



**HAL**  
open science

## Evaluation des incertitudes et de l'homogénéité de longues séries de débits de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018)

Michel Lang, Matteo Darienzo, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard

### ► To cite this version:

Michel Lang, Matteo Darienzo, Jérôme Le Coz, Benjamin Renard. Evaluation des incertitudes et de l'homogénéité de longues séries de débits de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018). LHB Hydroscience Journal, inPress, 10.1080/27678490.2022.2053313 . hal-03673906

**HAL Id: hal-03673906**

**<https://hal.science/hal-03673906>**

Submitted on 20 May 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Evaluation des incertitudes et de l'homogénéité de longues séries de débits de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018)

Michel Lang, Matteo Darienzo, Jérôme Le Coz & Benjamin Renard

To cite this article: Michel Lang, Matteo Darienzo, Jérôme Le Coz & Benjamin Renard (2022): Evaluation des incertitudes et de l'homogénéité de longues séries de débits de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018), LHB, DOI: [10.1080/27678490.2022.2053313](https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2053313)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2053313>



© 2022 The Author(s). Published by Informa UK Limited, trading as Taylor & Francis Group.



Published online: 17 May 2022.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)

## Evaluation des incertitudes et de l'homogénéité de longues séries de débits de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018)

Michel Lang <sup>a</sup>, Matteo Darienzo <sup>a,b</sup>, Jérôme Le Coz <sup>a</sup> and Benjamin Renard <sup>a</sup>

<sup>a</sup>INRAE, Unité de recherche RIVERLY, Centre de Lyon-Villeurbanne, Villeurbanne cedex, France ; <sup>b</sup>CIMA Research Foundations, Savona, Italy

### RESUME

Un diagnostic sur la sécurité aux inondations des digues du Rhin en aval de Strasbourg a été réalisé par INRAE de 2018 à 2020, pour le compte de la DREAL Grand-Est, avec des échanges au sein de la Commission Permanente internationale pour l'aménagement du Rhin supérieur. Un travail spécifique d'analyse des incertitudes est présenté à l'aide du modèle BaRatin sur la reconstitution des débits de crue des séries de Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018). La largeur de l'intervalle d'incertitude à 95% varie à Bâle de  $\pm 7\%$  sur la période récente (1994–2017) à  $\pm 48\%$  sur la période la plus ancienne (1225–1713), et à Maxau de  $\pm 5\%$  sur la période récente (1977–2018) à  $\pm 45\%$  sur la période la plus ancienne (1815–1839). L'application de tests statistiques fait apparaître des hétérogénéités pour les deux séries de crues, qui proviennent pour partie des aménagements hydrauliques sur le Rhin au cours des deux derniers siècles. Les séries corrigées de ces effets sont de meilleure qualité, avec toutefois une rupture vers 1966–1976 à Bâle et Maxau, qui pourrait provenir d'un changement constaté en Europe centrale en termes de régime de circulation climatique depuis les années 1970.

### ABSTRACT

A diagnosis on the safety of dikes from floods along the River Rhine downstream of Strasbourg was carried out by INRAE, on behalf of the DREAL Grand-Est, with exchanges within the International Permanent Commission for the Development of the Upper Rhine. Two long series in Basel (1225–2017) and Maxau (1815–2018) have been reviewed, with an analysis of discharge uncertainties using the BaRatin model. The width of the 95% uncertainty interval of the flood discharges varies in Basel from  $\pm 7\%$  over the recent period (1994–2017) to  $\pm 48\%$  over the oldest period (1225–1713), and in Maxau from  $\pm 5\%$  (1977–2018) to  $\pm 45\%$  (1815–1839). Statistical tests on the flood samples reveal a heterogeneity of the two series, which stems in part from hydraulic developments to the Rhine over the past two centuries. The series corrected for these effects are of better quality. However, there is still a step-change around 1966–1976 in Basel and Maxau, which cannot be explained by metrological problems (rating curve) or by hydraulic engineering on the Rhine or in the catchment area. It could be due to a change in the climate circulation regime in Central Europe since the 1970s.

### MOTS CLEFS

Crues ; Rhin ; incertitudes ; données historiques

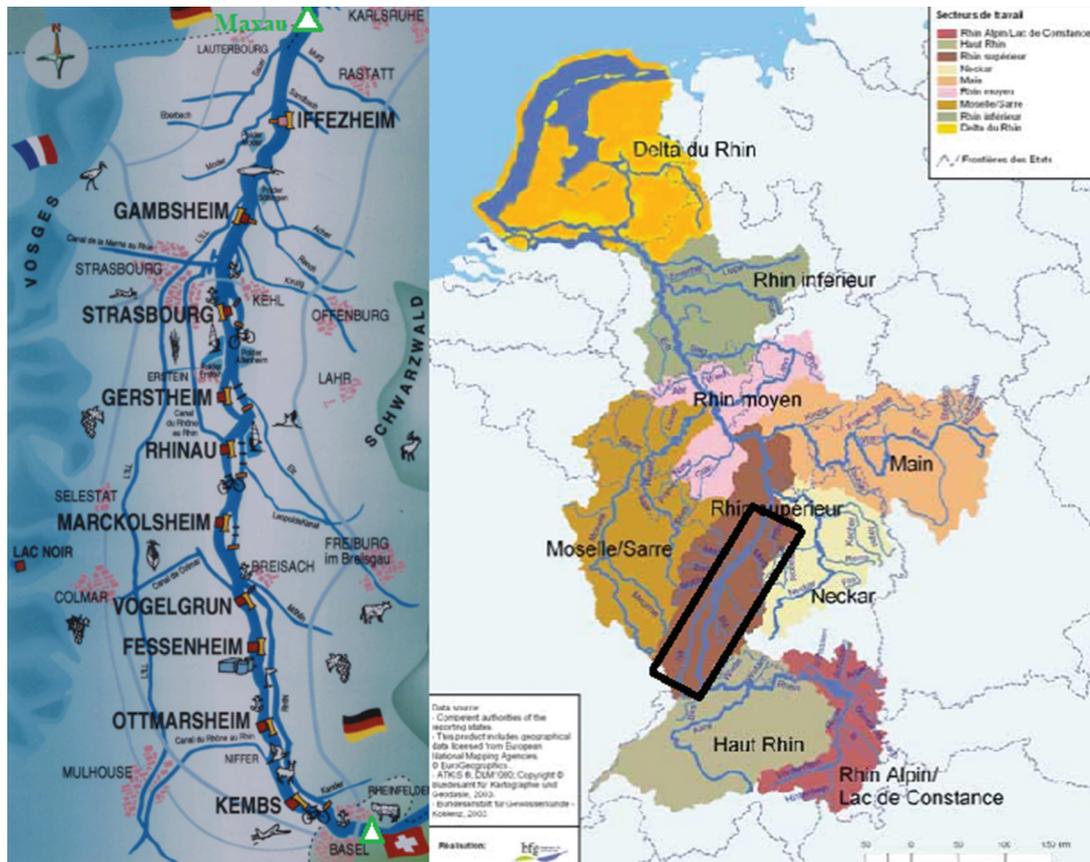
### KEYWORDS

Flood; Rhine; Uncertainty; Historical data

## 1. Introduction

Le niveau de protection contre les inondations du Rhin supérieur (Figure 1), entre Kehl-Strasbourg et Neuburgweier-Lauterbourg, est régi par la convention franco-allemande du 4 juillet 1969 sur l'aménagement du Rhin. Une série de revanches sont à respecter entre le niveau de la crête de digue et la ligne d'eau atteinte pour différents débits de référence exprimés en  $m^3/s$ . Les calculs par modélisation hydraulique réalisés par le Service de Navigation allemand, et validés en 2010 par la Commission Permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur, montrent que les digues du Rhin à l'aval de Strasbourg ne respectent pas ces revanches contractuelles pour les biefs de Gamsheim et Iffezheim, en particulier sur le secteur amont du bief d'Iffezheim. Par ailleurs, les français et les allemands souhaitent avoir une appréciation sur la correspondance entre débit de référence et période de retour, pour pouvoir comparer

avec les règles usuelles de dimensionnement des crêtes de digues. La crue millénale (resp. décennale) de l'étude de l'université allemande (IWG, 2010) validée par la Commission Permanente de mai 2010 correspond à une crue centennale (resp. millénale) dans certaines études françaises. A cet effet, une expertise sur la caractérisation des débits extrêmes du Rhin a été réalisée par INRAE de 2018 à 2020, pour le compte de la DREAL Grand-Est, avec des échanges au sein de la Commission Permanente internationale pour l'aménagement du Rhin supérieur. Un avis a été formulé (Lang, 2020) sur l'estimation des crues de référence du Rhin ( $Q_{10}$  à  $Q_{1500}$ ), sur la partie aval du cours franco-allemand (biefs de Gamsheim et Iffezheim), à partir du traitement de deux longues séries hydrométriques du Rhin à Bâle (1808–2017) et Maxau (1815–2018).



**Figure 1.** Vue en plan du Rhin supérieur, secteur Kembs-Iffezheim (source : CIPR, 2021 ; EDF, 2010), et position des stations hydrométriques de Bâle et Maxau.

