



Rapport d'expertise des modélisations hydrauliques liées  
au projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-  
Seine et Nogent-sur-Seine  
et au projet d'aménagement de la Bassée

**Volet Hydrologie**

Expertisé par

Ludovic Oudin

Hydrologue à l'Université Pierre et Marie Curie – Paris 6

**Rapport provisoire**



# Sommaire

<b>Sommaire .....</b>	<b>3</b>
<b>Synthèse 5</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>7</b>
1.1. Cadre de l'étude et objectifs de l'expertise hydrologique.....	7
1.2. Données hydrologiques utilisées pour la modélisation hydraulique.....	7
1.3. Méthodologie de l'expertise sur le choix des crues de calage et de validation.....	8
1.4. Crues de calage, de validation et de projet.....	9
<b>2. Projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine sous maîtrise d'ouvrage VNF .....</b>	<b>11</b>
2.1. Spécificité du projet et questions traitées lors de l'expertise.....	11
2.2. Etat des lieux des données disponibles sur le secteur .....	11
2.3. Représentativité de l'ampleur des crues historiques sélectionnées.....	13
2.4. Représentativité et qualité des données des crues historiques sélectionnées .....	15
2.5. Faisabilité de l'alimentation en eau des parties canalisées .....	17
2.6. Bilan de l'expertise et recommandations .....	18
<b>3. Projet d'aménagement de la Bassée sous maîtrise d'ouvrage EPTB Seine Grands Lacs .....</b>	<b>19</b>
3.1. Spécificité du projet et questions traitées lors de l'expertise.....	19
3.2. Etat des lieux des données disponibles pour l'étude .....	19
3.3. Représentativité de l'ampleur des crues historiques sélectionnées.....	21
3.4. Représentativité et qualité des données des crues historiques sélectionnées .....	23
3.5. Expertise du modèle de prévision de crue développé sur le bassin de l'Yonne .....	25
3.6. Bilan et recommandations.....	27
<b>Liste des illustrations.....</b>	<b>29</b>
<b>Références citées .....</b>	<b>30</b>
<b>Glossaire .....</b>	<b>31</b>



## Synthèse

Le présent rapport expertise le volet « hydrologie » des études portant sur le projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine porté par Voies navigables de France (VNF) et sur le projet d'aménagement de la Bassée porté par l'Etablissement public territorial de bassin Seine Grands lacs (EPTB Seine Grands Lacs).

L'expertise hydrologique se focalise sur l'analyse des données utilisées pour le calage et la validation des modèles hydrauliques pour les deux études. Deux caractéristiques des crues sélectionnées sont analysées : la représentativité en termes d'ampleur et de fréquence d'occurrence et la représentativité des données historiques par rapport à la configuration actuelle (qualité des observations historiques ou des reconstitutions, changement de morphologie du lit mineur et changement d'occupation du sol du lit majeur). Une attention particulière est aussi portée sur les éléments spécifiques de chacun des projets et notamment aux outils utilisés pour reconstituer les apports hydrologiques lorsque les données ne sont pas disponibles.

Concernant le projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine porté par Voies navigables de France (VNF), le nombre d'événements pris en compte est adapté à ce stade du projet mais doit absolument être augmenté par la suite afin d'obtenir un calage du modèle hydraulique le plus robuste possible. Le choix d'évènements supplémentaires est cependant délicat si l'on se limite aux données de Pont-sur-Seine. Le recours aux données plus en amont du réseau hydrographique sera donc inévitable, tel que cela a été fait pour la crue de 1982. Ce recours implique l'utilisation d'un modèle de propagation entre les stations de Méry-sur-Seine, d'Arcis-sur-Aube et de Pont-sur-Seine. L'utilisation d'un modèle hydraulique fin (tel que celui qui est réalisé sur le secteur de la Bassée) à partir des stations de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube permettrait de disposer d'un panel de crue de calage et de validation plus large et de mieux représenter les apports latéraux diffus sur ce secteur. Par ailleurs, les débits nécessaires à l'alimentation du canal étant largement plus faibles que les débits pouvant être prélevés au niveau de la rivière, il apparaît que l'alimentation en eau des parties canalisées pourra se faire sans que le débit de la Seine passe sous le seuil du débit réservé réglementaire.

Concernant le projet d'aménagement de la Bassée porté par l'Etablissement public territorial de bassin Seine Grands lacs (EPTB Seine Grands Lacs), le panel de crues utilisées au calage et en validation est très riche, ce qui permet de tester le modèle dans des configurations hydrologiques variées (répartition spatiale de l'aléa, saison, amplitude générale de la crue, état de saturation du sol, etc.). Les crues de calage utilisent principalement des données observées aux stations d'apport principal. De ce fait, la qualité des données utilisées pour les crues de calage n'est pas remise en cause. Pour les crues de validation, un certain nombre d'épisodes nécessitent de recourir à des modélisations hydrologiques pour reconstituer les débits d'apports des bassins versants amont. A ce stade, les erreurs de modélisation hydrologique sont importantes mais au vu du nombre important des crues utilisées pour le calage, les crues de validation sont plus utilisées comme des crues de projet et on peut supposer que le degré de réalisme de ces crues de projet est suffisant. L'analyse du temps de réaction du bassin de l'Yonne montre que malgré les contraintes liées à la mise en place du dispositif de pompage, il est envisageable de gérer l'aménagement de la Bassée à condition d'être en mesure de prévoir d'une façon relativement satisfaisante les débits sur le bassin de l'Yonne. L'efficacité de l'aménagement dépendra donc de la performance et la robustesse du modèle de prévision des crues. Celles-ci sont encore difficiles à évaluer compte tenu des développements encore en cours sur la procédure de mise à jour du modèle de prévision ainsi que sur l'utilisation des scénarios de pluie de Météo-France.



# 1. Introduction

## 1.1. Cadre de l'étude et objectifs de l'expertise hydrologique

La Commission nationale du débat public (CNDP) a organisé deux débats publics concomitants portant sur :

- le projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine porté par Voies navigables de France (VNF)
- le projet d'aménagement de la Bassée porté par l'Etablissement public territorial de bassin Seine Grands lacs (EPTB Seine Grands Lacs).

Le projet de VNF vise à développer le transport fluvial en aménageant le tronçon de la Seine entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine et le projet de l'EPTB Seine Grands lacs consiste à construire dix espaces endigués de stockage temporaire des eaux de crue dans le lit majeur de la Seine entre Bray-sur-Seine et Marolles-sur-Seine afin d'écarter de manière indirecte les crues de l'Yonne à la confluence des deux rivières.

Au cours des réunions publiques ayant porté sur l'un ou l'autre des débats, la question de la neutralité hydraulique du projet VNF est revenue fréquemment, des demandes ayant été émises visant à expertiser de manière indépendante les modèles hydrauliques utilisés. Le présent rapport s'intéressera à l'analyse des données utilisées pour le calage et la validation des modèles hydrauliques. Une partie du rapport sera également consacrée à l'analyse des outils de modélisation hydrologique utilisés dans le cadre des deux projets.

## 1.2. Données hydrologiques utilisées pour la modélisation hydraulique

La modélisation hydraulique s'appuie sur un certain nombre de chroniques de débit, lors des phases de calage, de validation et d'utilisation du modèle pour tester des scénarios d'aménagement. On distingue généralement les données utilisées en entrée (conditions limites amont) et les données utilisées pour évaluer les simulations du modèle.

Les données utilisées en entrée sont idéalement des hydrogrammes observés juste en amont du secteur modélisé alors que les données servant à évaluer le modèle sont des hydrogrammes ou limnigrammes observés sur le secteur ou des repères de crue nivelés dans le lit majeur (cf. Figure 1).

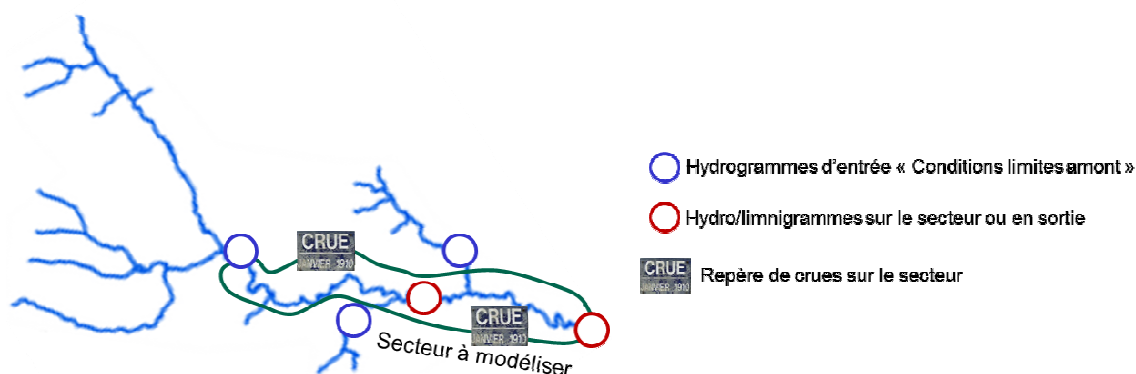


Figure 1 : Schéma représentant les données hydrologiques nécessaires pour la modélisation hydraulique.

Suivant le domaine étudié, il n'existe pas toujours de donnée historique disponible juste en amont du secteur modélisé. Dans ce cas, il est nécessaire de reconstituer ces chroniques de débit en utilisant les données auxiliaires disponibles. Deux possibilités sont alors envisageables (cf. Figure 2) :

1. Une reconstitution des chroniques de débit à partir des hydrogrammes observés à des stations plus en **amont** dans le réseau hydrographique. Cette reconstitution fait appel à des modèles hydrauliques plus ou moins simples selon les données topographiques disponibles et la distance entre le(s) point(s) amont et le point en aval;
2. Une reconstitution des chroniques de débit à partir des chroniques de pluies et de températures sur le **bassin versant** dont l'exutoire correspond au point d'entrée. Cette reconstitution fait appel à une modélisation hydrologique du bassin versant.

Pour les deux possibilités envisagées, il est nécessaire de disposer de données pour caler les modèles de reconstitution, quels que soient leur type et leur complexité.

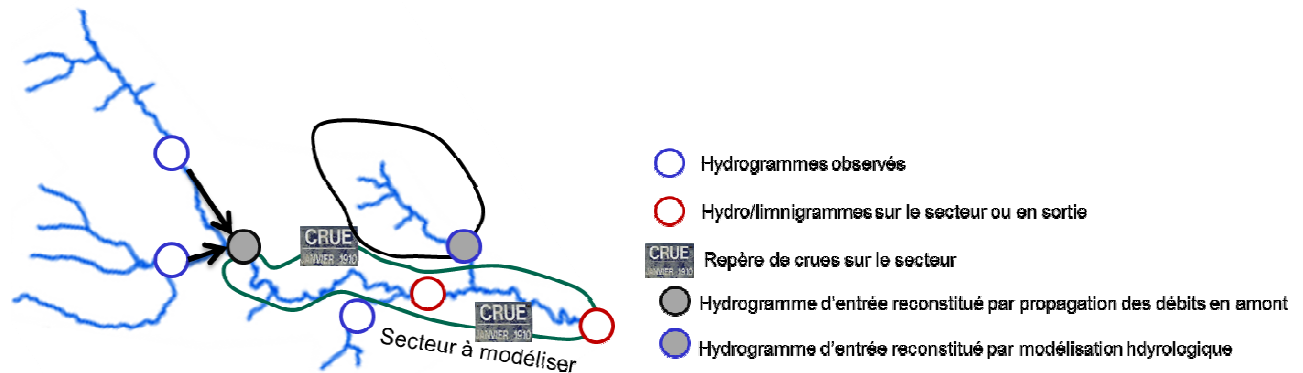


Figure 2 : Schéma représentant les données hydrologiques à reconstituer pour la modélisation hydraulique.

