

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

## TABLE DES MATIERES

---

<b>C.</b>	<b>FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE DES BASSES VALLEES ANGEVINES</b>	
<b>1.</b>	<b>OBJECTIFS DE L'ANALYSE HYDRAULIQUE</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>DEFINITION DES SCENARIOS POUR L'ANALYSE</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>COMPARAISON DES COTES MAXIMALES AVEC LES CRUES DE REFERENCE</b>	<b>4</b>
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
<b>4.</b>	<b>ANALYSE DES PROFILS EN LONG ET DES PERTES DE CHARGE DES OUVRAGES DANS LES BVA</b>	<b>12</b>
4.1.	Comparaison des profils en long dans les BVA	12
4.2.	Analyse de l'incidence des ouvrages	13
<b>5.</b>	<b>ANALYSE DU STOCKAGE/DESTOCKAGE ET DE LA PROPAGATION DES HYDROGRAMMES DANS LES BVA</b>	<b>14</b>
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
<b>6.</b>	<b>ANALYSE DES INCIDENCES RESPECTIVES DE LA LOIRE ET DE LA MAINE SUR LES BVA</b>	<b>20</b>
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
<b>7.</b>	<b>ANALYSE DES ECOULEMENTS DANS DURTAL</b>	<b>24</b>
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
<b>8. CONCLUSIONS</b>	<b>27</b>

#### 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
<b>Déc. 1982</b>	224	386	534	153	5350	6338	965
<b>Janv. 1994</b>	159	351	299	97	4750	5620	809
<b>Janv. 1995</b>	456	684	685	235	3510	5545	1743
<b>Déc. 1999</b>	360	561	543	232	3869	5151	1177
<b>Janv. 2004</b>	375	448	469	117	4080	4867	840

Les débits sont fournis en m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 93m<sup>3</sup>/s (pour atteindre le débit de période de retour 20 ans).
- Scénario 6 : débit Oudon augmenté de 93m<sup>3</sup>/s et retardé de 24h.
- Scénario 7 : Sarthe retardée de 24h.
- Scénario 9 : débit Oudon augmenté de 93m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s pour la crue de janvier 2004 à 925 m<sup>3</sup>/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
<b>Ecart cote pont amont Angers SNCF</b>	+ 6 cm	+ 9 cm	+ 7 cm	+ 14 cm	- 1 cm
<b>Ecart cote confluence Loire</b>	+ 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 1112m<sup>3</sup>/s pour le scénario 8, soit assez proche du débit de pointe du scénario 4 (1022 m<sup>3</sup>/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 (1750m<sup>3</sup>/s au lieu de 1170 m<sup>3</sup>/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<sup>ème</sup> position entre le seuil de Prigne et Seiches, en aval de Seiches, c'est le scénario 1 qui prend la 3<sup>ème</sup> 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 m<sup>3</sup>/s pour la crue de janvier 2001, 224 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s à Saumur en janvier 2004 au lieu de 1750m<sup>3</sup>/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<sup>ème</sup> 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, Chateauneuf + 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s de réduction du débit de pointe, pour un débit total de 600 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s environ, pour un débit total de 800 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s au lieu de 582 m<sup>3</sup>/s). Le débit maximum atteint pendant la phase de déstockage est augmenté : 857m<sup>3</sup>/s au lieu de 824 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s, pour un débit en Loire de l'ordre de 3000 m<sup>3</sup>/s. Le débit maximum entrant depuis la Loire est de l'ordre de 150 m<sup>3</sup>/s jusqu'en amont de la Maine, puis il s'atténue rapidement pour atteindre 20 m<sup>3</sup>/s à Briollay dans la Sarthe et disparaître en amont de Briollay.

