



DATE

Mai 2015

AUTEURS

Florian GETTVERT

Ségolène LOUPIAC

Élèves-ingénieurs en 3^{ème} année

Spécialité Gestion des Cours d'Eau et du Littoral

École Nationale des Travaux Publics de l'État

INTERVENANTS

Patrick CHASSE

CEREMA EMF

Patrick FOURMIGUE

Matthieu ALQUIER

Anne-Marie FROMENTAL

Elodie PAYA

CEREMA Méd.

INTRODUCTION	3
HYDROMETRIE ET HYDROLOGIE DES CRUES DE LA MARNE	4
1 Calculs élémentaires du débit de débordement de la Marne	4
2 Ajustement des courbes de tarage de la Marne	5
3 Etude du régime hydrologique de la Marne en période de crue	7
4 Quantiles de période de retour	10
CALCULS PRELIMINAIRES DU DEBIT DERIVE DANS LE CANAL DE SAINT-MAUR	12
1 Relation entre débit et hauteur d'eau dans le tunnel	12
2 Profil en long du canal de Saint-Maur avec l'écluse.	13
3 Vitesse dans le tunnel	13
MODELISATION HYDRAULIQUE EN REGIME PERMANENT	16
1 Construction et calage d'un modèle en bief unique	17
2 Construction du modèle complet	19
3 Optimisation de la position de la vanne-secteur en temps de crue	19
4 Impact de la vanne-secteur sur les crues en amont	20
MODELISATION HYDRAULIQUE EN REGIME NON-PERMANENT	21
1 Etat de référence « Canal fermé » et état « canal ouvert »	21
2 Comparaison et impact	21
ANNEXE	24

INTRODUCTION

Le projet en milieu fluvial se situe sur la boucle dite de Saint-Maur-des-Fossés, sur la Marne, entre Gournay-sur-Marne en amont et le confluent avec la Seine en aval.

Il porte sur l'étude d'une vanne-secteur, dont la rénovation, voire la reconstruction, est projetée par VNF, Direction Territoriale de la Seine, subdivision de Joinville.

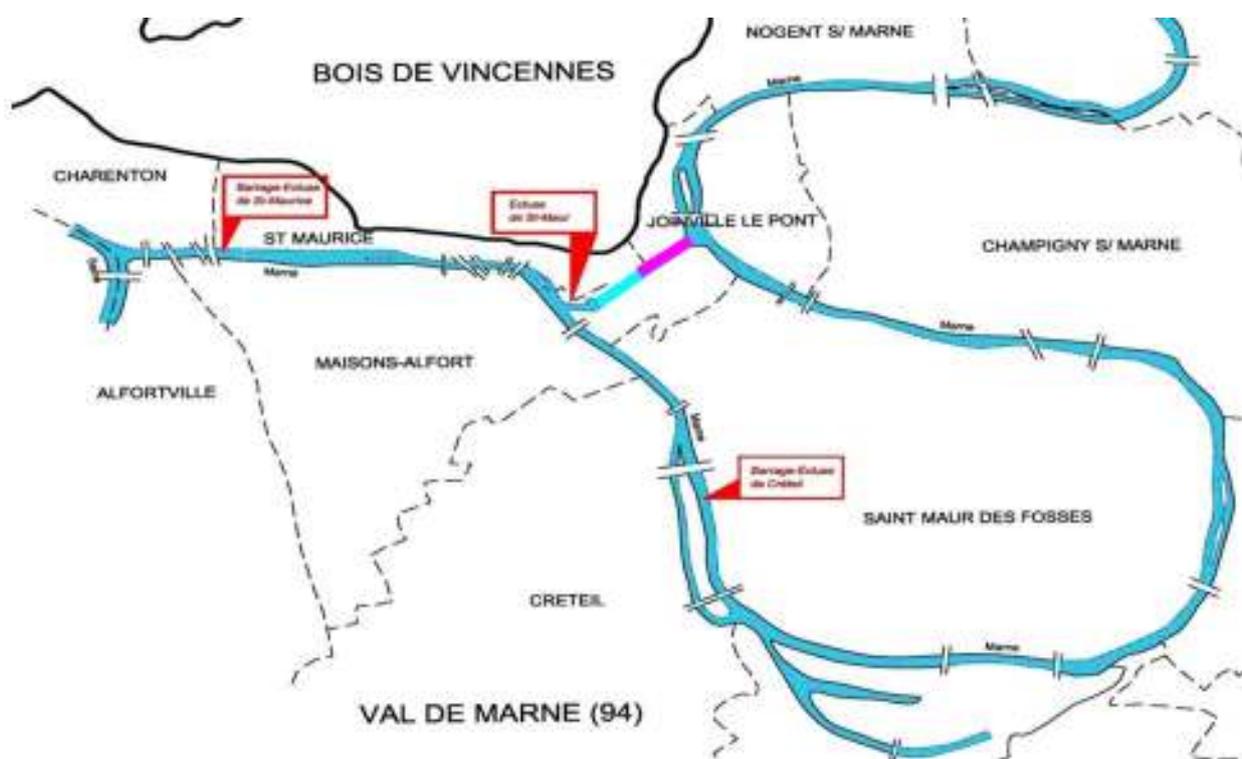


Figure 1 : La Marne, boucle de Saint-Maur.

Cette boucle, d'une longueur d'environ 14 kilomètres, est court-circuitée par le canal de Saint-Maur (Figure 1) dont l'accès se fait par un tunnel-canal. La vanne-secteur est localisée dans la tête amont de l'écluse aval du canal de Saint-Maur et est en position basse en période normale.

Ce rapport se décompose en quatre parties :

- l'étude de l'hydrométrie et du régime hydrologique de la Marne en période de crues ;
- une première approche de l'estimation du débit dérivé dans le canal de Saint-Maur ;
- une modélisation hydraulique de la boucle de Saint-Maur et du canal en régime permanent ;
- une modélisation hydraulique de la boucle de Saint-Maur et du canal en régime non-permanent – établissement de profils temporels et spatiaux en amont et en aval de la restitution du canal de Saint-Maur dans la Marne pour évaluer les impacts.

HYDROMETRIE ET HYDROLOGIE DES CRUES DE LA MARNE

La crue de référence de la Marne sur le secteur de la boucle de Saint-Maur est la crue historique de 1910, estimée centennale. Cette crue historique a servi de référence à l'établissement du PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation). L'objectif de cette partie est de resituer cette crue dans la chronique des crues enregistrées ou relevées à plusieurs stations hydrométriques. D'autres crues historiques seront exploitées dans le projet comme celles de 1955, 1970 et 1999.

1 Calculs élémentaires du débit de débordement de la Marne

Afin de pouvoir avoir une première estimation du débit de débordement de la Marne au niveau de la boucle de Saint-Maur, il peut être pertinent de considérer une section moyenne du lit mineur de la Marne sur laquelle calculer un débit de débordement.

Pour cela, on considère que cette section moyenne du lit mineur de la Marne est de forme trapézoïdale et présente les caractéristiques suivantes : une largeur au plafond de 65 m, un fruit des talus de 3/2 et un coefficient de Strickler de 30 (rugosité uniforme sur toutes les parois de la section : fond et talus). La pente moyenne des écoulements en crue peut être estimée grâce à l'étude du profil en long de la Marne dans la boucle de Saint-Maur à $i = 0,25$ m/km.

A partir de toutes ces informations, il est alors possible de déterminer une relation entre le débit uniforme et la hauteur, appelée courbe de tarage « théorique », de la Marne dans notre secteur d'étude. Les résultats de ce modèle sont présentés en *Figure 2*, le détail des calculs peut être visualisé en [Annexe 1](#).

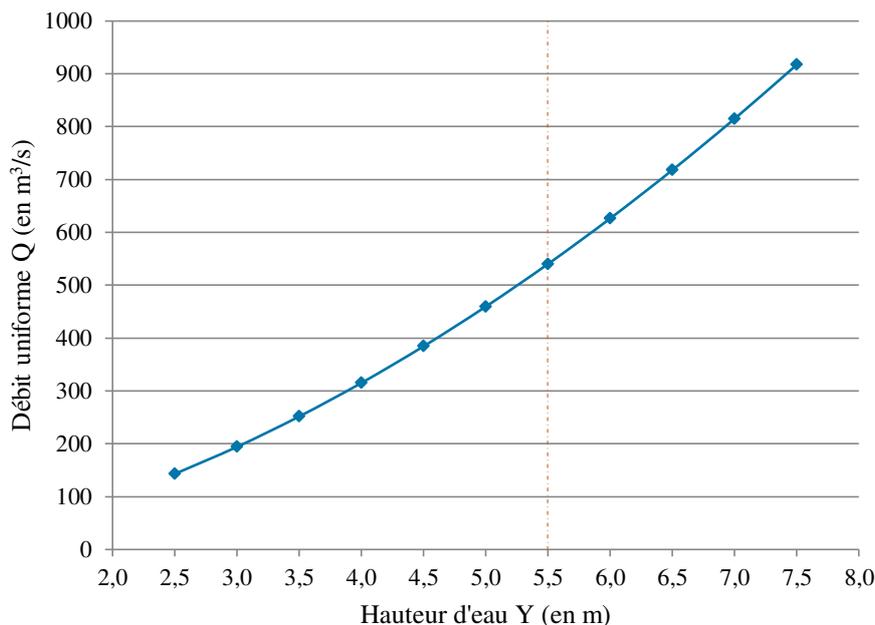


Figure 2 : Courbe de tarage « théorique » de la Marne dans la boucle de Saint-Maur.

Une courbe des vitesses peut également être déduite du débit par la relation suivante : $V=Q/S$. Cette courbe des vitesses selon la hauteur d'eau dans la section du canal est présentée en *Figure 3*.

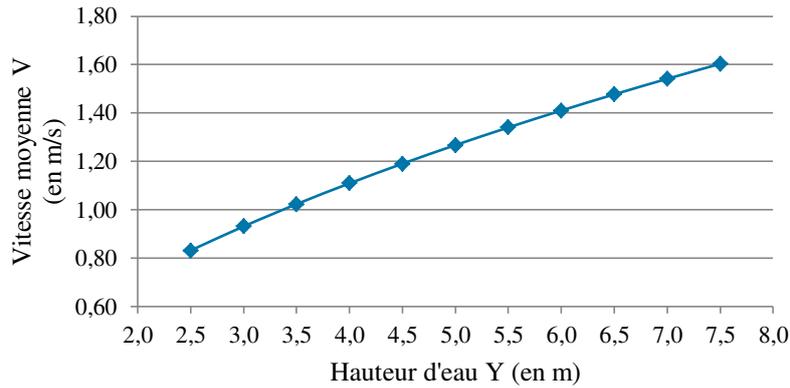


Figure 3 : Vitesse moyenne observée de la Marne en fonction de la hauteur d’eau au niveau de la boucle de Saint-Maur.