Dans cet article, nous présentons les données disponibles en termes de jaugeages et d'évolution morphologique du lit du Rhin (Section 2), qui vont être exploitées pour une analyse des incertitudes de reconstitution des débits de crue à l'aide du modèle BaRatin (Section 3). Une série de tests statistiques est appliquée pour contrôler l'homogénéité des séries (Section 4), dont une procédure exploitant les incertitudes sur les débits de crue. Nous concluons (Section 5) sur les niveaux d'incertitudes estimés à Bâle et Maxau et la qualité des longues séries reconstituées sur plusieurs siècles.

## 2. Longues séries de Bâle et Maxau

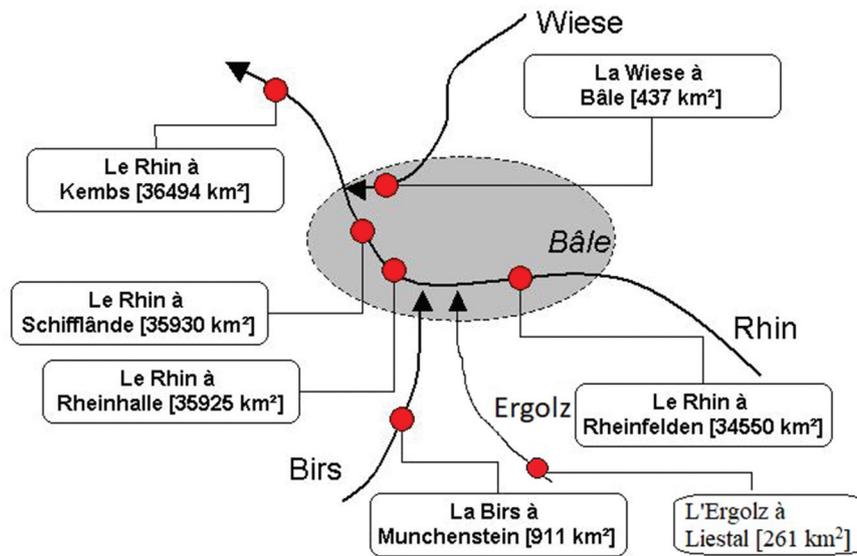
### 2.1. Données disponibles à Bâle (Suisse)

Plusieurs emplacements ont été retenus au cours du temps pour mesurer les hauteurs d'eau et estimer les débits du Rhin à Bâle (Figure 2, avec la superficie du bassin contrôlé par chaque station). La station hydrométrique de Bâle/Schiffpländle a été implantée en 1808 et a été la station de référence jusque 1933, date de mise en service du barrage de Kembs qui depuis influence la relation hauteur-débit. La période 1934–1993 est assez difficile à suivre, aucun jaugeage ni courbe de tarage n'ayant pu être récupérés. Le débit sur cette période a été estimé à partir de la station de Bâle/Rheinfelden

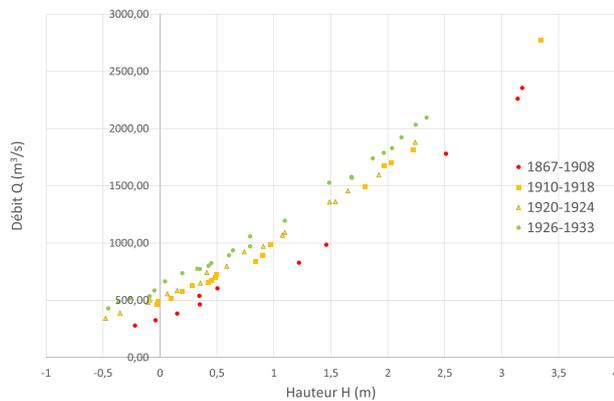
plus en amont, et d'une estimation des apports de l'Ergolz et de la Birs. A partir de 1994 jusqu'à aujourd'hui, la station hydrométrique de référence est celle de Bâle/Rheinhalle. On dispose de 53 jaugeages sur la période 1867–1933 (Figure 3) et de 88 jaugeages sur la période 1994–2017. Le croisement de différentes sources d'information communiquées par les services hydrométriques suisses (OFEV) et allemands (WSV ; BWSK, 1926 ; CECR, 1972 et fichiers numériques) permet de reconstituer une série continue de valeurs maximales annuelles de débits de crue de 1808 à 2017.

Le dossier hydrométrique de la station (OFEV) contient une série de 5 profils en travers anciens (en 1914, 1916, 1918, 1922 et 1930) de la section du lit mineur du Rhin, qui montrent une certaine stabilité de la section sur la période 1914–1922 et un enfoncement du lit sur le levé de 1930 sur une partie de la section. Un document allemand (BWSK, 1930) représente le profil en long du Rhin de Bâle à Mannheim (annexe 9 : tronçon d'environ 250 km) pour différentes dates : 1830, 1852, 1895, 1902, 1926.

On peut noter sur le Tableau 1 que la pente du Rhin à Bâle est restée stable (autour de  $10^{-3}$ , avec une légère augmentation continue de 0.8 à  $1.1 \cdot 10^{-3}$ ), mais que le lit s'est incisé. Par ailleurs, un recensement des plus fortes crues de la période 1225–1807 a été réalisé par Wetter et al. (2011), à partir des niveaux atteints dans la vieille ville et d'un modèle hydraulique. On dispose



**Figure 2.** Plan de situation des stations hydrométriques dans le secteur de Bâle (repris d'un schéma EDF et des informations fournies par l'OFEV, gestionnaire de la station).



**Figure 3.** Jaugeages sur le Rhin à Bâle/ Schiffländle 1867–1933 (au flotteur de 1867 à 1908, au moulinet en surface de 1910 à 1933).

**Tableau 1.** Evolution de la pente et de l'altitude du fond du lit mineur du Rhin à Bâle (période 1830–1926). Zéro échelle  $Z = 243.90$  m.

Année	1830	1852	1895	1902	1926
Pente du Rhin	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$0.8 \cdot 10^{-3}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-3}$
Fonds du lit (m)	244.5	244.5	244	244	243

ainsi d'une collection de 38 crues avant la mise en service de la station hydrométrique : 27 crues avec  $Q > 4911 \text{ m}^3/\text{s}$  sur la période 1268–1713 ; et 11 crues avec  $Q > 4322 \text{ m}^3/\text{s}$  sur la période 1714–1807.

## 2.2. Données disponibles à Maxau (Allemagne)

Les informations ont été fournies par le gestionnaire de la station, le WSV (Voies Navigables du Rhin supérieur). Les premiers relevés systématiques de hauteur d'eau à Maxau (Zéro échelle  $Z = 97.79$  m ; Superficie  $50,343 \text{ km}^2$ ) ont été réalisés à partir de 1815. D'après le dossier de la station (WSV, 1975), la

fréquence des relevés a varié entre 1815 et 1881 (de 1 à 3 fois par jour suivant les périodes). Elle est passée à 3 fois par jour (5, 13 et 21 h) à partir de 1881. Les hautes eaux ont été relevées de façon plus fréquente, de façon à ne pas rater la pointe de crue. Le premier limnigraphe est implanté en 1888, mais suite à des problèmes métrologiques, les premiers enregistrements en continu et validés des hauteurs ne commencent qu'en 1897. Du fait de la seconde guerre mondiale, les mesures ont été interrompues à plusieurs reprises de mai 1942 à novembre 1943, et la station de mesure a été détruite en novembre 1943. Un nouveau limnigraphe a été installé fin février 1946.

Les débits de crue sont disponibles en continu depuis 1821, à partir de 22 courbes de tarage reconstituées sur la période 1821–1973 (CECR, 1978) et de 15 courbes de tarages établies à l'aide des 850 jaugeages réalisés depuis 1947, dont 42 jaugeages avec un débit de crue supérieur à  $3000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le Rhin a fait l'objet d'importants travaux de rectification au XIX<sup>e</sup> siècle et d'aménagements pour la navigation au XX<sup>e</sup> siècle. A partir du suivi de l'évolution des niveaux du Rhin à Maxau sur la période 1810–1927 (BWSK, 1930) et de leur interprétation (BAW, 2015), nous avons reporté sur la Figure 4 les évolutions du lit du Rhin de 1815 à 1946. On note une incision de plus d'un mètre de 1815 à 1904, suivie d'un exhaussement de 30 à 40 cm de 1905 à 1946.

