

**AVIS SUR L'ESTIMATION DE LA CRUE CENTENNALE
DE L'OISE A VENETTE**

30/01/2024

Michel LANG, Jérôme LE COZ

INRAE
U.R RIVERLY
5 rue de la Doua
69626 Villeurbanne cedex

Michel LANG : 04 72 20 87 98
michel.lang@inrae.fr

SOMMAIRE

1. Objet de l'expertise	3
2. Données sur l'Oise à Venette.....	3
3. Analyse BaRatin des courbes de tarage	9
3.1 Méthode BaRatin.....	9
3.2 Courbes de tarage de l'Oise à Venette.....	10
4. Série de débit maximum annuel sur l'Oise à Venette.....	21
5. Distribution des crues sur l'Oise à Venette.....	23
5.1 Estimation des paramètres d'une loi GEV	23
5.2 Distribution empirique d'un échantillon mixte	26
5.3 Date de début de la période historique	26
5.4 Résultats sur l'estimation des quantiles de crue	27
6. Conclusion	32
7. Bibliographie.....	33
8. Annexe : Documents et rapports exploités pour l'expertise	34

1. Objet de l'expertise

Irstea a réalisé entre 2012 et 2014 une Assistance à Maître d'Ouvrage pour l'Entente Oise-Aisne, sur le suivi de l'étude « *Hydrologie du bassin de l'Oise* » réalisée par Hydratec (2014). L'estimation des quantiles de crue est basée sur la méthode des « *courbes enveloppes* » développée par Hydratec, à partir du couplage de pluies de référence avec un modèle hydrologique (transformation pluie-débit) et un modèle hydraulique (propagation des crues).

Le barrage de Venette (bassin versant de l'Oise 16 900 km²), situé à Compiègne, immédiatement en aval de la confluence Oise-Aisne, s'avère suivi depuis fort longtemps et l'Entente Oise-Aisne a récupéré 142 ans de mesures des crues, depuis 1881, date à laquelle la chenalisation de l'Oise a été achevée et la structuration du bassin versant n'a pas fondamentalement changé depuis. Une série de 81 valeurs de débit de crue supérieur à un seuil de 328 m³/s sur la période 1881-2022 a été exploitée par l'Entente Oise-Aisne pour mettre à jour l'estimation du débit centennal de crue de l'Oise à Venette, ainsi que l'intervalle de confiance (Girardon, 2023).

L'Entente Oise-Aisne souhaite disposer d'un avis extérieur sur cette nouvelle estimation, en vue de valider la valeur de la crue centennale qui sera utilisée pour les futures analyses du risque inondation dans le secteur de Compiègne (Analyses Coût Bénéfice d'aménagements, Plans de Prévention du Risque Inondation...).

2. Données sur l'Oise à Venette

La liste des informations exploitées pour les besoins de l'expertise se trouve en annexe.

Le barrage et l'écluse de Venette sur l'Oise sont situés 3600 m en aval de la confluence entre l'Oise et l'Aisne, sur les communes de Venette et Compiègne (*Figure 1*). L'écluse de Venette a été construite entre 1826 et 1835, puis agrandie à deux reprises entre 1890 et 1900, puis en 1975 (histoire-compiegne.com). Le barrage de Venette du XIXe siècle manœuvré par des éclusiers a été remplacé par un nouvel ouvrage à clapets automatisé en 2011 (*Figure 2*).

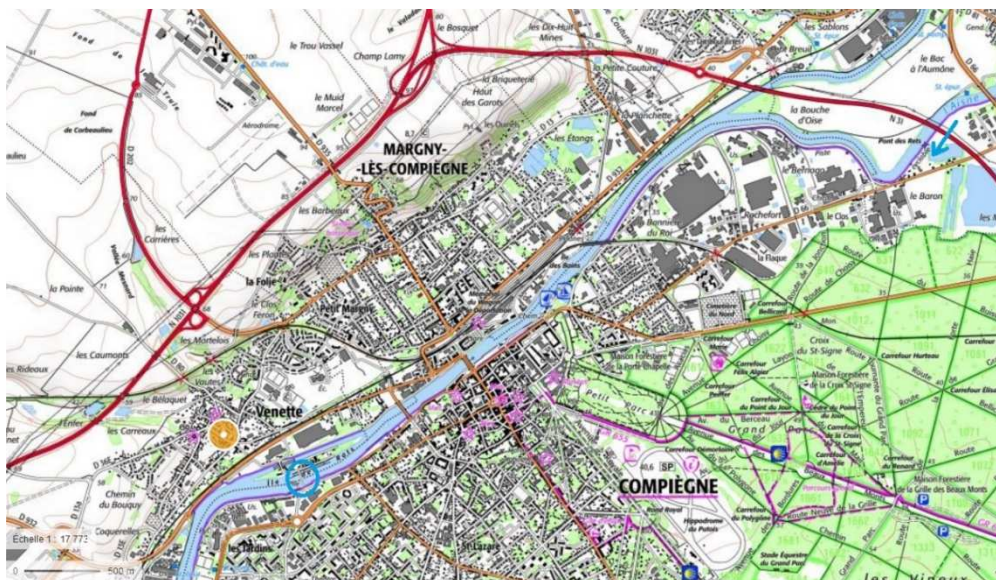


Figure 1 : Plan de situation du barrage de Venette (PlanSituationBarrageVenette.jpg)

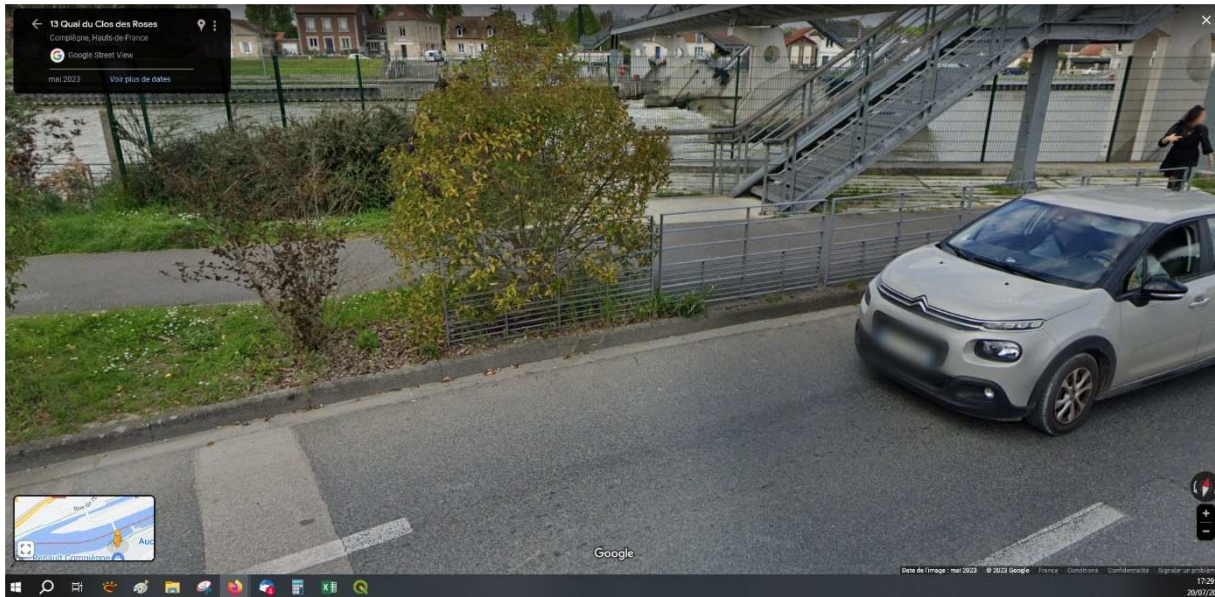


Figure 2 : Vue GoogleMap sur le barrage à Venette (BarrageVenette.jpg)

Les données hydrométriques disponibles sont les suivantes :

- ✓ 1 courbe de tarage (depuis 2011) avec 10 jaugeages DREAL. Les données de la Figure 3 ont été numérisisées (CourbeTarageVenette.xlsx) ;
- ✓ 1 courbe de tarage obtenue avec le modèle hydraulique HYDRA (Figure 4)
- ✓ Série de cotes de crues : 1856-1915 (cotes supérieures à 2.60 m) ; 1910-2021 (cotes supérieures à 4.25 m) ; 1987-2021 (enregistrement en continu) (Cotes_Venette - 1910-2021 JMC.xlsx ; AnalyseParetoGeneralisee.xlsx) ;
- ✓ Rapport sur le zéro des échelles limnimétriques de 1872 à 2003 (RapportGaulhierGoux2003.doc) ; l'échelle est située 35 m en aval du barrage actuel de Venette, 20 m en aval de l'ancien barrage.

Sur l'HydroPortail, les données de débit ne sont disponibles que sur la période 2011-2023 (<https://www.hydro.eaufrance.fr>).

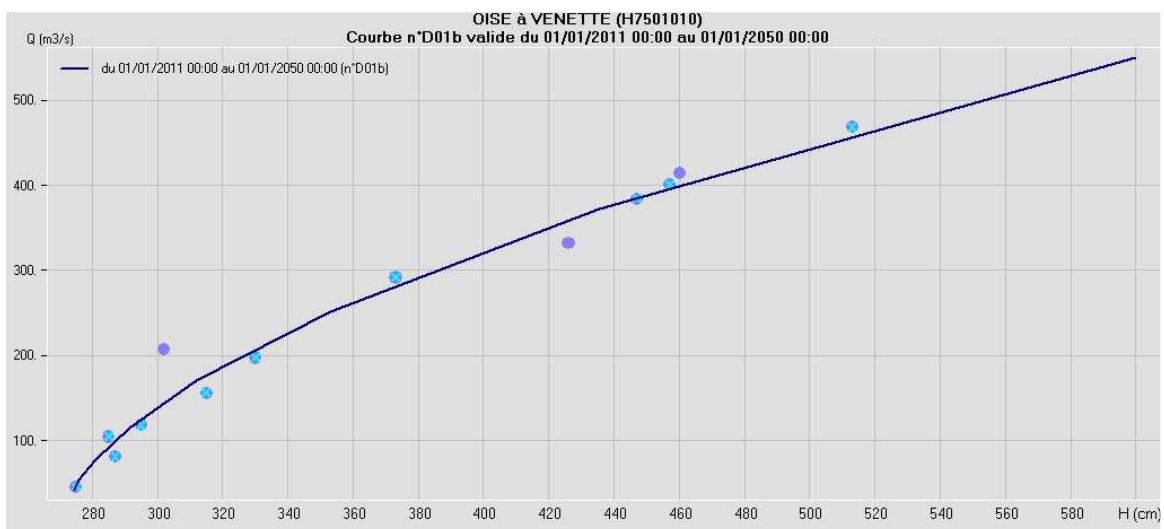


Figure 3 : Courbe de tarage DREAL à Venette (CourbeTarageVenette.jpg)

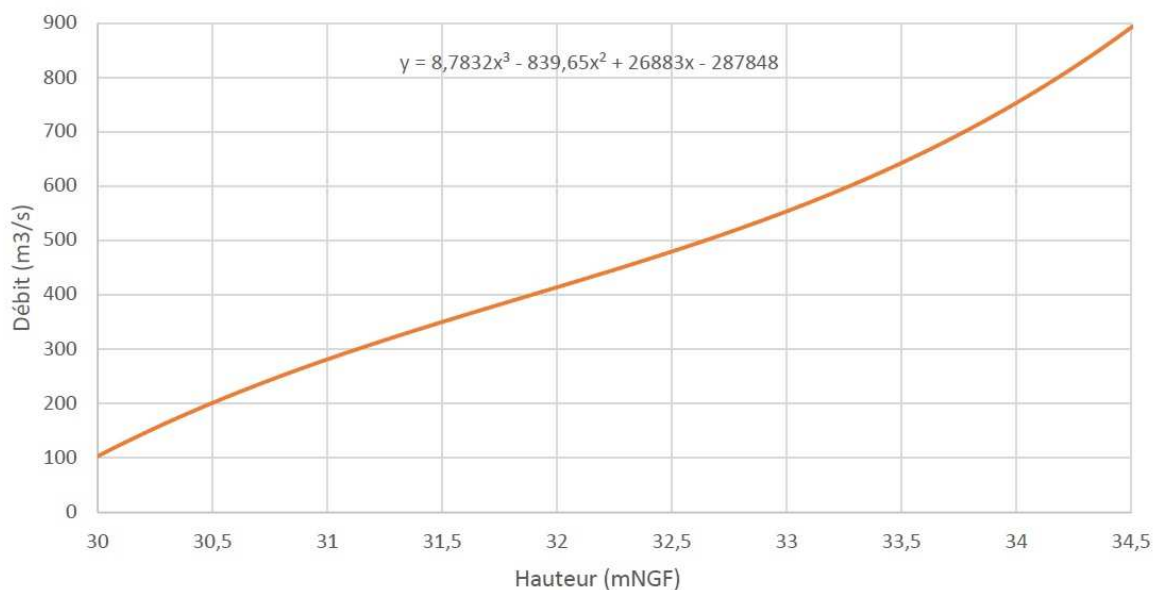


Figure 4 : Courbe de tarage à Venette obtenue avec le modèle HYDRA (CourbeTarageVenette.jpg)

Collection de hauteurs historiques

L'étude hydrologique récente réalisée par l'Entente Oise-Aisne (Girardon, 2023) a considéré que les données de crue sont exploitables à partir de 1881 (achèvement des travaux de chenalisation sur l'Oise), en raisonnant sur les cotes de crue supérieures à 4.25 m et en imposant une durée minimale d'un mois entre deux événements successifs. A ce stade, nous avons exploité deux sources d'information complémentaires qui renseignent sur des crues avant 1881 :

- ✓ Base nationale des repères de crue : www.reperesdecruces.developpement-durable.gouv.fr

En rive droite de l'Oise, 5 repères de crue sont positionnés en aval de l'écluse de Venette :

$$H(1784) > H(1995) > H(1993) > H(1846) > H(2001).$$

En exploitant les cotes connues pour les crues de 1993, 1995 et 2001 (respectivement 6.41, 6.50 et 6.07 m), on estime graphiquement d'après la *Figure 5* les cotes suivantes :

$$H(1784) = 6.90 \text{ m et } H(1846) = 6.18 \text{ m.}$$

Les repères de crue ont été nivelés par l'IGN (*Figure 6*) avec les altitudes suivantes (IGN 69) : $Z(1784) = 34.08 \text{ m}$ et $Z(1846) = 33.34 \text{ m}$ pour un zéro d'échelle $Z_0 = 27.09$. Soit :

$$H(1784) = 6.99 \text{ m et } H(1846) = 6.25 \text{ m.}$$

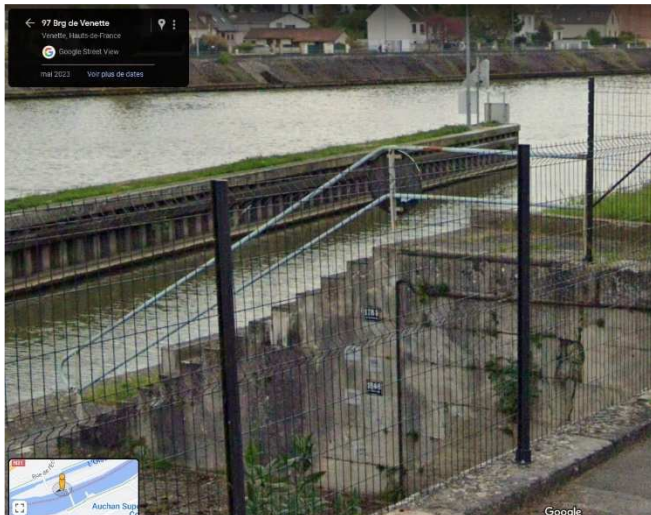


Figure 5 : Repères de crue sur la commune de Venette (ReperesCrueVenetteA.jpg ; ReperesCrueVenetteB.jpg)

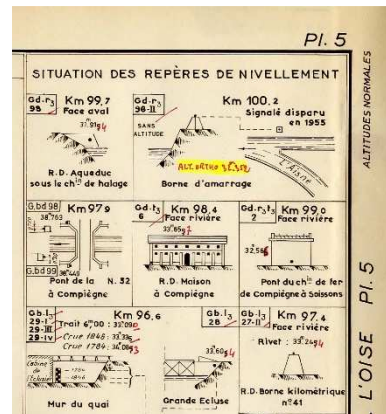
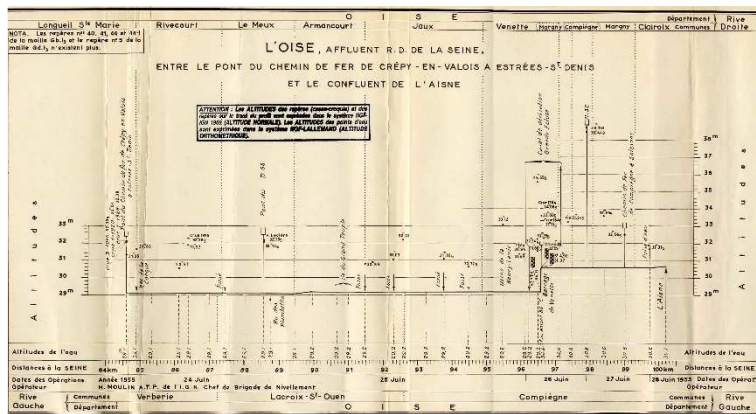


Figure 6 : Nivellement des repères de crue de 1784 et 1846 sur la commune de Venette ([https://geodesie.ign.fr/fiches/dossier 91070](https://geodesie.ign.fr/fiches/dossier_91070), planche 5) (PLOise1955.jpg)

En rive gauche de l'Oise, à Compiègne, 2 repères de crue sont positionnés sur un mur en rive gauche de l'Oise, 900 m en amont du barrage de Venette (cf. Figure 7) :

$$H(1740) > H(1910).$$

Ces repères ont été nivelés par l'Entente Oise-Aisne (mail du 06/12/2023) :

- ✓ Z (partie basse de la marque de la crue de 1740) = 33.99 m (NGF),
soit $H(1740) = 33.99 - 27.11 = 6.88$ m ;
- ✓ Z (crue 1910) = 33.38 m (NGF),
soit $H(1910) = 33.38 - 27.11 = 6.27$ m.

L'écart entre ces 2 repères de crue est de 0.61 m. En supposant qu'il est identique à Venette, et en exploitant la cote connue à Venette pour la crue de 1910 (5.92 m), on peut estimer une cote de crue en 1740 à Venette :

$$H(1740 \text{ à Venette}) = H(1910 \text{ à Venette}) + 0.61 \text{ m} = 5.92 + 0.61 = 6.53 \text{ m}.$$

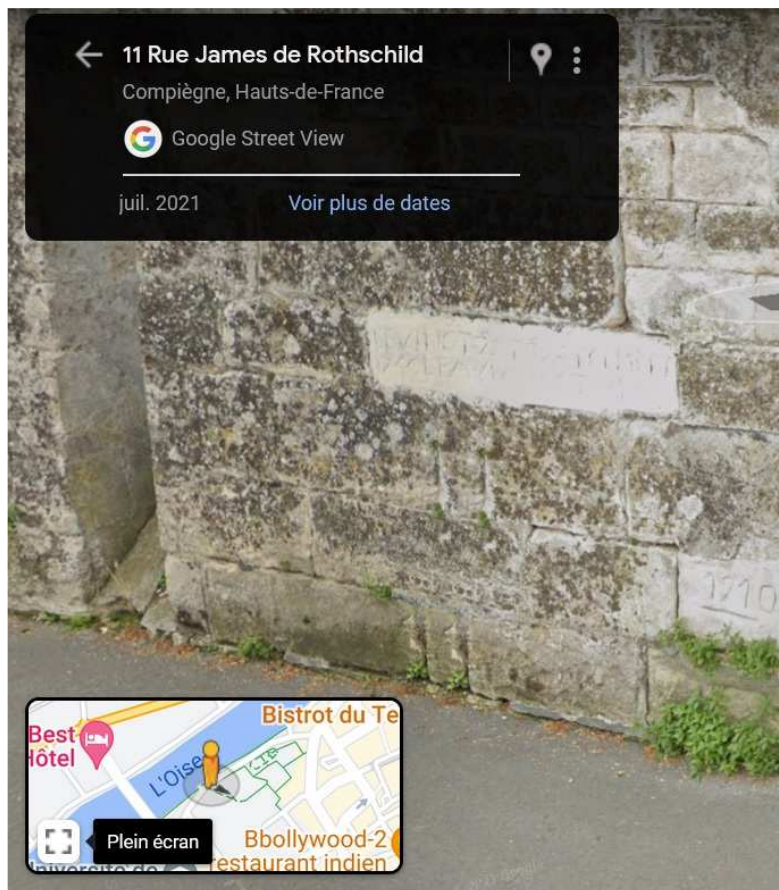


Figure 7 : Repères de crue sur la commune de Compiègne (ReperesCruCompiegneA.jpg ; ReperesCruCompiegneB.jpg) www.reperesdecrues.developpement-durable.gouv.fr

✓

✓ Champion (1862) : Index et tome II

L'index (page 55) recense sur l'Oise une série d'années avec des crues en 711, 900, 1194, 1348, 1408, 1437, 1591, 1607, 1658, 1740, 1741, 1757, 1802, 1850. Le tome II (pages 158-174) donne des informations sur le niveau atteint pour certaines crues.

