

CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Les Basses Vallées Angevines (« BVA ») sont constituées par les parties aval des rivières du bassin de la Maine (22 000 km²) : les vallées de l'Oudon, la Mayenne, la Sarthe et le Loir y forment de vastes étendues inondables qui confluent au nord d'Angers ; via le chenal de Maine, elles se jettent ensuite dans la Loire et ses multiples bras.

La topographie particulièrement plate de la zone implique que l'ensemble des BVA forme un grand réservoir qui se remplit, notamment lorsque les débits des affluents ne peuvent être évacués à l'aval d'Angers à cause de la condition aval qu'impose la Loire si elle est en crue.

Les niveaux d'eau à Angers et dans les BVA sont donc non seulement dépendants du débit entrant, mais ils sont également fonction des volumes stockés et déstockés et fortement influencés par les niveaux de la Loire.

La prévision des crues sur ce secteur est donc difficile et peu précise.

L'objectif de la présente étude est double :

- réaliser une modélisation hydraulique de la zone, afin de mieux comprendre les phénomènes hydrauliques en temps de crue, puis de tester des aménagements potentiels sur le secteur,
- réaliser des outils temps réels afin d'améliorer la prévision de crue : un premier outil simple basé sur les outils existants, et un second outil basé sur la modélisation hydraulique.

L'étude s'est décomposée en 7 étapes, qui font l'objet du présent rapport. Chaque étape fait l'objet d'une partie de rapport et d'une partie d'annexe spécifique :

▪ **RAPPORT :**

- Tome 1 : Modélisation des phénomènes de crue au niveau des Basses Vallées Angevines
 - Partie A : Etude hydrologique,
 - Partie B : Montage et calage du modèle hydraulique,
 - Partie C : Compréhension des phénomènes hydrauliques,
 - Partie D : Aménagement de protection contre les inondations
- Tome 2 : Réalisation d'outils de prévision de crue
 - Partie E : Outil de prévision empirique,
 - Partie F : Outil de prévision MOISE, basé sur le modèle hydraulique.

▪ **ANNEXES du Tome 1 (en deux volumes) :**

- Annexes A,
- Annexes B, C, D

Un atlas cartographique des zones inondables complète l'ensemble.

A. ETUDE HYDROLOGIQUE

TABLE DES MATIERES

A.	ETUDE HYDROLOGIQUE	
1.	OBJECTIFS DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE	1
2.	RECUEIL DES DONNEES HYDROLOGIQUES	2
3.	EVOLUTION DU LIT DE LA LOIRE	3
4.	ANALYSE DES HAUTEURS D'EAU SUPERIEURES A 4M AU PONT DE VERDUN	5
4.1.	Données analysées	5
4.2.	Analyse statistique	5
4.3.	Analyse des relations entre la hauteur au Pont de Verdun et les débits de la Loire et des affluents de la Maine	7
4.4.	Analyse des relations entre les hauteurs au Pont de Verdun et les niveaux d'eau dans les BVA	14
4.5.	Remous au Pont de verdun	18
4.6.	Conclusions	18
5.	ANALYSE DES APPORTS INTERMEDIAIRES	20
5.1.	Géologie	22
5.2.	Analyse des pluies mensuelles	23
5.2.1.	Représentation des cumuls mensuels en fonction de l'altitude	24
5.2.2.	Représentation spatiale des cumuls mensuels	24
5.3.	Analyse des pluies journalières	25
5.3.1.	Représentation des pluies journalières	25
5.3.2.	Représentation des cumuls de pluies sur une période	25
5.4.	Analyse des débits	25
5.4.1.	Corrélations entre les différentes stations sur les affluents	25
5.4.2.	Analyse des débits spécifiques	26
5.4.3.	Evaluation des apports intermédiaires dans la zone d'étude	26
5.5.	Conclusion	27
6.	ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DES CRUES	29
6.1.	Analyse statistique	29
6.2.	Sélection des épisodes de crue	33
6.3.	Débits de pointe et volumes des crues	33

6.4.	Contributions relatives des différents affluents de la Maine	34
6.5.	Analyse des Décalages entre les pointes de crue	36
6.5.1.	Valeurs moyennes des décalages observés	36
6.5.2.	Relations entre les décalages et les débits de pointe	38
6.5.3.	Analyse des concomitances	39
6.6.	Contexte météorologique	41
6.7.	Typologie des crues	41
6.7.1.	Rappel sur la typologie des crues de la Loire	41
6.7.2.	Typologie des crues de la Maine à Angers	42
6.8.	Analyse des volumes de stockage-déstockage	43
6.9.	Analyse des gradients d'évolution des débits	46
6.10.	Conclusions sur les caractéristiques des crues	47
7.	CHOIX DES CRUES DE CALAGE ET DE VALIDATION DU MODELE HYDRAULIQUE	50
8.	CONCLUSIONS	51

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Nombre de crues ayant dépassé 4m au Pont de Verdun sur la période 1877-2004.....	6
Tableau 2 :	La Maine à Angers au Pont de Verdun - Estimation des hauteurs de période de retour 5 à 100 ans pour la période 1877-2004	7
Tableau 3 :	Coefficient de détermination des corrélations entre la hauteur à Angers et les débits et hauteurs journalières à Montjean, les débits journaliers à Saumur et sur les affluents de la Maine, pour les crues supérieures à 4m à Angers.....	9
Tableau 4 :	Plages de variation des débits amont de la Maine et de la Loire en fonction de la classe de hauteur à Angers (sur 25 crues de la période 1971-2004).....	12
Tableau 5	Variations des cotes aux écluses en fonction du niveau à Angers.....	16
Tableau 6 :	Ecarts de cotes au droit des écluses en fonction du débit amont	17
Tableau 7 :	Données sur le remous au Pont de Verdun.....	18
Tableau 8 :	Stations pluviométriques Météo France dans le bassin versant intermédiaire	21
Tableau 9 :	Débits caractéristiques de crue.....	30
Tableau 10	Comparaison des débits maximaux instantanés caractéristiques de crue avec les débits de l'étude 3P	31
Tableau 11	Estimation des débits de période de retour 100 ans	32
Tableau 12	Classes de périodes de retour des principales crues classées selon la hauteur à Angers	34
Tableau 13	Comparaison des volumes stockés et déstockés (en Mm3) pour différentes hypothèses de calcul du débit fictif à Montjean-sur-Loire.....	44

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE HYDROLOGIQUE

Les objectifs de l'étude hydrologique sont multiples :

- Recueillir les données hydrologiques pour l'analyse hydrologique et pour la mise en œuvre et le calage du modèle hydraulique,
- Analyser les données hydrologiques pour décrire et comprendre le fonctionnement hydraulique de la zone des BVA :
 - Analyser l'incidence de l'approfondissement de la Loire sur les mesures de hauteur à Angers,
 - Caractériser les crues pour les hauteurs d'eau supérieures à 4m au Pont de Verdun à Angers,
 - Mettre en évidence le rôle des différents affluents de la Maine et de la Loire sur les hauteurs d'eau dans les BVA,
 - Analyser les apports intermédiaires entre les stations hydrométriques amont et la station aval de Montjean-sur Loire,
 - Faire une analyse statistique des débits de crues,
 - Analyser le rôle des gradients de montée des débits.
- Choisir les crues de calage et de validation du modèle hydraulique.

2. RECUEIL DES DONNEES HYDROLOGIQUES

L'étape de recueil de données a concerné dès le début de l'étude l'ensemble des données et des études antérieures nécessaires aux différentes étapes de l'étude. L'ensemble des données recueillies est récapitulé dans le tableau 1 de l'annexe A1.1.

Le recueil des données hydrologiques a concerné :

- les fichiers de débits moyens journaliers à l'ensemble des stations hydrométriques,
- les fichiers de débits et hauteurs à pas de temps variable pour les périodes de crue (les données numériques disponibles commencent en 1993),
- les hauteurs au Pont de Verdun,
- les jaugeages et courbes de tarage,
- les hauteurs aux échelles de crue des BVA,
- les hauteurs aux écluses de l'Oudon, de la Mayenne et de la Sarthe dans les BVA,
- les hauteurs aux échelles de crue de la Loire,
- des données de pluies journalières et mensuelles.

Le tableau 2 fourni en annexe A1.1 récapitule les données de débits et de hauteurs recueillies pour l'étude aux stations hydrométriques. Les graphes fournis en annexes A1.2 et A1.3 représentent les hydrogrammes de crue aux différentes stations hydrométriques intéressant l'étude, ainsi que les hauteurs à Angers.

Les données disponibles (périodes, nature) sont rappelées dans chaque partie d'étude.

Les sources de provenance des données sont diverses :

- DIREN des Pays de la Loire, DIREN Centre et DIREN Poitou Charente,
- DDE 49,
- Service maritime et de navigation (services centraux et éclusiers),
- Cellule de mesures et bilan Loire estuarienne,
- Banque HYDRO,
- SAUR (débits de l'Authion),
- Météo France.

3. EVOLUTION DU LIT DE LA LOIRE

Cette analyse est nécessaire en préalable à l'analyse des hauteurs d'eau au Pont de Verdun, compte-tenu de l'incidence probable des extractions de matériaux qui ont été effectuées dans le lit de la Loire jusqu'en 1992-1994.

Pour cette analyse, on a recueilli les différents jaugeages effectués par les gestionnaires des stations hydrométriques de Saumur et Montjean-sur-Loire sur la Loire : à Montjean-sur-Loire, 165 jaugeages depuis 1964, à Saumur, 98 jaugeages depuis 1982. Les jaugeages de Saumur ont été complétés par les jaugeages à la station de Montsoreau, sur la période 1957-1977 (39 jaugeages).

Les graphes 1 à 5 fournis en annexe A2.1 représentent les jaugeages effectués.

A Montjean-sur-Loire, on constate un approfondissement du lit continu depuis le début de la période pour laquelle on dispose des jaugeages (pour une même hauteur, le débit est plus important). Cet approfondissement est un peu supérieur à un mètre sur une période de 40 ans, il semble s'être stabilisé à partir de 2002.

L'incidence de la variation de la profondeur du lit se réduit au fur et à mesure que les hauteurs d'eau deviennent importantes. Pour un débit de l'ordre de 1500 m³/s à Montjean-sur-Loire, l'écart est de l'ordre de 1.1m ; pour un débit de 4000 m³/s, l'écart est de l'ordre de 75 cm. Pour les très forts débits jaugés, au-delà de 5500 m³/s environ, on remarque que les jaugeages effectués à différentes périodes sont proches (décembre 1982, février 1977, janvier 1982, janvier 1994).

Les courbes de tarage provisoires établies par la DIREN des Pays de la Loire à la station de Montjean-sur-Loire ont été calculées de manière à ce que les écarts entre les jaugeages et la courbe restent inférieurs à 10%. Les périodes retenues pour les différentes courbes de tarage sont les suivantes : 1960-1971, 1971-1980, 1980-1985, 1985-1992 et 1992-2004 (voir graphes 1 et 2 en annexe A2.1).

A Saumur, seuls les jaugeages depuis 1982 sont disponibles, soit sur une période de 20 ans. On dispose également des jaugeages à Montsoreau sur la période 1957-1977, soit sur une durée de 20 ans également.

A Saumur, on n'observe pas de décalage aussi important qu'à Montjean-sur-Loire, et une courbe unique peut être construite à partir de l'ensemble des jaugeages. Quelques jaugeages effectués en 1993 et 2002 s'écartent néanmoins de la courbe d'environ 30 à 40cm, ils correspondent à des débits compris entre 1000 et 2000 m³/s, mais cet écart n'est pas systématique. Pour des débits plus faibles, d'autres relevés effectués fournis par la DIREN Centre montrent un écart de l'ordre de 25cm pour des débits de l'ordre de 200 m³/s, sur la période 1986-1995, mais le nombre de points de mesure est faible.

Les jaugeages effectués à Montsoreau montrent également des écarts de l'ordre de 30 à 40 cm pour des débits de l'ordre de 800 à 2000 m³/s sur la période 1957-1977, mais le nombre de jaugeages est trop faible pour permettre de conclure quant à un approfondissement éventuel du lit.

Les informations dont on dispose par ailleurs (Cellule de mesures et bilan Loire estuarienne – Fiche sur les lignes d'eau du fleuve) indiquent que l'approfondissement du lit de la Loire se réduit de l'aval vers l'amont entre Montjean-sur-Loire et La Pointe (confluence Loire-Maine), puis qu'il devient nettement plus faible aux Ponts de Cé : pour un débit d'étiage de 177 m³/s, l'abaissement de la ligne d'eau entre 1900 et 1998

est de 2.1m à Montjean-sur-Loire, 1.6m à La Possonnière, 1.6m à La Pointe et 0.6m aux Ponts de Cé.

A Montjean-sur-Loire, l'abaissement a été d'environ 40cm pendant la première moitié du XXème siècle, puis s'est nettement accéléré dans la deuxième moitié, plus particulièrement à partir des années 1970. Ces données doivent être considérées comme des minima. Les mesures récentes sembleraient indiquer une stabilisation du phénomène d'approfondissement, voire un relèvement léger des lignes d'eau. Dans ce contexte, le secteur La Pointe-La Possonnière semble cependant assez instable, ce qui pourrait traduire des réajustements morphologiques en cours.

▪ CONCLUSIONS

L'approfondissement du lit de la Loire a été important dans le secteur Ponts de Cé-Montjean-sur-Loire durant le siècle dernier (au total, au moins 2.1m à Montjean-sur-Loire se réduisant jusqu'à 60cm aux Ponts de Cé). L'évolution du lit semble se stabiliser mais cela reste à confirmer, le secteur de la confluence Maine-Loire semble encore évoluer.

L'incidence de l'approfondissement se réduit quand le débit augmente et devient négligeable pour les forts débits supérieurs à 5500 m³/s à Montjean-sur-Loire.

A Saumur, l'approfondissement est peu significatif, au moins sur les 20 dernières années.

Les conséquences pour la suite de l'étude sont les suivantes :

- L'incidence de l'approfondissement du lit de la Loire devra être prise en compte lors de l'analyse des hauteurs d'eau à Angers, et l'analyse des données des crues anciennes devra prendre en compte ce phénomène.
- Le calage du modèle hydraulique doit être effectué à partir de levés bathymétriques récents, pour que le modèle soit représentatif des conditions d'écoulement actuelles. Les relevés sur la Loire ont été effectués à partir des années 1995, ce qui doit être convenable et compatible avec les crues qui seront simulées.
- Le calage du modèle hydraulique pourra être perturbé si les relevés bathymétriques utilisés pour le modèle ne correspondent pas aux conditions réelles des crues de calage. On aura intérêt à sélectionner des crues de calage proches de la date de réalisation de la bathymétrie (à partir de 1995 pour la Loire).

4. ANALYSE DES HAUTEURS D'EAU SUPERIEURES A 4M AU PONT DE VERDUN

4.1. DONNEES ANALYSEES

Les données utilisées pour cette analyse sont les relevés journaliers des hauteurs d'eau au Pont de Verdun (échelle historique située en aval du pont). Ces relevés, effectués à heure fixe, ne correspondent pas forcément à la valeur maximale journalière, mais ils en sont très proches, les variations au cours d'une journée étant généralement faibles en période de crue. Cependant, il existe une incertitude sur la valeur exacte du maximum.

A partir de 2003, des stations de mesure automatique ont été installées au droit des ponts de Basse Chaîne (aval du pont de Verdun) et de Haute Chaîne (amont du pont de Verdun), les données fournissent la valeur du maximum instantané. Dans la mesure où les crues des années 2003 et 2004 ne sont pas exceptionnelles, on a considéré pour l'analyse que les mesures des deux années 2003 et 2004 au pont de Basse Chaîne pouvaient être utilisées pour compléter la série d'observations à l'échelle aval du pont de Verdun, même si un léger écart est possible entre les deux sites de mesure.

Deux échantillons ont été constitués :

- l'échantillon des valeurs maximales annuelles disponibles sur la période 1877-2004 soit sur 128 années, en considérant l'année hydrologique du 1^{er} septembre au 31 août. Remarque : des données journalières sont disponibles depuis 1834 mais avec une période manquante importante entre 1850 et 1875, c'est pourquoi on a préféré commencer l'analyse à partir de 1877. De plus, des modifications de la Loire (constructions de levées en particulier) sont intervenues suite aux fortes crues qui se sont produites pendant la période 1845-1875.
- l'échantillon des maxima de crue supérieurs à 4m sur la période 1877-2004 : pour sélectionner les valeurs de cet échantillon, on a considéré que deux crues successives étaient indépendantes si la hauteur minimale entre les deux crues était inférieure à 1.5m. On a ainsi sélectionné 113 valeurs. L'intervalle de temps minimal obtenu entre deux crues est de 33 jours.

Les valeurs des deux échantillons sont fournies en annexe A2.2.

4.2. ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique des deux échantillons complets montre :

- échantillon des valeurs maximales annuelles : on constate un changement de comportement entre les valeurs 5 et 6m, mettant en évidence deux populations de crues. L'ajustement d'une loi de Gumbel sur les deux parties de l'échantillon (coupure à 5.5m) montre nettement cette différence de comportement. Avec la loi de Weibull, le changement de comportement est plutôt mis en évidence à partir de 6m.
- échantillon des valeurs supérieures à 4m : une coupure apparaît également aux environs de 6m.

Les graphes d'ajustement sont fournis en annexe A2.2.

La forme de la loi de répartition des débits journaliers maxima annuels de la Loire à Montjean-sur-Loire est similaire, et une cassure se manifeste aux alentours d'un débit de 4800m³/s à Montjean-sur-Loire (voir 6.1).

Pour mettre en évidence une éventuelle dérive due à l'incidence de l'approfondissement de la Loire, on a comparé les répartitions des hauteurs sur deux périodes : avant et après 1945. La date de 1945 a été sélectionnée de manière à obtenir deux échantillons de taille comparable et parce que les extractions de matériaux dans le lit de la Loire se sont a priori intensifiées après 1945.

En découpant l'échantillon des valeurs supérieures à 4m en deux sous-échantillons sur les périodes 1877-1945 et 1946-2004, on obtient un échantillon plus homogène sur la période 1877-1945 que sur la période suivante, ce qui semblerait indiquer effectivement que la période récente a été plus perturbée par l'évolution du lit de la Loire.

Les graphes de représentation des fréquences empiriques de non dépassement des deux sous-échantillons classés montrent également des différences entre les fréquences de non-dépassement d'une même hauteur observée avant ou après 1945.

Si l'on compare le nombre de valeurs des deux sous-échantillons, en répartissant les valeurs par classes de 50cm, on constate également une différence entre les deux périodes (voir Tableau 1). Remarque : pour les hauteurs élevées, le nombre total de crues étant faible, les différences calculées sont moins significatives.

Tableau 1 : Nombre de crues ayant dépassé 4m au Pont de Verdun sur la période 1877-2004

classe de hauteur au Pont de Verdun	Nombre de dépassement (Nombre moyen de dépassement annuel)		
	période 1877-2004	1877-1945	1946-2004
>4m	113 (0.88)	62 (0.9)	51 (0.864)
<i>entre 4m et 4.5m</i>	<i>32</i>	<i>14</i>	<i>18</i>
>4.5m	81 (0.63)	48 (0.7)	33 (0.56)
<i>entre 4.5m et 5m</i>	<i>24</i>	<i>15</i>	<i>9</i>
>5m	57 (0.45)	33 (0.48)	24 (0.41)
<i>entre 5m et 5.5m</i>	<i>24</i>	<i>16</i>	<i>8</i>
>5.5m	33 (0.26)	17 (0.25)	16 (0.27)
<i>entre 5.5m et 6m</i>	<i>18</i>	<i>10</i>	<i>8</i>
>6m	15 (0.12)	7 (0.1)	8 (0.14)
<i>entre 6m et 6.5m</i>	<i>12</i>	<i>5</i>	<i>7</i>
>6.5m	3 (0.02)	2 (0.03)	1 (0.02)

▪ **CONCLUSIONS :**

- L'enfoncement du lit de la Loire perturbe de manière significative la loi de répartition des crues de la Maine à Angers, en ayant rendu moins fréquentes les crues de moyenne importance, situées dans la gamme des hauteurs comprises entre 4.5m et 5,5m. En revanche, pour les fortes hauteurs, il n'y aurait pas eu de changement significatif. Cela correspondrait au fait que les niveaux de la Loire soient peu ou pas influencés par l'approfondissement du lit de la Loire pour les forts débits. En effet, à

partir d'un débit de l'ordre de 5500 m³/s, les niveaux de la Loire ont subi peu de modification à Montjean-sur-Loire ce qui fait que pour les hauteurs à Angers supérieures à 6m environ, il n'y a probablement pas eu d'incidence [voir en 4.3 les graphes de correspondance entre le niveau à Angers et le débit à Montjean-sur-Loire]. Remarque : l'incidence du seuil de Maine sur les hauteurs en crue en amont n'est pas connue, mais elle est a priori négligeable. De plus, sa date de construction est relativement récente par rapport à la période analysée.

- La loi de répartition des hauteurs de la Maine au Pont de Verdun présente une cassure aux alentours d'une hauteur de 5.5m à 6m, cette forme est similaire à ce qui est constaté sur la Loire à Saumur et Montjean-sur-Loire (cassure aux alentours d'un débit de 4800 m³/s sur la Loire à Montjean-sur-Loire – cf 6.1).

L'estimation des hauteurs d'eau pour les périodes de retour de 2 à 100 ans, faite directement à partir de l'estimation des fréquences empiriques sur la période complète 1877-2004, fournit les valeurs du Tableau 2. Pour les valeurs de période de retour supérieure à 5 ans, les analyses précédentes indiquent que l'on peut considérer que l'incidence de l'approfondissement de la Loire est très faible voire négligeable.

Tableau 2 : La Maine à Angers au Pont de Verdun - Estimation des hauteurs de période de retour 5 à 100 ans pour la période 1877-2004

	Hauteur au Pont de Verdun	Intervalle de confiance à 90% (Gumbel)
H période de retour 5 ans	5.61 m	+/-19cm
H période de retour 10 ans	6.02 m	+/- 23cm
H période de retour 20 ans	6.1 m	+/- 30 cm
H période de retour 50 ans	6.5 m	+/- 38cm
H période de retour 100 ans	6.64 m	+/-44 cm

4.3. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR AU PONT DE VERDUN ET LES DEBITS DE LA LOIRE ET DES AFFLUENTS DE LA MAINE

Afin de caractériser les hauteurs à Verdun supérieures à 4m, on a analysé les relations entre la hauteur au Pont de Verdun et les variables suivantes :

- le débit de la Loire à Saumur et Montjean-sur-Loire,
- la hauteur d'eau de la Loire à Montjean-sur-Loire,
- le débit des affluents de la Maine : Mayenne à Chambellay, Oudon à Segré (ou Port aux Anglais avant 1995), Sarthe à Beffes, Loir à Durtal,
- le débit des petits affluents de la Loire (Layon principalement [station de St Lambert du Lattay], car trop peu de données sont disponibles en continu sur le Thouet).

Cette analyse a été effectuée à partir de l'échantillon des crues supérieures à 4m à Angers constitué pour l'analyse statistique, en prenant en compte les débits journaliers du même jour ou de la veille aux stations hydrométriques des affluents de la Maine (veille ou avant-veille à Beffes) et les débits de la veille à Saumur. Les débits journaliers sont les débits moyens calculés de 0h à 0h (valeurs issues de la banque HYDRO). Du point de vue temporel, elles peuvent par conséquent être affectées à l'instant 12h.

La hauteur d'eau à Montjean-sur-Loire prise en compte pour cette analyse est la hauteur moyenne correspondant au débit journalier, calculée à partir des courbes de tarage de la période correspondante (courbes provisoires). Il ne s'agit par conséquent pas des hauteurs moyennes réellement mesurées, mais cette méthode de calcul permet d'obtenir des données complètes (les limnigrammes ne sont pas disponibles pour toutes les crues) et cohérentes pour l'analyse. Seules les hauteurs moyennes après 1945 ont été évaluées. En effet, les courbes disponibles commencent en 1960 (remarque : pour les 7 crues de l'échantillon antérieures à 1960 [dates de 1950 à 1958], on a utilisé la courbe la plus ancienne disponible). D'autre part, la relation fine entre la hauteur à Angers et la hauteur à Montjean-sur-Loire sera étudiée dans le volet prévision, pour l'établissement des prévisions à Angers.

Le Tableau 3 fournit les coefficients de détermination calculés entre la hauteur maximale à Angers et les débits moyens journaliers des différentes stations. Ce tableau fournit également le coefficient obtenu entre les hauteurs à Angers et la hauteur à Montjean-sur-Loire. Le coefficient de détermination (carré du coefficient de corrélation) mesure la qualité de la relation linéaire entre deux variables. Ce coefficient est compris entre 0 et 1, la valeur de 1 correspondant à une relation linéaire parfaite. La période de données prise en compte est variable selon les stations en fonction des données disponibles, on a pris en compte pour chaque station la période maximale de données disponibles. Pour la somme des débits amont de la Maine, la période prise en compte correspond à la période de données commune aux 4 stations amont. Le nombre de valeurs disponible pour le calcul de la corrélation est fourni également dans le tableau.

Tableau 3 : Coefficient de détermination des corrélations entre la hauteur à Angers et les débits et hauteurs journalières à Montjean, les débits journaliers à Saumur et sur les affluents de la Maine, pour les crues supérieures à 4m à Angers

	Montjean-sur-Loire	Saumur	Segré	Beffes	Chambe Ilay	Durtal	Somme débits amont Maine (*)	Somme débits amont Maine+Loire (*)
Période	1879-1945 1946-2004	1946-2004	1969-2004	1971-2004	1965-2004	1961-2004	1971-2004	1971-2004
Variable								
Débit j (Nb valeurs)	Av45 : 0.93 (55) Ap 45 : 0.88 (51)		0.56 (27)	(j-1) 0.57 (33)	0.42 (38)	0.54 (44)	0.58 (25)	0.9 (25)
Débit j-1 (Nb valeurs)		0.62 (51)	0.49 (27)	(j-2) 0.58 (33)	0.36 (38)	0.56 (44)	0.57 (25)	0.93 (25)
Hauteur j (Nb valeurs)	Ap 45 : 0.89 (51)							

J = débit (ou hauteur) du même jour

J-1 = débit (ou hauteur) de la veille

J-2=débit (ou hauteur) de l'avant-veille

(n) = nombre de valeurs disponible pour le calcul de la corrélation

(*) La somme des débits amont prend en compte un décalage à Beffes de 1 jour par rapport aux autres affluents. Le débit pris en compte à Saumur est toujours celui de la veille. Ce choix a été fait dans cette analyse pour tenir compte d'un décalage lié aux temps de propagation a priori différenciés à partir des stations amont. L'analyse plus détaillée des décalages temporels est effectuée en 6.5.

Hauteur à Angers / débit journalier de la Loire à Montjean-sur-Loire

Les graphes 1 et 2 fournis en annexe A2.3, effectués pour les périodes 1879-1945 et 1946-2004, montrent une dispersion moins forte des points pour la première moitié du XXème siècle (meilleur coefficient de détermination), ce qui pourrait indiquer que les modifications du lit de la Loire ont été un peu plus importantes dans la deuxième moitié du XXème siècle. On note un décalage de l'ordre de 40 cm entre les deux droites de régression, construites sur chaque période séparément (pour un même débit de la Loire, la hauteur au Pont de Verdun a diminué d'environ 40cm entre la première et la deuxième moitié du XXème siècle) (graphe 3 – Annexe A2.3). Au-delà de 4500 m³/s à Montjean-sur-Loire, les 2 nuages de points se mélangent. Le décalage moyen s'y réduit. Cela corrobore le résultat précédent (peu d'influence de l'approfondissement au delà de 4500 m³/s à 5000 m³/s).

La relation n'est cependant pas de très bonne qualité. Si l'on regarde uniquement la deuxième moitié du XXème siècle, les points se situent dans un fuseau globalement croissant, les valeurs inférieures du fuseau sont les crues pour lesquelles le débit de la

Loire à Saumur est relativement faible, les valeurs supérieures du fuseau correspondant aux points pour lesquels le débit de la Loire est le plus fort (graphe 4 – Annexe A2.3).

Hauteur à Angers / hauteur moyenne journalière à Montjean-sur-Loire

Cette analyse est effectuée sur la période 1946-2004, pour les crues supérieures à 4m à Angers, soit pour un total de 51 crues.

La relation entre les hauteurs est un peu meilleure que la relation entre les débits, mais on retrouve le même type de fuseau (graphes 5 et 6 – annexe A2.3, représentant la hauteur moyenne journalière à Montjean-sur-Loire en fonction de la hauteur à Angers). Cependant, la position des points est modifiée du fait de la transformation en hauteur. On note dans ce cas que les crues les plus récentes sont situées dans la partie inférieure du fuseau, et les crues les plus anciennes dans la partie supérieure. En fait, pour une même hauteur à Montjean-sur-Loire, la hauteur à Angers est plus importante pour les crues récentes (l'écart est de 30 à 50cm environ). Cela est d'autant plus vrai que les conditions de débit à Saumur sont similaires. Cela traduit le fait qu'une même hauteur à Montjean-sur-Loire correspond à un débit plus fort pour la période récente (à cause de l'approfondissement du lit), et par conséquent à une hauteur supérieure à Angers. En effet, à condition de débit égale à Saumur, un débit plus élevé à Montjean-sur-Loire correspondra à un débit plus élevé sur la Maine.

Hauteur à Angers / débit de la Loire à Saumur

Le graphe 7 fourni en annexe A2.3 représente la hauteur à Angers en fonction du débit de la veille à Saumur, pour la période 1946-2004, soit pour les 51 crues ayant dépassé 4m à Angers.

Les points sont beaucoup plus dispersés, et le graphe met également en évidence une dispersion des points en fuseau globalement croissant, de largeur environ 1200m³/s (débit à Saumur), une même hauteur pouvant être observée à Angers pour un débit à Saumur compris entre deux valeurs séparées de 1200 m³/s.

Pour les plus fortes hauteurs à Angers, les deux extrémités du fuseau représentent les crues de décembre 1982 et janvier 1995.

Hauteur à Angers / débits des affluents de la Maine

Les relations sont représentées sur les graphes 8 à 11 de l'annexe A2.3. Les étiquettes associées aux points des graphes sont les valeurs correspondantes des débits de la Loire à Saumur la veille.

La période pour laquelle des données sont disponibles commence en 1961 mais on ne dispose de l'ensemble des stations qu'à partir de 1971. D'autre part, certaines stations présentent parfois des lacunes, en particulier pour les données de l'Oudon. Les périodes disponibles ainsi que le nombre de crues analysé pour chaque affluent sont les suivantes :

- Segré (Port aux anglais avant 1995) : 1969-2004 (27 crues)
- Beffes : 1971-2004 (33 crues)
- Chambellay : 1965-2004 (38 crues)
- Durtal : 1961-2004 (44 crues)

Les graphes 8 à 11 fournis en annexe A2.3, établis pour chaque affluent, montrent le même type de relation :

Une relation assez lâche (coefficient de détermination compris entre 0.4 et 0.6 – voir Tableau 3) mais globalement croissante entre le débit de l'affluent et la hauteur à Angers, et très influencée par le débit de la Loire :

- les crues pour lesquelles le débit de la Loire est faible (inférieur à 2000 m³/s), se regroupent dans la partie supérieure gauche du graphe,
- les crues pour lesquelles le débit de la Loire est élevé (supérieur à 4000 m³/s), se regroupent dans la partie inférieure droite du graphe,
- au milieu du graphe, on trouve des crues pour lesquelles le débit de la Loire évolue entre 2600 et 3600 m³/s.

Hauteur à Angers / Somme des débits « amont » des affluents de la Maine

On dispose de 25 crues pour cette analyse (période 1971-2004).

La somme des débits amont a été calculée en additionnant les débits amont du même jour ou de la veille (Beffes). On a également calculé la somme des débits amont de la veille (dans ce cas, le débit à la station de Beffes est décalé d'un jour supplémentaire).

La relation obtenue est de meilleure qualité que les relations obtenues avec certains affluents pris séparément (Mayenne, Oudon, Loir). Elle a une qualité similaire à la relation entre les hauteurs à Angers et le débit de la Sarthe à Beffes (cf coefficients de détermination fournis dans le tableau Tableau 3). On retrouve le même type de comportement (graphe 12 – Annexe A2.3).

Hauteur à Angers / Somme des débits « amont » de la Maine et de la Loire

On dispose de 25 crues pour cette analyse (période 1971-2004).

La somme des débits amont a été calculée en additionnant les débits amont du même jour ou de la veille (Beffes, Saumur). On a également calculé la somme des débits amont de la veille (dans ce cas, le débit à la station de Beffes est décalé d'un jour supplémentaire).

Le graphe 13 – Annexe A2.3 met en évidence :

- une relation de bonne qualité entre les 2 variables, la relation est meilleure avec la somme des débits amont de la veille (Beffes j-2) qu'avec la somme des débits amont du même jour (Beffes j-1).
- une différenciation entre l'incidence du débit de la Loire et celle du débit de la Maine sur le niveau à Angers. Pour les deux plus fortes crues étudiées à Angers, janvier 1995 et décembre 1982, on note :
 - un accroissement de 1100 m³/s du débit de la Loire à Saumur provoque une surcote de l'ordre de 45cm à Angers (par rapport aux crues d'avril 1983 et février 1988 ayant un débit total des affluents de la Maine similaire aux alentours de 950 m³/s, l'accroissement de débit de la Loire de l'ordre de 1100 m³/s pour la crue de 12/82 entraîne une surcote à Angers de l'ordre de 40 à 50 cm),
 - un accroissement de 600m³/s du débit des affluents de la Maine provoque une surcote de l'ordre de 55cm à Angers (01/95) (par rapport à la crue de janvier 2000 ayant un débit similaire à Saumur de l'ordre de 3600 m³/s, l'accroissement du débit total des affluents de la Maine de 600 m³/s pour la crue de janvier 1995 entraîne une surcote à Angers de l'ordre de 55cm). Cela est visible également sur le graphe 12.

Pour approfondir l'analyse, on a représenté sur la Figure 1 la somme des débits amont de la Maine en fonction du débit à Saumur, ainsi que la valeur de la hauteur à Angers pour chaque point (la période de données disponibles est 1971-2004, avec 25 crues). Les points s'organisent de manière cohérente et l'on peut tracer les courbes enveloppes des hauteurs à Angers par tranche de 50cm qui permettent de visualiser

l'incidence relative des deux variables. Ces deux variables représentent les deux phénomènes influençant la hauteur à Angers (crue de la Maine, crue de la Loire).

Le Tableau 4 traduit les plages de variation de ces deux variables pour chaque tranche de hauteur à Angers (remarque : le nombre de crues disponibles pour cette analyse est réduit à 25 du fait de l'absence de données à certaines stations).

Tableau 4 : Plages de variation des débits amont de la Maine et de la Loire en fonction de la classe de hauteur à Angers (sur 25 crues de la période 1971-2004)

Classe de hauteur Angers	Somme débits amont Maine j-1 (Beffes j-2) (m3/s)	Débit Loire Saumur j-1 (m3/s)	Somme Maine + Loire j-1 (Beffes j-2) (m3/s)
4-4.5m (10 crues)	50-710	1950-3500	2470-3520
4.5-5m (3 crues)	280-770	2600-33000	3380-3780
5-5.5m (2 crues)	200-1330	2750-3950	4080-4150
5.5-6m (4 crues)	800-1330	2750-4260	4080-5190
6-6.5m (5 crues)	960-1270	3650-5350	4920-6310
>6.5m (1 crue)	1870	3620	5490

Hauteur à Angers / débit du Layon

L'analyse est effectuée sur la période 1967-2004, avec des données pour 37 crues supérieures à 4m à Angers.

Par rapport aux relations entre le niveau à Angers et le débit des affluents de la Maine pris séparément, le graphe 14 - Annexe A2.3 met en évidence une relation apparemment de meilleure qualité entre le débit du Layon et la hauteur à Angers, du moins quand la Loire est en crue. Pour les fortes crues du Layon associées à de faibles crues de la Loire (regroupées dans la partie supérieure gauche du graphe) il n'y a aucun lien avec la hauteur à Angers.

La relation entre les débits du Layon et la somme des débits amont de la Maine a un coefficient de détermination de 0.66, soit une qualité un peu meilleure que celle des relations analysées précédemment entre la hauteur à Angers et les débits des affluents de la Maine (cf graphe 15 en annexe A2.3), ce qui pourrait expliquer en partie la relation mise en évidence entre le débit du Layon et la cote à Angers. Il est à noter également que le Layon peut être influencé par le niveau de la Loire, dans ce cas, les débits de crue du Layon pourraient être surestimés en cas de crue concomitante de la Loire. Cela pourrait contribuer à une meilleure relation apparente entre le débit du Layon et la hauteur à Angers.

La corrélation du débit du Layon avec le débit de la Loire à Saumur est de mauvaise qualité (graphe 16 – Annexe A2.3), elle est meilleure avec le débit de la Loire à Montjean-sur-Loire (graphe 17 – Annexe A2.3), du moins à partir d'un débit en Loire de l'ordre de 3400 m3/s (même type de relation qu'entre la hauteur à Angers et le débit du Layon).

Figure 1 - Relation entre le débit a Saumur (j-1) et la somme des débits amont de la Maine (j-1) (Beffes j-2) étiquettes : hauteur à Angers - Estimation des courbes d'iso-hauteurs à Angers

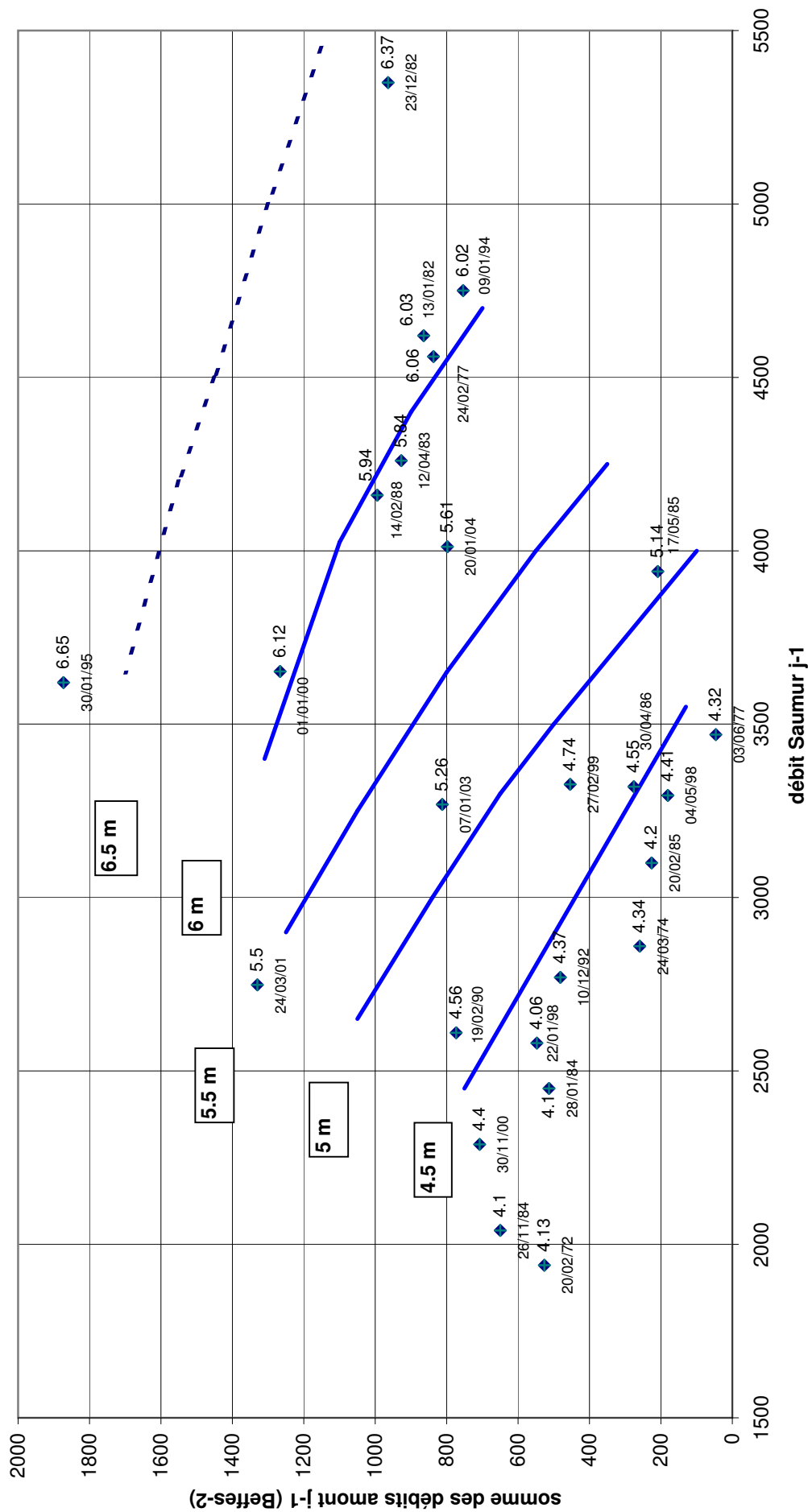


Figure 1 : Courbes iso-hauteur des crues à Angers en fonction du débit à Saumur et de la somme des affluents de la Maine

4.4. ANALYSE DES RELATIONS ENTRE LES HAUTEURS AU PONT DE VERDUN ET LES NIVEAUX D'EAU DANS LES BVA

Pour cette analyse, on a utilisé les relevés de niveaux recueillis aux échelles de crue suivantes :

- Mayenne : Chambellay, Montreuil/Maine, Grez-Neuville, Roussière, Sautré, Montreuil-Belfroy, Cantenay-Epinard,
- Sarthe : Chateauneuf/Sarthe, Cheffes, Villevêque, Briollay, Ecoflant,
- Loir : Durtal, Seiches, Briollay,
- Oudon : Lion d'Angers (données très partielles, non exploitées).

Les relevés sont disponibles pour les crues suivantes (un relevé par jour, données non disponibles à toutes les échelles) :

- janvier 2003
- février 2003
- janvier 2004

On a également utilisé les relevés de niveaux aux écluses de :

- Mayenne : La Jaille Yvon, Chenillé, La Roche Chambellay, Montreuil/Maine, Grez-Neuville, La Roussière, Sautré, Montreuil Belfroy
- Sarthe : Pendu, Villechien, Chateauneuf/Sarthe, Cheffes
- Oudon : Maingué, La Chapelle sur Oudon, Himbaudière

Le Loir n'est plus navigable (pas de données).

Ces relevés comportent plusieurs valeurs par jour (entre 3 et 6), les données n'étant pas disponibles à l'ensemble des écluses pour toutes les crues. On dispose des relevés amont et aval pour chaque écluse. Les crues pour lesquelles des données ont été recueillies sont : décembre 1982, janvier 1994, janvier-février 1995, décembre 1999 - janvier 2000, décembre 2000, janvier 2001, janvier-février 2004.

Mesures aux échelles de crue

Pour chaque crue, on a représenté l'évolution des niveaux aux différentes échelles en fonction du niveau à Angers en identifiant les différentes crues (graphes 1 à 16 – Annexe A3.1). Les niveaux à Angers sont les relevés à l'échelle de crue du Pont de Verdun, située en aval du pont de Verdun et ne prenant pas en compte par conséquent le remous du Pont de Verdun. Les niveaux sont en m NGF. Sur certains de ces graphes, on a également indiqué le débit à la station amont.

Chaque graphe représente donc l'évolution du niveau à différentes échelles en fonction du niveau à Angers, au voisinage du maximum de la crue.

L'examen de ces graphes montre :

- sur le Loir et la Sarthe : une très forte influence du niveau à Angers sur le niveau aux échelles de crue (Ecoflant, Briollay, Cheffes), le débit de la rivière n'intervenant que secondairement (par exemple, crue de janvier 2004). L'échelle de Chateauneuf/Sarthe est encore influencée par le niveau aval.

- sur la Mayenne : une faible influence du niveau aval sur les échelles de Montreuil/Maine et Chambellay, avec une incidence plus forte du niveau à Angers sur les échelles aval (Grez-Neuville, Sautré, Roussière).

On peut cependant noter que l'incidence du débit amont sur les niveaux aux échelles peut rester importante, même pour les échelles très influencées comme par exemple les échelles de Briollay et de Cheffes. Sur les graphes 1 et 3, on voit se dessiner deux droites quasi-parallèles pour les hauteurs à Angers inférieures à 4.75m (l'écart est d'environ 30 à 40 cm à Cheffes et 50cm à Briollay pour une même hauteur à Angers). Les points se trouvant sur la droite supérieure appartiennent à la crue de janvier 2001, ceci s'explique par la particularité de cette crue qui a été marquée par une très forte crue des affluents face à une petite crue de la Loire.

Mesures aux écluses

On a effectué le même type de graphe qu'avec les données aux échelles de crue (graphes 1 à 30 – Annexe A3.2). Les mesures sont plus fréquentes qu'aux échelles de crue et permettent de couvrir une durée plus importante de crue. Cependant, pour certaines écluses, il n'y a plus de mesures lorsque le niveau devient trop élevé. Les conclusions sont identiques.

Pour chaque écluse, les hauteurs amont et aval enregistrées au cours de chaque crue ont été tracées en fonction de la hauteur de la Maine à Angers au même moment, et les différentes crues sont identifiées sur les graphes.

En ce qui concerne la Mayenne, il y a une bonne relation avec la hauteur de la Maine à Angers en aval de l'écluse de la Roussière.

En ce qui concerne la Sarthe, il y a une bonne relation en aval de l'écluse de Chateauneuf sur Sarthe.

Plus en amont de ces deux stations, la hauteur de la Maine à Angers peut influencer la cote aux écluses mais de manière moins franche, c'est-à-dire qu'à une valeur de hauteur de la Maine à Angers correspond un intervalle de plusieurs valeurs de hauteurs aux écluses. Plus on va vers l'amont et plus l'influence aval intervient pour les hauteurs élevées à Angers.

Pour l'Oudon, on note une influence qui remonte jusqu'à l'écluse de la Chapelle-sur-Oudon amont, mais qui se manifeste pour des niveaux relativement hauts à Angers.

Lorsque les relevés ne sont pas influencés par la cote aval à Angers, les graphes présentent des points qui peuvent être très dispersés. Rappel : pour de nombreuses écluses et en particulier les écluses de la partie aval des BVA, les mesures ne couvrent pas les pointes de crue du fait de la submersion des échelles de mesure. D'autre part, les mesures sont généralement effectuées plus longtemps aux échelles amont qu'aux échelles aval.

Le Tableau 5 présente les cotes minimales et maximales mesurées aux écluses, pour les classes de hauteur de 3-4m, 4-5m, 5-6m et supérieures à 6m à Angers.