Sur le bassin de la Seine, les chroniques de débit aux stations hydrométriques débutent généralement dans les années soixante. Par conséquent, des reconstitutions sont souvent nécessaires pour des crues historiques antérieures majeures. Il est important de noter ici que le recours à un modèle de reconstitution introduit une incertitude importante sur les chroniques de débit reconstituées en amont du secteur modélisé et ces incertitudes se répercutent ensuite sur les résultats de simulations du modèle hydraulique. Une attention particulière sera donc portée dans ce travail d'expertise au mode de reconstitution des hydrogrammes d'entrée.

### 1.3. Méthodologie de l'expertise sur le choix des crues de calage et de validation

Le volet « hydrologie » de l'expertise consiste essentiellement à analyser la pertinence des crues utilisées lors du calage et de la validation des modèles hydrauliques. Cette section a pour objectif de décrire la méthodologie suivie lors de cette expertise pour évaluer la pertinence des événements de crue sélectionnés.

La sélection d'une crue de calage ou de validation est une décision s'appuyant sur deux caractéristiques de la crue :

1. La représentativité de l'évènement

La représentativité de l'évènement renvoie à l'ampleur de la crue. Le calage des paramètres de rugosité des lits mineur et majeur nécessite de prendre en compte un évènement de crue non débordante et un évènement de crue débordante respectivement. Cela conduit généralement à considérer au moins deux crues historiques différentes. Il est généralement plus délicat d'obtenir des données en qualité et en quantité suffisante pour l'évènement débordant compte tenu de la faible occurrence de ce type d'évènement.



## 2. La représentativité des données

La morphologie des rivières évoluant au cours du temps, il est illusoire de penser représenter de façon fiable les crues anciennes avec une configuration du lit actuelle. La connaissance de l'évolution de la morphologie du lit des rivières permet cependant de quantifier la représentativité des données historiques par rapport à la configuration actuelle de la morphologie de la rivière.

Ces deux objectifs sont souvent conflictuels puisqu'une crue ancienne forte est particulièrement intéressante pour caler les paramètres du modèle hydraulique liés à la rugosité du lit majeur, mais les données sont généralement de qualité moindre et moins représentatives de la configuration morphologique actuelle de la rivière, en comparaison à une crue plus récente mais de moindre envergure. La Figure 3 illustre schématiquement le compromis à faire entre représentativité de l'évènement et représentativité des données par rapport à la configuration actuelle du lit de la rivière.

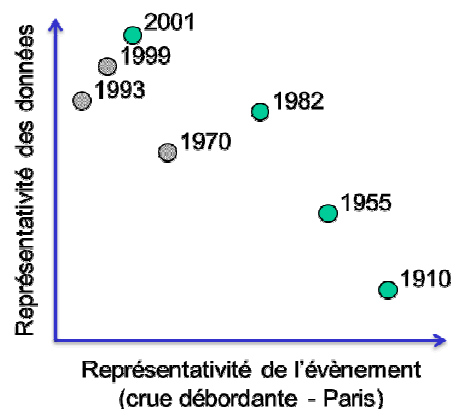


Figure 3 : Schéma illustrant le compromis entre représentativité de l'évènement et représentativité des données pour le choix d'une crue de calage (ou de validation). Les points verts représentent les solutions acceptables car non dominés sur un des deux objectifs. Cas d'une crue de la Seine à Paris.

Il est donc nécessaire de déterminer le compromis le plus adéquat entre ces deux objectifs pour sélectionner un panel de crues représentatif. **La prise en compte de plusieurs crues pour le calage et la validation permet de s'affranchir en partie de ce choix et aboutit à un calage en général plus robuste.**

### 1.4. Crues de calage, de validation et de projet

Par la suite, les crues de calage et les crues de validation ou de projet ne seront pas traitées de la même façon. La qualité de simulation exigée pour les crues de calage et de validation est bien supérieure à celle des crues de projet. Ainsi, l'exigence en termes de qualité des données d'entrée suit cette logique :

- Caler un modèle avec des données d'entrée erronées entraîne non seulement des simulations généralement mauvaises en calage mais peut conduire en plus à des estimations de paramètres fausses, qui seront dommageables pour l'utilisation ultérieure du modèle.
- Lors de la validation du modèle, l'utilisation de données erronées conduit à des performances du modèle en validation moins bonnes. Celles-ci doivent être mises en perspective de la qualité des données utilisées en entrée.
- Pour les crues de projet, le réalisme des données d'entrée est requis mais l'adéquation parfaite avec la réalité n'est pas une condition absolue. On peut d'ailleurs être amené à utiliser des données d'entrée synthétiques qui respectent certaines propriétés des observations mais n'en sont pas.

**Les crues de calage, les crues de validation et les crues de projet n'ont donc pas les mêmes contraintes et ceci doit être gardé à l'esprit lors de l'analyse des données utilisées pour chacune des crues simulées.**



## 2. Projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine sous maîtrise d'ouvrage VNF

---

### 2.1. Spécificité du projet et questions traitées lors de l'expertise

L'étude intitulée « Modélisation hydraulique de la Vallée de la Petite Seine » est composée de 4 parties réalisées successivement :

1. La constitution d'un référentiel hydraulique, i.e. la modélisation hydraulique de l'état actuel des aménagements ainsi que l'identification de zones vulnérables sur lesquelles l'étude d'impact se focalise ;
2. l'évaluation des impacts hydrauliques et environnementaux des scénarios dits « bruts », i.e. la morphologie du lit de la rivière est modifiée dans le modèle afin de représenter les tronçons de rivière remaniés pour la mise à grand gabarit;
3. l'évaluation des impacts hydrauliques et environnementaux des scénarios révisés, i.e. un raffinement dans l'évaluation des impacts des scénarios bruts et propositions de solutions compensatoires ;
4. l'évaluation de la faisabilité de l'alimentation en eau des parties canalisées, i.e. l'identification de situation de crise potentielle et de conflits d'usage de l'eau prélevée en période d'étiage.

L'expertise du volet « hydrologie » est concernée par les parties 1 et 4 de l'étude. L'organisation du rapport est la suivante : La section 2.2 dresse un état des lieux des données utilisables pour l'étude, les sections 2.3 et 2.4 analysent la représentativité des crues historiques utilisées pour le calage et la validation (i.e. les éléments du rapport de phase 1), la section 2.5 analyse l'étude portant sur la faisabilité de l'alimentation en eau des parties canalisées (i.e. les éléments du rapport de phase 4) et la section 2.6 dresse un bilan de l'expertise réalisé sur les études de ce projet, ainsi que les recommandations pour des études complémentaires éventuelles.

### 2.2. Etat des lieux des données disponibles sur le secteur

#### 2.2.1. Hydrogrammes d'entrée

La Figure 4 situe géographiquement l'emprise du domaine modélisé ainsi que les stations hydrométriques sur le réseau hydrographique du secteur et en amont. La présence des stations de Pont-sur-Seine et de Saint-Aubin sur l'Ardusson (affluent de la Seine) permet d'injecter directement les débits observés à ces stations au sein du modèle hydraulique développé sur le tronçon entre Nogent-sur-Seine et Bray-sur-Seine. Cependant, les enregistrements de débits à la station de Pont-sur-Seine ne commencent qu'en 1979 et les débits sont lacunaires pour la crue majeure de 1982 (cf. Tableau 1). Par conséquent, il a été envisagé de recourir aux données plus anciennes des stations de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube, deux stations plus en amont dans le réseau hydrographique.

Le Tableau 1 reprend des éléments de synthèse de la banque HYDRO et met en évidence des incohérences entre les stations de Pont-sur-Seine et Bazoches-les-Bray, avec des débits moyens plus élevés à Pont qui est en amont de Bazoches. Ces incohérences ont déjà été signalées par le passé (SOGREAH, 1977; Cemagref, 2004) et proviennent probablement d'incertitudes sur les débits mesurés à la station de Pont-sur-Seine (ou de Bazoches-les-Bray).

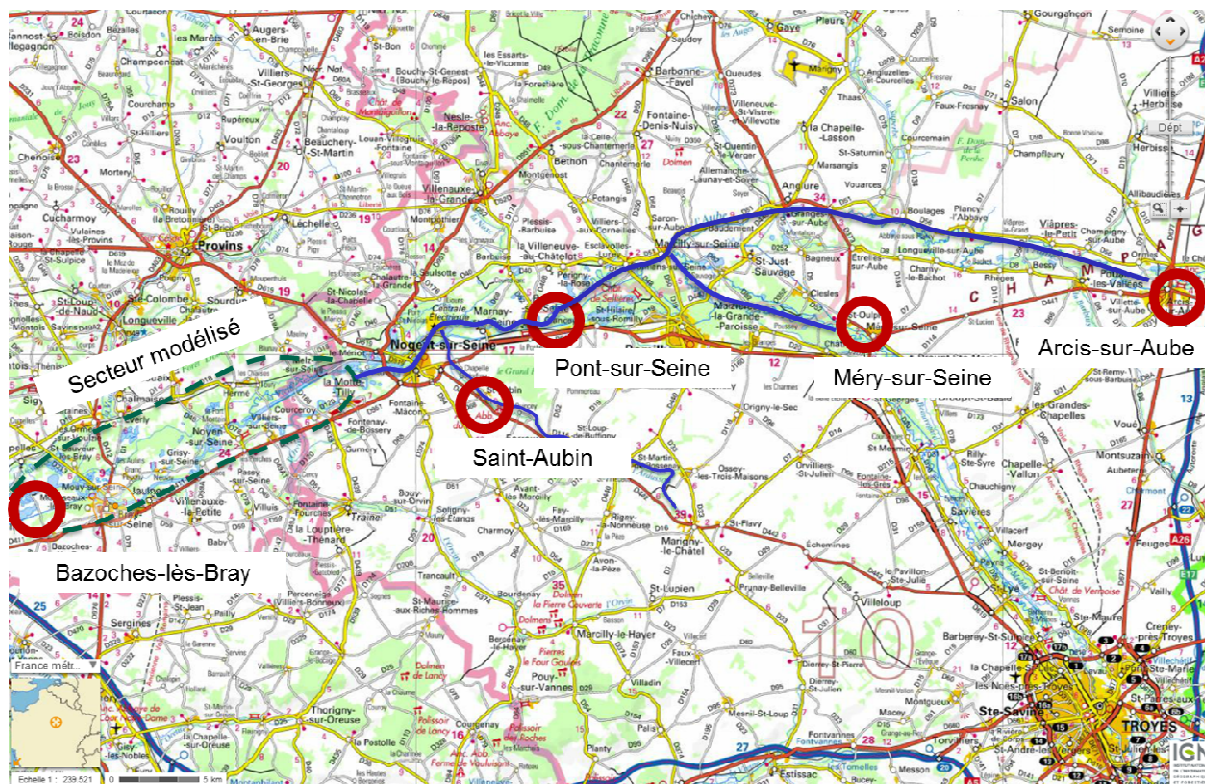


Figure 4 : Situation géographique du domaine modélisé pour le projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine. Indication des stations hydrométriques utilisées pour constituer les hydrogrammes d'entrée.