- ✓ crue exceptionnelle le 21/02/1658 : $H = 6.83$ m à Soissons ;
- ✓ crue exceptionnelle le 28/03/1784 : crue inférieure à celle de 1658 (écart de 9 pouces x 0.027 m = 0.24 m) et crue supérieure à celle de 1740 (écart de 2 pieds x 0.325 m = 0.65 m) ;
- ✓ mention qu'aucune crue aussi forte que celle de 1784 n'a été observée sur la période 1784-1859.

On peut estimer une cote de crue en 1740 à Venette, en exploitant l'écart de 0.65 m entre les crues de 1784 et 1740, et la cote du repère de crue de 1784 à Venette de 6.99 m :

$$H(1740 \text{ à Venette}) = H(1784) - 0.65 \text{ m} = 6.99 - 0.65 = 6.34 \text{ m.}$$

On peut estimer une cote de crue en 1658 à Venette, en exploitant l'écart de 0.24 m entre les crues de 1658 et 1784, et la cote du repère de crue de 1784 à Venette de 6.99 m :

$$H(1658) = H(1784) + 0.24 \text{ m} = 6.99 + 0.24 = \mathbf{7.23 \text{ m.}}$$

On dispose de deux estimations de la cote de crue en 1740 à Venette, respectivement de 6.53 m et 6.24 m (d'après l'écart entre les marques de crue de 1740 et 1910 à Compiègne, ou l'écart entre les crues de 1784 et 1740 d'après Champion, 1862). Nous retiendrons une valeur moyenne dans cet intervalle :

$$H(1740) = (6.24 + 6.53)/2 = \mathbf{6.39 \text{ m.}}$$

Au final, nous retiendrons par la suite les informations suivantes sur la période 1658-1855 :

- ✓ 2 crues exceptionnelles : $H(1658) = 7.23$ m et $H(1784) = 6.99$ m et;
- ✓ 2 crues fortes : $H(1740) = 6.39$ m et $H(1846) = 6.25$ m et;
- ✓ toutes les autres crues sont inférieures à la crue de 1846 : $H < H(1846) = 6.25$ m.

3. Analyse BaRatin des courbes de tarage

3.1 Méthode BaRatin

Le principe général de la méthode BaRatin (Le Coz *et al.*, 2014) est de combiner, via une approche bayésienne, une expertise sur le fonctionnement hydraulique d'une station hydrométrique avec les données de jaugeage (H_i, Q_i) disponibles. La méthode fournit une estimation de la courbe de tarage $Q(H)$, et les incertitudes associées.

Dans un premier temps, l'utilisateur définit un certain nombre de caractéristiques hydrauliques :

- Le(s) type(s) de contrôle(s) hydraulique(s) : seuil, chenal..., en fonction du niveau d'eau H ;
- La configuration hydraulique du tronçon englobant la station hydrométrique.

Pour un écoulement, d'abord en lit mineur puis en lit majeur, la relation $Q(H|\theta)$ peut s'exprimer par des lois puissance :

$$k_1 < H \leq k_2 \text{ (lit mineur)} : \quad Q(H) = a_1(H - b_1)^{c_1} \quad (1a)$$

$$H \geq k_2 \text{ (lit majeur)} : \quad Q(H) = a_1(H - b_1)^{c_1} + a_2(H - b_2)^{c_2} \quad (1b)$$

avec $\theta = (a_1, a_2, c_1, c_2, k_1, k_2)$ le vecteur des paramètres de la courbe de tarage (les paramètres b_1 et b_2 étant déduits des autres paramètres).

Dans le cas d'un écoulement avec un contrôle par un chenal, on définit *a priori* une distribution de valeurs possibles pour la largeur B , la pente S , et le Strickler K . Le paramètre a se déduit d'une formule de Strickler $a = KB\sqrt{S}$, de même que l'exposant $c = 5/3$. La hauteur d'activation k est estimée d'après la géométrie du lit.

Dans un second temps, on exploite les jaugeages (H_i, Q_i) disponibles, en associant une erreur ε_i à chaque valeur de débit jaugeé Q_i . On suppose que l'erreur ε_i est distribuée suivant une loi normale $\mathcal{N}(0, u_{Q_i})$, avec un écart type u_{Q_i} qui dépend du type de jaugeage. L'incertitude sur le débit jaugeé, associée à l'intervalle de confiance à 95%, $Q_i \pm 2u_{Q_i}$, est exprimée en pourcentage du débit : 5% (ADCP), 7% (moulinet sur l'ensemble de la section), 10% (moulinet à $0.6H$ et en surface), 15% (moulinet en surface), 20% (flotteurs) (Puechberty *et al.*, 2017). Les deux informations sont ensuite combinées pour réévaluer le jeu de paramètres θ , à l'aide d'une approche bayésienne formalisée avec un modèle d'erreur sur la courbe de tarage :

$$Q_i = Q(H_i|\theta) + \varepsilon_i \quad \text{où : } \varepsilon_i \sim \mathcal{N}(0, \sqrt{\sigma_Q^2 + u_{Q_i}^2}), \quad (2)$$

où σ_Q représente l'écart type de l'erreur restante non liée à l'incertitude sur les jaugeages ni à celle sur le jeu de paramètres θ de la courbe (cf. incertitude sur le choix d'une loi puissance par exemple).

Le logiciel BaRatinAGE permet d'obtenir l'estimation *a posteriori* du jeu de paramètres θ , avec différentes sorties graphiques : courbe de tarage *a posteriori* avec les jaugeages, comparaison des estimations *a priori* et *a posteriori* de la courbe de tarage et du jeu de paramètres θ , vérification de la convergence de la chaîne de simulation du jeu de paramètres.

3.2 Courbes de tarage de l'Oise à Venette

L'échelle limnimétrique de Venette est implantée en rive droite de l'Oise, en sortie de l'écluse de Venette (*Figure 8*). Elle est située 135 m en aval du barrage de Venette et 12.7 km en amont du barrage de Verberie.



Figure 8 : Plan de situation de l'échelle limnimétrique de Venette (PlanSituationEchelleVenette.jpg)

Référencement altimétrique du zéro de l'échelle

Le zéro de l'échelle est à la cote $Z_0 = 27.11$ m (IGN 69). D'après Gaullier et Goutx (2003), le zéro de l'échelle a été modifié comme résumé dans le *Tableau 1*.

Tableau 1 : Zéro de l'échelle limnimétrique de Venette (ZeroEchellesChronologiqueOiseAisne.xls)

Source	Date	Lieu consultation	Système nivellement	Zéro Venette
/	1877	DIREN Ile-de-France	?	27.07
/	1880 ou plus	SN Compiègne	?	27.07
Service Hydro du bassin de la Seine	1894 - 1895	DIREN Ile-de-France	?	22.07 (*)
Bulletins d'annonce des crues	1897 et 1906	Archives municipales Compiègne	?	27.31
Monographie crues 1910	1910	SN Compiègne	?	27.07
Graphiques cotes d'eau	1910	SN Compiègne	Bourdalous Orthométrique	27.30 26.62
Bulletins d'annonce des crues	1911 – 1919 et 1920	Archives municipales Compiègne	?	27.31
/	1926 ou plus	SN Compiègne	Orthométrique	26.62
DIREN Ile-de-France	2001	DIREN Ile-de-France	IGN 69	27.11

(*) valeur considérée comme erronée (mention « sans doute erreur de transcription »)

Pour exprimer toutes les cotes anciennes par rapport au référentiel de nivellement actuel IGN69, Gaullier et Goutx (2003, page 22) indiquent qu'il convient d'effectuer les corrections suivantes :

- ✓ 1877-1895 : rajouter de + 0.38 à +0.45 m ;
- ✓ 1896 : rajouter de + 0.38 à +0.69 m ;
- ✓ 1897-1906 : rajouter de + 0.62 à +0.69 m ;
- ✓ 1907-1909 : rajouter de + 0 à +0.69 m ;
- ✓ 1910 : rajouter de + 0 à +0.61 m ;

- ✓ 1911-1919 : rajouter de + 0.62 à +0.69 m ;
- ✓ 1920-1926 : rajouter de + 0 à +0.69 m ;
- ✓ 1927-2022 : aucune correction.

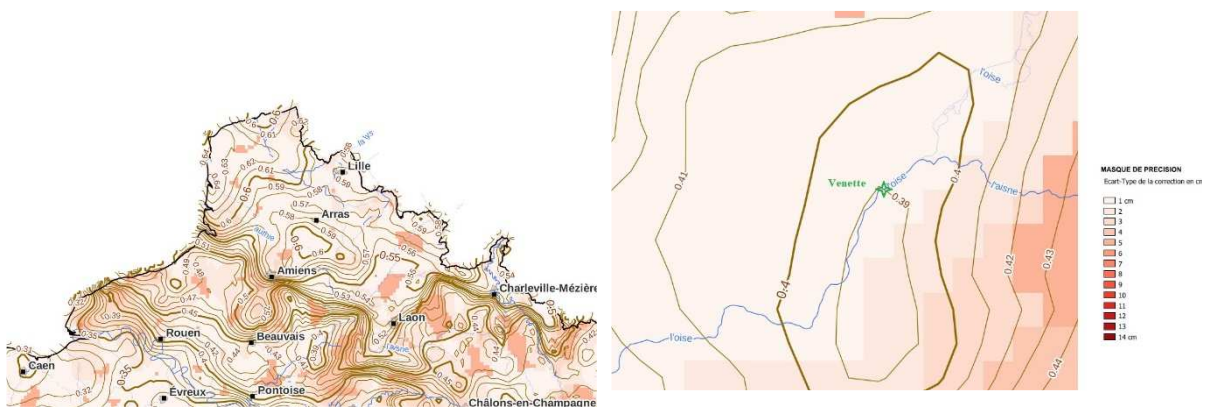
En l'état, il est difficile de valider ces corrections sans vérification complémentaire. En effet, il est indiqué (Gaullier et Goutx, 2003, page 14) que la correspondance entre systèmes de nivellement successifs est la suivante :

- ✓ Cote (ortho) = Cote (Bourdaloue) – 0.07 m ;
- ✓ Cote (IGN69) = Cote (ortho) + 0.40 à 0.50 m = Cote (Bourdaloue) + 0.33 à 0.53 m

Sur le site de l'IGN (https://geodesie.ign.fr/index.php?page=histoire_du_nivellement#titre4), il est indiqué que le zéro de référence du système Bourdaloue (à partir de 1860) est de 0.40 m à Marseille, et celui du système Lallemand (appelé également ortho ou NGF, et établi de 1884 à 1922) est de 0.329 m à Marseille. Les cotes exprimées dans le référentiel Bourdaloue sont donc inférieures de 7 cm par rapport à celles exprimées dans le référentiel Lallemand (c'est l'inverse qui est retenu par Gaullier et Goutx, 2003).

A noter que l'IGN mentionne que les écarts entre les deux systèmes Bourdaloue et Lallemand ne sont pas constants sur l'ensemble de la métropole.

On trouve également sur le site de l'IGN (<https://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>) une carte donnant la correspondance spatiale entre les systèmes Lallemand et IGN 69. Sur la *Figure 9*, on note que l'écart sur l'Oise à Venette est égal à + 0.39 m, avec une très bonne précision (1 cm).



*Figure 9 : Correspondance entre le Système NGF-Lallemand et le système NGF-IGN69 :
 $Z(\text{IGN69}) = Z(\text{Lallemand}) + C$ (CorrespondanceSystNivellementFranceNord.jpg ;
 CorrespondanceSystNivellementVenette.jpg)*

Les correspondances à appliquer entre systèmes de nivellement sont plutôt :

- ✓ Cote (ortho) = Cote (Bourdaloue) + 0.07 m ;
- ✓ Cote (IGN69) = Cote (ortho) + 0.39 m = Cote (Bourdaloue) + 0.43 m

En complément des informations du *Tableau 1*, on dispose par ailleurs d'une information sur le profil en long de l'Oise en 1955 via le site de l'IGN (*Figure 6*). Le nivellement de l'échelle à Venette est $Z_0 = 27.09$ m (IGN 69), voisin de la référence actuelle $Z_0 = 27.11$ m.

Au final, sous réserve de vérifier que les zéros de l'échelle ont bien été référencés dans les documents source par rapport au système de nivellement en vigueur à la date du document (et pas retranscrits ultérieurement dans le système IGN69), **les corrections de cote de crue à appliquer seraient les suivantes :**

- ✓ **1877-1895** : Z_0 (a priori Bourdaloue) = 27.07 m, ce qui correspond à Z_0 (IGN69) = 27.07 + 0.07 + 0.39 = 27.53 m, soit **rajouter + 0.42 m pour revenir en cote IGN 69** ($Z_0 = 27.11$ m);
- ✓ **1896-1920** : Z_0 (a priori Lallemand) = 27.31 m, ce qui correspond à Z_0 (IGN69) = 27.31 + 0.39 = 27.70 m, soit **rajouter + 0.59 m pour revenir en cote IGN 69** ($Z_0 = 27.11$ m);
- ✓ **1921-2022** : en 1926, Z_0 (a priori Lallemand) = 26.62 m, ce qui correspond à Z_0 (IGN69) = 26.62 + 0.39 = 27.01 m ; en 1955, Z_0 (IGN 69) = 27.09 m. Valeurs voisines de la cote actuelle ($Z_0 = 27.11$ m); **aucune correction.**

Hypothèses retenues a priori sur les caractéristiques hydraulique du site de l'Oise à Venette

Nous avons considéré pour l'établissement des courbes de tarage BaRatin une succession de deux contrôles hydrauliques.

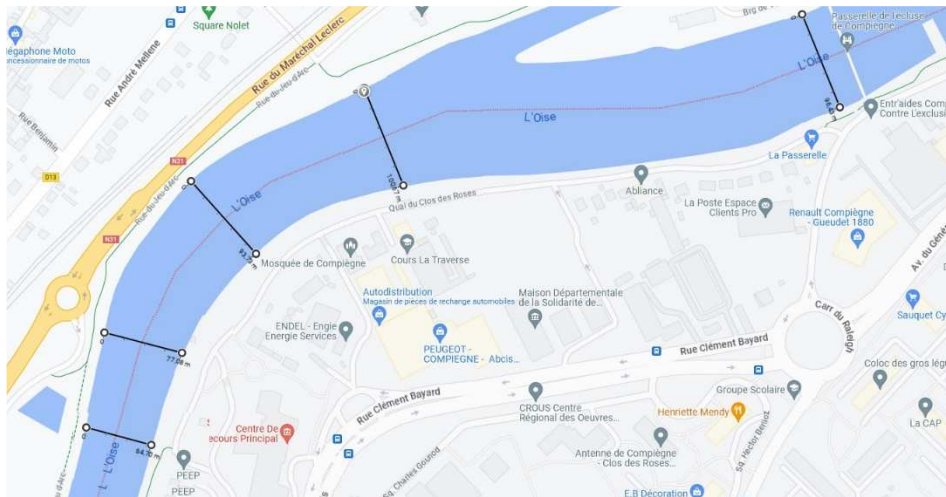
Contrôle n°1 : chenal en lit mineur

Les *a priori* retenus sur les paramètres de la loi hauteur-débit (*équation 1a*) sont les suivants :

$$a_1 = K_1 B_1 \sqrt{S_1} = 30.9 \pm 11.4 \text{ m}^{4/3} / \text{s} ; k_1 = -0.4 \pm 0.2 \text{ m} ; c_1 = 1.67 \pm 0.05$$

- Coefficient de Strickler $K_1 = 36 \pm 5$ (cf. modèle hydraulique HYDRA ; mail du 20/07/2023 Entente Oise-Aisne) ;
- Largeur $B_1 = 70 \pm 5$ m (cf. *Figure 10a*) ;
- Pente $S_1 = 1.5 \cdot 10^{-4} \pm 1 \cdot 10^{-4}$ m (cf. *Figure 10b* ; mail du 20/07/2023 Entente Oise-Aisne) ;
- Hauteur $b_1 = k_1 = -0.4 \pm 0.2$ m (cf. *Figure 10c*).

La hauteur d'activation k_1 pour un contrôle chenal est déduite de la géométrie du lit mineur au droit de la station hydrométrique. D'après la *Figure 10c*, le fond du lit au droit du barrage de Venette est à l'altitude $Z = 26.91$ m et baisse rapidement à $Z = 26.5$ m plus en aval. Ceci correspond à une cote à l'échelle $H = 26.91 - 27.11 = -0.20$ m puis $H = 26.5 - 27.11 = -0.61$ m. Nous retenons un *a priori* $k_1 = -0.4 \pm 0.2$ m.



Ligne d'eau et lit mineur sur le bief de Venette

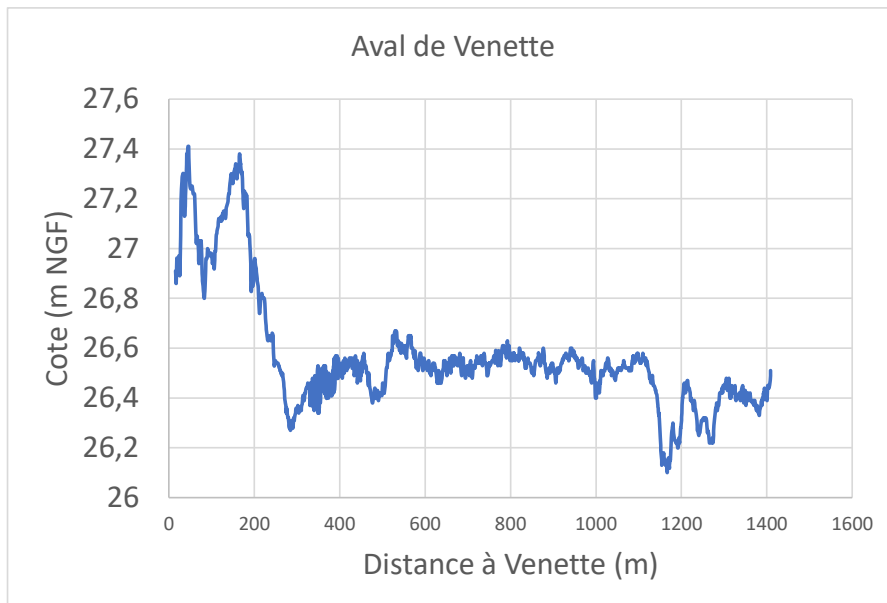
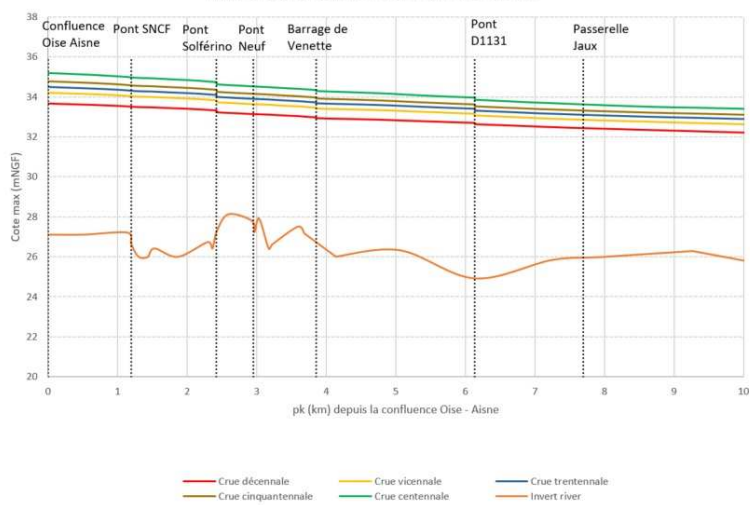


Figure 10 : Géométrie du lit mineur en aval du barrage de Venette : a/ vue en plan Géoportail (VuePlanOiseVenette.png) ; b/ profil en long du modèle hydraulique HYDRA (PLOiseVenette.png ; PL_Hydra.xlsx) ; c/ bathymétrie VNF de 2019 (Bathy_Oise_Venette_données_VNF_2019.xlsx)

Contrôle n°2 : chenal en lit majeur

Les *a priori* retenus sur les paramètres de la loi hauteur-débit (équation 1b) sont les suivants :

$$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2} = 137.2 \pm 71.8 ; k_2 = 6.9 \pm 0.5 \text{ m} ; c_2 = 1.67 \pm 0.05$$

- Coefficient de Strickler $K_2 = 14 \pm 5$ (cf. modèle hydraulique HYDRA ; mail du 20/07/2023 Entente Oise-Aisne) ;
- Largeur $B_2 = 800 \pm 150$ m. D'après la carte d'aléa du PPRi (cf. Figure 11a), la largeur du lit majeur varie d'amont en aval (900, 830, 690 et 630 m ; cf. Figure 11b). En estimant la largeur associée au remplissage du lit majeur à la cote $Z = 34$ m (H voisin de 7 m), on obtient en 3 profils en travers (cf. Figure 12) respectivement les largeurs de 890, 1000 et 640 m ;
- Pente $S_2 = 5 \cdot 10^{-4} \pm 1 \cdot 10^{-4}$ m, avec la même pente que le lit mineur ;
- Hauteur d'activation $k_2 = 6.9 \pm 0.5$ m, en considérant une altitude $Z = 34$ m pour remplir le lit majeur ;
- Hauteur b_2 déduite par continuité des équations 1a et 1b, pour $H = b_2$.