## 3. Estimation des incertitudes sur les débits de crue

### 3.1. Le modèle BaRatin

Les incertitudes sur les débits de crue à Bâle et Maxau sont estimées à l'aide du modèle BaRatin (Le Coz et al., 2014). Le principe est de croiser, par une approche bayésienne, une expertise sur les contrôles hydrauliques

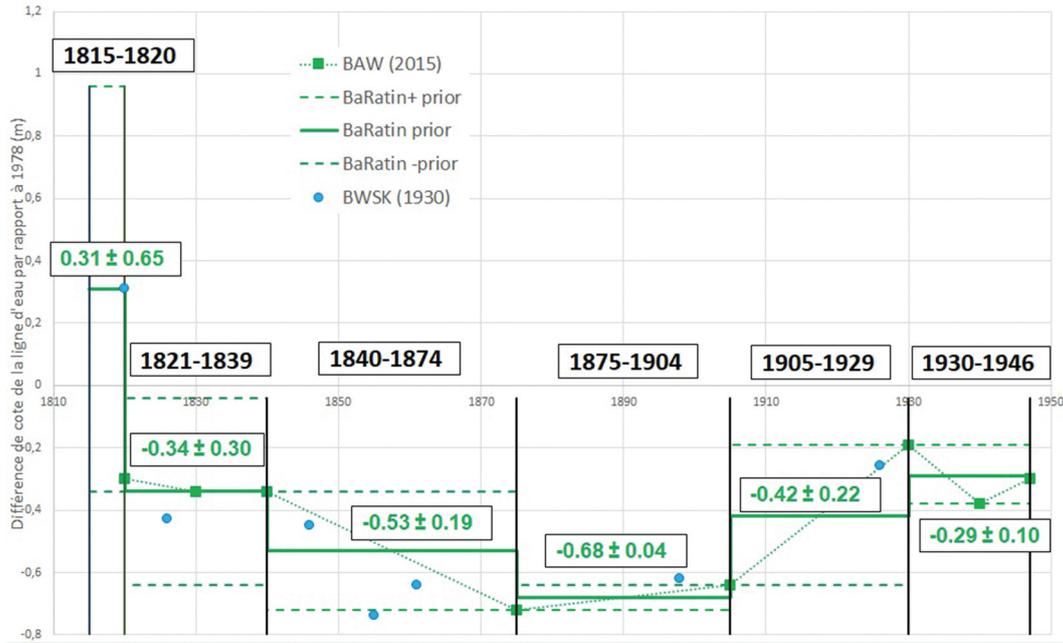


Figure 4. Evolution du fond du lit du Rhin à Maxau de 1815 à 1946 (BAW, 2015 ; BWSK, 1930) et hypothèses retenues pour le calcul d'incertitudes avec le modèle BaRatin.

qui conditionnent la relation hauteur-débit avec les jaugeages disponibles. La méthode produit une estimation de la courbe de tarage et des incertitudes associées (intervalle de confiance à 95% par exemple). La formulation de *a priori* repose sur l'identification des contrôles hydrauliques au droit de la station hydrométrique (chenal, seuil ...) et des paramètres associés (géométrie de la section, pente du lit, coefficient de Strickler). Dans le cas d'un écoulement avec un contrôle par un chenal, d'abord en lit mineur puis en lit majeur, la relation  $Q(H|\theta)$  peut s'exprimer par des lois puissance :

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

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

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 par continuité de la relation  $Q(H)$  en  $H = k_2$ ). L'incertitude sur les débits jaugés est estimée (GDH, 2017, tableau 4.2) d'après le type de jaugeage (exploration complète du champ de vitesses ou seulement de la surface, dilution d'un traqueur) et des modalités de mesure de la vitesse (ADCP, moulinet, radar, caméra).

Pour la période antérieure à l'existence de jaugeages, le modèle BaRatin est appliqué de façon rétroactive, en remontant dans le temps depuis la première courbe de tarage calée à partir de jaugeages. Les informations disponibles sur l'évolution morphologique du lit du Rhin sont exploitées pour définir une série de sous-périodes homogènes, avec pour chacune une hypothèse sur les paramètres hydrauliques.

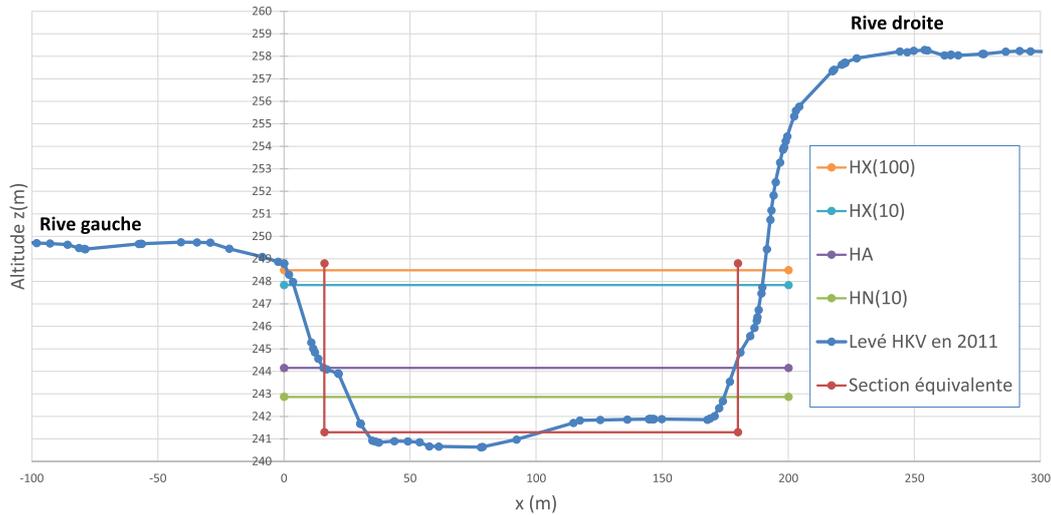
### 3.2. Incertitudes des débits de crue du Rhin à Bâle

#### 3.2.1. Périodes avec jaugeages

*Période récente 1994–2017.* A partir d'un profil en travers levé en 2011 (Figure 5), nous avons déterminé la section rectangulaire équivalente du lit mineur, et retenu une largeur  $B_1 = 165 \pm 20$  m. Nous avons estimé la largeur du lit majeur à  $B_2 = 130 \pm 20$  m, d'après l'extension de la zone inondable dans le centre ancien de Bâle (Wetter et al., 2011). Pour un contrôle hydraulique par un chenal rectangulaire large, avec une formulation dérivée de l'équation de Manning-Strickler :  $Q = BKS^{1/2}H^{5/3}$ , les plages de valeurs retenues sur les paramètres physiques ( $B$  : largeur de la section ;  $K$  : coefficient de Strickler ;  $S$  : pente du lit) sont résumées dans le Tableau 2, avec également les hauteurs d'activation  $k_1$  et  $k_2$ .

Le croisement des hypothèses faites sur ces paramètres avec 57 jaugeages ADCP (hauteur  $H > 5.5$  m ; incertitude de mesure  $\pm 5\%$ ) de la période 1994–2018 donne une courbe de tarage BaRatin *a posteriori* avec une incertitude de l'ordre de  $\pm 4\%$  (Figure 6). Nous avons reporté également les deux courbes de tarage de l'OFEV les plus extrêmes de la période (N°10 de l'année 1995 et N°16 de l'année 2002), ainsi que le débit estimé par l'OFEV pour les deux plus fortes crues de la période : le 09/08/2007 et le 12/05/1999. Si l'on affecte une incertitude de  $\pm 7\%$  aux débits de crue de 2007 et 1999, la borne supérieure correspond à l'estimation BaRatin. **Au final, nous retiendrons cette incertitude de  $\pm 7\%$  pour le débit des crues maximales annuelles de la période 1994–2017.**

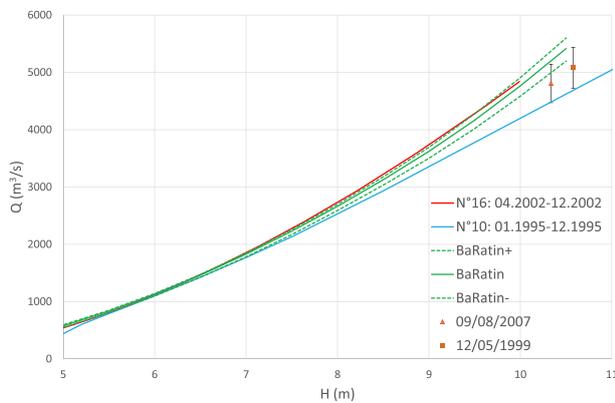
*Période 1867–1933.* Aucun jaugeage n'ayant pu être obtenu sur la période 1934–1993, nous avons poursuivi l'analyse sur la période 1867–1933 (Bâle/Schiffliände), pour



**Figure 5.** Profil en travers du Rhin à Bâle/ Rheinhalle (HKV, 2011) avec une section rectangulaire équivalente, et le report approximatif des hauteurs HX(100), HX(10), HA et HN(10) associées respectivement aux débits de crue de période de retour 100 et 10 ans, au débit moyen annuel, et au débit d'étiage décennal.

**Tableau 2.** Paramètres retenus pour le tracé a priori de la courbe de tarage du Rhin à Bâle/ Rheinhalle (période récente).

	Lit mineur					Lit majeur				
Paramètres physiques	$k_1$ (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)	$S_2$	$c_2$
	$1.3 \pm 0.5$	$35 \pm 5$	$165 \pm 20$	$10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$	$9 \pm 0.5$	$15 \pm 5$	$130 \pm 20$	$10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$
Paramètres de la courbe	$k_1$	$a_1 = K_1 B_1 \sqrt{S_1}$			$c_1$	$k_2$	$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2}$			$c_2$
	idem	$186.6 \pm 57$			idem	idem	$71.1 \pm 31$			idem



**Figure 6.** Courbe de tarage du Rhin à Bâle/ Rheinhalle, période récente 1994–2017 : estimation BaRatin, report des deux courbes de tarage extrêmes et des deux plus forts débits de crue.

laquelle une série de profils en travers (1914–1930) et de profils en long (1830–1926) donnent une idée de la topographie du lit mineur du Rhin. D'après les 70 jaugeages disponibles, nous avons distingué trois sous-périodes : 1867–1909, 1910–1925, 1926–1933. Les incertitudes obtenues avec le modèle BaRatin sont respectivement de  $[-12\% ; +26\%]$ ,  $[-5\% ; +9\%]$  et  $[-7\% ; +10\%]$ . A titre conservatoire, en considérant une augmentation des incertitudes en remontant dans le temps, l'incertitude sur la période 1910–1925 a été prise identique à celle de 1926–1933, à savoir  $[-7\% ; +10\%]$ .