Le début d'incidence aval sur le niveau mesuré à une écluse se manifeste par un changement relativement net de pente lorsque l'on représente la cote mesurée à l'écluse en fonction du niveau aval. Le changement de pente s'effectue dans une plage de valeurs de hauteurs à Angers qui permet d'estimer la hauteur d'eau à Angers à partir de laquelle commence généralement l'incidence aval. Cette valeur est indiquée dans le Tableau 5. Les valeurs obtenues sont cohérentes de l'amont vers l'aval. Remarque : dans certains cas, l'interprétation des graphes est délicate, les points étant peu nombreux et les comportements parfois différents selon les crues.

Tableau 5 Variations des cotes aux écluses en fonction du niveau à Angers

	Hauteur à Angers				hauteur Angers début d'influence aval
	3-4m	4-5m	5-6m	>6m	
LOUDON					
<i>Maingué amont</i>	21.7-23.2	21.8-23.8	21.8-23.6	21.9-23.6	non
<i>Maingué aval</i>	20.7-22.9	20.8-23.4	20.8-23	21-23.4	non
<i>Chapelle amont</i>	20.7-22.4	20.8-22.2	20.8-23	20.9-22.4	6 ?
<i>Chapelle aval</i>	19.6-22.1	19.8-22.2	19.8-22.4	20.3-22.4	5.4
<i>Himbaudière amont</i>	19.5-20.7	19.6-20.2	19.6-21	20.3-20.7	?
<i>Himbaudière aval</i>	18.6-20.5	18.7-20	19-20.4	20-20.7	4.9
MAYENNE Amont LOUDON					
<i>Jaille amont</i>	22.1-22.8	22.2-22.8	22.1-22.7	22.4-22.7	non
<i>Jaille aval</i>	21.4-22.6	21.5-22.6	21.3-22.1	21.9-22.5	non
<i>Chenillé amont</i>	21.4-22.2	21.4-22.5	21.3-22.4	21.7-22.3	6.3 ?
<i>Chenillé aval</i>	20.3-21.8	20.3-21.5	20.3-21.8	20.6-21.8	6.3 ?
<i>La Roche amont</i>	20.2-21.3	20.3-21.8	20.3-22	20.5-22.6	5.8
<i>La Roche aval</i>	19.5-21	19.5-21	19.5-20.9	20.2-20.9	5.4
<i>Montreuil sur Maine amont</i>	19.5-20.8	19.6-20.8	19.5-20.7	20.3-20.9	5
<i>Montreuil sur Maine aval</i>	18.6-20.5	18.9-20.5	18.9-20.6	20.2-20.7	4.9
MAYENNE AVAL LOUDON					
<i>Grez Neuville amont</i>	18.6-19.9	18.7-20.5	18.7-20.9		4.8
<i>Grez Neuville aval</i>	18-19.4	18.2-20.4	18.1-20.4		4.2
<i>Roussière amont (*)</i>	18-19.3	18.1-19.9	18.9-20.3		3.9
<i>Roussière aval (*)</i>	17.1-19	18-20.4	18.9-20.2		2.7
<i>Sautré amont</i>	17.1-18.6	18.1-19.6	19-19.8		2.7
<i>Sautré aval</i>	17-18.6	18.1-19.6	19-19.8		2.4
<i>Montreuil amont</i>	17-18.2	17.9-18.6			2.3
<i>Montreuil aval</i>	16.9-18.1	17.6-18.5			0
SARTHE					
<i>Pendu amont (*)</i>	21.1-22	21.2-22.1	21.4-22.4	21.8-22.2	4.7 ?
<i>Pendu aval (*)</i>	20.3-21.6	20.3-21.91	20.6-22.2	21.2-22.1	4.7 ?
<i>Villechien amont (*)</i>	20.1-20.6	20.2-20.8	20.1-21.1	20.8-21.1	5.7 ?
<i>Villechien aval (*)</i>	18.7-20	18.8-20	19.3-20.9	20.9-21.4	4.2
<i>Châteauneuf amont (*)</i>	18.5-19.4	18.6-19.7			4.3
<i>Châteauneuf aval (*)</i>	17.3-19.3	18.1-19.7	18.9-20.6	20-21.3	2.9
<i>Cheffes amont</i>	17.1-18.3	18.2-18.6			2.8
<i>Cheffes aval</i>	16.9-18				0

Afin de déterminer l'influence du débit sur les cotes NGF au niveau des écluses, on a représenté les points des graphes précédents en fonction du débit amont, par tranche de 100 m³/s.

Ce type de graphique a été effectué pour les écluses suivantes : Maingué amont, la Jaille Yvon amont, La Roussière aval, Montreuil Belfroy aval, le Pendu amont, Villechien aval, Cheffes aval (graphes 31 à 37 fournis en annexe A3.2).

Ainsi, ces graphes montrent que dans la gamme des hauteurs relevées :

- les écluses de Maingué amont, du Pendu amont et de la Jaille Yvon amont ne sont pas influencées par la cote à Angers, les cotes sont directement influencées par le débit de l'Oudon, de la Sarthe et de la Mayenne respectivement.
- les écluses de Cheffes aval et de Montreuil Belfroy aval ont des cotes qui sont fortement corrélées à la cote de la Maine à Angers. Cependant, de forts débits amont peuvent entraîner des surcotes. Le Tableau 6 fournit une estimation de l'écart moyen constaté entre les niveaux mesurés aux écluses, pour une même hauteur à Angers en fonction des tranches de débits amont concernées. On constate que la surcote diminue lorsque la hauteur à Angers augmente. Remarque : Ces valeurs sont des estimations, qui fournissent des éléments de comparaison intéressants, cependant, le nombre de points de mesures est parfois faible pour certaines écluses et cette analyse a été réalisée sur 8 crues.

Tableau 6 : Ecart de cotes au droit des écluses en fonction du débit amont

écluse	classes de débits amont concernées	Hauteur de la Maine à Angers			
		3m	4m	5m	6m
Roussière aval	entre 100-200m ³ /s et 200-300 m ³ /s	zone avant influence	30cm	0	0
	entre 200-300m ³ /s et 300-400 m ³ /s	zone avant influence	40 cm	0	0
	entre 300-400m ³ /s et >400 m ³ /s	zone avant influence	50 cm	40 cm	0
Montreuil Belfroy aval	entre 100-200m ³ /s et 200-300 m ³ /s	30 cm	10 cm	0	pas de valeurs
	entre 200-300m ³ /s et 300-400 m ³ /s	40 cm	30 cm	pas de valeurs	pas de valeurs
	entre 300-400m ³ /s et >400 m ³ /s	30 cm	0	pas de valeurs	pas de valeurs
Villechien aval	entre 100-200m ³ /s et 200-300 m ³ /s	zone avant influence	zone avant influence	25 cm	0
	entre 200-300m ³ /s et 300-400 m ³ /s	zone avant influence	zone avant influence	70 cm	40 cm
Cheffes aval	entre 100-200m ³ /s et 200-300 m ³ /s	40 cm	30 cm	pas de valeurs	pas de valeurs
	entre 200-300m ³ /s et 300-400 m ³ /s	10 cm	5 cm	pas de valeurs	pas de valeurs

4.5. REMOUS AU PONT DE VERDUN

Les données disponibles pour cette évaluation sont très partielles. Elles correspondent à des mesures effectuées pour quelques crues. Les données des nouvelles stations installées aux ponts de Haute Chaîne et Basse Chaîne fournissent des informations pour les crues récentes de janvier 2003 et janvier 2004 uniquement.

Les informations disponibles sont rassemblées dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Données sur le remous au Pont de Verdun

Date et heure	hauteur amont (m)	Hauteur aval (m)	Remous (m)
30/01/1995 09 :00	7.04	6.66	0.38
21/12/1999 08 :00	6.30	6.12	0.18
23/03/2001	5.68	5.52	0.16
08/01/2001 08 :00	5.04	4.90	0.14
06/01/2003 19 :00	5.35	5.27	0.08
20/01/2004 04 :00	5.72	5.63	0.09

Les données des crues de 1995 à 2001 ont été fournies par la DIREN Centre.

Ce tableau fait apparaître des valeurs de perte de charge non négligeables, en particulier pour les fortes crues de la Maine (38cm en janvier 1995). Ces données seront utilisées pour le calage et le contrôle du modèle hydraulique.

4.6. CONCLUSIONS

L'approfondissement de la Loire a différentes conséquences sur les hauteurs à Angers :

- en comparant les hauteurs maximales à Angers observées sur la période 1877-1945 et 1946-2004, on constate une diminution de la fréquence des crues de moyenne importance (hauteur d'eau comprise entre 4.5m et 5m). Pour les crues plus importantes, on ne constate pas d'écart significatif dans la répartition des crues.
- pour un même débit de la Loire à Montjean-sur-Loire, la hauteur à Angers pour la période 1946-2004 a diminué d'environ 45cm par rapport à la période antérieure (1877-1945) en particulier pour des hauteurs inférieures à 5.5m. Au-delà, l'abaissement est moins net et plus faible.
- pour une même hauteur d'eau à Montjean-sur-Loire et à condition de débit égale à Saumur, la hauteur d'eau à Angers a augmenté d'environ 30 à 50cm entre les années 50-70 et les années 90-2000.

Relations entre la hauteur à Angers et les débits amont

Les relations entre la hauteur à Angers et les débits amont (affluents de la Maine et Loire à Saumur) ont été analysées séparément puis conjointement. Les résultats obtenus montrent que la hauteur à Angers est expliquée à la fois par la somme des débits des affluents de la Maine et par le débit à Saumur. Pour une même hauteur à Angers, les plages de variation de ces deux composantes sont importantes. Une même hauteur à Angers peut être obtenue pour une gamme de débit à Saumur variant de 1500 m³/s et pour une somme des débits de la Maine variant de 900 m³/s.

Relations entre la hauteur à Angers et les hauteurs dans les BVA

Les analyses faites à partir des relevés aux échelles de crue et aux écluses mettent en évidence une incidence de la hauteur d'eau à Angers dans les BVA qui se réduit progressivement de l'aval vers l'amont. Certaines écluses et échelles sont complètement influencées par le niveau aval, d'autres sont partiellement influencées, seules les écluses ou échelles proches des extrémités amont de la zone d'étude ne semblent pas influencées. On remarque cependant que même pour les échelles et écluses les plus influencées, le débit amont peut entraîner une surcote qui peut atteindre de 30 à 50cm.

Sur l'Oudon, l'incidence de la hauteur à Angers se manifesterait jusqu'à l'écluse de Maingué aval, sur la Mayenne, jusqu'à l'écluse de Chenillé-Changé, sur la Sarthe au moins jusqu'à l'écluse du Pendu. Sur le Loir, les données sont insuffisantes pour évaluer jusqu'où remonte l'incidence du niveau aval. L'échelle amont de Durtal ne semble pas influencée.

Les mesures aux écluses ne couvrent cependant pas toute la gamme des hauteurs à Angers, les mesures étant interrompues quand l'échelle est noyée. En particulier, pour des hauteurs supérieures à 6m, les informations sont peu nombreuses. Il est possible que pour les très fortes hauteurs à Angers, l'incidence se manifeste plus en amont.

5. ANALYSE DES APPORTS INTERMEDIAIRES

Le bassin intermédiaire entre les stations hydrométriques des affluents de la Maine et les stations de Saumur et Montjean-sur-Loire sur la Loire couvre une surface totale de 8265 km². Ce bassin se décompose en 6 entités :

- bassin versant du Thouet, affluent rive gauche de la Loire à Saumur (confluence du Thouet à l'aval de la station hydrométrique de la Loire à Saumur) : 3380 km²
- bassin versant du Layon, affluent rive gauche de la Loire en aval de la Maine : 1075 km²
- bassin versant de l'Aubance, affluent rive gauche de la Loire en aval de la Maine : 490 km²
- bassin versant de l'Authion, affluent rive droite de la Loire en amont de la Maine : 1483 km²
- bassin versant de la Maine en aval des stations de Segré, Château-Gontier, Beffes et Durtal (bassin versant intermédiaire des BVA) : 1667 km²
- bassin versant de la Loire en aval de la Maine jusqu'à Montjean-sur-Loire : 170 km²

L'objectif de cette analyse est de qualifier le comportement de ce bassin intermédiaire en période de crue de la Maine, de quantifier dans la mesure du possible ces apports pour les prendre en compte dans le modèle hydraulique et juger de l'intérêt de les prendre en compte dans les modèles de prévision.

Les données hydrométriques disponibles concernent les stations suivantes :

- St Lambert du Lattay sur le Layon (920 km²). Les données instantanées et journalières existent depuis 1972.
- Puy Notre Dame (2040 km²) et Pont de Missé (997 km²) sur le Thouet, ainsi que Massais (634km²) sur l'Argenton, affluent du Thouet entre Missé et Puy Notre Dame. Les données à Puy Notre Dame existent dans la banque HYDRO depuis 2001 (débits journaliers uniquement), avec de nombreuses lacunes (données perdues). Les données à Pont de Missé existent depuis 1995 (débits journaliers uniquement). Les données de l'Argenton existent depuis 1969. Au total, avec la station de Puy Notre Dame, 60% du bassin versant du Thouet est contrôlé. Le Thouet reçoit juste avant la confluence avec la Loire un autre affluent important : la Dive, sur laquelle il n'existe pas de station hydrométrique.
- Soulaines sur l'Aubance (172 km²). Les données instantanées et journalières existent depuis 1982.

Compte tenu du peu de données existant sur le Thouet, on a également utilisé les données de la station d'Ingrandes sur la Vienne pour l'analyse, la Vienne et le Thouet pouvant avoir des comportements relativement proches en période de crue.

Les débits de l'Authion sont évacués vers la Loire en période de crue par une station de pompage, les débits de cette station ont été recueillis auprès de l'exploitant (SAUR), sous la forme de volumes journaliers pompés (voir également en 5.4.2).

Concernant les données pluviométriques, il existe 46 stations Météo France situées dans le bassin intermédiaire, ou à proximité immédiate (27 dans le département de Maine-et-Loire et 19 dans le département des Deux-Sèvres).

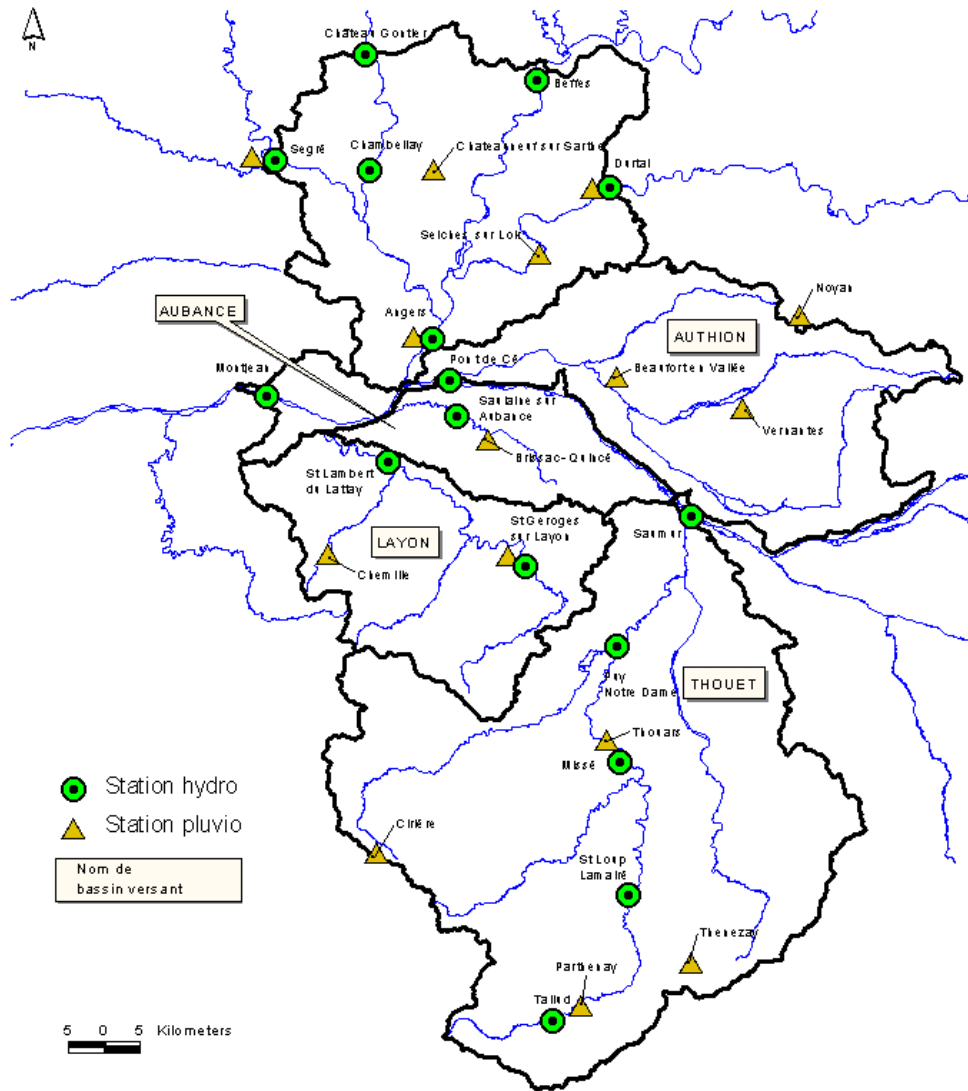
Parmi ces stations, 15 stations jugées représentatives en fonction de leur emplacement et de leur altitude ont été sélectionnées. On a donné la priorité aux stations automatiques pour lesquelles des données en temps réel pourraient être disponibles. Les données de pluviométrie mensuelle ont été acquises auprès de Météo France, pour cinq crues. La liste de ces stations est fournie dans le Tableau 8. Les données aux stations automatiques de Marcé et Beaucouzé, non disponibles avant 1992, ont été remplacées par les données des stations voisines de Seiches-sur-le-Loir et d'Angers pour toute la période analysée.

Tableau 8 : Stations pluviométriques Météo France dans le bassin versant intermédiaire

Nom station	Sous-bassin	station automatique	Altitude (m)
Segré	BVA (Oudon)	oui (temps réel)	45
Chateaufort/Sarthe	BVA (Sarthe)	non	28
Durtal	BVA (Loir)	non	42
Seiches-sur-le-Loir	BVA (Sud Loir)	non	28
Angers ville	BVA (Maine)	non	44
Noyant	Authion (est)	non	84
Vernantes	Authion (centre)	non	47
Beaufort en Vallée	Authion (ouest)	non	28
Brissac Quincé	Aubance	non	59
Chemillé	Layon (ouest)	non	105
St Georges / Layon	Layon (centre –est)	non	59
Cirière	Thouet (sud-ouest)	non	200
Parthenay	Thouet (sud)	oui (temps réel)	159
Thouars	Thouet (centre)	oui (temps réel)	80
Thenezay	Thouet (sud-est)	oui (temps réel)	140

La Figure 2 représente la position des stations hydrométriques et pluviométriques, ainsi que le découpage du bassin versant intermédiaire en sous-bassins versants.

Figure 2 : Bassin versant intermédiaire – Stations hydrométriques et pluviométriques



5.1. GEOLOGIE

Dans le **bassin versant intermédiaire des BVA**, l'axe de la Sarthe constitue quasiment la limite entre les terrains sédimentaires du bassin parisien (à l'est) et les terrains primaires du massif armoricain (à l'ouest).

Les formations primaires sont constituées principalement de roches sédimentaires : siltites et grès verts en alternance (roches à structure très fine), avec des passées de quartzites, à structure plus grossière.

Les formations secondaires des terrains du bassin parisien sont ici essentiellement marneuses et sablo-gréseuses.

Les formations primaires et secondaires sont en partie recouvertes :

- entre la Sarthe et la Mayenne, par des formations limoneuses présentant des faciès hybrides assez variables (argilo-silteux à sablo-graveleux) ;
- par les terrasses alluviales quaternaires de la Mayenne, de la Sarthe et du Loir. Ces terrasses sont constituées de matériaux assez grossiers et de sables ;
- par des formations sableuses recouvrant par endroit les terrasses quaternaires (sables de solifluxion) ; en particulier, le triangle Tiercé-Montreuil/Loir-Soucelles est totalement recouvert par ces formations.

Les vallées sont occupées par des alluvions récentes présentant un faciès argileux en surface.

Le bassin de l'Authion est situé dans la partie sédimentaire à rattacher au bassin parisien. Les terrains sont majoritairement constitués de formations marneuses (partie basse du bassin), sablo-gréseuses et gréseuses jusqu'en amont du bassin. Des formations alluviales recouvrent la vallée (en rive gauche de l'Authion, jusqu'à la Loire).

Le bassin du Layon est situé sur le massif armoricain, les coteaux du Layon qui constituent la limite nord-ouest/sud-ouest du bassin étant situés sur la faille ligérienne. Les parties aval et centrale du bassin sont constituées de terrains sédimentaires et détritiques avec des faciès couramment rencontrés dans les bassins d'âge carbonifère : conglomérats de roches diverses natures (schistes, grès, quartz, roches volcaniques), schistes et mica-shistes. La partie amont du bassin comporte des affleurements de granite et roches cristallines.

Le bassin de l'Aubance est situé dans une zone de transition entre les deux formations (massif armoricain : formations de schistes gréseux et bassin parisien : formations de marnes et sables verts, et gréseuses sur les parties amont).

Le bassin du Thouet se divise en deux grands ensembles :

- la partie ouest dans laquelle on trouve les terrains granitiques du massif armoricain. Ce socle granitique constitue un terrain relativement peu perméable, et favorable au ruissellement
- la partie est dans laquelle on trouve les terrains sédimentaires du bassin parisien. Le recouvrement se fait d'est en ouest et du sud vers la nord, l'aval du bassin (en aval de l'Argenton) étant entièrement recouvert par les terrains du bassin parisien. L'Argenton est situé entièrement dans les terrains primaires. La Dive, affluent aval rive droite, est située entièrement dans les terrains sédimentaires du bassin parisien. Ces terrains sont constitués de roches calcaires très perméables, parfois karstifiées, et constituent une réserve aquifère importante (la Dive est en effet soumise à des crues de nappe, plutôt qu'à des crues de ruissellement).

Conclusion :

Du point de vue de l'aptitude au ruissellement, le bassin versant intermédiaire est majoritairement constitué de terrains de nature peu perméable. Seuls quelques secteurs sont constitués de terrains plus perméables : terrasses alluviales de la Mayenne, de la Sarthe et du Loir, amont du bassin de l'Authion. Le bassin de la Dive (affluent rive droite du Thouet) est très spécifique puisqu'il s'agit de terrains calcaires très perméables, générant des crues de nappes.

5.2. ANALYSE DES PLUIES MENSUELLES

Les données des pluies mensuelles ont été récupérées pour le mois de la crue étudiée, ainsi que les deux mois précédant la crue, soit pour les périodes suivantes :

- octobre 1982 - décembre 1982
- novembre 1994 - février 1995
- octobre 1999 - janvier 2000
- novembre 2000 - mai 2001
- décembre 2003 - février 2004

5.2.1. Représentation des cumuls mensuels en fonction de l'altitude

Pour chaque crue, on a représenté le cumul mensuel du mois le plus pluvieux de chaque période, en fonction de l'altitude, en groupant les stations par sous-bassin versant. Ces graphes sont fournis en annexe A4.1. Sur chaque graphe, les étiquettes représentent une abréviation du nom de la station et du bassin concerné. L'examen de ces graphiques montre :

- un comportement globalement homogène de l'ensemble des stations situées à faible altitude (inférieure à 100 m), avec pour la crue de janvier 1995 des écarts plus importants pour ce groupe de stations. La station de Thouars (la plus au sud de ce groupe) reçoit la plupart du temps un cumul situé à la valeur minimale ou inférieur à celui des autres stations,
- un gradient pluviométrique en fonction de l'altitude pour le bassin du Thouet,
- un gradient pluviométrique en fonction de l'altitude pour les bassins de l'Authion et du Layon, mais avec des comportements différents possibles pour certaines crues, en particulier la crue de janvier 2004. Pour cette crue, sur l'Authion, l'ouest du bassin (partie basse) est plus arrosé que la partie est (partie haute). Pour cette crue également, sur le Layon, la pluie est plus forte dans la partie basse du bassin que dans la partie haute.
- sur le bassin de l'Aubance, la station de Brissac Quincé a un cumul qui se situe selon les crues, entre les valeurs observées sur l'aval des bassins de l'Authion et du Layon.
- sur le bassin intermédiaire des BVA, pas de gradient en fonction de l'altitude (mais l'altitude reste faible, comprise entre 28 et 53m). On observe néanmoins des écarts pouvant atteindre jusqu'à 20% entre les différentes stations de cette zone.

5.2.2. Représentation spatiale des cumuls mensuels

Pour chaque crue, on a représenté les cumuls mensuels en fonction de la position spatiale de la station (graphes fournis en annexe A4.1).

Cette représentation fait ressortir deux zones de comportements différents :

- zone 1 où les précipitations sont importantes et très hétérogènes dans la zone : stations de Cirière et Parthenay.
- zone 2 où les précipitations sont moins importantes que dans la zone 1 et plus homogènes dans la zone : stations de Segré, Chateauneuf sur Sarthe, Durtal, Beaufort en vallée, Vernantes, Brissac-Quincé, St Georges sur Layon et Thouars.

Les stations de Noyant, Thenezay et Chemillé sont situées à la frontière de ces deux zones.

5.3. ANALYSE DES PLUIES JOURNALIERES

Après analyse de la répartition spatiale des données mensuelles et des variations en fonction de l'altitude, les données de pluies journalières ont été acquises pour 6 stations que l'on peut considérer comme représentatives de la pluviométrie du bassin intermédiaire : Angers ville, Vernantes, St Georges sur Layon, Chemillé, Parthenay, Thouars.

5.3.1. Représentation des pluies journalières

On a représenté les hyétogrammes journaliers à ces stations pour les crues de décembre 1982, janvier 1995, décembre 1999, janvier et mai 2001, janvier 2004 (voir graphes en annexe A4.2). On a également représenté les graphes des débits journaliers disponibles pour ces crues (voir graphes en annexe A4.3).

5.3.2. Représentation des cumuls de pluies sur une période

Les cartes de cumuls pluviométriques pour les épisodes analysés sont fournies en annexe A5. Ces cartes ont été établies par MétéoFrance à partir de l'ensemble des données pluviométriques disponibles sur la zone. Ces cartes couvrent l'ensemble du bassin versant de la Maine, ainsi que le bassin versant intermédiaire de la Loire entre Saumur et Montjean-sur-Loire.

5.4. ANALYSE DES DEBITS

5.4.1. Corrélations entre les différentes stations sur les affluents

Dans un premier temps, on a cherché à mettre en évidence les corrélations éventuelles entre les débits journaliers des différentes stations (voir graphes en annexe A4.3) :

- Entre les débits journaliers de la Vienne à Ingrandes (jour j ou jour j-1) et les débits journaliers du Layon (St Lambert du Lattay), du Thouet à Missé et de l'Argenton à Massais, on n'observe pas de corrélation nette (graphes 1 à 6 en annexe A4.3). Pour certaines crues, on constate néanmoins une certaine corrélation (par exemple décembre 1999 entre le Thouet et la Vienne à Ingrandes). Les graphes de représentation des hydrogrammes du Layon, du Thouet et de la Vienne (Ingrandes) montrent cependant que le Thouet a un comportement souvent relativement similaire à celui de la Vienne, avec une pointe en avance d'environ 24h, parfois 48h (crue de décembre 1999) sur celle de la Vienne (graphes fournis en annexe A4.4).
- Entre les débits du Thouet à Missé et les débits du Thouet à Puy Notre Dame, on observe une bonne corrélation (graphe 7 en annexe A4.3).
- Entre les débits du Thouet à Missé et les débits de l'Argenton à Massais, on observe une assez bonne corrélation (graphe 8 en annexe A4.3).
- Entre les débits de l'Argenton et les débits du Layon, on observe une assez bonne corrélation (graphe 9 en annexe A4.3)
- Entre les débits du Thouet et les débits du Layon, on observe une assez bonne corrélation, les comportements des deux rivières sont souvent similaires (graphe 10 en annexe A4.3).

5.4.2. Analyse des débits spécifiques

Les débits spécifiques des différents hydrogrammes des petits affluents composant les apports intermédiaires ont été évalués pour les crues suivantes :

- crue de décembre 1982,
- crue de janvier 1995,
- crue de décembre 1999,
- crues de janvier 2001,
- crue de mai 2001,
- crue de janvier 2004.

Les graphes de représentation de l'évolution des débits spécifiques pour chaque crue sont fournis en annexe A4.4 (graphes 1 à 12 : graphes des débits et graphes des débits spécifiques pour chaque crue).

Pour ces différentes crues, on retrouve de manière générale le classement suivant pour les débits spécifiques (des plus élevés au moins élevés) :

- l'Argenton et le Thouet,
- le Layon,
- l'Aubance.

Cette différence de débits spécifiques peut notamment s'expliquer par la différence de pluviométrie, de nature géologique et de morphologie des différents bassins, conduisant à des comportements différents.

En ce qui concerne l'Authion, ses débits sont difficilement évaluables. En effet, les débits d'apport de l'Authion à la Loire ne sont connus que lorsque la station de pompage fonctionne, c'est à dire quand le niveau de la Loire est haut. Il y a de plus un plafonnement du débit à la capacité maximale de pompage de la station. Les valeurs disponibles ne sont par conséquent qu'indicatives. On constate néanmoins que les débits spécifiques de l'Authion, lorsqu'ils sont évaluables, sont voisins de ceux de l'Aubance, et que les comportements sont assez proches (en supposant que les pointes de l'Authion sont écrêtées du fait de la limitation de la station de pompage).

En ce qui concerne la crue de mai 2001, le schéma est quasiment le schéma inverse du schéma général.

Pour cette crue, de fortes pluies se sont produites le 30 avril à Angers, ce qui explique le débit spécifique élevé de l'Aubance aux alentours du 1^{er} mai, les pluies ont été plus faibles à St Georges sur Layon, d'où un débit spécifique faible du Layon aux alentours du 1^{er} mai. De fortes pluies se sont également produites les 2 et 3 mai sur le secteur de St Georges sur Layon et de Chemillé contrairement au secteur de Parthenay. Ceci explique le débit spécifique remarquablement faible du Thouet, comparé aux autres affluents de la Loire, les 3 et 4 mai. La répartition de la pluie mensuelle sur l'ensemble du secteur d'étude pour le mois de mai 2001, montre également bien la disparité des pluies et notamment que les plus faibles précipitations se sont produites sur la partie sud du secteur d'étude.

5.4.3. Evaluation des apports intermédiaires dans la zone d'étude

Pour l'évaluation des apports intermédiaires sur l'ensemble de la zone d'étude, on propose d'utiliser les estimations suivantes, en l'absence de données complètes sur le Thouet, l'Authion, et les BVA :

- débit du Thouet : estimé à partir du débit du Layon à St Lambert du Lattay ;
- débit de l'Authion : estimé à partir du débit de l'Aubance à Soulaines ;
- débit du bassin versant intermédiaire des BVA : estimé à partir du débit de l'Aubance à Soulaines.

En effet, les débits du Layon et de l'Aubance sont disponibles pour la plupart des crues étudiées, ce qui n'est pas le cas des débits du Thouet. D'autre part, les débits de la station de pompage de l'Authion ne sont pas directement utilisables pour représenter les apports de l'Authion alors que le comportement de l'Aubance semble similaire à celui de l'Authion. Il semble que cette station puisse représenter également les apports du bassin versant intermédiaires des BVA. Du point de vue de la géologie, ces zones sont assez homogènes, ce qui n'est pas le cas du bassin du Layon (majorité de terrains primaires). Du point de vue de la pluviométrie, le bassin de l'Aubance est également plus représentatif, le bassin du Layon s'étendant vers le Sud de manière importante.

Les estimations seront effectuées pour les débits journaliers, afin de ne pas perturber les estimations par des pointes spécifiques de ces deux rivières. De plus, les pointes de courte durée de ces petits affluents auront probablement un rôle peu important sur les crues de la Loire ou de la Maine.

Les relations proposées pour l'estimation des débits journaliers des apports intermédiaires à l'exutoire des différents bassins versants intermédiaires sont les suivantes :

$$Q_{\text{Layon}}(j) = Q_{\text{Layon}}[\text{St Lambert}](j)$$

$$Q_{\text{Thouet}}(j) = Q_{\text{Layon}}[\text{St Lambert}](j-0.5) * 3.019 - 10.4$$

$$Q_{\text{Aubance}}(j) = Q_{\text{Aubance}}[\text{Soulaines}](j) (490/172)^{0.8}$$

$$Q_{\text{Authion}}(j) = Q_{\text{Aubance}}[\text{Soulaines}](j) (1483/172)^{0.8}$$

$$Q_{\text{BVA}}(j) = Q_{\text{Aubance}}[\text{Soulaines}](j) * (S_{bv}/172)^{0.8}$$

(S_{bv} est la surface du sous-bassin versant correspondant)

Entre le Layon et le Thouet, ces relations ont été établies par corrélation, en utilisant les données des différentes stations disponibles sur le Thouet (corrélation entre les débits du Thouet à Missé et à Puy Notre Dame, corrélation entre les débits du Thouet à Missé et les débits du Layon). Pour estimer le débit du Thouet, le débit pris en compte est le débit du Layon à Saint Lambert à j-0.5 (débit interpolé entre le débit du jour j et le débit du jour j-1).

Entre l'Authion, le bassin versant intermédiaire des BVA et l'Aubance, ces relations ont été établies par l'application d'une formule de type Myer (rapport des surfaces de bassin versant à la puissance 0.8), prenant en compte les surfaces respectives des sous-bassins versants.

Ces estimations seront utilisées au chapitre 6.8, pour l'analyse des volumes de stockage-déstockage.

5.5. CONCLUSION

Le bassin versant intermédiaire entre les stations hydrométriques aval des affluents de la Maine et la Loire à Saumur représente une superficie de 8265 km². Ce bassin est drainé par de petits affluents rive gauche de la Loire (Thouet, Aubance et Layon) et rive droite de la Loire (Authion) qui représentent près de 80% de la surface totale. Le bassin versant intermédiaire des BVA représente 20% du bassin intermédiaire total.

Les données disponibles sur les petits affluents ont permis d'évaluer l'importance des apports intermédiaires pour quelques crues récentes, et de comparer les comportements de ces affluents. Ces comportements sont liés à la nature géologique des bassins, ainsi qu'à leur situation :

- Le Thouet (jusqu'à l'Argenton) et le Layon ont des comportements relativement voisins, du fait de la proximité de leurs bassins amont, et de leur nature géologique comparable (terrains peu perméables). Ces bassins amont sont affectés par des pluies qui peuvent être très différentes des pluies affectant la vallée de la Loire et la zone des BVA (altitude plus élevée et positionnement plus au sud). Leurs débits spécifiques sont les plus élevés de la zone intermédiaire.
- La Dive, affluent rive droite du Thouet en aval de l'Argenton est soumise à des crues de nappe et fournit probablement un apport soutenu durant certaines périodes, mais avec des pointes « lissées ». Aucune donnée suffisamment précise pour l'étude n'est disponible sur ces débits.
- Les débits de l'Authion sont mal connus, ils ne sont évalués qu'en période de hautes eaux de la Loire, par le biais de la station de pompage qui restitue les débits à la Loire.
- L'Aubance peut être considérée comme représentative des bassins versants de faible altitude proches de la vallée de la Loire (BVA, Authion), de par sa position et sa nature géologique. Son comportement est similaire à celui de l'Authion (lorsque les débits de l'Authion sont disponibles).

Le débit journalier de ces affluents peut atteindre au total 1000 m³/s, mais leur débit reste souvent de l'ordre de 500 à 600 m³/s. Suivant l'importance de la crue de la Maine et de la Loire, ces valeurs ne sont pas négligeables par rapport aux débits amont des affluents de la Maine et de la Loire. De plus, le comportement du bassin intermédiaire peut a priori être différent de celui des grands bassins amont, affectés par des épisodes pluvieux différents. C'est pourquoi, nous proposons de tester l'intégration de données concernant les apports intermédiaires dans les modèles de prévision basés sur les outils existants qui seront mis en œuvre. Les résultats obtenus permettront de juger de l'intérêt de disposer de données temps réel pour l'évaluation de ces apports.

L'évaluation des apports intermédiaires sera également utilisée pour définir les conditions d'entrée du modèle hydraulique (apports intermédiaires).

6. ANALYSE DES CARACTERISTIQUES DES CRUES

6.1. ANALYSE STATISTIQUE

L'analyse statistique a porté sur :

- les débits maximaux instantanés annuels,
- les débits moyens maximaux annuels, pour les durées 1, 2, 5, 10 et 30 jours.

Pour les affluents de la Maine, les stations analysées sont les suivantes :

Andigné (Port aux anglais) et Segré, Chambellay, Château Gontier, Beffes, Durtal.

Pour ces stations, les analyses ont été effectuées à partir d'ajustements de la loi de Gumbel sur les échantillons de valeurs maximales annuelles disponibles dans la banque HYDRO.

Pour l'Oudon, l'analyse des débits maxima instantanés a été effectuée sur une série incluant les débits à Andigné jusqu'en 1999 puis les débits à Segré de 2000 à 2004. Pour les débits moyens journaliers, l'analyse a été effectuée sur les débits à Andigné, sur la période 1969-1999.

Les résultats sont fournis dans les tableaux 9 et 10, les graphes des courbes débits-durée-fréquence correspondantes sont fournis en annexe A6.1. Le Tableau 10 permet également de comparer les nouvelles valeurs obtenues pour les débits instantanés avec les valeurs de l'étude 3P (CNR 1999). Les valeurs de l'étude 3P sont celles obtenues avec l'ajustement de la loi de Gumbel et la méthode du gradex pour les périodes de retour les plus élevées. L'extrapolation par la méthode du gradex est effectuée à partir de la période de retour 75 ans pour la Sarthe à Beffes, 50 ans pour le Loir et 35 ans pour la Mayenne et l'Oudon.

Par rapport aux résultats de l'étude 3P (CNR 1999), on constate un accroissement général des débits caractéristiques de crue sur les stations des affluents de la Maine. Cet accroissement est pour la plupart des stations de l'ordre de 5 à 10%. Cela s'explique par l'occurrence de crues importantes depuis 1999 (décembre 1999, janvier 2001 qui ont des périodes de retour de l'ordre de 10 à 20 ans), et la faible taille relative des échantillons (20 à 32 ans de données selon les stations). Pour la station de Beffes, l'accroissement est plus important (15 à 20%). On constate que pour cette station, les valeurs de débits de pointe prises en compte dans l'étude 3P étaient plus faibles que les valeurs dont on dispose aujourd'hui dans la banque HYDRO. Par exemple, pour la crue de janvier 1995, la plus forte crue de l'échantillon, le débit de pointe pris en compte dans l'étude 3P était de 580 m³/s à Beffes ; cette estimation a depuis, été revue à la hausse suite aux jaugeages effectués lors de cette crue, ce débit de pointe est estimé maintenant à 685 m³/s. Remarque : on vérifiera lors de l'étude hydraulique que la station de Beffes n'est pas influencée par l'aval en cas de forte crue, et en particulier lors de la crue de 1995.

Pour la Loire, les stations analysées sont Montjean-sur-Loire et Saumur. Les débits maximaux annuels sont également issus de la banque HYDRO. A Saumur, la série utilisée est constituée des débits maximaux annuels à Montsoreau de 1916 à 1988, puis des débits à la station de Saumur jusqu'en 2004.

Tableau 9 : Débits caractéristiques de crue

La Mayenne à Chambellay (période 1965-2004 - 37 années - Loi Gumbel)

Période de retour	Qi	Qj	Vcx 2	Vcx 5	Vcx 10	Vcx 30
2	360	340	310	240	190	140
5	520	490	450	350	280	200
10	630	590	540	420	340	240
20	730	680	630	490	400	280
50	860	810	740	580	470	330

La Mayenne à Château Gontier (période 1970-2004 - 34 années - Loi Gumbel)

Période de retour	Qi	Qj
2	340	310
5	490	440
10	590	540
20	680	620
50	810	740

L'Oudon à Andigné et Segré (période 1969-2004 - 25 années Loi Gumbel)

Période de retour	Qi	Qj	Vcx 2	Vcx 5	Vcx 10	Vcx 30
2	98	80	73	54	41	26
5	160	130	120	90	69	44
10	200	170	160	110	87	56
20	240	200	190	140	100	67
50	290					

La Sarthe à St Denis d'Anjou (Beffes) (période 1971-2004 33 années - Loi Gumbel)

Période de retour	Qi	Qj	Vcx 2	Vcx 5	Vcx 10	Vcx 30
2	330	320	310	280	220	140
5	460	450	440	400	320	210
10	550	530	520	480	390	250
20	640	620	610	550	450	290
50	750	720	710	650	530	340

Le Loir à Durtal (période 1961-2003 42 années - Loi Gumbel)

Période de retour	Qi	Qj	Vcx 2	Vcx 5	Vcx 10	Vcx 30
2	170	170	170	150	120	85
5	260	250	250	230	190	130
10	310	310	300	270	230	150
20	360	360	350	320	270	180
50	430	420	420	380	320	210

La Loire à Montjean-sur-Loire sur Loire (période 1863-2004 - 134 années - Loi Weibull)

Période de retour	Qi	Qj	Vcx 2	Vcx 5	Vcx 10	Vcx 30
2	3380	3350	3330	3200	2910	2270
5	4470	4440	4410	4250	3900	3060
10	5030	5000	4970	4790	4420	3470
20	5490	5450	5420	5230	4840	3810
50	6000	5960	5930	5730	5310	4190

La Loire à Saumur (période 1916-2004 - 87 années - loi Weibull)

Période de retour	Qi
2	3000
5	3910
10	4380
20	4750
50	5170

Légende : Qi : débit instantané, Qj : débit moyen journalier, Vcx2, Vcx5, Vcx10, Vcx30 : débit moyen journalier sur 2, 5, 10 et 30 jours. Les débits sont fournis en m3/s.

Tableau 10 Comparaison des débits maximaux instantanés caractéristiques de crue avec les débits de l'étude 3P

Période de retour	Andigné (Port aux Anglais)		Chambellay		Chateau-Gontier		Beffes		Durtal	
		3P		3P (**)		3P (**)		3P		3P
5 ans	140	133	520	510	490	485	460	362	260	254
10 ans	180	165	630	590	590	560	550	425	310	310
20 ans	210	200	730	690	680	660	630	490	360	360
50 ans	260	265 (*)	860	760	810	720	740	575	430	440

(*) : estimation réalisée avec la méthode du gradex - Les débits sont fournis en m3/s.

(**) Pour les périodes de retour 5ans à 20 ans, les valeurs des débits caractéristiques issues de l'étude 3P pour la Mayenne ont été interprétées à partir des résultats fournis dans l'étude 3P de manière à conserver une cohérence entre les valeurs instantanées et les valeurs journalières.

Pour la Loire à Montjean-sur-Loire, on rencontre le même phénomène que pour l'échantillon des hauteurs maximales à Angers : sur un graphe de Gumbel, il existe une cassure dans l'échantillon des valeurs maximales annuelles à partir d'un débit de 4800 m3/s environ, c'est à dire à partir d'une période de retour comprise entre 5 et 10 ans. La loi retenue est finalement la loi de Weibull, qui fournit un ajustement de bonne qualité. A Saumur, l'ajustement retenu est également effectué avec une loi de Weibull.

Pour ces deux stations, les ajustements avec une loi de Weibull fournissent des résultats très proches de ceux obtenus avec une loi normale (voir graphes d'ajustement fournis en annexe A6.1).

L'estimation des débits de période de retour 100 ans a été effectuée pour les affluents de la Maine à partir de la méthode du gradex (comme cela avait été le cas pour l'étude

3P). La méthode du gradex est basée sur le principe qu'au-delà d'un certain seuil de débit (appelé point pivot), l'ensemble de la pluie ruisselle sur le bassin. La période de retour du point pivot est généralement au moins égale à 10 ans, mais elle peut être augmentée en fonction de la nature du bassin versant et de la taille de l'échantillon de crues disponible.

Pour le Loir, cette estimation a été effectuée par BCEOM dans le cadre d'une étude spécifique : "Ralentissement dynamique des crues par création de levées transversales dans le lit majeur du Loir entre Ruillé et la Flèche", SMPEI, avril 2004. Cette valeur est inférieure à la valeur estimée dans l'étude 3P.

Pour la Sarthe, la Mayenne et l'Oudon, les valeurs présentées ont été réajustées par rapport à l'étude 3P, dans la mesure où les valeurs des débits caractéristiques correspondants aux seuils d'application de la méthode du gradex sont augmentées. Les hypothèses de la méthode pour ces bassins versants ont été reprises de l'étude 3P :

- Mayenne et Oudon : Période de retour du point pivot T=35 ans, Durée = 2 jours, Gradex = 10mm
- Sarthe : Période de retour du point pivot =75 ans, Durée = 4 jours, Gradex = 11mm

Pour la Mayenne, les valeurs réajustées sont fortement supérieures aux valeurs estimées dans l'étude 3P (+15%).

L'estimation du débit centennal de la Loire à Montjean-sur-Loire et Saumur résulte des informations fournies par la DIREN Centre issues d'études antérieures réalisées par le Service de Bassin Loire Bretagne :

- Estimation du débit centennal à Saumur effectuée à partir de l'ajustement d'une loi log-normale aux débits maximaux instantanés annuels à Montsoreau (119 années sur la période 1857-1977),
- Estimation du débit centennal à Montjean effectuée à partir de l'ajustement d'une loi normale aux débits maximaux instantanés annuels à Montjean sur la période 1843-1983.

Les valeurs sont fournies dans le Tableau 11.

Tableau 11 Estimation des débits de période de retour 100 ans

Station	Débit max instantané de période de retour 100 ans (valeur étude 3P)
Andigné (Oudon)	340 (330)
Château Gontier (Mayenne)	1060 (920)
Chambellay (Mayenne)	1120 (970)
Beffes (Sarthe)	868 (690)
Durtal (Loir)	557 (590)
Montjean-sur-Loire (Loire)	6500
Saumur (Loire)	6400

Les débits sont fournis en m³/s.

6.2. SELECTION DES EPISODES DE CRUE

La période retenue pour l'analyse des caractéristiques des hydrogrammes de crue est la période 1966-2004 pour laquelle des données de débits sont disponibles aux stations hydrométriques des affluents de la Maine. Néanmoins, on ne dispose pas sur cette période des données à l'ensemble des stations pour la totalité des crues.