La hauteur de débordement de la Marne est estimée à 5,50 m au niveau de la boucle de Saint-Maur. Ce débordement est par conséquent observé à partir d’un débit de 540 m³/s, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 1,34 m/s et un régime fluvial (nombre de Froude inférieur à 1).

Cependant, les données issues de jaugeages permettent d’atteindre une évaluation davantage satisfaisante de la relation entre la hauteur d’eau et le débit du cours d’eau.

2 Ajustement des courbes de tarage de la Marne

Les données hydrométriques disponibles dans le secteur d’étude sont :

- la station hydrométrique de Noisiel, ayant fonctionné de 1957 à 1996, avec des enregistrements de débits de septembre 1973 à juin 1998 et les jaugeages associés de 1968 à 1982 ;
- la station hydrométrique de Gournay-sur-Marne, fonctionnant depuis novembre 1996 à partir d’une courbe de tarage et d’une station à ultra-sons, avec les jaugeages associés.

Ces deux stations sont localisées à l’amont de l’entrée du canal de Saint-Maur. Leurs courbes de tarage sont présentées en Figure 4 et Figure 5.

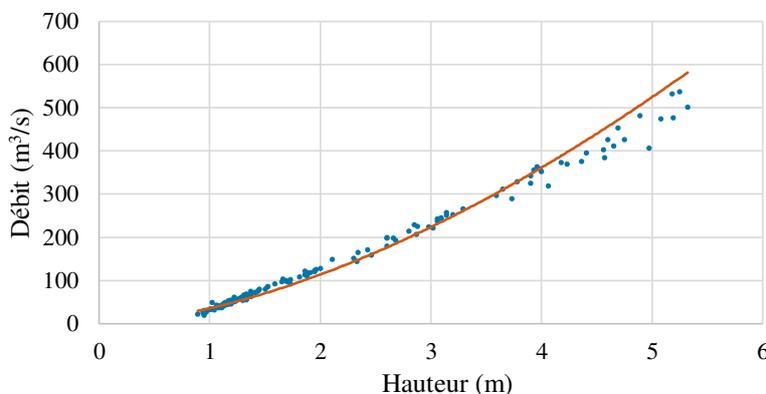


Figure 4 : Courbe de tarage à la station de Gournay-sur-Marne.

Une régression *puissance* à partir des 149 couples hauteur – débit recueillis sur la station (points bleus sur la Figure 4) permet d’obtenir la relation suivante pour la station de Gournay-sur-Marne : $Q = 35,824 \cdot H^{1,6678}$ ($R^2 = 0,98$). Cette relation est représentée par la courbe orange de la Figure 4.



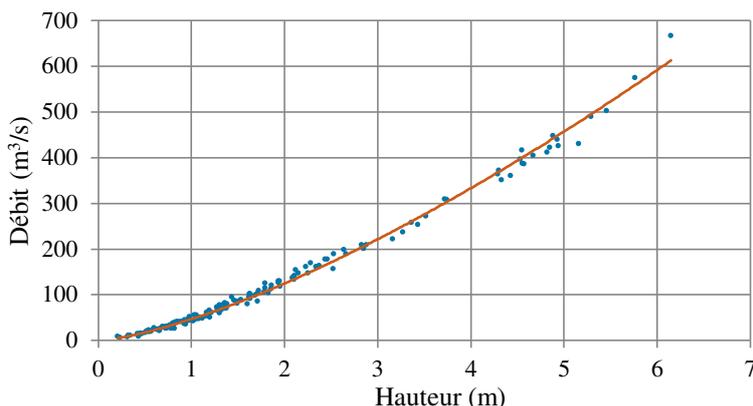


Figure 5 : Courbe de tarage à la station de Noisiel.

De même que pour la courbe de tarage de la station de Gournay-sur-Marne, une régression puissance à partir des 157 couples hauteur – débit recueillis sur la station de Noisiel (points bleus sur la Figure 5) permet d’obtenir la relation suivante : $Q = 46,759.H^{1,4165}$, $R^2 = 0,99$ (courbe orange de la Figure 5).

Ainsi, à partir des chroniques journalières des hauteurs limnimétriques sur les deux stations et des courbes de tarage ci-dessus, il est possible de disposer *in fine* des débits journaliers du 30 octobre 1996 au 03 janvier 2007 pour la station de Gournay-sur-Marne et du 1 janvier 1974 au 22 juin 1998 pour la station de Noisiel.

Dans le cadre de notre étude, une seule chronique de débits de la Marne serait préférable pour analyser le comportement de la vanne-secteur de l’écluse de Saint-Maur. Il convient alors de fusionner les chroniques précédentes pour disposer d’une chronique de débits de la Marne entre 1974 et 2006 et cela passe d’abord par une comparaison des hauteurs et débits obtenus sur la période de recouvrement de 18 mois des débits de Noisiel et Gournay-sur-Marne.

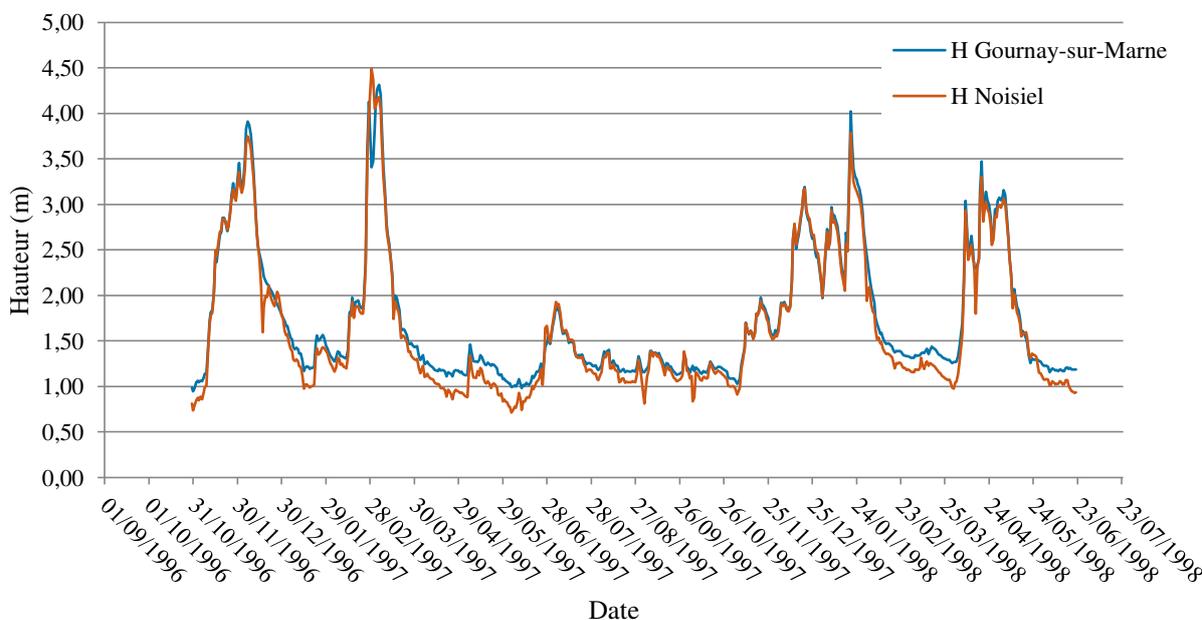


Figure 6 : Chroniques journalières des hauteurs limnimétriques des deux stations sur la période de recouvrement du 30/10/1996 au 22/06/1998.



La *Figure 6* montre une bonne cohérence entre les hauteurs d'eau observées au niveau des deux stations pour les périodes de hautes eaux et des écarts plus forts de hauteur d'eau pour les périodes de basses eaux (entre avril et septembre 1997, un maximum de différence de 30,5 centimètres est par exemple observé le 27/06/1997). Cependant, par la suite, seuls les débits de pointe observés en période de hautes eaux nous intéressent.

Les deux chroniques journalières des hauteurs limnimétriques ont alors été regroupées dans une seule et même chronique et, pour la période de recouvrement, il a été choisi de sélectionner la hauteur maximale journalière observée entre les deux séries.

Au final, en fusionnant les chroniques de débit de la Marne précédentes, cela permet de disposer d'une seule chronique de débits de la Marne de 1974 à 2006 et d'estimer une seule et même courbe de tarage pour la Marne (*Figure 7*) dont l'équation est la suivante : $Q = 43,036.H^{1,4768}$ ($R^2 = 0,9756$). C'est cette courbe de tarage qui sera employée dans la suite de l'étude.

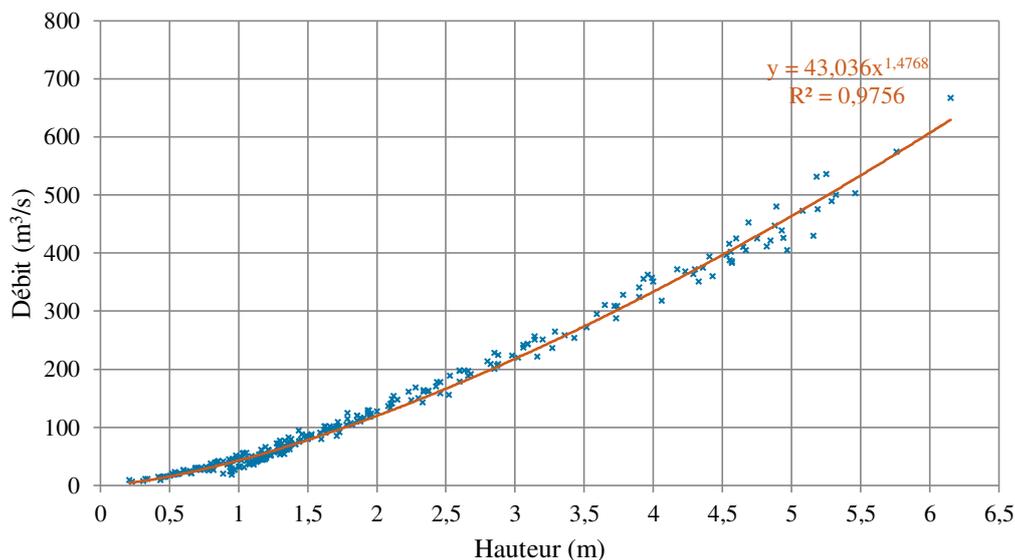


Figure 7 : Courbe de tarage de la Marne en amont du secteur d'étude.