### 3.2.2. Périodes sans jaugeages

**Période 1808–1866.** Aucun jaugeage n'étant disponible, nous reprenons les valeurs *a posteriori* des paramètres hydrauliques de la période 1867–1908 pour les valeurs *a priori* du **lit mineur** de la période 1808–1866, en dégradant l'information de certains paramètres susceptibles d'être affectés par de potentiels détariages (Tableau 3). On notera une différence importante sur les hauteurs d'activation  $k_1$  et  $k_2$  de la période 1867–1909, *prior* et *posterior*, qui reste difficile à interpréter. Les valeurs *a priori* ont été fixées à partir d'informations limitées, issues de profils en long (période 1830–1906), sans relevé de profil en travers. Les valeurs *a posteriori* ont bénéficié de l'information apportée par les 11 jaugeages de la période 1867–1909.

D'après le Tableau 1, nous voyons que le fond du lit a baissé de 0.5 m entre 1852 et 1895 : nous retenons une hauteur d'activation du lit mineur plus haute de 0.5 m sur la période 1808–1866, et augmentons l'incertitude :  $k_1 = -0.9 \pm 0.5$  m. Nous retenons pour le Strickler  $K_1$  une fourchette  $[35 ; 40]$   $m^{1/3}/s$ , pour la largeur  $B_1$  une fourchette  $[165 ; 175]$  m et pour la pente  $S_1$  une fourchette  $[6 \cdot 10^{-4} ; 10^{-3}]$ . Pour le **lit majeur**, en l'absence de meilleure information, nous conservons les valeurs *a priori* de la période 1867–1908, sauf pour la pente  $S_2$ , que nous prenons identique à celle du lit mineur.

**Tableau 3.** Paramètres retenus pour la courbe de tarage BaRatin avec incertitudes du Rhin à Bâle/ Rheinhalde : période 1808–1866 et 1225–1807.

Période		Lit mineur					Lit majeur				
		$k_1$ (m)	$K_1$ (m <sup>1/3</sup> /s)	$B_1$ (m)	$S_1$	$C_1$	$k_2$ (m)	$K_2$ (m <sup>1/3</sup> /s)	$B_2$ (m)	$S_2$	$C_2$
1867–1909	prior	$0.5 \pm 0.5$	$35 \pm 5$	$173 \pm 20$	$10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$	$9 \pm 0.5$	$15 \pm 5$	$130 \pm 20$	$10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$
	posterior	$-1.4 \pm 0.1$	$38.5 \pm 1$	$a_1 = 185.2 \pm 18.1$ $170 \pm 2$	$8 \cdot 10^{-4} \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.66 \pm 0.02$	$5 \pm 0.3$	$17 \pm 3$	$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2} = 61.7 \pm 13.8$ $130 \pm 10$	$9 \cdot 10^{-4} \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.02$
1808–1866	prior	$-0.9 \pm 0.5$	$37.5 \pm 2.5$	$170 \pm 5$	$8 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$	$5 \pm 0.5$	$15 \pm 5$	$130 \pm 20$	$8 \cdot 10^{-4} \pm 2 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$
	prior	$-1 \pm 1$	$35 \pm 5$	$a_1 = 180.3 \pm 26.1$ $170 \pm 5$	$8 \cdot 10^{-4} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$	$5 \pm 0.5$	$20 \pm 5$	$a_2 = 55.2 \pm 21.4$ $130 \pm 20$	$8 \cdot 10^{-4} \pm 5 \cdot 10^{-4}$	$1.67 \pm 0.05$
1225–1807				$a_1 = 168.3 \pm 58.0$				$a_2 = 232.6 \pm 68.6$			

Nous avons reporté sur la **Figure 7** la courbe de tarage BaRatin obtenue avec ces valeurs *a priori*, et également trois couples ( $H$ ,  $Q$ ) obtenus par modélisation hydraulique (table 2, de Wetter et al., 2011). Les débits correspondent à la submersion de différents emplacements de référence dans le centre historique de Bâle :

- Quai « *Blumenplatz* » inondé : altitude  $Z = 249.6$  m,  $Q = 4300$  m<sup>3</sup>/s ;
- Début d'inondation de « *Fischmarkt* » : altitude  $Z = 250.1$  m,  $Q = 4900$  m<sup>3</sup>/s ;
- Fortes inondations de « *Fischmarkt* » : altitude  $Z = 251.1$  m,  $Q = 6400$  m<sup>3</sup>/s.

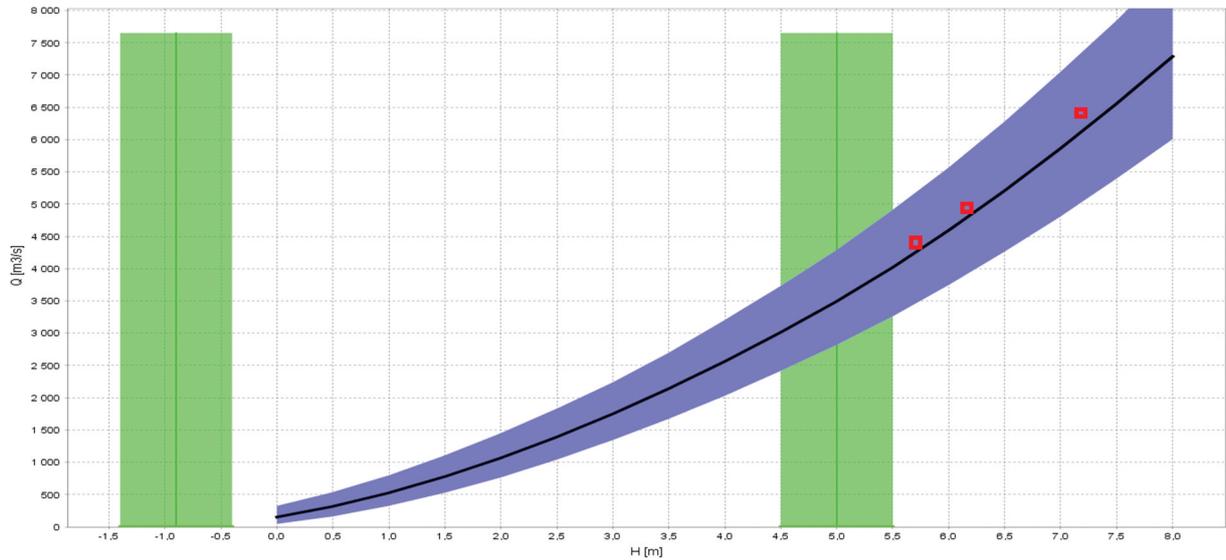
On note une bonne cohérence entre la courbe de tarage Baratin estimée de façon très approximative à partir de valeurs *a priori* des paramètres hydrauliques, et celle obtenue par modélisation hydraulique. Les incertitudes de la courbe de tarage Baratin sont de  $[-18\% ; +22\%]$ . A titre conservatoire, de façon à avoir des incertitudes plus importantes en remontant dans le passé, comme l'intervalle d'incertitude sur la période 1867–1909 était de  $[-12\% ; +26\%]$ , nous retenons une incertitude finale sur les débits de la période 1808–1866 comprise dans l'intervalle  $[-18\% ; +26\%]$ .

**Période 1225–1807.** Wetter et al. (2011) ont recensé 38 crues ayant inondé le centre ancien de Bâle. Nous avons fait une série d'hypothèses sur la valeur des paramètres de la courbe de tarage (**Tableau 3**), en retenant des incertitudes plus fortes (hauteur d'activation du lit mineur  $k_1$ , Strickler  $K_1$  et  $K_2$ , pente  $S_1$  et  $S_2$ ), qui conduisent à une incertitude de  $[-35\% ; +44\%]$ .

**Période intermédiaire 1934–1993.** Cette période, pour laquelle aucun jaugeage ni courbe de tarage n'ont pu être récupérés, est encadrée par deux périodes 1910–1933 et 1994–2017 où les incertitudes sont faibles,  $\pm 9\%$  et  $\pm 7\%$  du fait de l'existence de jaugeages. A titre conservatoire, nous avons retenu une incertitude de  $\pm 20\%$ , voisine de celle des périodes 1808–1866 ( $\pm 22\%$ ) et 1867–1909 ( $\pm 19\%$ ).