Figure 11 : Extension du lit majeur dans le secteur du barrage de Venette : a/ carte d'aléa du PPRi de la rivière Oise, secteur Compiègne (CarteZI_Lamagistere.png) ; b/ largeur en différents profils en travers (Lit MajeurOiseVenette.jpg)

Calcul BaRatin avec les jaugeages de la période 2011-2023

Nous avons retenu une incertitude de $\pm 5\%$ sur les jaugeages. La **courbe BaRatin** issue du croisement des estimations *a priori* des paramètres de la courbe de tarage avec les jaugeages est **visiblement erronée** (Figure 13a) pour les cotes inférieures à 3.5 m. Il est vraisemblable que l'influence du barrage de Verberie, situé 12.7 km en aval, soit sensible à bas débit jusqu'à Venette, et remonte la cote. L'objectif de cette analyse étant celui de l'estimation des crues, nous ne conservons par la suite que les 4 jaugeages les plus forts, au-delà d'une cote $H = 3.5$ m (Figure 13b).

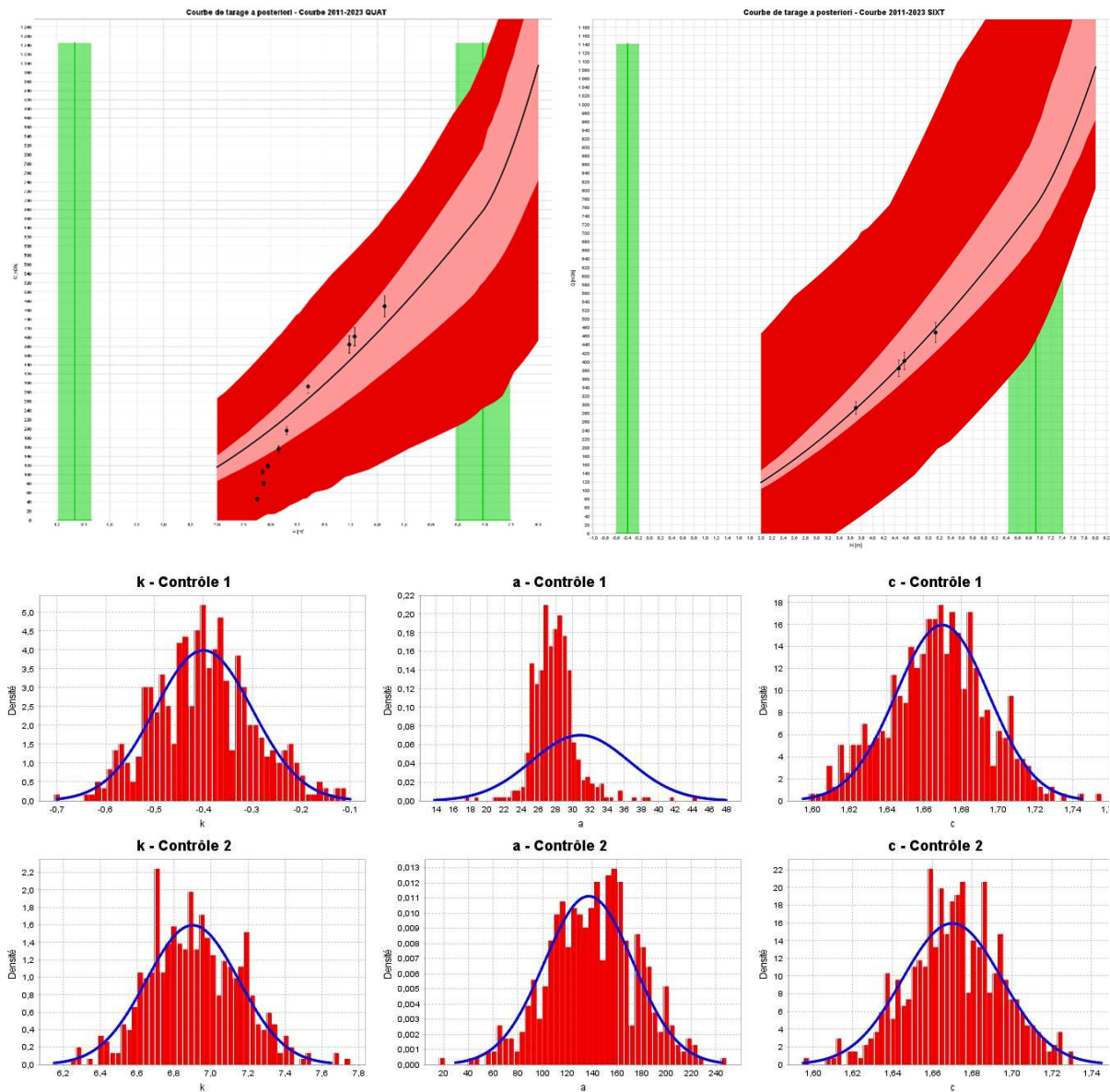


Figure 13 : Courbe de tarage de l'Oise à Venette sur la période 2011-2023 : a/ courbe de tarage avec l'ensemble des jaugeages, et intervalle de confiance à 95% ; b/ courbe de tarage avec 4 jaugeages, et intervalle de confiance à 95% ; c/ distribution des paramètres avec valeurs *a priori* (en bleu) et *a posteriori* (en rouge) (RCBaRatin2011_2023.png, RCBaRatin2011_2023_4Jaugeages.png, BaRatinParametres2011_2023_4Jaugeages.jpg)

Pour le lit mineur (contrôle n°1), le modèle revoit à la baisse le paramètre $a_1 = K_1 B_1 \sqrt{S_1}$. Pour le lit majeur (contrôle n°2), l'absence de jaugeages ne permet pas de conclure, l'estimation *a posteriori* est similaire à celle de l'*a priori*.

La comparaison de la courbe BaRatin avec la courbe DREAL et celle obtenue avec le modèle hydraulique HYDRA montre (cf. *Figure 14*) des valeurs BaRatin un peu plus fortes (+ 7 à + 10%) dans l'intervalle de cote [4 ; 6 m]. Au-delà la courbe BaRatin tend à converger vers la valeur HYDRA.

A ce stade, il n'y pas de raison particulière de remettre en cause l'utilisation de la courbe HYDRA pour calculer les débits de la période récente. La très forte incertitude obtenue sur la courbe BaRatin 2011-2023 est liée au fait que nous n'avons conservé que les 4 jaugeages de hautes-eaux (non influencés par le niveau en aval) pour caler la courbe. Nous retiendrons par la suite une incertitude de + 10% pour la courbe de tarage HYDRA.

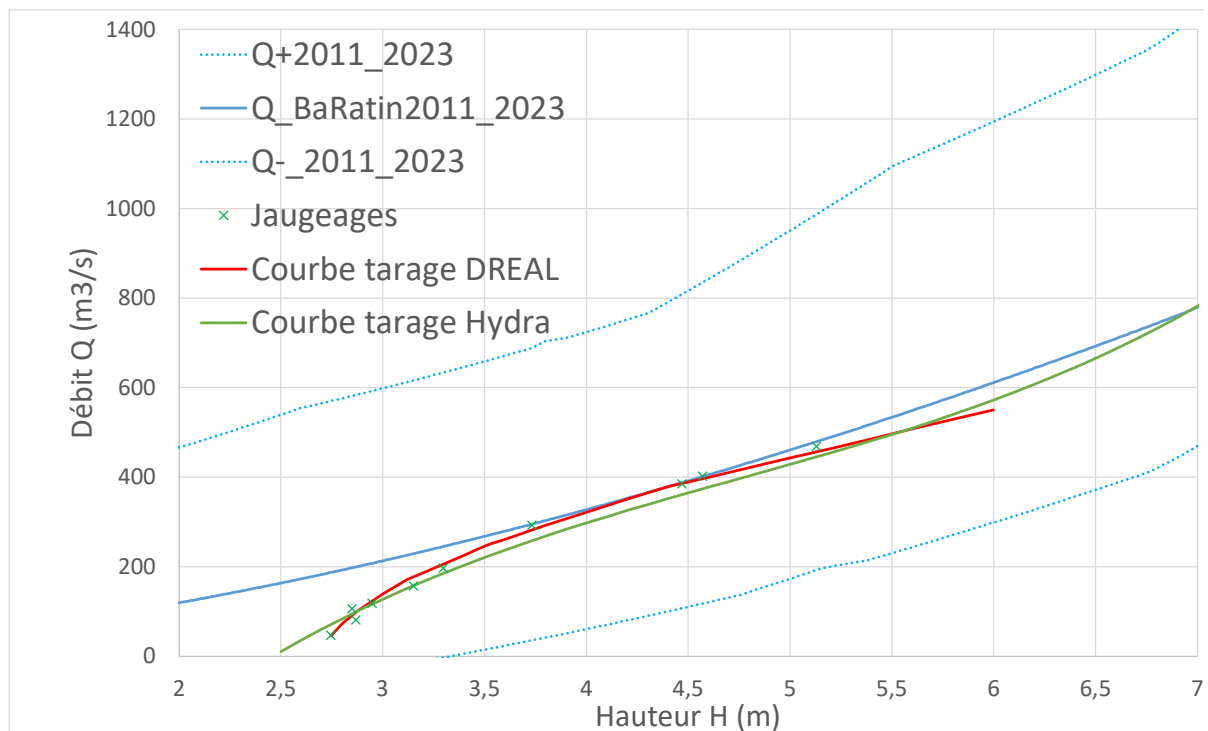


Figure 14 : Comparaison des courbes de tarage BaRatin (avec intervalle de confiance à 95%), DREAL et du modèle HYDRA sur l'Oise à Venette (RCBaRatinVenette.xlsx)

Courbe de tarage ancienne avant 1881

La *Figure 15* montre l'évolution de l'occupation du sol à Compiègne au cours du temps. On ne voit pas d'évolution significative sur le tracé du lit mineur de l'Oise, à l'exception de la construction de l'écluse et du barrage de Venette. La largeur du lit mineur (scan 1950) est un peu réduite ($B = 65$ m) par rapport à la situation actuelle ($B = 70$ m). Pour le lit majeur, on constate qu'il était auparavant très peu urbanisé, à l'exception du centre ancien de Compiègne, dans les limites de remparts.

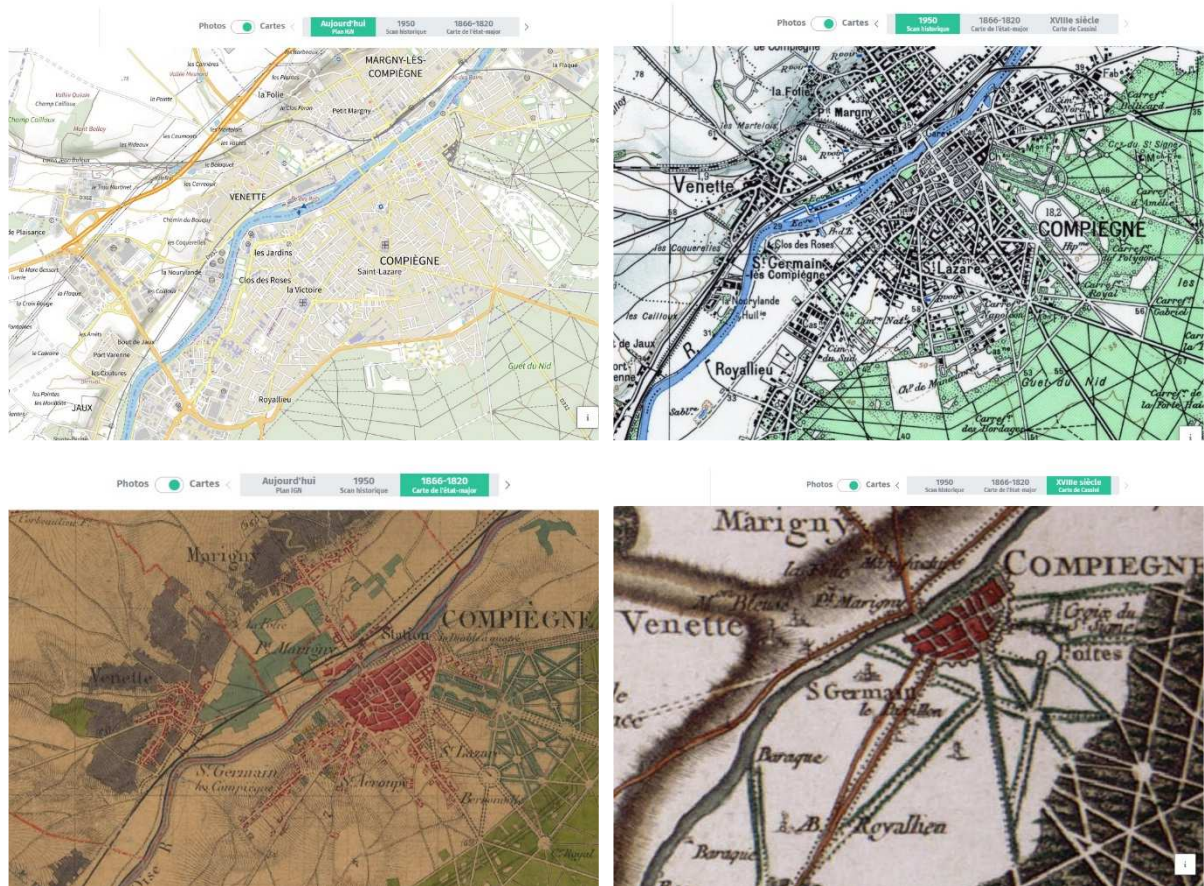


Figure 15 : Vues en plan via Geoportail dans le secteur de Compiègne : a/ en 2023 ; b/ scan 1950 ; c/ carte d'état major 1866-1920 ; carte de Cassini (XVIIIe siècle) (IGN2023Compiègne.jpg ; Scan1950Compiègne.jpg ; CarteEtatMajor1820-1866Compiègne.jpg ; CarteCassiniXVIIIeSiecleCompiègne.jpg)

Aucun jaugeage n'étant disponible avant 2011, nous reprenons la courbe BaRatin de la période récente 2011-2023, en modifiant certains paramètres et leurs incertitudes. **Pour le lit mineur**, on dispose de la ligne d'eau d'étiage en juin 1955 (*Figure 6*), qui indique au droit du barrage de Venette une cote d'eau $Z_{aval} = 29.2$ (NGF) et une cote d'eau $Z_{amont} = 30.6$ (NGF). Au droit de l'échelle de Venette (située en aval), le niveau d'eau relevé était donc : $Z(\text{juin } 1955) = 29.2$ (NGF) + 0.39 = 29.59 (IGN69). Le débit de l'Oise au moment du relevé n'est pas connu. En supposant qu'il était voisin du débit moyen mensuel de juin, on peut l'estimer comme suit :

- $QM(\text{juin})_{\text{Creil}} = 74 \text{ m}^3/\text{s}$ (<https://www.hydro.eaufrance.fr/>) pour une superficie de bassin versant 14 200 km² ;
- $QM(\text{juin})_{\text{Venette}} = 74 * 12\,985 / 14\,200 = 68 \text{ m}^3/\text{s}$, en gardant le même débit spécifique.

Avec une formule de Strickler $Q = K_1 B_1 \sqrt{S_1} H^{5/3}$, avec $K_1 = 36$; $B_1 = 65$ m ; $S_1 = 1.5 \cdot 10^{-4}$, on obtient pour $Q = 68$ m³/s, $H(\text{juin 1955}) = 1.67$ m. La cote du fond du lit serait donc :

$$Z(\text{fond}) = 29.59 - 1.67 = 27.92 \text{ m (IGN69)},$$

soit une hauteur d'activation $k_1 = 27.92 - 27.11$ (zéro échelle) = 0.81 m, bien différente de celle retenue pour la période récente ($k_1 = -0.4$ m).

Compte-tenu de l'incertitude sur le débit qui s'écoulait réellement en juin 1955, et du fait que l'influence aval du barrage de Verberie contribue à relever fortement le niveau de l'eau à Venette (cf. dénivelée de seulement 0.1 m sur la ligne d'eau d'étiage en juin 1955 entre Verberie et Venette), nous considérons que la géométrie du fond du lit mineur en aval de l'échelle de Venette n'a pas changé, entre 1955 et aujourd'hui. **A défaut d'information sur la topographie du lit mineur de l'Oise avant 1881, nous conservons la géométrie contemporaine, à l'exception d'une largeur plus faible du lit mineur (65 m au lieu de 70 m).**

Pour le lit majeur, la seule évolution que l'on peut supposer concerne le Strickler, qui avant le XXe siècle devait être plus élevé (moins de résistance à l'écoulement) du fait d'une urbanisation réduite. Le coefficient de Strickler est un peu augmenté $K_2 = 17 \pm 5$.

Tableau 2 : Paramètres des courbes de tarage BaRatin 17-20^e siècles et 2011-2023 de l'Oise à Venette (les valeurs en vert de la CT 2011-2023 sont reprises pour la CT 1658-1880 ; en violet, valeurs modifiées de la CT 2011-2023)

Courbes de tarage		Lit mineur					Lit majeur				
		k_1 (m)	K_1 (m ^{1/3} /s)	B_1 (m)	S_1	c_1	k_2 (m)	K_2 (m ^{1/3} /s)	B_2 (m)	S_2	c_2
CT 2011-2023	Prior	-0.4 ± 0.2	36 ± 5	70 ± 5	1.5E-4 ± 1E-4	1.67 ± 0.05	6.9 ± 0.5	14 ± 5	800 ± 150	1.5E-4 ± 1E-4	1.67 ± 0.05
		$a_1 = K_1 B_1 \sqrt{S_1} = 30.9 \pm 11.4$					$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2} = 137.2 \pm 71.8$				
	post.	-0.62 ± 0.15	$a_1 = 27.9 \pm 2.5$			1.67 ± 0.03	6.87 ± 0.24	$a_2 = 112.1 \pm 35.7$			1.65 ± 0.03
	post « équivalent »		32 ± 5	70 ± 5	1.5 E-4 ± 1E-4			13 ± 5	700 ± 150	1.5E-4 ± 1E-4	
			$a_1 = 27.4 \pm 10.3$					$a_2 = 111.5 \pm 61.5$			
	post similaire à HYDRA (-8% pour le lit mineur)		30 ± 5	70 ± 5	1.5 E-4 ± 1E-4						
CT 1658-1880	prior	-0.6 ± 0.3	30 ± 5	65 ± 5	1.5 E-4 ± 1E-4	1.67 ± 0.05	6.9 ± 0.5	17 ± 5	700 ± 150	1.5E-4 ± 1E-4	1.67 ± 0.05

Le Tableau 2 récapitule le processus de choix des paramètres de la courbe de tarage 1658-1880 :

- Ligne 1 : valeurs *a priori* retenues pour les paramètres de la CT 2011-2023 ;
- Ligne 2 : valeur *a posteriori* retenues pour les paramètres de la CT 2011-2023, en exploitant les jaugeages disponibles ;
- Ligne 3 : choix empirique des coefficients K_i , B_i et S_i pour retrouver la valeur *a posteriori* $a_i = K_i B_i \sqrt{S_i}$;
- Ligne 4 : réduction de 8% du Strickler K_1 du lit mineur pour retrouver la courbe HYDRA ;
- Ligne 5 : valeur *a priori* retenues pour les paramètres de la CT 1658-1880. En violet, lorsqu'une modification a été retenue par rapport à la CT 2011-2023 : incertitude plus forte

sur le fond du lit mineur, réduction de la largeur du lit mineur, augmentation du Strickler du lit majeur).

La *Figure 16* représente la courbe de tarage BaRatin reconstituée avant 1881, avec son intervalle de confiance à 95%. A cote identique, les débits sont de 12 à 20% supérieurs à ceux estimés avec la courbe de tarage HYDRA. L'incertitude sur la courbe de tarage BaRatin 1658-1880 est très importante : $\pm 37\%$. Une reconstitution plus fine serait possible, en modifiant la configuration du modèle hydraulique HYDRA, sous réserve de disposer d'informations sur la topographie du lit mineur et majeur de cette période.