3 Etude du régime hydrologique de la Marne en période de crue

Dans cette partie, l'intérêt sera porté sur l'étude des crues de la Marne en amont de la boucle de Saint-Maur. Un échantillonnage par valeurs maximales annuelles (MAXAN) est effectué sur la chronique des débits journaliers observés sur la période 1974 - 2006. Les données sont fournies dans le *Tableau 1*. Le tracé chronologique de cette série est donné en *Figure 8* et un résumé statistique des données est également réalisé (*Tableau 2*).

Tableau 1 : Maxima annuels de la Marne au niveau de la boucle de Saint-Maur.

Année	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
MAXAN (m ³ /s)	265,2	264,2	194,9	408,8	467,2	410,7	398,6	377,0	452,9	542,5	389,3
Année	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995
MAXAN (m ³ /s)	256,1	347,4	230,0	445,7	244,0	340,3	423,0	337,2	469,3	505,3	475,5
Année	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
MAXAN (m ³ /s)	322,5	395,4	351,1	490,3	477,7	533,4	487,4	371,5	310,3	188,4	234,1

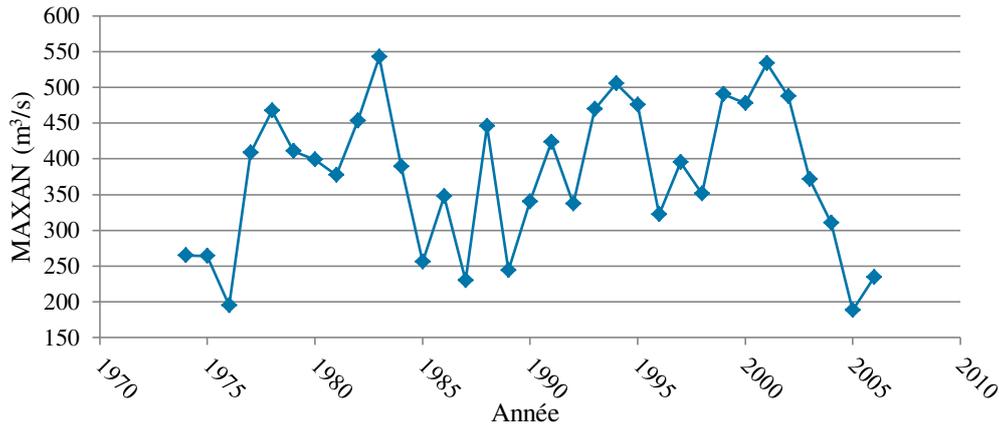


Figure 8 : Série chronologique des maxima annuels.

Tableau 2 : Résumé statistique des valeurs maximales annuelles pour la Marne dans la boucle de Saint-Maur.

<i>MAXAN - La Marne, boucle de Saint-Maur</i>		Nbre de valeurs : 33	
Moyenne	376,0	Ecart-type	100,9
Médiane	389,3	Coefficient de variation	27%
Quantile 25%	310,3	Variance de l'échantillon	10178,8
Quantile 75%	467,2	Etendue	354,1
Minimum	188,4	Kurtosis (coefficient d'aplatissement)	-0,97
Maximum	542,5	Coefficient d'asymétrie	-0,25

La loi de Gumbel, notée $Gu(\mu, \lambda)$, est la première loi des valeurs extrêmes utilisée pour l'étude des maxima annuels. On suppose que les données susmentionnées suivent une loi de Gumbel avec μ le paramètre de position et λ le paramètre d'échelle (ou gradex). Ces deux paramètres sont estimés de la manière suivante :

$$\begin{cases} \hat{\lambda} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s_x \\ \hat{\mu} = \bar{x} - \gamma \hat{\lambda} \text{ avec } \gamma = 0,5772 \end{cases}$$

avec s_x l'écart-type de l'échantillon et \bar{x} la moyenne. On trouve alors $\hat{\lambda} = 78,66$ et $\hat{\mu} = 330,58$.



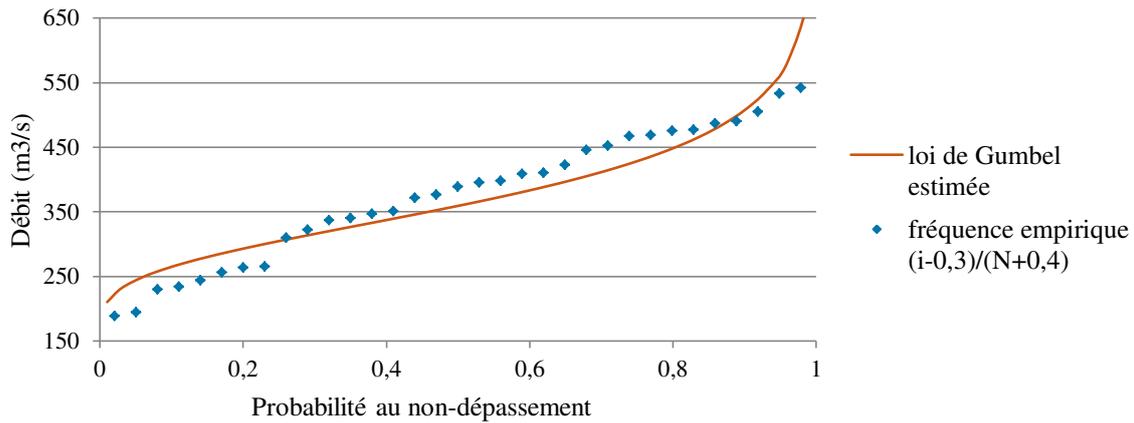


Figure 9 : Quantiles empiriques et issus de la loi de Gumbel estimée, version 1.

Pour vérifier que la distribution est en adéquation avec les données empiriques, il est d'usage de linéariser la figure ci-dessus en effectuant une transformation sur l'axe des abscisses. Pour un échantillonnage MAXAN, étant donné la définition de la loi de Gumbel, on tracera les débits en fonction de la variable $-\log(-\log(p))$ où p est la probabilité au non-dépassement. Cette représentation linéarisée est présentée en Figure 10.

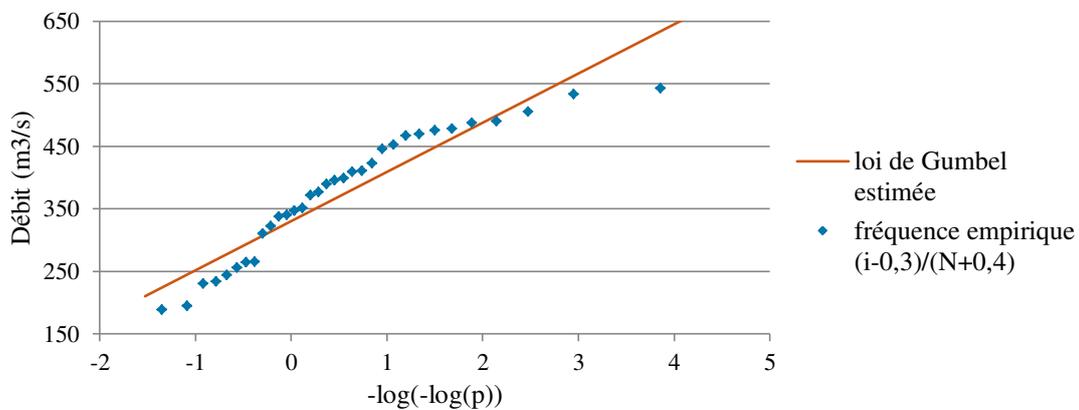


Figure 10 : Quantiles empiriques et issus de la loi de Gumbel estimée, version 2.

C'est sur ce dernier graphique (Figure 10) que se juge l'adéquation entre distribution estimée et données empiriques. La représentation linéarisée permet de zoomer sur les valeurs les plus fortes, ce qui facilite le jugement sur les plus forts quantiles. Néanmoins, il convient de rester prudent dans l'interprétation de cette courbe. En particulier, il faut éviter de trop se focaliser sur les derniers points car le positionnement de ces points en fréquence empirique est très incertain : il n'est donc pas anormal qu'un ou deux points s'éloignent de la droite théorique, cela peut être un simple effet de la variabilité de l'échantillon.

Par contre, on constate peu d'éloignement des données empiriques avec la droite et il n'y a pas de différence de forme notable entre les courbes empirique et théorique qui laisserait présager un manque d'adéquation entre la distribution estimée et les données. **La distribution décrit alors les données de manière satisfaisante.**



4 Quantiles de période de retour

Le calcul de débits caractéristiques est affecté par de nombreuses sources d'incertitude¹. Il est donc important de chercher à quantifier cette incertitude, afin de pouvoir juger de la confiance que l'on peut accorder aux estimations de débits précédentes.

Dans la présente étude de cas, seules les incertitudes d'échantillonnage peuvent être quantifiées par le calcul des intervalles de confiance. Les incertitudes ont été estimées par la méthode des moments. L'intervalle de confiance au niveau de confiance 1- α est de la forme suivante $\hat{q}_p \pm u_{1-\alpha/2} \sqrt{Var(\hat{q}_p)}$ où $u_{1-\alpha/2}$ est le quantile de la loi normale $N(0,1)$ et où $Var(\hat{q}_p) = \frac{s_x^2}{N} [1 + 1,14. w(p) + 1,10. w^2(p)]$ avec $w(p) = \frac{-\sqrt{6}}{\pi} \log(-\log(p)) + 0,45$.

Les résultats avec un intervalle de confiance de 90% sont présentés Figure 11.