### 3.3. Incertitudes des débits de crue du Rhin à Maxau

**Période 1947–2017.** On dispose de la topographie détaillée de la section d'écoulement et d'une série de 850 jaugeages. En l'absence d'information précise sur le mode opératoire de chaque jaugeage, nous avons fait l'hypothèse qu'ils avaient été réalisés au moulinet jusque fin 1999 et à l'ADCP depuis 2000, avec une incertitude de respectivement  $\pm 10\%$  et  $\pm 5\%$  sur les débits. Cette incertitude a été majorée pour les débits de crue (débit supérieur à 3000 m<sup>3</sup>/s, soit  $H > 7.6$  m) d'un facteur multiplicatif égal à 2. Le **Tableau 4** récapitule les incertitudes retenues sur les débits jaugés.



**Figure 7.** Courbe de tarage BaRatin a priori sur le Rhin à Bâle/ Schifflande, période 1808–1866, avec le report de trois couples (H,Q) obtenus par modélisation hydraulique (Wetter et al., 2011).

Une procédure de segmentation (Darienzo et al., 2021) a permis de décomposer cette période 1947–2017 en 11 sous-périodes, au lieu des 37 courbes de tarage officielles (Figure 8).

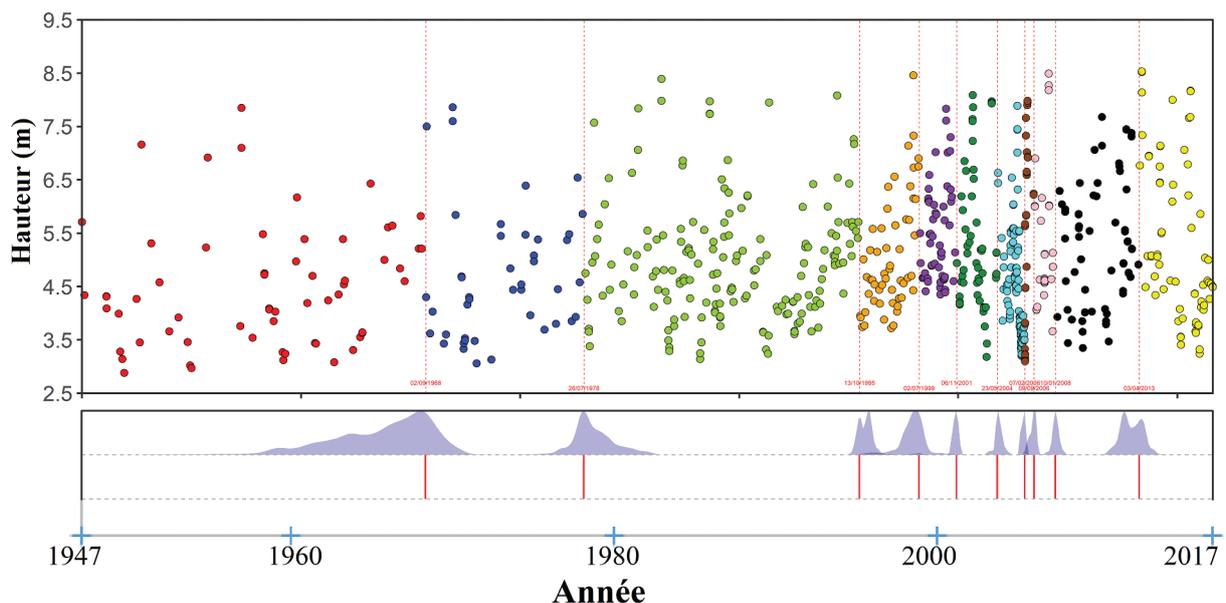
Une variante du modèle BaRatin-SPD (Mansanarez et al., 2019) a été utilisée pour rechercher les paramètres ( $a_i, b_i, c_i$ ) des courbes de tarage des 11 sous-périodes en une seule itération. On obtient une incertitude très faible sur les débits, respectivement de

$[-5\% ; +4\%]$  sur la période 1947–1968, et de  $[-3\% ; +2\%]$  sur la période 1968–2017. Le modèle SPD a donné une estimation du paramètre  $b_1$  du fond du lit mineur pour les 11 sous-périodes. On note un exhaussement d'environ 50 cm de 1947 à 2017 (Figure 9), qui est cohérent avec le suivi morphologique du lit du Rhin (BAW, 2015).

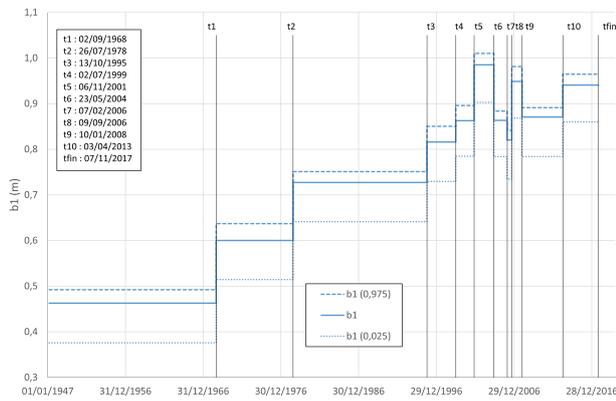
*Période antérieure 1815–1946.* Aucun jaugeage n'est disponible. Nous avons repris les valeurs *a posteriori* de la courbe BaRatin de la période 1947–1968 qui a suivi, en dégradant l'information sur les paramètres  $a_1$  et  $a_2$  de la courbe de tarage (équation 1), et en intégrant les informations disponibles sur l'évolution morphologique du lit du Rhin. Nous avons distingué 6 sous-périodes considérées comme homogènes (Figure 4) : 1815–1820, 1821–1839, 1840–1874, 1875–1904, 1905–

**Tableau 4.** Incertitudes retenues sur les débits jaugés du Rhin à Maxau de 1947 à 2017.

Période	Jaugeage	$Q \leq 3000 \text{ m}^3/\text{s}$	$Q > 3000 \text{ m}^3/\text{s}$
1947–1999	Moulinet	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$
2000–2017	ADCP	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$



**Figure 8.** Segmentation des jaugeages du Rhin à Maxau (période 1947–2017) (le second graphe donne les densités de probabilité des dates de rupture – en bleu, et la date la plus probable – en rouge).



**Figure 9.** Variations du paramètre  $b_1$  (fonds du lit mineur) du Rhin à Maxau, pour les 11 sous-périodes de 1947 à 2017 (valeur estimée et intervalle de confiance à 95%).

1929 et 1930–1946. La courbe de la première période 1815–1820 est obtenue par simple translation de la première courbe officielle en 1821–1827, avec une incision du fond du lit de 0.74 m entre 1820 et 1826 (BWSK, 1930). Les incertitudes obtenues avec la courbe BaRatin pour certaines sous-périodes étant voisines, nous avons retenu une incertitude de  $[-37\% ; +48\%]$  sur la période 1815–1839 et de  $[-27\% ; +37\%]$  sur la période 1840–1946.

A noter (Figure 10) que les courbes BaRatin sont assez nettement inférieures aux courbes de tarage officielles sur la période 1840–1946 ( $-13\%$  à  $-42\%$  pour les hauteurs comprises entre 7 et 8.8 m). Les courbes officielles sont situées juste en-dessous de la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% des courbes BaRatin. Les données officielles de débit de crue restent cohérentes avec celles estimées avec BaRatin, avec prise en compte des incertitudes.

Il est difficile d'aller plus loin dans la comparaison : les courbes BaRatin sont bâties sur une série d'hypothèses sur les paramètres physiques du lit mineur et du lit majeur (hauteur d'activation  $k$ , Strickler  $K$ , largeur  $B$ , pente  $S$ , exposant  $c$  lié au type de contrôle hydraulique), d'informations sur la morphologie passée du Rhin, et en remontant dans le temps depuis la dernière courbe de tarage BaRatin avec jaugeages (1947–1968). Les courbes officielles reconstituées reposent sur une méthodologie d'interpolation des courbes de débits classés à Bâle et Kaubs, situés respectivement 200 km en amont et 150 km en aval de Maxau (CECR, 1978 ; annexe 3.4).