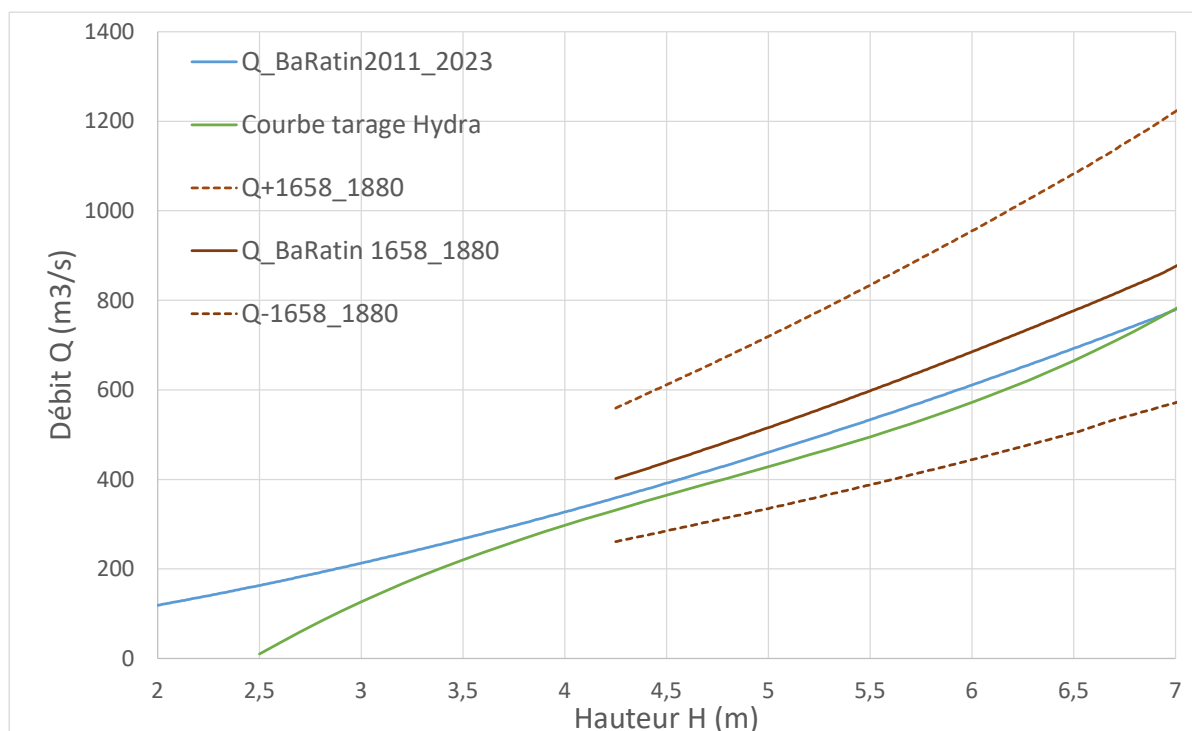


Figure 16 : Courbes de tarage 2011-2023 (BaRatin et modèle HYDRA) et 1658-2010 (BaRatin) sur l'Oise à Venette (RCBaRatinVenette.xlsx)

Erreurs multiplicatives sur les courbes de tarage

Sur la période récente 2011-2021 avec des jaugeages, nous considérons une incertitude de $\pm 10\%$ sur les débits de crue. Sur la période ancienne 1658-1880 antérieure à la chenalisation de l'Oise, nous reprenons l'incertitude de $\pm 37\%$ issue de l'étude BaRatin (demi-largeur de l'intervalle de confiance à 95% ; *Figure 16*). Sur la période intermédiaire 1881-2010 sans jaugeages, nous retenons une incertitude intermédiaire de $\pm 20\%$.

Tableau 3 : Erreurs multiplicatives C_i retenues sur la courbe de tarage pour le calcul du débit maximum annuel de l'Oise à Venette

Sous-période	1658-1783	1784-1855	1856-1880	1881-2010	2011-2021
Incertitude	$\pm 37\%$	$\pm 37\%$	$\pm 37\%$	$\pm 20\%$	$\pm 10\%$
Prior sur le coefficient C_i ($i = 1, 5$)	C_5	C_4	C_3	C_2	C_1
	[0.63 ;1.37]	[0.63 ;1.37]	[0.63 ;1.37]	[0.80 ;1.20]	[0.90 ;1.10]

4. Série de débit maximum annuel sur l'Oise à Venette

Le régime de l'Oise à Creil montre que la période d'étiage se situe en août –septembre et que la période des hautes-eaux va de décembre à mars (*Figure 17*). L'année hydrologique N utilisée pour l'extraction de la valeur maximale annuelle commencera en septembre de l'année $N-1$ et terminera en août de l'année N . Nous avons extrait le maximum de l'année hydrologique de la série de cotes de crues disponibles à Venette de 1856 à 2021, **puis converties en débit à partir de la courbe HYDRA** (*Figure 16*).

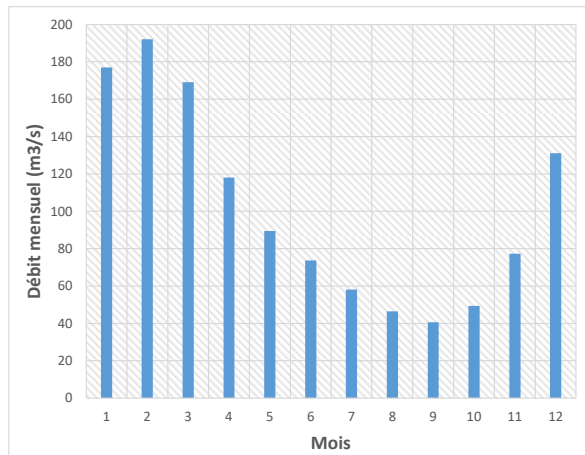


Figure 17 : Régime de l'Oise à Creil : débit mensuel interannuel sur la période 2007-2023 (HydroPortail ; QIX_Venette1658_2021.xlsx)

Le débit des crues historiques de 1658, 1740, 1784 et 1846 est estimé respectivement à 781, 643, 779 et 616 m³/s (cf. cotes de crue : 7.23, 6.39, 6.99 et 6.25 m). Au final, on dispose (cf. *Figure 18*) de la série de débits suivante :

- Période 1658-1855 : 4 crues historiques en 1658, 1740, 1784 et 1846. Pour les autres années, le débit est supposé inférieur au plus faible débit des 4 crues, à savoir 616 m³/s ;
- Période 1856-2021 : 3 années sont considérées comme manquantes (1917-1919 ; fin de la 1^{ère} guerre mondiale) et on dispose de 163 valeurs maximales annuelles (dont 87 années où la cote est supposée inférieure à 4.25 m).

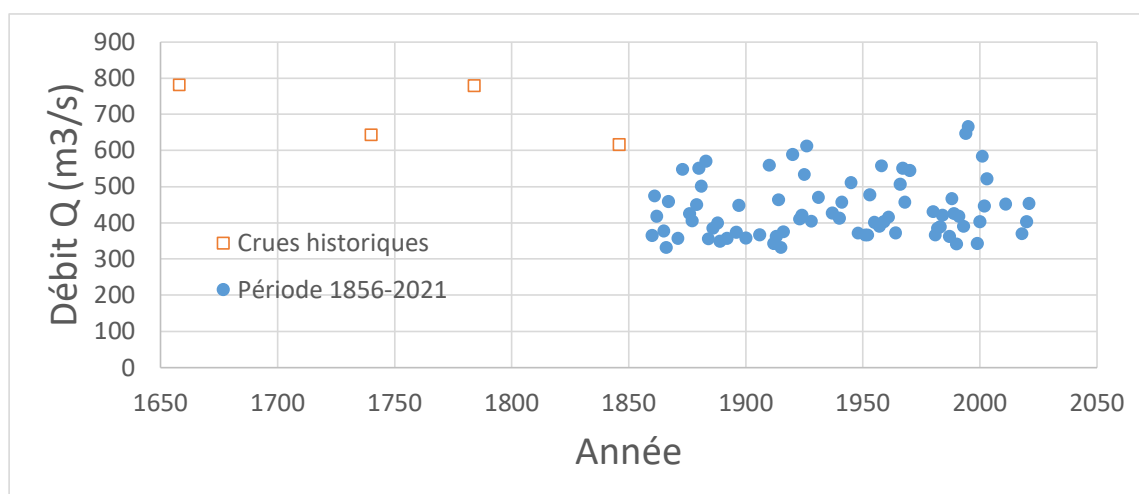


Figure 18 : Valeurs maximales annuelles du débit de l'Oise à Venette de 1658 à 2021 (QIX_Venette1658_2021.xlsx)

A titre de vérification, nous avons comparé le débit mentionné dans la littérature pour deux crues remarquables de l'Oise avec celui estimé avec la courbe HYDRA :

- Crue de janvier-février 1955 : Lang et Cœur (2014, p 434) mentionnent un débit de $665 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'Oise à Creil. Pour une cote $H = 6.50 \text{ m}$ à Venette, la courbe HYDRA donne un débit de $647 \text{ m}^3/\text{s}$, tout à fait cohérent ;
- Crue de janvier 1910 : Marty et Pelletier (1999, p36) mentionnent un débit de $460 \text{ m}^3/\text{s}$ sur l'Oise à Venette. Pour une cote $H = 5.92 \text{ m}$ à Venette, la courbe HYDRA donne un débit de $559 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une valeur supérieure de + 20 %.

C'est pour cette raison qu'au final toutes les cotes de crues depuis 1658 à aujourd'hui ont été converties en débit avec la courbe HYDRA. Le calcul BaRatin 1658-1880 est exploité uniquement pour apprécier les incertitudes sur la reconstitution des débits.

5. Distribution des crues sur l'Oise à Venette

5.1 Estimation des paramètres d'une loi GEV

Les calculs ont été réalisés avec le modèle HBAY développé par Benjamin Renard (INRAE). Les données de crues peuvent être connues exactement, positionnées par rapport à un seuil, ou comprises dans un intervalle. Ceci permet notamment de traiter le cas d'une période historique, avec la connaissance de crues historiques pour certaines années seulement, et l'information que le débit a été inférieur à un seuil pour toutes les autres années. Il est possible d'inclure dans le modèle une erreur multiplicative liée à la courbe de tarage (possibilité de définir plusieurs courbes de tarage au cours du temps).

La méthode d'estimation des paramètres repose sur une analyse bayésienne (combinaison d'un *a priori* sur les paramètres et d'une fonction de vraisemblance). La résolution numérique s'effectue par une méthode de simulation Monte Carlo par Chaines de Markov (MCMC), avec la génération de valeurs qui convergent en probabilité vers la distribution *a posteriori* issue de l'analyse bayésienne.

Principe général de l'analyse bayésienne

Y est une variable aléatoire de fonction de répartition $F(y)$ et de densité de probabilité $f(y)$. La loi de probabilité F possède un jeu de paramètres $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ qui sont estimés à partir d'un échantillon $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$.

L'approche « classique » consiste à choisir le jeu de paramètres θ qui maximise la fonction de vraisemblance :

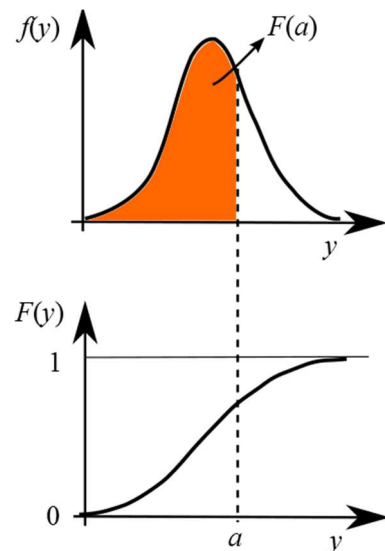
$$V(\mathbf{y}) = p(\mathbf{y}|\theta) = \prod_{i=1}^n f(y_i) = \prod_{i=1}^n p(y_i|\theta) \quad (3)$$

Dans le cadre de l'analyse bayésienne, on donne la possibilité à l'hydrologue de donner son expertise sur les valeurs *a priori* du jeu de paramètres θ . Le paramètre θ_i peut par exemple être défini comme strictement positif, ou distribué de façon uniforme dans un intervalle, ou suivant une loi normale (moyenne, écart-type). On note $p(\theta)$ la densité de probabilité *a priori* du jeu de paramètres.

En utilisant le théorème de Bayes, on peut combiner cette probabilité *a priori* $p(\theta)$ avec la vraisemblance $V(\mathbf{y})$ de l'échantillon pour en déduire la probabilité *a posteriori* $p(\theta|\mathbf{y})$ du jeu de paramètres θ , sachant l'échantillon \mathbf{y} :

$$p(\theta|\mathbf{y}) \propto V(\mathbf{y})p(\theta) \quad (4)$$

Le code de calcul HBAY utilise un algorithme de simulation par chaînes Monte Carlo (MCMC) qui permet de simuler des valeurs d'un vecteur θ qui vont converger au bout d'un certain temps vers la distribution *a posteriori* $p(\theta|\mathbf{y})$. Ces valeurs simulées constitueront un échantillon représentatif de la distribution des paramètres (cf. Figure 19).



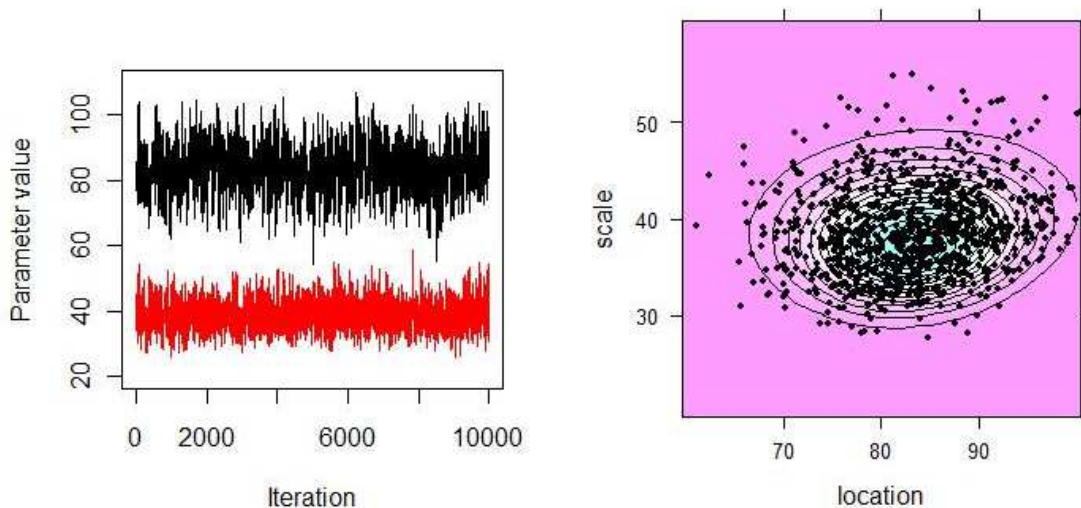


Figure 19 : Exemple à gauche de simulations MCMC successives de deux paramètres θ_1 et θ_2 (respectivement paramètres d'échelle et de position). Report à droite des valeurs simulées et tracé possible de contours associés à une probabilité donnée (NoticeHBAY_2018.docx)

On retiendra alors parmi ces valeurs simulées le vecteur θ^* qui maximise la probabilité *a posteriori* $p(\theta | \mathbf{y})$. On pourra également s'intéresser aux incertitudes d'estimation sur chaque paramètre θ_i via des intervalles de crédibilité : par exemple l'intervalle à 95% $[\theta_i(0.025) ; \theta_i(0.975)]$, à partir des quantiles 0.025 et 0.975 non dépassés respectivement 2.5% et 97.5% sur le jeu de données simulées.

Avec l'analyse bayésienne, il est possible d'utiliser la distribution prédictive $p(z | \mathbf{y})$ pour prédire la probabilité au non dépassement d'une valeur $\mathbf{Y} = z$, en ne raisonnant plus sur le jeu optimal θ^* , mais en considérant la *distribution a posteriori* du jeu de paramètres $p(\theta | \mathbf{y})$:

$$p(z | \mathbf{y}) = \int p(z | \theta) p(\theta | \mathbf{y}) d\theta \quad (5)$$

C'est une façon de majorer le résultat sur l'estimation de la distribution, en considérant les incertitudes sur le jeu de paramètres θ . Suivant la loi de probabilité utilisée et l'incertitude associée sur l'estimation des paramètres, la distribution prédictive (cf. Figure 20) peut être voisine de l'estimation associée au jeu optimal θ^* (loi de Gumbel) ou au contraire être plus forte (loi GEV).

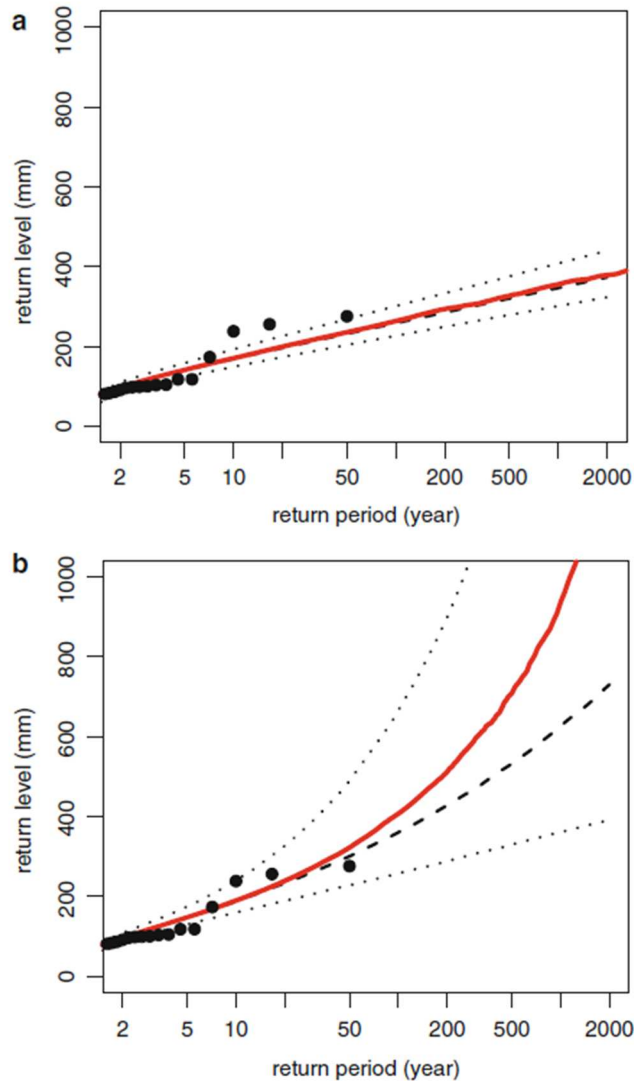


Figure 20 : Comparaison de la distribution max post associée au jeu optimal de paramètre θ^* (en noir trait tireté) et de la distribution prédictive (en rouge). L'intervalle de confiance à 90% est représenté en lignes pointillées : (a) loi de Gumbel ; (b) loi GEV (repris de Renard et al., 2013 : Fig. 3.7)

Fonction de vraisemblance

La formulation de l'équation (3) de la fonction de vraisemblance correspond au cas où l'on dispose d'un échantillon complet $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ de valeurs maximales annuelles.

Une première variante consiste à prendre en compte une erreur multiplicative C_k sur les débits y_i , liée à la conversion hauteur-débit (fonction Ψ_k pour la courbe de tarage de la période k) :

$$y_i = C_k \widehat{\psi}_k(H_i) \quad (6)$$

Le jeu de paramètres à estimer $\theta = (\mu, \lambda, \xi, C_1, C_2, \dots, C_{NC})$ inclut désormais le coefficient d'erreur multiplicative pour les NC courbes de tarage, en plus des paramètres de position μ , d'échelle λ et de forme ξ de la loi GEV. Au vu de l'étude BaRatin pour la période 1658-2010, on considère que le coefficient C_k suit une loi uniforme dans des intervalles donnés dans le *Tableau 3*

(respectivement $\pm 37\%$, $\pm 20\%$ et $\pm 10\%$). D'après Neppel *et al.* (2010), on peut montrer que la fonction de vraisemblance s'écrit alors :

$$V(\mathbf{y}) = p(\mathbf{y}|\boldsymbol{\theta}) = \prod_{i=1}^n f(y_i) = \prod_{k=1}^{NC} \prod_{i=1}^n p\left(\frac{y_i}{c_k} \left| \frac{\mu}{c_k}, \frac{\lambda}{c_k}, \xi \right.\right) \quad (7)$$

Une seconde variante consiste à traiter un échantillon incomplet de crues historiques, en supposant que les crues historiques non connues sont inférieures à un seuil de perception S_i . Pour ces années, la probabilité $p(y_i|\boldsymbol{\theta})$ est remplacée par $F(S_i|\boldsymbol{\theta})$ dans l'équation (3). On peut également traiter le cas de crues comprises dans un intervalle $[y_i^-; y_i^+]$, en utilisant dans l'équation (1) : $F(y_i^+|\boldsymbol{\theta}) - F(y_i^-|\boldsymbol{\theta})$.