Tableau 1 : Synthèse sur les stations hydrométriques de la banque HYDRO présentes sur le secteur ou en amont (valeurs calculées le 04/11/2012)

Station	Code	Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Début et fin des chroniques	Débit moyen (HYDRO) (m <sup>3</sup> /s)	Débit décennal (HYDRO) (m <sup>3</sup> /s)	Débit cinquantennal (HYDRO) (m <sup>3</sup> /s)	Max observé (HYDRO) (m <sup>3</sup> /s)
Seine à Méry-sur-Seine	H0810010	3880	1966-2012	32.5 [29.9;35.1]	180.0 [60.0;200.0]	240.0 [220.0;280.0]	203.0 01/01/1982
Aube à Arcis-sur-Aube	H1501010	3590	1960-2012	33.6 [30.9;36.3]	230.0 [210.0;270.0]	320.0 [280.0;370.0]	332.0 14/04/1983
Seine à Pont-sur-Seine	H1700010	8760	1979-2012 (lacunes pour la crue de 1982)	76.00 [68.2;83.9]	290.0 [260.0;330.0]	360.0 [320.0;430.0]	298.0 22/04/2001
Ardusson à Saint-Aubin	H1713010	159	1970-2012	0.644 [0.547;0.741]	2.500 [2.300;3.000]	3.600 [3.200;4.300]	4.050 12/01/1982
Voulzie à Jutigny	H1932020	280	1974-2012	1.620 [1.430;1.800]	9.300 [8.200;11.00]	13.00 [11.00;16.00]	13.6 09/04/1983
Seine à Bazoches	H1940020	10100	1999-2012	75.00 [58.80;91.30]	340.0 [290.0;490.0]	Non calculé	353.0 23/04/2001

## 2.2.2. Données pour l'évaluation des simulations (calage et validation)

Un important travail de collecte de données de niveau de crue a été effectué pour l'étude, en particulier pour les crues majeures de 1910, 1955 et 1982. Les données proviennent d'anciens relevés de laisses par VNF qui ont été utilisés pour réaliser des profils en long des niveaux maximums atteints et/ou de nouvelles cotes levées par SAFEGE pour l'étude.

- Pour la crue de 1910, de nombreux repères sont exploitables. Les nivellements réalisés par le bureau d'études pour le projet font apparaître quelques incohérences avec les nivellements d'études antérieures. Ces incohérences sont discutées et souvent expliquées dans le rapport ;
- Pour la crue de 1955, une ligne d'eau a été fournie par VNF sur un levé d'une étude précédente à partir des niveaux atteints au droit de chaque ouvrage hydraulique ;
- Pour la crue de 1982, de nombreux repères de crue existent, en complément de la ligne d'eau des niveaux maximums atteints fournie par VNF. Une critique des données de nivellement a été réalisée mais des incohérences importantes subsistent avec des repères de crues conduisant à des différences de niveau en crue de l'ordre de 50 cm (sur le secteur aval).

Pour les données utilisées pour caler le lit mineur, deux campagnes de mesures ont été réalisées fin juin et courant août 2010 pour niveler la ligne d'eau. Une trentaine de points ont été nivelés et sont par la suite exploités lors du calage du modèle hydraulique.

## 2.3. Représentativité de l'ampleur des crues historiques sélectionnées

Quatre épisodes de crues ont été sélectionnés pour constituer le référentiel hydraulique. Deux épisodes sont utilisés pour le calage et deux pour l'étape de validation. A ce stade de l'étude, le nombre d'événements pris en compte est adapté mais doit absolument être augmenté par la suite. Ceci sera rediscuté dans la section 2.6. La discussion du présent paragraphe se concentre sur la représentativité des crues, étant donné ce nombre restreint d'épisodes.

Concernant les épisodes utilisés pour le calage, le nivellement de la ligne d'eau réalisé par SAFEGE est utilisé pour caler les coefficients de rugosité du lit mineur tandis que les hydrogrammes et repères de la crue de 1982 sont utilisés pour caler les coefficients de rugosité du lit majeur. Le nivellement de 2010 correspond à une situation loin d'être optimale en termes de représentativité puisqu'il ne s'agit pas d'une situation de crue non débordante mais plutôt d'une situation d'étiage. La crue de 1982 est choisie compte tenu de son ampleur par rapport aux autres crues historiques, même si les données ne sont pas disponibles à la station de Pont-sur-Seine pour cette crue (voir la discussion à la section 2.4).

Concernant la validation, les crues de 2001 et de 1910 sont utilisées compte tenu de l'ampleur de la crue référence de 1910 et des informations abondantes existant pour la crue de 2001.

Afin d'évaluer la représentativité des crues sélectionnées par rapport aux autres crues historiques, le Tableau 2 référence les principales crues historiques depuis 1966 sur les trois stations en indiquant la période de retour correspondante pour chacune des crues. L'historique indique une plus faible occurrence des crues importantes sur les deux stations amont depuis la fin des années 1980. Par conséquent, il est impossible de simuler une crue forte en utilisant les données historiques de Pont-sur-Seine dont les enregistrements débutent en 1983.

Dans ce contexte, l'utilisation de la crue de janvier 1982 pour le calage paraît un choix logique compte tenu des forts débits obtenus sur les stations de Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube. L'examen des valeurs de débits maximaux obtenus aux stations amont permettent d'envisager une crue à Pont-sur-Seine dont la période de retour est probablement supérieure à 50 ans.

Tableau 2 : Bilan des crues sur les stations de Pont-sur-Seine, Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube. Les codes couleurs indiquent l'ampleur de la crue par rapport aux débits de crue caractéristiques de la banque HYDRO (gris : période de retour T de moins de 2 ans, bleu: T = 2 ans, vert : T = 5 ans, jaune : T = 10 ans et orange : T = 20 ans)

date	Débit journalier max à Pont-sur-Seine (m3/s)	Débit journalier max à Méry-sur-Seine (m3/s)	Débit journalier max à Arcis-sur-Aube (m3/s)
févr.-66		140	130
janv.-67		118	202
janv.-68		153	242
févr.-70		155	266
avr.-70		101	110
déc.-74		94.5	144
févr.-76		106	135
févr.-77		126	238
mars-78		149	266
févr.-79		135	215
mars-79		102	127
déc.-79		91	135
févr.-80		144	266
janv.-81		146	184
janv.-82		200	309
déc.-82		133	291
déc.-82		133	291
mars-83	292	165	317
janv.-84	246	112	188
nov.-84	212	116	129
mai-85	233	128	182
févr.-86	220	121	131
nov.-86	228	108	125
févr.-87	204	85.6	122
mai-87	211	110	111
janv.-88	262	128	153
mars-88	262	125	265
mai-88	206	119	75.8
nov.-88	210	84.6	107
déc.-90	211	115	117
déc.-93	238	120	121
déc.-94	253	117	127
déc.-94	277	117	131
mars-95	251	93.2	127
avr.-95	277	92.3	131
nov.-96	244	118	124
févr.-97	226	104	120
janv.-98	206	88	96.1
mars-98	276	126	118
oct.-98	219	90.5	117
janv.-99	216	93.7	108
févr.-99	290	125	145
déc.-99	232	117	136
févr.-00	205	98	121
nov.-00	247	111	108
mars-01	297	147	149
nov.-01	205	89.9	112
déc.-01	246	106	134
févr.-02	260	124	117
déc.-02	246	109	120
janv.-03	241	104	110
déc.-03	207	122	106
févr.-06	214	106	117
févr.-07	226	93.4	113
mars-08	201	86.9	108

## 2.4. Représentativité et qualité des données des crues historiques sélectionnées

### 2.4.1. Synthèse des données hydrométriques utilisées pour les crues de calage et de validation

Pour les trois crues sélectionnées (1910, 1982 et 2001), la disponibilité des données est très variable :

- Aucune donnée hydrométrique n'est disponible pour la crue de 1910 aux stations de Pont-sur-Seine, Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube. Le seul moyen de simuler cette crue est de recourir à des chroniques de débit reconstituées. C'est ce qui est fait dans l'étude avec les débits issus du modèle MSBR (Marti et Lepelletier, 1997; Villion, 1997) qui permet de reconstituer les hydrogrammes à certains points du réseau de la Seine pour quelques crues historiques à partir d'un modèle hydrologique couplé à un modèle hydraulique couvrant l'ensemble du réseau hydrographique du bassin de la Seine jusqu'à Paris. L'incertitude existant sur ces reconstitutions est importante (et difficilement quantifiable) mais la crue de 1910 n'étant pas utilisée pour le calage mais uniquement pour la validation, le recours à ces « données » reconstituées n'est pas préjudiciable pour le calage du modèle hydraulique.
- Aucune donnée hydrométrique n'est disponible pour la crue de 1982 à la station de Pont-sur-Seine. Cependant, les données aux stations de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube sont utilisables, à condition d'établir un modèle permettant de propager les débits des deux stations amont jusqu'à la station de Pont-sur-Seine. Cette crue étant utilisée pour le calage, un examen détaillé de la reconstitution du débit à Pont-sur-Seine est fait dans cette section.
- Les données pour la crue de 2001 sont disponibles à la station de Pont-sur-Seine et sont donc utilisés pour constituer les hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique.

### 2.4.2. Cas de la crue de 1982

Comme dit précédemment, un modèle de propagation des débits a été réalisé afin de propager les débits des deux stations amont de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube jusqu'à la station de Pont-sur-Seine. Ce modèle est un modèle hydraulique 1D classique pour lequel peu de données topographiques et bathymétriques ont été utilisées (3 sections en travers sur le bief Seine et 1 section en travers sur le bief Aube). Les paramètres de rugosité du modèle ont été calés à partir des crues de 2000 et de 2001 pour lesquelles des données existent aux stations amont et à la station aval. Les résultats de ce calage sont reportés sur la Figure 5 et montrent une bonne reconstitution des débits de Pont-sur-Seine. Un déficit de volume de la crue est apparent sur les hydrogrammes puisque le modèle de propagation ne tient pas compte des apports latéraux diffus entre les stations amont et la station aval.

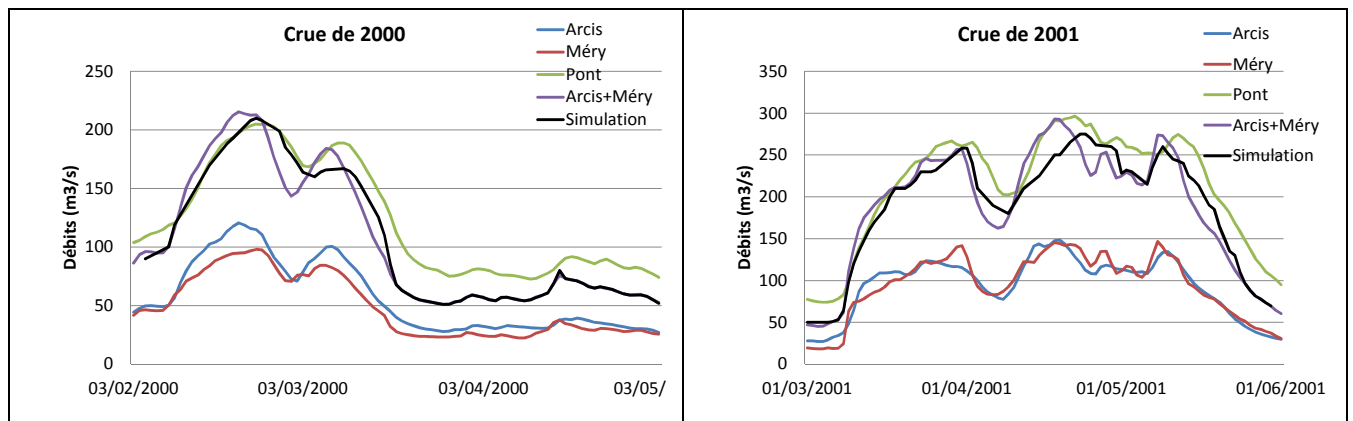


Figure 5 : Hydrogrammes observés et reconstitués à Pont-sur-Seine à partir des stations de Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube pour les crues de 2000 et 2001.