## 5.2. VOLUMES DE STOCKAGE DANS LES BVA

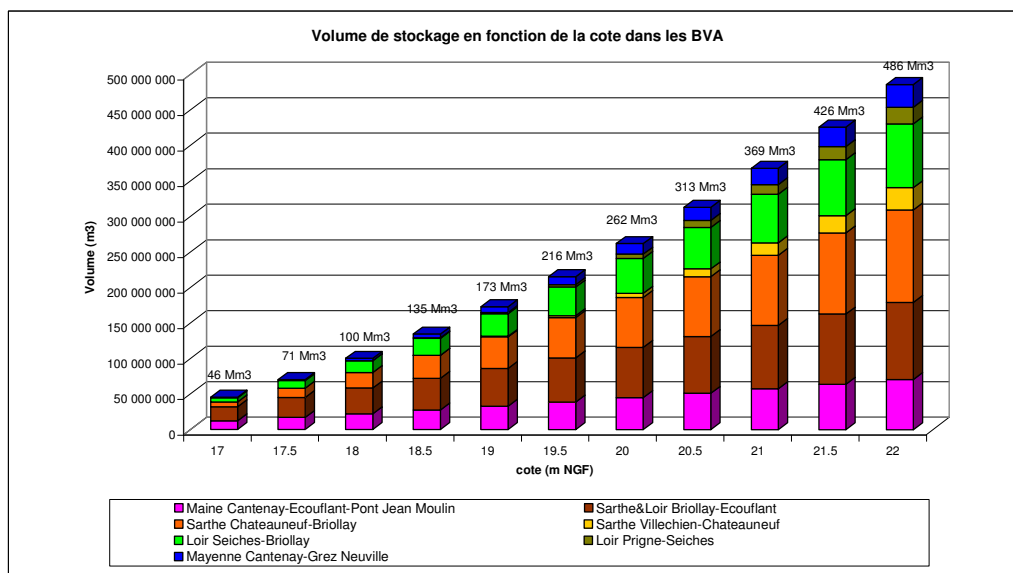
Le volume de stockage a été calculé par tranche de 50cm pour les cotes 17 à 22m NGF, pour les secteurs suivants :

- 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 Ecoouflant, 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, Ecoouflant 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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 Cante nay, la Sarthe à Eco uflant, 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	Ecouflant	Briollay	Cante nay
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 m<sup>3</sup>/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 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 m<sup>3</sup>/s.

On obtient de faibles débordements à l'amont du seuil de Durtal (environ 14 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s.

On constate un débordement important à l'amont du seuil de Durtal (environ 57 m<sup>3</sup>/s), dont 32 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s.

On constate un fort débordement en rive gauche à l'amont du seuil de Durtal (87 m<sup>3</sup>/s), dont environ 42m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s.

121 m<sup>3</sup>/s débordent en amont du seuil de Durtal, dont 51 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/s en Maine pour le scénario 3 à comparer aux 1800 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup> pour la cote 21 m NGF, et 426 millions de m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>/s) associée à l'absence de crue en Maine conduit à une entrée de débit de 150 m<sup>3</sup>/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

<b>1. OBJECTIFS DE L'ETUDE D'AMENAGEMENTS</b>	<b>1</b>
<b>2. PRESENTATION DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT</b>	<b>2</b>
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
<b>3. SIMULATIONS DES SCENARIOS D'AMENAGEMENT</b>	<b>7</b>
3.1. Scénarios A, B, C et D	7
3.2. Scénario E	9
<b>4. CONCLUSIONS</b>	<b>10</b>

#### 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.

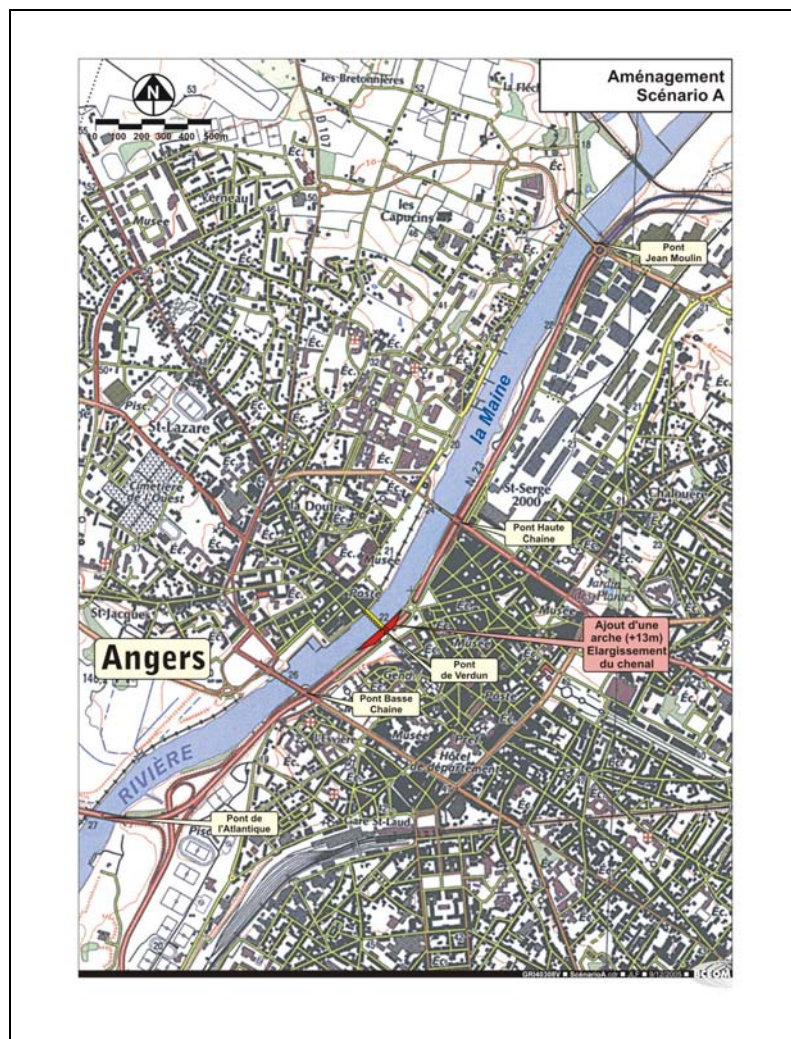
D'autre part, des simulations ont été effectuées pour analyser d'incidence des projets de réduction des crues de l'Oudon, sur le bassin amont. Ces simulations font l'objet d'un scénario d'aménagement dénommé E.