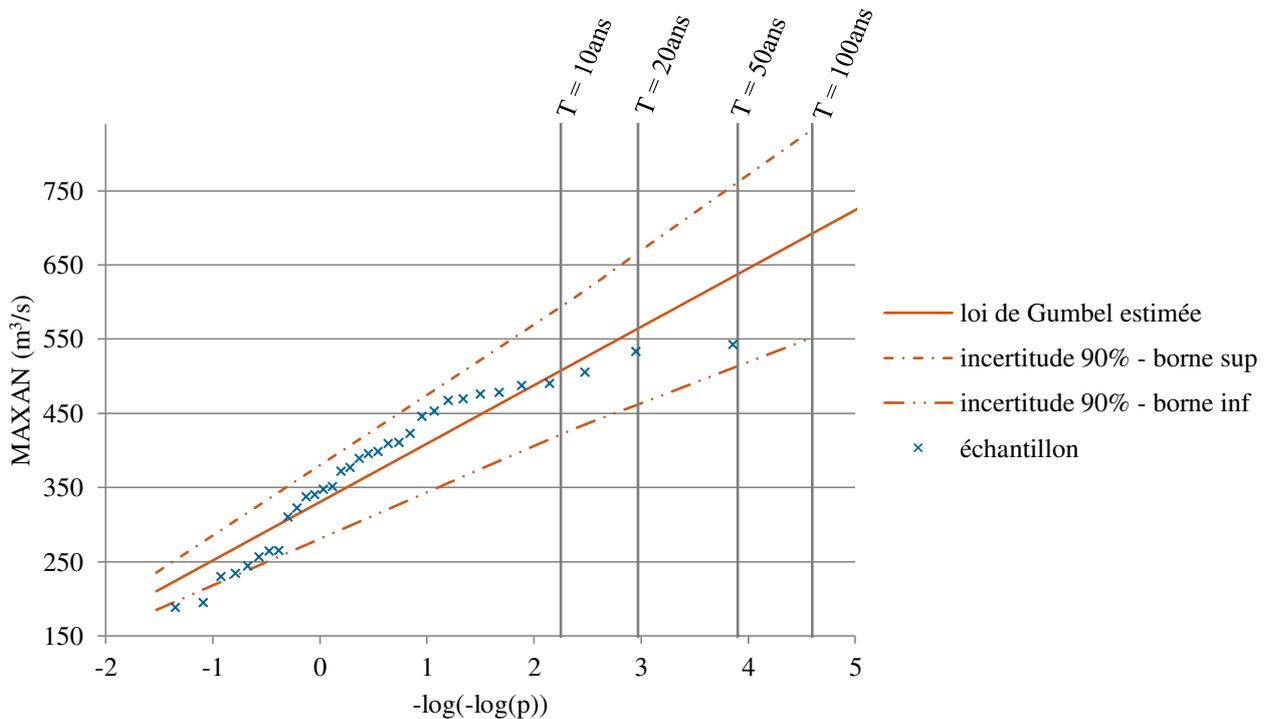


Figure 11 : Intervalle de confiance à 90 % pour les quantiles.

Ainsi, à partir de la Figure 11, il est possible de déduire les débits caractéristiques de période de retour 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans avec leurs intervalles de confiance à 90% (Tableau 3). Ces résultats peuvent être confrontés aux données utilisées pour les crues par la Banque hydro sur la station de Gournay-sur-Marne (code station : H5841020).

¹ Exemples de source d'incertitudes : incertitudes liées à la mesure, incertitude d'échantillonnage, etc.



Tableau 3 : Estimation des débits de pointe de la Marne pour certaines périodes de retour.

Période de retour	Débit caractéristique	Banque hydro
10 ans	$508 \pm 86 \text{ m}^3/\text{s}$	$500 \text{ m}^3/\text{s}$
20 ans	$564 \pm 102 \text{ m}^3/\text{s}$	$550 \text{ m}^3/\text{s}$
50 ans	$638 \pm 124 \text{ m}^3/\text{s}$	$620 \text{ m}^3/\text{s}$
100 ans	$692 \pm 140 \text{ m}^3/\text{s}$?

Il est également possible de resituer des crues historiques dans la chronique des crues enregistrées ou relevées sur les stations hydrométriques de Noisiel et de Gournay-sur-Marne. Cela permet notamment de qualifier la période de retour des débits de pointe observés pendant ces crues (*Tableau 4*) en utilisant la loi de Gumbel trouvée précédemment.

Tableau 4 : Période de retour des crues historiques.

Année	Débit (m^3/s)	Période de retour (an)
1910	850	738
1924 1955	776	288
1970	607	34
1999	510	10

On s'aperçoit que la crue de 1910, estimée centennial, a une période de retour presque 8 fois élevée (738 ans).

Connaissant à présent le régime hydrologique de la Marne en période de crue, nous allons nous intéresser dans la seconde partie à estimer le débit dérivé dans le canal de Saint-Maur.



CALCULS PRELIMINAIRES DU DEBIT DERIVE DANS LE CANAL DE SAINT-MAUR

Avant de commencer la modélisation sous Fudaa-Mascaret, on se propose de réaliser quelques calculs préliminaires avec Excel puis Canal21 afin d'avoir un ordre de grandeur du débit dérivé dans le canal de Saint-Maur (Figure 12), pour une position donnée de la vanne et une cote Marne aval imposée.

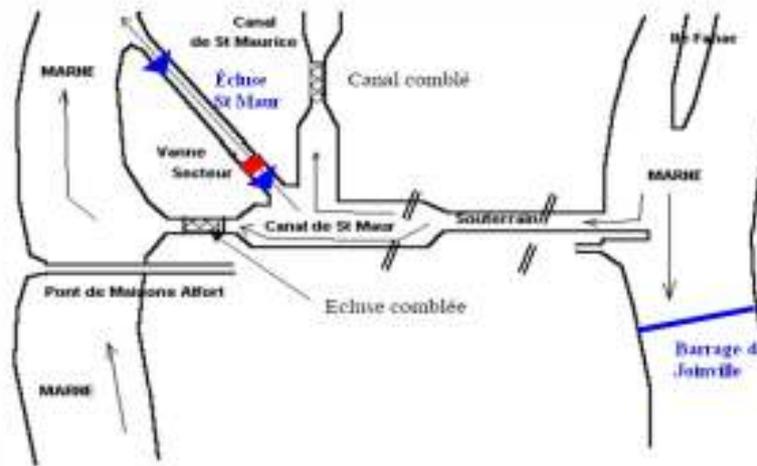


Figure 12 : Schéma du canal de Saint-Maur avec son écluse.

1 Relation entre débit et hauteur d'eau dans le tunnel

Dans un premier temps, sous Excel, on cherche à déterminer la relation entre débit uniforme et hauteur (de 0,50 à 6,50 m par pas de 0,50 m) dans le tunnel, qui sera considéré comme un canal rectangulaire de largeur 9 m, de pente 0,0022 et d'un coefficient de Strickler égal à 40. Pour connaître le débit uniforme, on applique alors la relation de Manning-Strickler : $Q = K \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$.

On obtient alors le graphique ci-dessous (Figure 13). La courbe peut être ajustée par une loi puissance.

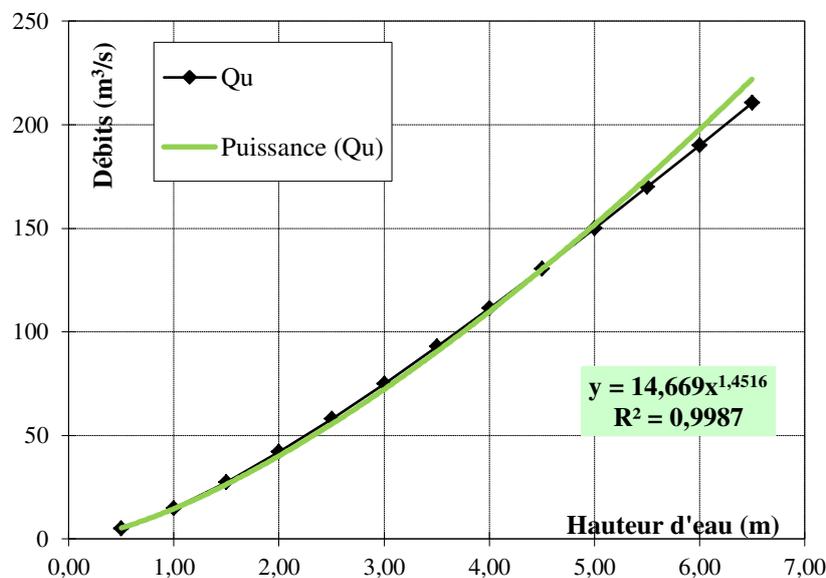


Figure 13 : Relation entre débit uniforme et hauteur d'eau dans le tunnel.



On note que le canal peut « absorber » un fort débit lors des hautes eaux.

2 Profil en long du canal de Saint-Maur avec l'écluse.

On se propose maintenant de dresser le profil en long du fond du canal de Saint-Maur (Figure 14) grâce aux données du Tableau 5. La cote de fond de l'extrémité amont du tunnel est de 30,12 NGF. Pour une cote de la crête de vanne à 30,40 NGF, la pelle amont sera de 1,49m et la pelle aval de 4,34m.

Tableau 5 : Données du profil en long.

Pos	type elem	nom	larg ou rayon	fruit	Pelle aval	Ouvert	longueur	pente	Y debord	strickler
1	Rec	tunnel	9		0		550	+0.0022	10	40
2	Tro	AvalTunne			0		160	-0.0110		30
3	Rec	canal	30		0		200	+0.0080		30
4	Tro	AmontEclu:			0		10	+0.0160		30
5	Rec	PorteAmon12			0		5	0		40
6	Dev	VanneSect12			4.33					
7	Rec	Ecluse	12		0		153	0		40

Sur ce profil en long, le terre-plein entre tunnel et écluse est représenté à 33 NGF environ. Quatre conditions de niveau d'eau aval écluse y sont également reportées :

- o Crue type 1999 : 32.12 NGF
- o Crue type 1970 : 32.99 NGF
- o Crue type 1955 : 34.21 NGF
- o Crue type 1910 : 35.72 NGF

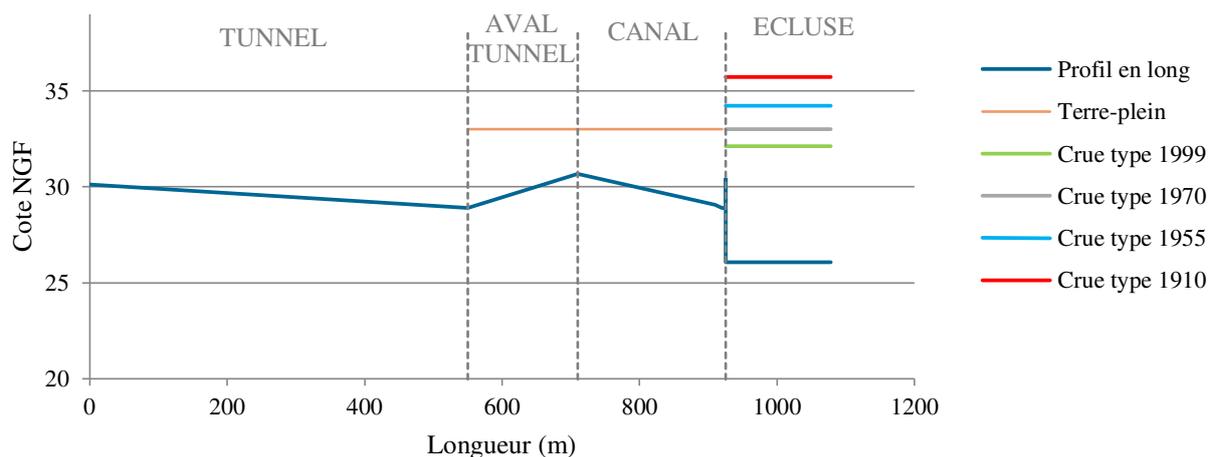


Figure 14 : Profil en long du canal de Saint-Maur avec la vanne secteur relevé à 30,40 NGF.