5.2 Distribution empirique d'un échantillon mixte

Pour un échantillon classé par valeurs décroissantes : $y(1) \geq \dots \geq y(N)$, la fréquence empirique au dépassement s'écrit : $f_i = \text{Prob}(\mathbf{Y} > \mathbf{y}(i)) = \frac{i-a}{N+1-2a}$ (8)

Avec une loi à 3 paramètres comme la loi GEV, la valeur optimale du paramètre a dépend du coefficient de forme (valeur exacte non connue). Nous retenons la valeur $a = 0.44$, qui correspond à l'optimum pour une loi de Gumbel (Cunnane, 1978).

Pour un échantillon mixte, composé d'un échantillon $(y_1, y_2, \dots, y_{NC})$ de valeurs maximales en NC années (période continue) et d'une collection de crues historiques supérieures à un seuil S sur NH années (période historique), on raisonne en deux sous-échantillons (Hirsch, 1987) :

- ✓ NS crues supérieures au seuil S sur la période totale (dont NS_H sur la période historique et NS_C sur la période continue), qui couvre $NA = NC + NH$ années

$$\text{Prob}(\mathbf{Y} > \mathbf{y}(i)) = \left(\frac{NS}{NA}\right) f_i = \left(\frac{NS}{NA}\right) \frac{i-0.44}{NS+0.12} \quad i = 1, NS \quad (9)$$

- ✓ Crues inférieures au seuil S sur la période continue

$$\text{Prob}(\mathbf{Y} > \mathbf{y}(i)) = \frac{NS}{NA} + \left(1 - \frac{NS}{NA}\right) \frac{(i-NS)-0.44}{NC-NS_C+0.12} \quad i = NS + 1, NC + NS_H \quad (10)$$

5.3 Date de début de la période historique

La plupart des auteurs font commencer la période historique à la date de la plus ancienne crue historique connue. Prosdociami (2018) a montré que cela introduit un biais, et qu'il était préférable de commencer la période historique avant la première crue. Le nombre d'années à rajouter est :

$$\frac{1}{k}(t_k - 1), \text{ avec :} \quad (11)$$

- ✓ k : le nombre de crues supérieures à un seuil de perception sur la totalité de la chronique ;
- ✓ t_k : le nombre d'années entre la première crue connue et la fin de la chronique.

5.4 Résultats sur l'estimation des quantiles de crue

Nous faisons une **étude de sensibilité en considérant 5 périodes de référence** :

- Période 1910-2021 : correspond à un inventaire réputé exhaustif de toutes les crues ayant dépassé la cote de 4.25 m à Venette ;
- Période 1881-2021 : correspond à la période considérée comme « *fiable* » dans le rapport de l'Entente Oise-Aisne (Girardon, 2023) avec le rajout des crues dont la cote a dépassé 2.60 m à Venette ;
- Période 1856-2021 : correspond au début du recensement des crues dont la cote a dépassé 2.60 m à Venette (1856-1915) ;
- Période 1784-2021 : rajout des 2 crues historiques de 1784 et 1846 recensées dans la base nationale des repères de crues et dont les marques sont visibles en aval de l'écluse de Venette (cf. *Figure 5*) ;
- Période 1658-2021 : rajout des 2 crues historiques de 1658 et 1740 recensées par Champion (1862) et dont une marque de crue de 1740 est visible sur un mur à Compiègne (cf. *Figure 7*).

Sur les deux périodes les plus anciennes avec des crues historiques, nous faisons commencer le début de la période historique respectivement en 1737 et 1607, d'après l'équation (11) :

- Période 1784-2021 :
 - ✓ $k = 5$ (2 crues historiques en 1784 et 1846 + 3 crues de la période continue 1856-2021 ayant dépassé le seuil de perception de 612 m³/s, en 1926, 1994 et 1995) ;
 - ✓ $t_k = 2021 - 1784 + 1 - 3$ (années manquantes) = 235 (nombre d'années entre la première crue connue et la fin de la chronique).

$$\frac{1}{k}(t_k - 1) = \frac{234}{5} = 47, \text{ début de la période : } 1784 - 47 = 1737.$$

- Période 1658-2021 :
 - ✓ $k = 7$ (4 crues historiques en 1658, 1740, 1784 et 1846 + 3 crues de la période continue 1856-2021 ayant dépassé le seuil de perception de 612 m³/s) ;
 - ✓ $t_k = 2021 - 1658 + 1 - 3$ (années manquantes) = 361 (nombre d'années entre la première crue connue et la fin de la chronique).

$$\frac{1}{k}(t_k - 1) = \frac{360}{7} = 51, \text{ début de la période : } 1658 - 51 = 1607.$$

Un contrôle sur la stationnarité de la série des valeurs maximales annuelles sur les périodes 1856-2021, 1881-2021 et 1910-2021 (respectivement 75, 64 et 53 valeurs sur 166, 141 et 112 années) **ne montre pas d'anomalie**. L'hypothèse d'homogénéité (test de Pettitt ; Pettit, 1979) ou d'absence de tendance (test de Mann-Kendall, Kendall, 1979) n'est pas refusée, car la p-value des tests est largement supérieure à 0.1 (dans le cas contraire l'hypothèse est refusée, avec un risque d'erreur de 10 %). La p-value du test de Pettitt vaut respectivement 0.41, 0.19 et 1, et celle du test de Mann-Kendall respectivement 0.39, 0.19 et 0.81 pour les trois périodes de référence.

Un contrôle sur l'homogénéité de la série des 7 valeurs de crue supérieures à $312 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1607-2021 (crues de 1658, 1740, 1784, 1846, 1926, 1994 et 1995) ne montre pas d'anomalie, avec le test de Poisson (Lang *et al.*, 1999). Sur la *Figure 21*, avec en abscisse la date d'occurrence de chaque crue et en ordonnée le nombre cumulé de crues, la courbe expérimentale en bleu se situe à l'intérieur des limites de l'intervalle de confiance à 95% (en pointillé).

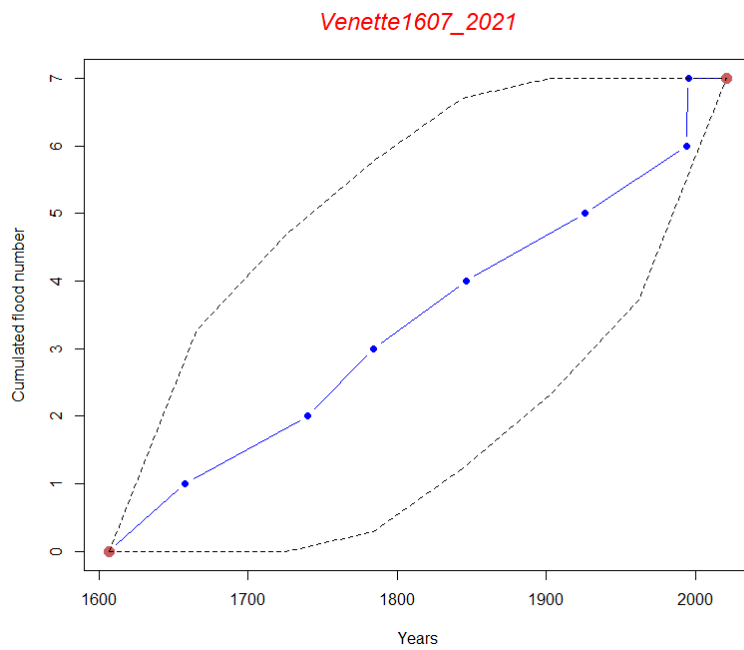


Figure 21 : Test de Poisson sur le processus d'occurrence des crues supérieures à $312 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'Oise à Venette (PoissonVenette1607_2021.png)

Estimation de la crue centennale

Au final (*Tableau 4* et *Figure 22*), on obtient une estimation de la crue centennale Q_{100} de $586 \text{ m}^3/\text{s}$ si l'on restreint l'analyse à la période 1910-2021. En prenant une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes, la valeur estimée de la prédictive Q_{100} est de $646 \text{ m}^3/\text{s}$. C'est une valeur voisine de celle estimée par Girardon (2023) : $Q_{100} = 623 \text{ m}^3/\text{s}$, à partir d'un échantillon de 81 valeurs supérieures à un seuil de $328 \text{ m}^3/\text{s}$ et une loi Pareto généralisée.

Compte-tenu des incertitudes sur la transformation hauteur-débit (cf. *Figure 16*) et sur la correction des cotes de crue pour tenir compte des changements d'échelle et des correspondances entre systèmes de nivellement (valeurs différentes d'après Gaullier et Goutx, 2003 et le site de l'IGN), **il est préférable de considérer les informations antérieures à 1910.**

En rajoutant l'information des relevés de cotes réalisées depuis 1856 (périodes 1856-2021 et 1881-2021), ou en incluant les crues historiques recensées en 1658, 1740, 1784 et 1846 (périodes 1658-2021 et 1784-2021), la crue centennale dépasse les $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Le fait de rajouter de l'information historique ne dégrade pas l'incertitude d'estimation (de $\pm 15\%$ avec 1 siècle de données 1910-2021, à $\pm 14\%$ sur près de 3 siècles et demie 1658-2021). En prenant une marge de sécurité pour tenir compte des incertitudes, la valeur estimée de la prédictive Q_{100} vaut respectivement 686 et $675 \text{ m}^3/\text{s}$, sur les périodes 1658-2021 et 1784-2021.

Tableau 4 : Estimation de la crue centennale de l'Oise à Venette pour 5 périodes de référence

Période de référence	1658-2021	1784-2021	1856-2021	1881-2021	1910-2021
Q_{100} (m ³ /s)	633	642	617	618	586
Incertitude	± 14%	± 15%	± 14%	± 15%	± 15%
Prédictive Q_{100} (m ³ /s)	686	675	643	643	646

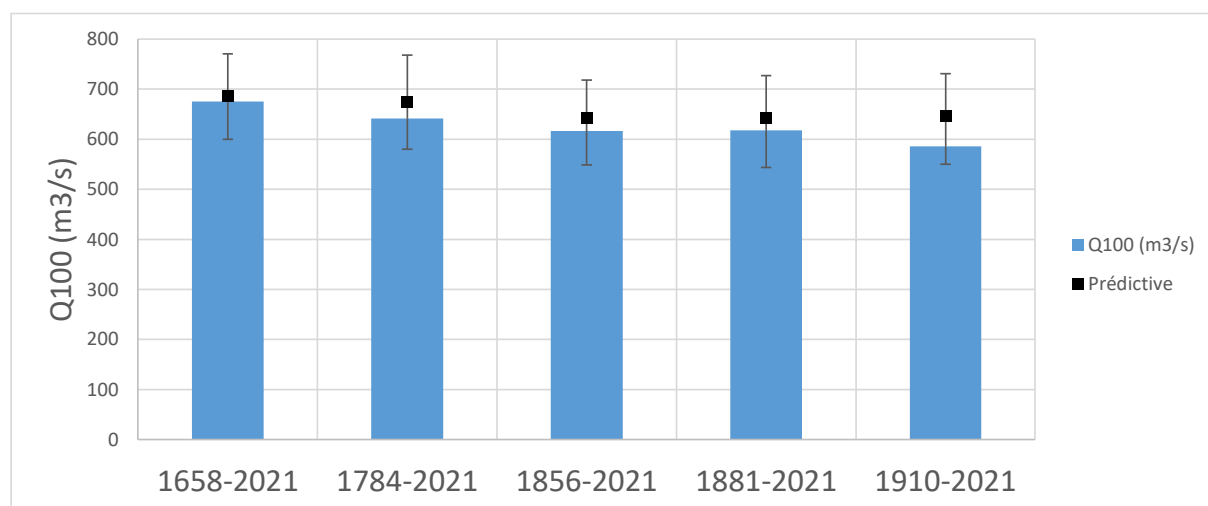


Figure 22 : Estimation de la crue centennale Q_{100} sur l'Oise à Venette sur 5 périodes de référence, avec l'intervalle de confiance à 95% et la valeur de la prédictive (SyntheseVenette.xlsx)

On voit dans le Tableau 5 que le modèle HBAY ne corrige que faiblement les données de débit (coefficient d'erreur multiplicative a posteriori compris entre 0.93 et 1.06) : **les corrections restent inférieures à 10% en valeur relative.**

Tableau 5 : Valeurs a priori et a posteriori sur le coefficient d'erreur multiplicative C_i associé à l'incertitude sur la conversion hauteur-débit de l'Oise à Venette

		Sous-périodes				
		1658-1783	1784-1855	1856-1880	1881-2010	2011-2021
Prior C_i		[0.63 ; 1.37]	[0.63 ; 1.37]	[0.63 ; 1.37]	[0.80 ; 1.20]	[0.90 ; 1.10]
Posterior C_i	1658-2021	1.06 [0.90 ; 1.21]	0.98 [0.84 ; 1.17]	1.00 [0.85 ; 1.14]	0.99 [0.87 ; 1.09]	1.03 [0.94 ; 1.07]
	1784-2021	/	0.96 [0.85 ; 1.19]	1.01 [0.87 ; 1.17]	1.00 [0.88 ; 1.08]	1.04 [0.95 ; 1.07]
	1856-2021	/	/	1.00 [0.87 ; 1.18]	0.98 [0.87 ; 1.09]	1.02 [0.94 ; 1.08]
	1881-2021	/	/	/	0.99 [0.86 ; 1.09]	1.00 [0.94 ; 1.07]
	1910-2021	/	/	/	0.93 [0.85 ; 1.08]	1.00 [0.95 ; 1.07]

Le détail des ajustements sur 3 périodes est reporté en *Figure 23*. La distribution empirique des crues est reportée en orange (données brutes) et en bleu (données corrigées avec le coefficient d'erreur multiplicative). L'estimation par une loi GEV est reportée en bleu (avec en pointillé l'intervalle de confiance) et en noir pour la distribution prédictive. On voit que l'information historique permet de disposer de plusieurs crues supérieures à la crue centennale (période 1658-2021 et 1784-2021), au lieu d'une seule en se restreignant à la période 1910-2021.

La distribution prédictive se situe plutôt en milieu de l'intervalle de confiance, ce qui n'est pas le cas pour la distribution modale. L'utilisation de la distribution prédictive permet de prendre une marge de sécurité vis à vis des incertitudes d'estimation.

Valeurs de quantiles de crue sur la période 1658-2021

Le *Tableau 6* donne la valeur des quantiles de crue et de leur incertitude pour les périodes de retour 10, 20, 30, 50 et 100 ans.

Tableau 6 : Quantiles de crue (m^3/s) et incertitudes sur l'Oise à Venette, période 1658-2021

Période de retour T (ans)	10	20	30	50	100
Distribution max post	500	560	591	629	675
Distribution prédictive	493	556	591	632	686
Incertitude (demi-largeur de l'intervalle de confiance à 95%)	± 11%	± 11%	± 12%	± 12%	± 13%

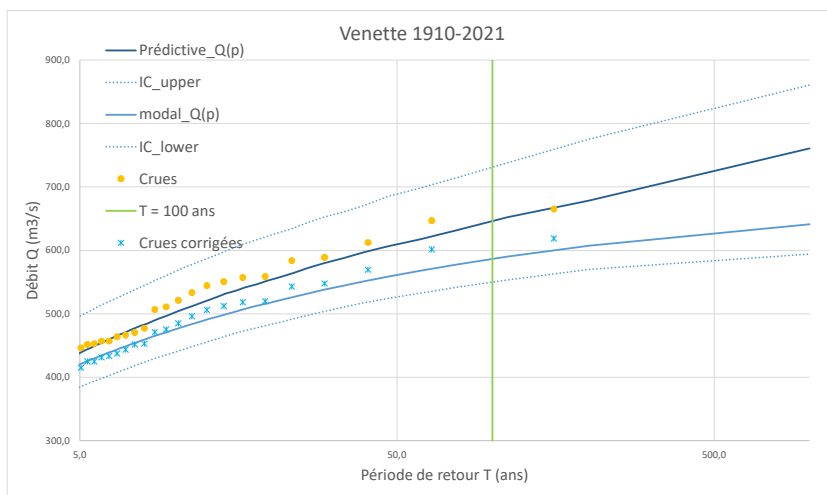
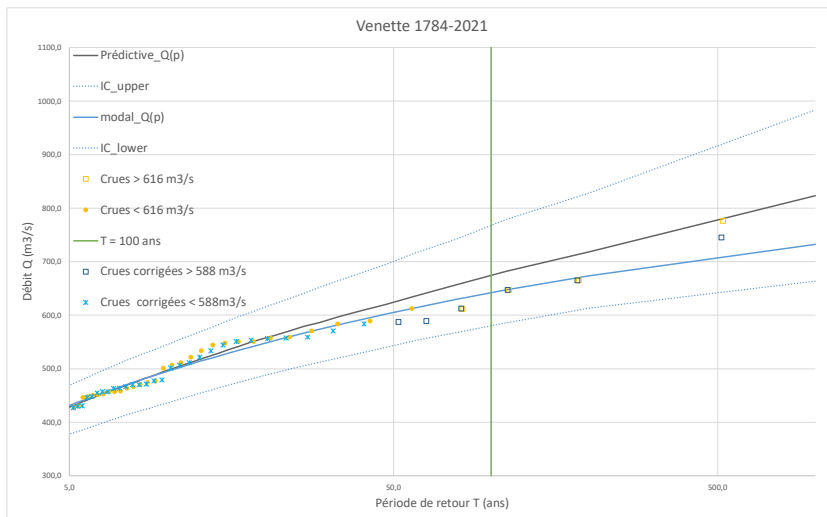
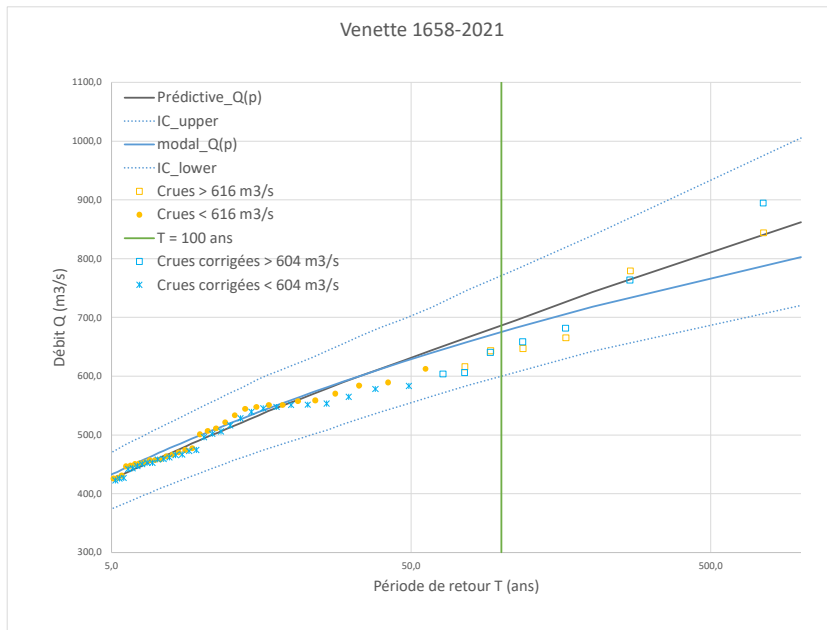


Figure 23 : Distribution des crues de l'Oise à Venette sur 3 périodes de référence avec une loi GEV (valeur max-post, intervalle de confiance à 95% et valeur prédictive) (Venette*_2021.xlsm)

6. Conclusion

L'Entente Oise-Aisne a produit une nouvelle étude (Girardon, 2023) qui donne une valeur de crue centennale $Q_{100} = 623 \text{ m}^3/\text{s}$ de l'Oise à Venette plus faible que celle retenue dans l'étude Hydratec (2014), avec $Q_{100} = 770 \text{ m}^3/\text{s}$. La première étude est basée sur un ajustement statistique (Loi Pareto généralisée) de 81 valeurs de débit supérieures à un seuil de $328 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1882-2022. La seconde étude est basée sur le couplage d'un modèle hydrologique et d'un modèle hydraulique.

Nous avons exploité les informations historiques sur les crues du secteur de Compiègne pour élargir la fenêtre chronologique d'analyse et ainsi réduire l'incertitude d'échantillonnage. Outre les informations de cotes déjà disponibles depuis 1856 et transmises par l'Entente Oise-Aisne, nous avons rajouté quatre crues historiques (1658, 1740, 1784 et 1846), à partir de repères de crue à Venette et Compiègne, et du recensement de crues sur l'Oise par Champion (1862).

Les cotes de crue ont été converties en débit avec la courbe HYDRA pour l'ensemble des crues. L'analyse BaRatin des courbes de tarage montre une forte incertitude sur la relation hauteur-débit sur la période 1658-1880 ($\pm 37\%$) et la période 1881-2010 ($\pm 20\%$). Les débits de crue de la période récente 2011-2021 sont supposés connus à $\pm 10\%$. Par ailleurs des incohérences subsistent sur le référencement altimétrique du zéro de l'échelle, du fait d'hypothèses contradictoires entre le rapport de Gaullier et Goutx (2003) et le site de l'IGN.