## 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 900m<sup>2</sup> 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 m<sup>2</sup>, 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.

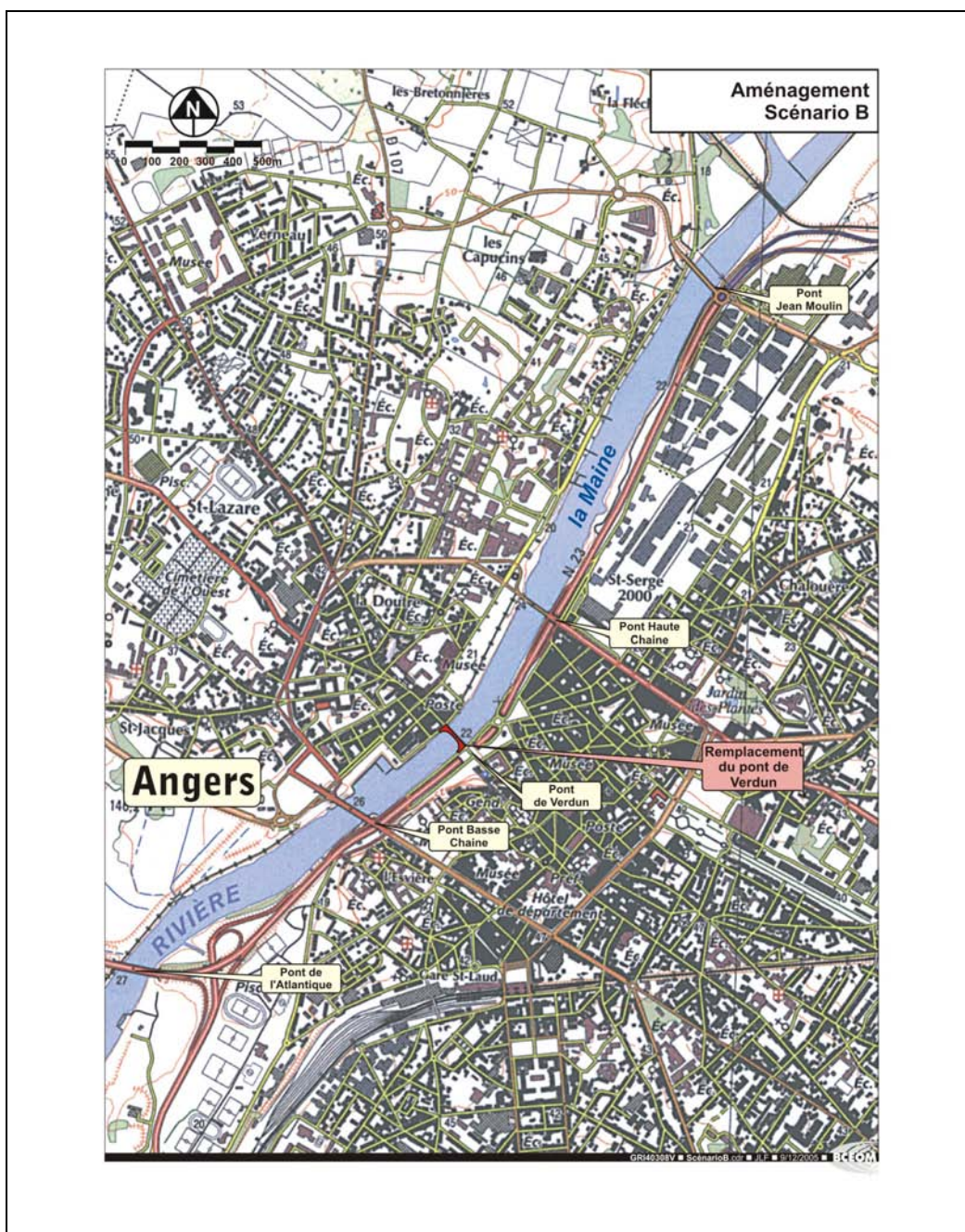
Figure 1 : Scénario A : Ajout d'une arche au pont de Verdun