3 Vitesse dans le tunnel

Il s'agit maintenant de construire l'assemblage présenté Tableau 5 (au total 7 éléments) sous Canal21 dans l'objectif de chercher les conditions dans lesquelles la vitesse maximale dans le tunnel reste inférieure à 3 m/s (limite admise pour sa stabilité constructive).

Pour ce faire, on teste 3 débits amont (100, 150 et 200 m³/s) pour deux niveaux de la Marne en aval (6 et 8,5 m au-dessus du radier à 26.06 m NGF). Les résultats sont présentés dans le Tableau 6 : les vitesses ont été prises à

l'amont du tunnel puisque c'est à cet endroit que les vitesses sont les plus élevées comme le montre un des profils de vitesse extrait de la modélisation Canal 21 en *Figure 15*.

Tableau 6 : Vitesse maximale dans le tunnel pour plusieurs scénarii.

Crête vanne	29,20 m NGF		30,40 m NGF		31,60 m NGF	
Niveau de la Marne en aval	Ya = 6m	Ya = 8,5m	Ya = 6m	Ya = 8,5m	Ya = 6m	Ya = 8,5m
Q = 100 m ³ /s	2,986	2,239	2,775	2,210	2,321	2,141
Q = 150 m ³ /s	3,511	3,020	3,255	2,956	2,841	2,802
Q = 200 m ³ /s	3,893	3,596	3,713	3,500	3,253	3,253

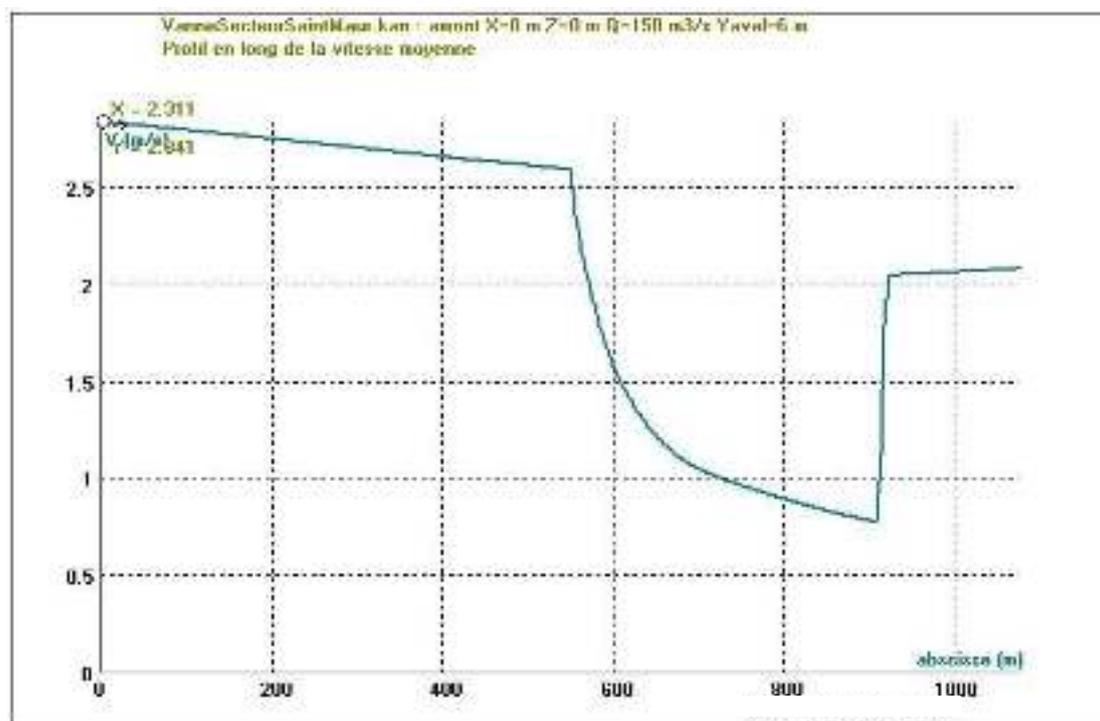


Figure 15-1 : Profil de vitesse moyenne dans la section (Q = 150m³/s, Ya = 6m et crête vanne à 31,60 NGF)



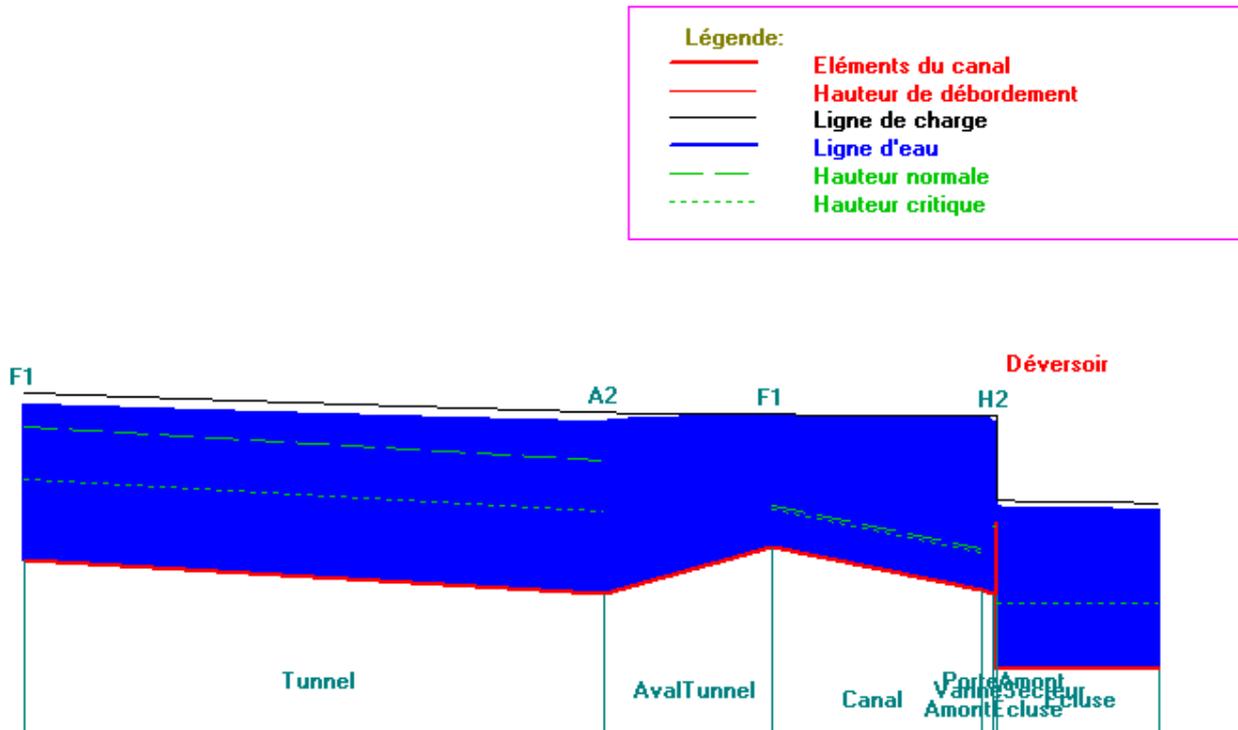


Figure 15-2 : Ligne d'eau significative sur le profil en long du canal ($Q = 150\text{m}^3/\text{s}$, $Y_a = 6\text{m}$ et crête vanne à 31,60 NGF)

L'objectif, dans les prochaines parties, est de quantifier avec Mascaret l'impact sur les niveaux de la Marne et de la Seine de la dérivation d'une partie du débit de la Marne dans le canal de Saint-Maur :

- en régime PERMANENT, en préalable : calage des Strickler du modèle et optimisation de la position de la vanne-secteur ;
- en régime NON-PERMANENT : estimation de l'impact en aval (Seine à Paris).



MODELISATION HYDRAULIQUE EN REGIME PERMANENT

En connaissant les débits de la Marne et de la Seine évalués pendant les crues historiques, on en déduit le débit total passant au niveau du pont d'Austerlitz. A partir de cette information et en utilisant la courbe de tarage de la Seine aval (Figure 16), on peut en déduire les hauteurs d'eau au niveau du pont d'Austerlitz pendant les crues historiques (Tableau 7).

Tableau 7 : Estimation de la hauteur d'eau au pont d'Austerlitz pendant les crues historiques.

Données pour calculs en PERMANENT				
Année	Q_{Marne} (m^3/s)	Q_{Seine} (m^3/s)	Q_{Total} (m^3/s)	$Z_{\text{Austerlitz}}$ (m NGF)
1910	850	1620	2470	34,87
1955	776	1314	2090	33,04
1970	607	1073	1680	31,54
1999	510	1030	1540	31,10

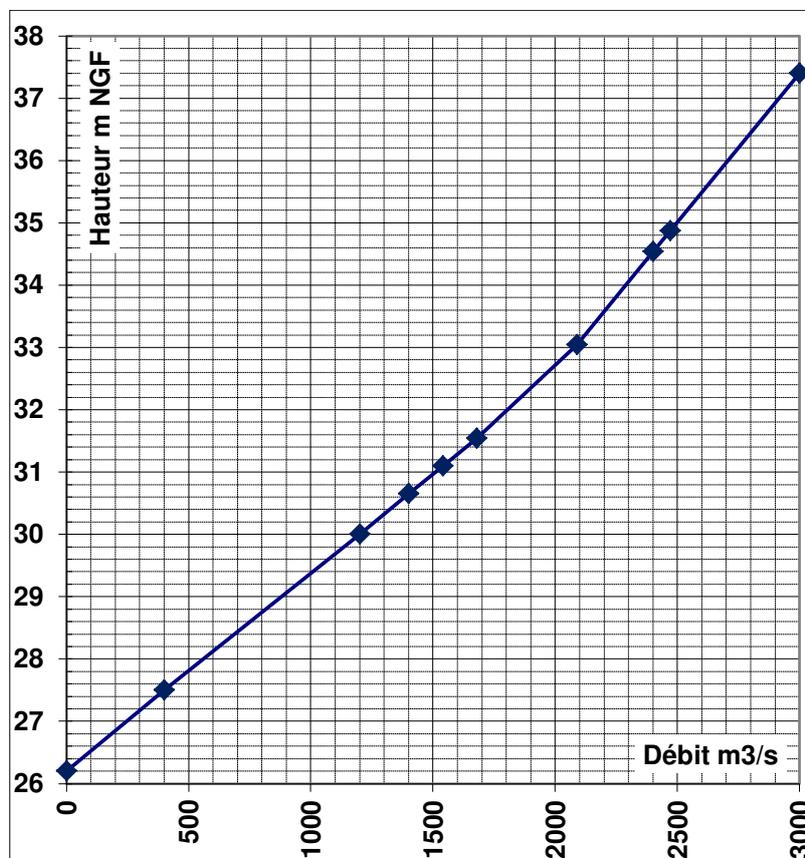


Figure 16 : Loi hauteur/débit (Seine aval – Austerlitz).