Les épisodes de crue pour lesquels la hauteur maximale a dépassé 4m à l'échelle de crue du Pont de Verdun ont été sélectionnés à partir des données journalières de crue disponibles à cette échelle (voir méthode de sélection décrite en 4.1). La liste de ces épisodes est fournie dans le tableau de l'annexe A1.1, qui indique également les données disponibles aux différentes stations hydrométriques pour chaque crue.

Au total, 48 périodes de crue ont été retenues, dont 12 sur la période 1993-2004 pour laquelle on dispose de données numériques à pas de temps variable (hauteurs et débits). Pour les épisodes antérieurs, on dispose de fichiers de débits moyens journaliers et de copie d'une grande partie des enregistrements papier (limnigrammes).

Les graphes fournis en annexe A1.2 et A1.3 représentent les hydrogrammes de crue à toutes les stations, ainsi que la hauteur d'eau à Angers (2 graphes par crue avec ou sans les débits de la Loire à Saumur et Montjean-sur-Loire, les débits de la Vienne à Nouâtre figurent également sur certains graphes). Sur la période 1960-1992, les graphes représentent les débits journaliers. Sur la période 1993-2004, ils représentent les débits instantanés.

Pour les crues antérieures à 1993, les dates des pointes de crue et les hauteurs maximales ont été lues sur les enregistrements papier lorsqu'ils étaient disponibles, afin d'aboutir à une analyse la plus exhaustive possible des temps de propagation et concomitances.

L'analyse des volumes a été effectuée sur les débits journaliers, disponibles sous forme numérique pour l'ensemble des stations.

6.3. DEBITS DE POINTE ET VOLUMES DES CRUES

Les tableaux fournis en annexe A6.2 présentent les débits de pointe des crues pour chaque station (débits instantanés et débits journaliers), les débits moyens maximaux sur 2, 5 et 10 jours consécutifs ainsi que les estimations des périodes de retour correspondantes (on a évalué la classe de période de retour plutôt qu'une période de retour précise, pour faciliter les comparaisons).

Le Tableau 12 présente les périodes de retour des principales crues récentes, classées selon l'importance de la hauteur à Angers. La classe de période de retour figurant dans ce tableau correspond à la classe de période de retour la plus élevée estimée pour les débits maximaux instantanés ou moyens (sur 1, 2, 5 ou 10 jours). Généralement, la période de retour est proche pour tous les débits, cependant, on peut avoir des disparités plus importantes pour certaines crues comme pour la crue de décembre 1999 sur la Mayenne et l'Oudon (période de retour entre 5 et 10 ans pour le débit de pointe, entre 10 et 20 ans pour le débit moyen journalier et entre 20 et 50 ans pour les débits moyens sur 5 ou 10 jours).

Tableau 12 Classes de périodes de retour des principales crues classées selon la hauteur à Angers

Crue	Hauteur à Angers (aval Pont de Verdun)	périodes de retour sur la Mayenne, l'Oudon, la Sarthe et le Loir	périodes de retour Loire
janvier 1995	6.65 100 ans	>50 ans sur la Sarthe et le Loir Mayenne, Oudon : entre 20 et 50 ans	Montjean-sur-Loire : entre 10 et 20 ans Saumur : entre 2 et 5 ans
décembre 1982	6.37 entre 20 et 50 ans	Sarthe, Loir : entre 5 et 10 ans Mayenne, Oudon : entre 10 et 20 ans	Montjean-sur-Loire : entre 20 et 50 ans Saumur : 50 ans
décembre 1999	6.12 entre 20 et 50 ans	Sarthe : entre 20 et 50 ans Loir : entre 10 et 20 ans Mayenne, Oudon : entre 20 et 50 ans	Montjean-sur-Loire entre 5 et 10 ans Saumur : entre 2 et 5 ans
janvier 1994	6.02 10 ans	Sarthe, Mayenne, Oudon : entre 2 et 5 ans Loir : inf. à 2 ans	Montjean-sur-Loire : entre 20 et 50 ans Saumur : entre 10 et 20 ans
janvier 2004	5.61 entre 5 et 10 ans	Loir : entre 20 et 50 ans Sarthe, Mayenne : entre 5 et 10 ans Oudon : entre 2 et 5 ans	Montjean-sur-Loire entre 5 et 10 ans Saumur : entre 5 et 10 ans
janvier 2003	5.26 inf. à 5 ans	Loir : entre 5 et 10 ans Sarthe, Mayenne : entre 2 et 5 ans Oudon : entre 10 et 20 ans	Montjean-sur-Loire entre 2 et 5 ans Saumur : 2 ans
janvier 2001	4.9 inf. à 5 ans	Mayenne, Oudon : entre 20 et 50 ans Sarthe : entre 10 et 20 ans Loir : entre 10 et 20 ans	Montjean-sur-Loire entre 2 et 5 ans Saumur : inf. à 2 ans

Ce tableau montre que l'importance relative des crues des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur conditionne l'importance de la crue à Angers. Les conditions peuvent être très contrastées du point de vue des périodes de retour respectives. Notre échantillon ne comporte pas de crue exceptionnelle à la fois sur les affluents de la Maine et à Saumur.

6.4. CONTRIBUTIONS RELATIVES DES DIFFERENTS AFFLUENTS DE LA MAINE

Cette analyse a été effectuée sur les crues pour lesquelles les données sont disponibles à toutes les stations hydrométriques des affluents de la Maine (Oudon, Mayenne, Sarthe et Loir), soit pour un total de 25 crues. Pour la Mayenne, on a utilisé les débits de la station de Château Gontier, qui ne sont pas influencés par l'aval. En effet, il est possible que la station de Chambellay soit influencée par l'aval pour les fortes crues dans les BVA. Les débits journaliers à Château Gontier ont été augmentés de 10% pour l'analyse comparative. En effet, les débits moyens journaliers à Chambellay sont en moyenne supérieurs d'environ 10% aux débits moyens journaliers de Château Gontier, avec une très bonne corrélation.

Le graphe fourni en annexe A6.3 représente pour chaque crue, la part de débit apportée par chaque affluent de la Maine, par rapport à la somme des débits des quatre affluents. La couleur de la courbe correspond à la classe de hauteur à Angers.

Ce graphe est construit à partir des données journalières, en considérant les débits de la veille par rapport à la date de la pointe à Angers, sauf pour Beffes, où l'on prend les débits de l'avant-veille.

On constate :

- La part de l'Oudon varie de 2 à 13%.
- La part de la Mayenne varie de 18 à 41%. Au total, l'Oudon et la Mayenne représentent 20% à 54% du débit total journalier.
- La part de la Sarthe varie de 28 à 47%.
- La part du Loir varie de 15 à 43%.

La variabilité est plus élevée sur la Mayenne et le Loir que sur la Sarthe. Pour la majorité des crues, la contribution de la Sarthe est plus importante que celle de la Mayenne. Pour deux crues de l'échantillon, la contribution de la Mayenne est supérieure à celle de la Sarthe : il s'agit des crues de février 1988 et février 1972. Pour ces deux crues, la contribution du Loir est également plus faible que celle de la Mayenne et de la Sarthe. Pour les autres crues, l'écart est compris entre quelques % (apports journaliers proches pour les deux rivières, c'est le cas pour la crue de janvier 1995) et 26% (apports de la Sarthe prépondérants par rapport à la Mayenne).

La contribution du Loir est inférieure à celle de la Sarthe pour toutes les crues sauf pour la crue de mai 1985 (faible crue). Pour deux crues, cette contribution est voisine de celle de la Sarthe : janvier 2004 et juin 1977 (faible crue), sinon, la part du Loir est généralement inférieure de 10% à celle de la Sarthe. Par rapport à la Mayenne, le Loir a une contribution généralement plus faible (entre 0 à 10% de moins). Cependant, on remarque des situations contrastées pour lesquelles le Loir a un apport soit beaucoup plus faible (crues de février 1972, février 1988, février 1990, mars 2001), soit équivalent ou plus élevé (crues de janvier 2004 et mai 1985 notamment).

La comparaison des courbes obtenues en fonction de la classe de hauteur à Angers montre :

- hauteur supérieure à 6,3 m à Angers : pour les deux plus fortes crues à Angers, les contributions de la Mayenne et de la Sarthe sont peu contrastées, respectivement 31 et 35% pour la crue de janvier 1995 et 27 et 40% pour la crue de décembre 1982. L'apport de l'Oudon se situe parmi les plus fortes valeurs (11 et 13%).
- hauteur comprise entre 6m et 6,3m à Angers : les quatre crues de cette classe présentent un écart plus élevé entre les apports de la Sarthe et de la Mayenne : +13 à +20%, et un apport du Loir proche de celui de la Mayenne (écart inférieur à 10%). L'Oudon a un apport variable, soit élevé (11%), soit moyen (6%).
- hauteur comprise entre 5,5m et 6 m à Angers : les quatre crues de cette classe se différencient par 2 comportements très contrastés entre la Sarthe et la Mayenne (soit un écart de 20 à 23% entre la part de la Sarthe et celle de la Mayenne, soit des apports de la Mayenne proches de ceux de la Sarthe). Les apports du Loir suivent le comportement de la Sarthe, ils en sont proches pour la crue de janvier 2004. Les apports de l'Oudon suivent le comportement de la Mayenne.
- hauteur inférieure à 5,5m à Angers : les 15 crues de cette classe ont des comportements globalement moins contrastés que certaines crues des classes précédentes. La part de la Sarthe est toujours supérieure à la part de la Mayenne sauf pour deux crues (sur 15), la part du Loir est toujours inférieure à la part de la Sarthe sauf pour une crue (faible crue de mai 1985). En moyenne, la part du Loir est inférieure ou égale à la part de la Mayenne (pour 8 crues sur 15).

Les conclusions que l'on peut tirer de cette analyse des apports journaliers des affluents sont les suivantes :

- pour les plus fortes crues à Angers, les apports respectifs des affluents principaux sont peu contrastés (phénomènes pluvieux généralisés entraînant des crues sur tous les affluents). Les contributions respectives des affluents se classent dans l'ordre décroissant : Sarthe, Mayenne, Loir, Oudon.
- une situation contrastée par une forte crue sur l'un des affluents principaux (Mayenne, Sarthe, Loir) conduira à une crue renforcée à Angers,
- les petites crues à Angers sont générées par des situations moins contrastées, avec un comportement moyen pour lequel les parts respectives de la Sarthe, la Mayenne et le Loir sont respectivement décroissantes.

Ces conclusions sont cependant limitées par le nombre réduit de crues complètes disponibles.

6.5. ANALYSE DES DECALAGES ENTRE LES POINTES DE CRUE

Les tableaux fournis en annexe A6.4 présentent les dates et heures des valeurs maximales observées, ainsi que les décalages entre les pointes des différents affluents de la Maine, de la Loire à Saumur et Montjean-sur-Loire, et de la Maine à Angers. Les graphes 1 à 6 fournis également en annexe A6.4 représentent les écarts temporels calculés en fonction du débit pour les différents affluents de la Maine. Pour certaines crues présentant des pointes multiples, la comparaison a été effectuée pour les pointes successives bien identifiées sur différents affluents, afin de compléter le nombre de valeurs analysées.

Dans ces tableaux, les données manquantes pour certaines crues correspondent soit à des données inexistantes (antérieures à la date de mise en service de la station hydrométrique), soit à des données non disponibles (limnigrammes papier manquants), soit à des pannes de certaines stations.

Pour la station de Saumur avant 1994, on ne dispose que de données journalières. L'instant d'occurrence du débit maximum a été affecté à 12h.

A Angers, les données disponibles avant 2003 pour l'étude hydrologique sont des mesures effectuées à 12h. L'instant d'occurrence de la valeur maximale est par conséquent mal connu, sauf à partir de 2003 (installation des stations automatiques des ponts de Basse Chaîne et Haute Chaîne).

Les comparaisons effectuées avec les données de hauteur à Angers (avant 2003) et les débits à Saumur (avant 1994) seront par conséquent peu précises.

6.5.1. Valeurs moyennes des décalages observés

▪ AFFLUENTS DE LA MAINE

Concernant les décalages des pointes des affluents de la Maine, on peut noter :

- généralement très peu de décalage entre l'Oudon et la Mayenne, la pointe de l'Oudon arrivant quelques heures avant ou après la pointe de la Mayenne à Chambellay,
- un décalage de 1 à 12 heures entre la pointe à Château Gontier et la pointe à Chambellay, la valeur moyenne étant de 5 heures,

- une arrivée de la pointe de la Sarthe à Beffes généralement postérieure à la pointe de la Mayenne à Chambellay, mais le décalage est assez variable et peut s'inverser. Plus de la moitié des crues de l'échantillon analysé ont un retard compris entre -10 heures (pointe de la Mayenne antérieure à la pointe de la Sarthe) et +10 heures (pointe de la Mayenne postérieure à la pointe de la Sarthe). Le décalage peut être plus important, avec une arrivée de la pointe de la Sarthe beaucoup plus tardive, le décalage pouvant atteindre 60 à 70 heures pour de petites crues. La forme des hydrogrammes à Beffes, qui comportent souvent une pointe de durée longue (1 à 3 jours) peut parfois conduire à un décalage important lorsque l'on compare strictement les positions des maximums. La valeur moyenne du décalage est de -10 heures (pointe de la Mayenne à Chambellay antérieure à la pointe de la Sarthe à Beffes). Pour les fortes crues de notre échantillon sur la Mayenne et la Sarthe (janvier 1995 pointes 1 et 2, janvier 2001, janvier 2004 pointe 1), on remarque un décalage très court (respectivement -4 heures, +2 heures, +1 heure 30 et -7 heures).
- une arrivée de la pointe du Loir à Durtal nettement postérieure aux pointes de la Mayenne et de la Sarthe, avec un décalage très variable entre le Loir et la Mayenne (pour 85% des crues de l'échantillon, la pointe du Loir à Durtal arrive entre 10 et 100 heures après la pointe de la Mayenne à Chambellay). Pour de faibles crues de la Mayenne et du Loir, le décalage peut être nul voire positif (pointe du Loir en avance de quelques heures par rapport à la Mayenne). La valeur moyenne du décalage est de 60 heures.

Remarque : cette comparaison fournit un ordre de grandeur, mais les résultats obtenus sont parfois biaisés par les formes particulières de certains hydrogrammes (par exemple, formes des pointes de crues non cohérentes entre Château-Gontier et Chambellay pour la crue de décembre 1999). Sur la Sarthe l'hydrogramme comporte souvent une pointe de durée longue. Sur le Loir, l'interprétation est parfois difficile, la forme de l'hydrogramme étant souvent beaucoup plus plate.

L'ordre « moyen » d'arrivée des pointes de crue des affluents serait le suivant :

- t_0 : Oudon, Mayenne à Château Gontier
- $t_0 + 5$ heures : Mayenne à Chambellay
- $t_0 + 15$ heures : Sarthe à Beffes
- $t_0 + 65$ heures : Loir à Durtal

▪ **AFFLUENTS DE LA MAINE ET LOIRE**

Concernant le décalage entre les pointes des affluents et la pointe de la Loire à Montjean-sur-Loire, les valeurs sont encore plus variables.

Les graphes 1, 2, et 3 fournis en annexe A6.4 représentent ces décalages en fonction de la hauteur maximale à Angers. On constate que le décalage entre la pointe amont et la pointe aval (pointe à Montjean-sur-Loire) aurait tendance à diminuer lorsque la cote à Angers augmente. Cependant, les variations observées peuvent être importantes d'une crue à l'autre, pour une même hauteur maximale à Angers.

Entre la pointe à Montjean-sur-Loire et la pointe de la Mayenne, la Sarthe et le Loir, le décalage varie généralement de :

- +40 à +120 heures entre Chambellay et Montjean-sur-Loire,
- +30 à +110 heures entre Beffes et Montjean-sur-Loire,
- -30 à +80 heures entre Durtal et Montjean-sur-Loire (un écart négatif signifie une pointe à Montjean se produisant avant la pointe du Loir à Durtal).

Ce décalage dépend également fortement de la date d'occurrence de la pointe de crue à Saumur qui peut parfois arriver nettement plus tard que les pointes des crues des affluents de la Maine, et par conséquent masquer une première pointe de crue à Montjean-sur-Loire due à la crue de la Maine.

▪ LOIRE

En ce qui concerne la Loire, on observe généralement un temps de propagation d'environ 24 heures entre la pointe de la Loire à Saumur et la pointe de la Loire à Montjean-sur-Loire. Le décalage réel observé entre la pointe de crue à Saumur et la pointe de crue à Montjean peut être différent du temps de propagation dans le cas de pointe de crue de longue durée, ou dans le cas d'un hydrogramme de crue à Montjean-sur-Loire perturbé de manière significative par la crue de la Maine (crues de mars 2001, mai 2001 et janvier 2004 par exemple).

Pour les crues antérieures à 1994, on ne dispose pas de l'heure du maximum à Saumur, la pointe à Saumur se produit généralement la veille de la pointe à Montjean-sur-Loire.

▪ MAINE ET LOIRE

Les données dont on dispose à Angers avant 2003 ne permettent pas de connaître précisément l'heure d'occurrence du maximum à Angers (une valeur par jour mesurée à 12h). Le décalage moyen serait de l'ordre de 8 à 12 heures (la pointe à Angers se produisant généralement avant la pointe à Montjean-sur-Loire). Pour quelques crues, le décalage est perturbé par la date et la durée des pointes de crue à Saumur. En particulier pour la crue de décembre 1999, le maximum se produit à Angers le lendemain du maximum à Montjean-sur-Loire.

6.5.2. Relations entre les décalages et les débits de pointe

On a représenté le décalage entre les pointes de crue de la Sarthe, de la Mayenne et du Loir en fonction du débit de pointe de la Mayenne ou de la Sarthe, ainsi que les relations entre les débits de pointe de ces rivières prises deux à deux (voir graphes 4 à 9 en annexe A6.4). On constate que de manière générale, il existe une bonne corrélation entre les débits de pointe de la Mayenne, de la Sarthe et du Loir.

▪ MAYENNE-SARTHE

On constate une tendance à la diminution du décalage avec l'accroissement du débit pour des débits de petites crues (débits compris entre 200 et 300 m³/s). Le décalage entre les pointes de crue est faible pour les forts débits de pointe (décalage entre la pointe à Chambellay et la pointe à Beffes). On pourrait considérer qu'à partir d'un débit de 300 m³/s sur la Mayenne, le décalage entre la Sarthe et la Mayenne devient très faible. Le risque de concomitance est donc élevé pour les fortes crues.

Pour quelques pointes de crue, on obtient une arrivée de la pointe de la Sarthe quelques heures avant la pointe de la Mayenne à Chambellay (janvier 1995 2^{ème} pointe, mars 2001 2^{ème} pointe), et même une avance apparente plus importante pour la crue de décembre 1999 (20 heures), et la petite crue de décembre 1976 (pointe 1). Pour la crue de décembre 1999, la durée de pointe de l'hydrogramme de la Mayenne est importante (quasiment 24 heures) avec un débit de pointe se produisant en fin de la période de pointe de l'hydrogramme (remarque : la forme de la pointe n'est pas cohérente avec la forme de l'hydrogramme à Château-Gontier, et la pointe décalée de l'hydrogramme semble plutôt due à l'incidence du niveau aval dans les BVA).

Remarque : le temps de propagation jusqu'aux BVA et Angers est plus long depuis la station de Beffes sur la Sarthe que depuis la station de Chambellay sur la Mayenne.

On peut estimer qu'il faudrait que la pointe de la Sarthe arrive à Beffes environ 24h avant l'arrivée de la pointe de la Mayenne à Chambellay pour conduire à une réelle concomitance dans les BVA. Ce scénario serait a priori plus pénalisant que les situations de concomitance aux niveaux des stations amont.

▪ SARTHE-LOIR

Pour les débits de la Sarthe inférieurs à 400 m³/s environ, le décalage avec le débit de pointe du Loir est très variable, de -100 heures (Sarthe en avance par rapport au Loir) à +40 heures (Sarthe en retard). Pour quelques petites crues, la pointe du Loir se produit un peu avant celle de la Sarthe. Lorsque le débit de la Sarthe augmente, on constate une tendance à la diminution du décalage (pour la crue de janvier 1995, plus forte crue de notre échantillon, la pointe de la Sarthe se produit 48 heures avant la pointe du Loir). Il existe une assez bonne relation entre les débits de pointe de la Sarthe et du Loir.

▪ MAYENNE-LOIR

Pour les faibles débits de la Mayenne, le décalage avec le débit de pointe du Loir est très variable, de 100 à 35 heures. Lorsque le débit de la Mayenne augmente, on constate une tendance à la diminution du décalage (la valeur observée pour les plus fortes crues est de l'ordre de 45 heures). La relation entre les débits de pointe de la Mayenne et ceux du Loir est moins bonne que celle obtenue entre les débits de pointe de la Sarthe et ceux du Loir, cependant la tendance est identique (fortes crues du Loir associées à des fortes crues de la Mayenne).

6.5.3. Analyse des concomitances

▪ CONCOMITANCES ENTRE LES AFFLUENTS DE LA MAINE

De l'analyse précédente des décalages entre les pointes de crue des affluents de la Maine au droit des stations hydrométriques de Maingué, Chambellay, Beffes et Durtal, on peut conclure que le risque de concomitance des pointes de crue de la Mayenne, l'Oudon et la Sarthe serait plus élevé pour les fortes crues. Concernant le Loir, le décalage par rapport aux autres affluents est généralement important dans le cas de crues « simples » (crue à une seule pointe générée par un même épisode pluvieux sur tous les affluents) : pour les fortes crues, la pointe de crue du Loir arrivera environ 48 heures après la pointe de crue de la Sarthe.

Par contre, la succession de plusieurs pointes de crues rapprochées peut conduire à des concomitances entre une pointe du Loir et une pointe de la Mayenne et de la Sarthe. Il pourra s'agir soit de pointes dues à des épisodes pluvieux successifs, soit à des hydrogrammes plus complexes, pour lesquels les pointes de crues des affluents amont sont décalées (voir graphes de représentation des hydrogrammes de crue en annexe A1.2).

L'hydrogramme de la Sarthe à Beffes présente souvent deux pointes de crue (en général, arrivée de l'Erve, la Vaège et la Vègre avant l'arrivée de la crue de la Sarthe amont), décalées de 2 jours environ, alors que l'hydrogramme correspondant de la Mayenne n'a qu'une seule pointe. Dans certains cas, ces deux pointes se composent de telle sorte que l'hydrogramme de la Sarthe ne présente pratiquement pas de décroissance entre ces deux pointes, ce qui conduit à un hydrogramme dont la pointe dure plusieurs jours. De même, l'hydrogramme de la Loire à Saumur est souvent composé de deux pointes (première pointe due à l'arrivée de la crue de la Vienne et deuxième pointe due à l'arrivée de la crue de la Loire amont). Le cas de plusieurs pointes successives étant fréquent, la concomitance entre une pointe du Loir et une pointe de la Mayenne et de la Sarthe est également fréquemment observée pour les crues étudiées (rappel : les

crues étudiées sont les crues pour lesquelles la hauteur à Angers est supérieure à 4m).

Les descriptions suivantes effectuées pour quelques crues caractéristiques montrent l'apparition de ce phénomène (des graphes zoomés sont fournis en annexe A1.2 pour les crues de janvier 1995, décembre 1999 et janvier 2004).

▪ CRUE DE JANVIER 1995

L'hydrogramme de la Mayenne comporte trois pointes, générées par trois épisodes pluvieux successifs (pointes les 23, 27 et 29 janvier à Château Gontier). La première pointe est la plus importante, les deux autres pointes ayant néanmoins un débit assez voisin. L'hydrogramme de la Sarthe ne comporte que deux pointes, la deuxième pointe, qui dure près de trois jours, correspond à la composition des hydrogrammes générés par les épisodes 2 et 3. Cette deuxième pointe est nettement supérieure à la première. Elle se compose avec l'unique pointe du Loir, le 29 janvier. Le premier épisode a donné une pointe à Durtal le 26 janvier qui s'est composée avec les pointes de la Mayenne et de la Sarthe du deuxième épisode. La montée de crue du Loir s'est ensuite poursuivie jusqu'au 29 janvier (pas de décrue entre les deux pointes). A Angers, la hauteur dépasse 4m dès le 23 janvier, et la montée se poursuit jusqu'au 30 janvier. Le maximum à Montjean-sur-Loire se produit également le 30 janvier. A Saumur, l'hydrogramme montre une première pointe le 26 janvier (probablement correspondant à l'arrivée de la crue de la Vienne), puis une seconde pointe prolongée les 29 et 30 janvier.

La crue de janvier 1995 est la crue la plus forte de notre échantillon.

▪ CRUE DE DECEMBRE 1999

On observe tout d'abord une première pointe de crue le 28 décembre sur la Mayenne, la Sarthe et l'Oudon, puis une deuxième pointe le 31 décembre en fin de journée. Cette deuxième pointe est plus faible sur la Mayenne, mais voisine de la première pointe pour la Sarthe. Elle est concomitante à la pointe du Loir générée par le premier épisode. La pointe de la Maine à Angers se produit les 1-2 janvier, la pointe de la Loire à Montjean-sur-Loire se produit le 31 décembre, 24 heures après la pointe à Saumur.

▪ CRUE DE MARS 2001

Pour cette crue, on a une bonne simultanéité des pointes de crue de la Mayenne, la Sarthe, l'Oudon et la Loire à Saumur, les 22-23 mars. La crue de la Loire à Saumur semble être une crue simple (sans crue en provenance de la Loire amont), la décrue s'amorce très rapidement. La pointe de crue se produit à Montjean-sur-Loire le 24 mars. Une seconde pointe de crue apparaît le 26 mars sur la Mayenne et la Sarthe, et se compose avec la pointe de crue du Loir (les 25-26 mars), mais la Loire étant en décrue à Saumur, cette deuxième pointe ne génère pas de nouvelle montée à Montjean-sur-Loire.

▪ CRUE DE MAI 2001

On observe une première pointe de crue des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur (arrivée de la crue de la Vienne), le 1^{er} mai sur la Mayenne, le 2 mai sur la Sarthe, le 4 mai sur la Loire à Saumur et le 5 mai sur le Loir. Cette première pointe est suivie d'une deuxième pointe le 3 mai sur la Sarthe et l'Oudon (pas de 2^{ème} pointe sur la Mayenne, décrue). Il se produit ensuite une troisième pointe le 5 mai sur la Mayenne et l'Oudon. Sur la Sarthe et le Loir, ce troisième épisode conduit seulement à un ralentissement de la décrue. La succession d'épisodes rapprochés conduit à une concomitance entre la Mayenne et le Loir.

A Angers, un premier maximum se produit le 5 mai (première pointe de la Mayenne, la Sarthe et la Loire), un second maximum se produit le 8 mai (troisième pointe de la Mayenne, première pointe du Loir, nouvelle montée de la Loire à Saumur). La poursuite de la montée de la Loire à Saumur jusqu'au 11 mai entraîne ensuite un maintien d'un niveau élevé à Angers jusqu'au 12 mai, alors que les affluents de la Maine ne sont plus en crue. Au total, le niveau est resté quasi constant pendant 8 jours à Angers.

▪ CRUE DE JANVIER 2004

On observe une première pointe de la Sarthe et de la Mayenne le 14 janvier, puis une deuxième pointe de la Sarthe les 16-17 janvier. Cette deuxième pointe devient concomitante avec la pointe du Loir. A Montjean-sur-Loire, on a une première montée régulière jusqu'au 18 janvier, puis la montée se poursuit avec un gradient plus faible jusqu'au maximum de la crue, observé le 20 janvier. A Saumur, on peut également identifier une première pointe le 16 janvier, puis une poursuite de la montée jusqu'au 19 janvier.

▪ CONCOMITANCE DES CRUES DE LA LOIRE ET DE LA MAINE

Source : Etude 3P (CNR 1999)

Le type de situation météorologique à l'origine des crues océaniques de la Loire est également à l'origine des crues de la Maine (succession de perturbations d'origine atlantique), d'où un risque de concomitance plus important pour ce type de crue, ainsi que pour les crues mixtes (cf 6.7.1 Rappel sur la typologie des crues de la Loire).

L'analyse conjointe des périodes de retour de la crue à Angers et de la crue de la Loire à Saumur montre que la probabilité de concomitance d'une crue de type janvier 1995 sur la Maine (crue quasiment centennale) avec une crue centennale de la Loire amont (débit de 6400m³/s) est de l'ordre de 1x10⁻³ à 2x10⁻³ (soit une période de retour de l'ordre de 500 ans).

6.6. CONTEXTE METEOROLOGIQUE

Une analyse du contexte météorologique des principales crues a été effectuée, sous la forme d'une carte du cumul pluviométrique pendant l'épisode principal ayant généré la crue, et d'un commentaire sur les conditions météorologiques pendant et avant la crue.

Ces données ont été acquises auprès de Météo France et sont fournies en annexe A5 pour les crues de décembre 1982, janvier 1995 (cartes pluviométriques extraites de l'étude 3P – CNR 1999), décembre 1999, janvier, mars et mai 2001, janvier 2004.

Les cartes de cumuls pluviométriques des événements de décembre 1982, décembre 1999, janvier, mars et mai 2001, et janvier 2004 couvrent l'ensemble du bassin de la Maine, ainsi que les bassins des affluents rive gauche de la Loire entre Saumur et Montjean-sur-Loire (principalement Thouet et Layon). Les bassins versants principaux sont représentés sur ces cartes, ainsi que le bassin versant intermédiaire entre les stations amont et Montjean-sur-Loire.

6.7. TYPOLOGIE DES CRUES

6.7.1. Rappel sur la typologie des crues de la Loire

Source : Atlas des zones inondables de la vallée de la Loire – Service de Bassin Loire-Bretagne ;

Les crues de la Loire sont de trois types :

Les crues océaniques : ce sont les plus fréquentes. Elles sont provoquées par des fronts pluvieux venant de l'océan qui peuvent s'étendre à l'ensemble du bassin. Ces crues sont d'importance variable suivant l'intensité et la répartition spatiale des précipitations qui affectent plus ou moins les différents sous-bassins, notamment le groupe des affluents du cours moyen : le Cher, la Vienne et la Maine.

En Loire moyenne, du Bec d'Allier au Bec de Vienne, les débits de ces crues océaniques sont toujours inférieurs à ceux que peuvent contenir les levées. En Basse Loire, à l'aval du bec de Vienne, ces crues peuvent atteindre la limite de débordement des levées.

La dernière crue océanique marquante sur la Basse Loire est celle de décembre 1982 qui, avec un débit de 6 300 m³/s en aval de la Maine, a été de période de retour au moins cinquantennale alors qu'en Loire moyenne elle était tout à fait modeste : 2 300 m³/s entre Gien et Blois.

Les crues cévenoles : ce sont les plus brutales. Elles résultent des précipitations orageuses d'origine méditerranéenne qui surviennent en général à l'automne (septembre-octobre-novembre) ou plus rarement au printemps (mai-juin) sur les Cévennes et les hauts bassins de la Loire et de l'Allier.

Localisées sur les hauts bassins, elles s'atténuent rapidement si elles ne sont pas soutenues en aval par des apports d'une crue océanique. La dernière crue cévenole très importante date de septembre 1980 et a été provoquée par des pluies torrentielles dépassant localement 600 mm de pluie en 24h. Elle a atteint un débit de 2 000 m³/s à Brives Charensac où en quelques heures le niveau de la Loire est monté à 6.70 m au-dessus du niveau de l'étiage. Elle a entraîné des dommages considérables dans la région du Puy-en-Velay.

Les crues mixtes : la conjonction d'une crue « cévenole » et d'une crue « océanique » peut se traduire par une montée des eaux généralisée sur l'ensemble du bassin. Ce sont les crues les plus redoutables pour la Loire moyenne.

C'est à ce type de crue mixte qu'appartiennent les trois grandes crues de 1846, 1856 et 1866 ; leur débit au confluent de la Loire et de l'Allier a atteint un maximum estimé à 7 600 m³/s.

6.7.2. Typologie des crues de la Maine à Angers

Les analyses effectuées sur les relations entre la hauteur à Angers et les débits amont, ainsi que l'analyse des caractéristiques des crues permettent de dégager les éléments suivants concernant la typologie des crues de la Maine à Angers :

- Les crues à Angers se produisent lorsqu'il y a conjonction de deux phénomènes : crues des affluents de la Maine et crue de la Loire. L'importance relative des deux phénomènes va conditionner l'importance de la crue à Angers. Entre 4m et 5.5m, pour accroître la hauteur de 50 cm à Angers, la somme des débits amont de la Maine doit augmenter de 400 m³/s, alors que le débit à Saumur doit s'accroître de 1600 m³/s. Entre 5,5m et 6.5m, la somme des débits amont de la Maine doit s'accroître de près de 600 m³/s, et le débit à Saumur d'au moins 1900 m³/s, pour obtenir un accroissement de 50cm à Angers.
- Ces deux types de phénomènes ne sont pas indépendants : on n'observe pas dans notre échantillon de crues de forte crue de la Loire sans crue des affluents de la Maine, ni de forte crue des affluents de la Maine sans crue de la Loire. On observe cependant des crues pour lesquelles le débit journalier des affluents de la Maine est très faible (inférieur à 200 m³/s au total) avec une petite crue de Loire (période

de retour entre 5 et 10 ans à Saumur), et qui entraînent une hauteur comprise entre 4,2 et 5,1m à Angers. Les conditions peuvent par conséquent être très contrastées du point de vue des périodes de retour respectives des deux phénomènes. L'analyse de la concomitance des crues de la Maine et de la Loire confirme cette non-indépendance. Rappel : l'échantillon des crues analysées est constitué des crues pour lesquelles la hauteur d'eau à Angers a dépassé 4m, sur la période 1960-2004.

- Les situations météorologiques à l'origine des crues de la Maine (perturbations d'origine atlantique) sont également à l'origine des crues océaniques sur la Loire. C'est avec ce type de situation (ainsi qu'avec les crues mixtes) que le risque de concomitance d'une forte crue de la Loire avec une forte crue de la Maine est le plus élevé. Les crues cévenoles sur la Loire peuvent être considérées comme indépendantes des crues de la Maine (phénomènes météorologiques indépendants).
- Les crues à pointes multiples, fréquemment rencontrées, vont être à l'origine de situations de concomitance à la fois entre les pointes des affluents de la Maine et avec la pointe de la Loire à Saumur. Ces situations pourront entraîner des crues de longue durée à Angers (le niveau maximum reste élevé à Angers car la crue de la Loire reste soutenue alors que les affluents de la Maine présentent des pointes de crues successives).

6.8. ANALYSE DES VOLUMES DE STOCKAGE-DESTOCKAGE

Cette analyse a été effectuée à partir des données journalières, en mettant à profit les résultats obtenus lors de l'analyse des apports intermédiaires.

Dans un premier temps, on a essayé d'évaluer l'hydrogramme correspondant à la totalité des entrées de la zone d'étude. Cet hydrogramme fictif des débits à Montjean-sur-Loire a été calculé à partir de la somme des débits suivants :

- Débit de la Loire à Saumur (j-1)
- Débits des affluents de la Maine (j-1)
- Débits des affluents de la Loire : Thouet (j-1), Aubance (j), Layon (j), Authion (j)
- Débits du bassin intermédiaire résiduel (zone des BVA) (j)

Pour l'évaluation des apports intermédiaires, on dispose des débits journaliers du Layon et de l'Aubance pour la plupart des crues (à partir de 1982). Les débits du Thouet ont été évalués à partir des débits du Layon (relation établie en 5.4.1). Les débits de l'Authion et de la zone des BVA ont été évalués à partir des débits de l'Aubance (cf 5.4).

Pour les crues de décembre 1982, janvier 1995, décembre 1999, janvier et mai 2001 et janvier 2004, on dispose des données réelles sur le Thouet, l'Aubance et le Layon. Les données de l'Authion ne sont pas directement utilisables, car elles ne fournissent les débits arrivant dans la Loire qu'en période de pompage (Loire haute). On ne dispose généralement pas des premières pointes de crue qui s'évacuent en Loire sans pompage.

Les valeurs de volumes stockés et déstockés sont comparées dans le Tableau 13, qui fournit les résultats « bruts » et les valeurs obtenues en multipliant les apports intermédiaires calculés par un coefficient de 20%. Ce tableau permet également de comparer les valeurs obtenues avec celles qui sont calculées à partir des équations du

modèle de prévision de la DIREN Centre (débits des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur affectés de coefficients variables) (cf 4.3).

Tableau 13 Comparaison des volumes stockés et déstockés (en Mm3) pour différentes hypothèses de calcul du débit fictif à Montjean-sur-Loire

	Calcul1	Calcul2	Calcul3	Calcul4	Calcul5
	Volume stockage/ déstockage	Volume stockage/ déstockage	Volume stockage/ déstockage	Volume stockage/ déstockage	Volume stockage/ déstockage
déc. 1982	175 / 439	195 / 411	203 / 433	195 / 411	229 / 322
janv. 1994		80 / 552	73 / 536	106 / 508	84 / 258
janv.1995		462 / 401	418 / 365	508 / 327	352 / 292
janv. 1998		20 / 93	19 / 85	22 / 78	38 / 50
fév. 1999		244 / 66	241 / 62	293 / 51	119 / 77
déc. 1999	208 / 426	227 / 455	195 / 420	264 / 403	115 / 381
nov. 2000		33 / 240	7 / 242	6 / 208	3 / 96
janv. 2001	118 / 340	65 / 220	48 / 192	71 / 181	28 / 131
mai-01	115 / 192	131 / 220	135 / 221	197 / 165	186 / 103
janv. 2003		58 / 216	53 / 192	77 / 186	17 / 126
janv. 2004	124 / 466	78 / 508	76 / 491	92 / 457	146 / 334

Calcul 1 : Débits fictifs à Montjean-sur-Loire calculés avec évaluation explicite des apports intermédiaires (débits réels Thouet, Layon, Aubance, Authion, estimés sur les BVA à partir du débit de l'Aubance). Les débits de la Loire à Saumur, du Thouet et des affluents de la Maine sont décalés d'un jour. Les données disponibles ne permettent pas de faire ce calcul pour toutes les crues.

Calcul 2 : Débits fictifs à Montjean-sur-Loire calculés avec évaluation explicite des apports intermédiaires (débits réels Layon, Aubance, débits estimés pour le Thouet, l'Authion, et les BVA à partir du débit de l'Aubance). Les débits de la Loire à Saumur, du Thouet et des affluents de la Maine sont décalés d'un jour.

Calcul 3 : Débits fictifs à Montjean-sur-Loire calculés avec évaluation explicite des apports intermédiaires (débits réels Layon, Aubance, débits estimés pour le Thouet, l'Authion, et les BVA à partir du débit de l'Aubance). Les débits de la Loire à Saumur, du Thouet et des affluents de la Maine (sf ls Sarthe) sont décalés d'un jour. Les débits de la Sarthe à Beffes sont décalés de 2 jours.

Calcul 4 : Débits fictifs à Montjean-sur-Loire calculés avec évaluation explicite des apports intermédiaires (débits réels Layon, Aubance, débits estimés pour le Thouet,

l'Authion, et les BVA à partir du débit de l'Aubance). Les débits de la Loire à Saumur, du Thouet et des affluents de la Maine (sf la Sarthe) sont décalés d'un jour. Les débits de la Sarthe à Beffes sont décalés de 2 jours. Les débits des apports intermédiaires sont multipliés par un coefficient de 20%.

Calcul 5 : Débits fictifs à Montjean-sur-Loire calculés à partir des débits des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur (coefficients multiplicatifs du modèle de prévision).

Ces valeurs ont été calculées pour les périodes pour lesquelles la hauteur à Angers est supérieure à 3m. Cela permet de diminuer l'incidence des phénomènes de ressuyage et soutien du débit de base par les nappes qui peuvent devenir prépondérants en fin de crue, et conduire à une sous-estimation des débits d'entrée à partir des mesures du débit des rivières uniquement. On constate en effet qu'en fin de crue, les estimations de débit fictif à Montjean-sur-Loire sont nettement inférieures au débit réel, et cela pendant une longue durée.

Les décalages entre les stations amont ont été ajustés de manière à approcher au mieux l'hydrogramme observé à Montjean-sur-Loire. En particulier un décalage de 2 jours de l'hydrogramme de Beffes a été testé, ce décalage n'apporte que très peu de modifications.

Des graphes de comparaison avec l'hydrogramme observé à Montjean-sur-Loire ont été effectués, ils sont fournis en annexe A7.1. Ces graphes représentent l'hydrogramme fictif calculé à Montjean-sur-Loire pour les différentes hypothèses de calcul. Ils montrent le phénomène de stockage-déstockage.

Les courbes obtenues pour les calculs 1, 2 et 3 présentent peu de différences. Pour certaines crues, la prise en compte d'un coefficient multiplicatif des apports intermédiaires (calcul 4) améliore la cohérence entre volumes stockés et déstockés (ex : mai 2001).

On note de manière générale une bonne correspondance entre les courbes des calculs 1-2-3-4 et la courbe du calcul 5. Cela montre que les deux approches sont valides.

Pour certaines crues, il semble cependant que l'évaluation des apports intermédiaires à partir des débits des rivières principales seulement conduise à une surestimation des entrées (ex : février 1999).

La hauteur à Angers est également représentée sur ces graphes et permet l'analyse des phénomènes de stockage-déstockage.

Lors de la montée de crue, le phénomène de stockage se manifeste à partir d'une hauteur à Angers de l'ordre de 2.5 à 3.5m.

Pendant la période de pointe à Angers (qui peut parfois durer plusieurs jours), on peut observer un déstockage dès que le niveau baisse à Angers (les courbes de débits fictifs traduisent ce phénomène) et éventuellement une reprise du stockage.

Pendant la décrue, le phénomène de déstockage se prolonge généralement jusqu'à la fin de la crue (phénomènes de ressuyage et soutien par les nappes).

Les volumes de déstockage évalués sont la plupart du temps toujours nettement supérieurs au volume de stockage, sauf pour la crue de janvier 1995, et pour les deux petites crues de février 1999 et mai 2001. Cela est probablement dû à la méthode d'évaluation sommaire (simple addition des débits entrants avec différents coefficients et décalages temporels), qui ne tient pas compte de la complexité des phénomènes hydrauliques intervenant dans les BVA. La mise en oeuvre du modèle hydraulique

permettra une meilleure compréhension du phénomène de stockage-déstockage (voir Partie C : Compréhension des phénomènes hydrauliques).

6.9. ANALYSE DES GRADIENTS D'EVOLUTION DES DEBITS

Cette analyse a pour objectifs de préciser le rôle des gradients de montée des débits sur les hauteurs d'eau à Montjean-sur-Loire et Angers. En effet, les modèles de prévision des crues actuels à Montjean-sur-Loire et Angers sont basés sur une relation entre les gradients des débits amont (affluents de la Maine et Loire à Saumur) et le gradient à Montjean-sur-Loire, et une amélioration récente de ces modèles a été apportée par la DIREN Centre en prenant en compte une atténuation de ces gradients pour différentes classes de débit à Montjean-sur-Loire. Les gradients utilisés pour ces modèles sont les gradients horaires : variation du débit en une heure aux différentes stations hydrométriques.

L'analyse du phénomène de stockage-déstockage dans les BVA (cf 6.8) met en effet en évidence que pendant la phase de montée de crue, le gradient du débit à Montjean-sur-Loire est inférieur à la somme des gradients d'entrée (affluents de la Maine et Loire à Saumur), correspondant à un stockage dans la zone des BVA. En phase de décrue, on constate le phénomène inverse.

Les analyses ont été effectuées en examinant les relations entre :

- Le gradient horaire du débit à Montjean-sur-Loire,
- Les gradients horaires aux stations amont, en tenant compte d'un décalage variable selon les stations (Maingué et Saumur : 24h, Château-Gontier : 28h, Sarthe : 48h, Loir : 36h).

Ces décalages résultent de l'outil existant de prévision des crues (évaluation des temps de propagation entre les stations amont et Montjean-sur-Loire).

L'analyse a été effectuée pour les périodes pendant lesquelles la hauteur est supérieure à 3m à Angers, de manière à ne pas perturber l'analyse avec les valeurs beaucoup plus nombreuses correspondant à des hauteurs plus faibles. Les crues traitées sont les crues les plus significatives de notre échantillon pour lesquelles les données complètes sont disponibles : janvier 1995, décembre 1999, janvier 2001, janvier 2004.

Les graphes correspondants à ces analyses sont fournis en annexe A7.2.

Ces graphes représentent le gradient horaire du débit à Montjean-sur-Loire en fonction de :

- la valeur du gradient horaire de la somme des débits des affluents de la Maine,
- la valeur du gradient horaire de débit à Saumur,
- la valeur du gradient horaire de la somme des débits d'entrée (affluents de la Maine + Loire à Saumur).

Remarque : pour la crue de janvier 1995, certaines valeurs obtenues sont très dispersées et relativement incohérentes avec les valeurs des autres crues. Cela est dû à des problèmes d'oscillations dans des données de l'hydrogramme de crue à Montjean en fin de montée de crue (les 25 et 26/01/1995), générant des gradients négatifs artificiels alors qu'on est en phase de montée de crue. Ces points ne doivent pas être pris en compte dans l'analyse.

Les graphes montrent :

- une relation de mauvaise qualité lorsque l'on distingue les affluents de la Maine et la Loire à Saumur : les graphes forment un nuage de points dispersé, avec une tendance globale à une relation croissante,
- un ensemble de points plus organisé lorsque l'on considère la somme des gradients d'entrée, mais avec une forte dispersion. On constate que la réduction du gradient à Montjean-sur-Loire peut atteindre plus de 50% par rapport au gradient des entrées, lorsque le gradient est positif (phase de montée).

Pour des gradients horaires à Montjean-sur-Loire compris entre 15 et 25 m³/s, on observe une dispersion très forte des gradients amont pour les crues de janvier 2001 et janvier 2004 (de 0 à 70 m³/s). Ces points correspondent aux premiers pics de crue des affluents de la Maine (montées rapides de l'Oudon, la Mayenne et la Sarthe aux alentours du 6/01/2001 et du 14/01/2004), qui ont peu de répercussions sur l'évolution du gradient à Montjean-sur-Loire, qui reste stable pendant ces périodes.

L'analyse des gradients en fonction de la classe de hauteur à Angers montre que la dispersion des points est quasiment similaire pour les différentes classes de hauteur et couvre toute la gamme de variation des gradients, sauf pour la classe de hauteurs supérieures à 6m. Pour cette classe, les valeurs de gradients positifs sont plus concentrées vers des valeurs faibles, ces valeurs correspondent en effet aux sommets des crues à Montjean-sur-Loire.