## 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 m<sup>2</sup> environ, rétrécie par la présence des arches massives, est augmentée de plus de 30%, pour atteindre 1200 m<sup>2</sup> environ.

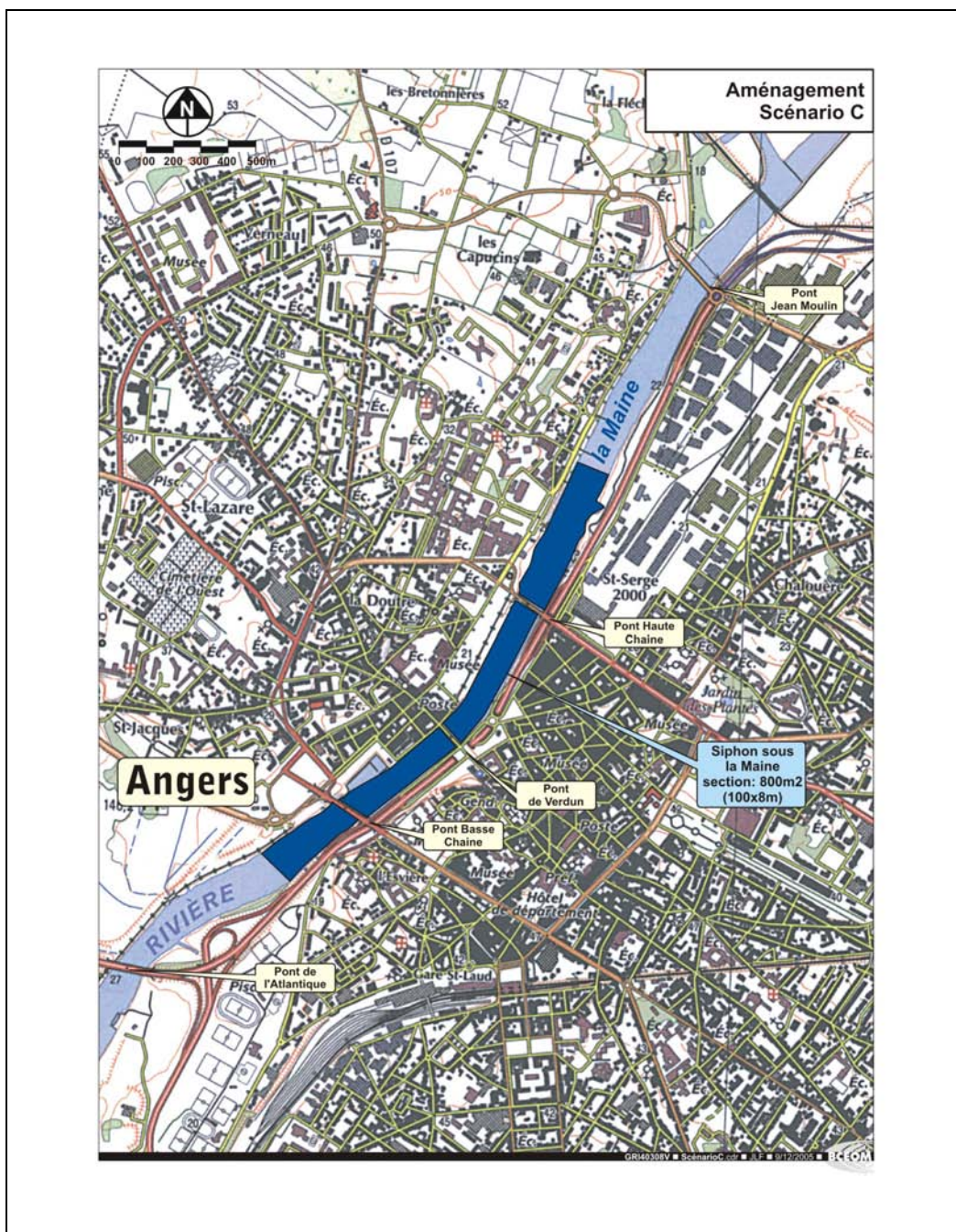
Figure 2 : Scénario B : Remplacement du pont de Verdun