1 Construction et calage d'un modèle en bief unique

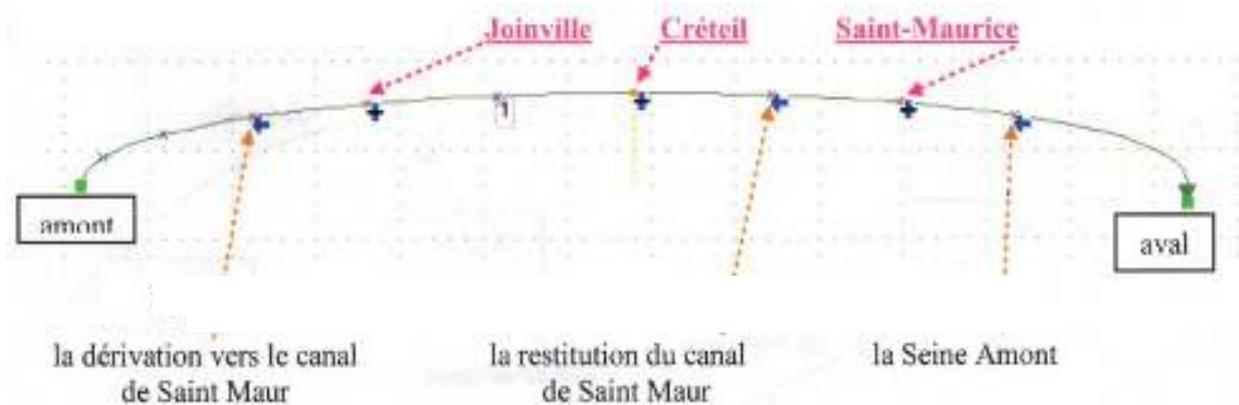


Figure 17 : Modèle Mascaret BIEF UNIQUE.

Après avoir suivi les différentes étapes pour caler le modèle (initialisation des coefficients de Strickler, saisie des données de crues de calage, réglage des paramètres numériques du module de calage), on a cherché à caler les coefficients de Strickler sur chacun des cinq « sous-biefs ». Ils sont initialement pris à 30 pour le lit mineur. Les données des crues de 1955 et 1970 servent à caler les coefficients de Strickler. Les renseignements fournis sont les suivants : le débit amont, la cote aval, les débits d'apports, l'abscisse et la cote des laisses de crue, dont chacune est affectée d'un coefficient de pondération.

Une fois le calage automatique lancé, on peut visualiser les valeurs de Strickler issues du calage (*Tableau 8*).

Tableau 8 : Valeurs des coefficients de Strickler après calage (régime Permanent).

Sous-bief	Coeff. de Strickler lit mineur ($m^{1/3}/s$)	Coeff. de Strickler lit majeur ($m^{1/3}/s$)
1	31,17	4
2	33,92	4
3	32,93	4
4	34,04	4
5	33,44	4

On peut noter que toutes les valeurs des coefficients de Strickler sont supérieures à la valeur initialement renseignée qui était de $30 m^{1/3}/s$. Cependant, ces valeurs restent dans l'ordre de grandeur observé pour un cours d'eau comme la Marne (K souvent compris entre 30 et $40 m^{1/3}/s$).

Les valeurs du *Tableau 8* ont été calées par rapport aux crues de 1955 et de 1970, il s'agit maintenant de tester/contrôler le calage sur la crue de 1910. Pour cela, les coefficients de frottement de Strickler ont été importés (« *Importer Résultats Calage* »). La ligne d'eau a ensuite été exportée (*Figure 18*).

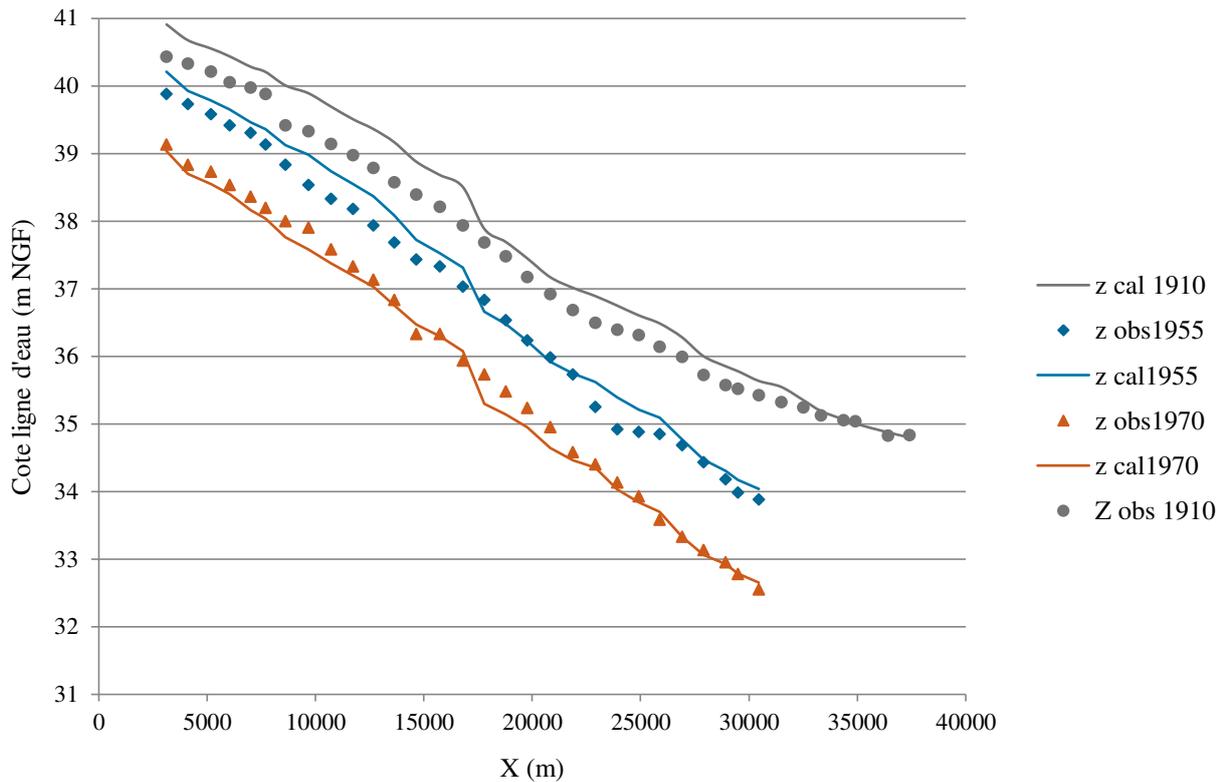


Figure 18 : Ligne d'eau des crues type 1910, 1955 et 1970 (modélisation Mascaret Bief Unique).

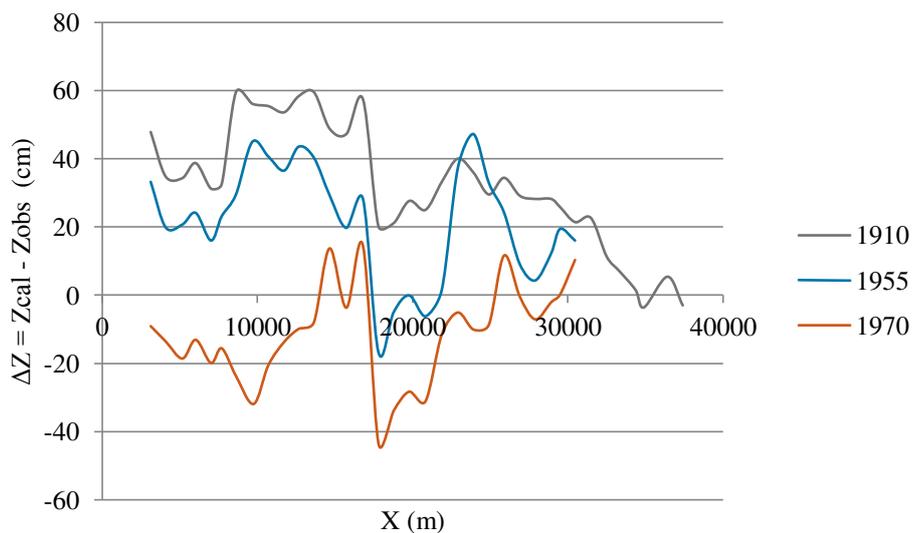


Figure 19 : Différences entre ligne d'eau calée et ligne d'eau observée pour les 3 crues types.

D'après la *Figure 19*, pour la crue de 1910, en moyenne entre les hautes eaux de crue et la ligne d'eau obtenue par modélisation, il y a une différence de 32 ± 14 cm : les hauteurs d'eau calées par le modèle sont plus hautes que celles observées par les hautes eaux de crue. Cette différence est de 1955 : 22 ± 13 cm et -11 ± 11 cm pour les crues de 1955 et 1970 respectivement. Les différences entre valeurs observées et calées sont plus faibles pour les crues de 1955 et 1970.

2 Construction du modèle complet

La topologie du réseau hydrographique a été construite selon le modèle présentée en *Figure 20*.