Sur la base de ces simulations de calage relativement satisfaisantes, le modèle de propagation est ensuite utilisé pour reconstituer les débits à Pont-sur-Seine pour la crue de 1982. Au cours des tests de calage du modèle

hydraulique, le choix a été fait de gonfler le débit de pointe simulé par le modèle de propagation de 10%. Les hydrogrammes obtenus sont indiqués sur la Figure 6.

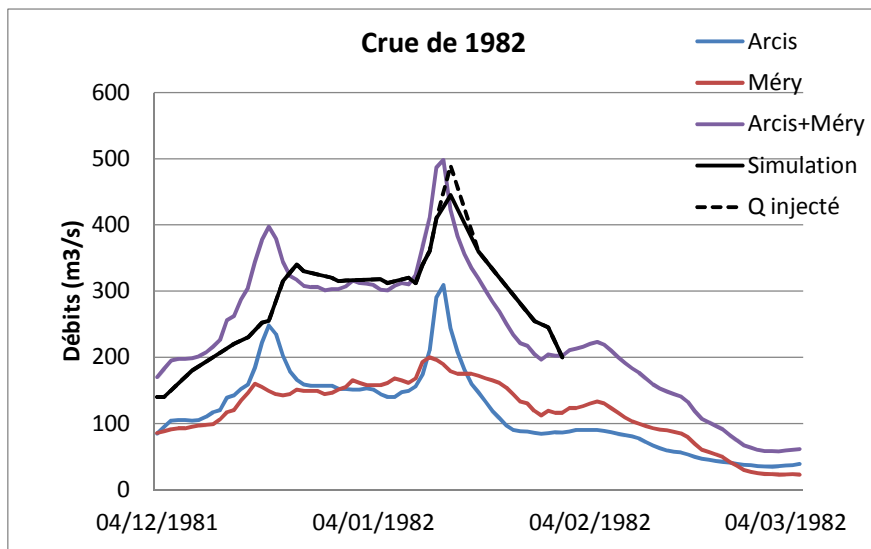


Figure 6 : Hydrogramme reconstitué à Pont-sur-Seine à partir des stations de Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube pour la crue de 1982. Le débit finalement injecté au modèle hydraulique « Bassée » est également indiqué.

Deux aspects sont analysés dans ce qui suit :

1. La pertinence de l'augmentation de 10% sur la pointe de la crue ;
2. La non prise en compte des apports latéraux.

L'analyse s'appuie sur les données de débits observés des crues récentes pour lesquelles nous disposons de données observées aux stations amont et à la station de Pont-sur-Seine, c'est-à-dire postérieures à 1982. Il faut souligner ici l'absence de crues fortes pour ces données récentes, déjà évoquée à la section 2.3.

### Augmentation du débit de pointe

La Figure 7 montre les relations entre les débits maximaux des stations de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube et ceux de la station de Pont-sur-Seine. Il apparaît que les débits maximaux de crues à Pont-sur-Seine sont proches de ceux obtenus en sommant les débits des deux stations amont. Les crues s'éloignant significativement de ce schéma sont les fortes crues en provenance de l'Aube qui apparaissent tamponnées. Pour ces crues, les débits de pointe des crues en provenance de l'Aube sont en effet réduits à Pont-sur-Seine (après la confluence avec l'Aube). Ce comportement apparaît également sur l'hydrogramme simulé par le modèle de propagation de la crue de 1982.

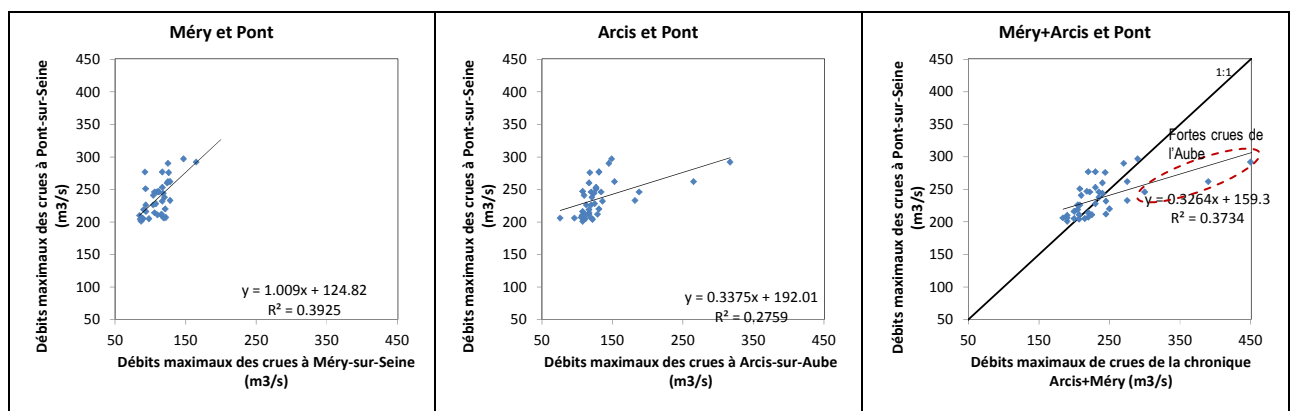


Figure 7 : Relations entre débits maximaux de crue des stations amont de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube et la station aval de Pont-sur-Seine. Réalisé à partir des crues référencées au Tableau 2.



Notons que ces considérations sont faites en ne tenant pas compte des apports latéraux entre les stations amont et la station aval, en négligeant l'atténuation des hydrogrammes de crue et en considérant aucun décalage entre le temps d'arrivée de l'onde provenant de Méry-sur-Seine et celle provenant d'Arcis-sur-Aube. Pour confirmer le gonflement de 10% de la pointe de crue, il serait donc intéressant de reproduire la Figure 7c avec les débits maximaux provenant des hydrogrammes reconstitués à Pont-sur-Seine par le modèle de propagation.

### Quantification des apports latéraux

La Figure 8 met en évidence l'évolution du volume des crues de l'amont à l'aval. Il semble que l'hypothèse d'un apport de 15% est valide, d'autant que cette valeur est en accord avec le rapport de surface des bassins versants correspondants. Le choix a pourtant été fait dans l'étude de ne pas tenir compte de ces apports latéraux, ce qui peut s'expliquer en partie par la difficulté de répartir temporellement ces apports latéraux, qui interviennent essentiellement lors de la phase de décrue (voir par exemple la Figure 5) et n'ont donc généralement pas d'impact sur la valeur du débit maximal de la crue. Un raffinement du modèle de propagation permettrait néanmoins de mieux rendre compte de ces apports qui peuvent avoir un rôle important dans le cas de crues comportant plusieurs pics.

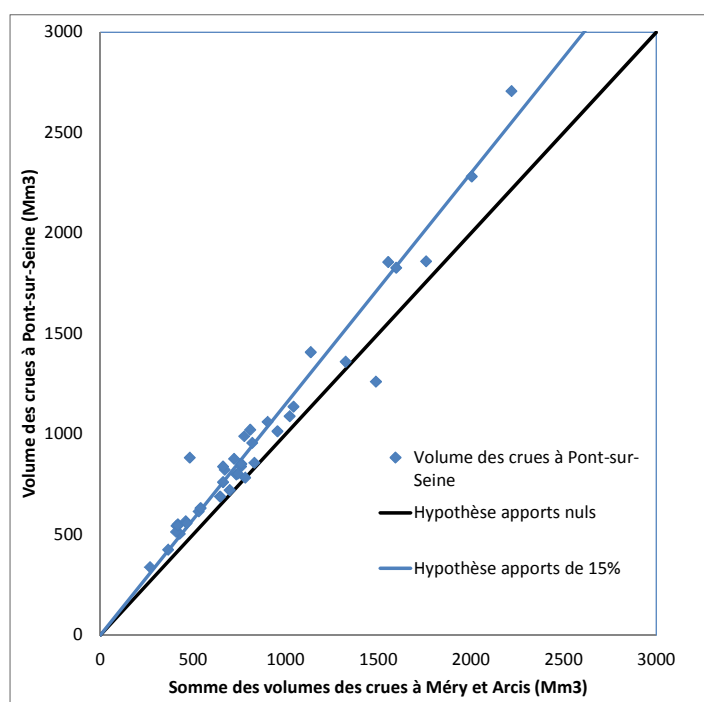


Figure 8 : Volumes des crues calculés à la station de Pont-sur-Seine en fonction de la somme des volumes de crues aux stations amont. Réalisé à partir des crues référencées au Tableau 2.

## 2.5. Faisabilité de l'alimentation en eau des parties canalisées

Cette section expertise la phase 4 de l'étude du projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine : « faisabilité de l'alimentation en eau des parties canalisées et évaluation des conséquences sur le débit de la Seine en étiage ». Trois secteurs sont concernés par cette problématique : le canal à grand gabarit, la nouvelle écluse de Jaulnes, et le contournement de Bray-sur-Seine (scénario 3 uniquement).

La méthodologie développée dans le cadre de l'étude suit quatre étapes :

1. Estimation du débit d'alimentation nécessaire sur chaque site à partir de la consommation en eau du canal. Ce débit dépend du scénario étudié ;
2. Estimation des débits actuels juste en amont de la prise d'eau. Cette estimation dépend du site étudié.

3. Estimation du débit modifié dans la rivière après consommation par le canal;
4. Comparaison des débits modifiés avec le débit réservé réglementaire.

La première étape n'a pas fait l'objet d'analyse fine lors de l'expertise. Les trois autres étapes reposent sur des considérations classiques qui sont tout à fait adaptées à ce stade de l'étude. La principale difficulté est de déterminer les apports et pertes en eau diffus ou provenant d'affluents non jaugés sur le réseau hydrographique entre la station hydrométrique la plus proche et la prise d'eau. Pour cela, les calculs proposés reposent sur la prise en compte des apports d'affluents jaugés et sur l'estimation d'apports diffus dont la quantité est déterminée au prorata de la surface de bassin versant drainé, c'est-à-dire en faisant l'hypothèse classique que les apports sont proportionnels à la surface du bassin versant alimentant la rivière. Les débits nécessaires à l'alimentation du canal étant largement plus faibles que les débits pouvant être prélevés au niveau de la rivière, les hypothèses faites sont suffisantes.

## 2.6. Bilan de l'expertise et recommandations

Les crues historiques retenues pour le projet sont représentatives :

- Le choix de la crue 1982 pour le calage est indiscutable au vu des données disponibles ;
- La ligne d'eau de 2010 utilisée pour caler le lit mineur n'est pas une crue de plein bord. La prise en compte d'une crue non ou peu débordante comme épisode de calage supplémentaire semble nécessaire ;
- Les deux crues de validation sont bien choisies : la crue de 2001 est récente et bien documentée et la crue de 1910 est une référence quant à son ampleur. Il faut cependant mettre en garde sur les interprétations des simulations pour cette crue puisque les données d'entrée sont des reconstitutions forcément entachées d'erreurs importantes, que ce soit en termes de valeur de débit maximal et de répartition temporelle du volume de crue. Par conséquent, les exigences d'adéquation avec les données observées pour la crue de 1910 doivent être à la mesure de la qualité des « données » utilisées.