6.10. CONCLUSIONS SUR LES CARACTERISTIQUES DES CRUES

▪ ANALYSE STATISTIQUE DES DEBITS DE CRUE

Les débits caractéristiques de crue ont été réévalués sur la base des données disponibles jusqu'en 2004. Par rapport aux résultats de l'étude 3P (CNR 1999) qui avait utilisé les données de crues disponibles jusqu'en 1997, les valeurs obtenues sont un peu plus élevées sur le Loir et sur la Mayenne (+5 à +10%), et nettement plus élevées sur la Sarthe (+20%). Cela est dû à l'occurrence de crues relativement importantes depuis 1997 (1999, 2001, 2004), ainsi qu'à la réévaluation du débit de la crue de janvier 1995 sur la Sarthe.

Les estimations des débits de période de retour 100 ans sur la Mayenne et la Sarthe ont été effectués avec la méthode du gradex, sur la base des mêmes hypothèses que celles prises en compte dans l'étude 3P. Les valeurs obtenues sont nettement plus élevées que les valeurs de l'étude 3P : 15% sur la Mayenne, +26% sur la Sarthe.

Pour le Loir, l'estimation faite dans le cadre de l'étude fournit une valeur inférieure à celle de l'étude 3P.

▪ CONTRIBUTIONS RESPECTIVES DES DIFFERENTS AFFLUENTS DE LA MAINE

Concernant les apports journaliers respectifs des affluents de la Maine, on aboutit aux conclusions suivantes :

- pour les plus fortes crues à Angers, les apports respectifs des affluents principaux sont peu contrastés (phénomènes pluvieux généralisés entraînant des crues sur tous les affluents) ;
- une situation contrastée par une plus forte crue sur l'un des affluents principaux (Mayenne, Sarthe, Loir) conduira à une crue renforcée à Angers ;
- les petites crues à Angers sont générées par des situations moins contrastées, avec un comportement moyen pour lequel les parts respectives de la Sarthe, la

Mayenne et le Loir sont respectivement décroissantes. La Sarthe apporte en moyenne 40% du débit journalier, l'Oudon et la Mayenne 35%, le Loir 25%.

▪ **HORLOGE DES CRUES DES AFFLUENTS DE LA MAINE**

L'horloge « moyenne » d'arrivée des pointes de crue au droit des stations hydrométriques de Maingué, Château-Gontier, Chambellay, Beffes et Durtal serait la suivante :

- t0 : Oudon, Mayenne à Château Gontier
- t0 + 5 heures : Mayenne à Chambellay
- t0 + 15 heures : Sarthe à Beffes
- t0 + 65 heures : Loir à Durtal

Cependant, cette horloge moyenne peut être perturbée par différents phénomènes :

- les décalages entre les pointes de crue de la Mayenne à Chambellay et de la Sarthe à Beffes ont tendance à se réduire pour les fortes crues,
- en cas de crues à pointes multiples, on peut obtenir des concomitances entre des pointes de crue différentes de la Sarthe, de la Mayenne et du Loir.

Les temps de propagation des pointes de crue des affluents de la Maine jusqu'à Angers ne peuvent être évalués directement à partir des décalages constatés, l'incidence de la Loire étant forte. Cependant, le temps de propagation jusqu'à Angers étant probablement plus long sur la Sarthe que sur la Mayenne, on peut estimer qu'il faudrait que la pointe de la Sarthe arrive à Beffes environ 24h avant l'arrivée de la pointe de la Mayenne à Chambellay pour conduire à une réelle concomitance dans les BVA. Ce scénario serait a priori plus pénalisant que les situations de concomitance aux niveaux des stations amont.

▪ **INCIDENCE DE LA LOIRE**

Le temps de propagation entre Saumur et Montjean-sur-Loire est d'environ 24 heures. La date de la pointe de crue à Montjean-sur-Loire est fortement conditionnée par la date de la pointe de crue à Saumur. Cependant, lorsque l'arrivée de la crue de la Maine perturbe de manière significative l'hydrogramme de crue à Montjean-sur-Loire cela peut entraîner un décalage réel entre les pointes de crue à Saumur et Montjean-sur-Loire plus faible ou plus élevé que le temps de propagation.

▪ **DATE DU MAXIMUM A ANGERS**

Les observations disponibles à Angers avant 2003 ne permettent pas de connaître précisément l'heure du maximum. La date du maximum à Angers est généralement la date du maximum à Montjean-sur-Loire. D'après les observations pour les crues récentes, la pointe à Angers se produirait généralement 8 à 12 heures avant la pointe à Montjean-sur-Loire.

▪ **PHÉNOMÈNE DE STOCKAGE/DÉSTOCKAGE**

L'analyse des hydrogrammes fictifs calculés à Montjean-sur-Loire (somme des débits amont des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur) et leur comparaison avec l'hydrogramme réellement observé à Montjean-sur-Loire, met en évidence le phénomène de stockage pendant la phase de montée de crue (débit fictif inférieur au débit réel) et de déstockage pendant la décrue (débit fictif supérieur au débit réel). Ce stockage-déstockage dans la zone des BVA en amont

d'Angers corrobore l'incidence forte du débit de la Loire sur l'importance de la crue à Angers.

Lors de la montée de crue, le phénomène de stockage se manifeste à partir d'une hauteur à Angers de l'ordre de 2.5 à 3.5m.

Pendant la période de pointe à Angers (qui peut parfois durer plusieurs jours), on peut observer un déstockage dès que le niveau baisse à Angers (les courbes de débits fictifs traduisent ce phénomène) et éventuellement une reprise du stockage.

Pendant la décrue, le phénomène de déstockage se prolonge généralement jusqu'à la fin de la crue (phénomènes de ressuyage et soutien par les nappes).

Le modèle hydraulique permettra de préciser le comportement des BVA vis à vis de ce phénomène.

▪ GRADIENTS D'EVOLUTION DES DEBITS

L'analyse a été effectuée sur les gradients horaires des débits amont et du débit à Montjean-sur-Loire.

Pendant la phase de montée de crue, le gradient du débit à Montjean-sur-Loire est inférieur à la somme des gradients d'entrée (affluents de la Maine et Loire à Saumur), correspondant à un stockage dans la zone des BVA. En phase de décrue, on constate le phénomène inverse.

La relation entre le gradient à Montjean-sur-Loire et le gradient des débits amont est globalement croissante mais on constate une dispersion assez importante des valeurs (pour une même valeur de gradient à Montjean-sur-Loire, on peut avoir des valeurs variables de gradient amont), indiquant que la relation n'est pas directe. En début de crue par exemple, les montées rapides qui peuvent se produire sur les affluents de la Maine n'entraînent pas de modification significative du gradient à Montjean-sur-Loire. Cela signifie probablement que le volume joue également un rôle, ainsi que l'état initial, dans la relation entre les gradients amont et le gradient aval.

La relation entre le gradient à Montjean-sur-Loire et les gradients des rivières amont (affluents de la Maine et Loire) est meilleure si l'on somme les gradients de toutes les entrées (Maine + Loire) que si l'on considère seulement les affluents de la Maine ou seulement la Loire, ce qui confirme l'influence combinée des deux rivières. La réduction du gradient entre la somme des gradients amont et le gradient aval peut atteindre 50%.

L'étape d'amélioration des outils existants ainsi que l'étape de compréhension des phénomènes hydrauliques permettront de préciser le rôle des différents gradients sur les crues dans les BVA.

7. CHOIX DES CRUES DE CALAGE ET DE VALIDATION DU MODELE HYDRAULIQUE

▪ CRUES DE CALAGE : CRUES DE DECEMBRE 1982, DECEMBRE 1999 ET JANVIER 1995

Les crues de calage retenues pour la zone des BVA sont les crues de décembre 1982, décembre 1999 et janvier 1995, soit les plus fortes crues de la période récente. Ces crues correspondent à des situations contrastées du point de vue de l'importance respective des apports de la Maine et de la Loire (cf Tableau 12).

Pour la crue de décembre 1982, l'évolution du lit de la Loire pourrait perturber le calage.

La crue complémentaire proposée pour le calage de la Loire est la crue de janvier 1994 : c'est la plus forte crue de la Loire après celle de décembre 1982 et la bathymétrie qui va être utilisée a été réalisée à partir de 1995, soit à une date proche de cette crue. L'évolution du lit de la Loire ne devrait par conséquent pas perturber le calage.

▪ CRUE DE VALIDATION : CRUE DE JANVIER 2004

Les crues de janvier 2001 et de janvier 2004 sont particulièrement intéressantes.

La crue de janvier 2001 présente l'intérêt d'une forte crue des affluents de la Maine (en particulier sur la Mayenne), mais avec une faible crue de la Loire ce qui conduit à Angers à une hauteur faible (4.9m), d'où un nombre réduit de relevés des échelles de crue dans les BVA.

La crue de janvier 2004 est plus importante à Angers (5.6m). Elle correspond également à des crues importantes des affluents (mais plus faibles sur la Mayenne et la Sarthe), associées à une petite crue de la Loire. Le nombre de relevés d'échelles de crue disponibles dans les BVA est plus important.

Le cas d'une forte crue de la Sarthe et de la Mayenne se rencontre également dans la crue de janvier 1995.

C'est donc la crue de janvier 2004 qui sera utilisée pour la validation du modèle hydraulique. La crue de janvier 2001 sera simulée dans l'étape de compréhension des phénomènes hydrauliques.

8. CONCLUSIONS

Les conclusions de l'étude hydrologique reprennent les conclusions partielles présentées à la fin de chaque partie d'étude.

▪ INCIDENCE DE L'APPROFONDISSEMENT DE LA LOIRE

L'approfondissement du lit de la Loire a été important dans le secteur Ponts de Cé-Montjean-sur-Loire durant le siècle dernier (au total, au moins 2.1m à Montjean-sur-Loire se réduisant jusqu'à 60cm aux Ponts de Cé). L'évolution du lit semble se stabiliser mais cela reste à confirmer, le secteur de la confluence Maine-Loire semble encore évoluer.

L'incidence de l'approfondissement se réduit quand le débit augmente et devient négligeable pour les forts débits supérieurs à 5500 m³/s à Montjean-sur-Loire.

A Saumur, l'approfondissement est peu significatif, au moins sur les 20 dernières années.

Les conséquences pour la suite de l'étude sont les suivantes :

- l'incidence de l'approfondissement du lit de la Loire devra être prise en compte lors de l'analyse des hauteurs d'eau à Angers, et l'analyse des données des crues anciennes devra prendre en compte ce phénomène,
- le calage du modèle hydraulique doit être effectué à partir de levés bathymétriques récents, pour que le modèle soit représentatif des conditions d'écoulement actuelles. Les relevés sur la Loire ont été effectués à partir des années 1995, ce qui doit être convenable et compatible avec les crues qui seront simulées,
- le calage du modèle hydraulique pourra être perturbé si les relevés bathymétriques utilisés pour le modèle ne correspondent pas aux conditions réelles des crues de calage. On aura intérêt à sélectionner des crues de calage proches de la date de réalisation de la bathymétrie (à partir de 1995 pour la Loire).

▪ RELATIONS ENTRE LA HAUTEUR A ANGERS ET LES HAUTEURS DANS LES BVA

Les analyses faites à partir des relevés aux échelles de crue et aux écluses mettent en évidence une incidence de la hauteur d'eau à Angers dans les BVA qui se réduit progressivement de l'aval vers l'amont. Certaines écluses et échelles sont complètement influencées par le niveau aval, d'autres sont partiellement influencées, seules les écluses ou échelles proches des extrémités amont de la zone d'étude ne semblent pas influencées. On remarque cependant que même pour les échelles et écluses les plus influencées, le débit amont peut entraîner une surcote qui peut atteindre de 30 à 50cm.

Sur l'Oudon, l'incidence de la hauteur à Angers se manifesterait jusqu'à l'écluse de Maingué aval, sur la Mayenne, jusqu'à l'écluse de Chenillé-Changé, sur la Sarthe au moins jusqu'à l'écluse du Pendu. Sur le Loir, les données sont insuffisantes pour évaluer jusqu'où remonte l'incidence du niveau aval. L'échelle amont de Durtal ne semble pas influencée.

Les mesures aux écluses ne couvrent cependant pas toute la gamme des hauteurs à Angers, les mesures étant interrompues quand l'échelle est noyée. En particulier, pour des hauteurs supérieures à 6m, les informations sont peu nombreuses. Il est

possible que pour les très fortes hauteurs à Angers, l'incidence se manifeste plus en amont. Le modèle hydraulique permettra de préciser ce point.

▪ **DEBITS CARACTERISTIQUES DE CRUES**

Les débits caractéristiques de crue ont été réévalués sur la base des données disponibles jusqu'en 2004. Par rapport aux résultats de l'étude 3P (CNR 1999) qui avait utilisé les données de crues disponibles jusqu'en 1997, les valeurs obtenues sont un peu plus élevées sur le Loir et sur la Mayenne (+5 à +10%), et nettement plus élevées sur la Sarthe (+20%). Cela est dû à l'occurrence de crues relativement importantes depuis 1997 (1999, 2001, 2004), ainsi qu'à la réévaluation du débit de la crue de janvier 1995 sur la Sarthe.

Les estimations des débits de période de retour 100 ans sur la Mayenne et la Sarthe ont été effectués avec la méthode du gradex, sur la base des mêmes hypothèses que celles prises en compte dans l'étude 3P. Les valeurs obtenues sont nettement plus élevées que les valeurs de l'étude 3P : +15% sur la Mayenne, +26% sur la Sarthe.

Pour le Loir, l'estimation faite dans le cadre de l'étude fournit une valeur inférieure à celle de l'étude 3P.

▪ **TPOLOGIE DES CRUES DE LA MAINE A ANGERS**

Les analyses effectuées sur les relations entre la hauteur à Angers et les débits amont, ainsi que l'analyse des caractéristiques des crues permettent de dégager les éléments suivants concernant la typologie des crues de la Maine à Angers :

- Les crues à Angers se produisent lorsqu'il y a conjonction de deux phénomènes : crues des affluents de la Maine et crue de la Loire. L'importance relative des deux phénomènes va conditionner l'importance de la crue à Angers. Entre 4m et 5.5m, pour accroître la hauteur de 50 cm à Angers, la somme des débits amont de la Maine doit augmenter de 400 m³/s, alors que le débit à Saumur doit s'accroître de 1600 m³/s. Entre 5,5m et 6.5m, la somme des débits amont de la Maine doit s'accroître de près de 600 m³/s, et le débit à Saumur d'au moins 1900 m³/s, pour obtenir un accroissement de 50cm à Angers.
- Ces deux types de phénomènes ne sont pas indépendants : on n'observe pas dans notre échantillon de crue de forte crue de la Loire sans crue des affluents de la Maine, ni de forte crue des affluents de la Maine sans crue de la Loire. Les conditions peuvent cependant être très contrastées du point de vue des périodes de retour respectives des deux phénomènes. L'analyse de la concomitance des crues de la Maine et de la Loire confirme cette non-indépendance. Rappel : l'échantillon des crues analysées est constitué des crues pour lesquelles la hauteur d'eau à Angers a dépassé 4m, sur la période 1960-2004.
- Les situations météorologiques à l'origine les crues de la Maine (perturbations d'origine atlantique) sont également à l'origine des crues océaniques sur la Loire . C'est avec ce type de situation (ainsi qu'avec les crues mixtes) que le risque de concomitance d'une forte crue de la Loire avec une forte crue de la Maine est le plus élevé.
- Les crues à pointes multiples, fréquemment rencontrées sur les affluents de la Maine, vont être à l'origine de situations de concomitance à la fois entre les pointes des affluents de la Maine et avec la pointe de la Loire à Saumur. Ces situations pourront entraîner des crues de longue durée à Angers (le niveau

maximum reste élevé à Angers car la crue de la Loire reste soutenue alors que les affluents de la Maine présentent des pointes de crues successives).

- L'analyse des hydrogrammes fictifs calculés à Montjean-sur-Loire (somme des débits amont des affluents de la Maine et de la Loire à Saumur) et leur comparaison avec l'hydrogramme réellement observé à Montjean-sur-Loire, met en évidence le phénomène de stockage pendant la phase de montée de crue (débit fictif inférieur au débit réel) et de déstockage pendant la décrue (débit fictif supérieur au débit réel). Ce stockage-déstockage dans la zone des BVA en amont d'Angers corrobore l'incidence forte du débit de la Loire sur l'importance de la crue à Angers.
- En cas de crue simple, l'ordre d'arrivée des pointes de crue en amont des BVA sera proche des valeurs suivantes :
 - t_0 : Oudon, Mayenne à Château Gontier
 - $t_0 + 5$ heures : Mayenne à Chambellay
 - $t_0 + 15$ heures : Sarthe à Beffes
 - $t_0 + 65$ heures : Loir à Durtal

Cependant, cette horloge moyenne d'arrivée des pointes de crue en amont des BVA peut être perturbée par différents phénomènes :

- Les décalages entre les pointes de crue de la Mayenne à Chambellay et de la Sarthe ont tendance à se réduire pour les fortes crues,
- En cas de crues à pointes multiples, on peut obtenir des concomitances entre des pointes de crue différentes de la Sarthe, de la Mayenne et du Loir. Ces phénomènes conduisent à une aggravation des crues dans les BVA. Pour obtenir une réelle concomitance des pointes amont au droit des BVA et à Angers, il faudrait que la pointe de la Sarthe arrive environ 24h avant la pointe de la Mayenne.

Concernant les apports journaliers respectifs des affluents de la Maine, on aboutit aux conclusions suivantes :

- pour les plus fortes crues à Angers, les apports respectifs des affluents principaux sont peu contrastés (phénomènes pluvieux généralisés entraînant des crues sur tous les affluents) ;
- une situation contrastée par une plus forte crue sur l'un des affluents principaux (Mayenne, Sarthe, Loir) conduira à une crue renforcée à Angers ;
- les petites crues à Angers sont générées par des situations moins contrastées, avec un comportement moyen pour lequel les parts respectives de la Sarthe, la Mayenne et le Loir sont respectivement décroissantes. La Sarthe apporte en moyenne 40% du débit journalier, l'Oudon et la Mayenne 35%, le Loir 25%.

▪ GRADIENTS D'EVOLUTION DES DEBITS

L'analyse a été effectuée sur les gradients horaires des débits amont et du débit à Montjean-sur-Loire.

Pendant la phase de montée de crue, le gradient du débit à Montjean-sur-Loire est inférieur à la somme des gradients d'entrée (affluents de la Maine et Loire à Saumur), correspondant à un stockage dans la zone des BVA. En phase de décrue, on constate le phénomène inverse.

La relation entre le gradient à Montjean-sur-Loire et le gradient des débits amont est globalement croissante mais on constate une dispersion assez importante des

valeurs (pour une même valeur de gradient à Montjean-sur-Loire, on peut avoir des valeurs variables de gradient amont), indiquant que la relation n'est pas directe. En début de crue par exemple, les montées rapides qui peuvent se produire sur les affluents de la Maine n'entraînent pas de modification significative du gradient à Montjean-sur-Loire. Cela signifie probablement que le volume joue également un rôle, ainsi que l'état initial, dans la relation entre les gradients amont et le gradient aval.

La relation entre le gradient à Montjean-sur-loire et les gradients des rivières amont (affluents de la Maine et Loire) est meilleure si l'on somme les gradients de toutes les entrées (Maine + Loire) que si l'on considère seulement les affluents de la Maine ou seulement la Loire, ce qui confirme l'influence combinée des deux rivières. La réduction du gradient entre la somme des gradients amont et le gradient aval peut atteindre 50%.

▪ **CRUES DE CALAGE ET DE VALIDATION DU MODELE HYDRAULIQUE**

Les crues de calage retenues pour la zone des BVA sont les crues de décembre 1982, décembre 1999 et janvier 1995. Pour la Loire, la crue complémentaire de calage est la crue de janvier 1994. La crue de validation retenue est la crue de janvier 2004.

La mise en œuvre du modèle hydraulique ainsi que l'étape de compréhension des phénomènes hydrauliques permettront de préciser les rôles des différentes composantes intervenant dans la genèse des crues au niveau des BVA, en particulier concernant l'importance relative de la Loire et des affluents de la Maine, les situations de concomitance ainsi que les phénomènes de stockage-déstockage dans les BVA.

**B. CONSTRUCTION, CALAGE ET VALIDATION DU
MODELE HYDRAULIQUE**

TABLE DES MATIERES

B.	CONSTRUCTION, CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDRAULIQUE	
1.	OBJECTIFS DU MODELE HYDRAULIQUE	1
2.	DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES	2
2.1.	Topographie	2
2.2.	Bathymétrie	3
2.3.	Modèles numériques de terrain	4
3.	DONNEES DE CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE	7
3.1.	Crues de calage et de validation	7
3.2.	Données d'entrée du modèle hydraulique	8
3.2.1.	Débits aux points d'entrée amont	8
3.2.2.	Débits des apports intermédiaires	8
3.3.	Condition limite aval	9
3.4.	Données disponibles pour le calage	9
4.	CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE	13
4.1.	Présentation du logiciel STREAM	13
4.2.	Domaines d'application	13
4.3.	Discretisation de l'espace en casiers	13
4.4.	Construction du modèle	14
4.4.1.	Définition de la topologie	14
4.4.2.	Saisie de la topographie	15
4.5.	Méthodologie de calage	16
4.6.	Valeurs des coefficients de Strickler	16
5.	PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS	20
5.1.	Calage sur les hydrogrammes	20
5.1.1.	Andigné	20
5.1.2.	Chambellay	21
5.1.3.	Montjean-sur-Loire	21
5.2.	Calage sur les limnigrammes	22
5.2.1.	Andigné	22
5.2.2.	Chambellay	22
5.2.3.	Durtal	23

5.2.4.	Montjean-sur-Loire	23
5.2.5.	Angers	23
5.2.6.	Ponts de Cé	24
5.3.	Calage sur les relevés observateurs : écluses et échelles de crue	24
5.3.1.	Relevés aux échelles de crue des Basses Vallées Angevines	24
5.3.2.	Relevés aux échelles de crue de la Loire	25
5.3.3.	Relevés aux écluses dans les Basses Vallées Angevines	25
5.4.	Calage sur les laisses de crue dans les Basses Vallées Angevines	28
5.5.	Comparaison des zones inondées pour la crue de janvier 1995	37
6.	PROPOSITIONS DE CRUES A SIMULER	38

Liste des tableaux

Tableau 1 :	Profils existants (profils complets topographiques + bathymétriques)	3
Tableau 2 :	Profils levés spécifiquement pour l'étude (levés par le cabinet FIT conseil)	4
Tableau 3 :	Périodes de retour des crues de calage et de validation.....	7
Tableau 4 :	Evaluation des apports intermédiaires pour les crues de calage et de validation.....	9
Tableau 5 :	Données disponibles pour le calage du modèle hydraulique	12
Tableau 6 :	Valeurs des coefficients de Strickler retenues.....	19
Tableau 7 :	Analyse valeurs calculées et observées aux écluses.....	26
Tableau 8 :	Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur l'Oudon (valeurs des cotes fournies en m NGF).....	32
Tableau 9 :	Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Mayenne (valeurs des cotes fournies en m NGF).....	33
Tableau 10 :	Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Sarthe (valeurs des cotes fournies en m NGF).....	34
Tableau 11 :	Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur le Loir (valeurs des cotes fournies en m NGF).....	36
Tableau 12 :	Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Maine (valeurs des cotes fournies en m NGF).....	37
Tableau 13 :	Caractéristiques des crues de calage et de validation	38
Tableau 14 :	Choix d'événements à simuler.....	41

Liste des figures

Figure 1 :	Données topographiques et bathymétriques disponibles.....	5
Figure 2 :	Localisation des observations disponibles pour le calage.....	6
Figure 3 :	Schéma de découpage d'une vallée en casiers.....	13
Figure 4 :	Schéma de la topologie du modèle hydraulique.....	17

1. OBJECTIFS DU MODELE HYDRAULIQUE

Dans le cadre du volet hydraulique de l'étude de modélisation des phénomènes de crue au niveau des Basses Vallées Angevines, l'étape de construction, calage et validation du modèle hydraulique fait suite à l'étude hydrologique.

Le modèle hydraulique a pour objectifs :

- La compréhension des phénomènes hydrauliques de crue dans les Basses Vallées Angevines,
- L'étude d'aménagements visant à réduire les inondations (tranche conditionnelle),
- La prévision des crues (tranche conditionnelle).

La zone modélisée est délimitée par :

A l'amont :

- La station hydrométrique de Maingué sur l'Oudon
- L'écluse de la Jaille-Yvon sur la Mayenne (située entre les stations hydrométriques de Château-Gontier et de Chambellay)
- La station hydrométrique de Beffes sur la Sarthe
- Le pont SNCF de Durtal sur le Loir
- Le Pont Cessart à Saumur sur la Loire

A l'aval :

- La station hydrométrique de Montjean-sur-Loire sur la Loire

Pour la Loire, la zone modélisée est comprise entre les levées et ne comprend pas les vals.

Les données utilisées ainsi que les différentes étapes de la construction et du calage du modèle hydraulique sont décrites dans ce rapport :

- Données topographiques et bathymétriques,
- Données de calage,
- Construction et calage du modèle,
- Exploitation et présentation des résultats.

2. DONNEES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES

2.1. TOPOGRAPHIE

Les Basses Vallées Angevines sont couvertes par des levés topographiques récents.

Ces levés couvrent la totalité des zones inondables connues sur le secteur modélisé.

Ces levés ont 2 origines : DDE du Maine-et-Loire (photogrammétrie) et DIREN Centre (laser).

Des plans photogrammétriques au 1/2000 ont été établis en 2003 pour la DDE du Maine-et-Loire à partir de prises de vue au 1/8000. Ces plans sont structurés en 5 secteurs différents (et établis par 3 cabinets de géomètres : Cabinet FIT Conseil, Cabinet Sevaux et associés et Cabinet Branchereau) :

- L'Oudon : de Segré à la confluence avec la Mayenne (Cabinet Sevaux et associés).
- Val de Mayenne : de La Jaille-Yvon et Marigne à Cantenay-Epinard (confluence avec la Sarthe) (Cabinet Sevaux et associés).
- Val du Loir : de Durtal (limite départementale) à Villeveque (confluence avec la Sarthe) (Cabinet Sevaux et associés).
- Val du Louet : Loire et Louet des Ponts de Cé à Chalennes (Cabinet Branchereau).
- Val de St Georges : Loire de Chalennes à Montjean-sur-Loire (cabinet FIT Conseil).

Par ailleurs, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) par laser aéroporté a été établi pour la DIREN Centre, par la société Terralmaging. Les données utilisées pour le modèle hydraulique des Basses Vallées Angevines ont été fournies par la DIREN Centre en mars 2004. A cette date, elles n'avaient pas été complètement validées. Les caractéristiques des données mises à disposition sont les suivantes :

- Semis de points bruts, d'une densité de 1 pt/4m² et d'une précision meilleure que 15 cm.
- Semis de points filtrés correspondant :
 - aux points appartenant au modèle d'élévation (haut des arbres, haut des bâtiments...);
 - aux points appartenant au modèle de terrain (vrai sol sous végétation, bâti éliminé);
 - aux points correspondants à des surfaces en eau, des surfaces bâties et des surfaces de végétation haute.
- Grid du modèle numérique de terrain (maille de 1m) obtenu par interpolation à partir des semis du modèle numérique de terrain.
- Orthophotoplans rectifiés en vraie couleur.

2 secteurs du MNT concernent la zone du modèle hydraulique :

- Secteur 5 : val de Loire de Saumur à Rochefort sur Loire, ce secteur remontant sur la Maine jusqu'au pont de la RN23 ;
- Secteur 6 : val de Sarthe, de Morannes (limite départementale) jusqu'au pont de la RN23 à l'aval d'Angers.

2.2. BATHYMETRIE

Les tableaux 1 et 2 synthétisent les levés bathymétriques disponibles et utilisés pour la construction du modèle. Ce sont d'une part des levés existants et d'autre part des levés réalisés spécifiquement pour la présente étude :

Tableau 1 : Profils existants (profils complets topographiques + bathymétriques)

Secteur	Source	Date des levés	Nombre de profils
Loire des Ponts de Cé à Montjean-sur-Loire	Agence de l'Eau Loire-Bretagne/Cellule de Mesures et de Bilan Loire estuaire – modèle Loire estuarienne	1995	49
Loire de Saumur aux Ponts de Cé	DIREN Centre – modèle Loire moyenne	1995 (Crougneau)	23
Oudon	Etude de protection contre les crues de Segré	2000	21
Maine d'Angers à Bouchemaine	EPLG - Campagne complémentaire modèle Loire moyenne	1997	5 (ouvrages)
Loir à Durtal	Centre d'études techniques de l'Equipement (CETE)	1998	3

La Figure 1 récapitule les données topographiques disponibles pour la construction du modèle hydraulique.

Tableau 2 : Profils levés spécifiquement pour l'étude (levés par le cabinet FIT conseil)

Secteur	Type	Date des levés	Nombre de profils
Oudon	Profils bathymétriques	09/2004	8
Mayenne	Profils bathymétriques	09 et 10/2004	20
Sarthe	Profils bathymétriques	10/2004	29
Sarthe entre Beffes et Morannes	Profils complets	11/2004	3
Loir	Profils bathymétriques	10/2004	8
Loir	Profils bathymétriques	01/2005	18
Loir à Durtal	Profils complets	10/2004	3
Vieille Maine	Profils bathymétriques	10/2004	2
Maine	Profils bathymétriques	10/2004	9
Louet	Profils bathymétriques	10/2004	18

2.3. MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) spécifique couvrant l'ensemble de la zone d'étude a été généré à partir des données topographiques terrestres disponibles.

Compte tenu des deux types de données disponibles, deux techniques différentes sont utilisées ;

- Dans les secteurs couverts par une photorestitution, les points cotés correspondant au terrain naturel et les courbes de niveaux, ainsi que certaines lignes 3D caractéristiques sont extraites puis triangulés puis convertis en GRID au pas de 5 m.
- Dans les secteurs couverts par un levé laser, une grille au pas de 5m (GRID) est réalisée à partir des points du terrain naturel (« MNT terre»), ou à partir du « MNT eau » dans les zones inondées. La valeur des cellules des grilles est calculée comme valeur moyenne des points contenus dans chaque cellule. Cette méthode permet une bonne représentation des phénomènes continus.

Afin d'obtenir un MNT complet sur la zone d'étude, les différentes grilles ainsi obtenues sont assemblées. Dans les zones de chevauchement, la GRID issue du traitement laser est systématiquement privilégiée, car elle permet une représentation plus fine du terrain.

Cette GRID de 5 m, très fine, permet ensuite de générer des grilles dont le pas est adapté aux différents traitements dont elle fera l'objet au cours de l'étude.

Pour la cartographie numérique et les atlas au 1/25 000°, une grille de 10 m est générée.

Pour les animations, la grille utilisée sera adaptée à l'échelle résultant du choix du cadrage choisi, elle variera entre 25 et 100 m.

* « Levés topographiques et bathymétriques des Basses Vallées Angevines ». Etablissement Public Loire (Cabinet FIT Conseil, 2004 et 2005)

Figure 1 : Données topographiques disponibles

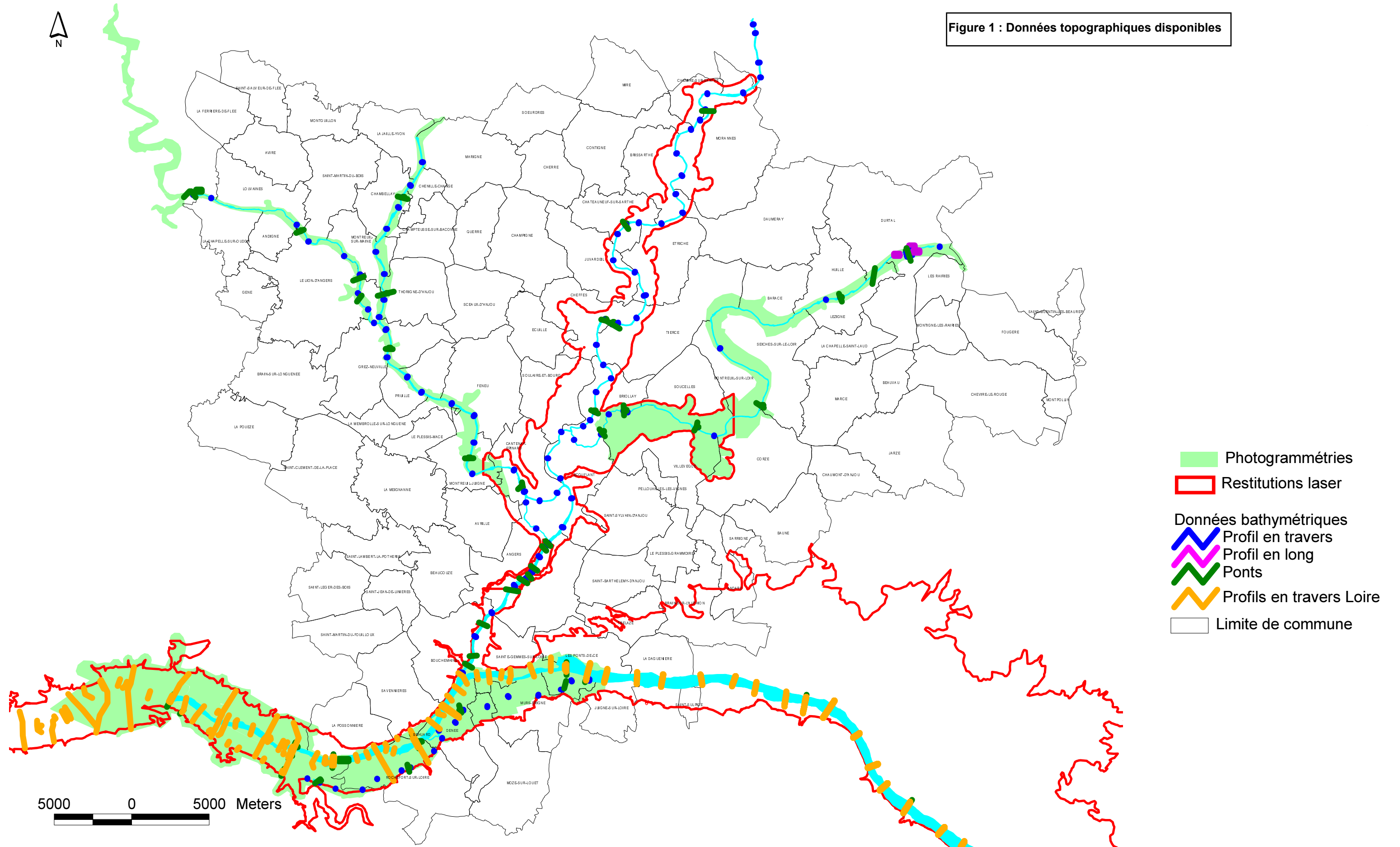
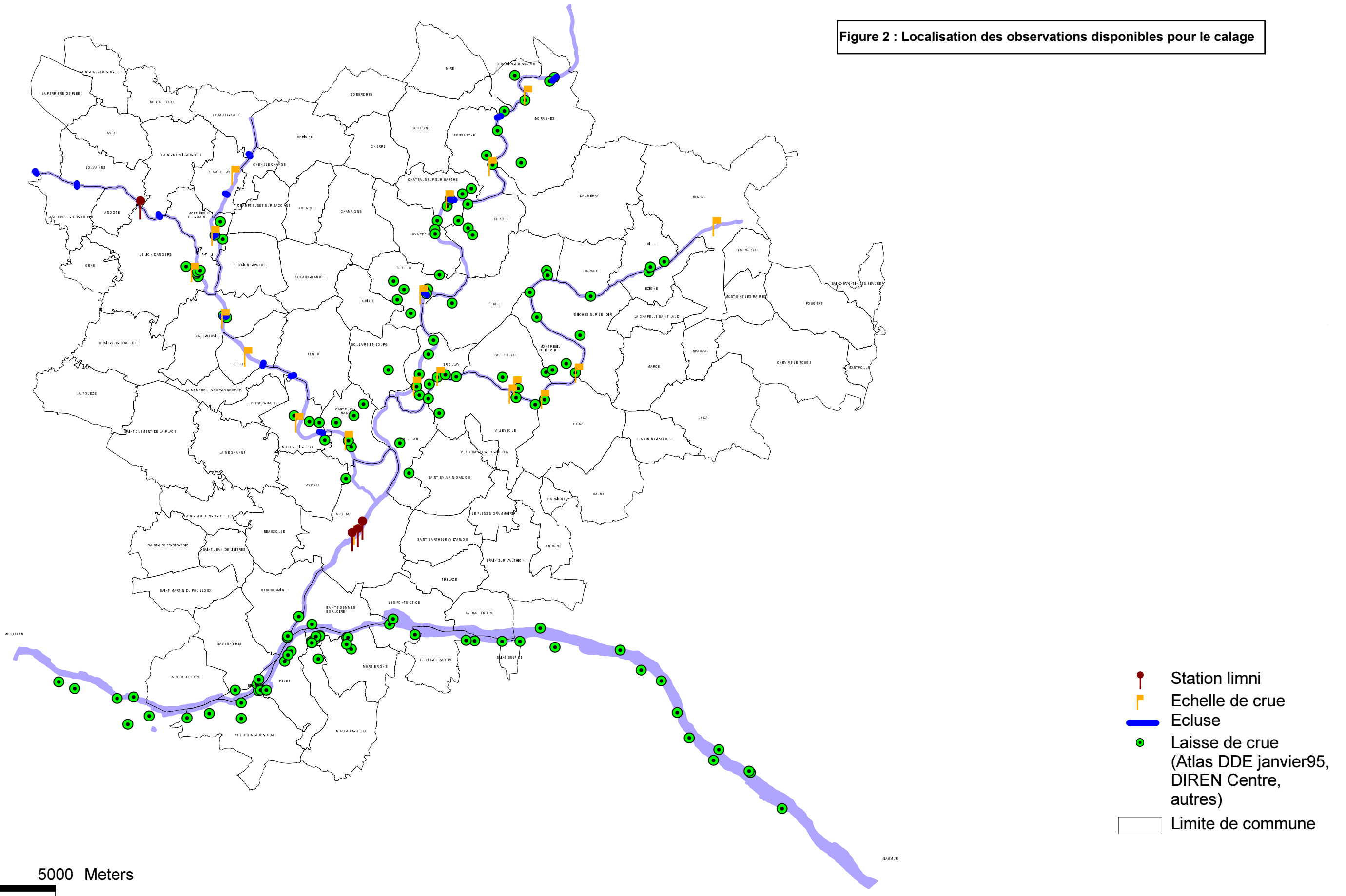




Figure 2 : Localisation des observations disponibles pour le calage



5000 0 5000 Meters

3. DONNEES DE CALAGE DU MODELE HYDRAULIQUE

3.1. CRUES DE CALAGE ET DE VALIDATION

Le choix des crues de calage et de validation du modèle hydraulique a été fait au vu des résultats de l'étude hydrologique (voir chapitre 7. du rapport de l'étude hydrologique).

Les crues de calage retenues pour la zone des BVA sont les crues de décembre 1982, décembre 1999 et janvier 1995, soit les plus fortes crues de la période récente. Ces crues correspondent à des situations contrastées du point de vue de l'importance respective des apports de la Maine et de la Loire (cf Tableau 3).

Pour la crue de décembre 1982, l'évolution du lit de la Loire pourrait perturber le calage.

Une crue complémentaire est utilisée pour le calage de la Loire : la crue de janvier 1994. C'est la plus forte crue récente de la Loire après celle de décembre 1982. Les informations disponibles dans les Basses Vallées Angevines pour cette crue sont utilisées pour la validation du modèle hydraulique dans ce secteur.

La crue de janvier 2004 est utilisée pour la validation du modèle hydraulique.

Le niveau maximum atteint au pont de la Basse-Chaine à Angers pour cette crue est de 5,6m. C'est une crue importante des affluents de la Maine notamment du Loir (mais plus faible sur la Mayenne et la Sarthe), associée à une petite crue de la Loire.

Pour ces 5 crues, l'ensemble des données disponibles (observations hydrométriques, relevés de crues, laisses de crue, jaugeages) a été utilisé.

Tableau 3 : Périodes de retour des crues de calage et de validation

Crue	Hauteur à Angers	périodes de retour sur l'Oudon, la Mayenne, la Sarthe et le Loir	périodes de retour Loire
décembre 1982	6.37 entre 20 et 50 ans	Sarthe, Loir : entre 5 et 10 ans Mayenne : entre 10 et 20 ans	Montjean-sur-Loire : entre 20 et 50 ans Saumur : 50 ans
janvier 1994	6.02 10 ans	Sarthe, Mayenne : entre 2 et 5 ans Loir : inf. à 2 ans	Montjean-sur-Loire : entre 20 et 50 ans Saumur : entre 10 et 20 ans
janvier 1995	6.65 100 ans	>50 ans sur la Sarthe et le Loir Mayenne : entre 20 et 50 ans	Montjean-sur-Loire : entre 10 et 20 ans Saumur : entre 2 et 5 ans
décembre 1999	6.12 entre 20 et 50 ans	Sarthe : entre 20 et 50 ans Loir : entre 10 et 20 ans Mayenne : entre 5 et 10 ans	Montjean-sur-Loire entre 5 et 10 ans Saumur : entre 2 et 5 ans
janvier 2004	5.61 entre 5 et 10 ans	Loir : entre 20 et 50 ans Sarthe, Mayenne : entre 5 et 10 ans	Montjean-sur-Loire entre 5 et 10 ans Saumur : entre 5 et 10 ans

3.2. DONNEES D'ENTREE DU MODELE HYDRAULIQUE

Les entrées du modèle hydraulique sont constituées des débits aux points amont et des débits des apports intermédiaires.

3.2.1. Débits aux points d'entrée amont

Pour les débits amont de l'Oudon, la Sarthe, le Loir et la Loire, les débits utilisés sont les débits fournis par les gestionnaires des stations hydrométriques de Maingué (Oudon), Beffes (Sarthe), Durtal (Loir) et Saumur (Loire).

Pour les crues de décembre 1982 et janvier 1994, les débits en entrée de l'Oudon sont les débits à la station d'Andigné (en aval de Maingué), la station de Maingué ayant été créée postérieurement (débits à partir de 1995).

Les débits de la Mayenne à l'écluse de la Jaille-Yvon sont les débits de la station hydrométrique de Château Gontier, décalés de 4 heures pour tenir compte du temps de propagation entre Château-Gontier et la Jaille-Yvon.

Les débits utilisés en entrée du modèle sont les débits instantanés sauf pour la crue de décembre 1982, pour laquelle les seuls débits disponibles sont des débits moyens journaliers.

3.2.2. Débits des apports intermédiaires

Les apports intermédiaires ont été analysés lors de l'étude hydrologique. Les affluents importants (Thouet, Authion, Aubance, Layon) disposent de stations de mesure dont les données ont pu être exploitées. Les données n'étant pas disponibles pour toutes les crues sur l'ensemble des affluents, les données ont été estimées par des formules de corrélations à partir des données connues sur le Layon et l'Aubance.

Dans les Basses Vallées Angevines, les apports intermédiaires ont été estimés, il s'agit d'apports de petits affluents non jaugés ou d'apports diffus.

Les apports intermédiaires sont intégrés dans le modèle de la manière suivante :

- Les débits du Thouet sont pris en compte dans le débit d'entrée de la Loire (débits du Thouet additionnés au débit de la Loire à Saumur).
- Des points d'injection sont définis dans le modèle pour l'Authion, l'Aubance et le Layon.
- Les apports intermédiaires dans les Basses Vallées Angevines sont répartis en fonction des surfaces de sous-bassins versants : 9 points d'injection sont définis.

Les débits pris en compte sont des débits moyens journaliers. Cela permet :

- d'une part de tenir compte au moins partiellement de l'écrêtement des pointes qui se produit du fait de l'incidence aval des niveaux dans les rivières principales sur l'écoulement des petits affluents, qui favorise le stockage,
- d'autre part de pouvoir utiliser des formules de reconstitution simples entre affluents proches basées sur des débits journaliers (notamment entre le Layon et le Thouet). Ces estimations sont peu perturbées par une pointe locale sur un affluent.

Le Tableau 4 présente pour chaque crue les données utilisées pour définir les débits des apports intermédiaires du modèle hydraulique.

Tableau 4 Evaluation des apports intermédiaires pour les crues de calage et de validation

Apport	Crue décembre 1982	Crue janvier 1994	Crue janvier 1995	Crue décembre 1999	Crue janvier 2004
Thouet	Débits estimés à partir des débits du Layon à la station de St Lambert du Lattay (formule de corrélation entre Puy Notre Dame et St Lambert). $Q_j \text{ Thouet} = 3.019 * Q_{\text{Layon}}(j-0.5) - 10.4$ si $Q_j \text{ Thouet}$ calculé négatif $Q_j \text{ Thouet} = Q_j \text{ Layon}$			Débits estimés à partir des débits du Thouet à la station de Missé (formule de corrélation entre Puy Notre Dame et Missé)	
Authion	Débits station de pompage quand station de pompage en service Débits estimés à partir des débits de l'Aubance à Soulaines quand station de pompage ne fonctionne pas ($Q_j \text{ Authion} = Q_j \text{ Soulaines} * (1483/172)^{0.8}$)				
Aubance	Débits estimés à partir des débits mesurés à la station de Soulaines/Aubance ($Q_j \text{ Aubance total} = Q_j \text{ Soulaines} * (490/172)^{0.8}$)				
Layon	Débits mesurés à la station de St Lambert du Lattay				
BVA	Débits estimés à partir des débits de l'Aubance à Soulaines (hydrogramme calculé par sous-bassin versant en utilisant un coefficient proportionnel à la surface ^{0.8} : $Q_j = Q_j \text{ Soulaines} * (S_{bv} / 172)^{0.8}$)				

3.3. CONDITION LIMITE AVAL

La condition limite aval du modèle est constituée par la relation cote-débit de la station hydrométrique de Montjean-sur-Loire.

La relation prise en compte est la courbe actuelle fournie par la DIREN des Pays de la Loire, valable pour la période 1992-2004.

Pour la crue de décembre 1982, les résultats prennent en compte la courbe cote-débit de la période 1980-1985. L'approfondissement de la Loire est en effet sensible sur les hauteurs faibles à moyennes, mais n'a pas d'incidence sur le maximum de cette crue.

Afin d'analyser le comportement de la relation cote-débit à Montjean-sur-Loire et en particulier l'existence d'un phénomène éventuel d'hysteresis, des tests ont été effectués en prenant en compte en condition limite aval les cotes observées à Montjean-sur-Loire. Ces tests ont effectivement mis en évidence une hysteresis de la relation cote-débit (cf 5.2.4).

3.4. DONNEES DISPONIBLES POUR LE CALAGE

Les données utilisées pour le calage du modèle sont principalement des relevés de niveaux, ainsi que quelques jaugeages. Pour la crue de janvier 1995, on dispose également de cartographie des hauteurs d'eau et des zones inondées (atlas cartographiques), ainsi que de photos aériennes et images satellite.