L'ajustement d'une loi GEV sur la série du débit maximum annuel depuis 1856, complétée éventuellement des crues historiques depuis 1658 ou 1784, conduit à une estimation de la crue centennale majorée (distribution prédictive) de 643 à $686 \text{ m}^3/\text{s}$ suivant la période considérée. **Nous proposons de retenir la valeur obtenue avec les quatre crues historiques de 1658, 1740, 1784 et 1846 :**

$$Q_{100} (\text{prédictive}) = 686 \text{ m}^3/\text{s}.$$

A noter que cette valeur de $686 \text{ m}^3/\text{s}$ a été dépassée deux fois en trois siècles et demie, par les deux plus fortes crues connues sur le secteur : celle de 1658 ($H = 7.23 \text{ m}$; $Q = 844 \text{ m}^3/\text{s}$) et celle de 1784 ($H = 6.99 \text{ m}$; $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$).

Au final, l'estimation de la crue centennale à partir des informations historiques depuis 1658 se situe entre les valeurs estimées par l'Entente Oise-Aisne ($Q_{100} = 623 \text{ m}^3/\text{s}$) et l'étude Hydratec ($Q_{100} = 770 \text{ m}^3/\text{s}$). Cette estimation repose sur la conversion des cotes de crue en débit d'après la courbe HYDRA. Elle pourrait être affinée, en modifiant la configuration du modèle hydraulique HYDRA, sous réserve de disposer d'informations sur la topographie du lit mineur et du lit majeur de l'Oise au XIX^e siècle, voire avant.

7. Bibliographie

- Cunnane C. (1978)** Unbiased plotting position — a review. *J. Hydrol.*, 37 (1978), 205-222, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(78\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(78)90017-3)
- Hirsch R.M. (1987)** Probability plotting position formulas for flood records with historical information, *Journal of Hydrology*, 96, 185-199, [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(87\)90152-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(87)90152-1)
- Kendall M.G. (1975)** *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, 202 p.
- Lang M, Coeur D., 2014.** *Les inondations remarquables en France. Inventaire 2011 pour la directive Inondation*, Ed. Quae, 640p.
- Le Coz J., Renard B., Bonnifait L., Branger F., Le Boursicaud R. (2014)** Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573-587, doi: [10.1016/j.jhydrol.2013.11.016](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016)
- Marti R., Lepelletier T. (1999).** L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine. *La Houille Blanche*, 8, 33-39, <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1997074>
- Neppel L. et al. (2010)** Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. *Hydrological Science Journal*, 55 :2, 192-208, <https://doi.org/10.1080/02626660903546092>
- Pettitt A.N. (1979)** A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Stat.* 28 (2), 126–135.
- Prosdocimi I. (2018)** German tanks and historical records: the estimation of the time coverage of ungauged extreme events. *SERRA* 32, 607-622, [10.1007/s00477-017-1418-8](https://doi.org/10.1007/s00477-017-1418-8)
- Puechberty R., Perret C., Poligot Pitsch S., Battaglia P., Belleville A., Bompard P., Chauvel G., Cousseau J., Dramais G., Glaziou G., Hauet A., Héluin S., Lang M., Larrarte F., Le Coz J., Marchand P., Moquet P., Payrastre O., Pierrefeu, G., Rauzy G. (2017).** *Charte qualité de l'hydrométrie. Guide de bonnes pratiques*. Minist. de l'Ecologie, 84p.

8. Annexe : Documents et rapports exploités pour l'expertise

Informations sur les inondations de l'Oise à Compiègne

- **Barrage de Venette** : <https://histoire-compiegne.com/autour-de-compiegne/venette/le-barrage-de-venette/>
- **Base des repères de crues** : www.reperesdecrues.developpement-durable.gouv.fr
Repere#492576, Repere#492578, Repere#786292
- **Cartes de zones inondées** : Atlas des Zones Inondées AZI par la crue de décembre 1933
AZI_1993.shp ; zone inondée par la crue centennale
ZI_crue_centennale_bief_Venette.shp ; PAC - 2014 secteur barrage de Venette.pdf
- **Centre d'annonce des crues de Compiègne (1994)**. *Recueil des crues du sous bassin de l'Oise*, 116p. Venette (p72-79) SNS_recueil_crues_bassin Oise_juin_1994.pdf
- **Champion M. (1862)**. *Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours*. Cemagref Editions, *Index* (p 55, 200, 224), *Tome II* (p 158-174 ; pièce justificative N°108, p IX-XI), gallica.bnf.fr
- **Gaullier M., Goutx D. (2003)**. *Crues historiques de l'Aisne et de l'Oise*, 27 p.
RapportGaullierGoutx2003.doc et fichiers de données : Oise crues.xls ; Oise etude des zeros.xls ; zero des echelles chronologique.xls
- **Girardon Q. (2023)**. *Etude statistique des crues. L'Oise à Venette – 142 ans de suivi*, avril, Entente Oise-Aisne V7.2- Etude statistique des crues à VenetteAvril2023.pdf ; fichiers de données : AnalyseParetoGeneralisee.xlsx ; Cotes_Venette - 1910-2021 JMC.xlsx
- **Hydratec (2014)**. *Hydrologie du bassin versant de l'Oise. Rapport de phase 2 et annexes*. Rapport Entente Oise-Aisne, octobre 2014, 128p + 230 p.
HydratecHydrologie_BV_Oise_phase2_2014.pdf ;
HydratecHydrologie_BV_Oise_phase2_annexes_2014.pdf
- **Lignes d'eau modélisées en crue par le modèle Hydra**. PL_Hydra.xlsx

Cartes et plans anciens

- Cartes anciennes (XVIII^e siècle carte de Cassini, 1820-1866 carte de l'état-major, 1950 scan historique, IGN 2023). <https://remonterletemps.ign.fr/>
- Profil en long de l'Oise (1955).
https://geodesie.ign.fr/fiches/index.php?module=e&action=e_profils&context=accueil
L'Oise (« crépy-en-valois à estrées-st denis et le confluent de l'aisne ») 91070_5.jpg, renommé en PLOise1955.jpg
- Carte donnant la correspondance spatiale entre les systèmes Lallemand et IGN 69.
<https://geodesie.ign.fr/index.php?page=grilles>

Informations sur la station hydrométrique de Venette

- **Données hydrométriques à Venette** : Cotes supérieures à 2.60 m sur la période 1856-1915 ; Cotes supérieures à 4.25 m sur la période 1910-2021 ; courbes de tarage (1992-2022) ; 328 jaugeages (1967-2022) ; fiches de jaugeages (1989-2004) ; profils en travers (1992-2020) ; Dossier station WikiDTG. Cotes_Venette - 1910-2021 JMC.xlsx ; AnalyseParetoGeneralisee.xlsx

RESUME

Cette étude a pour objet de donner un avis externe sur la nouvelle estimation de la crue centennale de l'Oise à Venette, $Q_{100} = 623 \text{ m}^3/\text{s}$, réalisée par l'Entente Oise-Aisne en 2023. Cette valeur est plus faible que celle retenue dans l'étude Hydratec de 2014, avec $Q_{100} = 770 \text{ m}^3/\text{s}$. La valeur de $623 \text{ m}^3/\text{s}$ est basée sur un ajustement statistique (Loi Pareto généralisée) de 81 valeurs de débit supérieures à un seuil de $328 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1910-2021.

Le travail a consisté à conforter l'échantillon disponible, en exploitant les cotes de crue disponibles depuis 1856 et la mention de quatre crues historiques, en 1658, 1740, 1784 et 1846. L'incertitude sur la reconstitution des débits de crue est estimée respectivement à $\pm 37\%$, $\pm 20\%$ et $\pm 10\%$ sur les périodes 1658-1880, 1881-2010 et 2011-2021. Un ajustement d'une loi GEV sur un échantillon mixte composé des valeurs maximales annuelles de la période 1856-2021 et de quatre crues historiques (1658, 1740, 1784 et 1846) conduit à une valeur de crue centennale de $686 \text{ m}^3/\text{s}$. Elle est basée sur un recul chronologique de trois siècles et demie, avec la prise en compte des erreurs d'estimation. Les résultats obtenus sont tributaires de la conversion hauteur-débit et pourraient être affinés, sous réserve de disposer d'informations sur la topographie du lit mineur et du lit majeur de l'Oise au XIX^e siècle, voire avant.



ETUDE STATISTIQUE DES CRUES L'OISE A VENETTE - 142 ans de suivi

Quentin GIRARDON

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	3
1. Présentation des données et méthode d'analyse statistique	3
1.1. Données utilisées	3
1.3. Présentation de l'analyse statistique	6
1.4. Distribution des valeurs extrêmes : dépassement d'un seuil	6
2. Traitement des données et vérification des hypothèses sur l'échantillon	8
2.1. Création de l'échantillon d'étude.....	8
2.2. Vérification des hypothèses de l'échantillon	9
2.3. Analyse fréquentielle des crues de Venette.....	9
3. Détermination de la distribution et incertitudes	11
3.1. Estimation des paramètres de la distribution – choix de la méthode	11
3.2. Tests sur la distribution	13
3.3. Calcul des incertitudes	13
3.4. Résultats en débit et correspondance en cote	15
3.4.1 Résultats sur les débits.....	15
3.4.2 Résultats sur les hauteurs	16
CONCLUSION	Erreur ! Signet non défini.
Bibliographie.....	16

INTRODUCTION

Les études statistiques sur le bassin Oise Aisne s'appuient sur des méthodes réputées de traduction de pluie en débit. Ces outils s'appliquent sur les têtes de bassin. Plus en aval, les crues statistiques sont propagées par des modèles calés sur des crues réelles. En pratique, les crues statistiques sont construites par homothétie d'un même épisode global sur l'ensemble du bassin.

Sur les petits bassins, les crues se propagent depuis un instant similaire (la pluie tombe sur le petit bassin de façon homogène). C'est le cas par exemple des bassins de l'Oise amont et du Ton dont les sources sont assez proches. Pour les grands bassins (Oise Aisne pour le cas qui nous occupe), les ondes de crues peuvent démarrer à des instants différents du fait de l'orientation des perturbations (parfois est-ouest, parfois nord-sud etc.). Au vu de la grande distance entre les sources de l'Oise et de l'Aisne, la statistique à la confluence Oise Aisne dépend non seulement de l'ampleur de chaque crue, mais de leur déphasage éventuel.

Dès lors, la question du déphasage à appliquer sur la crue centennale, littéralement de probabilité 1/100 en tout point du bassin, ne peut se résoudre à la propagation des différentes crues en tête de bassin depuis un instant identique. A Venette, où nous disposons de 142 ans de mesures fiables au barrage (l'échelle limnimétrique la plus ancienne recensée à Venette date de 1881), il nous apparaît utile de procéder à une analyse statistique pour estimer un débit centennal issu de ces observations, inscrit dans un intervalle de confiance. Il conviendra ensuite d'ajuster le démarrage des différentes crues centennales aux têtes de bassin de l'Oise d'une part, de l'Aisne d'autre part, pour retrouver un débit convenablement situé dans l'intervalle de confiance à la confluence.

1. Présentation des données et méthode d'analyse statistique

1.1. Données utilisées

Le suivi du niveau d'eau de l'Oise au barrage de Venette offre un reflet de l'histoire des crues. Les données utilisées dans cette étude remontent jusqu'à 1881, soit 142 ans de mesures des hauteurs d'eau jusqu'en 2022 dans une configuration de l'Oise assez stable. A cette date, le Canal latéral à l'Oise est finalisé depuis cinquante ans (en 1831¹), et depuis les conditions d'écoulement à l'amont du barrage de Venette n'ont pas été significativement impactées (certaines mises au gabarit d'écluses ont eu lieu sans entraîner d'importantes modifications des écoulements). Plusieurs fois l'échelle limnimétrique de Venette a été déplacée depuis son dernier recensement connu en 1877. Ces déplacements ont eu pour conséquence de modifier le zéro de l'échelle. Un travail important a été réalisé par Martine GAULLIER et David GOUX en 2003 afin de ramener à une même référence les cotes de crues observées à Venette².

La longueur de cette série de mesures permet de réaliser une analyse statistique et d'évaluer, moyennant une incertitude encadrée, les débits et niveaux probables.

Les mesures utilisées se décomposent en deux séries de mesure :

- La première est composée de pics de crues recensés entre 1881-1915 et supérieurs à 2,60 m ;
- La seconde est composée de pics de crues recensés entre 1910-2021 et supérieurs à 4,25 m

¹ D'après le site Wikipédia, lien URL https://fr.wikipedia.org/wiki/Canal_lat%C3%A9ral_%C3%A0_l'Oise, consulté le 26/04/2022

² D'après S.N.S Compiègne Crues Historiques de l'Aisne et de l'Oise, Note technique de Martine Gaullier et David Goux, février 2003

Sur l'Hydroportail, les mesures à Venette ne sont disponibles qu'à partir de 1987, il n'a pas pu être possible de compléter la seconde série de données afin de prendre également les pics de crues supérieurs à 2,60 m. Sur l'ensemble des données utilisées, le maximum mesuré à cette station est celui de la crue de février 1995, avec 6,50 m.

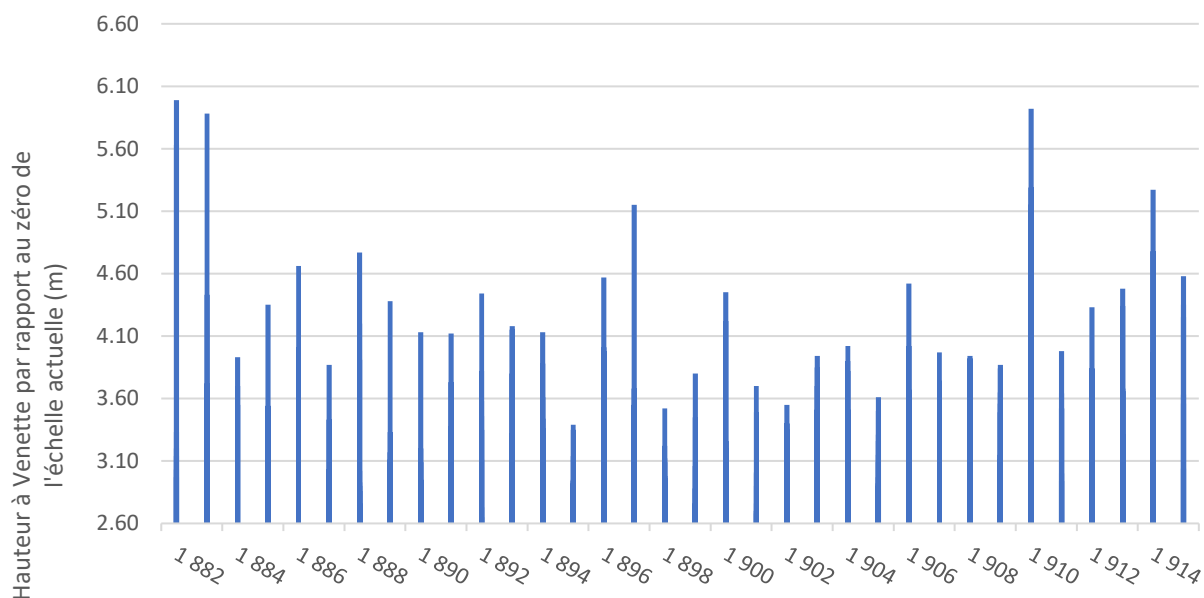


Figure 1 : Chronique des hauteurs de pics de crues supérieures à $S = 2,60$ m à la station de Venette entre 1881 et 1919 (échelle non chronologique)

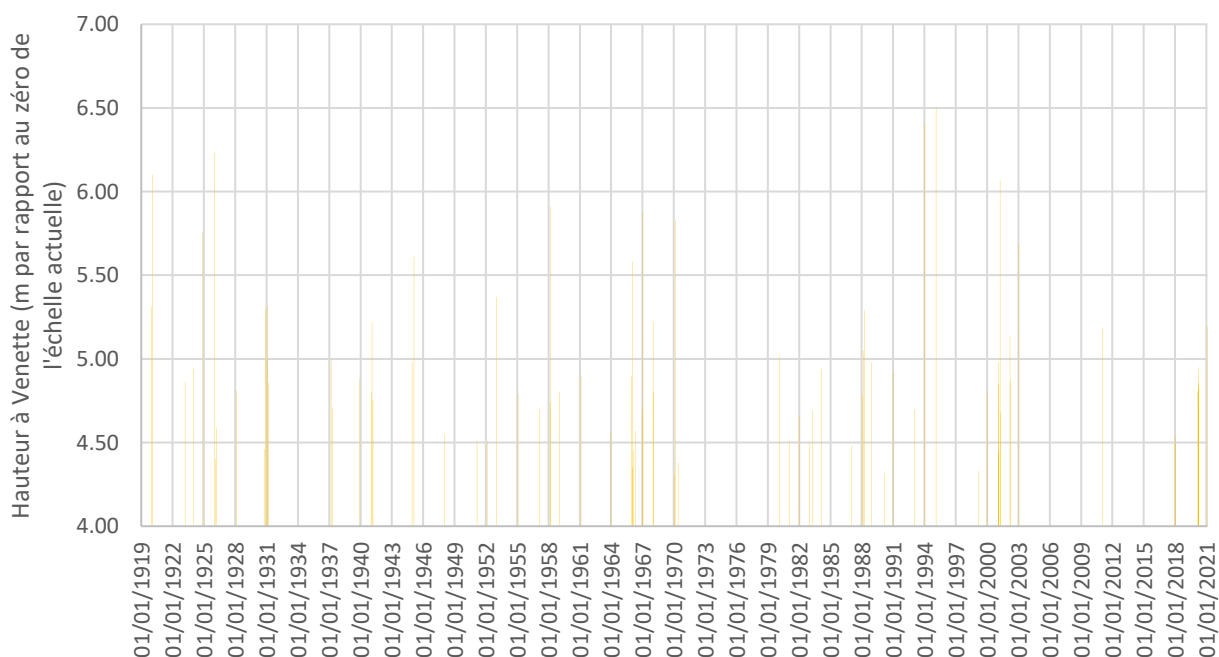


Figure 2 : Chronique des hauteurs de pics de crues supérieures à $S = 4,25$ m à la station de Venette depuis 1919

Pour réaliser une étude statistique, il convient de travailler sur les débits, directement liés à la pluie (les cotes dépendant du profil en travers, sans lien statistique). Ne disposant pas de courbe de tarage à la station de Venette, nous avons utilisé le modèle Hydra disponible à l'Entente Oise Aisne pour la réaliser.

Pour étalonner la qualité de la restitution des débits par notre modèle, nous avons comparé quelques couples hauteur-débit à la station de Creil où l'on dispose de plusieurs mesures de débit. Cette vérification conduit à des résultats satisfaisants sur l'adéquation de la courbe de tarage créée avec les mesures réalisées. La réalisation de la courbe de tarage à partir du modèle est donc licite à la station de Venette.

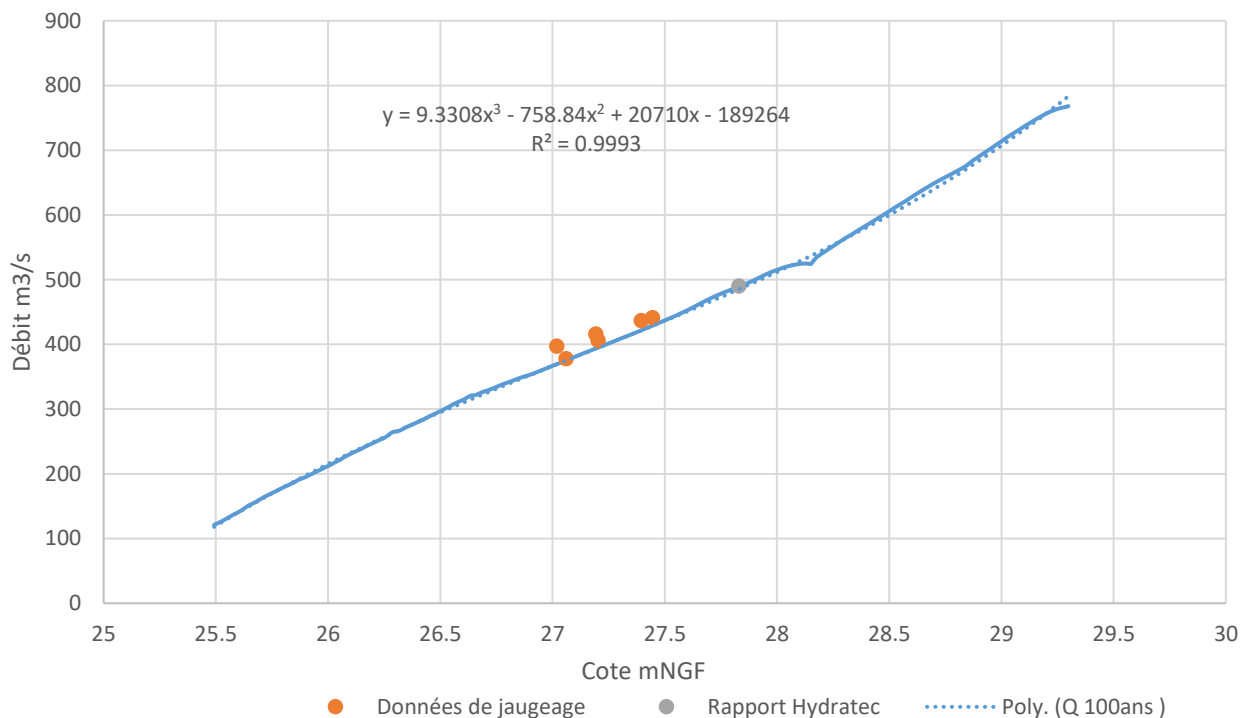


Figure 3 : Comparaison courbe de tarage et mesures à l'aval du barrage de Creil

La courbe de tarage calculée pour la station de Venette est la suivante.