A ce stade du projet, le nombre d'événements pris en compte est adapté mais doit absolument être augmenté par la suite afin d'obtenir un calage du modèle hydraulique plus robuste. Le choix d'événements supplémentaires est cependant délicat si l'on se limite aux données de Pont-sur-Seine. Le recours aux données plus en amont du réseau hydrographique sera donc inévitable, tel que cela a été fait pour la crue de 1982.

Ce recours implique l'utilisation d'un modèle de propagation entre les stations de Méry-sur-Seine, d'Arcis-sur-Aube et de Pont-sur-Seine. Pour la suite des études, il serait important de raffiner ce modèle de propagation, ce qui permettrait de vérifier les hypothèses faites pour la crue de 1982. L'utilisation d'un modèle hydraulique fin (tel que celui qui est réalisé sur le secteur de la Bassée) à partir des stations de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube permettrait de disposer d'un panel de crue de calage et de validation plus large. Une quantification plus fine des apports latéraux sur les tronçons étudiés devrait aussi être envisagée par la suite.

Concernant la faisabilité de l'alimentation en eau du canal, les débits nécessaires à l'alimentation étant largement plus faibles que les débits pouvant être prélevés au niveau de la rivière, il apparaît que l'alimentation en eau des parties canalisées pourra se faire sans que le débit de la Seine passe sous le seuil du débit réservé réglementaire.

## 3. Projet d'aménagement de la Bassée sous maîtrise d'ouvrage EPTB Seine Grands Lacs

---

### 3.1. Spécificité du projet et questions traitées lors de l'expertise

L'étude du projet d'aménagement de la Bassée est constituée de cinq parties :

1. Phase 1 - Etude hydrologique qui avait pour objectif de compléter les études précédentes sur les crues de la Seine en incluant des crues atypiques qui ne sont pas nécessairement les crues les plus fortes, mais qui peuvent induire une gestion particulière de l'ouvrage ;
2. Phase 2.1 - Construction et calage du modèle hydraulique ;
3. Phase 2.2 - Reconstitution et validation de 20 crues historiques ;
4. Phase 2.3 - Etude de gestion de l'aménagement de la Bassée qui avait pour objectif de définir les principes de gestion de l'ouvrage et de quantifier les impacts des incertitudes relatives à la prévision des crues sur l'efficacité de l'ouvrage ;
5. Phase 3 - Définition de l'architecture du système de prévision des crues.

Le volet « hydrologie » de l'expertise concerne les parties 1, 3 et 4 de l'étude, i.e. les phases 1, 2.2 et 2.3. L'organisation du rapport est la suivante : la section 3.2 dresse un état des lieux des données utilisables pour l'étude, les sections 3.3 et 3.4 analysent la représentativité des crues historiques utilisées pour le calage et la validation (i.e. les éléments des rapports de phase 1 et 2.2), la section 3.5 analyse l'étude portant sur le développement d'un modèle de prévision de crue (i.e. les éléments du rapport de phase 2.3) et la section 3.6 dresse un bilan de l'expertise réalisée sur ce projet, ainsi que les recommandations pour des études complémentaires éventuelles. Notons en préambule que la réalisation proprement dite du système de gestion et son intégration dans la chaîne d'information de Seine Grands Lacs ne faisait pas partie de la prestation. En particulier, le présent rapport expertise dans la section 3.5 le modèle de prévision développé, même s'il s'agit à ce stade d'un modèle de prévision sommaire qui fera l'objet d'études dédiées par la suite.

### 3.2. Etat des lieux des données disponibles pour l'étude

La Figure 9 présente la carte du réseau hydrographique modélisé par le modèle hydraulique utilisé lors de l'étude, ainsi que les points d'injection des hydrogrammes en amont du modèle hydraulique.

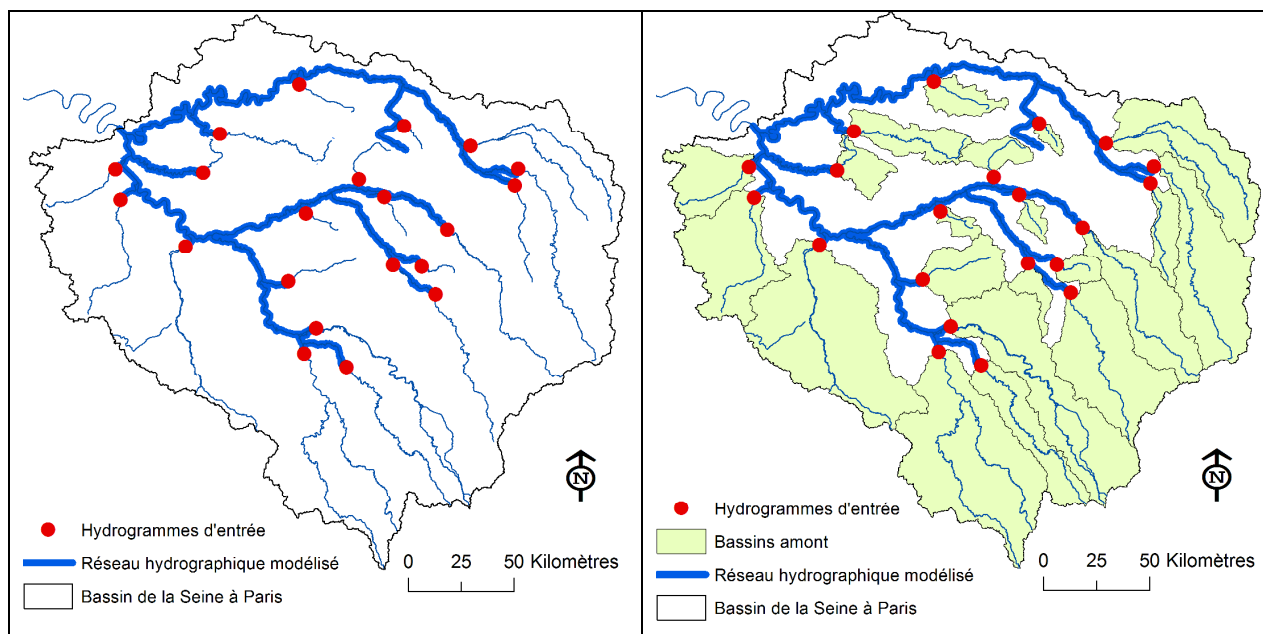


Figure 9 : Emprise géographique du domaine modélisé. Le réseau hydrographique modélisé hydrauliquement est surligné. Les 21 points d'injection du modèle hydraulique (i.e. hydrogrammes d'entrée) sont indiqués en rouge et les bassins versants correspondants à ces points d'injection sont indiqués sur la figure de droite.

Il faut noter que pour beaucoup de crues historiques, les débits ne sont pas observés aux stations hydrométriques correspondant aux points d'injection. Pour ces crues historiques, des modèles hydrologiques sont envisagés pour reconstituer les hydrogrammes à partir des données de pluie et d'évapotranspiration potentielle. Cet aspect sera analysé dans la section 3.4.

Le Tableau 3 reprend des éléments de synthèse de la banque HYDRO pour les 21 stations hydrométriques utilisées pour fournir les hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique. La surface des bassins versants étant très variable, certaines stations enregistrent des apports quantitativement prédominants. Huit stations majeures sont identifiées à partir du Tableau 3 : le Loing à Episy, l'Armançon à Briennon, la Seine à Bar-sur-Seine, l'Aube à Blaincourt, l'Yonne à Gurgy, le Serein à Chablis, la Marne à Saint-Dizier et la Saulx à Vitry-en-Perthois. L'analyse qui suit se fera donc de façon privilégiée sur ces huit stations.

Tableau 3 : Synthèse sur les stations hydrométriques utilisées pour fournir les hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique de Seine Grands Lacs (valeurs calculées le 04/11/2012). Sur fond gris, les stations d'apports majeurs.

Station	Code	Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> )	Début et fin des chroniques	Débit moyen (HYDRO) (m3/s)	Débit décennal (HYDRO) (m3/s)	Débit cinquantennal (HYDRO) (m3/s)	Max observé (HYDRO) (m3/s)
La Barbuise à Pouan	H1513210	187	1970 - 2011	0.7	2.7	3.8	4.64 le 15/01/1982
<b>Le Loing à Episy</b>	<b>H3621010</b>	<b>3900</b>	<b>1949-2012</b>	<b>18.0</b>	<b>170.0</b>	<b>250</b>	<b>296 le 11/01/1982</b>
La Soude à Soudron	H5213310	105	1968 - 2009	0.5	2.2	3	3.48 le 19/03/1970
<b>L'Armançon à Briennon</b>	<b>H2482010</b>	<b>2990</b>	<b>1966 - 2010</b>	<b>28.6</b>	<b>300.0</b>	<b>410</b>	<b>338 le 11/01/1982</b>
La Vanne à Pont-sur-Vanne	H2622010	866	1963 - 2010	5.3	13.0	18	18.6 le 11/01/1982
<b>La Seine à Bar-sur-Seine</b>	<b>H0400010</b>	<b>2340</b>	<b>1950 - 2007</b>	<b>24.0</b>	<b>220.0</b>	<b>300</b>	<b>315 le 17/01/1955</b>
L'Hozain à Bucheres	H0503010	249	1970 - 2009	1.4	22.0	31	25.1 le 27/02/1997
La Barse à Montieramey	H0702010	235	1985 - 2008	1.7	15.0	19	16.2 le 20/03/1995
<b>L'Aube à Blaincourt</b>	<b>H1231010</b>	<b>1640</b>	<b>1953 - 2008</b>	<b>18.5</b>	<b>160.0</b>	<b>230</b>	<b>214 le 17/01/1955</b>
La Superbe à Saint-Saturin	H1603010	320	1970 - 2011	1.6	6.3	8.7	7.37 le 01/04/1978
L'Ardusson à Saint-Aubin	H1713010	159	1970 - 2007	0.6	2.5	3.6	4.05 le 13/01/1982
<b>L'Yonne à Gurgy</b>	<b>H2221010</b>	<b>3820</b>	<b>1954 - 2010</b>	<b>40.3</b>	<b>320.0</b>	<b>440</b>	<b>386 le 15/03/2001</b>
<b>Le Serein à Chablis</b>	<b>H2342010</b>	<b>1120</b>	<b>1954 - 2001</b>	<b>7.8</b>	<b>110.0</b>	<b>150</b>	<b>114 le 29/04/1998</b>
L'Essonne à Ballancourt	H4042010	1870	1964 - 2010	8.2	18.0	23	27.7 le 15/04/1983
L'Orge à Morsang	H4252010	922	1967 - 2010	3.8	30.0	40	39.1 le 22/03/1978
L'Yerres à Courtomer	H4322010	427	1967 - 2010	1.6	41.0	Non calculé	62.5 le 21/03/1978
<b>La Marne à Saint-Dizier</b>	<b>H5071010</b>	<b>2380</b>	<b>1948 - 2007</b>	<b>25.5</b>	<b>260.0</b>	<b>350</b>	<b>496 le 14/01/1955</b>
La Blaise à Louvemont	H5083050	480	1962 - 1976	4.6	47.0	Non calculé	42.2 le 19/12/1999
<b>La Saulx à Vitry-en-Perthois</b>	<b>H5172010</b>	<b>2100</b>	<b>1957 - 2010</b>	<b>25.7</b>	<b>220.0</b>	<b>290</b>	<b>270 le 26/02/1958</b>
Le Surmelin à Saint-Eugene	H5302010	454	1961 - 2010	2.6	43.0	60	46 le 31/03/1962
Le Grand-Morin à Pommeuse	H5732010	770	1969 - 2010	5.4	76.0	100	88.9 le 06/12/1988

Sur les huit stations majeures identifiées, les chroniques de débit débutent généralement dans les années cinquante, permettant d'avoir recours à des données observées pour la crue majeure de 1955 en particulier.