D'autre part, un questionnaire relatif aux inondations a été envoyé début en mai 2004 aux 78 communes concernées par le secteur d'étude. 39 communes les ont rempli et renvoyé. Certains questionnaires ont été renvoyés trop tardivement pour pouvoir être pris en compte.

4 objectifs étaient recherchés au travers de ces questionnaires :

- recueillir les études communales sur les inondations,

- identifier les repères de crue connus,
- recenser la vulnérabilité,
- recenser les travaux susceptibles de modifier les écoulements de crue.

De nombreuses informations sur la vulnérabilité ont pu être collectées grâce à ces questionnaires.

Une vingtaine de repères connus ont été indiqués. Certains ont fait l'objet d'une fiche, d'autres ont été jugés insuffisamment précis.

Pour compléter ces questionnaires, des enquêtes de terrain ont été réalisées sur les Basses Vallées Angevines et le Louet en mai 2004, et sur le Loir à Durtal en août 2004.

Ces enquêtes ont permis de relancer les communes pour les réponses aux questionnaires, de visualiser la localisation des échelles de crue, de recueillir les relevés communaux de ces échelles, et d'identifier 30 laisses de crue (dont 13 pour la crue de janvier 2004). Ces laisses ont fait l'objet d'une fiche, et ont été nivelées lors de la campagne topographique.

Les relevés de niveaux disponibles sont les suivants (l'ensemble des données disponibles pour chaque crue est récapitulé dans le Tableau 5) :

▪ **DANS LES BASSES VALLÉES ANGEVINES :**

- Laisses de crue : il s'agit de laisses de crue correspondant au niveau maximum atteint pendant la crue. Pour la crue de janvier 1995, les laisses de crue disponibles sont relativement nombreuses (68 laisses de crue intégrant les laisses disponibles dans l'atlas des zones inondables). Pour les crues antérieures, les informations sont plus partielles. Des laisses de crue supplémentaires ont été repérées et nivelées dans le cadre de la présente étude :
 - Loir : 15 laisses (crues de 1983, 1995, 2000, 2004).
 - Mayenne : 8 laisses (1995, 1999, 2001, 2004).
 - Sarthe : 6 laisses (1995, 1999, 2004).
 - Louet : 1 laisse (2004).
- Mesures en continu des hauteurs d'eau aux stations hydrométriques situées dans la zone modélisée : stations de Chambellay, Andigné (jusqu'en 2000), Durtal, Angers ponts de Haute et Basse Chaine (à partir de 2003).
- Relevés à Angers au Pont de Verdun (échelle de crue située côté aval du pont) : relevés quotidiens en période normale, 3 fois par jour en période de crue (il n'y a plus de relevés à partir de 2003, date d'installation des stations aux ponts de Haute et Basse Chaine). Des relevés ponctuels effectués en amont et en aval du Pont de Verdun pendant certaines crues au voisinage du maximum, permettent de connaître le remous dû au pont (crues de janvier 1995, décembre 1999, janvier 2004).
- Relevés aux échelles de crue des Basses Vallées Angevines : la plupart des échelles existantes ont été installées dans les Basses Vallées Angevines après la crue de janvier 1995. La cote altimétrique du zéro de chacune de ces échelles est la même que la cote altimétrique du zéro de l'échelle du pont de Verdun. Il existe 17 échelles, et des relevés sont disponibles pour 13 échelles pour la crue de janvier 2004. Pour les crues antérieures, seuls les relevés à l'échelle de crue de Cheffes sont disponibles.

- Relevés observateurs aux écluses : les relevés aux échelles amont et aval des écluses situées dans la zone modélisée ont été recueillis. Ces relevés sont effectués plusieurs fois par jour en période de crue (à 8h, 12h et 16h), par contre, ils sont interrompus pour les niveaux d'eau élevés lorsque les échelles sont noyées. Selon les crues et la position des échelles, les relevés seront par conséquent plus ou moins complets, et ne couvriront pas le maximum de la crue. Les échelles des écluses situées le plus en aval disposent de moins de relevés car l'influence aval s'y manifeste plus rapidement.

- **SUR LA LOIRE**
- Relevés aux stations hydrométriques : station des Ponts de Cé (à partir de fin 2000), station de Montjean-sur-Loire. Ces stations sont gérées par la DIREN des Pays de la Loire.
- Relevés aux échelles de crue de la Loire : des relevés observateurs sont disponibles aux échelles de crue de la Loire (en général 3 relevés par jour en période de crue, relevés parfois plus nombreux pour les échelles importantes, en particulier l'échelle de crue de Montjean-sur-Loire). Depuis 1999, certaines échelles ont été automatisées (stations gérées par le Service Maritime et de Navigation) : Chalonnes, la Possonnière, la Pointe, St Mathurin, Gennes. Pour les autres échelles, seules les valeurs maximales sont disponibles, en particulier pour la crue de janvier 2004.

Les informations de jaugeages disponibles sont les suivantes :

- un jaugeage à Angers en janvier 1995
- jaugeages à Montjean-sur-Loire au voisinage de la pointe de crue (crue décembre 1982, crue janvier 1994, crue janvier 2004)

La Figure 2 indique la position des observations disponibles dans les Basses Vallées Angevines (écluses, échelles de crue, laisses de crue, stations hydrométriques) et pour la Loire (laisses de crue).

Tableau 5 Données disponibles pour le calage du modèle hydraulique

		Crue décembre 1982	Crue janvier 1994	Crue janvier 1995	Crue décembre 1999	Crue janvier 2004
Laisses de crue (PHE) de BVA	Nombre de laisses de crue	0	-	68	2	14
Relevés échelles de crue BVA	Nombre d'échelles relevées	Echelle de Cheffes uniquement				Loir : 3 Sarthe : 3 Mayenne : 5 Oudon : 1
Relevés écluses BVA	Nombre d'écluses relevées	12	12	13	13	13
Relevés Angers	Pont de Verdun	Relevés quotidiens, 3 fois par jour en crue 1 jaugeage en janvier 1995 valeurs ponctuelles remous				non
	Remous Pont de Verdun	non	non	oui	oui	oui
Relevés stations hydrométriques	Andigné Chambellay Durtal Angers Pontsde Cé Montjean-sur-Loire	oui oui oui oui	Oui oui oui oui	oui (*) oui oui oui	oui oui oui oui	non oui oui oui oui
Relevés échelles de crue Loire	Montjean-sur-Loire Chalennes St Georges Possonière La Pointe Pontsde Cé St Mathurin Gennes Saumur	oui oui non oui oui oui oui oui oui	Oui oui oui oui oui oui oui oui	oui oui non oui oui oui oui oui	oui oui non oui oui oui oui oui	oui oui non oui oui oui oui oui
Laisses de crue (PHE) de Loire	Nombre de laisses	6	12	6	0	24

(*) données incomplètes

- : station hydrométrique inexistante

4. CONSTRUCTION ET CALAGE DU MODELE

4.1. PRESENTATION DU LOGICIEL STREAM

4.2. DOMAINES D'APPLICATION

Le modèle hydraulique des Basses Vallées Angevines est développé avec le logiciel STREAM (Simulation en TRansitoire des Ecoulements A surface libre Multidirectionnels). STREAM est un logiciel conçu par BCEOM. Son domaine d'application est l'étude de phénomènes hydrauliques complexes (échanges lit mineur - lit majeur, champs d'inondation hétérogènes, écoulements maillés, deltas...) et des processus de propagation de débits entre l'amont et l'aval d'un cours d'eau.

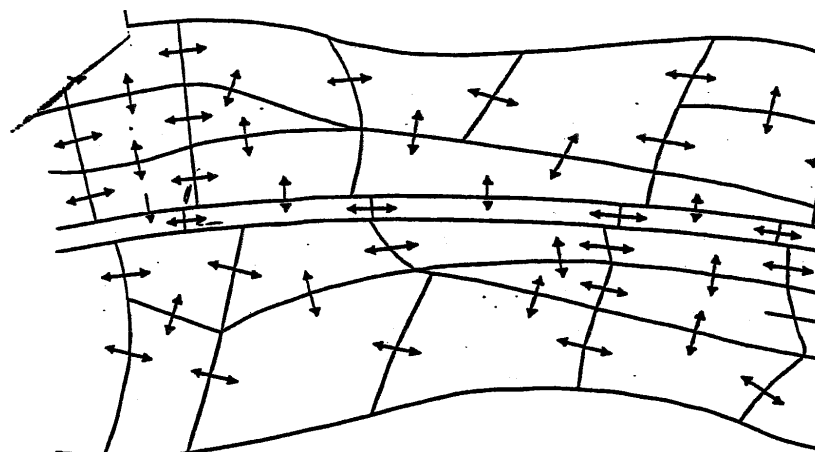
La modélisation fine de ces phénomènes permet en particulier de comprendre et de réaliser la cartographie des risques d'inondation (cartes d'aléas hydrauliques avec hauteurs de submersion, durées de submersion, vitesses d'écoulement), de définir des aménagements de protection contre les crues et de prendre en compte les impacts d'éventuels aménagements nouveaux (seuils, projets routiers, mise hors d'eau d'infrastructures...).

Le logiciel STREAM est également utilisable pour la prévision des crues en temps réel.

4.3. DISCRETISATION DE L'ESPACE EN CASIERS

STREAM est basé sur une représentation discrétisée des écoulements dans l'espace et dans le temps. Les lits mineurs et majeurs des cours d'eau modélisés sont entièrement représentés par un enchaînement de cellules, appelées " casiers " (Cf. Figure 3).

Figure 3 : Schéma de découpage d'une vallée en casiers



Chacune de ces cellules est caractérisée dans le modèle par :

- La topographie de ses limites :
 - profils en travers issus :
 - du Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour les limites en lit majeur,
 - des profils bathymétriques pour les limites en lit mineur,
 - des levers d'ouvrages hydrauliques pour les limites situées au droit de ces derniers.
- La loi d'échange hydraulique de chacune de ses limites :
 - loi de frottement pour les limites classiques qui ne présentent pas de singularité,
 - loi d'ouvrage pour les limites qui correspondent à un ouvrage hydraulique.

Ces lois, associées à la topographie de la limite, permettent au modèle de calculer les échanges entre les casiers.

- Sa topographie interne représentée par une loi surface-cote permettant au modèle de calculer, pour chaque cote d'eau, le volume stocké dans le casier.

A partir des conditions fixées aux limites externes du modèle (hydrogrammes amont et latéraux et conditions de cotes à l'aval), celui-ci est alors capable de calculer, à chaque instant, d'une part les transferts d'eau entre chaque casier et, d'autre part, la cote d'eau résultante au centre de chaque casier. STREAM permet ainsi de simuler le déroulement complet de la crue.

Par rapport aux modèles filaires, dans lesquels la topographie est simplement représentée par des profils en travers successifs coupant l'ensemble de la vallée (lits mineurs et majeurs), les modèles à casiers sont des modèles multidirectionnels qui permettent de calculer les écoulements dans les 2 dimensions du plan.

4.4. CONSTRUCTION DU MODELE

4.4.1. Définition de la topologie

Le découpage du domaine à modéliser en casiers représente l'une des étapes fondamentales de la modélisation puisqu'il conditionne la validité et la précision des résultats obtenus.

Une reconnaissance de terrain a permis d'identifier les éléments déterminants pour l'écoulement : ponts, seuils, barrages, remblais, ouvrages de décharge ainsi que la morphologie des vallées, la position des stations de mesure, des échelles de crue.

La taille des casiers est adaptée aux objectifs du modèle et à la nature des écoulements. Ainsi, les pentes d'écoulement, la présence d'obstacles à l'écoulement, et la précision recherchée vont permettre de définir les tailles des casiers. Au final, le nombre de casiers est de 842, répartis par rivière de la manière suivante :

- Oudon = 63 casiers
- Mayenne = 89 casiers
- Sarthe = 120 casiers
- Loir = 110 casiers
- Maine = 110 casiers

- Loire = 350 casiers

On obtient une densité de casiers importante sur la Maine (représentation fine dans Angers), ainsi que sur la Loire. Sur la Loire, en aval des Ponts de Cé, une représentation fine est nécessaire pour représenter correctement l'incidence de la Loire sur l'écoulement de la Maine. Les différents bras de la Loire ont été représentés, notamment le Louet.

Dans les Basses Vallées Angevines, la taille des casiers est plus importante, dans la mesure où la pente de la ligne d'eau est très faible.

Le schéma de la topologie du modèle est fourni en Figure 4.

4.4.2. Saisie de la topographie

Une fois la topologie du modèle digitalisée, la topographie définissant les casiers (profils inter-casiers et lois surface-cote) a été extraite de la topographie des vallées des différentes rivières modélisées. La topographie des vallées comprend :

- le Modèle Numérique de Terrain (MNT) pour les limites en lit majeur,
- les profils bathymétriques pour les limites en lit mineur.

Chaque profil inter-casiers résultant de ce croisement a systématiquement été vérifié et rectifié si nécessaire de sorte qu'il soit représentatif de l'écoulement moyen entre le centre des deux casiers qu'il sépare.

La topographie définissant les ouvrages hydrauliques a, quant à elle, été saisie manuellement. Au total, près de 70 ouvrages (ponts et seuils) ont été modélisés.

4.5. METHODOLOGIE DE CALAGE

Afin de reproduire l'écoulement des crues de façon réaliste, le modèle nécessite d'être calé sur des crues historiques, c'est à dire qu'il faut faire correspondre les résultats de modélisation avec les observations réalisées lors des crues historiques :

- cotes des repères de crue ou laisses de crue,
- limnigrammes et hydrogrammes des stations de mesure en continu,
- relevés aux échelles de crue,
- débits mesurés en crue (jaugeages)

Les paramètres de calage sont les paramètres qui représentent les pertes de charge linéaires ou singulières, estimées au droit de chaque interface de casier :

- coefficients de Strickler : coefficients de frottement des pertes de charge linéaires
- coefficients d'ouvrage : pertes de charge singulières au droit des ouvrages

Lors de la construction du modèle, ces coefficients sont initialement fixés selon des valeurs type, classiques, à partir des informations de terrain puis ajustés individuellement lors du calage.

Le calage s'effectue de manière itérative jusqu'à atteindre un degré d'exactitude satisfaisant, en recherchant dans un premier temps une adéquation globale, puis en améliorant les résultats localement si nécessaire.

Le calage s'effectue dans un premier temps pour les crues de calage, puis les résultats obtenus pour la crue de validation sont contrôlés. Si nécessaire, des ajustements du modèle peuvent être réalisés. Dans la pratique, on dispose pour la crue de validation (janvier 2004) d'observations sur la Loire et de repères de crue dans les Basses Vallées Angevines relativement nombreux. Ces données ont par conséquent permis d'améliorer le calage du modèle dans la gamme de débits correspondant à cette crue. Dans la présentation des résultats, les crues de calage et de validation ne sont plus distinguées.

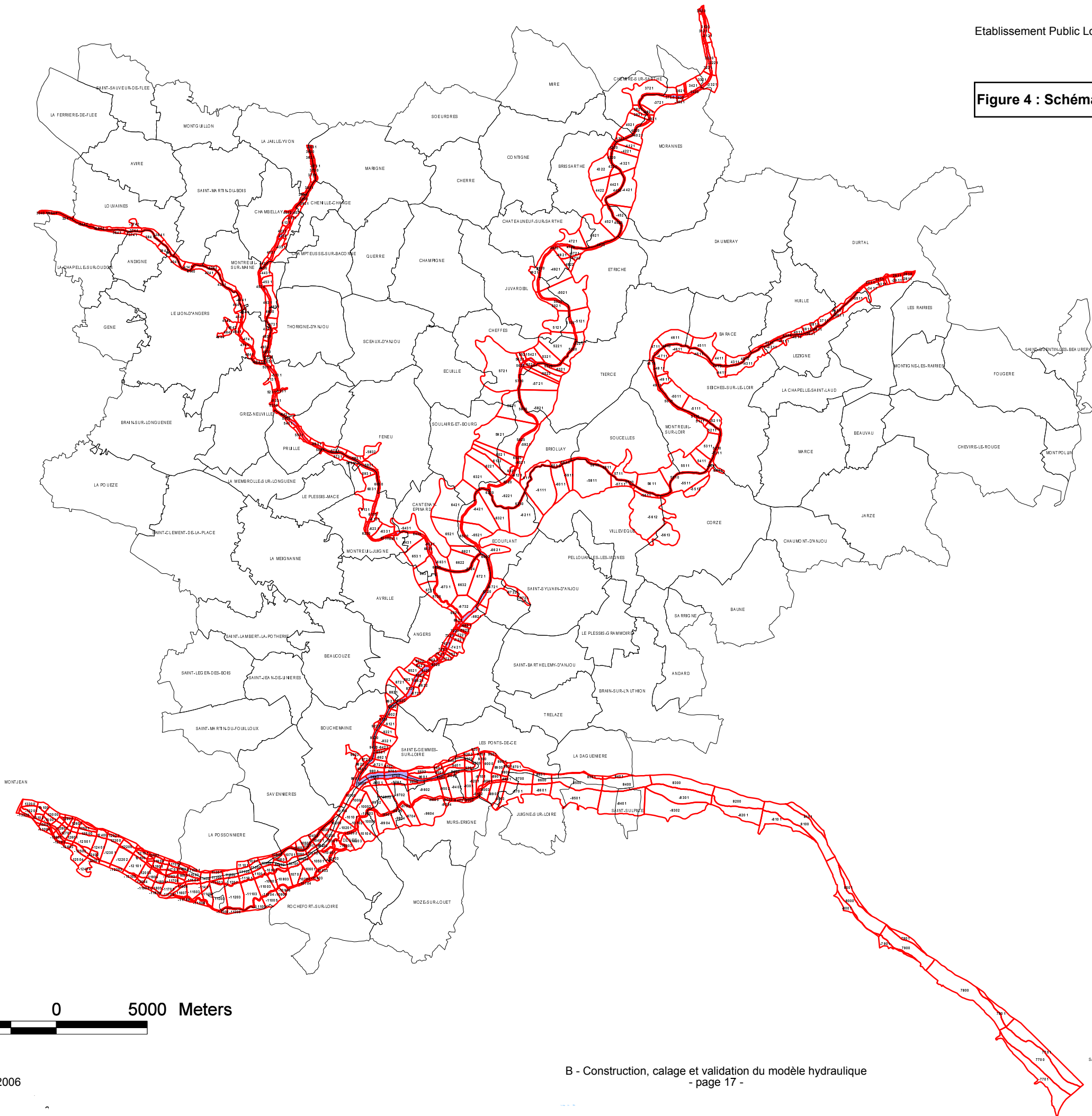
Le calage a été également effectué de manière itérative entre la Loire et les Basses Vallées Angevines compte-tenu des interactions entre les niveaux respectifs de la Loire et des Basses Vallées Angevines.

L'objectif du modèle est de représenter correctement les phénomènes lorsque la hauteur au pont de Verdun à Angers dépasse 4m (aval du pont). Les simulations ont toutefois pris en compte la totalité des crues.

4.6. VALEURS DES COEFFICIENTS DE STRICKLER

Les valeurs des coefficients de Strickler retenues suite au calage sont fournies dans le Tableau 6.

Figure 4 : Schéma de la topologie du modèle hydraulique



5000 0 5000 Meters

Tableau 6 : Valeurs des coefficients de Strickler retenues

Rivière	Secteur	Lit mineur	Lit majeur
Oudon	Segré-Maingué	25-26	10
	Aval Maingué confluence Mayenne	25-28	10
Mayenne	Amont Chambellay	24	10
	Chambellay- Montreuil-sur-Maine	28	10
	Montreuil- confluence Maine	24	10
Sarthe	Amont Morannes	25	10
	Morannes- confluence Maine	25-28	10
Loir	Amont Chaufour	22-23	5-10
	Chaufour-Moulin de Prigne	25-30	10
	Moulin de Prigne- confluence Sarthe	23	10
Maine	Amont pont de l'Atlantique	25, localement 28	10
	Pont de l'Atlantique- confluence Loire	28	8-10
Loire	Saumur-Saint- Mathurin-sur-Loire	24-26	5-8
	Saint-Mathurin-sur- Loire-Ponts de Cé	26-32	6-10
	Ponts de Cé – confluence Maine	29-34	8-10
	Confluence Maine- Chalonnnes	29, localement 25	8
	Chalonnnes- Montjean-sur-Loire	28-35	8

5. PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS

L'analyse des résultats s'effectue à l'aide des éléments suivants :

- graphes de comparaison des débits observés et calculés aux stations hydrométriques,
- graphes de comparaison des cotes observées et calculées aux stations hydrométriques, échelles de crue, écluses,
- graphes de comparaison des relations cote-débit aux stations hydrométriques,
- tableau de comparaison des valeurs maximales calculées et des valeurs maximales observées (laisses de crue, PHE), par rivière.

L'ensemble des résultats sous forme de graphes est présenté en annexes B2 à B7.

Une comparaison du contour des zones inondées calculées pour la crue de janvier 1995 a également été effectuée, avec les limites figurant dans l'atlas des zones inondables du Maine et Loire réalisé par la DDE49 pour cette même crue à partir de relevés de terrain, de témoignages et de photos aériennes de crue. Cette comparaison est intégrée à l'atlas des zones inondables réalisé dans le cadre de la présente étude.

5.1. CALAGE SUR LES HYDROGRAMMES

Le calage sur les hydrogrammes est contrôlé aux stations hydrométriques de Montjean-sur-Loire sur la Loire, Andigné sur l'Oudon (crues de janvier 1995 et décembre 1999) et Chambellay sur la Mayenne (graphes fournis en annexe B2).

Les stations d'Andigné et de Chambellay sont proches des entrées amont du modèle (Oudon et Mayenne). Le calage des débits est par conséquent correct (la plus grande partie du débit est connue à la station amont). Cependant, des écarts dus à la méthode d'estimation des apports intermédiaires peuvent apparaître pour certaines crues. En effet, on a choisi de représenter les apports intermédiaires dans la zone des Basses Vallées Angevines à l'aide d'une méthode cohérente pour les 5 crues étudiées, sans chercher à déterminer finement les apports sur les différents petits affluents des quatre rivières principales. Les écarts parfois constatés à Andigné et Chambellay n'ont pas d'incidence sur le calage du modèle en aval.

D'autre part, ces 2 stations peuvent être influencées par le niveau aval dans les Basses Vallées Angevines, dans ce cas, la courbe hauteur-débit de la station hydrométrique n'est plus applicable et les débits issus de cette transformation sont erronés.

La comparaison a également porté sur la relation cote-débit obtenue avec le modèle hydraulique et les courbes de tarage des stations hydrométriques.

Les graphes de comparaison des hydrogrammes calculés et observés sont fournis en annexe B2. Les graphes de comparaison des relations cote-débit calculées et des courbes de tarage sont fournis en annexe B4.

5.1.1. Andigné

La comparaison entre débits observés et débits calculés ne peut être effectuée que pour les crues de décembre 1999 et janvier 1995, avec des mesures qui ne couvrent

pas l'ensemble de la crue (panne de la station). Rappel : la station d'Andigné a été arrêtée en 2000.

Le calage temporel est correct.

Le calage des débits est correct. Pour la crue de janvier 1995, le débit calculé est inférieur au débit observé dans la première partie de la crue. Les observations ne couvrent pas l'ensemble de la crue, en particulier la pointe principale. Il se produit probablement une incidence aval, conduisant à une surestimation des débits observés.

5.1.2. Chambellay

La comparaison des débits observés et calculés est effectuée pour toutes les crues sauf décembre 1982 (pas de débits instantanés disponibles). On constate une bonne correspondance des débits, avec parfois une sous-estimation pouvant atteindre 10% pour les premières pointes de crue (janvier 1994 et décembre 1999 notamment).

On constate également que les débits observés sont surestimés en cas d'influence aval : crue de janvier 1995, mais également pointe de la crue de décembre 1999.

Le calage dans le temps est correct, en particulier pour les pointes les plus fortes. Les pointes de crue faibles arrivent avec un peu d'avance à Chambellay, en particulier pour la crue de décembre 1999. Cela ne se produit pas ou très peu pour les autres crues, qui présentent également des pointes secondaires du même ordre de grandeur. De plus, pour cette crue, la pointe de crue enregistrée est très décalée (retardée) par rapport à la pointe calculée.

L'entrée du modèle est constituée par les débits à Château-Gontier décalés de 4 heures. Le décalage réel est probablement un peu variable en fonction du débit (propagation un peu plus lente pour les faibles crues).

Afin de valider le calage, la relation hauteur-débit obtenue avec le modèle hydraulique a été contrôlée par rapport à la courbe de tarage (voir graphes 1 à 4 en annexe B4). Le calage obtenu est correct tant que la station n'est pas influencée par l'aval. Ce contrôle permet en effet de visualiser l'incidence aval qui se manifeste pour les crues de décembre 1982, janvier 1995, décembre 1999 et janvier 2004. Dès que la station est influencée (pour les cotes supérieures à 20.9 m NGF environ), la relation cote-débit n'est plus univoque et il n'est pas possible d'évaluer le débit à partir de la cote. La comparaison débits calculés-débits observés n'est alors plus pertinente.

5.1.3. Montjean-sur-Loire

Le débit calculé à Montjean-sur-Loire est la résultante des entrées du modèle et du comportement des différents secteurs (amortissement dans les lits majeurs, stockage dans les Basses Vallées Angevines, ...).

Pour les cinq crues, le calage est correct dans la phase de montée de crue et pour la pointe de crue. En décrue, on constate souvent une sous-estimation du débit. Cette sous-estimation peut être relativement importante et représenter environ 10 à 20% du débit observé à Montjean-sur-Loire.

Plusieurs explications peuvent être avancées pour cette sous-estimation :

- Débits d'entrée sous-estimés à Saumur pour cette partie de la crue.
- Débits d'apports sous-estimés en fin de crue (par exemple, apports des nappes arrivant tardivement par rapport à la pointe de crue). Ainsi, en ce qui concerne les apports du Thouet, les débits de la Dive, affluent aval, ne sont pas intégrés dans l'estimation des apports. Il peut également se produire un phénomène de stockage

dans les basses vallées des affluents, réduisant le débit lorsque le niveau est élevé dans la rivière principale, avec une restitution des volumes stockés après la pointe de crue.

- Phénomène d'hysteresis de la relation cote-débit à Montjean-sur-Loire, signifiant que cette relation n'est pas univoque.

Pour ce dernier point, des tests ont été effectués en imposant en condition limite aval les cotes observées à Montjean-sur-Loire. Ces tests montrent qu'il existe effectivement un phénomène d'hysteresis de la relation cote-débit pendant la décrue, qui explique en grande partie les écarts constatés. Pour la crue de janvier 1995 par exemple, un écart de 20 à 30cm est constaté pour des débits de l'ordre de 3000 à 3500 m³/s. Pour la crue de janvier 2004, on constate également entre la montée de crue et la décrue un écart de l'ordre de 20 cm pour des débits inférieurs à 3800 m³/s.

5.2. CALAGE SUR LES LIMNIGRAMMES

Le contrôle du calage est effectué aux stations limnigraphiques de :

- Dans les Basses Vallées Angevines :
Andigné, Chambellay, Durtal, Angers (pont de Verdun puis ponts de la Haute-Chaîne et de la Basse Chaîne).
- Sur la Loire :
Ponts de Cé, Montjean-sur-Loire

Les graphes de comparaison sont fournis en annexe B3.

Remarque : les stations de mesure du SMN sur la Loire, installées depuis 1999 (Ponts de Cé, Saint-Mathurin-sur-Loire, Gennes, port de la Pointe, la Possonnière et pont de Chalonnnes) sont traitées au chapitre suivant.

5.2.1. Andigné

La comparaison n'est pas précise du fait de la méconnaissance de l'altitude du zéro de l'échelle du limnigraphe. La station d'Andigné n'existant plus, l'altitude du zéro de l'échelle n'a pu être levée. L'altitude prise en compte est celle du zéro de l'échelle de l'écluse de la Himbaudière.

Des écarts de l'ordre de 10 cm à 20cm sont obtenus, mais ils peuvent être dus à une valeur du zéro de l'échelle incorrecte.

5.2.2. Chambellay

Les limnigrammes sont correctement reproduits à Chambellay. Les différences constatées sont dues aux écarts de débits décrits en 5.1.2 (légère sous-estimation des débits pour certaines premières pointes de crue, léger décalage des faibles débits), la relation cote-débit étant correctement reproduite tant que la station n'est pas influencée.

Les cotes sont bien reproduites en cas d'incidence aval (crue de janvier 1995 notamment).

5.2.3. Durtal

Le calage est bon sur les enregistrements limnigraphiques, la pointe de crue est bien reproduite. Pour la crue de décembre 1982, la sous-estimation de la pointe est due à la prise en compte de débits journaliers au lieu de débits instantanés. La relation cote-débit est correctement reproduite (voir graphes 9,10 et 11 en annexe B4), on constate une légère incidence aval pour la crue de janvier 1995.

5.2.4. Montjean-sur-Loire

Pour les crues de janvier 1994, janvier 1995, décembre 1999 et janvier 2004, les limnigrammes à Montjean-sur-Loire sont correctement reproduits dans la phase de montée et pour la pointe de crue, avec cependant une sous-estimation en décrue, due à un phénomène d'hysteresis et au manque de débit probable déjà évoqué en 5.1.3. Cette sous-estimation en décrue peut atteindre 20 à 30 cm, dans des gammes de cotes inférieures à 15 mNGF (soit 5,4m à l'échelle).

Les écarts sur le maximum restent inférieurs à 10 cm, en général, l'écart est de l'ordre de 5 à 7cm.

Pour la crue de décembre 1982, les cotes calculées sont inférieures aux cotes observées, en montée et en décrue, avec une bonne correspondance du maximum. Cela s'explique par l'évolution du lit de la Loire, les calculs étant effectués avec la topographie actuelle alors que le lit de la Loire s'est approfondi depuis 1982. La courbe cote-débit utilisée en condition limite n'était pas applicable en 1982, la comparaison avec les cotes mesurées en 1982 n'est par conséquent pas pertinente.

Un calcul a été effectué pour cette crue avec la courbe cote-débit applicable en 1982, les résultats montrent que les cotes calculées se rapprochent des cotes observées, au moins pour les faibles débits (voir graphe 1 en annexe B3).

5.2.5. Angers

La comparaison des cotes calculées et observées est effectuée au pont de Verdun pour les crues antérieures à 2004 (1 à 3 relevés par jour en période de crue), et aux ponts de la Haute-Chaîne et de la Basse-Chaîne pour la crue de janvier 2004.

Pour les crues de janvier 1995, janvier 1994 et décembre 1982, les limnigrammes sont reproduits de manière satisfaisante à Angers, avec des écarts très faibles (0 à quelques centimètres) pour toute la partie principale de la crue située au-dessus de la cote 13.66m NGF (4 m à Angers).

Pour la crue de décembre 1999, la cote est sous-estimée d'environ 10cm au moment de la pointe de crue uniquement (-8cm sur le maximum). Cette sous-estimation serait due aux conditions d'écoulement dans la Loire, où une légère sous-estimation est également observée, notamment aux échelles de La Possonnière, la Pointe, Ponts de Cé et Gennes.

Après analyse des conditions d'écoulement et des apports des différentes crues, il apparaît que les apports intermédiaires des affluents de la Loire (Thouet, Aubance, Layon) sont relativement plus importants pour cette crue que pour les autres crues de calage. Il est par conséquent possible que la non prise en compte de la Dive (affluent aval du Thouet) entraîne cette différence.

Pour la crue de janvier 2004, la montée de la crue ainsi que la première pointe sont bien reproduites, la seconde pointe est cependant sous-estimée d'environ 10cm. Cette sous-estimation de la deuxième pointe se retrouve également à Montjean-sur-Loire et

est due en grande partie à l'hysteresis de la relation cote-débit à Montjean-sur-Loire (cf 5.2.4).

5.2.6. Ponts de Cé

La comparaison des cotes observées et calculées est effectuée pour les crues de janvier 1994, janvier 1995 et décembre 1999 à partir des relevés observateurs. Pour la crue de janvier 2004, les relevés disponibles sont ceux de la station DIREN. Remarque : les différences de zéro entre l'échelle observateur et l'échelle du limnigraphe ont été prises en compte.

La comparaison montre une bonne correspondance entre valeurs observées et valeurs calculées. Certains relevés observateurs sont parfois douteux (crue de janvier 1994 notamment). La précision de ces relevés est selon le SMN d'environ 10cm.

Les valeurs maximales sont correctement reproduites, avec un écart inférieur à 10cm.

5.3. CALAGE SUR LES RELEVÉS OBSERVATEURS : ECLUSES ET ECHELLES DE CRUE

5.3.1. Relevés aux échelles de crue des Basses Vallées Angevines

Les graphes de comparaison des valeurs observées et calculées sont fournis en annexe B5. Pour certaines échelles, les relevés ont été obtenus de sources différentes, dans ce cas, les différentes séries de valeurs observées sont représentées avec des couleurs différentes.

A l'échelle de crue de Cheffes, pour laquelle les relevés sont disponibles pour 3 crues (décembre 1982, janvier 1995 et janvier 2004) et couvrent la partie haute de la crue, on obtient une très bonne correspondance entre valeurs calculées et valeurs observées pour ces 3 crues.

Pour les autres échelles, les relevés sont disponibles pour la crue de janvier 2004 seulement, et sont parfois peu nombreux.

Sur la Sarthe, la correspondance est bonne avec les échelles mesurées de Briollay, Ecoflant. A Chateauneuf, les cotes calculées pour la pointe de la crue sont supérieures aux cotes observées de plus de 20cm, mais on note des incohérences avec les relevés de laisses de crue amont et aval (voir 5.4). En montée de crue et en décrue, les écarts sont faibles.

Sur le Loir, la correspondance est bonne pour l'échelle de Briollay, les valeurs calculées sont un peu sous-estimées pour l'échelle de Seiches (-15cm en pointe). A Durtal, les valeurs calculées sont comprises entre les deux séries d'observations fournies lors du recueil de données (aucune indication ne permet de privilégier l'une ou l'autre des séries).

Sur la Mayenne, les relevés sont très peu nombreux aux différentes échelles :

- Pour les échelles de Roussière, Montreuil/Belfroy et Sautré, la correspondance est bonne avec les valeurs observées.
- Pour l'échelle de Grez-Neuville, la valeur maximale mesurée est incohérente avec les laisses de crue voisines, l'écart obtenu est de 15 cm (voir 5.4).
- Pour l'échelle de Montreuil/Maine et l'échelle de Chambellay, la correspondance est bonne, les écarts restent inférieurs à 10cm (-8cm à l'échelle de Montreuil/Maine, +4cm à l'échelle de Chambellay pour le maximum de la crue).

Sur l'Oudon, les seuls relevés disponibles sont ceux de l'échelle du Lion d'Angers (4 relevés durant la crue). La correspondance est bonne pour 3 des 4 relevés. Pour le relevé proche du maximum de la crue, on obtient un écart de 15 cm. Aucune autre mesure n'est disponible pour valider ces informations. Le calage sur les relevés aux écluses de l'Oudon situées en amont (Himbaudière) et à l'écluse de Grez Neuville sur la Mayenne en aval de la confluence avec l'Oudon étant correct pour cette crue, le choix a été fait de ne pas se caler sur l'ensemble des valeurs observées au droit de l'échelle du Lion d'Angers.

5.3.2. Relevés aux échelles de crue de la Loire

Les graphes de comparaison des relevés aux échelles et des valeurs calculées sont fournis en annexe 2.

Les profils en long des valeurs maximales mesurées aux échelles de crue sont fournis en annexe B7, pour les 5 crues.

Les écarts obtenus sur les valeurs maximales sont faibles, la plupart des cas inférieurs à 10cm. Très ponctuellement, on obtient cependant des écarts de l'ordre de 20cm. Il s'agit soit de points situés dans la partie amont du modèle, où les casiers sont grands et où une grande précision n'est pas requise, soit de valeurs incohérentes avec les relevés proches.

Pour la crue de janvier 2004 pour laquelle de nombreuses informations sont disponibles, le calage est bon sur l'ensemble des relevés.

Entre les Ponts de Cé et Montjean-sur-Loire, le contrôle est effectué aux échelles de La Pointe, La Possonnière et Chalonnnes. La comparaison entre valeurs observées et calculées montre une très bonne concordance du modèle sur ce secteur.

En amont des Ponts de Cé, les relevés aux échelles de Saint-Mathurin-sur-Loire et de Gennes (ou des Rosiers) sont également bien reproduits.

5.3.3. Relevés aux écluses dans les Basses Vallées Angevines

Les graphes de comparaison sont fournis en annexe B5.

Les relevés aux écluses ne couvrent pas pour la plupart d'entre elles la totalité de la crue mais fournissent néanmoins des informations intéressantes pour le calage : ces informations permettent un contrôle intermédiaire de la cohérence du modèle (calage temporel en particulier), ainsi que le calage partiel des lois d'ouvrages représentant les seuils. La crue de janvier 1994 a été intégrée à l'analyse, car des relevés sont disponibles aux écluses pour cette crue. Le Tableau 7 présente une analyse qualitative des écarts obtenus, avec une appréciation globale, et une indication concernant des défauts éventuels particuliers. Il est à noter que les cotes basses peuvent être perturbées par des manœuvres d'ouvrages sur certains seuils, en particulier la situation peut être différente entre le début et la fin de la crue. Le modèle hydraulique est construit en supposant les ouvrages fixes pendant la crue (seuils abaissés).

Globalement, les résultats obtenus aux écluses sont bons. On note souvent des écarts sur les cotes les plus basses seulement. Les écarts de niveaux entre le bief aval et le bief amont sont bien reproduits, le calage dans le temps est également correct. On note parfois des perturbations dans certains relevés (variation rapide de hauteur due soit à des erreurs de lecture, soit à des manœuvres de vannes).

Tableau 7 : Analyse valeurs calculées et observées aux écluses

	Décembre 1982	Janvier 1994	Janvier 1995	Décembre 1999	Janvier 2004
OUDON					
<i>Maingué amont</i>	Bon sauf décrue (QJ) (*)	Bon (léger décalage – débits entrée=An digné) (*)	Bon (*)	Bon	Bon (*)
<i>Maingué aval</i>	Bon sauf décrue (QJ) (*)	Bon (léger décalage – débits entrée=An digné) (*)	Bon (*), pointes sous-estimées	Bon, 1 ^{ère} pointe surestimée	Bon (*)
<i>Chapelle amont</i>	Bon, pointe sous-estimée (QJ) (*)	Bon (léger décalage – débits entrée=An digné) (*)	bon	Bon, 1 ^{ère} pointe sous-estimée	Bon (*), 2 ^{ème} pointe sous-estimée
<i>Chapelle aval</i>	Bon, pointe sous-estimée (QJ) (*)	Bon (léger décalage – débits entrée=An digné) (*)	bon	Bon, 1 ^{ère} pointe sous-estimée	Bon (*), 2 ^{ème} pointe sous-estimée
<i>Himbaudière amont</i>	Bon sauf décrue (QJ)	Bon (*)	Bon	bon	Bon
<i>Himbaudière aval</i>	Bon sauf décrue (QJ)	Sur-estimé 10 à 20cm (*)	Bon sur-estimé 5 à 10cm	Bon sur-estimé 10cm	Bon sur-estimé 5cm
MAYENNE Amont OUDON					
<i>Chenillé amont</i>	bon	Bon (*)	bon	Bon, qq points surestimés (+10cm)	bon
<i>Chenillé aval</i>	Bon en pointe, cotes basses sous-estimées 5 à 15cm	Bon (*)	Bon, cotes basses sous-estimées 5 à 10cm	bon	Bon, cotes basses sous-estimées 5 cm
<i>Chambellay amont</i>	Bon, cotes basses sous-estimées 5 à 15cm	Bon (*)	Bon (*), pointe sous-estimée (15cm)	bon	bon
<i>Chambellay aval</i>	Bon, cotes basses sous-estimées 5 à 15cm	Bon (*)	Bon, relevés fin décrue douteux	bon	bon

Tome 1 : Hydrologie et hydraulique - Rapport

	Décembre 1982	Janvier 1994	Janvier 1995	Décembre 1999	Janvier 2004
<i>Montreuil sur Maine amont</i>	Sous-estimation 10cm, forme décrue (QJ)	Bon (*), sous-estimation cotes basses (5 à 15cm)	Bon, Surestimation cotes basses 15cm	Surestimation cotes basses 15cm	Bon, Surestimation cotes basses 10cm
<i>Montreuil sur Maine aval</i>	Sous-estimation 10cm, forme décrue (QJ)	Surestimation (5 à 10cm)	Surestimation cotes basses en fin de crue (5 à 10cm)	bon	bon
MAYENNE AVAL OUDON					
<i>Grez Neuville amont</i>		Bon (*), qq pointes mal représentées	bon	Bon, pb de forme montée principale	bon
<i>Grez Neuville aval</i>		Bon (*), qq pointes mal représentées	bon	Bon, pb de forme montée principale	bon
<i>Roussière amont</i>	Bon	bon	bon	bon	bon
<i>Roussière aval</i>	Bon, sous-estimation cotes basses (10cm)	Bon, sous-estimation cotes basses (10cm)	Bon, sous-estimation cotes basses (10cm)	bon	Bon, sous-estimation cotes basses (10cm)
<i>Sautré amont</i>	Bon, sous-estimation (5 à 10 cm)			Bon, sous-estimation (5 à 10 cm)	Bon (*), sous-estimation cotes basses (5 à 10 cm)
<i>Sautré aval</i>	Bon, sous-estimation (5 à 10 cm)			Bon, sous-estimation (5 à 10 cm)	Bon (*), sous-estimation cotes basses (5 à 10 cm)
<i>Montreuil Belfroy amont</i>		Bon, surestimation cotes basses 10cm	Bon	Bon, surestimation cotes basses 5cm	Bon, surestimation cotes basses 5cm
<i>Montreuil Belfroy aval</i>		Bon, surestimation cotes basses 10cm	bon	Bon, surestimation cotes basses 5cm	Bon, surestimation cotes basses 5cm

	Décembre 1982	Janvier 1994	Janvier 1995	Décembre 1999	Janvier 2004
SARTHE					
<i>Pendu amont</i>	Forme relevés incohérente	Bon (*), pointe sousestimée 5cm	bon	Bon, surestimation 5 à 10cm	
<i>Pendu aval</i>	Sous estimation 10-20cm	Bon (*), cotes basses sousestimées 10-20cm	Bon, cotes basses sousestimées 10-15cm	bon	
<i>Villechien amont</i>	Sousestimation 10-20cm		Cotes basses sousestimées (10-15cm)		Bon, pointe surestimée
<i>Villechien aval</i>	Bon, pointe sous-estimée (QJ)		Bon, cotes basses fin de crue surestimées (15cm)		Bon, pointe surestimée
<i>Châteauneuf amont</i>	Bon (*)	Bon (*)	Bon (*), cotes basses fin de crue sousestimées 10cm	bon	(*), pointe surestimée (20cm)
<i>Châteauneuf aval</i>	Bon (*), forme incohérente début montée(?)	Bon (*), cotes basses sousestimées (20cm)	Bon (*), cotes basses fin de crue sousestimées (15-20cm)	Cotes surestimées	(*), pointe surestimée (20cm)
<i>Cheffes amont</i>	Relevés trop peu nombreux pour l'analyse				
<i>Cheffes aval</i>	Relevés trop peu nombreux pour l'analyse				

(*) : la totalité de la crue est mesurée pour l'écluse correspondante.

5.4. CALAGE SUR LES LAISSES DE CRUE DANS LES BASSES VALLEES ANGEVINES

La comparaison des cotes maximales observées et des valeurs maximales calculées par rivière est présentée dans les tableaux 4 à 7.

Les laisses de crue sont nombreuses pour la crue de janvier 1995, pour les autres crues, elles sont très partielles (voir 3.4).

Les informations sur les laisses de crue sont à considérer avec précaution, car il ne s'agit pas d'informations lues à une échelle. Ce sont souvent des informations relatives (par ex 70cm au-dessus du chemin, 20 cm au-dessus d'un mur), par conséquent moins précises.

Les tableaux de comparaison 8 à 12 incluent les observations parfois disponibles pour la pointe de crue aux échelles des écluses ainsi que les cotes maximales observées aux échelles de crue et aux stations hydrométriques.

Les cellules grisées dans les tableaux correspondent à des laisses de crue qui présentent des incohérences avec les observations voisines (aval ou amont).

Dans ces tableaux, les laisses de crue sont examinées de l'amont vers l'aval pour chaque rivière, elles sont repérées par le PK du centre du casier dans lequel elles se trouvent (remarque : plusieurs laisses de crue peuvent être situées dans un même casier mais à des positions différentes, elles seront repérées par un PK identique). Les PK sont croissants de l'aval vers l'amont, ils sont définis à partir d'une origine fixée à Montjean-sur-Loire (valeurs des PK fournies en kilomètres). Les laisses de crues sont positionnées sur la Figure 2.

▪ OUDON

Pour la crue de janvier 1995, les écarts constatés restent inférieurs à 10 cm, ils sont généralement de l'ordre de 1 à 6 cm. L'écart maximal (9cm) est obtenu sur une laisse de crue proche de la confluence avec la Mayenne.

Pour la crue de décembre 1982, on constate un écart important sur la valeur maximale relevée à l'écluse de la Chapelle amont. Cet écart est probablement du au fait que les données d'entrée du modèle sont pour cette crue constituées des débits journaliers, la pointe de crue n'est par conséquent pas représentée en débit instantané.

Pour les autres crues, aucune information de valeurs maximales n'est disponible sur l'Oudon.

▪ MAYENNE

Sur la Mayenne, les écarts sont très faibles dans la partie aval jusqu'à la confluence avec l'Oudon (1 à 6 cm). Les valeurs voisines de 10 cm constatées correspondent à des incohérences :

- Crue janvier 1995 : laisses de crue au PK 53.10 : 2 observations avec un écart de 17cm, la valeur calculée est située entre les deux valeurs mesurées
- Crue janvier 2004 :
 - la cote mesurée à l'écluse de Sautré aval est supérieure à la cote mesurée en amont de l'écluse (19.54 / 19.47)
 - à l'échelle de crue de Grez-Neuville, la cote relevée (19.89) est supérieure à la cote d'une laisse de crue située en amont immédiat de l'écluse (cote 19.80).

En amont de la confluence avec l'Oudon, les écarts sont en moyenne un peu plus élevés, dépassant parfois 10cm. Sur ce secteur, les débits de la Mayenne sont parfois un peu inférieurs aux débits observés à Chambellay (cf 5.1.2).