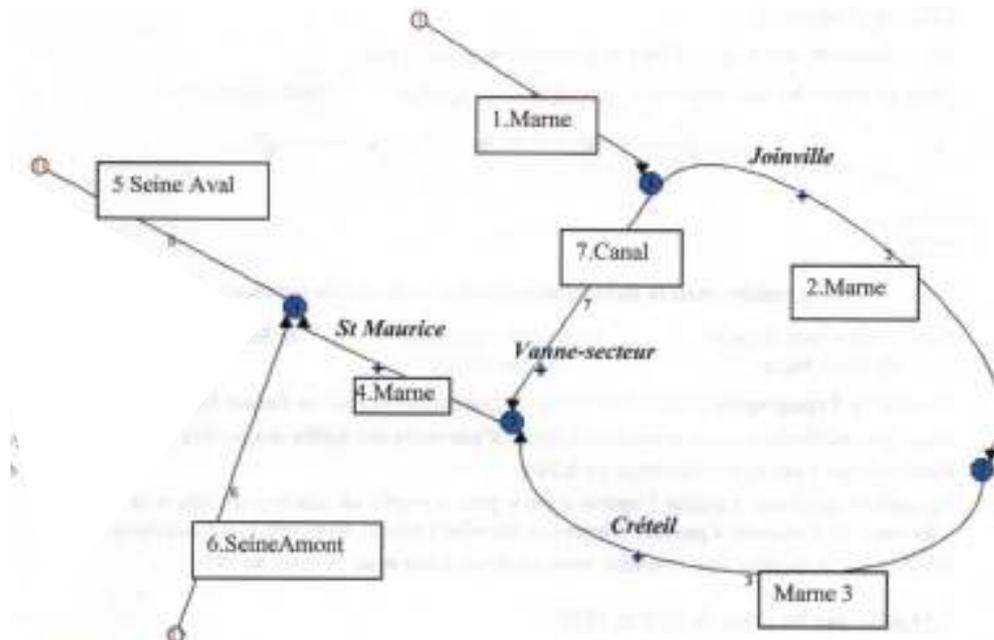


Figure 20 : Modèle COMPLET avec Seine Amont et Canal de Saint-Maur.

Les conditions limites entrées aux trois extrémités du modèle sont celles de la crue type 1910. Les valeurs des coefficients de Strickler sont celles issues du calage automatique précédent. Le coefficient de Strickler du bief 6 « Seine amont » est le même que celui du bief 5 « Seine aval » et ceux du bief 7 « Canal » sont pris idem que pour le calcul sur Canal21 (*Tableau 5*). C'est à partir de ce modèle COMPLET que l'on va chercher à optimiser la position de la vanne-secteur en temps de crue.

3 Optimisation de la position de la vanne-secteur en temps de crue

L'objectif de cette optimisation est de trouver la position de la vanne-secteur qui permette d'évacuer le maximum de débit dans le canal, tout en respectant la consigne de gestion de la vanne-secteur : « ne pas dépasser une vitesse moyenne d'écoulement de 3 m/s dans le tunnel et le canal ».

Cette optimisation de la cote de la crête de la vanne-secteur s'est faite par itérations successives (*Tableau 9*) en utilisant le modèle COMPLET décrit dans la partie précédente.

Tableau 9 : Position optimale de la vanne-secteur en temps de crue.

	Crue type 1910			Crue de 1955			Crue de 1970			Crue de 1999		
	Zcrete	Vmax	Qcanal	Zcrete	Vmax	Qcanal	Zcrete	Vmax	Qcanal	Zcrete	Vmax	Qcanal
itération 1	37,8	0,16	12	34,9	-	-	34,3	-	-	34,2	-	-
itération 2	30	3,05	192	30	3,22	173	31	2,76	125,5	30	2,94	-
itération 3	30,2	3,01	190	31	2,98	162,8	30,5	2,93	130,9	29,5	3,05	-
itération 4	30,3	2,98	189	30,8	3,01	165,2	30,25	3,01	133,2	29,75	3	117,5
itération 5	30,25	3	189,5	30,91	2,99	163,8	30,03	2,98	132,8			

Par exemple, en 1910, la position de la vanne-secteur qui permettait de limiter la vitesse d'écoulement dans le tunnel et le canal à 3 m/s était à 30,25 m NGF. Il s'agit de la position « minimale » en dessous de laquelle la structure de l'ouvrage est compromise (non-respect des consignes de gestion de la vanne-secteur).

De même, pour 1955, 1970 et 1999, cette position « minimale » était respectivement de 30.91 NGF, 30.03 NGF et 29.75 NGF.

4 Impact de la vanne-secteur sur les crues en amont

L'objectif de cette sous-partie est de quantifier les gains en hauteur d'eau obtenus lorsque la vanne-secteur est ouverte et que le canal de Saint-Maur laisse passer le plus de débit possible tout en respectant la consigne de gestion de la vanne-secteur.

La situation de référence est celle dite « canal fermé » (aucun débit ne transite par le canal de Saint-Maur). On peut, après avoir lancé les deux simulations (« canal fermé » et « canal ouvert ») pour les quatre crues types, visualiser les gains de hauteur d'eau apportés par la situation « canal ouvert » (Figure 21).

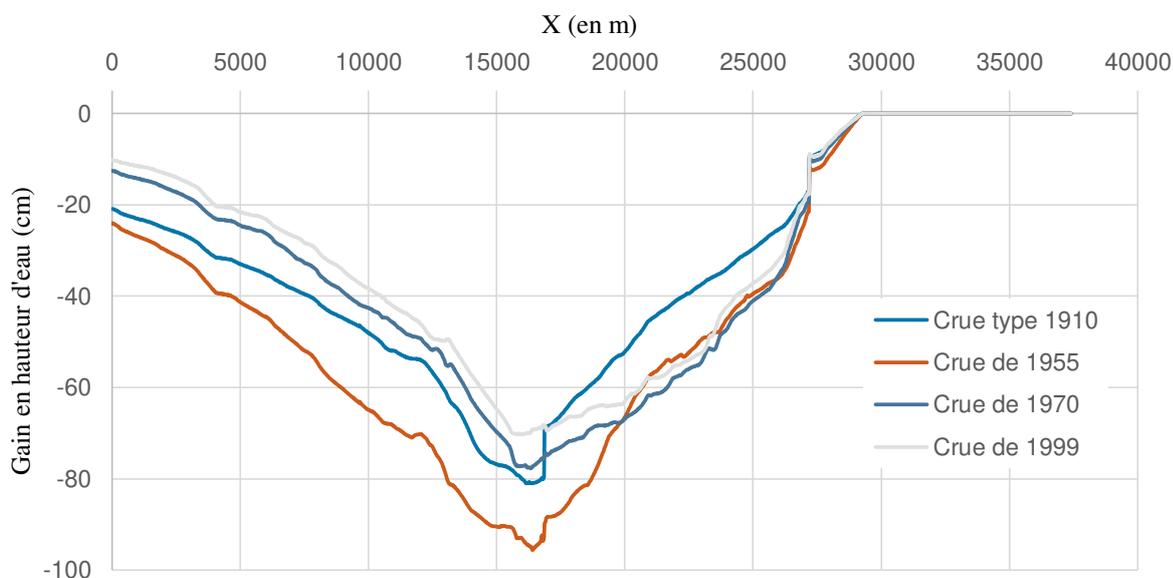


Figure 21 : Tracé des gains de hauteur d'eau pour chaque crue type.

En situation « canal ouvert », en comparaison avec la situation « canal fermé », on voit une diminution de la hauteur d'eau dans la Marne pouvant aller de 80 à 95 cm au niveau de l'amont du canal de St-Maur ($X = 16\ 200$ m). Etant en régime fluvial, il faut donc raisonner de l'aval vers l'amont. Il n'y a pas de gain à l'aval du canal (sur les biefs 4 « Marne » et 5 « Seine Aval » entre les abscisses 29 260 et 37 400 m), les gains en hauteur d'eau sont observés sur tout le linéaire de la boucle de Saint-Maur : diminution de la hauteur d'eau sur l'ensemble de la boucle jusqu'au maximum de gain (80 à 95 cm) puis augmentation de la hauteur d'eau dans la Marne en amont de l'entrée du canal de Saint-Maur (à l'abscisse 0, on observe encore un effet bénéfique de la situation « canal ouvert » puisque le gain reste encore inférieur à 0). Il y a donc bien une réduction des zones inondées dans la boucle de Saint-Maur dans la situation « canal ouvert ».

MODELISATION HYDRAULIQUE EN REGIME NON-PERMANENT

L'objectif de cette partie est d'évaluer l'impact de la dérivation d'une partie du débit de crue de la Marne dans le canal de Saint-Maur sur le niveau des crues en AVAL de la restitution du canal.

Ce calcul avait été demandé par la DIREN Île-de-France qui s'interrogeait sur le risque d'augmentation du débit de pointe en aval du fait de l'accélération de la propagation des crues et de la réduction des zones inondées dans la boucle de Saint-Maur et en amont, comme l'ont montré les calculs en permanent.

Cet impact sera calculé pour la crue de 1910. Comme en permanent, l'état de référence est celui dit "canal fermé" (i.e. aucun débit ne transite par le canal de Saint-Maur, comme c'était le cas lors de la crue de 1910, où l'entrée du tunnel avait été batardé).

1 Etat de référence « Canal fermé » et état « canal ouvert »

Les hydrogrammes Marne et Seine débutent par des paliers respectifs à 400 et 800 m³/s. Il faut donc commencer par calculer en permanent une ligne d'eau initiale, avec :

$$Q_{\text{Marne}} = 400 \text{ m}^3/\text{s} ; Q_{\text{Seine}} = 800 \text{ m}^3/\text{s} ; Z_{\text{Austerlitz}} = 30.00 \text{ NGF}$$

Puis, il faut basculer en régime non-permanent en choisissant le noyau de calcul « Fluvial non permanent », supprimer les lois hydrauliques initiales et importer les hydrogrammes Marne et Seine et la courbe de tarage au Pont d'Austerlitz.

Deux types de résultats sont à extraire à la suite de cette modélisation en non-permanent :

- Profil Temporel : hydrogrammes et limnigrammes en aval de la restitution du canal et à Austerlitz ;
- Profil Spatial : ligne d'eau "cotes maximales au cours du calcul" (sur biefs 1 à 5).

Pour l'état « canal ouvert », on procède comme ci-avant, avec la position optimale de la vanne-secteur déterminée lors de la partie précédente (cote de la crête à 30,25 m NGF).

2 Comparaison et impact

Résultats au pont d'Austerlitz, en débit et en cote :

Le débit et la hauteur d'eau au niveau du pont d'Austerlitz (*Figure 22*) sont légèrement plus élevés lorsque l'état du canal est dit « ouvert » (ce qui correspond à la position optimum de la vanne-secteur de l'écluse). Cependant, il faut relativiser car l'écart n'est que de 2 m³/s par rapport aux 2 400 m³/s qui transite sous le pont pendant une crue type 1910 et la hauteur est quasiment invariée (1 cm). Ainsi, il n'y a pas de risque d'augmentation du débit de pointe en aval du fait de l'accélération de la propagation des crues et de la réduction des zones inondées dans la boucle de Saint-Maur.