### 3.3. Représentativité de l'ampleur des crues historiques sélectionnées

L'étude de phase 1 vise à établir, via une analyse rétrospective depuis 1866, une typologie des crues du bassin de la Seine pour déboucher sur un panel d'une vingtaine de crues « prototypes » du bassin de la Seine. Cette sélection se fait en trois étapes :

1. Une première sélection des crues est établie par dépassement du débit de période de retour 3 ans sur les trois affluents de la Seine avant Paris et sur le débit de la Seine à Paris.
2. Une classification des crues présélectionnées est ensuite réalisée à partir de paramètres variés : type de précipitation à l'origine de la crue (océanique ou de type convectif) ; état de saturation du sol en début d'épisode ; intensité des pluies de l'événement par sous-bassins et présence de neige et/ou de gel ;
3. La sélection finale des crues prototypes prend également en compte le type de saison de l'occurrence des crues, ce qui a effectivement un intérêt primordial quant à la gestion de l'aménagement de la Bassée vis-à-vis de l'écrêtement potentiel des crues par les lacs réservoirs en amont.

Le panel de crues finalement retenu est riche et diversifié. Sur les vingt crues retenues, on dénombre quatorze crues d'hiver, quatre crues de printemps et deux crues d'automne.

Afin d'évaluer la représentativité des crues sélectionnées, le Tableau 4 indique les périodes de retour correspondant au débit de pointe sur les huit stations hydrométriques en amont du réseau.

Tableau 4 : Bilan des crues sur les huit stations hydrométriques d'apports majeurs. Les codes couleurs indiquent l'ampleur de la crue par rapport aux débits de crue caractéristiques de la banque HYDRO (blanc : période de retour T de moins de 2 ans, bleu foncé : T = 2 ans, bleu clair : T = 5 ans, jaune : T = 10 ans, orange : T = 20 ans, rouge : T = 50 ans). Les cellules grisées indiquent les données lacunaires aux stations.

date	Le Loing à Episy	L'Armançon à Briennon	La Seine à Bar-sur-Seine	L'Aube à Blaincourt	L'Yonne à Gurgy	Le Serein à Chablis	La Marne à Saint-Dizier	La Saulx à Vitry-en-Perthois
J10								
N10								
J19								
J24								
N44								
F45								
J55	152		315	214	334	93	496	
J59	130		174	178	233	72	424	205
F70	138	271	208	171	285	74	350	199
F77	177	242	172	135	303	88	222	194
A78	200	178	130	94	178	42	130	112
F80	174	291	159	171	256	94	140	153
J82	296	338	194	135	267	92	208	130
D82	161	315	189	154	279	96	116	163
A83	249	236	182	137	281	86	174	188
D93	50	205	141	82	183	74	139	210
J95	132	185	148	71	282	75	141	181
M99	126	229	238	100	278	90	180	119
D99	164	195	178	84	261	101	130	208
M01	142	291	167	75	386		123	161

<sup>1</sup> Deux types d'épisodes pluvieux se produisent sur le bassin de la Seine : les épisodes de type océanique -les plus courants- en provenance de l'Ouest qui sont en général marqués par des pluies peu intenses mais long et les épisodes de type convectif, en provenance du Sud qui sont marqués par des pluies intenses et courtes.

Le Tableau 4 met en évidence la représentativité des crues sélectionnées, avec des crues relativement faibles de périodes de retour généralement supérieures à 2 ans, et atteignant 50 ans sur certains affluents pour quelques crues.

Il s'agit maintenant de bien distinguer les crues de calage et les crues de validation. Les crues de calage sont différentes selon le domaine modélisé hydrauliquement. Quatre domaines majeurs sont identifiés avec des crues de calage différentes :

- Le modèle de la Petite Seine (Aube et Seine jusqu'à Bray-sur-Seine) est calé à partir des crues J55, J82 et J95. Les périodes de retour aux stations d'apport sont représentatives avec une crue très forte (J55), une crue forte (J82) et une crue modeste (J95) ;
- Le modèle de l'Yonne (depuis les stations en amont sur le Serein, l'Armançon et l'Yonne jusqu'à Courlon) est calé sur les crues M99, D99 et M01. La sélection est aussi représentative, avec une crue forte (M01) et deux crues modérées (M99 et D99), mais débordantes sur une partie du secteur ;
- Le modèle de la Seine Moyenne (depuis Bray et Courlon jusqu'à la confluence avec la Marne) est calé à partir des crues J55, F70, J82, D93 et J95. Les crues fortes de 1955 et de 1982 sont accompagnées de crues plus modérées (F70, D93 et J95), ce qui permet d'obtenir un spectre large de situation hydrologique ;
- Le modèle de la Marne est calé sur les crues J55, F70 et J82. Les intensités de ces crues sont représentatives avec des crues très fortes (J55 et F70) et une crue faible (J82).

La représentativité des crues de validation est également satisfaisante. Des crues anciennes très fortes sont utilisées (1910 et 1924), pour lesquelles aucune donnée hydrométrique n'est disponible en amont des modèles hydrauliques.

### 3.4. Représentativité et qualité des données des crues historiques sélectionnées

Le Tableau 4 a mis en évidence que pour les crues de calage, on dispose à chaque fois des hydrogrammes observés aux stations d'apports principales, sauf pour la crue de 1955 pour la Saulx à Vitry. De ce fait, la qualité des données utilisées pour les crues de calage n'est pas remise en cause. Par ailleurs, pour chacun des modèles hydrauliques, il y a au moins une crue récente (postérieure à 1980) parmi les crues de calage, ce qui permet d'envisager des configurations de morphologie du lit proche de l'actuel.

Pour les crues de validation, les données observées sont utilisées pour les crues postérieures à 1960 sur l'ensemble des stations d'apport principales. Pour les six crues anciennes sélectionnées (J10, N10, J19, J24, N44, F45), aucune donnée n'est disponible aux stations d'apport et un recours à la modélisation hydrologique sur les bassins versants correspondant à ces stations est donc envisagé afin de reconstituer leurs débits pour ces crues historiques.

Même si la précision des données d'entrée est moins cruciale pour la validation, il est tout de même demandé aux modèles hydrologiques de fournir des reconstitutions réalistes des débits. Ces modèles hydrologiques étant calés sur les crues récentes, leur capacité à reproduire les débits sur ces crues récentes observées donne une bonne indication de leur fiabilité pour la reconstitution des débits historiques. Dans ce qui suit, une analyse des simulations des modèles hydrologiques est réalisée.

Les modèles hydrologiques utilisés sont des modèles hydrologiques à réservoirs, fonctionnant au pas de temps journalier. Leur structure est tout à fait classique, avec une fonction de production et une fonction de transfert. Le calage du modèle est fait manuellement (i.e. les valeurs des paramètres du modèle sont ajustés en suivant une approche par essais et erreurs en analysant les débits simulés et observés) mais de façon séquentielle sur chacun des paramètres, ce qui permet d'objectiver a minima la procédure d'optimisation des paramètres du modèle.

Une analyse des hydrogrammes simulés par les modèles hydrologiques a été conduite sur les huit bassins en amont du secteur modélisé hydrauliquement. Les hydrogrammes sont en général bien phasés avec des décalages du pic ne dépassant généralement pas un jour. Les valeurs de débit au pic de la crue sont moins bien

simulés (cf. Tableau 5), avec des erreurs relatives de l'ordre de +/- 10% sur les sous bassins de l'Yonne (Yonne à Gurgy, Armançon à Briennon et Serein à Chablis) et de l'ordre de +/-20% sur les autres bassins versants.

Si les erreurs sur les bassins de l'Yonne sont acceptables par rapport à ce que l'on peut attendre des modèles hydrologiques, les erreurs sur les autres bassins sont assez fortes et s'expliquent probablement par la faible densité du réseau pluviométrique pris en compte pour calculer les pluies spatialisées sur ces bassins versants. La densité des postes pluviométriques utilisés dans le cadre de l'étude (cf. Rapport de phase 1, p. 6-7, reporté en Figure 10 ) est faible sur certains bassins versants et en particulier sur la Marne, la Saulx et l'Aube, qui accuse les plus fortes erreurs de débits au pic de crue. Les données de température permettant de calculer l'évapotranspiration potentielle sont également peu nombreuses par rapport à la superficie des bassins versants considérés, ce qui peut avoir un impact sur la simulation des crues de printemps et d'automne.

Tableau 5 : Erreur relative (%) du pic de crue simulé par les modèles hydrologiques sur les 8 bassins versants de tête. L'analyse est faite sur tous les hydrogrammes simulés et observés du rapport de phase 2.2.

	Le Loing à Episy	L'Armançon à Briennon	La Seine à Bar-sur-Seine	L'Aube à Blaincourt	L'Yonne à Gurgy	Le Serein à Chablis	La Marne à Saint-Dizier	La Saulx à Vitry-en-Perthois
J10								
N10								
J19								
J24								
N44								
F45								
J55			-17					
J59	31						-44	-5
F70		-2			1	6		
F77		2			15	10		
A78		-6			-20	3		
F80	-9	-11			0	12		70
J82		-23			22	11		
D82		-1			-2	-11		
A83		-2			-33	-6		
D93		-4			17	5		
J95		-24			-2	-20		
M99	8	-1	-13	50	-8	-4	-14	-17
D99	22	-3	11	-7	7	-7		5
M01	-7	1	-17	26	-13	14	17	-19



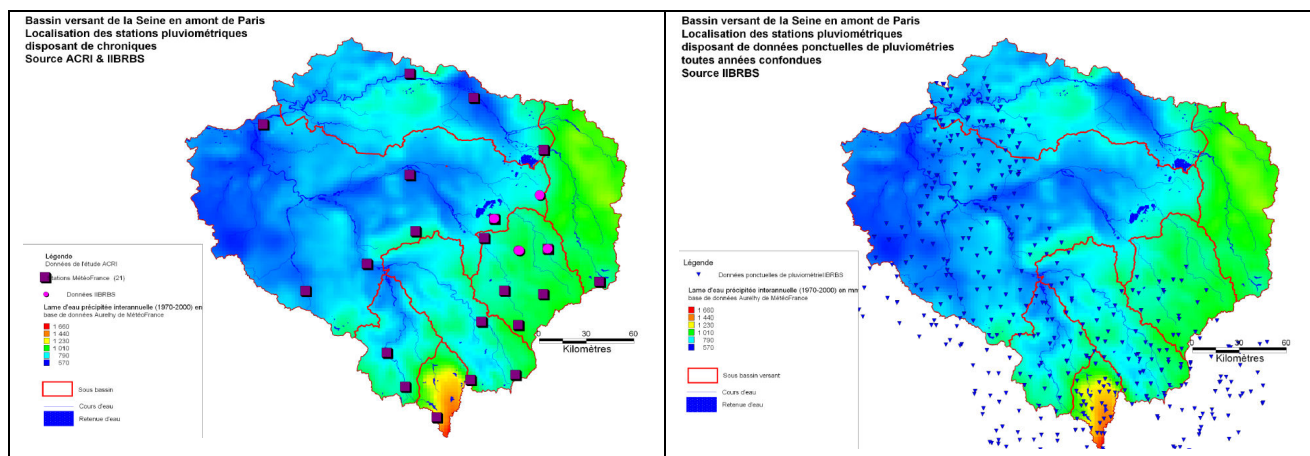


Figure 10 : Stations pluviométriques utilisées dans le cadre de l'étude. Stations sur le long terme (à gauche) et données ponctuelles plus récentes (à droite). Figures issues du rapport de phase 1 de l'étude.