Cependant, on note également plusieurs incohérences dans les observations :

- Crue janvier 1995 : cote observée en amont de l'écluse de Chambellay supérieure de 7cm à la cote du limnigraphe situé en amont
- Crue janvier 2004 :

- cote observée à l'échelle de crue de Chambellay légèrement inférieure à la cote du limnigraphe situé en aval
- cote observée à l'aval de l'écluse de Montreuil/Maine inférieure de 24cm à la cote de l'échelle de crue située en aval

▪ SARTHE

De manière générale, les écarts obtenus sont faibles, de l'ordre de 1 à 6 cm sur la partie aval (jusqu'à Chateaufort-sur-Sarthe), allant parfois jusqu'à 10-13cm ponctuellement sur quelques laisses de crue situées plus en amont. Le calage s'est efforcé de conserver une cohérence d'ensemble. Ainsi, pour l'écluse de Villechien, les résultats obtenus (surestimation pour la crue de janvier 2004, sous-estimation pour la crue de décembre 1982) ne sont pas modifiables en l'absence d'information supplémentaire.

On note également, comme pour la Mayenne, des incohérences pour certaines observations :

- Crue de janvier 1995 :
 - incohérence entre les laisses de crue lit mineur et lit majeur à l'aval immédiat de l'écluse du Pendu (PK 77.07 : écart de 19cm, le modèle calcule une cote identique en lit mineur et lit majeur sur ce secteur)
- Laisse de crue Briollay (PK 43.89) : les relevés sont incohérents pour les 3 crues relevées (surestimation de l'ordre de 50cm).
- Ecluse de Villechien : cote aval supérieure à la cote amont pour la crue de décembre 1982
- Ecluse de Chateaufort/Sarthe : les relevés pour la crue de janvier 2004 ne sont pas cohérents avec les relevés à l'échelle de crue. De plus, le relevé de la laisse de crue située en aval (PK 50.98 cote mesurée :19.73) n'est pas cohérent avec les relevés de l'échelle de crue et de l'écluse amont.
- Ecluse du Pendu amont pour la crue de décembre 1982 : la forme des mesures amont est incohérente avec la forme des mesures en aval de l'écluse.

▪ LOIR

Pour la crue de janvier 1995, les écarts sont faibles, inférieurs à 10cm, compris en général entre -5cm et +6cm. Les écarts supérieurs à 10cm correspondent à des incohérences dans les observations :

- laisse de crue en lit majeur rive gauche au PK 61.06 : cote identique à la cote de la laisse de crue amont, située 3,5 km en amont,
- laisse de crue en lit majeur rive droite au PK 75.75 : cote supérieure à la cote de la laisse de crue du lit mineur (+48cm),
- laisse de crue en lit mineur au PK 81.52 : cote inférieure à la cote du limnigraphe situé en aval -21cm),
- 1 laisse de crue incohérente en lit majeur rive gauche au PK 81.65,
- laisse de crue en lit mineur au PK 82.82 : cote inférieure à la cote de la laisse de crue aval -36cm).

Pour la crue de janvier 2004, les écarts sont également faibles. La laisse de crue à Briollay/Loir (PK 47.13) est incohérente (cote irréaliste).

Pour les crues de décembre 1982 et décembre 1999, on ne dispose que des informations à la station limnigraphique de Durtal, les résultats obtenus sont tout à fait cohérents. Pour la crue de décembre 1982, les débits en entrée du modèle sont des débits journaliers, on obtient une sous-estimation de la pointe de 12cm.

▪ **MAINE**

Les mesures disponibles concernent uniquement Angers (voir également l'analyse des limnigrammes en 5.2.5).

Les écarts sur le maximum sont faibles : 4 à 8cm, ils restent inférieurs à 10cm.

Pour la crue de janvier 1994, l'écart sur le maximum est de -4cm.

Le remous au pont de Verdun est correctement reproduit pour les crues pour lesquelles on dispose de mesures : janvier 1995 (remous observé 38cm, remous calculé 31cm), décembre 1999 (remous observé 18cm, remous calculé 15cm) et janvier 2004 (remous observé 9cm, remous calculé 5cm).

Pour la crue de janvier 2004, les valeurs maximales calculées sont cohérentes avec les mesures aux ponts de Haute et Basse Chaine (écarts respectifs de -4cm et -6cm).

Tableau 8 : Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur l'Oudon (valeurs des cotes fournies en m NGF)

Position (PK en km)	Crue janvier 1995			Crue décembre 1982		
	Cote maximale observée	Cote maximale calculée	Ecart (calculé-observé)	Cote maximale observée	Cote maximale calculée	Ecart (calculé-observé)
lit mineur (PK 73.02)	23.6	23.65	0.05			
écluse Maingué amont (PK 73.02)	23.62	23.65	0.03	22.88	22.88	0.00
écluse Maingué aval (PK 72.82)	23.37	23.39	0.02			
lit mineur (PK 72.82)	23.44	23.39	-0.05			
lit mineur (PK 71.43)	22.82	22.88	0.06			
lit mineur (PK 70.50)	22.65	22.70	0.05			
lit mineur (PK 70.50)	22.63	22.70	0.07			
écluse Chapelle amont (PK 70.50)				22.96	21.83	-1.13
écluse Chapelle aval (PK 69.62)				21.91	21.74	-0.17
lit mineur (PK 69.62)	22.57	22.64	0.07			
lit mineur (PK 68.65)	22.46	22.50	0.04			
lit mineur (PK 68.65)3640	22.42	22.50	0.08			
lit mineur (PK 67.68)3740	22.38	22.42	0.04			
lit mineur (PK 66.51)	22.28	22.30	0.02			
lit mineur (PK 65.34)	22.24	22.23	-0.01			
lit mineur (PK 65.34)	22.22	22.23	0.01			
limni Andigné (PK 65.34)						
écluse Himbaudière amont (PK 63.57)						
écluse Himbaudière aval (PK 62.49)						
lit mineur (PK 57.85)	21.97	21.97	0.00			
lit majeur rive droite (PK 57.85)	21.96	21.97	0.01			
échelle crue Lion d'Angers (PK 57.85)						
lit mineur (PK 57.00)	21.86	21.95	0.09			

Tableau 9 : Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Mayenne (valeurs des cotes fournies en m NGF)

	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart
Position et PK en km	obs.	calc.		obs.	calc.		obs.	calc.		obs.	calc.	
Ecl. Jaille Yvon aval PK 67.72												
Ecl. Chenillé amont PK 65.69												
Ecl. Chenillé aval PK 64.98										21.84	22.01	0.17
Ech.cruie Chambellay PK 63.47				21.25	21.27	0.02						
Limni Chambellay PK 62.76	22.5	22.44	-0.06	21.27	21.18	-0.09	21.70	21.80	0.10	21.52	21.68	0.16
Ecl.Chambellay amont PK 62.76	22.57	22.44	-0.13	21.28	21.18	-0.10				21.52	21.68	0.16
Ecl.Chambellay aval PK 61.78				20.98	20.97	-0.01						
Lit mineur PK 60.50	22.27	22.27	0.00									
Lit mineur PK 59.51	22.09	22.20	0.11	20.42	20.68	0.26	21.37	21.47	0.10			
Ecl.Montreuil/Maine am PK 59.51				20.76	20.68	-0.08						
Ecl.Montreuil/Maine av PK 58.36				20.48	20.58	0.10						
Lit mineur PK 58.36	22.23	22.17	-0.06									
Ech.cruie Montreuil/Maine PK 58.36				20.72	20.58	-0.14						
Ecl. Grez Neuville am PK 53.89												
Lit mineur PK 53.10	21.8	21.72	-0.08									
Lit mineur PK 53.10	21.63	21.72	0.09	19.8	19.75	-0.05						
Ecl.Grez Neuville aval PK 53.10												
Ech.cruie Grez-Neuville PK 53.10				19.89	19.75	-0.14						
Ech.cruie Roussière PK 50.00				19.51	19.46	-0.05						
Ecl. Roussière am PK 48.98												
Ecl.Roussière aval PK 47.92				19.51	19.45	-0.06						
Ech. cruie Sautré PK 46.83				19.47	19.44	-0.03						
Ecl. Sautré amont PK 46.83				19.47	19.44	-0.03						
Ecl. Sautré aval PK 45.81				19.54	19.44	-0.10						
Lit majeur rive droite PK 43.11	21.18	21.19	0.01									
Ech.cruie Montreuil Belfroy PK 42.07												
Lit majeur rive gauche PK 42.07	21.12	21.15	0.03									
Ecl.MontreuilBelfroy am PK 40.82												
Lit majeur rive gauche PK 39.23	21.07	21.10	0.03									
Ecl.Montreuil Belfroy av PK 39.23												

	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale		
Position et PK en km	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart
Ech. crue Cantenay Epinard PK 37.90												
Lit mineur PK 36.61	21.04	21.06	0.02	19.61	19.41	-0.20						
Lit majeur rive droite PK 34.88	21	21.06	0.06									

Ecart = cote calculée – cote observée

Tableau 10 : Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Sarthe (valeurs des cotes fournies en m NGF)

	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale		
Position et PK en km	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart
Ecl. Pendu amont PK 77.35										21.82	22.09	0.27
Ecl. Pendu aval PK 77.07										21.7	21.62	-0.08
Lit mineur PK 77.07	22.76	22.71	-0.05									
Lit majeur rive gauche PK 77.07	22.55	22.71	0.16									
Lit majeur rive gauche PK 75.66	22.31	22.54	0.23									
Ech. crue Morannes PK 73.54												
Lit mineur PK 72.50				21.11	21.08	-0.03						
Lit majeur rive gauche PK 71.29	21.82	21.86	0.04									
Ecl.Villechien am PK 71.29				20.77	20.94	0.17				21.11	21.01	-0.10
Ecl.Villechien aval PK 70.81				20.36	20.64	0.28				21.38	20.89	-0.49
Lit mineur PK 69.90	21.7	21.70	0.00									
Lit mineur PK 68	21.49	21.59	0.10									
Lit majeur rive droite PK 68	21.5	21.61	0.11									
Ech. crue Brissarthe PK 68												
Lit majeur rive droite PK 63.79	21.29	21.42	0.13									
Lit majeur rive droite PK 62.10	21.28	21.35	0.07									
Lit majeur rive gauche PK 62.10	21.26	21.34	0.08									
Ecl.Chateauneuf am PK 62.10												
Ecl.Chateauneuf av PK 61.14				19.68	19.87	0.19				20.44	20.52	0.08
Lit mineur PK 61.14				19.91	19.87	-0.04						
Ech. crue Chateauneuf PK 61.14	21.3	21.33	0.03	19.66	19.87	0.21						

	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale		
Position et PK en km	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart
Lit mineur PK 59.71	21.24	21.29	0.05									
Lit majeur rive droite PK 54.04	21.17	21.19	0.02									
Lit majeur rive droite PK 51.59	21.16	21.17	0.01									
Lit majeur rive gauche PK 51.59	21.15	21.16	0.01									
Lit mineur PK 50.98				19.73	19.49	-0.24						
Ecl.Cheffes am PK 50.98												
écluse Cheffes av PK 50.74												
Ech.crue Cheffes PK 50.74	21.09	21.15	0.06	19.49	19.47	-0.02				20.3	20.30	0.00
Lit majeur rive droite PK 49.96	21.14	21.15	0.00									
Lit mineur PK 48.18	21.23	21.14	-0.09									
Lit majeur rive gauche PK 45.92	21.15	21.12	-0.03									
Lit mineur PK 43.89	21.58	21.11	-0.47	20.07	19.44	-0.63	20.58	20.12	-0.46			
Ech.crue Briollay/Sarthe PK 43.89				19.45	19.44	-0.01						
Lit majeur rive droite PK 43.27	21.08	21.11	0.03									
Lit majeur rive gauche PK 43.27	21.18	21.11	-0.07									
Lit majeur rive droite PK 40.28	21.04	21.10	0.06									
Ech. crue Ecoouflant PK 38.42				19.43	19.42	-0.01						
Lit majeur rive gauche PK 36.83	21.04	21.06	0.02									

Ecart = cote calculée – cote observée

Tableau 11 : Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur le Loir (valeurs des cotes fournies en m NGF)

Position et PK en km	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart	Cote maximale		écart
obs.	calc.	obs.		calc.	obs.		calc.	obs.		calc.	obs.	
Lit mineur PK 82.82	24.22	24.72	0.50									
Lit mineur PK 82.40	24.58	24.64	0.06									
Lit majeur rive gauche PK 82.40	24.6	24.64	0.04									
Lit majeur rive gauche PK 81.65	24.5	24.52	0.02	24.09	23.97	-0.12						
Lit majeur rive gauche PK 81.65	24.87	24.52	-0.35	24.04	23.97	-0.07						
Lit majeur rive gauche PK 81.65				24.06	23.97	-0.09						
Lit mineur PK 81.52	23.97	24.43	0.46									
Ech. crue Durtal PK 81.52				24	23.97	-0.03						
limni Durtal PK 81.33	24.08	24.05	-0.03	23.59	23.56	-0.03	23.54	23.48	-0.06	22.83	22.71	-0.12
Lit majeur rive droite PK 77.49	23.08	23.03	-0.05	22.46	22.46	0.00						
Lit mineur PK 75.75	22.53	22.62	0.09									
Lit majeur rive droite PK 75.75	22.99	22.62	-0.37									
Lit mineur PK 70.80	22.09	22.04	-0.05									
Lit majeur rive droite PK 68.11	21.73	21.75	0.02	20.96	20.88	-0.08						
Lit mineur PK 66.91	21.68	21.66	-0.02									
Lit mineur PK 65.14	21.6	21.57	-0.03									
Lit majeur rive gauche PK 61.06	21.6	21.44	-0.16									
Ech. crue Seiches PK 59.82												
Lit mineur PK 58.78	21.41	21.39	-0.02									
Ech. crue Corzé PK 57.11												
Lit majeur rive gauche PK 57.11	21.36	21.36	0.00	19.87	19.84	-0.03						
Lit mineur PK 54.68	21.35	21.35	0.00									
Lit majeur rive droite PK 52.85	21.31	21.27	-0.04									
Ech. crue Villevêque PK 52.85												
Lit mineur PK 49.33	21.15	21.24	0.09									
Lit mineur PK 47.13	21.13	21.13	0.00									
Lit majeur rive gauche PK 47.13	21.17	21.13	-0.04									
Ech. crue Briollay/Loir PK 47.13				19.54	19.50	-0.04						
Lit mineur PK 67.13				22.35	19.50	-2.85						

Ecart = cote calculée – cote observée

Tableau 12 : Comparaison des valeurs maximales calculées et observées sur la Maine (valeurs des cotes fournies en m NGF)

	crue janvier 1995			crue janvier 2004			crue décembre 1999			crue décembre 1982		
	Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale			Cote maximale		
Position et PK en km	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart	obs.	calc.	écart
échelle pont haute chaîne PK 30.90				19.38	19.32	-0.06						
échelle pont de Verdun PK 30.30	20.31	20.38	0.07	19.29	19.25	-0.04	19.78	19.70	-0.08	20.03	20.07	0.04
échelle pont basse chaîne PK 29.68				19.27	19.23	-0.04						

Ecart = cote calculée – cote observée

5.5. COMPARAISON DES ZONES INONDEES POUR LA CRUE DE JANVIER 1995

La comparaison des contours de la zone inondée pour la crue de janvier 1995 dans les Basses Vallées Angevines montre des limites tout à fait cohérentes avec les limites des atlas des zones inondables. La cartographie comparée des zones inondables calculées et observées fait partie de l'atlas des zones inondables réalisé dans le cadre de l'étude.

6. PROPOSITIONS DE CRUES A SIMULER

L'étape suivante de l'étude est l'étape d'analyse et de compréhension des phénomènes hydrauliques se produisant dans les Basses Vallées Angevines en crue.

Ces analyses s'appuieront sur les résultats des modélisations des 5 crues de calage/validation, et sur la simulation de 10 événements de crue complémentaires.

Il peut s'agir d'événements de crues historiques ou de crues de projet, l'objectif étant d'étudier l'hydraulique de la zone d'étude dans la gamme des débits suivante :

- Limite inférieure : Hauteur d'eau supérieure à 4m au pont de Verdun.
- Limites supérieures :
 - Débit en entrée de 6400 m³/s sur la Loire à Saumur,
 - Débits cumulés de 2000 à 2500 m³/s sur les affluents de la Maine.

Pour mémoire, le Tableau 13 présente de manière synthétique et qualitative les 5 crues de calage/validation.

Tableau 13 : Caractéristiques des crues de calage et de validation

crue	Cote au pont de Verdun (m)	Somme débits affluents Maine (*) (m ³ /s)	Débit maximum calculé Maine à Angers (m ³ /s)	Commentaire
Décembre 1982	6,37	960	965	Forte crue de Loire, forte crue de la Mayenne, faible crue des autres affluents, forte crue à Angers
Janvier 1994	6,02	750	809	Forte crue de Loire, faible crue des affluents, crue forte à Angers
Janvier 1995	6,65	1870	1743	Faible crue de Loire, très forte crue des affluents, très forte crue à Angers
Décembre 1999	6,12	1290	1177	Faible crue de la Loire, forte crue des affluents sauf la Mayenne, forte crue à Angers
Janvier 2004	5,61	800	840	Crue moyenne de Loire, Forte crue du Loir et moyenne sur autres affluents, crue moyenne à Angers

(*) somme des débits journaliers des affluents amont de la Maine (Beffes décalé de 1 jour)

Dans cet échantillon, la crue maximale de Loire simulée est la crue de 1982, elle a atteint 5420 m³/s à Saumur. La crue maximale de Maine simulée est la crue de 1995, le débit cumulé sur les affluents de la Maine a atteint 1870 m³/s.

Les 4 crues historiques suivantes se distinguent et peuvent être intéressantes à simuler :

1. Crue de janvier 1982 : forte en Loire, elle a été faible sur les affluents (860 m³/s) et forte à Angers (6,02m). Elle est notable car :

- elle a dépassé 6m au pont de Verdun,
- elle est caractérisée par une durée exceptionnelle: la Maine est restée un mois au-dessus de 4m au pont de Verdun (2 pointes notables) alors que la durée classique est 15 à 20 jours,

Cependant elle présente l'inconvénient d'être ancienne, donc tous les hydrogrammes instantanés ne sont pas disponibles.

2. Crue de mai 1985 : moyenne sur la Loire, cette crue est singulière car insignifiante sur la Maine (200 m³/s), elle atteint pourtant 5,14 m au pont de Verdun à Angers.

3. Crue de janvier 2001 : forte sur les affluents, elle a été faible sur la Loire et faible à Angers (4,90m). Ses intérêts principaux sont les suivants :

- Récente, elle a marqué les esprits.
- Elle a été forte sur les affluents (1400 m³/s) seconde valeur de notre échantillon, mais relativement courte et « pointue » (prédominance Mayenne/Oudon).
- Faible à Angers, elle permettrait d'analyser le fonctionnement des crues faibles et/ou courtes.

4. Crue de mars 2001 : moyenne sur les affluents, elle est insignifiante sur la Loire et moyenne à Angers (5,50m). Le débit cumulé des affluents de la Maine a atteint 1330 m³/s, troisième valeur de notre échantillon : cela révèle une bonne concomitance des crues des affluents, et une crue relativement longue,

Pour ces différentes crues, les conditions limites amont pourront être les hydrogrammes instantanés observés, excepté pour la crue de 1982 pour laquelle, comme pour la crue de décembre 1982, seuls des hydrogrammes journaliers aux stations hydrométriques sont disponibles. Dans tous les cas, les apports intermédiaires seront des débits journaliers.

Au delà de la simulation d'événements historiques, dont on est sûr qu'ils sont réalistes puisque effectivement observés, il est possible de construire des scénarios hydrologiques théoriques. Cela permet d'élaborer des événements particuliers afin de :

- Simuler des événements supérieurs aux crues mesurées,
- distinguer et d'analyser l'influence de certains paramètres.

Les scénarios hydrologiques à étudier seront construits à partir d'événements réels particuliers, dont on va distordre ou amplifier certains paramètres. Cette approche permet de générer des scénarios relativement réalistes et de faire des comparaisons pertinentes avec les crues réelles (par exemple, si l'on décale simplement la crue d'un affluent, ou si l'on augmente la crue de l'un des affluents). Elle permet également de générer des scénarios moins réalistes mais utiles à l'analyse (par exemple crue d'un affluent de la Maine seul).

Il est intéressant de simuler différents type de crues exceptionnelles :

- Une crue exceptionnelle de Loire sans forte crue de Maine :
 5. Scénario de crue centennale à Saumur (6400 m³/s) élaboré à partir de la crue de janvier 1994. Il faut augmenter le débit de pointe d'un tiers, par homothétie (attention toutefois à la forme de l'hydrogramme résultant). Crue inchangée sur les affluents de la Maine (c'est-à-dire faible : 750 m³/s cumulés), tant en quantité qu'en déphasage.
 6. En variante, il est possible d'étudier une crue centennale à Saumur associée à un débit constant des affluents de la Maine, par exemple leur débit moyen du mois de janvier.
- Une crue exceptionnelle de Maine sans forte crue de Loire ; ce fut déjà le cas de la crue de janvier 1995, on peut envisager une crue encore plus forte des affluents de la Maine :
 7. Scénario de crue centennale de tous les affluents de la Maine, basée sur la crue de janvier 1995, en augmentant le Loir de 10%, la Mayenne de 50% et l'Oudon de 20%. L'hydrogramme de la Loire à Saumur en janvier 1995 serait conservé à l'identique dans ce scénario.
 8. Scénario identique au scénario 7, mais sans crue de Loire (débit moyen mensuel de janvier par exemple).
 9. Scénario dans lequel on conserve la crue de 1995 sur les affluents de la Maine, mais sans crue de Loire (débit moyen mensuel de janvier par exemple)
- Une crue exceptionnelle (centennale) à Montjean-sur-Loire, résultante d'une forte crue de Maine et d'une forte crue de Loire (les scénarios 5 et 7 devraient aboutir à des crues quasi centennales à Montjean-sur-Loire, mais obtenues par des crues uniques de Loire ou de Maine) :
 10. Scénario dans lequel on conserve la crue de 1995 sur les affluents de la Maine, mais on amplifie la crue de Loire à Saumur (de 3500 m³/s en pointe à 4500/5000 m³/s) afin d'aboutir à un débit centennal à Montjean-sur-Loire.
- Une crue exceptionnelle sur les bassins de la Sarthe et du Loir, dont les réponses sont souvent proches, avec une crue insignifiante de la Loire :
 11. Scénario basé sur un événement historique de ce type, la crue de février 1979, en amplifiant les hydrogrammes de la Sarthe et du Loir afin de les rendre centennaux et en conservant les autres entrées identiques.
 12. En variante, un événement centennal sur la Sarthe et le Loir (crue de 1995 amplifiée) et un débit constant (débit moyen de janvier par exemple) sur les autres entrées.
- Une crue exceptionnelle sur les bassins de la Mayenne et de l'Oudon, dont les réponses sont souvent proches (mais il n'est pas sûr qu'un tel événement dépasse les 4m à Angers), avec une crue insignifiante de la Loire :
 13. Scénario basé sur un événement historique de ce type, la crue de février 1996, en amplifiant les hydrogrammes de la Mayenne et de l'Oudon afin de les rendre centennaux, et en conservant les autres entrées identiques.
 14. En variante, un événement centennal sur la Mayenne et d'Oudon (crue de 1996 amplifiée) et un débit constant (débit moyen de janvier par exemple) sur les autres entrées.

Les simulations précédentes permettraient d'affiner la participation des différentes rivières dans les crues sur le secteur d'étude ; il serait également intéressant de préciser l'influence des déphasages des rivières sur l'ampleur de la crue.

On peut pour cela proposer des scénarios basés sur une crue réelle simple (par exemple décembre 1999 ou janvier 2004), dans laquelle on déphaserait un des affluents :

15. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on retarderait la Sarthe de 24h.
16. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on avancerait la Sarthe de 24h.
17. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on retarderait le Loir de 24h.
18. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on avancerait le Loir de 24h.
19. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on retarderait la Mayenne de 24h.
20. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on avancerait la Mayenne de 24h.
21. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on retarderait l'Oudon de 24h.
22. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on avancerait l'Oudon de 24h.
23. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on retarderait la Loire de 24h.
24. Scénario basé sur la crue choisie, dans lequel on avancerait la Loire de 24h.

Choix des dix événements de crue à simuler

Dans la suite de l'étude, les 10 événements suivants ont été retenus. Ils doivent permettre de répondre à un maximum d'interrogations sur le fonctionnement des Basses Vallées Angevines en crue (Tableau 14).

Tableau 14 : Choix d'événements à simuler

N°scénario	Caractéristiques
1	Crue centennale à Saumur à partir de Janvier 1994
2	Crue de janvier 1995 combinée à une crue supérieure de Loire
3	Crue centennale Sarthe + Loir (crue de référence = janvier 1995)
4	Crue centennale Oudon + Mayenne (crue de référence = janvier 1995)
5	Crue de janvier 2004 combinée à une crue plus importante de l'Oudon (20 ans)
6	Crue de janvier 2004 combinée à une crue plus importante de l'Oudon et crue de l'Oudon retardée de 24h
7	Crue de janvier 2004 avec crue de la Sarthe retardée de 24h
8	Crue de janvier 2001
9	Crue de janvier 2004 avec crues de l'Oudon et de la Mayenne retardées de 24h
10	Crue de janvier 2004 avec crue du Loir retardée de 24h

**C. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES BASSES
VALLEES ANGEVINES**

TABLE DES MATIERES

C.	FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES BASSES VALLEES ANGEVINES	
1.	OBJECTIFS DE L'ANALYSE HYDRAULIQUE	1
2.	DEFINITION DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE	2
3.	COMPARAISON DES COTES MAXIMALES AVEC LES CRUES DE REFERENCE	4
3.1.	La Maine	4
3.2.	Le Loir	6
3.3.	La Sarthe	7
3.4.	La Mayenne	8
3.5.	L'Oudon	10
4.	ANALYSE DES PROFILS EN LONG ET DES PERTES DE CHARGE DES OUVRAGES DANS LES BVA	12
4.1.	Comparaison des profils en long dans les BVA	12
4.2.	Analyse de l'incidence des ouvrages	13
5.	ANALYSE DU STOCKAGE/DESTOCKAGE ET DE LA PROPAGATION DES HYDROGRAMMES DANS LES BVA	14
5.1.	Analyse de la propagation	14
5.1.1.	Mayenne et Oudon	15
5.1.2.	Sarthe et Loir	16
5.1.3.	Maine	17
5.2.	Volumes de stockage dans les BVA	18
6.	ANALYSE DES INCIDENCES RESPECTIVES DE LA LOIRE ET DE LA MAINE SUR LES BVA	20
6.1.	Profils en long des cotes maximales dans la Loire	20
6.2.	Incidence de la Maine sur la Loire	20
6.3.	Décalages temporels entre les pointes de crue de la Maine et de la Loire	21
7.	ANALYSE DES ECOULEMENTS DANS DURTAL	24
7.1.	Crue de janvier 1994	24
7.2.	crue de decembre 1982	24
7.3.	Crue de janvier 2004	24

7.4. Crue de janvier 1995	25
7.5. Crue centennale du loir : scenario 3	25
7.6. Conclusion	25
8. CONCLUSIONS	27

Liste des tableaux

Tableau 1 Définition des scénarios de crues à simuler	2
Tableau 2 Débits de pointe aux entrées et en sortie du modèle pour tous les scénarios	3
Tableau 3 Impact sur les cotes amont et aval de la Maine pour les scénarios 5,6,7,9 et 10 par rapport à la crue de janvier 2004	6
Tableau 4 Cotes maximales (m NGF) et décalages en heures entre les pointes de crue sur la Loire, la Sarthe, le Loir et la Mayenne et la pointe de crue à Angers.....	21
Tableau 5 Décalages en heures entre l'occurrence du débit maximum en Maine et en Loire, par rapport à l'occurrence du niveau maximum à Angers	22

Liste des figures

Figure 1 Volumes de stockage disponibles dans les BVA par secteurs en fonction de la cote NGF.....	19
--	----

1. OBJECTIFS DE L'ANALYSE HYDRAULIQUE

L'analyse hydraulique a pour objectifs la compréhension des phénomènes de crue sur la zone d'étude. Cette analyse s'appuie sur la simulation de 15 événements de crue, réels ou synthétiques. L'objectif est en particulier de répondre aux questions suivantes :

- Y a-t-il un réel phénomène de verrou au rétrécissement (« le goulot d'Angers ») ? Quel est le remous au Pont de Verdun ? en cas de crue de Maine ? en cas de crue de Loire ?
- Quel est l'importance du stockage dans les BVA ?
- Quelles peuvent être les différences de pente de la ligne d'eau entre l'Oudon, la Mayenne, la Sarthe et le Loir ?
- Existe-t-il des obstacles majeurs à l'écoulement ?
- Quel est le rôle des gradients de débits amont sur les hauteurs d'eau ?
- La Loire peut-elle couler dans la Maine ? Quels sont les débits et les vitesses dans la Maine pour différentes conditions de concomitance crue Maine / crue Loire
- Quelle est l'importance du remous de la Loire ?

Rappel : la zone modélisée est délimitée par :

A l'amont :

- La station hydrométrique de Maingué sur l'Oudon
- L'écluse de la Jaille-Yvon sur la Mayenne (située entre les stations hydrométriques de Château-Gontier et Chambellay)
- La station hydrométrique de Beffes sur la Sarthe
- Le pont SNCF de Durtal sur le Loir
- Le Pont Cessart à Saumur sur la Loire

A l'aval :

- La station hydrométrique de Montjean-sur-Loire sur la Loire

Pour la Loire, la zone modélisée est comprise entre les levées et ne comprend pas les vals.

2. DEFINITION DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE

Dans un premier temps, 10 scénarios différents des crues de calage et de validation ont été définis puis simulés à l'aide du modèle. Avec les 5 crues de calage et de validation du modèle, déjà simulées, on dispose au total de 15 scénarios.

Les 10 scénarios ont été définis en concertation avec le Maître d'Ouvrage. Ils correspondent à des situations contrastées ou à des situations variantes par rapport aux situations réellement observées, de manière à pouvoir comprendre les influences respectives de la Loire et de la Maine, ainsi que des 4 affluents, Mayenne, Oudon, Sarthe et Loir. Chaque scénario est bâti sur une crue dite de référence, à partir de laquelle les hydrogrammes aux points d'entrée du modèle ont été élaborés. Les hydrogrammes des crues de période de retour 20 ans et 100 ans ont été élaborés à partir des hydrogrammes des crues de référence du scénario, en appliquant aux débits un coefficient multiplicatif permettant d'obtenir les caractéristiques voulues, tant en débit de pointe qu'en débit moyen.

Le Tableau 1 récapitule les 10 scénarios retenus pour l'analyse du comportement hydraulique.

Tableau 1 Définition des scénarios de crues à simuler

N°	Scénario	Crue référence	Loir	Sarthe	Mayenne	Oudon	Loire Saumur	Loire Montjean
1	Crue centennale Saumur	Janvier 1994	=	=	=	=	Q100	
2	Crue janvier 1995 avec Q100 Montjean	Janvier 1995	=	=	=	=		Q100
3	Crue centennale Sarthe&Loir	Janvier 1995	Q100	Q100	Qm janvier	Qm janvier	Qm janvier	
4	Crue centennale Oudon&Mayenne	Février 1996	Qm janvier	Qm janvier	Q100	Q100	Qm janvier	
5	Janvier 2004 avec crue forte Oudon	Janvier 2004	=	=	=	Q20	=	
6	Oudon retardé de 24h	Scénario 5	=	=	=	Retardé 24h	=	
7	Sarthe retardée de 24h	Janvier 2004	=	Retardé 24h	=	=	=	
8	Janvier 2001	Janvier 2001	=	=	=	=	=	
9	Oudon et Mayenne retardés de 24h	Sce5	=	=	Retardé 24h	Retardé 24h	=	
10	Loir retardé de 24h	Janvier 2004	Retardé 24h	=	=	=	=	

Qm janvier = débit moyen du mois de janvier

Les débits des apports intermédiaires sur chaque rivière sont pris égaux aux valeurs prises en compte pour la crue de référence, ou sont pris égaux aux valeurs mensuelles du mois de janvier, dans le cas où l'hydrogramme amont correspondant est le débit moyen du mois de janvier.

Les hydrogrammes en entrée des différentes rivières sont représentés pour les différents scénarios en annexe C1. Pour le scénario 2, plusieurs simulations ont été nécessaires sur la base de la crue de janvier 1995 pour définir le débit à Saumur permettant d'obtenir le débit centennal à Montjean-sur-Loire.

Le Tableau 2 fournit les débits de pointe aux entrées et en sortie du modèle pour tous les scénarios, y compris les crues de calage et de validation. Les débits de pointe calculés à Angers sont également fournis à titre de comparaison.

Tableau 2 Débits de pointe aux entrées et en sortie du modèle pour tous les scénarios

Scénario	Loir	Sarthe	Mayenne	Oudon	Loire Saumur	Loire Montjean calculé	Angers calculé
1	159	351	299	97	6400	6978	858
2	456	684	685	235	4475	6517	1729
3	550	868	80	19	1170	2644	1432
4	62	99	1060	340	1170	2225	1022
5	375	448	469	210	4080	4901	887
6	375	448	469	210	4080	4919	894
7	375	448	469	117	4080	4907	827
8	285	504	665	251	1750	3018	1112
9	375	448	469	210	4080	4952	925
10	375	448	469	117	4080	4861	790
Déc. 1982	224	386	534	153	5350	6338	965
Janv. 1994	159	351	299	97	4750	5620	809
Janv. 1995	456	684	685	235	3510	5545	1743
Déc. 1999	360	561	543	232	3869	5151	1177
Janv. 2004	375	448	469	117	4080	4867	840

Les débits sont fournis en m³/s.

3. COMPARAISON DES COTES MAXIMALES AVEC LES CRUES DE REFERENCE

Ce chapitre présente une comparaison des scénarios entre eux et par rapport aux crues de référence qui ont servi de base pour les constituer. Cette comparaison est présentée par rivière, pour la Maine, le Loir, la Sarthe, la Mayenne et l'Oudon. La comparaison porte sur les cotes maximales. L'analyse des profils en long des cotes maximales dans la Loire est présentée en 6.1.

Les graphes des profils en long des cotes maximales fournis en annexe C2 permettent de comparer les cotes maximales obtenues pour tous les scénarios et chaque rivière.

Les graphes des hydrogrammes calculés en différents points caractéristiques pour chaque scénario sont fournis en annexe C4. L'analyse de la propagation et du stockage est décrite au chapitre 5.

3.1. LA MAINE

C'est le scénario 2 qui fournit les cotes maximales dans la Maine, en amont du pont SNCF de Bouchemaine. La crue de janvier 1995 se classe en deuxième position en amont du pont de Verdun, suivie du scénario 1. En aval du pont de Verdun, c'est le scénario 1 qui est en deuxième position. En aval du pont SNCF de Bouchemaine, c'est le scénario 1 qui fournit les cotes maximales.

▪ SCENARIO 1 ET CRUE DE JANVIER 1994

Rappel : pour le scénario 1, le débit de pointe à Saumur est centennal, il est augmenté de 1650 m³/s par rapport à la crue de janvier 1994.

La ligne d'eau de la Maine obtenue pour le scénario 1 est quasiment parallèle à la ligne d'eau de la crue de janvier 1994, mais supérieure de 70cm environ (+73cm à la confluence avec la Loire, +67cm à l'amont de la Maine).

Le débit de pointe de la Maine est supérieur d'environ 50 m³/s pour le scénario 1. Cet accroissement est dû à l'accentuation du débit de pointe au moment du déstockage, le stockage ayant été plus important dans les BVA pendant la phase de montée de crue du fait de l'incidence plus forte de la Loire.

▪ SCENARIO 2 ET CRUE DE JANVIER 1995

Rappel : le scénario 2 correspond à la crue de janvier 1995 avec un débit de pointe à Saumur augmenté de 970 m³/s, de manière à obtenir à Montjean-sur-Loire un débit de pointe centennal.

La surcote obtenue pour le scénario 2 est de l'ordre de 50 cm à la confluence, et de 33 cm en amont d'Angers. Dans Angers, la surcote est de 35 à 40cm.

On retrouve des pertes de charge équivalentes pour les 2 scénarios au droit des ouvrages de franchissement de la Maine, avec une diminution de la pente générale de la ligne d'eau de la Maine pour le scénario 2. La dénivelée entre l'amont et l'aval de la Maine passe de 1.50m pour la crue de janvier 1995 à 1.33m pour le scénario 2.

▪ **SCENARIOS 5,6,7,9 ET 10 ET CRUE DE JANVIER 2004**

Rappel : les scénarios 5,6,7,9 et 10 sont construits à partir de la crue de janvier 2004 avec les caractéristiques suivantes :

- Scénario 5 : débit Oudon augmenté de 93m³/s (pour atteindre le débit de période de retour 20 ans).
- Scénario 6 : débit Oudon augmenté de 93m³/s et retardé de 24h.
- Scénario 7 : Sarthe retardée de 24h.
- Scénario 9 : débit Oudon augmenté de 93m³/s et Mayenne et Oudon retardés de 24h.
- Scénario 10 : Loir retardé de 24h.

Les impacts sur les cotes amont et aval de la Maine sont récapitulés dans le Tableau 3.

Le scénario 9 produit l'impact maximal : +14cm en amont d'Angers, +12cm en amont du pont de Verdun. Le fait de retarder la Mayenne réduit le décalage entre la pointe de la Mayenne et celles de la Sarthe et du Loir, en favorisant la concomitance (pour la crue de janvier 2004, la pointe de la Mayenne arrive à La Jaille Yvon environ 12 heures avant la pointe de la Sarthe à Beffes). Le débit total maximum Mayenne-Sarthe-Loir est plus important, entraînant un stockage plus important dans les BVA, d'où une surcote à Angers au moment du maximum à Angers qui se produit après l'arrivée de la pointe de débit dans les BVA. L'instant du maximum à Angers est légèrement avancé (2h).

Le débit de pointe de la Maine passe de 840 m³/s pour la crue de janvier 2004 à 925 m³/s pour le scénario 9.

Le scénario 5 entraîne une surcote de 5cm à Angers. Cette surcote est due à l'augmentation du débit entrant dans les BVA.

Cette surcote est augmentée de 3cm environ avec le scénario 6. Le fait de retarder l'Oudon entraîne un allongement de la crue de la Mayenne, d'où une plus grande concomitance avec les pointes de la Sarthe et du Loir, comme pour le scénario 9, mais avec une incidence plus faible.

Le scénario 7 entraîne une surcote de l'ordre de 6 cm à Angers. Cette surcote est due à une plus grande concomitance de la pointe de la Maine (résultant des crues amont et principalement des pointes de la Sarthe et du Loir) avec la pointe de la Loire. Le décalage de la Sarthe n'entraîne pas de modification du débit de pointe Sarthe+Loir, notamment au droit de Briollay, du fait de la forme des crues et de la durée importante de la deuxième pointe de crue de la Sarthe, qui reste concomitante avec la pointe de crue du Loir. L'instant du maximum à Angers est retardé d'environ 6 heures.

Pour le scénario 10, le retard du Loir entraîne une différence négligeable dans Angers (-1cm). La concomitance entre la Sarthe et le Loir est effectivement diminuée, d'où un débit de pointe de la Maine réduit, cependant cela n'entraîne pas d'amélioration notable du fait du retard de la pointe de la Maine qui devient alors plus concomitante avec la pointe de la Loire. Deux phénomènes ayant des conséquences inverses interviennent. L'instant du maximum à Angers est retardé d'environ 4 heures.

Tableau 3 Impact sur les cotes amont et aval de la Maine pour les scénarios 5,6,7,9 et 10 par rapport à la crue de janvier 2004

	Sce5	Sce6	Sce7	Sce9	Sce10
Ecart cote pont amont Angers SNCF	+ 6 cm	+ 9 cm	+ 7 cm	+ 14 cm	- 1 cm
Ecart cote confluence Loire	+ 2 cm	+ 4 cm	+ 3 cm	+ 6 cm	0

▪ **SCENARIO 3 :**

C'est le scénario pour lequel on obtient le plus fort gradient sur les cotes maximales calculées dans la Maine : 1.79m de dénivelée entre l'amont d'Angers (amont du pont SNCF) et la confluence avec la Loire. Malgré un débit centennal sur la Sarthe et le Loir conduisant à un débit de pointe de la Maine dans Angers de 1432 m³/s, il ne se produit pas de débordement dans Angers. Les cotes maximales obtenues à Angers sont inférieures aux cotes de la crue de janvier 2004 (-44cm en amont du pont de Verdun). Cela est principalement dû à l'absence de crue de la Loire.

▪ **SCENARIO 4 :**

Comme pour le scénario 3, on obtient un débit de pointe assez important dans la Maine (1020 m³/s), sans débordement dans Angers.

La pente de la ligne d'eau dans la Maine est comme pour le scénario 3, relativement élevée : la dénivelée entre l'amont et l'aval est de 1.27m.

Les cotes maximales sont très inférieures aux cotes maximales du scénario 3 (-1m environ dans Angers en amont du pont de Verdun).

▪ **SCENARIO 8 (CRUE DE JANVIER 2001)**

En amont du pont Pruniers, la ligne d'eau des cotes maximales se situe entre celles du scénario 3 et du scénario 4. En aval, elle est supérieure (+30cm par rapport au scénario 3 à la confluence Loire-Maine).

Le débit de pointe de la Maine est de 1112m³/s pour le scénario 8, soit assez proche du débit de pointe du scénario 4 (1022 m³/s). La surcote obtenue pour le scénario 8 par rapport à ce scénario (+70cm en amont du pont de Verdun) s'explique par des conditions d'écoulement en Loire plus défavorables (1750m³/s au lieu de 1170 m³/s).

Ce scénario montre l'incidence de la Loire, condition limite aval pour l'écoulement de la Maine. Même pour des débits de crue faibles en Loire, l'incidence est forte.

3.2. LE LOIR

C'est le scénario 3 (crue centennale du Loir et de la Sarthe) qui fournit les cotes maximales en amont du seuil de Prigne. En aval, c'est le scénario 2 qui fournit les cotes maximales, suivi de la crue de janvier 1995. Le scénario 3 se trouve en 3^{ème} position entre le seuil de Prigne et Seiches, en aval de Seiches, c'est le scénario 1 qui prend la 3^{ème} place.

▪ **SCENARIO 1 ET CRUE DE JANVIER 1994**

L'incidence de la Loire entraîne une surcote par rapport à la crue de janvier 1994 jusqu'au seuil de Chaufour, avec une pente de ligne d'eau plus faible (dénivelée de 14cm pour le scénario 1 entre le seuil de Montreuil/Loir et la confluence avec la Sarthe, au lieu de 23cm pour la crue de janvier 1994). La surcote est de 66cm à la confluence Sarthe-Loir, de 60cm à Seiches, puis se réduit vers l'amont jusqu'au seuil de Chaufour où elle s'annule.

▪ **SCENARIO 2 ET CRUE DE JANVIER 1995**

L'incidence de la Loire remonte jusqu'à Durtal, où l'on obtient une surcote de 2cm. La surcote est de 30cm à la confluence Sarthe-Loir, de 25cm à Seiches, de 12cm à Prigne.

▪ **SCENARIOS 5,6,7,9 ET 10 ET CRUE DE JANVIER 2004**

Pour les scénarios 5, 6 et 9, la surcote aval au droit de la confluence Sarthe-Loir (respectivement de 6cm, 9cm et 15cm) se répercute jusqu'au seuil de Prigne où elle devient inférieure à 1cm.

Pour le scénario 7, la surcote de 7cm à la confluence Sarthe-Loir s'annule au droit de Seiches. En amont, on obtient une diminution de la cote maximale de 2cm au maximum.

Pour le scénario 10, la cote maximale à la confluence avec la Sarthe est inférieure de 1cm à la cote maximale de la crue de janvier 2004. En amont de Briollay, elle devient néanmoins supérieure de 2 à 3cm jusqu'au seuil de Prigne.

▪ **SCENARIO 3 ET CRUE DE JANVIER 1995**

L'incidence du débit de pointe plus élevé du Loir (débit centennal) se manifeste sur la partie amont, en amont du seuil de Prigne. A Durtal, la surcote est d'environ 50cm en amont du pont de la RN23. En aval du seuil de Prigne, les cotes maximales obtenues restent inférieures à celles de la crue de janvier 1995, avec un écart de 1.57m à la confluence Sarthe-Loir. Sur ce secteur, l'incidence aval est prédominante. A la confluence Sarthe-Loir, la cote maximale obtenue est similaire à la cote maximale de la crue de janvier 2004.

▪ **SCENARIO 8 (CRUE DE JANVIER 2001)**

Malgré un débit de pointe supérieur à celui de la crue de janvier 1994, les cotes maximales restent inférieures à celles de la crue de janvier 1994 jusqu'au seuil de Montreuil/Loir. Elles restent également inférieures aux cotes maximales de la crue de décembre 1982 jusqu'au seuil de Prigne, alors que les débits de pointe sont assez proches (285 m³/s pour la crue de janvier 2001, 224 m³/s pour la crue de décembre 1982).

3.3. LA SARTHE

Depuis la confluence avec la Mayenne, et jusqu'à l'écluse de Villechien, c'est le scénario 2 qui fournit les cotes maximales les plus élevées. En amont de l'écluse de Villechien, c'est le scénario 3 qui fournit les valeurs maximales. C'est ensuite la crue de janvier 1995 qui se place en deuxième position.

▪ **SCENARIO 1 ET CRUE DE JANVIER 1994**

La surcote est de 67cm à la confluence avec la Mayenne, et se répercute vers l'amont jusqu'à l'écluse du Pendu, où elle devient nulle. La surcote est de 55cm à Chateauneuf, de 45cm à Brissarthe.

▪ **SCENARIO 2 ET CRUE DE JANVIER 1995**

La surcote est de 33cm à la confluence avec la Mayenne, de 26cm à Chateauneuf, de 17cm à l'écluse de Villechien. Elle se répercute jusqu'à l'écluse du Pendu, où elle est encore de 2cm.

▪ **SCENARIOS 5,6,7,9 ET 10 ET CRUE DE JANVIER 2004**

Pour les scénarios 5, 6, 7 et 9, on obtient une surcote jusqu'à l'écluse de Villechien. Cette surcote est respectivement de 6cm, 9cm, 7cm et 14cm à la confluence avec la Mayenne. Elle se reporte vers l'amont, en diminuant peu jusqu'à Chateauneuf où elle est encore respectivement de 5cm, 6cm, 8cm et 10 cm. Ensuite, elle s'atténue plus rapidement jusqu'à l'écluse de Villechien. En amont de l'écluse de Villechien, la surcote est nulle sauf pour le scénario 7 pour lequel elle est négative (abaissement de la cote maximale de 1 à 2cm).