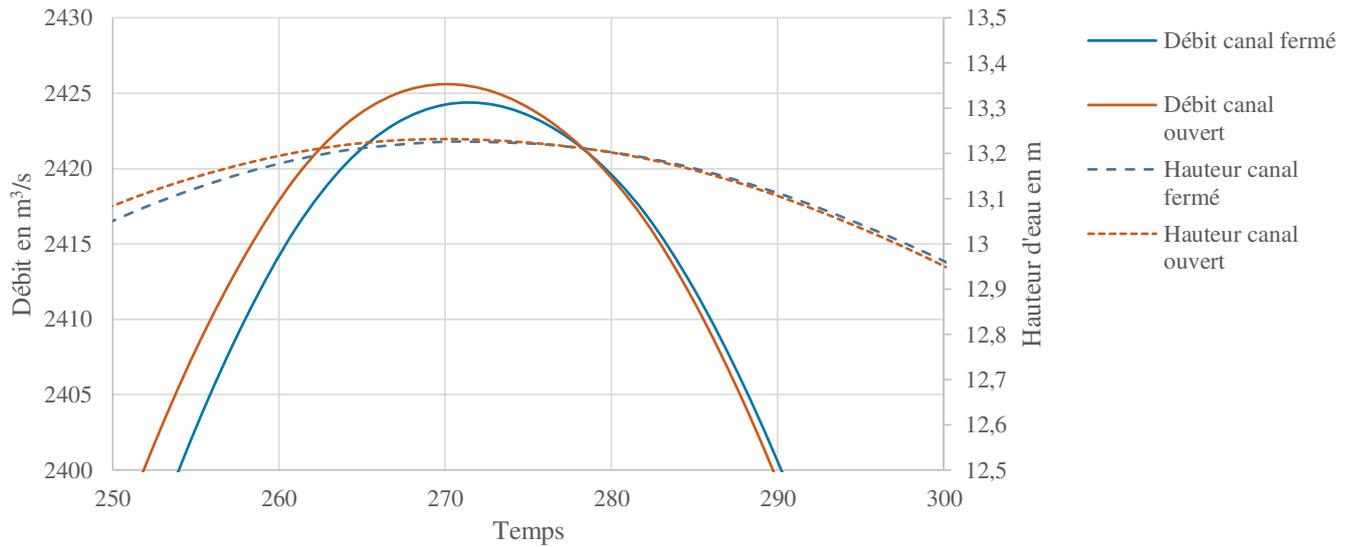


Figure 22 : Profil temporel - hydrogrammes et limnigrammes au pont d'Austerlitz.

Résultats en amont de la restitution du canal :

En régime non-permanent, pour la crue de 1910, on a un gain positif sur l'ensemble de la boucle de Saint-Maur : réduction des zones inondées dans la boucle de Saint-Maur. Cette réduction des impacts inondation est davantage marquée en régime non-permanent qu'en régime permanent (cf. Figure 23).

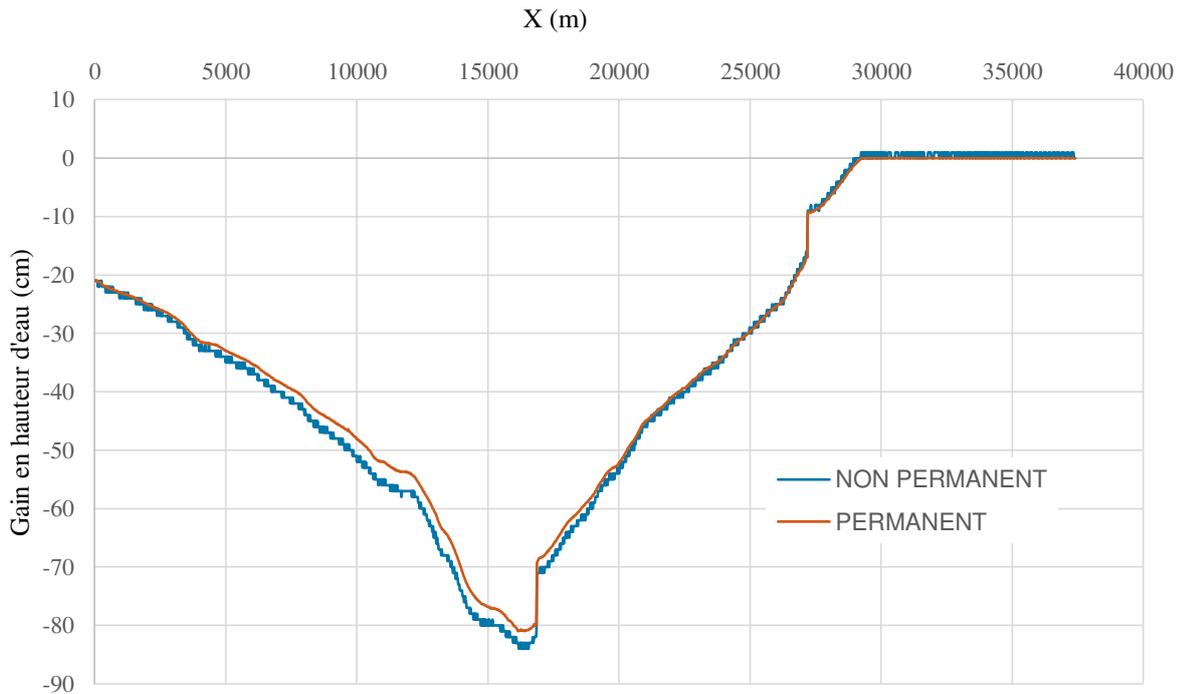


Figure 23 : Gains en hauteur d'eau entre les situations « canal fermé » et « canal ouvert », comparaison régime permanent / régime non-permanent.



Si l'on regarde maintenant les profils temporels en régime non-permanent, juste en amont de la restitution du canal, on observe une légère diminution du débit (*Figure 24*).

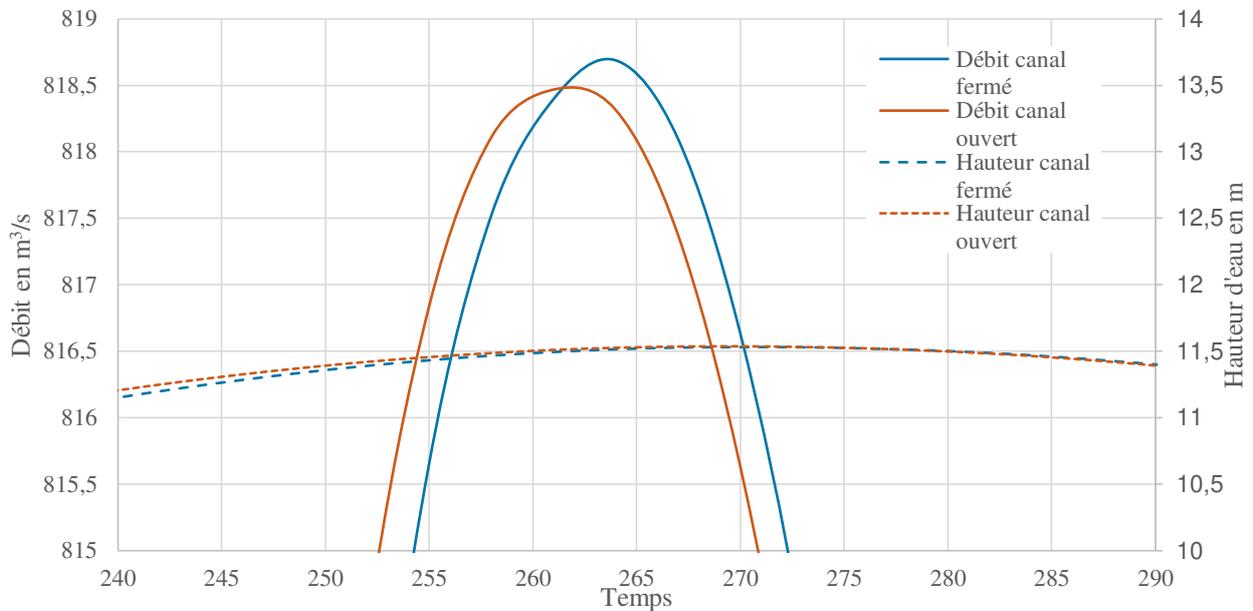


Figure 24 : Profil temporel - hydrogrammes et limnigrammes en amont de la restitution du canal.

En conclusion, il n'y a pas de risque d'augmentation du débit de pointe en aval, ni en amont lors de la situation « canal ouvert » par rapport à la situation « canal fermé ».



ANNEXE

Annexe 1 : Calculs hydrauliques pour la courbe de tarage “théorique” de la Marne.

On considère que la section moyenne du lit mineur de la Marne est une section trapézoïdale. On cherche alors à connaître la relation entre le débit uniforme et la hauteur d'eau Y dans le lit mineur (Y allant de 2,5 à 7,5 m avec un pas de 0,5 m).

Caractéristiques de la section (en UI)	
Pente i	0,00025
Plafond L	65
Fruit des talus m	1,5
Strickler K	30

Calculs hydrauliques élémentaires (en UI) :

Hauteur Y	Section S	Périmètre P	Rayon R_h	Débit Q	Vitesse V	Froude Fr
2,50	171,88	74,01	2,32	142,97	0,83	0,17
3,00	208,50	75,82	2,75	194,13	0,93	0,18
3,50	245,88	77,62	3,17	251,56	1,02	0,18
4,00	284,00	79,42	3,58	315,01	1,11	0,18
4,50	322,88	81,22	3,98	384,32	1,19	0,19
5,00	362,50	83,03	4,37	459,33	1,27	0,19
5,50	402,88	84,83	4,75	539,93	1,34	0,19
6,00	444,00	86,63	5,13	626,05	1,41	0,19
6,50	485,88	88,44	5,49	717,59	1,48	0,20
7,00	528,50	90,24	5,86	814,52	1,54	0,20
7,50	571,88	92,04	6,21	916,79	1,60	0,20

UI : unités internationales

Débit estimé pour la hauteur de débordement (Y = 5,50 m) :

$$Q \text{ (en m}^3\text{/s)} = 539,93$$

Remarque :

En régime uniforme et pour une section trapézoïdale, le nombre de Froude Fr vaut :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{\frac{gS}{T}}}$$

où V la vitesse, S la section mouillée et T la largeur de la surface d'eau au sommet du canal.

* **Relations entre les paramètres :**

- ↪ la section mouillée : $S = Y \cdot (L + mY)$
- ↪ le périmètre mouillé : $P = L + 2Y\sqrt{1 + m^2}$
- ↪ le rayon hydraulique : $R_h = S/P$
- ↪ le débit : $Q = K \cdot S \cdot R_h^{2/3} \cdot i^{1/2}$ (relation de Manning-Strickler)
- ↪ la vitesse : $V = Q/S$
- ↪ la largeur de la surface d'eau : $T = L + 2mY$