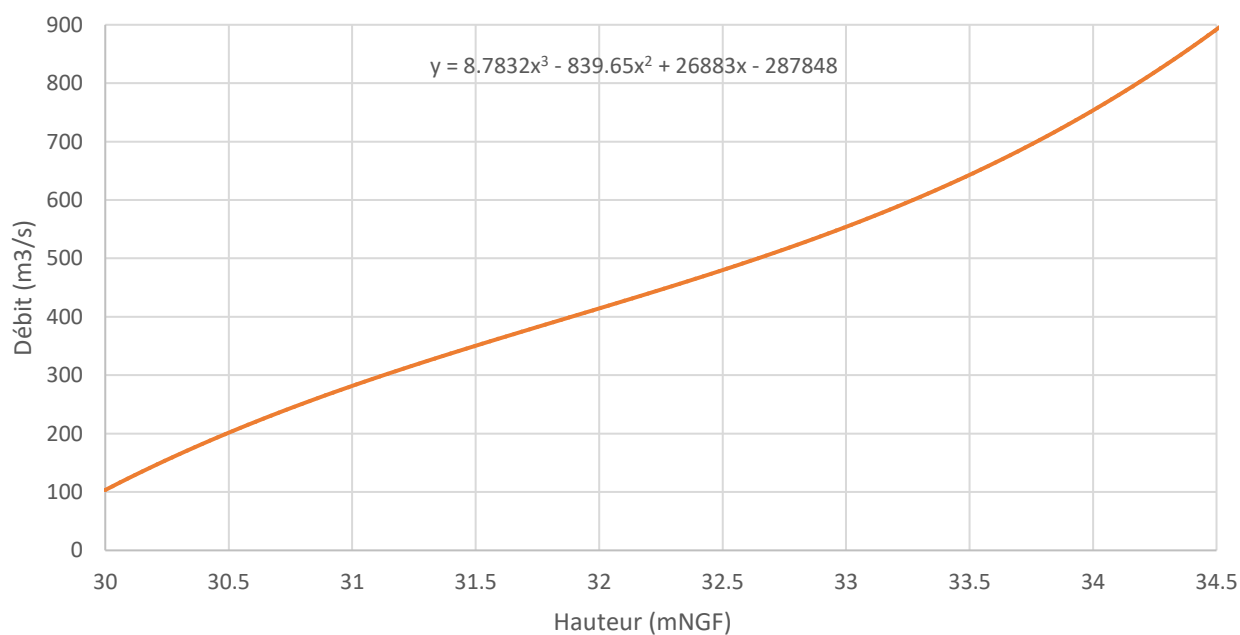


Figure 4 : Courbe de tarage à la station de Venette obtenue avec le logiciel Hydra

1.3. Présentation de l'analyse statistique

L'analyse statistique est une méthode permettant de déterminer une structure issue d'un ensemble de données au moyen d'outils statistiques. Ceux-ci permettent par exemple l'extrapolation des crues extrêmes à partir d'un échantillon fini. Plusieurs méthodes existent dont les conditions d'application diffèrent en fonction de l'échantillon étudié, des attendus de l'études ...

L'analyse statistique telle que menée dans cette note fait appel à une méthode d'échantillonnage appelée SUPSEUIL. Le calage de deux lois de distribution ont ensuite été testées pour déterminer la structure la plus probable de la série de données retenue : la loi de distribution de Pareto Généralisée (GPD) et la loi exponentielle.

1.4. Distribution des valeurs extrêmes : dépassement d'un seuil

Méthode d'échantillonnage :

En hydrologie, deux méthodes d'échantillonnage sont principalement utilisées, il s'agit de la méthode des Maximas Annuels (**MAXAN**) et la méthode par valeurs supérieures à un seuil (**SUPSEUIL**). L'historique qui a pu être récupéré ne comprenant que les niveaux supérieures à des seuils, l'étude s'est naturellement dirigée vers la méthode d'échantillonnage **SUPSEUIL**.

Celle-ci consiste à fixer une valeur seuil sur l'ensemble de l'échantillon et ne retenir que les crues supérieures à ce seuil. Cela implique qu'il peut exister des années sans crues retenues, correspondant à des années peu actives, et des années où plusieurs crues sont conservées. L'avantage est ainsi de conserver tous les événements d'intérêt et de supprimer ceux qui reviendraient trop régulièrement. Il reste cependant une contrainte en termes d'indépendance des crues. Il s'agit en effet de ne pas échantillonner le même événement plusieurs fois en conservant des pics qui constitueraient la même crue.

Lois de distribution :

Il peut être réalisé une analyse empirique de l'échantillon comme cela sera réalisé dans la partie 2.2. Celle-ci ne vise qu'à réaliser une première approche de l'échantillon. Elle permet de réaliser une première estimation des temps de retour moyen et des débits attendus. Elle dépend néanmoins de la méthode utilisée et du tirage des crues qui a été observé. Il existe cependant une grande variabilité possible de l'échantillon qui impacte donc également les résultats que l'on tire de son analyse empirique. Pour éviter ce biais on travaille dans le domaine des variables aléatoires dont on considère que l'échantillon obtenu n'est qu'un tirage. Il est ainsi possible d'introduire la notion d'incertitudes.

Il s'agit dès lors de déterminer la structure de la variable aléatoire derrière l'échantillon au travers de lois de distribution. Celles-ci sont des structures usuelles que l'on retrouve pour les événements rare. Deux seront testées dans le cadre de cette étude car étant des distributions naturelles dans le cadre de l'utilisation de la méthode d'échantillonnage SUPSEUIL : la **loi exponentielle** et la **loi de distribution de Pareto Généralisée (GPD)** .

Loi de distribution de Pareto Généralisée

La description de la loi GPD passe par 3 paramètres que sont :

- Le seuil x_0
- Le paramètre d'échelle λ (correspondant également au GRADEX)
- Le paramètre de forme ξ

Loi de distribution exponentielle

Cette distribution correspond à un cas particulier de la loi GPD pour lequel le paramètre de forme vaut 0. Elle possède ainsi moins de paramètres de calage que la loi GPD.

Méthode des moments

L'estimation des paramètres des lois de distribution se base sur l'échantillon retenu. Il existe plusieurs méthodes d'estimation, les deux principales étant la **méthode du maximum de vraisemblance** et la **méthode des moments**, la seconde étant celle retenue pour cette étude. Elle consiste à déterminer les paramètres des lois de distribution de sorte à ce que les moments empiriques (moyenne, variance ...) soient égaux aux moments des distributions. Pour cela on utilise des formulaires permettant le calcul des paramètres.

2. Traitement des données et vérification des hypothèses sur l'échantillon

2.1. Création de l'échantillon d'étude

La donnée récupérée permet d'avoir une vue des crues les plus importantes ayant été mesurées à la station de Venette depuis 1881. Cette donnée ne regroupe que les niveaux supérieurs à deux seuils dont l'origine de ce choix n'a pu être retrouvée. Ainsi, la première partie de la donnée 1881-1914 regroupe les crues supérieures à 2,60 m à l'échelle de Venette, et la seconde partie, des crues supérieures à 4,25 m. Pour une même année plusieurs pics de crues peuvent être retenus, certaines à moins de 15 jours d'intervalle, et d'autres années ne voient aucune crue dépasser ces seuils.

Deux choix ont été posés pour retravailler l'échantillon.

- Afin d'obtenir un échantillon uniformisé nous avons choisi de ne retenir **que les crues supérieures à 4,25 m**, ce qui permet également de ne s'intéresser qu'aux crues réellement importantes sur le secteur et supprimer celles d'occurrence trop importante.
- Afin de ne pas augmenter artificiellement la représentation d'une crue en considérant ses pics successifs, nous avons fait le choix de placer une durée minimum entre deux pics retenus visant à conserver une indépendance entre les crues. **La durée a été fixée à un mois**. Il reste toutefois admissible que l'historique de pluie sur le territoire intervient fortement dans la genèse d'une crue. Si un événement de pluie fort ayant conduit à une crue importante a eu lieu, il est plus probable que les événements pluvieux suivant conduisent également à des crues.

Il en ressort l'échantillon suivant :

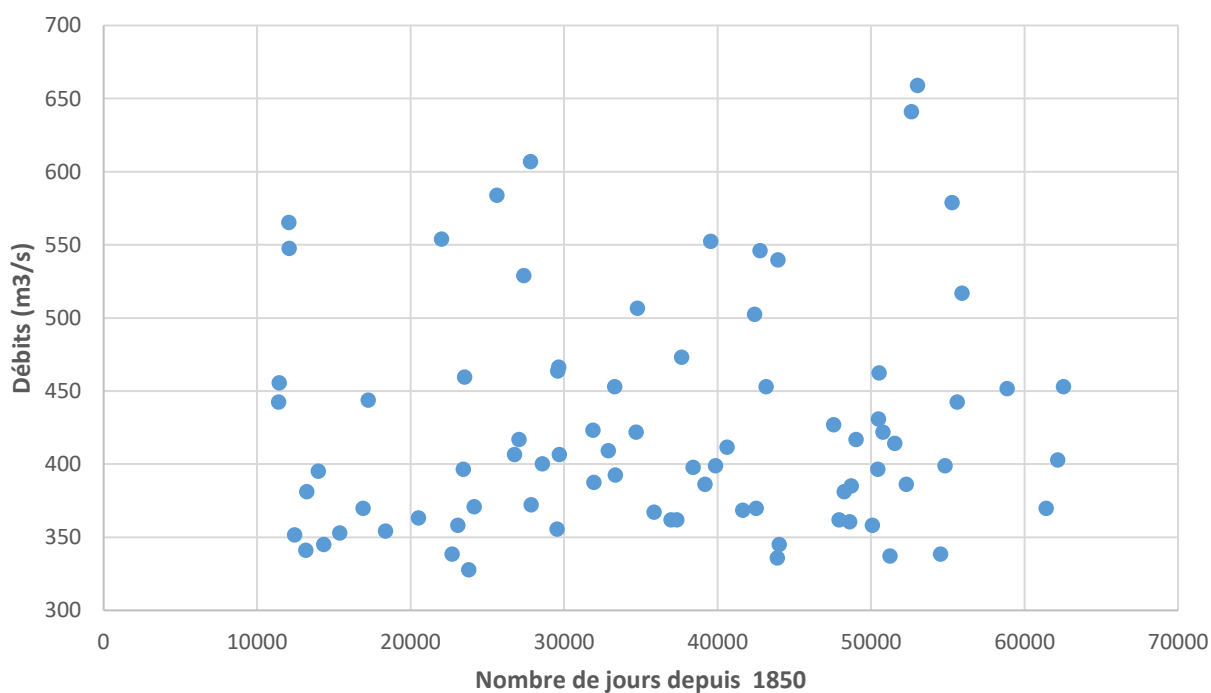


Figure 5 : Echantillon des débits à Venette depuis 1881 conservé pour l'analyse statistique

2.2. Vérification des hypothèses de l'échantillon

Pour s'assurer de la bonne constitution de l'échantillon, on fait appel à des tests statistiques permettant de vérifier au moyen la vraisemblance d'une hypothèse sur la nature d'un échantillon. Dans cette démarche nous avons voulu tester les hypothèses suivantes :

- L'échantillon est stationnaire, i.e. il n'y a pas de rupture significative sur la durée d'observation. Le test associé dans l'étude est le test de **Pettitt**.
- L'échantillon comprend des crues indépendantes entre elles. Le test associé dans l'étude est le test de **Mann-Kendall**.
- L'échantillon est homogène sur sa durée d'observation, testé avec le test de **Student**.

L'analyse de ses tests renvoie la conclusion suivante :

L'indépendance des données est validée dans un intervalle à 75% à partir du test de Mann-Kendall. La stationnarité du test de Pettitt indique qu'il existe un risque de rupture (faible mais probable) à partir de la 1931. Le test de l'homogénéité a alors été réalisé sur deux sous échantillons séparés à la date de 1931. Le test de Student indique alors que l'échantillon est homogène malgré le risque de rupture indiqué par le test de Pettitt. Il est à préciser que le test de Pettitt n'est pas puissant, il ne permet pas d'être sûr de la présence d'une rupture.

L'échantillon est considéré correct pour l'analyse statistique développée par la suite.

2.3. Analyse fréquentielle des crues de Venette

Une première approche de la rareté des crues peut se faire au moyen d'une analyse fréquentielle des débits observés, en calculant la fréquence au non-dépassement d'une crue. Dans la littérature on retrouve plusieurs formules de calculs de la fréquence de non-dépassement d'un échantillon, chacune faisant intervenir un ensemble d'hypothèses préalables à leur utilisation. Nous avons choisi d'appliquer la formule de Hazen, décrite ci-dessous, qui représente comme l'explique Benjamin Renard³, une formule « au milieu » des considérations naturelles de la fréquence de dépassement.

Une fois l'échantillon classé par ordre croissant, nous pouvons calculé la fréquence de non-dépassement par rapport à son rang, par la formule de Hazen :

$$F_m = \frac{m-0.5}{n} \quad (1)$$

F_m : fréquence de non-dépassement de la $m^{\text{ième}}$ valeur de l'échantillon ;

m : le rang qu'occupe la valeur, i.e. son classement parmi les valeurs de crues ;

n : le nombre d'observations ;

La fréquence d'un événement étant une notion plutôt mathématique, nous présenterons les résultats en tant que période de retour expérimentale, qui correspond au temps de retour moyen expérimental de la crue considérée. La formule permettant cette conversion est présentée ci-dessous où T_m est la période de retour de la crue de rang m , et F_m sa fréquence de non-dépassement

$$T_m = \frac{1}{1-F_m} \quad (2)$$

³ *Probabilités et Statistiques appliquée à l'Hydrologie (version du 07/03/2022), par Benjamin Renard de l'INRAE.*

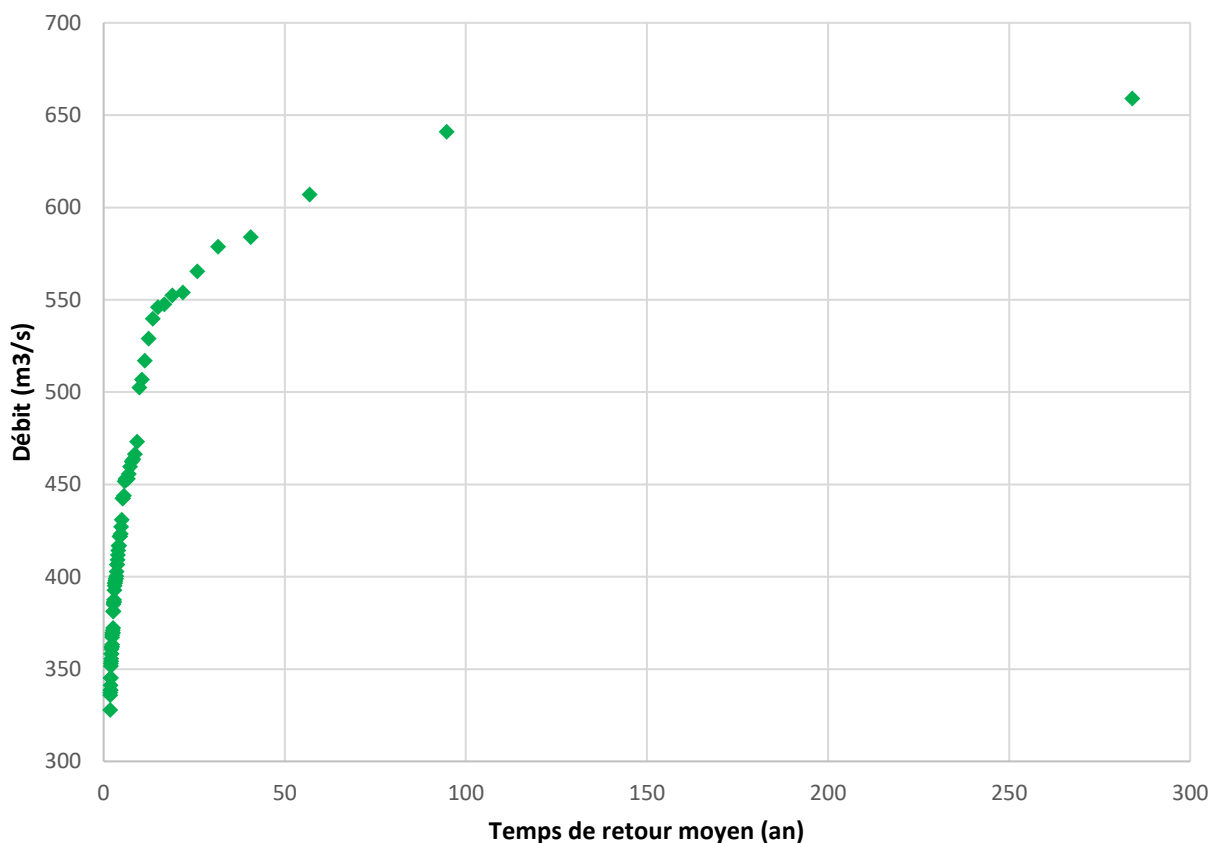


Figure 6 : Temps de retour moyens expérimentaux avec l'estimation de Hazen

L'analyse fréquentielle permet une première approche des temps de retour moyen des crues, mais présente également plusieurs inconvénients :

- L'analyse est dépendante par nature de l'échantillon observé, ce dernier n'étant qu'un tirage d'une variable aléatoire dont la distribution est inconnue.
- La fréquence de non-dépassement calculée varie fortement pour les fréquences proches de un en fonction de la formule utilisée.

Cette première approche sera par la suite utilisée afin de comparer les résultats des distributions et commenter l'adéquation à l'analyse fréquentielle. Cela permettra d'indiquer s'il y a de fortes différences de comportement la non-adéquation d'une loi de distribution.

3. Détermination de la distribution et incertitudes

3.1. Estimation des paramètres de la distribution – choix de la méthode

Sur l'échantillon de l'étude nous avons :

Nombre de crues retenues	81
Nombre d'années	142
Seuil (m³/s)	328
Moyenne (m³/s)	426
Ecart type	76,8
Variance	5902,8
μ (rapport nombre de crues / nombre d'années)	0,5704225

Les formules utilisées pour déterminer les moments des lois de distributions de Pareto Généralisée et Exponentielle sont disponibles dans le cours de M. Benjamin Renard⁴. Nous obtenons alors les valeurs suivantes pour les paramètres des lois :

Pareto Généralisée		Exponentielle	
λ	128,317	λ	98
ξ	0,311	x₀ (Seuil)	328
x₀ (Seuil)	328		
Moments associés			
Moyenne	425,7	Moyenne	426
Ecart type	76,8	Ecart type	97,9

On constate que la méthode des moments permet à la loi de Pareto Généralisée d'être en adéquation avec les moments empiriques. La distribution exponentielle voir son moment d'ordre 1 cohérent avec le moment empirique, ce qui n'est pas le cas pour l'ordre 2. En possédant un paramètre de moins que la loi GPD, la loi exponentielle n'est pas aussi « souple » et ne permet qu'un calage sur le moment d'ordre 1.

Il est à constater une différence importante de comportement entre les deux distributions. Du fait d'un paramètre de forme positif, la loi GPD est majorée par une limite de 700 m³/s. D'après cette loi, les crues seraient ainsi limitées dans leur amplitude ce qui n'est pas le cas avec la distribution exponentielle. Ce comportement est courant pour les grands bassins versants. Il reste toutefois possible que le débit majorant puisse être plus important, cela sera affiné l'observation future des crues.

⁴ Probabilités et Statistiques appliquée à l'Hydrologie (version du 07/03/2022), par Benjamin Renard de l'INRAE.