Les erreurs de modélisation hydrologiques constatées sur les crues de calage des modèles hydrologiques sont forcément présentes sur les crues de validation utilisées pour mettre en place les outils de gestion de l'aménagement. Ces erreurs sur les bassins amont sont susceptibles de se propager dans le modèle hydraulique en aval de ces bassins de tête. Toutefois, cette propagation n'est pas facile à appréhender puisque certaines de ces erreurs peuvent se compenser. Des études de sensibilité sont indispensables pour mieux appréhender cette propagation d'erreurs, d'autant que le poids de ces erreurs peut être considérable sur le résultat final dans le réseau hydrographique compte tenu de l'importance quantitative des apports simulés par les modèles hydrologiques (voir les surfaces d'apport figurées en Figure 9)

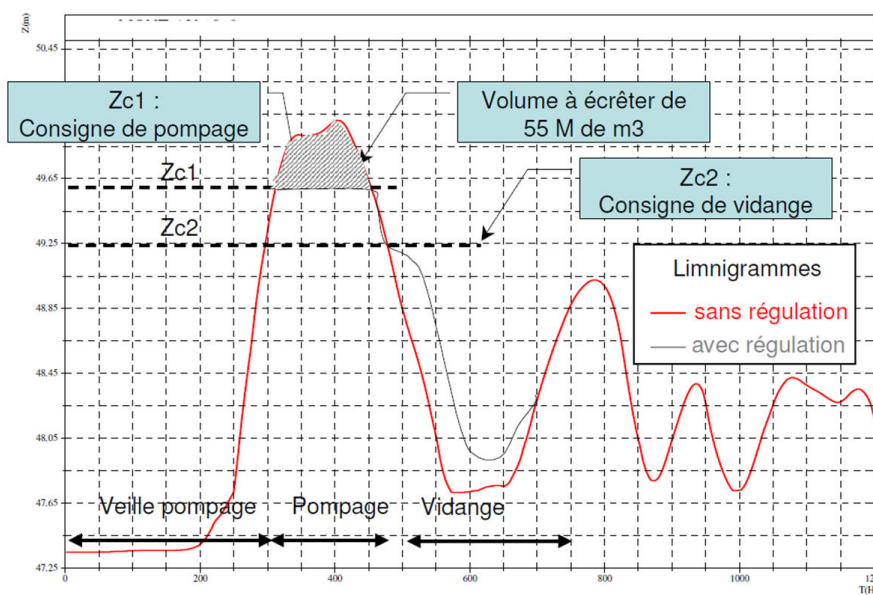
### 3.5. Expertise du modèle de prévision de crue développé sur le bassin de l'Yonne

Cette section expertise une partie du rapport de phase 2.3 portant sur la gestion de l'aménagement Bassée. Cette gestion repose sur deux éléments qui sont traités de façon séquentielle dans le rapport :

1. La mise en place de consignes de gestion, à partir du cas où les hydrogrammes futurs sur les affluents de l'Yonne sont connus ;
2. La réalisation d'un modèle de prévision des crues sommaire sur le bassin de l'Yonne, à partir de trois modèles de prévision développés sur les trois affluents majeurs : l'Yonne amont, le Serein et l'Armançon, afin d'estimer l'incertitude lié à la prévision.

Il faut noter en préambule que beaucoup de tests de sensibilité sont menés dans cette étude au fur et à mesure de l'avancée du rapport. Concernant les consignes de gestion, la solution retenue est celle proposée en première approche et qui a donc été testée sur les 20 crues historiques en prévision de débits parfaite. La gestion adaptative consistant à mettre à jour la cote de consigne toutes les 12 heures en fonction de la prévision des crues a été testée uniquement sur les crues doubles complexes telles que la crue de 1910 et celle de 1982. Des études complémentaires sur le développement de l'outil de gestion à proprement parler sont à programmer dans la poursuite du projet.

Le principe retenu pour le pompage est basé sur une régulation du débit de pompage en fonction d'une cote de consigne Zc1 située sur la Seine, en aval de la confluence Seine-Yonne, au niveau de Montereau (cf. Figure 11). De la même manière, la vidange est régulée à partir de cotes de consigne de vidange à ne pas dépasser de manière à ne pas générer de débordement (consigne Seine-Yonne Zc2 : située en aval de la confluence à Montereau et consigne Seine amont Zc3 : située en amont de la confluence et de Montereau). La cote de consigne Zc1 est la plus critique pour le bon fonctionnement de l'ouvrage. Elle dépend de l'épisode de crue et notamment du maximum observé/prévu. En effet, le calcul de Zc1 finalement retenu est obtenu à partir de la forme de l'hydrogramme de crue à Montereau, de façon à ce que le volume au-dessus du débit  $q(Zc1)$  soit égal à la capacité des casiers de la Bassée.



Limnigramme de la Seine à Montereau – Aval confluence

Figure 11 : Principe de gestion de l'ouvrage à partir des cotes de consignes Zc1 et Zc2. Figure issue du rapport de phase 2.3.

Il faut noter que les gains calculés lors de l'optimisation des cotes de consigne reposent sur des hydrogrammes observés et non prévus par le modèle de prévision. Ces gains –et probablement les cotes de consigne optimales– sont donc différents de ceux envisagés en situation opérationnelle.

Les gains effectifs de l'ouvrage sont mieux appréhendés par la suite en utilisant les hydrogrammes prévus par le modèle de prévision de crue développé sur les trois sous-bassins de l'Yonne en amont de Montereau. Ce modèle de prévision repose sur trois modèles hydrologiques développés sur les stations de l'Yonne à Gurgy, l'Armançon à Briennon et le Serein à Chablis ainsi que sur un modèle de propagation depuis ces trois stations jusqu'à Montereau.

Un modèle de prévision est sensiblement différent d'un modèle de simulation puisque l'on dispose d'une information supplémentaire cruciale qui est le débit observé à l'instant de la prévision. En revanche, l'information de pluie future n'est pas connue et le modèle utilise en entrée des scénarios de pluie pour les heures suivant l'instant de prévision. La Figure 12 illustre ces différences entre modèle de simulation et modèle de prévision.

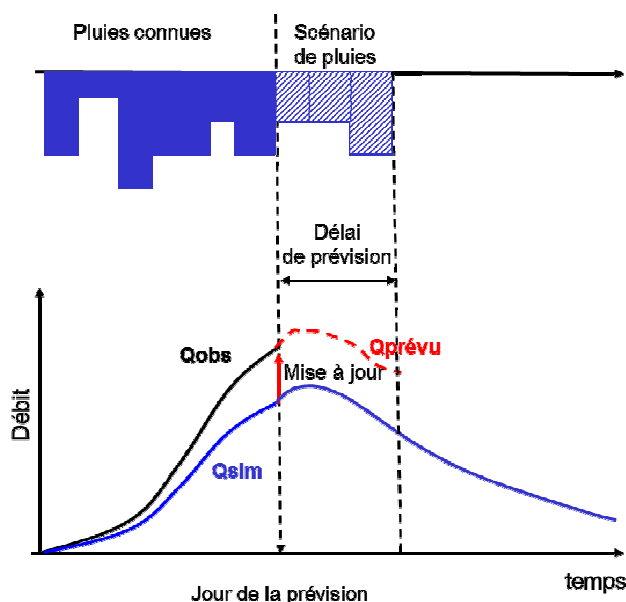


Figure 12 : Principe d'un modèle hydrologique de prévision

Les modèles de prévision développés dans le cadre de l'étude ont les caractéristiques suivantes :

- Fonctionnement continu, ce qui permet de bien représenter l'état de saturation du bassin avant chaque crue ;
- Les paramètres issus du calage des modèles en simulation sont utilisés en mode prévision. Cependant, il faut noter que le pas de temps du modèle de prévision est de 2 heures, alors que le pas de temps des modèles de simulation était journalier. En général, il est préconisé de caler un modèle au pas de temps pour lequel il est ensuite utilisé. Par conséquent, un recalage des paramètres du modèle pourrait se révéler utile ;
- La mise à jour du modèle repose sur un report pondéré de l'erreur commise à l'instant de la prévision ainsi que toutes les six heures à partir de l'instant de mise en alerte. La pondération est optimisée à partir des crues de calage. Il faut noter ici que certains modèles de prévision intègrent cette procédure de calage directement dans le modèle hydrologique, i.e. tous les paramètres du modèle hydrologique et du modèle d'erreur sont calés simultanément. Des tests en ce sens pourraient être réalisés afin d'optimiser les modèles de prévision. Par ailleurs, la mise à jour par report d'erreur est de moins en moins utilisée dans les modèles de prévision, des mises à jour sur les variables d'état du modèle étant en général plus efficaces et plus robustes. Il faut préciser que la mise à jour toutes les six heures est testée seulement a posteriori sur deux crues historiques. Des tests sur l'ensemble des crues sont nécessaires pour affiner les éléments de cette mise à jour (pas de temps, pondération du report d'erreur, etc.)

Le modèle de prévision est testé pour chaque crue historique. Le début de la simulation est fixé selon la date du pic (on commence la prévision quatre jours avant le pic de débit). Cette méthodologie n'est pas très correcte car on se place dans une situation où :

- On est sûr qu'il y aura bien une crue (il est donc impossible de tester la défaillance du modèle vis-à-vis des fausses alertes) ;
- Le début de la crue correspond généralement au début de la prévision.

Ces aspects méthodologiques devront être remis à plat par la suite en testant le modèle de prévision en mode continu, avec un recalage régulier des paramètres de sol du modèle hydrologique au cours de la saison, afin de bien capter le moment où se produit de début de crue. Cette analyse permettrait en outre de mieux identifier le rapport coût-bénéfice si le modèle de prévision conduisait à de nombreuses fausses alertes et donc à des déclenchements de pompages inutiles.

Les résultats obtenus avec les hydrogrammes prévus indiquent des bénéfices moyens de l'ouvrage du même ordre que lorsque les hydrogrammes observés sont utilisés. Ceci est dû au fait que pour les crues modestes D82 et D99, la prévision surestime les débits et l'ouvrage a donc tendance à stocker plus qu'il ne devrait. Pour la crue plus importante de 1970, il y a une dégradation sensible des bénéfices.

Une analyse de sensibilité a également été menée sur les scénarios de pluie utilisés en entrée des modèles de prévision. Le modèle d'erreur envisagé est à ce stade trop simple puisqu'il s'agit uniquement de modifier les cumuls linéairement pour les deux journées tenues responsables du pic de crue. Un modèle d'erreur introduisant un décalage temporel du pic de précipitations aurait été plus réaliste et probablement plus préjudiciable pour l'efficacité estimée de l'ouvrage. En l'état, les scénarios de pluies tendent juste à moduler le pic de crue. Compte tenu de l'erreur initiale imputable au modèle de prévision, on reste souvent dans l'intervalle de cette erreur. La littérature sur la prévision hydrométéorologique tend pourtant à montrer que l'incertitude sur les scénarios de pluie est souvent plus importante que l'incertitude liée au modèle hydrologique.

### 3.6. Bilan et recommandations

Le panel de crues utilisées au calage et en validation est très riche, ce qui permet de tester le modèle dans des configurations hydrologiques variées (répartition spatiale de l'aléa, saison, amplitude générale de la crue, état de saturation du sol, etc.).