Pour le scénario 10, on obtient une sous-cote de l'ordre de 1cm à la confluence avec la Mayenne, qui est renforcée progressivement jusqu'à Chateauneuf où la sous-cote atteint -5cm, puis qui se réduit à nouveau vers l'amont. En amont de l'écluse de Villechien, l'incidence est nulle.

▪ **SCENARIO 3 ET CRUE DE JANVIER 1995**

L'incidence du débit centennal entraîne une surcote en amont de Brissarthe. Cette surcote devient supérieure à 30cm en amont de Morannes, et devient supérieure à 50cm à l'amont du modèle (aval écluse de Beffes).

En aval de Brissarthe, les cotes maximales du scénario 3 restent inférieures à celles de la crue de janvier 1995, avec un écart qui s'accroît vers l'aval. A la confluence avec la Mayenne, l'écart est de -1.74m, avec pour le scénario 3 une cote maximale proche de la cote maximale de la crue de janvier 2004.

▪ **SCENARIO 8 (CRUE DE JANVIER 2001)**

En aval de Chateauneuf, le scénario le plus proche du scénario 8 est le scénario 4, avec des cotes maximales pour le scénario 8 inférieures aux cotes maximales de la crue de janvier 2004, alors que le débit de la Sarthe est supérieur. Cela montre l'incidence de la Loire sur les cotes maximales dans le secteur aval (4080 m³/s à Saumur en janvier 2004 au lieu de 1750m³/s pour le scénario 8).

3.4. LA MAYENNE

Sur la partie amont de la Mayenne et jusqu'à l'écluse de Grez-Neuville, c'est le scénario 4 qui fournit les cotes maximales, suivi du scénario 2 et de la crue de janvier 1995. En aval de Grez-Neuville, le scénario 2 fournit les cotes maximales, suivi de la crue de janvier 1995, puis du scénario 4 (jusqu'à l'écluse de Sautré). En aval de l'écluse de Sautré le scénario 1 est en 3^{ème} position.

▪ **SCENARIO 1 ET CRUE DE JANVIER 1994**

La surcote due à la Loire se répercute jusqu'à l'écluse de Chenillé. Cette surcote de 67cm à la confluence avec la Sarthe, diminue peu jusqu'à l'écluse de Grez-Neuville, où elle est encore de 63cm. Vers l'amont, elle se réduit progressivement (Montreuil/Maine : 33 cm, Chambellay : 13cm) jusqu'à l'écluse de Chenillé, où elle s'annule.

▪ **SCENARIO 2 ET CRUE DE JANVIER 1995**

La surcote due à l'augmentation du débit de la Loire est de 33cm à la confluence avec la Sarthe, et se répercute jusqu'à l'écluse de Chenillé.

▪ **SCENARIOS 5,6,7,9 ET 10 ET CRUE DE JANVIER 2004**

▪ Scénario 5 :

L'augmentation du débit de l'Oudon a un impact maximum de 32cm au droit de la écluse de Grez-Neuville, soit immédiatement en aval de la confluence Mayenne-Oudon. Cet impact diminue vers l'aval : il est de 22 cm jusqu'en amont de l'écluse de Roussière, puis de 8cm en aval de cette écluse et de 6cm à la confluence avec la Sarthe. En amont de la confluence Mayenne-Oudon, l'impact décroît progressivement (20cm en amont de l'écluse de Montreuil/Maine, 10cm à Chambellay) pour disparaître à l'écluse de Chenillé.

▪ Scénario 6 :

L'impact maximum est réduit à Grez-Neuville par rapport à celui du scénario 5 : +13cm au lieu de +32cm. Il se réduit ensuite plus rapidement vers l'amont (2cm en amont de l'écluse de Montreuil/Maine) Par contre, en aval de l'écluse de la Roussière et jusqu'à la confluence avec la Sarthe, l'impact est supérieur à celui du scénario 5 : +13cm à +9cm.

▪ Scénario 7 :

La surcote de 7cm à la confluence avec la Sarthe se reporte jusqu'en amont de l'écluse de Roussière où elle est encore de 6cm. Elle devient ensuite nulle ou négative (-2cm de gain maximum, à Grez-Neuville).

▪ Scénario 9 :

On obtient une surcote plus importante que pour le scénario 5. L'impact est maximal à l'écluse de Grez-Neuville : + 42cm par rapport à janvier 2004. Cet impact diminue vers l'aval : +25cm en amont de l'écluse de Roussière, +14cm à la confluence avec la Sarthe. En amont de Grez-Neuville, l'impact diminue également : 24cm à l'écluse de Montreuil/Maine, 12cm à Chambellay, puis s'annule en amont de l'écluse de Chenillé.

▪ Scénario 10 :

L'impact est négligeable par rapport à la crue de janvier 2004. On obtient une diminution de la cote maximale de 1cm maximum sur la partie aval, jusqu'à Grez-Neuville.

▪ **SCENARIO 3**

Les cotes maximales obtenues sont supérieures à celles du scénario 4 jusqu'à l'écluse de Montreuil-Belfroy, traduisant une surcote due à l'incidence aval de la crue de la Sarthe et du Loir.

▪ **SCENARIO 4**

Ce scénario fournit des cotes maximales supérieures à celles de la crue de janvier 1995 pour la partie amont, jusqu'à Grez-neuville. La surcote est de 1.10m à la Jaille Yvon (extrémité amont du modèle) et de 50cm à Montreuil/Maine.

En aval de Grez-Neuville, les cotes maximales deviennent inférieures à celles de la crue de janvier 1995, avec un écart qui s'accroît de manière très importante vers l'aval. A la confluence avec la Sarthe, l'écart est de -2.82m.

Les cotes maximales restent supérieures à celles de la crue de janvier 2004 jusqu'en amont de l'écluse de Montreuil-Belfroy. Plus en aval, elles deviennent inférieures à celles de tous les scénarios.

▪ **SCENARIO 8 (CRUE DE JANVIER 2001)**

Le débit de pointe de la Mayenne est similaire à celui de la crue de janvier 1995. En amont de l'écluse de Chenillé, les cotes maximales sont très voisines, par contre en aval de cette écluse, les cotes maximales du scénario 8 deviennent nettement inférieures aux cotes de janvier 1995 : -50cm au droit de l'écluse de Montreuil/Maine, -74cm à Grez-Neuville. Sur le secteur Montreuil/Maine-Grez-Neuville, les cotes du scénario 8 restent supérieures à celles de la crue de décembre 1999 et de décembre 1982. En aval de Grez-Neuville, les cotes maximales diminuent rapidement pour se retrouver en avant-dernière position à la confluence avec la Sarthe (le scénario en dernière position est le scénario 4).

3.5. L'OUDON

C'est le scénario 4 qui fournit les cotes maximales sur l'Oudon, suivi du scénario 2 et de la crue de janvier 1995.

▪ **SCENARIO 1 ET CRUE DE JANVIER 1994**

La surcote à la confluence avec la Mayenne est de 51cm, elle est encore de 40cm en aval de l'écluse de Himbaudière, puis s'atténue vers l'amont. Elle s'annule à l'écluse de la Chapelle.

▪ **SCENARIO 2 ET CRUE DE JANVIER 1995**

La surcote aval de 20cm se répercute vers l'amont jusqu'à l'écluse de Maingué : elle est de 17cm à l'écluse de Himbaudière et de 4cm à l'écluse de Maingué.

▪ **SCENARIOS 5,6,7,9 ET 10 ET CRUE DE JANVIER 2004**

▪ Scénario 5 :

La surcote est de 31cm à la confluence avec l'Oudon, elle s'accroît vers l'amont et atteint 59cm à l'écluse de Himbaudière et 93cm en aval de l'écluse de Maingué.

▪ Scénario 6

La surcote est moins importante que celle obtenue pour le scénario 5, traduisant l'impact de conditions aval plus favorables. A Maingué, on retrouve une surcote similaire (92cm au lieu de 93cm). En aval, la surcote est de 40cm à l'écluse de Himbaudière et 11cm à la confluence avec la Mayenne.

▪ Scénario 7

L'impact est très faible : -1cm à la confluence avec la Mayenne jusqu'en aval de l'écluse de Himbaudière.

- Scénario 9

L'impact est proche de celui obtenu pour le scénario 5, en étant légèrement supérieur, traduisant l'incidence de conditions aval un peu plus défavorables. A la confluence avec la Mayenne, la surcote est de 36cm. Elle atteint 60cm à l'écluse de Himbaudière, et 93cm à Maingué.

- Scénario 10

L'impact est négligeable : inférieur à 1cm à la confluence avec la Mayenne.

- **SCENARIO 4 :**

Le scénario 4 fournit les cotes maximales les plus élevées, avec une surcote à Maingué de 75cm par rapport à la crue de janvier 1995. A l'écluse de Himbaudière la surcote est de 43cm, et elle est de 31cm à la confluence avec la Mayenne.

- **SCENARIO 8 (CRUE DE JANVIER 2001)**

Les cotes maximales obtenues sont voisines des cotes maximales de la crue de décembre 1999. Les débits de pointe sont effectivement voisins pour des cotes maximales à la confluence avec la Mayenne très proches.

4. ANALYSE DES PROFILS EN LONG ET DES PERTES DE CHARGE DES OUVRAGES DANS LES BVA

4.1. COMPARAISON DES PROFILS EN LONG DANS LES BVA

L'analyse des profils en long des cotes maximales effectuée en 3 a été complétée par une comparaison des niveaux respectifs dans les différentes branches : Oudon, Mayenne, Sarthe, Loir et Maine.

Des profils en long des cotes maximales représentés sur un même graphe pour les différentes branches sont fournis en annexe C2 pour les principaux scénarios. Les PK pris en compte sont toujours comptés depuis l'aval vers l'amont, à partir de la confluence Loire-Maine.

Ces graphes mettent en évidence des différences de niveaux et de pentes de lignes d'eau des cotes maximales entre les rivières variables selon les scénarios :

- Les lignes d'eau de la Sarthe et du Loir sont inférieures aux lignes d'eau de la Mayenne et de l'Oudon (sauf cas extrême du scénario 3). La pente de la ligne d'eau est en général un peu supérieure sur le Loir à celle de la Sarthe, conduisant à des écarts qui s'accroissent de l'aval vers l'amont. Par exemple, pour la crue de janvier 1995, l'écart de 10 à 15cm sur la partie aval s'accroît jusqu'à 50cm au PK55 (seuil Chaufour – Ecluse du pendu). Pour la crue de janvier 2004, l'écart de 30cm en partie aval s'accroît jusqu'à 80cm au PK55.

La ligne d'eau de la Sarthe est pour la plupart des scénarios inférieure à celle du Loir, sauf pour la crue de janvier 1994 et le scénario 1 où elle se positionne légèrement au-dessus (+10cm sur la partie aval), et pour le scénario 8, où les lignes d'eau sont quasiment superposées sur l'aval puis se suivent vers l'amont (plusieurs croisements).

Pour le scénario 3, les pentes de lignes d'eau sont voisines sur la plus grande partie du linéaire. En amont de Lézigné, la pente de la ligne d'eau est plus élevée sur le Loir.

- La pente de la ligne d'eau de la Mayenne est la plus élevée pour tous les scénarios (sauf cas extrême du scénario 3). Pour la crue centennale, la pente des cotes maximales de la Mayenne est de l'ordre de 0.2 ‰. Sur le Loir et la Sarthe, la pente des cotes maximales en crue centennale est deux fois plus faible.

Pour les crues janvier 1995, janvier 2004, décembre 1999 et décembre 1982, les écarts en niveau entre la Mayenne et la Sarthe sont de l'ordre de 70 à 80 cm entre la cote à la confluence Mayenne-Oudon et la cote au même PK sur la Sarthe, soit 3km en amont de Cheffes (PK33). Pour la crue de décembre 1982, compte-tenu des débits relativement plus élevés sur la Mayenne que sur la Sarthe, l'écart comparable à celui des autres crues s'explique par l'incidence aval de la crue de Loire. Pour la crue de janvier 2001, plus contrastée du point de vue de l'importance des crues des différentes rivières et sans forte influence aval, l'écart est de 1.8m. Pour les crues de janvier 1994 et le scénario 1 où l'incidence aval est prédominante, l'écart est faible (10cm pour janvier 1994 et quelques cm pour le scénario 1).

- La ligne d'eau de l'Oudon est inférieure à celle de la Mayenne pour tous les scénarios, avec une pente nettement plus faible sur la partie aval, jusqu'à Andigné. Vers l'amont, la pente augmente mais ne devient voisine de celle de la Mayenne qu'en amont de l'écluse de La Chapelle. En fait, sur la partie aval de l'Oudon, la pente est voisine de la pente des lignes d'eau du Loir et de la Sarthe, si on compare les secteurs à PK identiques.

4.2. ANALYSE DE L'INCIDENCE DES OUVRAGES

Dans les BVA, l'analyse a porté sur les 28 ponts et 24 écluses (avec seuil) présents dans le secteur modélisé. Pour les simulations, les vannes des seuils ont été supposées ouvertes pendant toute la durée de la crue.

Les pertes de charge calculées correspondent à la différence entre la cote calculée en amont et en aval de l'ouvrage. Ces pertes de charge incluent la perte de charge singulière due à l'ouvrage, ainsi que des pertes de charge linéaires pour les parties comprises entre l'ouvrage et le centres des casiers amont et aval. Pour les ouvrages créant un fort obstacle à l'écoulement les pertes de charge singulières sont prépondérantes par rapport aux pertes de charge linéaires.

Pour les écluses, le comportement pendant la crue est le suivant :

- Les pertes de charge sont importantes en début de crue, tant que l'ouvrage fonctionne en régime dénoyé,
- Les pertes de charge deviennent faibles voire négligeables pour la pointe de crue, les ouvrages étant alors fortement noyés.

Les écluses ayant les pertes de charge les plus significatives pour les débits élevés sont les écluses de Chenillé (Mayenne amont) et Grez Neuville (Mayenne en aval de la confluence avec l'Oudon), pour lesquelles on obtient respectivement 30 à 50cm de perte de charge, et 25 à 30cm de perte de charge, pour les pointes de crues les plus fortes.

Pour les ponts, le comportement est inverse : les pertes de charge augmentent avec le débit du fait du rétrécissement dû à l'ouvrage et/ou aux remblais éventuels présents en lit majeur.

Les ouvrages (Ponts et/ou remblai lit majeur) constituant des obstacles à l'écoulement et générant les pertes de charge les plus importantes sont rappelés ci-après. Les valeurs indiquées correspondent à des différences de cotes dans le lit mineur calculées aux centres des casiers entre l'amont et l'aval de chaque ouvrage (perte de charge singulière due à l'ouvrage lui-même et perte de charge linéaire) :

- Pont de Verdun à Angers : jusqu'à 35cm pour la crue de janvier 1995.
- Pont RD89 à Chateauneuf/Sarthe : jusqu'à 70cm (pour le scénario 3) tant qu'il n'y a pas surverse au-dessus du remblai. Pour la crue de janvier 1995, la perte de charge est de 38cm.
- Pont RN23 à Durtal : jusqu'à 47cm en crue centennale (38 cm pour la crue de janvier 1995). L'analyse des écoulements dans Durtal et l'incidence de cet ouvrage sont présentés de manière plus détaillée en 7.

Les graphes fournis en annexe C3 représentent l'évolution de la perte de charge en fonction de la cote et du débit pour ces trois ouvrages. Les relations obtenues ne sont pas univoques du fait de la non-univocité des relations cote-débit, due à la plus ou moins forte incidence aval selon les secteurs. Les relations cote-débit calculées par le modèle en différents points sont également fournies en annexe C3.

5. ANALYSE DU STOCKAGE/DESTOCKAGE ET DE LA PROPAGATION DES HYDROGRAMMES DANS LES BVA

Pour cette analyse, on a effectué deux types de traitement :

- Représentation des hydrogrammes calculés en différents points de la zone d'étude pour chaque scénario. Pour certaines branches, notamment la Sarthe et le Loir, on a additionné les hydrogrammes calculés en des points équidistants par rapport à Angers. Les hydrogrammes totaux ont également été calculés dans les BVA, en sommant les hydrogrammes de l'ensemble des branches de manière cohérente par rapport aux temps de propagation estimés. Cela permet de visualiser d'une part la propagation des hydrogrammes depuis l'amont vers l'aval, d'autre part l'effet de stockage/déstockage dans les BVA.
- Evaluation des volumes de stockage dans les BVA en fonction de la cote.

5.1. ANALYSE DE LA PROPAGATION

Les hydrogrammes ont été calculés aux points suivants :

- Loir : amont (PK 60.9), Prigne (PK 46.8), amont Seiches (PK 38.5), Villevêque (PK 31.5), Briollay (PK 23.8)
- Sarthe : amont (PK 62), Brissarthe (PK 45.9), aval Chateauneuf (PK 37.5), amont Cheffes (PK 32.2), Briollay (PK 22.7), Ecoflant (PK 16.6)
- Mayenne : amont (PK 46.8), Montreuil/Maine (PK 38.3), amont confluence Oudon (PK 34.3), Grez-Neuville (PK 32.1), Cantenay (PK 16.5)
- Oudon : amont (PK 52.2), aval écluse de la Chapelle (PK 47.3), déviation Lion d'Angers (PK 38.1)
- Angers amont Pont Jean Moulin (PK 11.3)
- Angers amont Pont de Verdun (PK 9.3)
- Maine pont SNCF Bouchemaine (PK 2.7)

Les PK sont calculés de l'aval vers l'amont, à partir de la confluence Maine-Loire.

Pour chaque scénario, les graphes fournis en annexe C3 représentent :

- les hydrogrammes calculés en différents points pour la Mayenne, l'Oudon, la Sarthe, le Loir et la Maine,
- les hydrogrammes combinés en distinguant les branches Mayenne-Oudon et Sarthe-Loir,
- les hydrogrammes totaux, somme des hydrogrammes sur les 4 branches (voir 5.1.3),
- les limnigrammes dans la Loire et les BVA.

Les hydrogrammes combinés regroupent les points suivants :

- Sarthe et Loir : Sarthe + Loir amont, Brissarthe + Prigne, Chateaufort + Seiches, Cheffes + Villevêque, Sarthe + Loir Briollay
- Mayenne et Oudon : Mayenne amont + Oudon aval Chapelle

Les graphes représentent également sur un axe secondaire (à droite du graphe) les cotes calculées à Angers et les cotes de la Loire à Sainte-Gemmes-sur-Loire (amont de la confluence avec la Maine) et la Pointe (aval confluence).

Remarque : pour des raisons d'exploitation de fichiers de résultats de STREAM, ces hydrogrammes sont représentés avec un pas de temps de 6 heures, la valeur exacte du maximum de la crue n'est par conséquent pas toujours présente sur le graphe.

L'analyse des hydrogrammes pour les différents scénarios met en évidence les comportements différenciés des différents secteurs des BVA, en particulier en ce qui concerne la branche Mayenne d'une part, et les branches Sarthe et Loir d'autre part.

Les scénarios 3 et 4 correspondant à de fortes crues dans les BVA (Sarthe-Loir ou Mayenne-Oudon) sans crue de Loire, permettent de connaître les conditions d'écoulement sans incidence de la Loire.

5.1.1. Mayenne et Oudon

Sur la Mayenne, les hydrogrammes se propagent rapidement et avec très peu de déformation. Le temps de propagation est variable en fonction du débit et des conditions aval. Entre la Jaille Yvon et Cantenay Epinard, le temps de propagation est de l'ordre de 12 heures pour tous les scénarios sauf le scénario 4. Pour ce dernier, pour lequel le débit de pointe est le plus élevé (centennal) et l'incidence aval inexistante, le temps de propagation est plus court : 10 heures environ entre la Jaille-Yvon et Cantenay Epinard.

Entre la Jaille Yvon et la confluence avec l'Oudon (8.7km), le temps de propagation est de l'ordre de 4 à 5 heures, et de l'ordre de 6 à 8 heures entre Grez-neuville (aval confluence avec l'Oudon) et Cantenay Epinard.

Sur l'Oudon, le temps de propagation est de l'ordre de 5 à 8 heures entre Maingué et la confluence avec la Mayenne (14.1 km), soit une propagation en moyenne plus rapide que sur la Mayenne. L'hydrogramme de crue de l'Oudon subit peu de déformation.

En aval de Cantenay-Epinard, la propagation est très ralentie du fait de la présence de zones d'expansion importantes. Dans le cas du scénario 4 (crues de la Mayenne et de l'Oudon uniquement), le temps de propagation est estimé à environ 24heures entre Cantenay Epinard et l'amont de la Maine (Pont Jean Moulin), avec un amortissement du débit de pointe de l'ordre de 20%.

Pour les autres scénarios, l'analyse est moins directe, cependant on retrouve une première pointe de crue de la Maine correspondant à la propagation de la crue de la Mayenne environ 24 heures après la pointe à Cantenay Epinard (par exemple, pour la crue de janvier 1995).

Phénomène de blocage de l'écoulement de la Sarthe par la Mayenne :

On observe que le passage de la crue de la Mayenne dans le secteur aval des BVA bloque plus ou moins l'écoulement de la Sarthe, selon les conditions. Lors de l'arrivée de la crue de la Mayenne, le niveau est généralement encore relativement bas dans les BVA et la crue de la Mayenne entraîne soit un remplissage de la vallée de la Sarthe par l'aval (cas extrême du scénario 4, où l'on obtient un écoulement inversé dans la Sarthe avec un débit maximum de 300 m³/s), soit un blocage de l'écoulement de la Sarthe, provoquant un surstockage dans la partie aval de la vallée de la Sarthe.

On constate alors une diminution temporaire du débit de la Sarthe dans la partie aval au moment du passage de la pointe de crue de la Mayenne. L'incidence de ce phénomène se fait sentir sur la Sarthe et le Loir jusqu'à Briollay et s'atténue progressivement vers l'amont, jusqu'à Cheffes et Villevêque.

Par exemple, pour la crue de janvier 1995, entre les instants 280 et 340, le débit de la Sarthe à Ecoflant est très perturbé par la Mayenne (environ 300 m³/s de réduction du débit de pointe, pour un débit total de 600 m³/s environ). Ce phénomène est variable en fonction de la cote dans les BVA au moment de l'arrivée de la pointe de la Mayenne. Les deux pointes suivantes de la Mayenne entraînent également ce phénomène de blocage de la Sarthe, mais avec une incidence relativement plus faible sur le débit (-100 m³/s environ, pour un débit total de 800 m³/s environ). Cette réduction est sensible jusqu'à Briollay.

Pour la crue de janvier 2004, cette perturbation s'observe également, avec une incidence maximale à l'instant 1044 (réduction du débit de 50% environ, pour un débit estimé à de 250 m³/s). Pour la crue de décembre 1982, on constate également une réduction du débit de la Sarthe à Ecoflant d'au moins 50% au moment du passage de la pointe de la Mayenne (pour un débit estimé à 350 m³/s).

5.1.2. Sarthe et Loir

Pour le scénario 3 (crues centennales de la Sarthe et du Loir sans crues de la Mayenne ni de la Loire), on constate que les hydrogrammes de crue amont se propagent sans déformation importante. Sur la Sarthe, l'amortissement du débit de pointe est faible, environ 5% entre Chateaufort et Briollay. En amont, l'amortissement est négligeable. Le temps de propagation est de l'ordre de 16 heures entre Beffes et Cheffes, et de 24 heures entre Beffes et Briollay (39.3 km). Sur le Loir, l'amortissement du débit de pointe est également très faible (inférieur à 5%). Le temps de propagation est d'environ 24 heures entre Durtal et Briollay (37.1 km). Les conditions de propagation sont donc très proches sur les deux rivières. En aval de Briollay, le temps de propagation devient plus important : 10 à 12 heures de Briollay à Ecoflant, et 6 à 8 heures entre Ecoflant et l'amont de la Maine (pont Jean-Moulin).

En cas d'incidence aval, les conditions de propagation sont très perturbées et l'on constate un ralentissement de la propagation avec un stockage important d'une partie de l'hydrogramme de crue dans la partie aval des BVA pendant la phase de montée de crue, suivi d'une phase de déstockage pendant la décrue. Le fonctionnement est très dépendant des conditions d'écoulement en Loire. La partie aval des BVA se comporte principalement comme une bassine où les conditions de remplissage et de vidange dépendent du niveau aval imposé par la Loire. Ce niveau aval conditionne l'hydrogramme de crue de la Maine, et influence fortement l'écoulement de la Sarthe et du Loir aval en réduisant le débit pendant la phase de montée et jusqu'au moment de la pointe « théorique ». Le phénomène de blocage des écoulements par la Mayenne joue également pendant la première partie de la montée (niveau encore bas dans les BVA) (voir 5.1.1), mais la réduction de débit due au passage de la pointe de crue de la Mayenne a généralement le temps de s'atténuer au moins en partie avant la période de forte incidence aval due à la Loire.

A Ecoflant, le débit maximum de la Sarthe est généralement atteint pendant la phase de déstockage (c'est le cas pour tous les scénarios sauf janvier 2004). Ce phénomène dépend également des conditions de concomitance entre la Loire et la Maine (crues des affluents amont) (voir 6.3). Pour la crue de janvier 2004, le retard de la crue de la Loire par rapport à celle des affluents de la Maine conduit à des conditions d'écoulement plus favorables, en réduisant l'importance des phénomènes de stockage-déstockage.

L'occurrence de la cote maximale dans la partie aval des BVA est relativement dissociée de l'occurrence du débit maximum, et est toujours dépendante de l'occurrence du niveau maximum en Loire (voir 6.3).

Sur la Sarthe, le temps de propagation augmente de manière très importante en cas d'incidence aval : de l'ordre de 36 heures entre Beffes et Briollay. Sur le Loir, l'augmentation semble moins importante : on obtient des temps de propagation de l'ordre de 30 heures de Durtal à Briollay.

En aval de Briollay, on ne peut plus réellement parler de temps de propagation, les phénomènes de stockage-déstockage jouent un rôle prépondérant.

L'analyse des hydrogrammes de la Sarthe et du Loir sommés à PK équivalents (distance depuis la confluence Maine-Loire) montre que l'amortissement du débit Sarthe+Loir entre l'amont et Ecoflant est de l'ordre de 15 à 20% hors incidence du passage de la crue de la Mayenne (par exemple 17% pour la crue de janvier 2004).

5.1.3. Maine

Les hydrogrammes de la Maine ont une forme très lissée, où les pointes amont sont très amorties. Cela est d'autant plus important pour les fortes crues. Cela confirme le fonctionnement en « bassine » du secteur aval des BVA. Les pointes de la Mayenne qui pourraient générer des pointes sur la Maine sont en fait en grande partie « absorbées » par le stockage dans les BVA (et en grande partie dans la vallée de la Sarthe où le volume de stockage disponible est le plus important), avec une incidence sur les hydrogrammes de la Sarthe (phénomène de blocage évoqué en 5.1.1).

Si l'on compare les hydrogrammes totaux amont, en sommant les hydrogrammes de la Mayenne, l'Oudon, la Sarthe et le Loir, pour différentes distances de la confluence Sarthe-Mayenne, cet amortissement très important des débits est visible. Les graphes de l'annexe C4 fournissent ces comparaisons pour les points suivants :

- Sarthe Cheffes + Loir Villevêque + Mayenne Jaille Yvon + Oudon amont
- Sarthe Ecoflant + Mayenne Cantenay
- Maine amont
- Maine aval

Nota : pour additionner les hydrogrammes de la Sarthe, la Mayenne et du Loir, on a tenu compte des temps de propagation différenciés estimés précédemment, afin de prendre en compte les hydrogrammes les plus cohérents possibles. Un décalage de quelques heures pour ces traitements ne change pas l'analyse. Ces hydrogrammes sont calculés à titre indicatif, et ne permettent pas d'analyser les temps de propagation.

On constate que la pointe de crue calculée en amont des BVA (Mayenne+Oudon amont + Cheffes + Villevêque), s'amortit d'autant plus que la pointe de la Mayenne est forte : pour le scénario 4, l'amortissement est de l'ordre de 35% entre l'hydrogramme amont et Ecoflant. Pour les crues de décembre 1982, décembre 1999, la réduction est d'environ 30% . Pour la crue de janvier 1995, on obtient également une réduction du débit total d'environ 30% pour la première pointe de crue. Pour les pointes suivantes, la réduction est plus faible, de l'ordre de 8 à 10%. Cela met en évidence l'amortissement très fort des pointes de crues de la Mayenne, qui utilisent le volume de stockage généralement disponible dans les BVA (partie aval de la vallée de la Sarthe) au moment de leur arrivée, en début de phase de montée de crue.

Pour tous les scénarios, ces graphes permettent de mettre en évidence le passage de la phase de stockage (débits décroissants de l'amont vers l'aval) à la phase de

déstockage (débits croissants de l'amont vers l'aval). Les hydrogrammes calculés se croisent quasiment au moment du changement de phase. Ce changement se produit au voisinage de la pointe de crue à Angers (niveau maximum).

L'analyse comparée des scénarios par rapport aux crues de référence montre :

- **Entre la crue de janvier 1994 et le scénario 1**, le débit maximum pendant la phase de stockage est réduit de 10% pour le scénario 1 en amont de la Maine (524 m³/s au lieu de 582 m³/s). Le débit maximum atteint pendant la phase de déstockage est augmenté : 857m³/s au lieu de 824 m³/s.
- **Entre la crue de janvier 1995 et le scénario 2**, on ne constate pas de modification du débit de pointe pour le scénario 2 en amont de la Maine, mais seulement une diminution du débit pendant la montée (-5% au maximum). L'accroissement relatif du débit de la Loire est dans ce cas plus faible qu'entre la crue de janvier 1994 et le scénario 1.

▪ **Entre la crue de janvier 2004 et les scénarios 5,6,7,9 et 10 :**

Les modifications de débits associées aux scénarios se reportent sur les hydrogrammes totaux calculés, et les retards appliqués modifient parfois la forme de ces hydrogrammes. Les accroissements de débit s'amortissent légèrement entre l'amont et la Maine. Comme il a été vu en 3.1, le fait de retarder les crues amont rapproche la pointe de débit dans les BVA de la pointe de crue de la Loire. Par exemple, la réduction du débit de pointe de la Maine obtenue pour le scénario 10, n'est pas associée à une réduction significative de la cote à Angers, du fait d'une plus grande concomitance avec la Loire.

Les hydrogrammes calculés en amont (Pont Jean Moulin) et en aval de la Maine (pont SNCF Bouchemaine) montrent un temps de propagation court de l'ordre de 2 à 4 heures, ainsi qu'un léger amortissement du débit de pointe.

Les écoulements dans la Maine peuvent s'inverser dans des conditions très particulières d'absence de crue de Maine et de petite crue de Loire. C'est ce qui est observé au moment de la première petite pointe de crue simulée pour la crue de janvier 2004 (qui correspond à la crue de décembre 2003 de la Loire, voir graphes de la crue de janvier 2004 en annexe C4). Le débit maximum entrant en Maine est de l'ordre de 150 m³/s, pour un débit en Loire de l'ordre de 3000 m³/s. Le débit maximum entrant depuis la Loire est de l'ordre de 150 m³/s jusqu'en amont de la Maine, puis il s'atténue rapidement pour atteindre 20 m³/s à Briollay dans la Sarthe et disparaître en amont de Briollay.

5.2. VOLUMES DE STOCKAGE DANS LES BVA

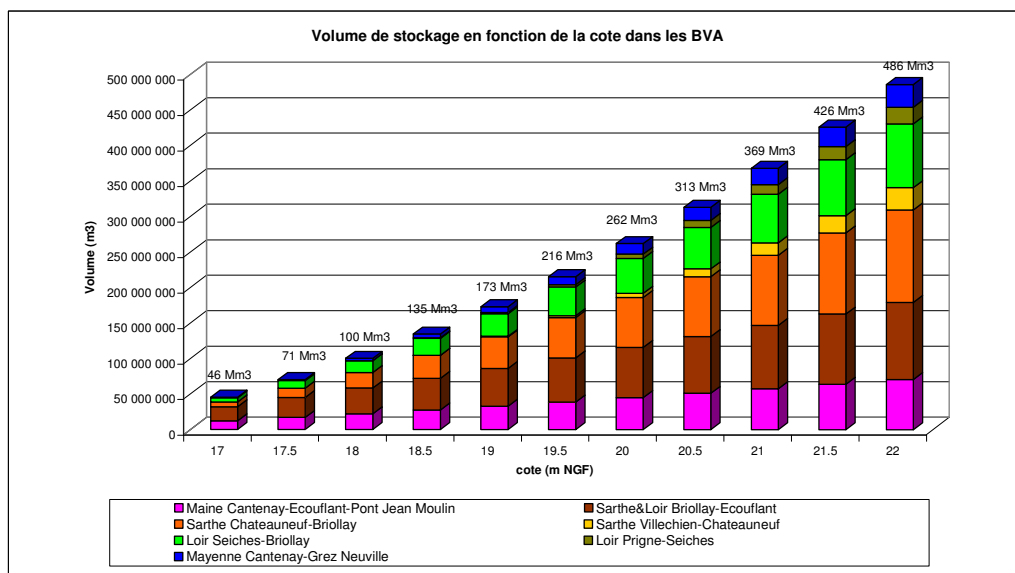
Le volume de stockage a été calculé par tranche de 50cm pour les cotes 17 à 22m NGF, pour les secteurs suivants :

- Sarthe et Mayenne entre Ecoufant, Cantenay-Epinard et la Maine au pont Jean Moulin,
- Sarthe et Loir entre Briollay et Ecoufant,
- Sarthe entre Chateauneuf et Briollay,
- Sarthe entre l'écluse de Villechien et Chateauneuf,
- Loir entre Seiches et Briollay,
- Loir entre Prigne et Seiches,
- Mayenne de Grez Neuville à Cantenay-Epinard.

Le calcul a été effectué à partir des données SIG, et du modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation hydraulique. Le calcul se base sur un niveau horizontal dans le secteur considéré. Les valeurs obtenues sont comparées dans la Figure 1, qui fournit également le volume total pour chaque tranche de cote considérée.

Le secteur aval de la vallée de la Sarthe fournit le plus grand volume de stockage : 25% à 45% du volume entre Briollay et Ecoufiant, 25% du volume entre Chateaufort et Briollay, soit au total au moins la moitié du volume disponible. Entre Seiches-sur-le-Loir et Briollay, la vallée du Loir fournit environ 18% du volume de stockage. Le reste du volume est fourni par le secteur de confluence Sarthe-Mayenne (entre Cantenay-Epinard, Ecoufiant et le pont Jean Moulin) [environ 15 à 25%], puis par les secteurs amont sur la Mayenne, la Sarthe et le Loir.

Figure 1 Volumes de stockage disponibles dans les BVA par secteurs en fonction de la cote NGF



Le volume total de stockage disponible est de l'ordre de 370 millions de m3 pour la cote 21m NGF, et 426 millions de m3 pour la cote 21.5m NGF. La cote maximale atteinte pour la crue de janvier 1995 est comprise entre 21m NGF et 21.5m NGF dans le secteur aval des BVA.

6. ANALYSE DES INCIDENCES RESPECTIVES DE LA LOIRE ET DE LA MAINE SUR LES BVA

Pour cette analyse, nous avons comparé pour les scénarios analysés, l'évolution des cotes dans la Loire, la Maine et les BVA, ainsi que les instants d'occurrence des cotes maximales dans la Maine, les BVA et la Loire.

Les profils en long des cotes maximales de la Loire sont fournis en annexe C2 pour tous les scénarios. Les graphes de l'évolution des niveaux dans la Loire, la Maine et les BVA, sont fournis en annexe C4 pour chaque scénario. Les graphes des hydrogrammes fournis également en annexe C4 représentent en axe secondaire l'évolution des cotes à Angers, Sainte-Gemmes-sur-Loire et La Pointe.

6.1. PROFILS EN LONG DES COTES MAXIMALES DANS LA LOIRE

Les profils en long des cotes maximales des scénarios 3 et 4 montrent que l'incidence de la crue de la Maine peut remonter 7 à 8 km en amont de Ponts de Cé, jusqu'à La Daguenière.

Les cotes maximales obtenues pour le scénario 2 sont supérieures à celles de la crue de décembre 1982 en aval de Sainte-Gemmes-sur-Loire. En amont, la crue de décembre 1982 fournit des cotes supérieures. La surcote obtenue pour le scénario 2 par rapport à la crue de janvier 1995 est de +68cm à Montjean-sur-Loire, +58cm à Bouchemaine, +53cm aux Ponts de Cé.

La surcote obtenue pour le scénario 1 (crue centennale de la Loire à Saumur) par rapport à la crue de janvier 1994 est variable selon les secteurs : +80cm à +90cm de Montjean-sur-Loire à Bouchemaine, +60cm à +70cm de Bouchemaine à La Bohalle.

Pour les scénarios 5,6,7,9 et 10 comparés à la crue de janvier 2004, on obtient :

- Scénario 5,6,7, 9 : une surcote de respectivement +3cm, +4cm, +3cm, +7cm à Montjean-sur-Loire. Cette surcote est quasiment identique à Bouchemaine (réduite de 1cm), et réduite aux Ponts de Cé (+1cm pour les scénarios 5,6 et 7, +2cm pour le scénario 9).
- Scénario 10 : incidence inférieure à 1cm.

6.2. INCIDENCE DE LA MAINE SUR LA LOIRE

L'incidence de la Maine sur les cotes maximales de la Loire s'analyse par la comparaison des relations cote-débit obtenues pour les différents scénarios. Aux Ponts de Cé (voir graphes fournis en annexe C3), l'incidence maximale est de l'ordre de 20 à 30cm entre la crue de janvier 1995 et le scénario 1, dans la gamme de débit de l'ordre de 3500 m³/s. Entre le scénario 1 et la crue de décembre 1982, l'incidence est plus faible, inférieure à 10cm dans la gamme de débit de l'ordre de 5000 m³/s.

6.3. DECALAGES TEMPORELS ENTRE LES POINTES DE CRUE DE LA MAINE ET DE LA LOIRE

Le Tableau 4 fournit pour chaque scénario les cotes maximales calculées ainsi que le décalage sur l'occurrence du niveau maximum sur la Loire en amont et en aval de la confluence avec la Maine, sur la Mayenne à Canteuay, la Sarthe à Ecoouflant, la Sarthe et le Loir à Briollay, par rapport à l'instant d'occurrence du maximum à Angers. Les valeurs sont également indiquées pour la Loire à Saumur (amont du modèle), pour fournir une indication sur le décalage entre la crue de la Loire et la crue de la Maine. Le Tableau 5 fournit les décalages en heures entre l'instant d'occurrence du niveau maximum à Angers et l'instant d'occurrence du débit maximum à Angers et dans la Loire.

Tableau 4 Cotes maximales (m NGF) et décalages en heures entre les pointes de crue sur la Loire, la Sarthe, le Loir et la Mayenne et la pointe de crue à Angers

Scé nari o	Cote max Angers calculée	Ponts de Cé	Ste Gemmes	La Pointe	Montjean	Saumur	Ecoouflant	Briollay	Canteuay
J94	19.64	20.91 (-12)	20.33 (-11)	19.35 (-6)	15.6 (-2)	28.79 (-19)	19.78 (10)	19.79 (11)	19.77 (9)
1	20.33	21.59 -13	20.94 (-11)	20.13 (-7)	16.54 (-3)	29.93 (9)	20.44 (10)	20.44 (10)	20.43 (9)
J95	20.37	20.44 (-2)	20.05 (0)	19.29 (2)	15.6 (5)	27.5 (-27)	21.1 (0)	21.1 (1)	21.1 (-2)
2	20.75	20.97 (-3)	20.49 (-2)	19.86 (1)	16.23 (3)	28.42 (-9)	21.41 (0)	21.43 (1)	21.39 (-1)
3	18.62	18 (4)	17.7 (4)	17.15 (4)	12.96 (9)	24.4 (-)	19.48 (-3)	19.6 (-4)	19.35 (-1)
4	17.73	17.7 (4)	17.34 (4)	16.64 (3)	12.46 (6)	24.4 (-)	18.27 (0)	18.28 (1)	18.65 (-14)
J200 4	19.25	20.42 (0)	19.9 (0.5)	18.87 (3)	15.05 (8)	27.95 (-5)	19.42 (-5)	19.44 (-7)	19.41 (-4)
5	19.29	20.42 (1)	19.91 (2)	18.89 (4)	15.08 (8)	27.95 (-4)	19.48 (-7)	19.51 (-10)	19.47 (-6)
6	19.31	20.43 (1)	19.92 (2)	18.9 (4)	15.09 (9)	27.95 (-4)	19.51 (-6)	19.53 (-8)	19.5 (-6)
7	19.3	20.42 (-4)	19.91 (-3)	18.89 (0)	15.08 (5)	27.95 (-10)	19.5 (-1)	19.52 (-1)	19.47 (-6)
9	19.35	20.43 (2)	19.93 (3)	18.92 (4)	15.12 (9)	27.95 (-3)	19.57 (-6)	19.59 (7)	19.56 (-6)
10	19.24	20.41 (-3)	19.9 (-2)	18.87 (1)	15.04 (6)	27.95 (-8)	19.42 (-2)	19.43 (-2)	19.4 (-1)
8	18.45	18.71 (-9)	18.29 (-7)	17.52 (-3)	13.37 (2)	25.37 (-17)	18.98 (3)	19.03 (5)	19 (3)
D82	20.07	21.17 (-14)	20.56 (-10)	19.76 (-5)	16.12 (-2)	29.15 (-25)	20.26 (6)	20.27 (6)	20.25 (5)
D99	19.7	20.44 (-42)	19.96 (-40)	19.04 (-22)	15.27 (-18)	27.84 (-47)	20.1 (3)	20.1 (3)	20.1 (3)

Nota : -12 signifie que le niveau maximum est atteint au point considéré 12 heures avant le niveau maximum à Angers.

Tableau 5 Décalages en heures entre l'occurrence du débit maximum en Maine et en Loire, par rapport à l'occurrence du niveau maximum à Angers

Scénario	Cote max Angers calculée (m NGF)	Débit max Angers calculé (m3/s)	Décalage Qmax Angers/Zmax Angers (heures)	Décalage Qmax Saumur/Zmax Angers (heures)	Décalage Qmax de Ponts Cé /Zmax Angers (heures)	Décalage Qmax Montjean /Zmax Angers (heures)
J94	19.64	809	47	-21	-14	-2
1	20.33	858	44	-22	-16	-3
J95	20.37	1743	-2	-3 (*)	-23	5
2	20.75	1729	-1	-3 (*)	-23	3
3	18.62	1432	-3	-	-	9
4	17.73	1022	-3	-	-	6
J2004	19.25	840	-42	-10	-6	7
5	19.29	887	-41	-9	0	8
6	19.31	894	-40	-9	0	9
7	19.3	827	-44	-15	-6	5
9	19.35	925	-40	-8	-13	9
10	19.24	790	-42	-14	1	6
8	18.45	1112	4	-17	-5	2
D82	20.07	965	44	-30	-18	-1
D99	19.7	1177	7	-48	-44	-18

(*) : la crue de janvier 1995 présente à Saumur une pointe de longue durée (plusieurs jours) et relativement plate, l'instant du maximum réel se situe à la fin de la partie plate, c'est pourquoi le décalage n'est pas significatif dans ce cas.

L'analyse de ces tableaux montre :

- Entre la crue de référence de janvier 2004 et les scénarios 5,6,7,9 et 10 :

Le renforcement de la crue sur la branche Mayenne (scénario 5 : renforcement crue Oudon) avance l'instant de la pointe de crue dans les BVA de 2 à 3 heures. Le retard de la crue de la Mayenne (scénario 6 : Oudon seul, ou scénario 9 : Oudon + Mayenne) réduit cette avance à 1 à 2 heures.

Le retard de la crue de la Sarthe (scénario 7) ou du Loir (scénario 10) retarde la pointe de crue dans les BVA, conduisant à une quasi concomitance avec la pointe à Angers.

On constate également que la crue de la Loire arrive plus tard pour la crue de janvier 2004 que pour les autres crues (environ 15 à 20 heures plus tard), conduisant à des conditions de concomitance plus favorables pour l'écoulement de la Maine. Néanmoins, la cote maximale dans les BVA est directement liée à la pointe de crue dans la Loire et pas à la pointe de débit dans les BVA (on constate un écart d'environ 42 heures entre la pointe de débit et la pointe de niveau en amont de la Maine pour cette crue, la pointe de débit passant bien avant la pointe de niveau).

- En cas d'incidence forte de la Loire (scénario 1, crues janvier 1994, décembre 1982 et décembre 1999), le niveau maximum dans les BVA se produit après l'instant du

maximum à Angers. Pour ces crues, la pointe de la Loire entre les Ponts de Cé et Montjean-sur-Loire se produit avant la pointe à Angers.

Le maximum en débit à Angers se produit après le passage du maximum en cote (environ 2 jours plus tard pour ces crues). Cela correspond à la pointe de débit générée par le déstockage.

- Entre le scénario 2 et la crue de référence de janvier 1995, une légère réduction du décalage entre la pointe de la Loire et la pointe à Angers et pas de modification de l'écart dans les BVA. Pour ces crues, le maximum de débit à Angers est proche du maximum de cote à Angers.
- En l'absence de crue de Loire (scénarios 3 et 4), une incidence de la crue de la Maine générant un maximum sur la Loire qui se produit après la pointe de crue de la Maine (respectivement +3 et +4 heures jusqu'aux Ponts de Cé, + 6 et 9heures à Montjean-sur-Loire).

7. ANALYSE DES ECOULEMENTS DANS DURTAL

Nous présentons une description des conditions d'écoulement dans Durtal, et en particulier l'impact de la rue Saint-Léonard, du remblai de la RN 23 et des ouvrages de décharge existants. Cette analyse est effectuée sur les conditions d'écoulement au moment du maximum de la crue, pour les crues de calage et la crue centennale (scénario 3). L'annexe C5 présente les schémas des écoulements dans Durtal pour les crues de janvier 2004, janvier 1995 et pour le scénario 3 (crue centennale du Loir).

7.1. CRUE DE JANVIER 1994

La crue de 1994 a atteint une hauteur de 6,02 m au pont de Verdun à Angers (période de retour estimée à 10 ans). C'est une crue forte de la Loire mais faible de la Maine et de ses affluents.

Le débit de pointe de l'hydrogramme de crue du Loir est de 159 m³/s.

Il n'y a pas de débordement dans le lit majeur rive gauche.

La perte de charge dans le lit mineur (linéaire + singulière) entre l'amont et l'aval du pont de la RN 23 est de 13 cm.

7.2. CRUE DE DECEMBRE 1982

La crue de 1982 a atteint une hauteur de 6,37 m au pont de Verdun à Angers (période de retour estimée entre 20 et 50 ans). C'est une crue forte de la Loire, assez forte de la Mayenne mais plutôt faible de la Sarthe et du Loir.