### 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 800m<sup>2</sup>.

Figure 3 : Scénario C : Siphon sous la Maine

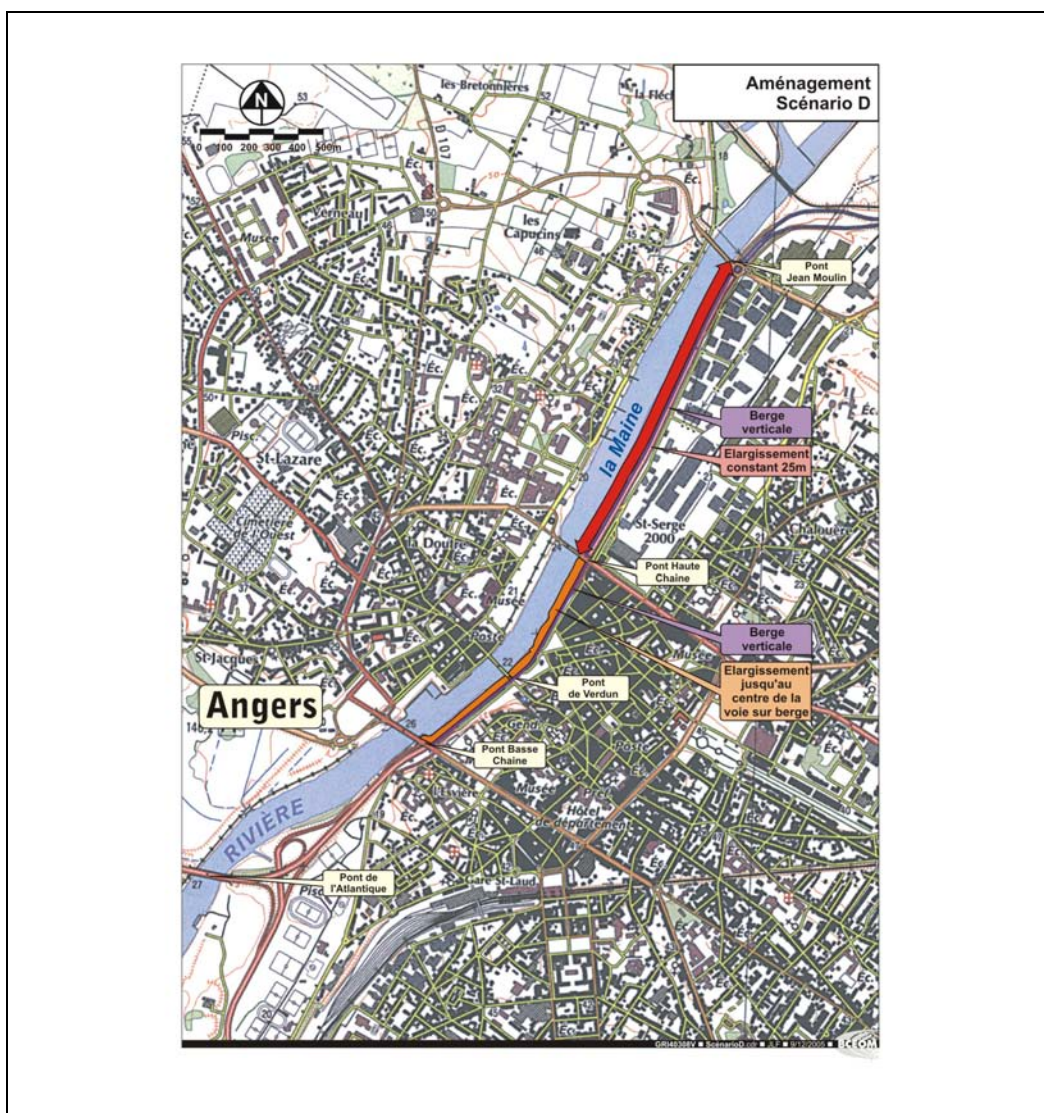


## 2.4. SCENARIO D : ELARGISSEMENT DE LA MAINE DANS LA TRAVERSEE D'ANGERS

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 180m<sup>2</sup> de section mouillée aux sections d'écoulement actuelles.

