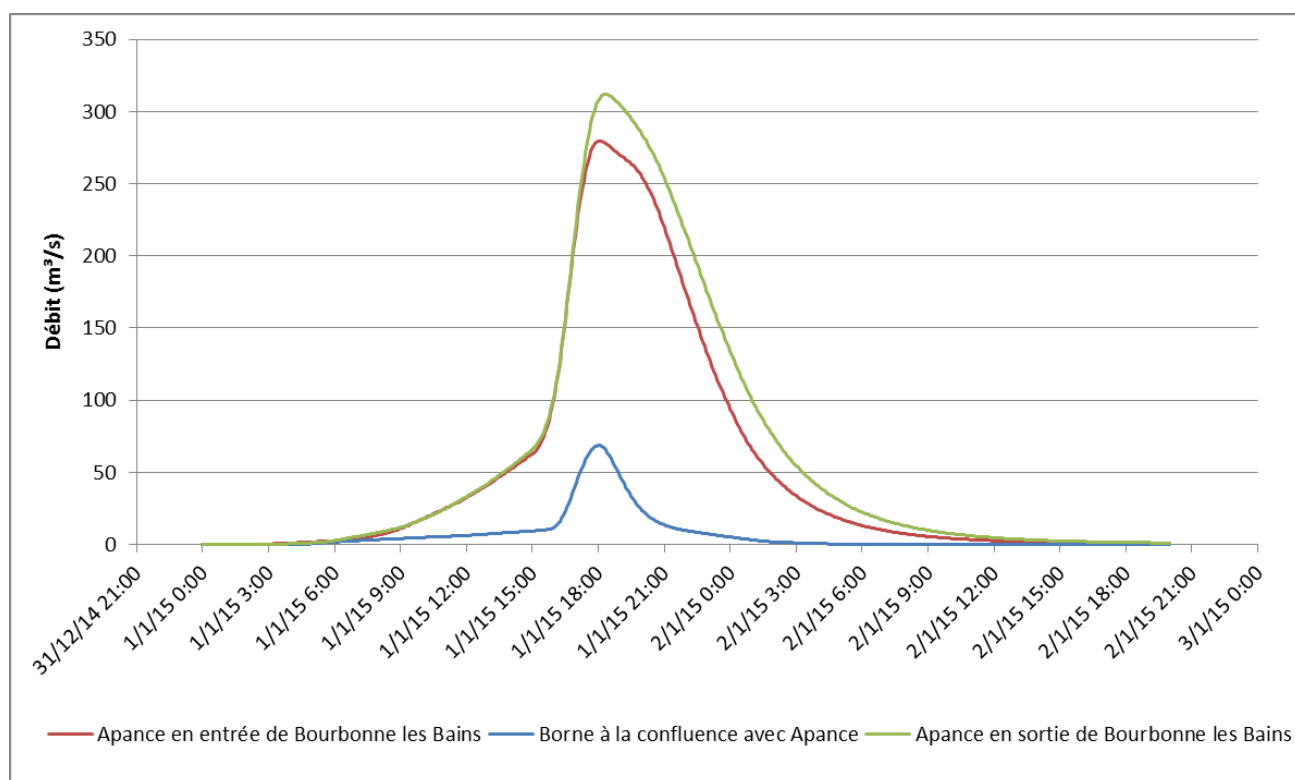


Figure 15 : Hydrogrammes calculés par le modèle hydrologique en différents nœuds du réseau hydrographique pour la crue exceptionnelle proposée (Q_p en sortie de Bourbonne-les-Bains = $315 \text{ m}^3/\text{s}$)