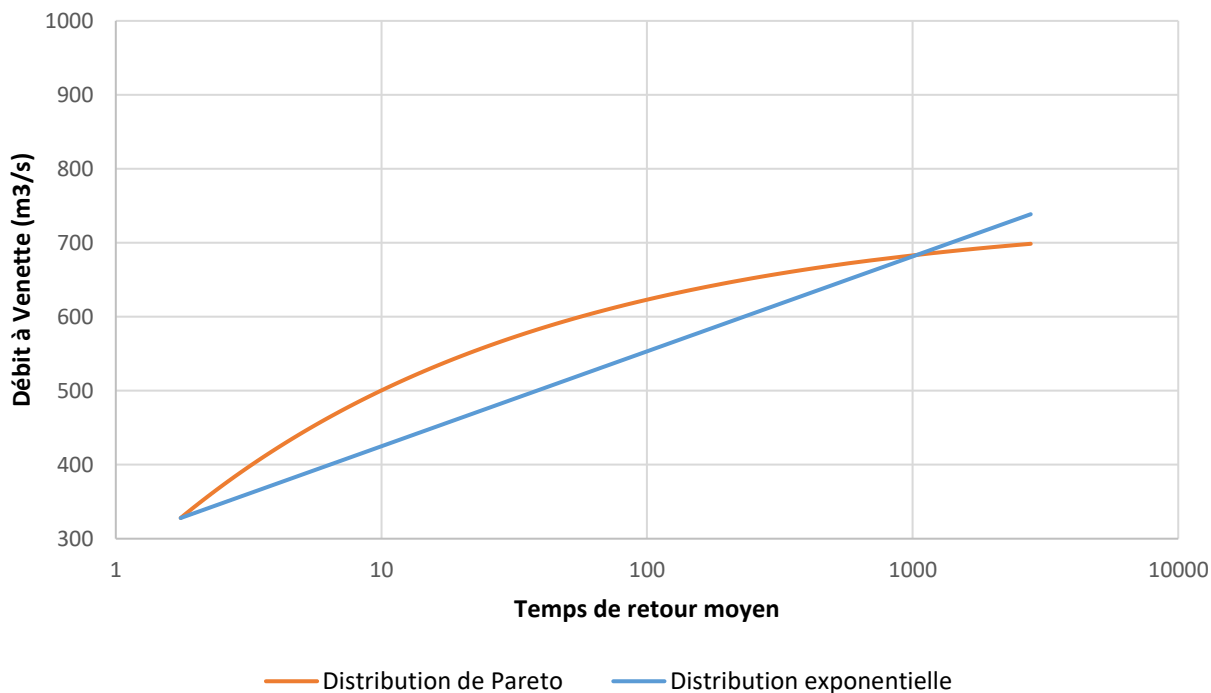


Figure 7 : Temps de retour moyen des distributions étudiées (échelle des abscisses logarithmique)

Une autre représentation des distributions sur laquelle on rajoute également les données de l'échantillon, permet de comparer la statistique et l'analyse fréquentielle.

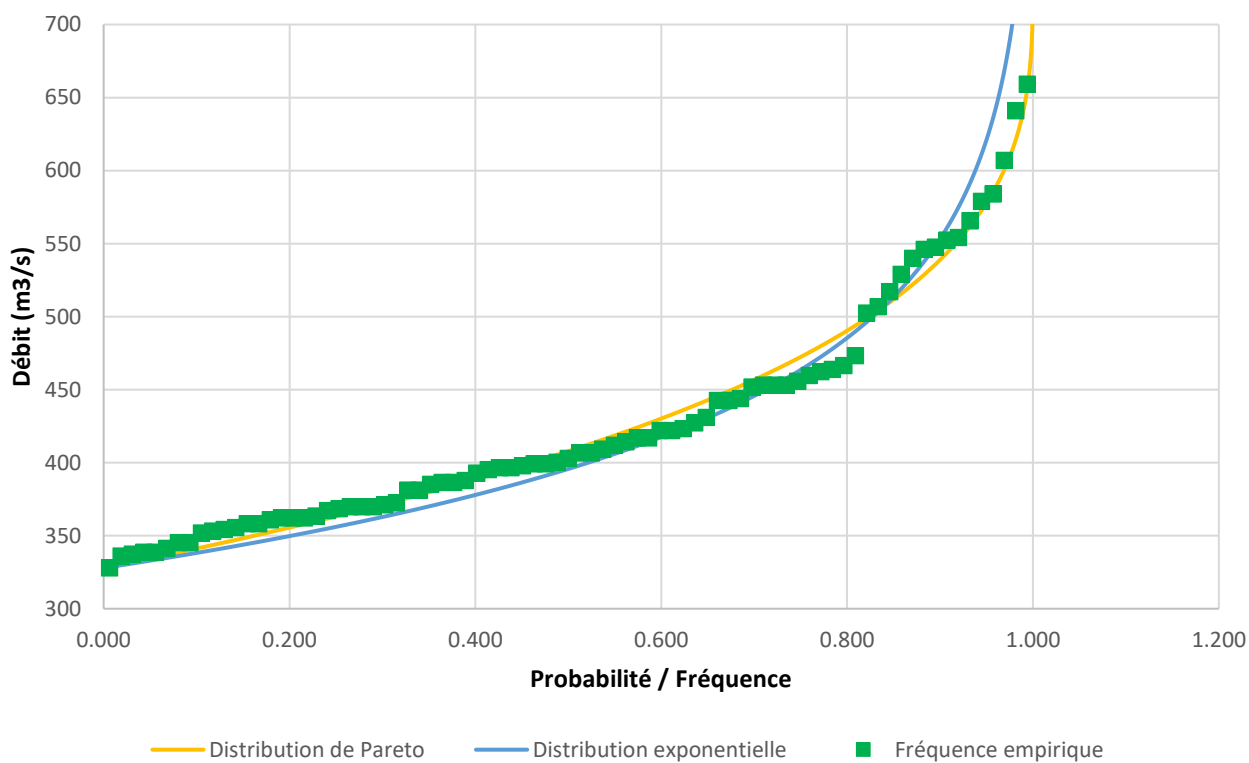


Figure 8 : Comparaison des fonctions de répartition des distributions testées et de la fréquence cumulée expérimentale

3.2. Tests sur la distribution

De la même façon que pour l'échantillon, un retour sur les lois de distributions calées est nécessaire. Il existe pour cela de nombreux tests permettant de vérifier des hypothèses différentes. Dans le cadre de cette étude nous avons cherché à vérifier l'adéquation des données avec une loi de distribution connue. Autrement dit, l'échantillon est issu de la distribution dont nous souhaitons faire le test. Deux tests ont été utilisés, il s'agit du **test de Kolmogorov-Smirnov** et du **test du Khi²**.

Il en ressort pour les deux tests et pour les deux distributions une validation. L'échantillon est donc compatible avec les deux distributions testées.

3.3. Calcul des incertitudes

Comme mentionné précédemment, l'échantillon des crues observées ne représente pas l'entièreté des possibles, il s'agit d'un tirage d'une variable aléatoire. Un autre tirage aurait pu conduire à une distribution en partie différente. Le calcul des intervalles de confiance est donc primordial pour accorder du crédit à une analyse statistique et doit toujours lui être associée.

Nous avons choisi de mettre en place pour le calcul des incertitudes, la méthode de rééchantillonnage appelée Bootstrap. Pour définir celle-ci, M. Benjamin Renard indique dans son cours⁵ « *L'idée derrière ces méthodes de rééchantillonnage est la suivante : si l'on pouvait disposer de plusieurs échantillons, il nous serait possible d'estimer les caractéristiques de la distribution d'échantillonnage. Comme on ne dispose en pratique que d'un unique échantillon, de nouveaux échantillons synthétiques sont créés par tirage au sort avec remise dans les valeurs observées. [...] La simplicité des méthodes de rééchantillonnage tient au fait qu'elles ne font plus appel au cadre probabiliste pour approcher la distribution d'échantillonnage (même si la théorie probabiliste est nécessaire pour démontrer que la technique fonctionne...). Les méthodes de rééchantillonnage ont gagné en popularité ces dernières années du fait de leur simplicité et de la puissance accrue des moyens informatiques.* ».

Cette méthode a été appliquée sur la distribution de Pareto Généralisée. Une soixantaine de tirages ont été réalisés à partir de la loi de distribution avec les paramètres définis dans la partie 3.1. Un intervalle de confiance a ensuite été déduit des répliques Bootstrap. L'intervalle de confiance à 90% est présenté sur le graphe plus bas.

Concernant la distribution exponentielle, il existe dans la littérature⁶ une formule permettant d'estimer l'intervalle de confiance à 90%. Celle-ci est indiquée ci-dessous :

$$Var(q_p) \sim \frac{S_x^2}{N} [1 + 2z(p) + 2z^2(p)] \quad (3)$$

Où $z(p) = \log(1 - p)$

Avec p la probabilité du quantile, S_x l'écart type et N le nombre de crues considérées.

⁵ Probabilités et Statistiques appliquée à l'Hydrologie (version du 07/03/2022), par Benjamin Renard de l'INRAE.

⁶ Probabilités et Statistiques appliquée à l'Hydrologie (version du 07/03/2022), par Benjamin Renard de l'INRAE.

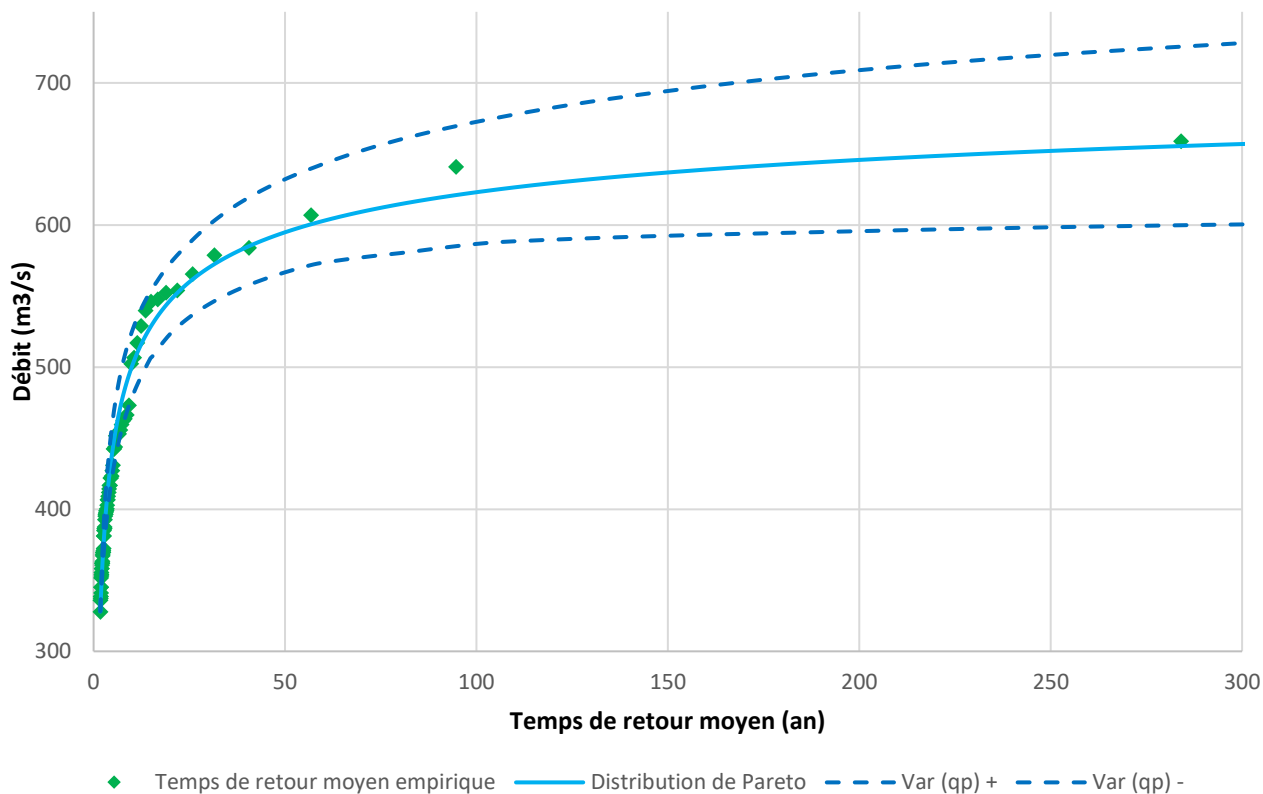


Figure 9 : Distribution de Pareto Généralisée et incertitude associée

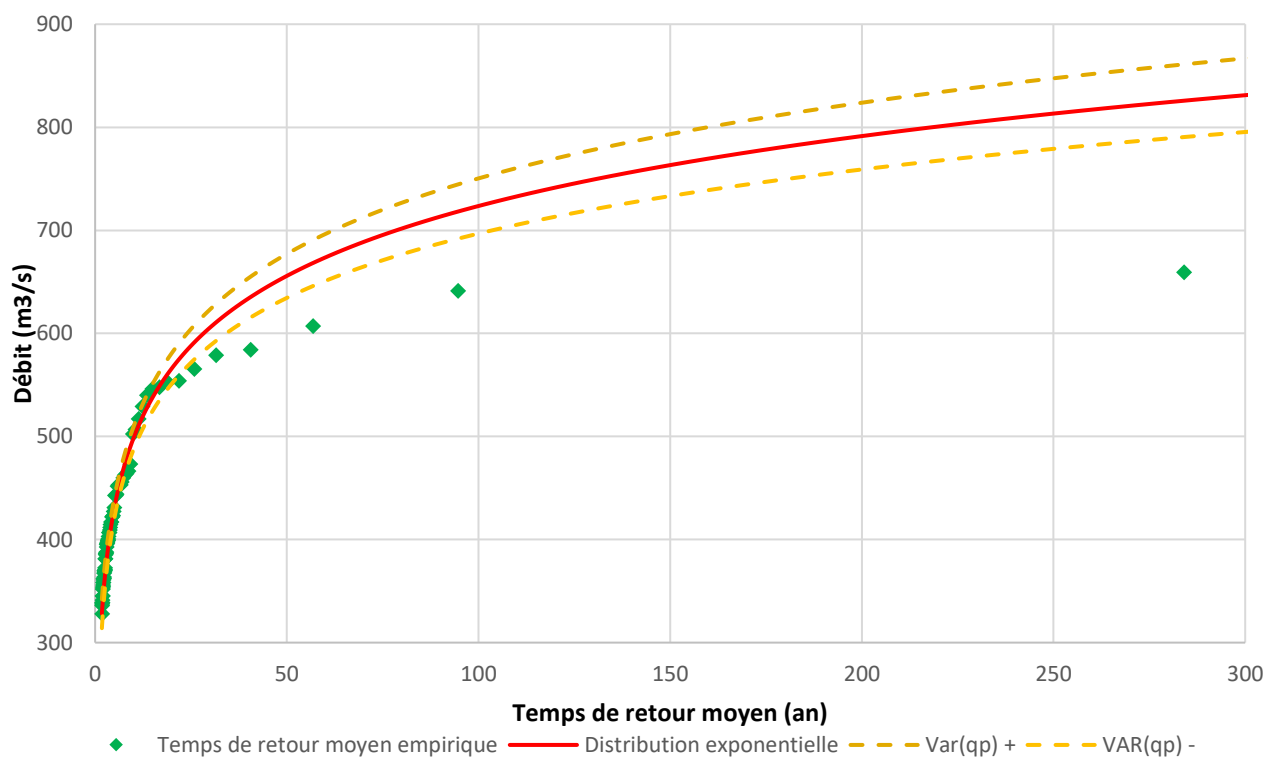


Figure 10 : Distribution Exponentielle et incertitude associée

Les graphes ci-dessus ont été présentés avec en abscisse les périodes de retour moyennes. On observe une meilleure adéquation visuelle de la distribution Pareto Généralisée avec les temps de retour moyen empiriques que la loi exponentielle. En l'état actuelle des observations on peut estimer que la distribution de Pareto Généralisée permet une meilleure retranscription de ce qui a été observé. Il semble cohérent de proposer que cette distribution soit la plus à même à l'heure actuelle à représenter la statistique des crues à Venette.

3.4. Résultats en débit et correspondance en cote

De la distribution de Pareto Généralisée, nous obtenons les résultats suivants :

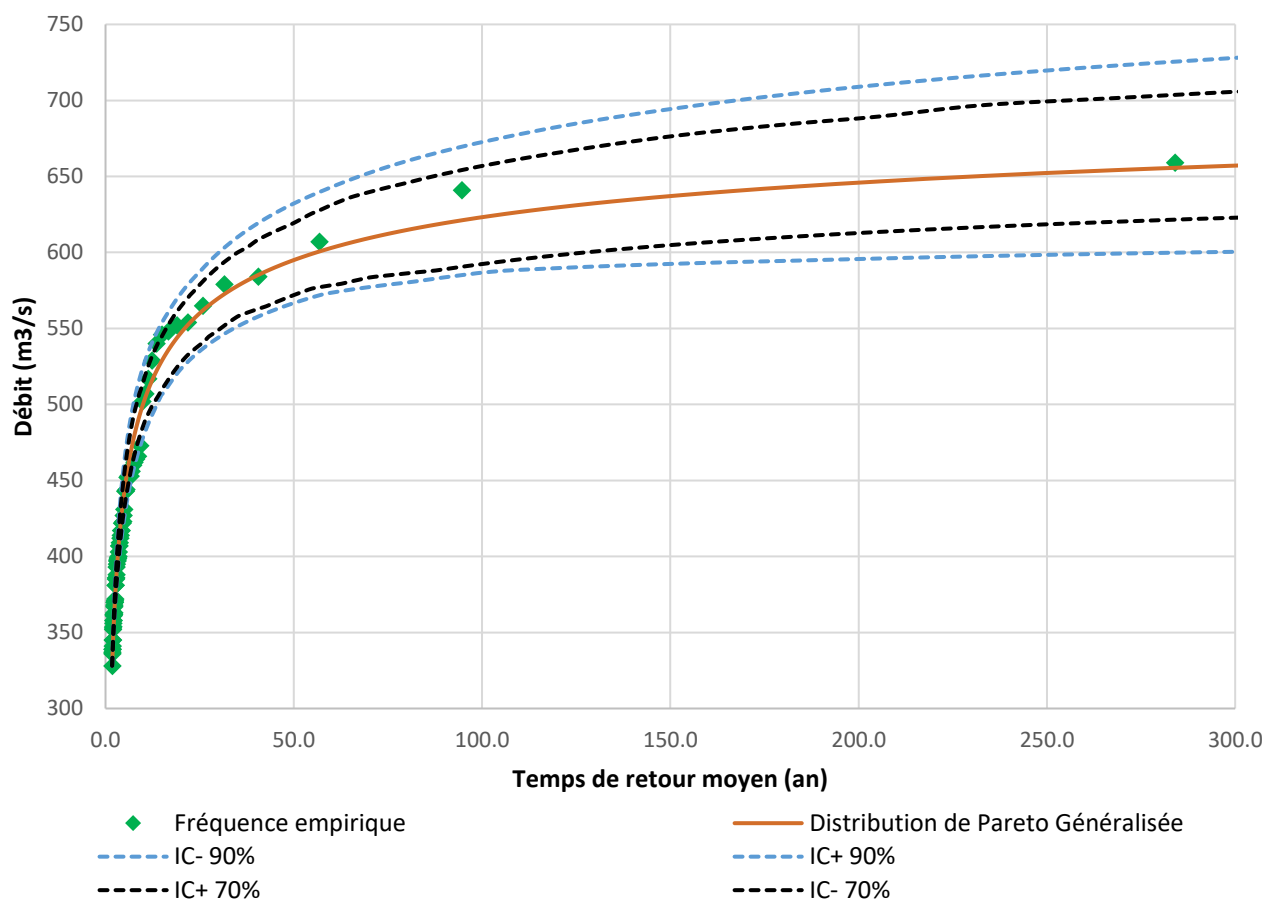


Figure 11 : Loi de distribution retenue pour l'analyse statistique des crues à Venette et incertitudes à 90% et 70%

3.4.1 Résultats sur les débits

Temps de retour (an)	Débit central	IC+ 90%	IC- 90%	IC+ 70%	IC- 70%
5	443	463	426	455	432
10	501	525	479	515	486
20	547	573	523	564	527
30	570	600	544	591	549
50	595	632	567	619	572
100	623	673	587	657	592

3.4.2 Résultats sur les hauteurs

L'historique des observations ayant été réalisée en hauteur, nous avons cherché également à présenter les résultats en mètre afin de pouvoir comparer aux crues historiques. Pour cela nous avons utilisé la relation de tarage présentée en partie 1.1.

Temps de retour (an)	Débit central	IC+ 90%	IC- 90%	IC+ 70%	IC- 70%
5	5,11	5,27	4,98	5,21	5,03
10	5,54	5,7	5,38	5,64	5,43
20	5,85	6,01	5,69	5,95	5,72
30	5,99	6,16	5,83	6,11	5,86
50	6,14	6,34	5,97	6,27	6
100	6,29	6,54	6,09	6,46	6,12

Bibliographie

CRUE : Un modèle d'estimation des probabilités des débits de crue (1993), J. Miquel du Laboratoire national d'hydraulique Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, publié sur le site de la Houille Blanche en novembre 2009 au lien <https://doi.org/10.1051/lhb/1983008>

Hydrologie Statistique, Chapitre 4 : Statistiques appliquées à l'hydrologie, de Rachid ABABOU, disponible au lien suivant <https://studylibfr.com/doc/4410802/39-chapitre-4---statistiques-appliqu%C3%A9es-%C3%A0-l-hydrologie-pl...>, consulté le 09/12/2021

Probabilités et Statistiques appliquée à l'Hydrologie (version du 07/03/2022), par Benjamin Renard de l'INRAE.