Figure 4 : Scénario D : Elargissement de la Maine dans la traversée d'Angers



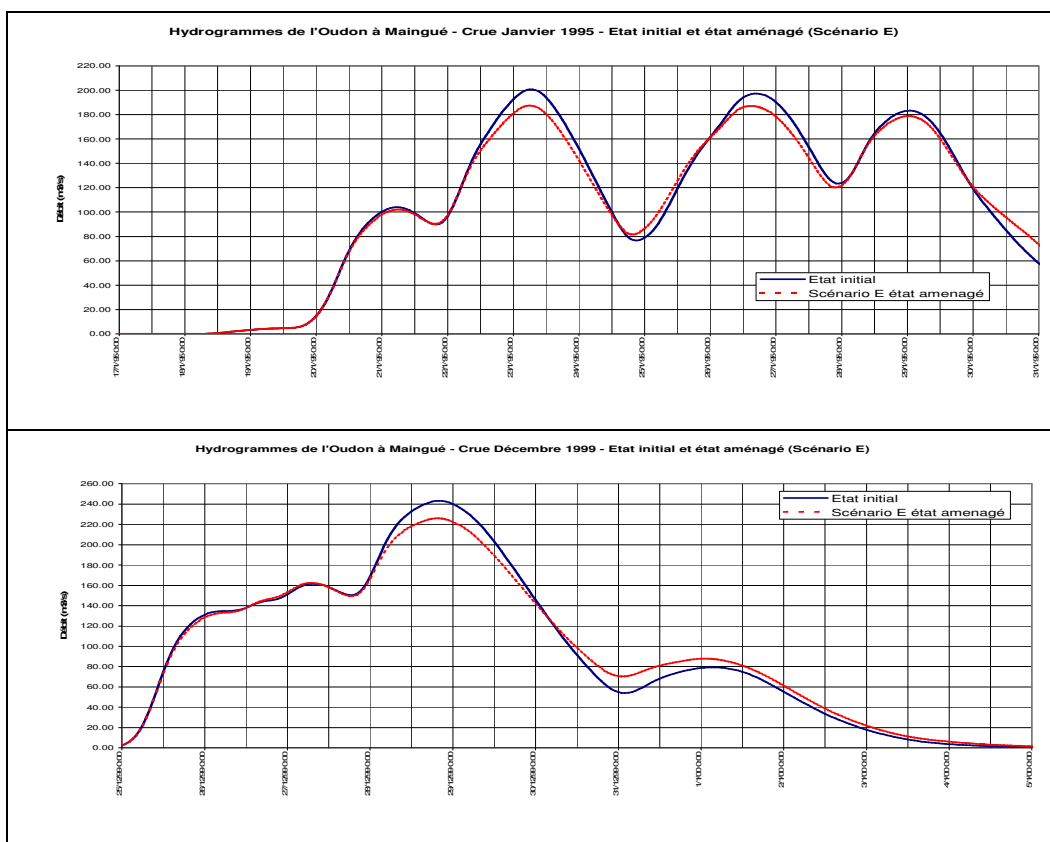
## 2.5. SCENARIO E : SIMULATION DES AMENAGEMENTS PREVUS SUR LE BASSIN AMONT DE L'OUDON

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 SYMBOLI<sup>1</sup>, 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



<sup>1</sup> « 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
<b>Angers Amont pont de Verdun</b>				
<b>Scénario A</b>	-5 cm	-4 cm	-3 cm	-1 cm
<b>Scénario B</b>	-24 cm	-23 cm	-12 cm	-5 cm
<b>Scénario C</b>	-26 cm	-24 cm	-15 cm	-6 cm
<b>Scénario D</b>	-4 cm	-4 cm	-2 cm	-1 cm
<b>Montjean-sur-Loire</b>				
<b>Scénario A</b>	+1 cm	+1 cm	0 cm	0 cm
<b>Scénario B</b>	+3 cm	+3 cm	+1 cm	+1 cm
<b>Scénario C</b>	+4 cm	+1 cm	+4 cm	+1 cm
<b>Scénario D</b>	+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 abaissments 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).