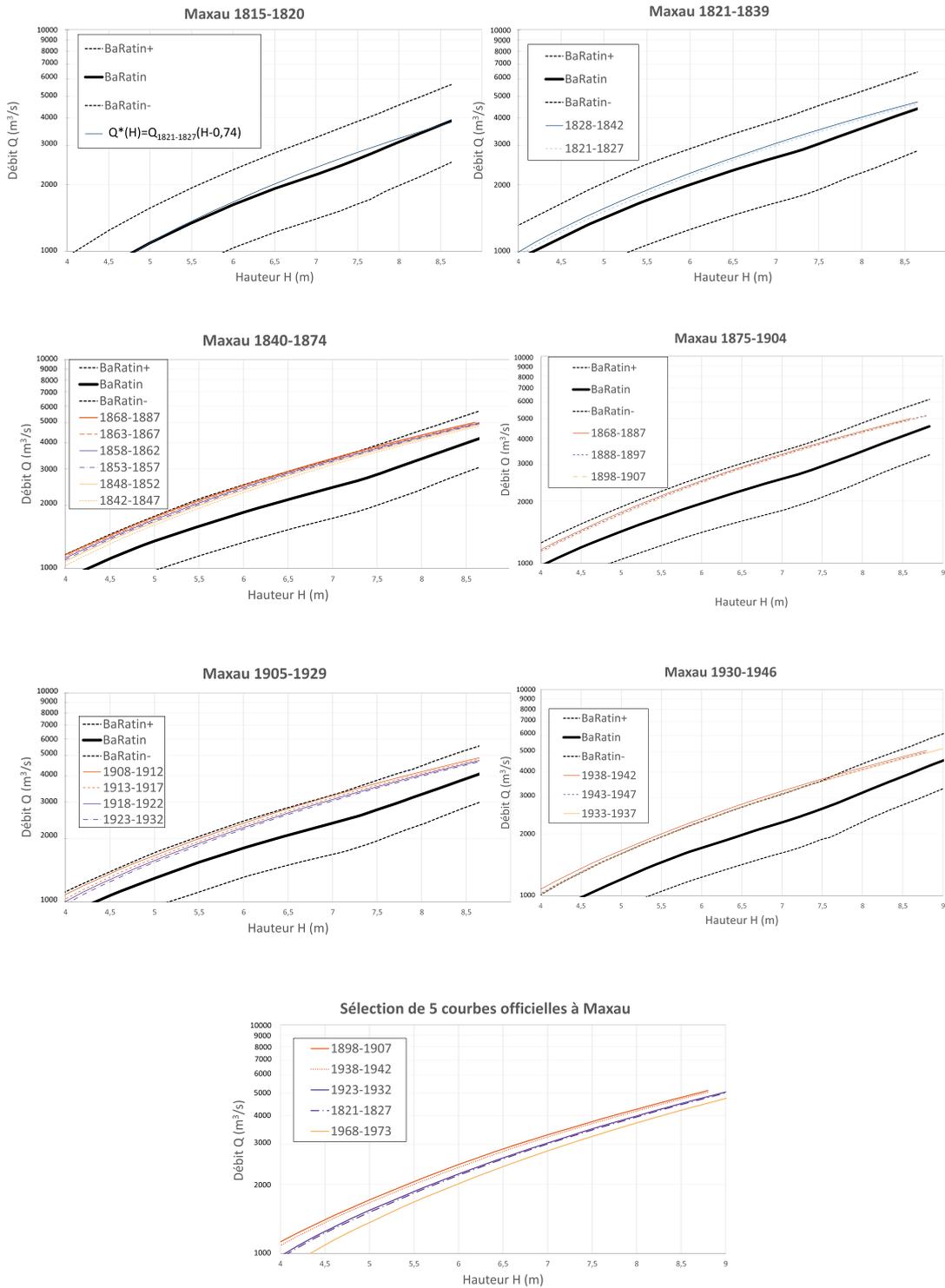
### 3.4. Récapitulatif sur les incertitudes des débits de crue du Rhin

Les séries « brutes » de débit  $Q$  ont été corrigées par un facteur multiplicatif  $c$  pour obtenir une série « corrigée » :  $Q^* = (1 + c) Q$ . Pour le Rhin à Bâle, la correction à appliquer résulte de deux aménagements hydrauliques en Suisse :

- (1) les premiers « travaux de correction des eaux du Jura » sur la période 1868–1890 ont consisté à dériver le cours de l'Aar pour le faire transiter par le lac de Biemme et à accroître les capacités d'échange entre ce lac et les lacs de Neuchatel et Morat. L'impact de ces travaux a été significatif et a fait l'objet d'études hydrauliques pour estimer l'effet de laminage suivant le débit de la crue. Il commence à partir d'un débit de  $2600 \text{ m}^3/\text{s}$  et plafonne au-delà d'un certain débit. Pour Wetter et al. (2011), le laminage peut aller jusqu'à une réduction maximale de  $600 \text{ m}^3/\text{s}$  (correction n°1) au-delà d'un débit de  $3900 \text{ m}^3/\text{s}$ . Pour l'étude CECR (1978), le laminage serait plus important, avec une réduction maximale de  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  (correction n°2) au-delà d'un débit de  $5400 \text{ m}^3/\text{s}$ . Par la suite, nous testerons les deux modes de correction, en donnant toutefois la préférence pour la correction n°1 basée sur des études plus récentes.
- (2) la dérivation d'un affluent de l'Aar, la Kander, dans le lac Thun en 1714. L'effet de cet aménagement a été estimé par Wetter et al. (2011) à l'aide d'un modèle hydraulique. Les crues historiques de la période 1268–1713, supérieures à  $4911 \text{ m}^3/\text{s}$  à Bâle, sont baissées de  $270 \text{ m}^3/\text{s}$  pour tenir compte des effets de cet aménagement si les crues étaient survenues dans l'état actuel, ainsi que de  $600$  à  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  (correction n°1 ou n°2) du fait des travaux de correction du Jura.

Pour le Rhin à Maxau, la correction à appliquer résulte des aménagements hydrauliques sur le Rhin supérieur qui ont fortement modifié la propagation des crues entre Bâle et Maxau. La série « brute » de Maxau a été corrigée pour ramener tous les débits de crue dans l'état d'aménagement de 1977 (référence pour la convention franco-allemande du 6 décembre 1982) :

- (1) période 1982–2018 : un tableau produit par LUBW (2019) résume l'effet de laminage des zones de rétention réalisées depuis 1982 pour 7 crues (débit à augmenter de  $+60$  à  $530 \text{ m}^3/\text{s}$  suivant les crues) ;
- (2) période 1891–1977: les études CECR (1978) et IWG (2010) indiquent la correction à apporter pour revenir à un état de référence « 1977 » (débit à augmenter d'un facteur multiplicatif de  $0$ – $11\%$  suivant les crues) ;
- (3) période 1815–1890 : le rapport INRAE (Lang, 2020) indique la correction à apporter pour revenir à un état de référence « 1977 » (débit à augmenter d'un facteur multiplicatif de  $0$ – $16\%$  suivant les crues).



**Figure 10.** Courbes de tarage à Maxau sur la période 1815–1946 : courbes BaRatin avec intervalle de confiance à 95% et courbes officielles reconstituées.

L'incertitude finale  $u_{Q^*}$  sur les débits corrigés  $Q^*$  est obtenue en supposant que les variables  $Q$  et  $c$  sont indépendantes et suivent une loi normale :

$$\left(\frac{u_{Q^*}}{E(Q^*)}\right)^2 = \left(1 + \left(\frac{u_c}{1 + E(c)}\right)^2\right) \left(\frac{u_Q}{E(Q)}\right)^2 + \left(\frac{u_c}{1 + E(c)}\right)^2 \quad (2)$$

( $E$  espérance mathématique)

Au final, les valeurs retenues pour les incertitudes sur les débits sont résumées dans le [Tableau 5](#).

#### 4. Tests sur l'homogénéité des séries de crue

Après avoir estimé l'incertitude sur les débits de crue à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018), nous allons vérifier l'homogénéité de ces deux longues séries. Comme les valeurs de débit ont été corrigées pour

**Tableau 5.** Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin.

Série de crues du Rhin à Bâle (1225–2017)								
Période	1225–1713	1714–1807	1808–1866(*)	1867–1889	1890–1909	1910–1933	1934–1993	1994–2017
Incertitude $u_Q$	±40%	±40%	±22%	±19%	±19%	±9%	±20%	±7%
Correction $c$	-20%	-15%	-15%	-15%	0	0	0	0
Incertitude $u_c$	±50%	±50%	±50%	±50%	0	0	0	0
Incertitude $u_{Q^*}$	±48%	±41%	±24%	±21%	±19%	±9%	±20%	±7%

Série de crues du Rhin à Maxau (1815–2017)							
Période	1815–1839	1840–1890	1891–1946	1947–1968	1969–1976	1977–2018	
Incertitude $u_Q$	±42%	±32%	±32%	±5%	±3%	±3%	
Correction $c$	16%	16%	10%	10%	10%	2.5 à 20%	
Incertitude $u_c$	±100%	±100%	±70%	±70%	±70%	±50%	
Incertitude $u_{Q^*}$	±45%	±35%	±33%	±9%	±8%	±5%	

(\*) avec la correction n°1 (laminage maximal de 600 m<sup>3</sup>/s)