Le débit de pointe de l'hydrogramme de crue du Loir est de 224 m³/s.

On obtient de faibles débordements à l'amont du seuil de Durtal (environ 14 m³/s) en lit majeur rive gauche.

Tout le débit du lit majeur transite sous les ouvrages de décharge situés sous la rue St Léonard. Il n'y a pas de débordement sur la rue. La différence de cote entre l'amont et l'aval de la rue Saint-Léonard est faible (2cm).

La différence de cote entre l'amont et l'aval de la RN 23 (perte de charge linéaire et perte de charge singulière) est de 18 cm en lit mineur et de 13 cm en lit majeur. La perte de charge singulière causée par le pont est de 14 cm en lit mineur.

Il transite environ 14 m³/s sous l'ouvrage de décharge en rive gauche sous la RN 23, soit 9% du débit amont.

7.3. CRUE DE JANVIER 2004

La crue de 2004 a atteint une hauteur de 5,63 m au pont de Verdun à Angers (période de retour estimée entre 5 et 10 ans). C'est une crue relativement faible de la Loire mais assez forte du Loir (période de retour estimée entre 20 et 50 ans à Durtal).

Le débit de pointe de l'hydrogramme de crue du Loir est de 375 m³/s.

On constate un débordement important à l'amont du seuil de Durtal (environ 57 m³/s), dont 32 m³/s franchissent la rue Saint-Léonard. Le reste du débit retourne dans le lit mineur en amont et au droit de la rue Saint-Léonard. La rue Saint-Léonard est submergée.

La différence de cote entre l'amont et l'aval de la rue Saint-Léonard est faible : 3cm.

La différence de cote entre l'amont et l'aval du pont de la RN 23 (perte de charge linéaire et perte de charge singulière) est de 31 cm en lit mineur et de 39 cm en lit majeur. La perte de charge singulière causée par le pont est de 25 cm en lit mineur.

Il transite environ 32 m³/s sous l'ouvrage de décharge en rive gauche sous la RN 23, soit 9% du débit amont.

7.4. CRUE DE JANVIER 1995

La crue de 1995 a atteint une hauteur de 6,66 m au pont de Verdun à Angers (période de retour estimée à 100 ans). C'est une crue très forte de la Maine et de ses affluents (crue de période de retour supérieure à 50 ans sur le Loir à Durtal) et relativement faible de la Loire.

Le débit de pointe de l'hydrogramme de crue du Loir est de 455 m³/s.

On constate un fort débordement en rive gauche à l'amont du seuil de Durtal (87 m³/s), dont environ 42m³/s franchissent la rue Saint-Léonard. Le reste du débit retourne dans le lit mineur.

La différence de cote entre l'amont et l'aval de la rue Saint-Léonard est faible(1 cm).

La différence de cote entre l'amont et l'aval du pont de la RN 23 (perte de charge linéaire et perte de charge singulière) est de 38 cm en lit mineur et de 47 cm en lit majeur. La perte de charge singulière causée par le pont est de 33 cm en lit mineur.

Il y a assez peu d'échanges de débit lit majeur-lit mineur entre la rue Saint-Léonard et la RN 23.

Le débit transitant sous l'ouvrage de décharge rive gauche sous la RN 23 est de 40 m³/s, soit 9% du débit amont.

7.5. CRUE CENTENNALE DU LOIR : SCENARIO 3

Les résultats présentés ci-dessous correspondent à la modélisation d'une crue centennale du Loir et de la Sarthe en faisant l'hypothèse que la Loire à Saumur, l'Oudon et la Mayenne ne sont pas en crue (scénario 3).

Le débit de pointe de l'hydrogramme de crue du Loir est de 550 m³/s.

121 m³/s débordent en amont du seuil de Durtal, dont 51 m³/s franchissent la rue Saint-Léonard.

A l'amont de la rue, la cote du lit majeur est supérieure de 6 cm à celle du lit mineur.

La différence de cote entre l'amont et l'aval de la rue St Léonard est faible (1 cm).

La différence de cote entre l'amont et l'aval du pont de la RN 23 (perte de charge linéaire et perte de charge singulière) est de 47 cm en lit mineur et de 58 cm en lit majeur. La perte de charge singulière causée par le pont est de 41 cm en lit mineur.

Il transite environ 47 m³/s sous l'ouvrage de décharge en rive gauche sous la RN 23, soit 9% du débit amont.

7.6. CONCLUSION

L'exploitation des résultats fait ressortir l'incidence prépondérante du pont et du remblai de la RN 23 sur les écoulements en amont, jusqu'en amont de la rue Saint-Léonard. La figure en annexe C3 montre la différence de hauteur d'eau dans le lit

mineur entre l'amont et l'aval du pont de la RN23 en fonction du débit amont. Plus le débit est fort, plus l'incidence du pont et du remblai de la RN23 est importante, et donc plus la différence de hauteur est importante.

Les ouvrages de décharge sous la rue Saint-Léonard permettent le passage de faibles débits de débordement sans submersion de la rue. Pour des crues plus importantes, la rue est submergée. En cas de forte crue, l'incidence aval due à la présence du remblai de la RN 23 est très forte. La rue Saint-Léonard elle-même avec ses ouvrages de décharge, crée une perte de charge supplémentaire négligeable par rapport à celle du remblai de la RN 23 (1 à 3 cm contre 33 à 41 cm pour les fortes crues). Cette perte de charge serait certainement plus importante sans cette incidence aval.

8. CONCLUSIONS

L'étape d'analyse et de compréhension des phénomènes hydrauliques a permis d'analyser en détail le fonctionnement hydraulique des BVA, en relation avec la Loire. Cette analyse, qui s'appuie sur la comparaison de scénarios hydrologiques contrastés basés sur des crues réelles ou synthétiques, nous permet de mieux comprendre les interactions complexes entrant en jeu lors des crues.

Le rôle de la Loire est prépondérant pour expliquer le comportement hydraulique des crues dans les BVA. Les deux scénarios théoriques 3 et 4, représentant des crues centennales soit de la Mayenne et de l'Oudon, soit de la Sarthe et du Loir, sans crue de Loire montrent qu'en l'absence de crue de Loire, les niveaux atteints dans les BVA et à Angers restent peu importants, du moins dans la gamme de débits étudiés (1400 m³/s en Maine pour le scénario 3 à comparer aux 1800 m³/s obtenus en Maine pour la crue de janvier 1995, avec un écart en cote de 1.8m à Angers entre les deux crues).

La partie aval des BVA fonctionne comme une bassine qui peut stocker des volumes très importants, et qui est généralement soumise à une forte influence aval.

Le volume total de stockage disponible est de l'ordre de 370 millions de m³ pour la cote 21 m NGF, et 426 millions de m³ pour la cote 21.5 m NGF. La cote maximale atteinte pour la crue de janvier 1995 est comprise entre 21 m NGF et 21.5 m NGF dans le secteur aval des BVA. Ce volume se répartit pour près de la moitié dans la partie aval de la Sarthe (de Briollay à Chateauneuf), 18% sur le Loir jusqu'à Seiches-sur-le-Loir et 18% entre Ecoflant, la confluence Sarthe-Mayenne et la Maine.

En l'absence d'influence aval, on constate un étalement des hydrogrammes de crue amont, en particulier des hydrogrammes de la Mayenne qui peuvent s'amortir en grande partie dans la basse vallée de la Sarthe. L'hydrogramme résultant en sortie de la bassine (amont de la Maine) a alors une forme lissée dans laquelle les variations de débits amont sont très amorties. Le transit de ces hydrogrammes de crue dans les BVA est très lent du fait des zones d'expansion très importantes.

En cas d'influence aval à cause d'un niveau haut en Loire, le fonctionnement est plus perturbé et l'on assiste à un surstockage d'une partie de la crue dans les BVA et à un amortissement supplémentaire du débit dans les BVA pendant la phase de montée de crue, du fait de l'impossibilité de transiter la totalité du débit vers l'aval. Dès que les conditions aval deviennent plus favorables, le débit évacué augmente à nouveau, provoquant une phase de déstockage qui peut conduire à un débit aval parfois un peu plus élevé que le débit maximum entrant pendant la montée de crue (cas des crues avec très forte incidence aval comme le scénario 1).

L'instant d'occurrence du maximum à Angers est toujours lié à l'instant d'occurrence de la cote maximale en Loire au voisinage de la confluence, alors qu'il peut y avoir un décalage important entre l'occurrence du niveau maximum à Angers et l'occurrence du débit maximum.

La concomitance plus ou moins grande entre la crue de la Loire et celles des affluents de la Maine joue sur l'importance du stockage. Par exemple, pour la crue de janvier 2004, la crue de Loire arrive plus tard, le phénomène de stockage-déstockage est apparemment réduit (pas de débit très important pendant la phase de déstockage).

En cas de forte crue de Loire seule (cas du scénario 1), associée à une crue faible de Maine, l'écoulement dans la Maine est bloqué par l'aval et les niveaux atteints dans les BVA sont très importants. Cependant, il ne s'agit pas d'un écoulement de la Loire dans la Maine. Cette configuration peut se produire pour des conditions de débit très faibles

en Maine (absence de crue), comme cela est obtenu en début de la crue de janvier 2004 (décembre 2003), où une petite crue de Loire (3600 m³/s) associée à l'absence de crue en Maine conduit à une entrée de débit de 150 m³/s en Maine.

Le rôle de certains ouvrages générant des pertes de charge importantes influence également les niveaux maximaux atteints dans les BVA. Les ouvrages ayant les incidences les plus importantes sont le pont de Verdun sur la Maine à Angers, le pont de la RD 89 à Chateauneuf/Sarthe, associé au remblai traversant le lit majeur et le pont de la RN 23 à Durtal.

La comparaison des paramètres hydrauliques dans les différentes rivières met en évidence des comportements très contrastés de la Mayenne et de l'Oudon d'une part, et de la Sarthe et du Loir d'autre part. La Mayenne et l'Oudon présentent des pentes hydrauliques plus importantes, avec des écoulements plus rapides et des temps de propagation nettement plus courts, à distance comparable. La Sarthe et le Loir ont des comportements voisins, avec une pente un peu plus importante sur la partie amont du Loir que sur la Sarthe. Ce constat est en correspondance avec l'analyse des volumes de stockage, qui met en évidence la faiblesse du volume disponible dans la vallée de la Mayenne en amont de Cantenay Epinard.

D. MODELISATION DES AMENAGEMENTS

TABLE DES MATIERES

D. MODELISATION DES AMENAGEMENTS

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE D'AMENAGEMENTS	1
2. PRESENTATION DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT	2
2.1. Scénario A : Elargissement de la section d'écoulement au droit du Pont de Verdun : ajout d'une arche	2
2.2. Scénario B : Elargissement de la section d'écoulement au droit du pont de Verdun : Remplacement du pont de Verdun	3
2.3. Scénario C : Siphon sous la Maine	4
2.4. Scénario D : Elargissement de la Maine dans la traversée d'Angers	5
2.5. Scénario E : Simulation des aménagements prévus sur le bassin amont de l'Oudon	6
3. SIMULATIONS DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT	7
3.1. Scénarios A, B, C et D	7
3.2. Scénario E	9
4. CONCLUSIONS	10

Liste des tableaux

Tableau 1 Impact sur les cotes maximales des scénarios d'aménagement A,B,C et D à Angers et Monjean.....	7
--	---

Liste des figures

Figure 1 : Scénario A : Ajout d'une arche au pont de Verdun	2
Figure 2 : Scénario B : Remplacement du pont de Verdun	3
Figure 3 : Scénario C : Siphon sous la Maine.....	4
Figure 4 : Scénario D : Elargissement de la Maine dans la traversée d'Angers	5
Figure 5 : Hydrogrammes simulés pour le scénario E.....	6

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE D'AMENAGEMENTS

Plusieurs hypothèses d'aménagements souvent évoquées pour réduire les niveaux de crue à Angers et dans les BVA ont été testées. Les scénarios d'aménagements étudiés ont été définis en fonction des résultats de l'étape d'analyse et de compréhension des phénomènes hydrauliques réalisée précédemment.

- Scénario d'aménagement A : Elargissement de la section d'écoulement au droit du pont de Verdun : ajout d'une arche.
- Scénario d'aménagement B : Elargissement de la section d'écoulement au droit du pont de Verdun : remplacement du pont de Verdun par un nouveau pont ne générant pas de perte de charge singulière.
- Scénario d'aménagement C : Siphon sous la Maine dans Angers.
- Scénario d'aménagement D : Elargissement de la Maine dans la traversée d'Angers.

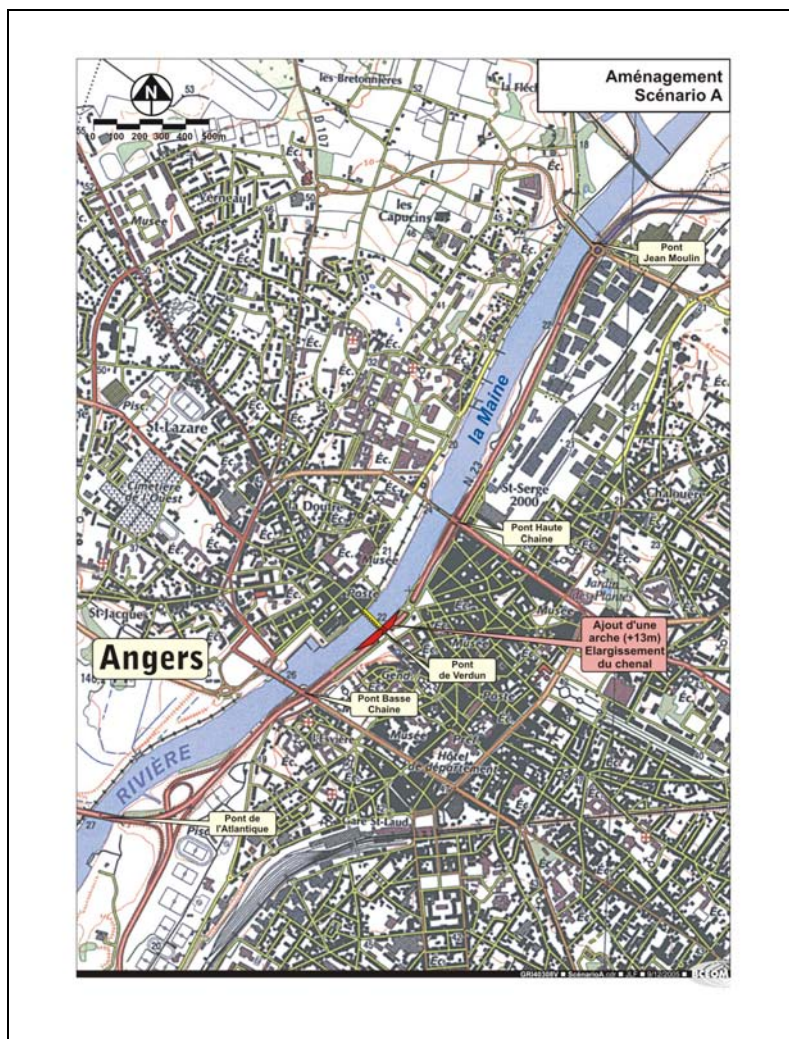
D'autre part, des simulations ont été effectuées pour analyser d'incidence des projets de réduction des crues de l'Oudon, sur le bassin amont. Ces simulations font l'objet d'un scénario d'aménagement dénommé E.

2. PRESENTATION DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT

2.1. SCENARIO A : ELARGISSEMENT DE LA SECTION D'ÉCOULEMENT AU DROIT DU PONT DE VERDUN : AJOUT D'UNE ARCHE

La Figure 1 présente le plan de situation de l'aménagement simulé. La section d'écoulement actuelle du pont de Verdun est de 900m² pour la cote 20.38 m NGF (cote atteinte en janvier 1995 en aval du Pont de Verdun). Pour cette cote, la section mouillée ajoutée est de 74 m², soit un accroissement de section mouillée de 8%. Cette section correspond à la section actuelle des arches principales. L'ajout d'une arche s'effectuerait en rive gauche, associé à un élargissement localisé du chenal d'écoulement de la Maine.

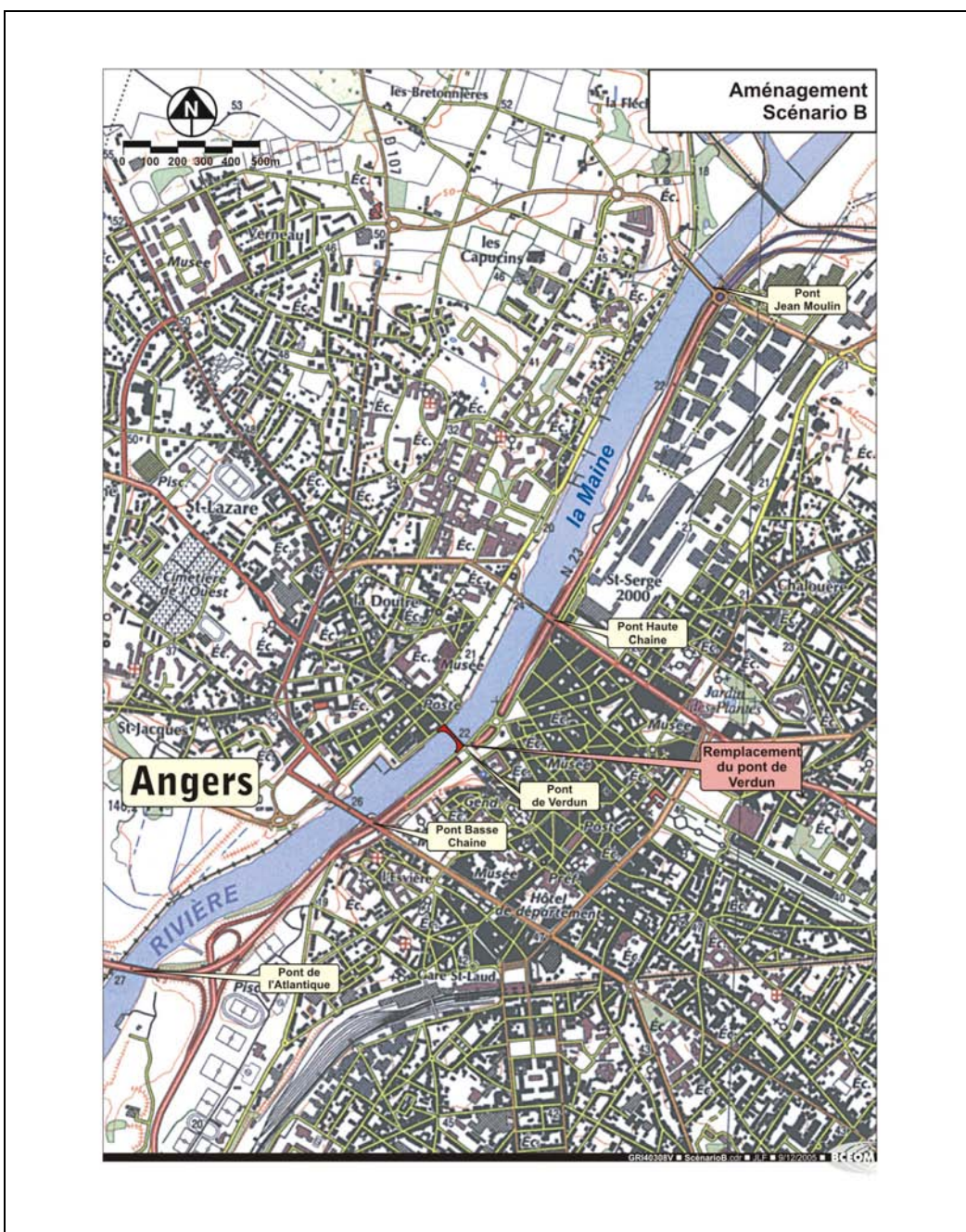
Figure 1 : Scénario A : Ajout d'une arche au pont de Verdun



2.2. SCENARIO B : ELARGISSEMENT DE LA SECTION D'ÉCOULEMENT AU DROIT DU PONT DE VERDUN : REMPLACEMENT DU PONT DE VERDUN

La Figure 2 présente le plan de situation de l'aménagement simulé pour le scénario B. Le pont de Verdun a été supprimé, en supposant son remplacement par un pont ne créant aucun remous. Pour ce scénario, la section mouillée actuelle de 900 m² environ, rétrécie par la présence des arches massives, est augmentée de plus de 30%, pour atteindre 1200 m² environ.

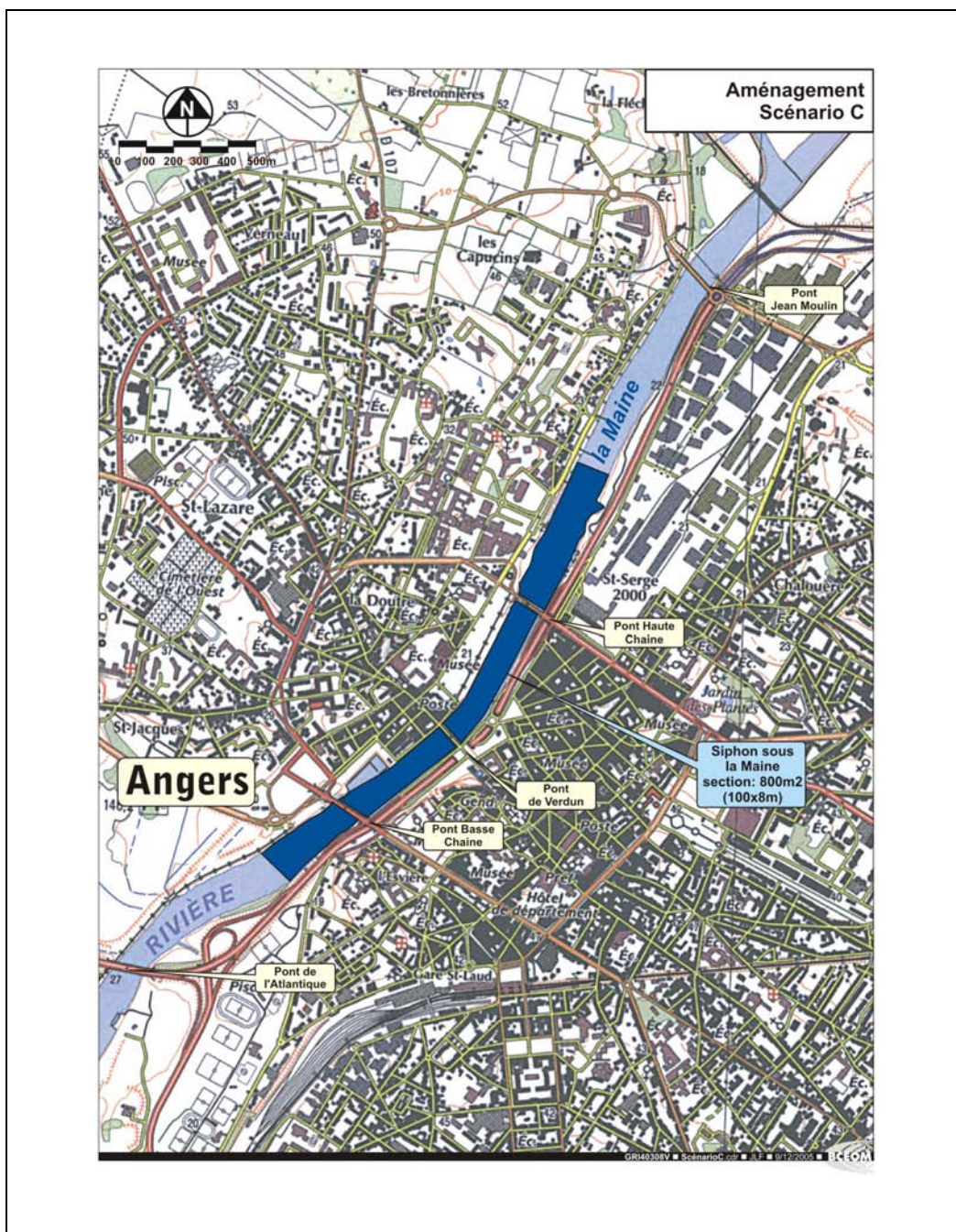
Figure 2 : Scénario B : Remplacement du pont de Verdun



2.3. SCENARIO C : SIPHON SOUS LA MAINE

La Figure 3 présente le plan de situation de l'aménagement simulé pour le scénario C. Ce scénario consiste à réaliser un siphon sous la Maine dans la traversée d'Angers, entre l'amont du pont de Haute Chaîne (face à l'hôpital) et l'aval du pont de Basse Chaîne. La longueur de l'ouvrage est de 2km, avec une section mouillée de 800m².

Figure 3 : Scénario C : Siphon sous la Maine

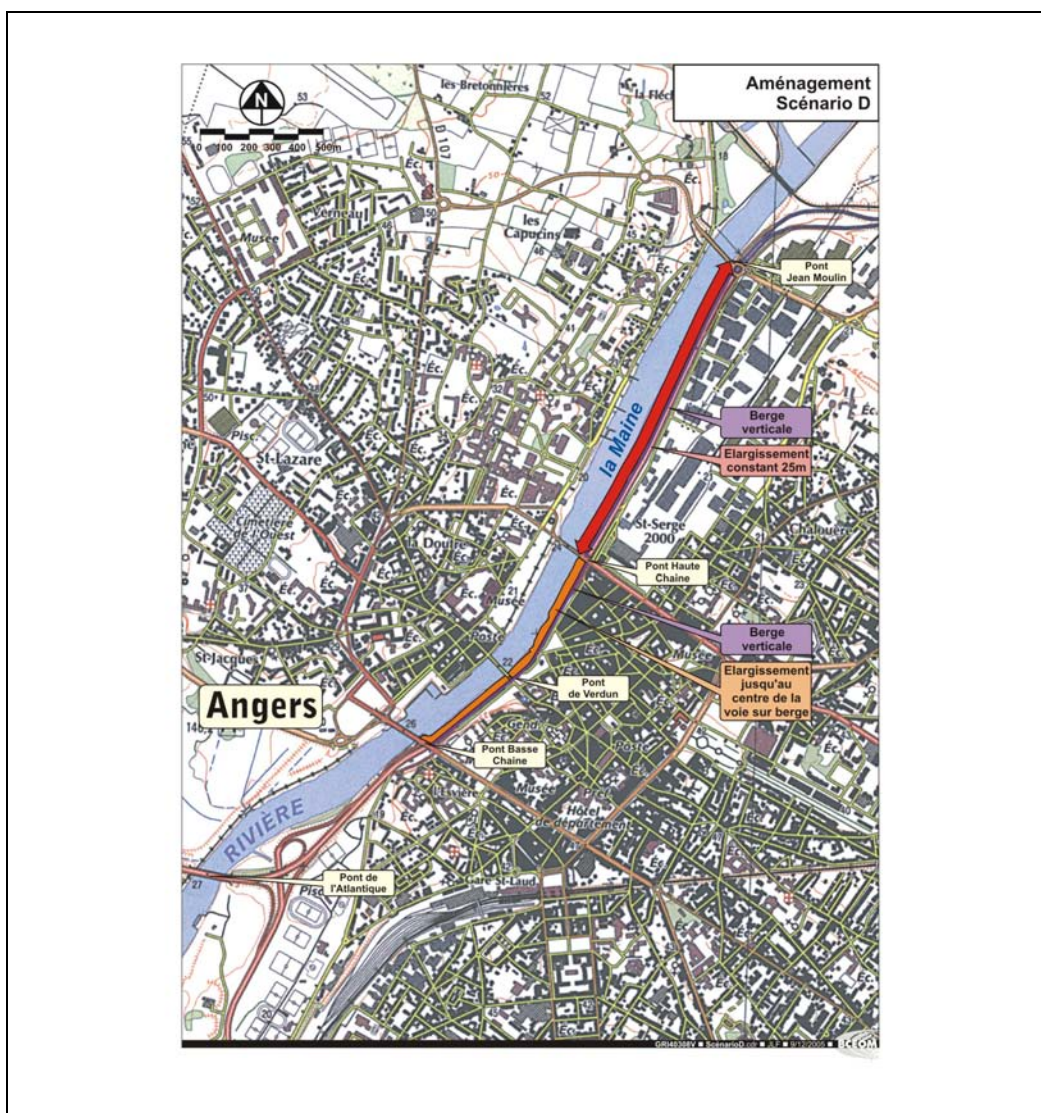


2.4. SCENARIO D : ELARGISSEMENT DE LA MAINE DANS LA TRAVERSEE D'ANGERS

La Figure 4 présente le plan de situation de l'aménagement simulé pour le scénario D. L'élargissement de la Maine s'effectue entre le pont Jean Moulin et le pont de Basse Chaîne. Entre le pont Jean Moulin et le pont de Haute Chaîne, l'aménagement consiste en un élargissement constant de 25m de large en rive gauche de la Maine, avec une nouvelle berge verticale en bordure de l'aménagement. Entre le pont de Haute Chaîne et le pont de Basse Chaîne, l'élargissement s'effectue jusqu'au centre de la voie sur berge, soit avec une largeur variable de 20 à 25m, et est associé également à une nouvelle berge verticale. La largeur d'écoulement est également augmentée au droit des ponts.

Globalement, ce scénario correspond à l'ajout de 180m² de section mouillée aux sections d'écoulement actuelles.

Figure 4 : Scénario D : Elargissement de la Maine dans la traversée d'Angers



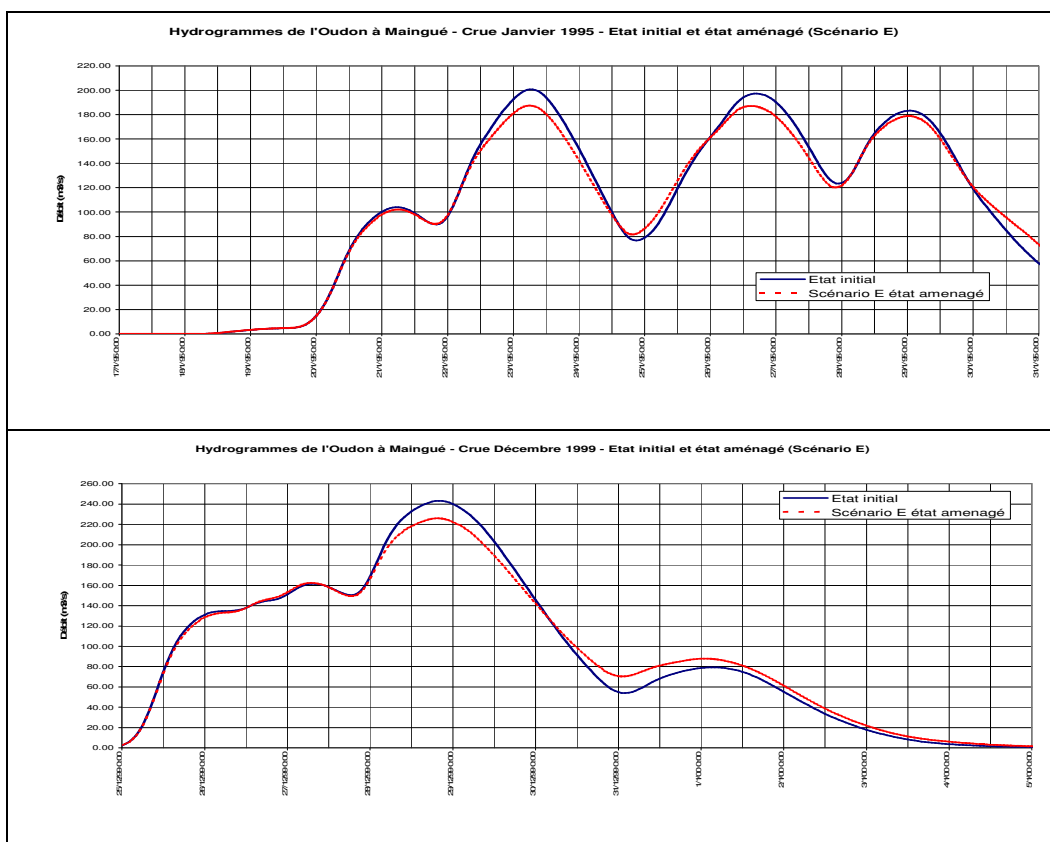
2.5. SCENARIO E : SIMULATION DES AMENAGEMENTS PREVUS SUR LE BASSIN AMONT DE L'OUDON

Ce scénario correspond à la simulation des hydrogrammes de crue amont de l'Oudon à Maingué (point d'entrée du modèle hydraulique STREAM des BVA), prenant en compte les aménagements prévus sur le bassin de l'Oudon. Les hydrogrammes d'entrée sont issus des résultats de l'étude réalisée par le SYMBOLI¹, ils concernent les crues de janvier 1995 et décembre 1999. Les simulations ont été effectuées avec les hydrogrammes fournis par le SYMBOLI pour la situation actuelle et la situation projetée, afin que la comparaison s'effectue sur une base cohérente. Il s'agit en effet dans les deux cas d'hydrogrammes calculés et pour la situation actuelle, les hydrogrammes sont différents des hydrogrammes observés qui ont été pris en compte dans le modèle STREAM.

Les hydrogrammes des crues de janvier 1995 et décembre 1999 fournis en entrée sur l'Oudon à Maingué sont représentés en Figure 5, pour la situation actuelle et la situation aménagée. Les autres entrées du modèle STREAM restent identiques à celles prises en compte pour le calage du modèle.

Entre la situation actuelle et la situation aménagée, les débits de pointe des hydrogrammes sont réduits d'environ 6%, pour les deux premières pointes de la crue de janvier 1995, et de 3% pour la troisième pointe. Pour la crue de décembre 1999, le débit de pointe est réduit de 7%.

Figure 5 : Hydrogrammes simulés pour le scénario E



¹ « Etude recherche de surstockage sur les sous bassins versants de l'Hière, du Chéran et de l'Usure » (SYMBOLI, ISL, 2005)

3. SIMULATIONS DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT

3.1. SCENARIOS A, B, C ET D

Ces quatre scénarios concernent des aménagements ayant pour objectifs d'améliorer les écoulements dans la traversée d'Angers. Les résultats sont analysés conjointement.

Les simulations de ces scénarios d'aménagement ont été réalisées pour les quatre crues suivantes :

- Janvier 1995
- Scénario 2 : crue de janvier 1995 avec renforcement de la crue de la Loire de manière à atteindre un débit centennal à Montjean
- Décembre 1999
- Décembre 1982

Le Tableau 1 présente les impacts de chaque scénario d'aménagement sur les cotes maximales à Angers (amont pont de Verdun) et à Montjean-sur-Loire. Les tableaux complets des écarts sur les cotes maximales en différents points des BVA et de la Loire sont fournis en annexe D1.

Tableau 1 Impact sur les cotes maximales des scénarios d'aménagement A,B,C et D à Angers et Monjean

	Janvier 1995	Scénario 2	Décembre 1999	Décembre 1982
Angers Amont pont de Verdun				
Scénario A	-5 cm	-4 cm	-3 cm	-1 cm
Scénario B	-24 cm	-23 cm	-12 cm	-5 cm
Scénario C	-26 cm	-24 cm	-15 cm	-6 cm
Scénario D	-4 cm	-4 cm	-2 cm	-1 cm
Montjean-sur-Loire				
Scénario A	+1 cm	+1 cm	0 cm	0 cm
Scénario B	+3 cm	+3 cm	+1 cm	+1 cm
Scénario C	+4 cm	+1 cm	+4 cm	+1 cm
Scénario D	+1 cm	+1 cm	0 cm	0 cm

Les profils en long des écarts maximaux comparés pour les quatre scénarios et pour chaque crue simulée sont fournis également en annexe D1.

Les abaissements des cotes maximales les plus importants sont obtenus pour les scénarios B et C, qui suppriment l'effet du remous dû au pont de Verdun. L'écart maximal est de 24 et 26cm respectivement pour les scénarios B et C, à l'amont

immédiat du pont de Verdun pour la crue de janvier 1995. Pour la crue de janvier 1995, l'impact se fait sentir dans l'ensemble des BVA en s'amortissant vers l'amont. Les impacts sont différents en amont pour les deux scénarios, le scénario C ayant une incidence plus importante. En effet, le scénario B ne joue que sur le remous dû au pont de Verdun qui ne devient significatif qu'au voisinage de la pointe de crue de la Maine, alors que le scénario C a une incidence sur une plus longue durée et contribue à réduire le volume stocké dans les BVA.

IMPACTS HYDRAULIQUES DU SCENARIO C :

Les impacts hydrauliques du scénario C pour la crue de janvier 1995 sont les suivants :

- sur la Maine, la réduction est de 32cm au droit du pont SNCF d'Angers,
- sur la Mayenne, la réduction est de 27cm à Montreuil-Juigné, de 15cm à la confluence avec l'Oudon et de 10cm à Chambellay,
- sur la Sarthe, la réduction est de 27cm à Cheffes, 18cm à Chateauneuf, 12cm à Brissarthe et 2cm à Morannes,
- sur le Loir, la réduction est de 27cm à Villevêque, 20cm à Seiches, 17cm à Montreuil/loir et 1cm à Durtal,

Pour le scénario 2, l'impact est réduit d'environ 2cm par rapport à l'impact obtenu pour la crue de janvier 1995.

Pour les crues de décembre 1999 et décembre 1982, la réduction des cotes maximales est plus faible : respectivement -15cm et -6cm en amont du pont de Verdun. En amont, l'abaissement maximal est de 20cm pour la crue de décembre 1999, et de 8cm pour la crue de décembre 1982.

IMPACTS HYDRAULIQUES DU SCENARIO B :

Les impacts hydrauliques du scénario B pour la crue de janvier 1995 sont les suivants :

- sur la Maine, la réduction est de 20cm au droit du pont SNCF d'Angers,
- sur la Mayenne, la réduction est de 16cm à Montreuil-Juigné, de 9cm à la confluence avec l'Oudon et de 6cm à Chambellay,
- sur la Sarthe, la réduction est de 17cm à Cheffes, 13cm à Chateauneuf, 9cm à Brissarthe et 1cm à Morannes,
- sur le Loir, la réduction est de 17cm à Villevêque, 13cm à Seiches, 11cm à Montreuil/loir et 1cm à Durtal,

Pour le scénario 2, l'impact est réduit d'environ 2cm par rapport à l'impact obtenu pour la crue de janvier 1995.

Pour les crues de décembre 1999 et décembre 1982, la réduction des cotes maximales est plus faible : respectivement -12cm et -5cm en amont du pont de Verdun. En amont, l'abaissement maximal est de 11cm pour la crue de décembre 1999, et de 5cm pour la crue de décembre 1982.

En aval du pont de Verdun, on constate pour les deux scénarios B et C un rehaussement des cotes maximales de quelques centimètres : +5cm à +6cm environ sur la Maine en aval du pont de Verdun, +3cm à +4cm sur la Loire de la confluence avec la Maine jusqu'à Montjean-sur-Loire.

L'accroissement des cotes maximales en aval d'Angers s'explique par la réduction de l'amortissement du débit dans les BVA due à l'absence de surcote provoquée par le pont de Verdun. Les débits calculés dans la Maine en amont d'Angers sont en effet légèrement supérieurs aux débits calculés pour l'état actuel (voir graphes des hydrogrammes calculés fournis en annexe D1).

IMPACTS HYDRAULIQUES DES SCENARIOS A ET D

Pour les scénarios A et D, les abaissements des cotes maximales sont plus faibles : respectivement -5cm et -4cm en amont du pont de Verdun pour la crue de janvier 1995. Pour le scénario A, cet abaissement se réduit vers l'amont, et est de l'ordre de 3 à 4cm dans les BVA. Pour le scénario D, l'abaissement maximal est obtenu en amont du pont SNCF d'Angers : -9cm, puis il est de l'ordre de -6cm à -8cm dans les BVA.

3.2. SCENARIO E

La comparaison des cotes maximales obtenues pour l'état initial et la situation aménagée montre (voir profils en long des écarts sur les cotes maximales en annexe D2) :

▪ Pour la crue de décembre 1999 :

- Un abaissement sur l'Oudon et sur la Mayenne, de 13 cm au maximum sur l'Oudon, qui se réduit vers l'aval et atteint 5cm à la confluence avec la Mayenne. Cet abaissement se transmet en amont sur la Mayenne jusqu'à Chambellay (-2cm au maximum), et sur l'aval jusqu'à l'écluse de Roussière (-3cm). En aval, il se produit une surélévation de +1cm jusqu'à la confluence avec la Sarthe.
- Un rehaussement de 1cm dans la partie aval des BVA, sur la Sarthe, le Loir et la Maine.

Ce rehaussement s'explique par le fait que la pointe de crue dans les BVA se produit au moment où arrive la pointe secondaire de l'Oudon, dont le débit est accru par les aménagements amont.

▪ Pour la crue de janvier 1995 :

- Un abaissement sur l'Oudon de 8cm à Maingué, puis réduit vers l'aval à 3cm à la Chapelle/Oudon, et inférieur à 1cm à la confluence avec la Mayenne.
- Un abaissement inférieur à 1cm sur la Mayenne, la Sarthe, le Loir et la Maine (de l'ordre de 0.5 à 0.7 cm).

C'est la réduction du débit de la troisième pointe de crue de l'Oudon, concomitante de la pointe de crue dans les BVA, qui permet ce gain sur les cotes maximales.

4. CONCLUSIONS

Les simulations effectuées avec le modèle sur plusieurs types de crue indiquent que l'influence des aménagements A, B, C et D étudiés sur les écoulements de crue serait très limitée à Angers et se réduirait vers l'amont.

Les aménagements permettant une amélioration des écoulements de la Maine avec un abaissement des cotes maximales dans la traversée d'Angers en amont du pont de Verdun, ont une incidence sur les cotes maximales :

- sur la Mayenne, l'incidence d'un abaissement de l'ordre de 25cm à Angers se transmet en amont jusqu'à Chambellay (-6 à -10cm),
- sur l'Oudon, l'incidence d'un abaissement se transmet jusqu'à Andigné (-6 à -11cm),
- sur la Sarthe, l'incidence d'un abaissement se transmet jusqu'à Brissarthe (-9 à -12cm) et est encore sensible jusqu'à Morannes (-1cm),
- sur le Loir, l'incidence d'un abaissement se transmet jusqu'à Montreuil/Loir (-11 à -17cm) et est encore sensible à Lézigné et Durtal (-1cm).

Ces abaissements sont obtenus pour la crue de janvier 1995, pour laquelle l'efficacité des aménagements est la plus importante.

L'incidence se réduit de l'aval vers l'amont, de manière progressive.

Selon le type d'aménagement, cette incidence est réduite plus ou moins rapidement dans les BVA. Pour le scénario C (siphon sous la Maine), l'incidence est plus importante sur l'ensemble des BVA que pour le scénario B, alors que les abaissements sur les cotes maximales obtenus à Angers sont similaires (-26 et -24cm). Cette incidence accrue pour le scénario C s'explique par une durée d'action prolongée du siphon pendant la crue, réduisant le volume stocké dans les BVA pendant la montée de crue. Le scénario B a une incidence sur une période plus courte pendant laquelle le remous du pont de Verdun est significatif en situation actuelle.

Les scénarios A et D ont des incidences plus faibles : -5 à -4cm en amont du pont de Verdun pour la crue de janvier 1995 et le scénario 2, cette incidence se reportant également en amont en s'atténuant sur l'ensemble des BVA.

Les aménagements augmenteraient légèrement le niveau de la Maine et de la Loire en aval.

En aval du pont de Verdun, les quatre scénarios A,B,C et D conduisent à une surélévation des cotes maximales de quelques centimètres (+6cm au maximum en aval du pont de Basse Chaîne pour le scénario C). Cette surélévation est due à un léger accroissement du débit de la Maine, du fait de la réduction du stockage amont dans les BVA.

Selon le type de crue, l'incidence de ces aménagements est plus ou moins sensible.

En cas de forte crue de Loire, les incidences seront moindres. Pour le scénario 2 pour lequel la crue de Loire est renforcée par rapport à la crue de janvier 1995, l'incidence est réduite de 1 à 2cm par rapport à celle obtenue pour la crue de janvier 1995. Pour une forte crue de Loire (crue décembre 1982), l'incidence est nettement plus faible (-5 et -6cm en amont du pont de Verdun pour les scénarios B et C).

L'analyse de l'incidence d'aménagements conduisant à des modifications des hydrogrammes amont sur l'Oudon (scénario E : aménagements sur le bassin de l'Oudon en vue de l'amortissement des hydrogrammes de crue) montre que la réduction des débits de pointe n'entraîne pas toujours une réduction des cotes maximales dans les BVA. En effet, les cotes maximales dans les BVA ne correspondent pas forcément à l'arrivée des pointes de crue de l'Oudon et un accroissement des débits en période de décrue de l'Oudon peut entraîner une surcote dans les BVA s'il se produit au moment de la pointe des crues dans les BVA.

Pour la crue de décembre 1999 par exemple, la réduction du débit de pointe de l'Oudon à Maingué du fait des aménagements amont, s'accompagne d'un accroissement des débits après la décrue, y compris pour une pointe de crue beaucoup plus faible, entraînant une légère surcote dans les BVA. Pour la crue de janvier 1995, la réduction des débits de pointe de l'Oudon de l'ordre de 3% pour la troisième pointe de crue, correspondant à la pointe de crue dans les BVA, entraîne dans ce cas un abaissement de la cote maximale dans la Maine à Angers de 1cm. Pour ces crues, les incidences restent très faibles et on peut considérer que les aménagements sur le bassin de l'Oudon n'ont pas d'impact significatif dans les BVA.

Lors de l'étape d'analyse des comportements hydrauliques, les résultats obtenus avec les scénarios 6, 9 et 10 (retards des crues de l'Oudon, la Mayenne, la Sarthe ou le Loir) ont montré que ces retards pouvaient entraîner des surcotes dans les BVA du fait des concomitances accrues entre les différents affluents de la Maine, mais également du fait du décalage induit par rapport à la crue de la Loire même si le débit de pointe global de la Maine est réduit.

Ralentissement des écoulements dans les BVA

Par ailleurs, des aménagements de nature à favoriser le ralentissement des écoulements dans les BVA (réalisation de haies par exemple) n'auront pas forcément de conséquences positives. En effet, tout obstacle à l'écoulement dans les BVA qui provoquerait un remous d'exhaussement transmettrait cette surcote vers l'amont, en l'atténuant. Le ralentissement pourrait cependant modifier le décalage entre les crues des différents affluents de la Maine et en cela pourrait améliorer les conditions d'écoulement pour certaines crues mais les conditions de concomitance avec la Loire resteront prépondérantes et les conséquences pourront être assez variables (cf partie C : Fonctionnement hydraulique des BVA).