Pour les crues de validation et de projet, le nombre important de crues historiques implique un recours fréquent à la modélisation hydrologique, qui permet de reconstituer les débits d'apports en amont du réseau hydrographique modélisé, à partir des pluies et températures observées sur les bassins versants correspondants. Même si les crues de projet et de validation n'ont pas les mêmes exigences que les crues de calage (cf. Section 1.4), ce recours à la modélisation introduit des erreurs pouvant être importantes sur les débits d'apports. Ces erreurs peuvent venir d'incertitudes sur la structure du modèle utilisé, ainsi que d'incertitudes sur les données utilisées pour caler les modèles hydrologiques. En effet, les données de pluie utilisées pour simuler les apports pour les crues sélectionnées sont très limitées. Un effort de collecte de données permettrait probablement d'améliorer les simulations des modèles hydrologiques. Il est également difficile d'appréhender quantitativement la propagation de ces incertitudes dans les modèles hydrauliques compte tenu des compensations possibles des erreurs faites en entrée du modèle hydraulique. Il serait intéressant de voir l'effet d'une simulation pluie-débit sur tous les bassins d'apport dans une configuration où les hydrogrammes d'entrée sont disponibles, afin de comprendre comment l'incertitude se propage. Cependant, au vu du nombre important des crues utilisées pour le calage, les crues de validation sont plus utilisées comme des crues de projet et on peut supposer que le degré de réalisme de ces crues de projet est suffisant à ce stade.

Le modèle de prévision de crues développé sur le bassin de l'Yonne s'appuie sur les modèles de simulation développés dans le cadre de l'étude pour simuler les apports en entrée du modèle hydraulique. Il faut souligner que les modèles de simulation étaient particulièrement performants sur les sous-bassins de l'Yonne, ce qui donne un certain crédit au modèle de prévision proposé ensuite. L'analyse du temps de réaction du bassin de l'Yonne montre qu'il est envisageable de gérer l'aménagement de la Bassée malgré les contraintes liées à la mise en place du dispositif de pompage. L'efficacité de l'aménagement dépendra de la performance et la robustesse du modèle de prévision des crues qui sont encore difficiles à évaluer compte tenu des développements encore en cours sur la procédure de mise à jour du modèle de prévision ainsi que sur l'utilisation des scénarios de pluie de Météo-France.

Pour la suite de l'évaluation de la gestion de l'ouvrage, il faudrait rendre le cadre méthodologique plus clair. En particulier :

- L'utilisation des modèles de prévision à des pas de temps fins (deux heures) nécessite de recalibrer les modèles hydrologiques à ce pas de temps de la prévision;
- Il est indispensable par la suite de tester le modèle de prévision en mode opérationnel, i.e. en continu sur la chronique historique afin d'évaluer ses défaillances vis-à-vis des fausses alertes (et faire ainsi une véritable analyse coût-bénéfice) ;
- Les incertitudes liées à la prévision hydrologique ne sont pas assez bien identifiées. Cette question devrait être traitée par la suite en distinguant les incertitudes imputables au modèle de prévision et celles imputables aux scénarios de pluie.

## Liste des illustrations

Figure 1 : Schéma représentant les données hydrologiques nécessaires pour la modélisation hydraulique.....	7
Figure 2 : Schéma représentant les données hydrologiques à reconstituer pour la modélisation hydraulique.....	8
Figure 3 : Schéma illustrant le compromis entre représentativité de l'évènement et représentativité des données pour le choix d'une crue de calage (ou de validation). Les points verts représentent les solutions acceptables car non dominés sur un des deux objectifs. Cas d'une crue de la Seine à Paris.....	9
Figure 4 : Situation géographique du domaine modélisé pour le projet de mise à grand gabarit de la liaison fluviale entre Bray-sur-Seine et Nogent-sur-Seine. Indication des stations hydrométriques utilisées pour constituer les hydrogrammes d'entrée.....	12
Figure 5 : Hydrogrammes observés et reconstitués à Pont-sur-Seine à partir des stations de Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube pour les crues de 2000 et 2001.....	15
Figure 6 : Hydrogramme reconstitué à Pont-sur-Seine à partir des stations de Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube pour la crue de 1982. Le débit finalement injecté au modèle hydraulique « Bassée » est également indiqué.....	16
Figure 7 : Relations entre débits maximaux de crue des stations amont de Méry-sur-Seine et d'Arcis-sur-Aube et la station aval de Pont-sur-Seine. Réalisé à partir des crues référencées au Tableau 2.....	16
Figure 8 : Volumes des crues calculés à la station de Pont-sur-Seine en fonction de la somme des volumes de crues aux stations amont. Réalisé à partir des crues référencées au Tableau 2.....	17
Figure 9 : Emprise géographique du domaine modélisé. Le réseau hydrographique modélisé hydrauliquement est surligné. Les 21 points d'injection du modèle hydraulique (i.e. hydrogrammes d'entrée) sont indiqués en rouge et les bassins versants correspondants à ces points d'injection sont indiqués sur la figure de droite.....	20
Figure 10 : Stations pluviométriques utilisées dans le cadre de l'étude. Stations sur le long terme (à gauche) et données ponctuelles plus récentes (à droite). Figures issues du rapport de phase 1 de l'étude.....	25
Figure 11 : Principe de gestion de l'ouvrage à partir des cotes de consignes Zc1 et Zc2. Figure issue du rapport de phase 2.3.....	26
Figure 12 : Principe d'un modèle hydrologique de prévision.....	26
Tableau 1 : Synthèse sur les stations hydrométriques de la banque HYDRO présentes sur le secteur ou en amont (valeurs calculées le 04/11/2012).....	12
Tableau 2 : Bilan des crues sur les stations de Pont-sur-Seine, Méry-sur-Seine et Arcis-sur-Aube. Les codes couleurs indiquent l'ampleur de la crue par rapport aux débits de crue caractéristiques de la banque HYDRO (gris : période de retour T de moins de 2 ans, bleu: T = 2 ans, vert : T = 5 ans, jaune : T = 10 ans et orange : T = 20 ans).....	14
Tableau 3 : Synthèse sur les stations hydrométriques utilisées pour fournir les hydrogrammes d'entrée du modèle hydraulique de Seine Grands Lacs (valeurs calculées le 04/11/2012). Sur fond gris, les stations d'apports majeurs.....	21
Tableau 4 : Bilan des crues sur les huit stations hydrométriques d'apports majeurs. Les codes couleurs indiquent l'ampleur de la crue par rapport aux débits de crue caractéristiques de la banque HYDRO (blanc : période de retour T de moins de 2 ans, bleu foncé : T = 2 ans, bleu clair : T = 5 ans, jaune : T = 10 ans, orange : T = 20 ans, rouge : T = 50 ans). Les cellules grisées indiquent les données lacunaires aux stations.....	22
Tableau 5 : Erreur relative (%) du pic de crue simulé par les modèles hydrologiques sur les 8 bassins versants de tête. L'analyse est faite sur tous les hydrogrammes simulés et observés du rapport de phase 2.2.....	24

## Références citées

- Cemagref, 2004. Critique d'un jeu de données hydrométriques pour la Diren Ile-de-France. 36p +Annexes,
- Marti, R. et Lepelletier, T., 1997. L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine - Hydrology of the 1910 flood and other major floods of the Seine basin. Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau, 52(8): 33-39,
- SOGREAH, 1977. Conséquence de la canalisation à grand gabarit de la Seine entre Bray et Villiers sur Seine.
- Villion, G., 1997. Rôle des lacs-réservoirs amont : les grands lacs de Seine - Role of upstream reservoir lakes: The Grands Lacs de Seine. Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau, 52(8): 51-56,

## Glossaire

- Banque HYDRO** : Banque de données nationale qui stocke les mesures de hauteur d'eau (à pas de temps variable) et de débits en provenance des stations de mesure implantées sur les cours d'eau français.
- Bassin versant** : Un bassin versant représente l'ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et par ses affluents. Son contour est délimité par des frontières naturelles que sont les « crêtes » qui représentent la ligne de partage des eaux. Chaque bassin versant est divisé en sous-bassins versants qui correspondent à la surface d'alimentation de chacun des affluents se jetant dans le fleuve principal.
- Bathymétrie** : La bathymétrie consiste en la mesure de la profondeur d'un plan d'eau par sondage et traitement des données correspondantes en vue de déterminer la configuration du fond de la rivière.
- Calage** : Un modèle (hydrologique ou hydraulique) comporte un certain nombre de paramètres dont la valeur doit être estimée par calage. Le calage consiste à déterminer les valeurs de ces paramètres afin que la modélisation restitue les observations. Une fois le modèle calé, il doit être validé en faisant les mêmes comparaisons avec d'autres crues.
- Crue de calage** : Episode de crue utilisé pour caler (i.e. ajuster) les valeurs des paramètres du modèle. La qualité du calage s'évalue en comparant les simulations du modèle aux observations.
- Crue de validation** : Episode de crue utilisé pour tester (contrôler) les paramètres d'un modèle qui ont été préalablement calés à partir d'une crue de calage. L'évaluation de la qualité de la validation se fait en comparant les simulations du modèle aux observations.
- Crue de projet** : Episode de crue utilisé pour tester un scénario d'aménagement. L'épisode peut être un épisode historique observé ou une crue hypothétique.
- Débit d'apport** : Débit utilisé en entrée du modèle hydraulique
- EPTB** : L'EPTB est l'acronyme d'Établissement Public Territorial de Bassin. Il désigne une organisation agissant pour le compte des collectivités locales afin d'aménager et de mettre en valeur les nappes, les fleuves et les milieux aquatiques. Il existe aujourd'hui 21 EPTB reconnus en France, chacun intervenant sur un bassin-versant ou une fraction de bassin-versant.
- Etiage** : Etat d'un cours d'eau pour des débits exceptionnellement faibles.
- Hydrogramme** : Suite des débits en fonction du temps, présentée généralement sous forme de graphique
- Hydrogramme d'entrée** : Chronique de débit utilisée en entrée du modèle hydraulique
- Limnigramme** : Suite des niveaux d'eau en fonction du temps, présentée généralement sous forme de graphique
- Lit** : Le lit est l'espace occupé par un cours d'eau, de manière permanente ou temporaire.
- Lit majeur** : Le lit majeur, appelé aussi « plaine d'inondation » ou « lit d'inondation », est la partie adjacente au chenal d'écoulement d'un cours d'eau, qui n'est inondée qu'en cas de crue.
- Lit mineur** : Le lit mineur est le chenal où l'eau s'écoule avant débordement.
- Modèle** : Représentation du bassin versant et/ou de la rivière par des éléments dont le fonctionnement peut être décrit par des relations mathématiques (des modélisations) qui permettent de simuler l'écoulement pour diverses situations observées ou inventées.
- Modélisation** : Représentation d'un phénomène physique (l'écoulement, en l'occurrence) par des relations mathématiques.
- Période de retour** : La période de retour (ou récurrence) est l'inverse de la fréquence (au dépassement) d'un événement. Cette fréquence correspond à la probabilité que cet événement soit atteint ou dépassé chaque année.
- SGL** : Seine Grands Lacs, établissement public territorial de bassin (EPTB) en charge du bassin de la Seine en amont de la confluence avec l'Oise (arrêté du préfet de région du 7 février 2011). Ses missions ont comme objectif de faciliter dans sa globalité la gestion équilibrée de la ressource en eau à l'échelle du bassin Seine amont. Cela implique en particulier la prévention des inondations, la préservation et la gestion des zones humides ou la contribution à l'atteinte du bon état écologique des eaux.
- Station hydrométrique** : Une station hydrométrique se définit comme une section d'un cours d'eau instrumentée où l'on mesure la hauteur et détermine le débit.