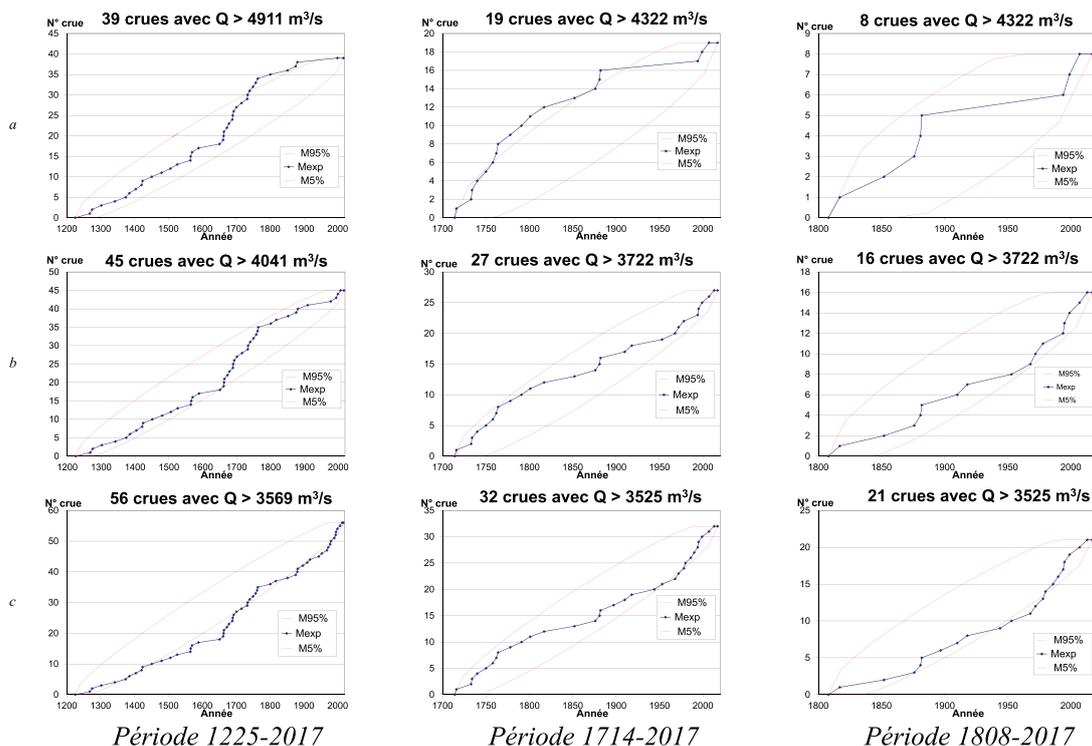
raisonner sur un même état de référence « 1977 » du Rhin et tenir compte des aménagements réalisés au cours du temps, les tests d'homogénéité seront appliqués sur les séries « brutes » (sans correction) et les séries « corrigées » (état de référence « 1977 »). Une procédure de segmentation mise au point par Darienzo et al. (2021) sera appliquée, en exploitant les incertitudes sur les débits de crue qui viennent d'être calculées (Tableau 5).

#### 4.1. Test sur le processus de Poisson pour les valeurs de crue du Rhin à Bâle supérieures à un seuil

Nous avons appliqué un test d'homogénéité sur la série de crues historiques à Bâle (Figure 11). Le principe du test (Lang et al., 1999) consiste à reporter sur un graphique la courbe expérimentale du

nombre cumulé  $m_t$  de crues sur un intervalle  $[0 ; t]$  en fonction de la date  $t$ , et à vérifier son positionnement par rapport à l'intervalle de confiance à 90%. Nous avons considéré 9 configurations : date de début de la série : 1225, 1714 (dérivation de la Kander) ou 1808 (début des enregistrements systématiques) ; série brute ou avec correction n°1 ou n°2 (pour ramener le débit des crues antérieures aux aménagements de 1714 et 1890 à la situation actuelle).

Sur la période 1225–2017, on dispose de 27 crues avec un débit  $Q > 4911$  m<sup>3</sup>/s sur 1268–1713, 11 crues avec un débit  $Q > 4322$  m<sup>3</sup>/s sur 1714–1807 (Section 2.1), et 210 valeurs maximales annuelles sur 1808–2017 (OFEV). Pour mémoire, les seuils de 4911 et 4322 m<sup>3</sup>/s correspondent aux crues extrêmes recensées par Wetter et al. (2011), et qui inondé le centre ancien de Bâle (Section 3.2.2 : quai « Blumenplatz » et place « Fischmarkt »).



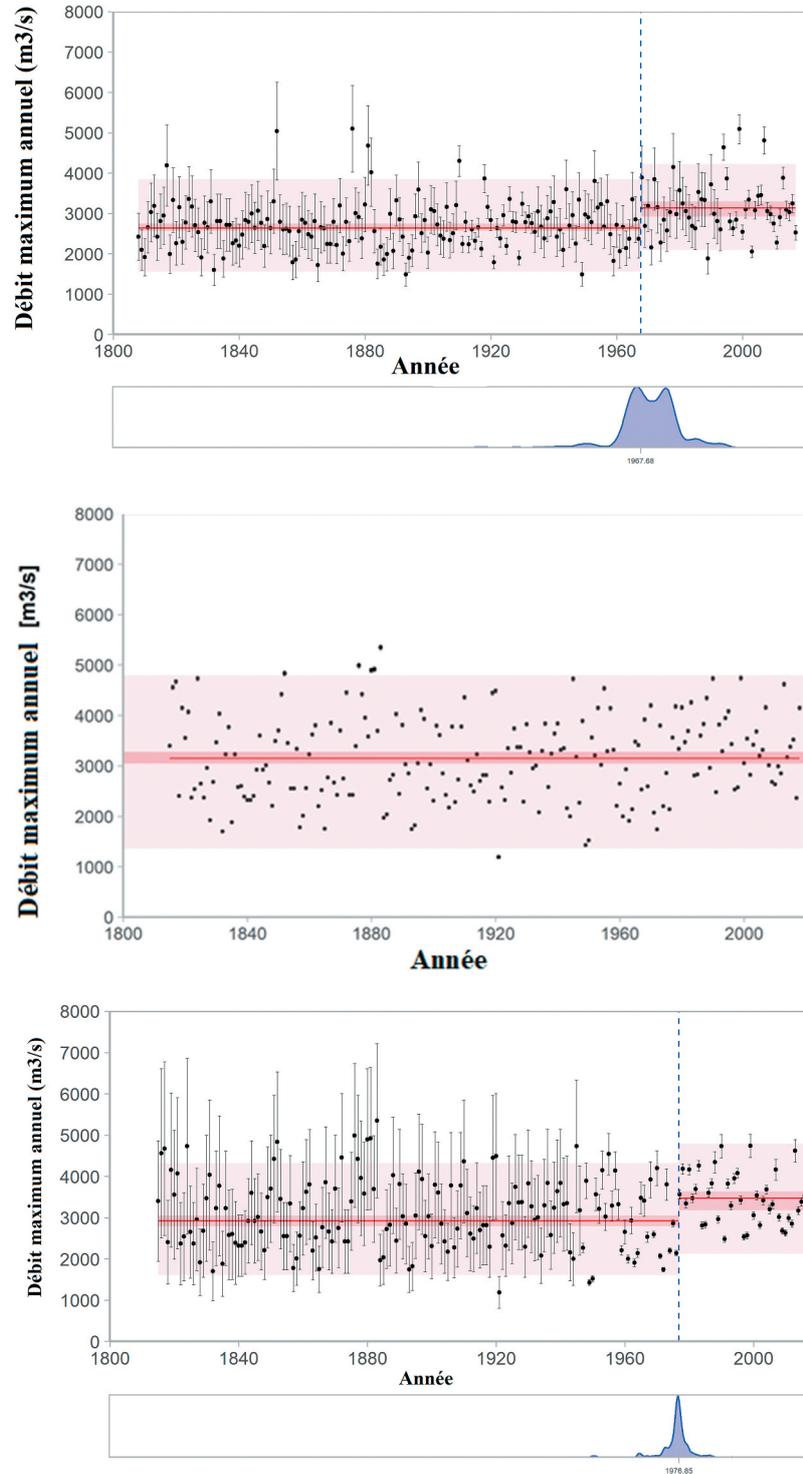
**Figure 11.** Test de Poisson sur l'homogénéité de la série de débits de crue du Rhin à Bâle supérieurs à un seuil : a) données brutes ; b) correction n°1 ; c) correction n°2.

**Tableau 6.** Contrôle d'homogénéité sur les valeurs maximales annuelles de crue du Rhin (p-value p pour le test de Pettitt).

Série	Période	Données	Test de Pettitt	Procédure de Darienzo
Bâle	1890–2017	Brutes	$p = 2E-3$ ; rupture en 1933	Rupture vers 1929–1930
	1808–2017	Brutes Corrigées (1714 et 1890)	$p = 2E-4$ ; rupture en 1933 $p = 1E-3$ ; rupture en 1964	Rupture vers 1930–1933 Rupture 1966 ou 1976
Maxau	1815–2018	Brutes Correction n°1	$p = 2E-3$ ; rupture en 1976 Pas de rupture	Rupture en 1976 Pas de rupture (*) Rupture en 1976 (**)

(\*) Procédure de Darienzo appliquée en considérant que les débits de crue sont connus exactement

(\*\*) Procédure de Darienzo appliquée en considérant que les débits de crue ont une incertitude (Tableau 5)

**Figure 12.** Résultats de la procédure de segmentation de Darienzo et al. (2021) sur la série corrigée de débit maximum annuel : a) à Bâle (1808–2017) ; b) et c) à Maxau (1815–2018) sans/avec incertitudes sur les débits ; avec la date de rupture la plus probable (maxpost, trait vertical pointillé en bleu), la densité de probabilité de la date de rupture (en-dessous en bleu), la valeur moyenne par période (trait horizontal en rouge), et les incertitudes paramétrique et totale (bandeaux rouge et rose).

Sur la **Figure 11a** (gauche), avec 39 crues supérieures à 4911 m<sup>3</sup>/s sur 1225–2017, on observe davantage de crues sur la période 1651–1764 et une sortie de l'intervalle de confiance. En raisonnant avec la correction n°1, le seuil de 4911 m<sup>3</sup>/s est réduit à 4041 m<sup>3</sup>/s (correction du Jura et dérivation de la Kander). On comptabilise 45 crues ayant dépassé 4041 m<sup>3</sup>/s, et la série apparaît comme homogène (**Figure 11b**, gauche). Avec la correction n°2 (**Figure 11c**, gauche), la série reste hétérogène.

Le test de Poisson a également été appliqué sur les périodes 1714–2017 et 1808–2017 (**Figure 11**, milieu et droite). On retrouve le même comportement, avec une série brute considérée comme hétérogène, de même que la série modifiée avec la correction n°2 (CECR, 1978). La série issue de la correction n°1, qui prend en compte par modélisation hydraulique (Wetter et al., 2011) l'effet des aménagements réalisés en 1714 et 1890, peut être considérée comme homogène. A noter que le diagnostic réalisé sur la série brute 1808–2017 (**Figure 11a**, droite) n'est pas forcément très robuste, vu le faible nombre de valeurs de crues avec un débit supérieur à 4322 m<sup>3</sup>/s (seulement 8 crues). C'est pour cette raison que le diagnostic sur la période 1808–2017 est approfondi dans la section suivante, en raisonnant sur les valeurs maximales annuelles.

#### 4.2. Test de segmentation sur les valeurs maximales annuelles du Rhin à Bâle et Maxau

Nous avons appliqué le test de Pettitt (1979) et une procédure de segmentation (Darioenzo et al., 2021) sur les séries de crues maximales annuelles à Bâle (1808–2017) et Maxau (1815–2018). Le test permet de rechercher une rupture dans une série et indique le rang de l'échantillon associé à cette rupture. La procédure recherche de façon itérative  $N$  ruptures dans une série et fournit pour chaque rupture détectée la densité de probabilité de la date de rupture.

On peut noter dans le **Tableau 6** qu'aucune rupture n'est détectée dans la série brute à Bâle en lien avec les travaux de correction des eaux du Jura en 1890. Une rupture est positionnée plutôt vers 1930–1933, qui pourrait correspondre au déplacement de la station de Schifflande à Rheinfelden et d'un nouveau mode de calcul des débits. La série corrigée de Bâle est considérée comme hétérogène, avec une date de rupture vers 1964–1966 ou 1976 (**Figure 12a**), sans explication physique connue. La série brute de Maxau est considérée comme hétérogène par les deux approches statistiques. Le test de Pettitt conduit à accepter l'hypothèse d'homogénéité de la série corrigée, de même que la procédure de Darioenzo (**Figure 12b**) si on néglige le fait que les débits de la série ont une incertitude. Par

contre, en incluant les incertitudes calculées précédemment (**Tableau 5**), une rupture est détectée vers 1976 avec la procédure de Darioenzo (**Figure 12c**).

Au final, les corrections apportées sur les séries de Bâle et Maxau permettent d'améliorer l'homogénéité des séries. Il subsiste toutefois une rupture sur les deux séries, vers 1966 ou 1976, qui ne peut être expliquée par un changement météorologique. Nous n'avons pas connaissance d'aménagement de grande ampleur du territoire qui puisse expliquer cette rupture. Brönnimann et al. (2019) pointent en Europe centrale une période plus intense de crues au XIX<sup>e</sup> siècle, et une période moins active 1943–1970 (« *flood-poor period* », **Figure 11b**, Brönnimann et al., 2019), qui induit que la période après 1970 a bien été plus active qu'avant 1970. Schmocker-Fackel et Naef (2010a, 2010b) mentionnent également un accroissement de la fréquence des crues en Suisse à partir des années 1970 (**Figure 5**, Schmocker-Fackel & Naef, 2010a, Schmocker-Fackel & Naef, 2010b). Des investigations complémentaires sont nécessaires pour attribuer une cause à la rupture constatée vers 1966–1976, mais l'origine climatique semble la plus vraisemblable, même si ce point mérite d'être approfondi.

## 5. Conclusions

Les longues séries de débit de crue sur le Rhin à Bâle (1225–2017) et Maxau (1815–2018) ont fait l'objet d'une analyse des incertitudes à l'aide du modèle BaRatin. L'exploitation des données disponibles en hydrométrie (hauteurs d'eau, jaugeages, géométrie de la section, profils en long, lignes d'eau) et d'études hydrauliques (modélisation des crues) montre que la qualité de reconstitution des débits de crue au XIX<sup>e</sup> siècle est meilleure à Bâle qu'à Maxau (respectivement  $\pm 20\%$  et  $\pm 40\%$ ), du fait d'une meilleure stabilité du lit du Rhin à Bâle. Les débits de crue récents sont très bien connus ( $\pm 5\text{--}7\%$ ) et les débits de crue anciens sont plus difficiles à estimer ( $\pm 45\text{--}48\%$ ).

Les séries de débits corrigés des effets des aménagements hydrauliques sont de meilleure qualité que les séries brutes. Elles peuvent être considérées comme homogènes, à l'exception d'une rupture vers 1966–1976, qui semble d'origine climatique. Ces deux longues séries de débits critiquées et validées ont pu être exploitées pour apporter une réponse sur la qualification en fréquence du débit de débordement du Rhin supérieur en aval de Strasbourg (Lang et al., 2021).

## Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

## ORCID

Michel Lang  <http://orcid.org/0000-0003-1417-1495>  
 Matteo Darienzo  <http://orcid.org/0000-0002-9184-4131>  
 Jérôme Le Coz  <http://orcid.org/0000-0003-1243-6955>  
 Benjamin Renard  <http://orcid.org/0000-0001-8447-5430>

## Disponibilité des données

Les données relatives aux résultats de cette étude sont disponibles auprès de l'auteur, Michel Lang, suivant une requête raisonnable.

## Références

- BAW. (2015). *Veränderungen am Pegel Maxau* (pp. 16). Bundesanstalt für Wasserbau, diaporama du 8 Juin.
- Brönnimann, S., Frigerio, L., Schwander, M., Rohrer, M., Stucki, P., & Franke, J. (2019). Causes for increased flood frequency in central Europe in the 19th century. *Climate of the Past*, 15(4), 1395–1409. <https://doi.org/10.5194/cp-15-1395-2019>
- BWSK. (1926). *Die Abflussverhältnisse des Rheins in Basel*. Bad Wasser und Strassenbaudirektion in Karlsruhe. *Tabelle*, 9, 15.
- BWSK. (1930). Die Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle von Basel bis Mannheim in den Jahren 1810 bis 1927. *Bad Wasser Und Strassenbaudirektion in Karlsruhe*, 111. + 9 annexes.
- CECR. (1972). *Beitrag zur Untersuchung der Hochwasserverhältnisse des Rheins am Pegel Basel*. Commission d'Etude des Crues du Rhin – Hochwasser-Studienkommission für den Rhein. 5p.
- CECR. (1978). Commission d'Etude des Crues du Rhin – Rapport principal (55p.) et annexes (84 p.).
- CIPR. (2021). *Les sous-bassins du Rhin*. Commission Internationale pour la Protection du Rhin, <https://www.iksr.org/fr/themes/rhin/les-sous-bassins/>
- Darienzo, M., Renard, B., Le Coz, J., & Lang, M. (2021). Detection of stage-discharge rating shifts using gaugings: A recursive segmentation procedure accounting for observational and model uncertainties. *Water Resources Research*, 57(4), e2020WR028607. <https://doi.org/10.1029/2020WR028607>
- EDF. (2010). *Le Rhin environnement international*. *Environnement général*. Journée CFBR. 21. Retrieved October 16, 2010, from.
- GDH. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie*. *Guide de bonnes pratiques*. Groupe Doppler Hydrométrie, 82. <https://gdh.inrae.fr/>
- HKV. (2011). *Fichier Daten\_Basel\_Maxau.xlsx*. Profils en travers, profil en long et coefficients de Strickler utilisés pour la modélisation hydraulique des crues du Rhin.
- IWG. (2010). *Détermination des débits extrêmes pour les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim*. Univ. Karlsruhe. 49 p. + annexes.
- Lang. (2020). *Expertise sur l'hydrologie du Rhin sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim* (pp. 101). INRAE.
- Lang, M., Le Coz, J., Renard, B., & Darienzo, M. (2021, juin 22-24). Design flood assessment on the upper Rhine using historical data and accounting for discharge uncertainty. *FLOODrisk 2020 – 4th European Conference on Flood Risk Management*, 7. <https://doi.org/10.3311/FloodRisk2020.3.6>
- Lang, M., Ouarda, T., & Bobée, B. (1999). Towards operational guidelines for over-threshold. *Modeling. Journal of Hydrology*, 225(3–4), 103–117. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5)
- Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., & Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydro-metric rating curves: A Bayesian approach. *Journal of Hydrology*, 509, 573–587. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.11.016>
- LUBW. (2019). *Bisherige Retentionseinsätze der Rückhaltemaßnahmen am Oberrhein zwischen Basel und Worms* (pp. 1). Germany: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg.
- Mansanarez, V., Renard, B., Le Coz, J., Lang, M., & Darienzo, M. (2019). Shift happens! Adjusting stage-discharge rating curves to morphological changes at known times. *Water Resources Research*, 55(4), 2876–2899. <https://doi.org/10.1029/2018WR023389>
- Pettitt, A. N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28(2), 126–135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Schmocker-Fackel, P., & Naef, F. (2010a). Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(8), 1581–1594. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1581-2010>
- Schmocker-Fackel, P., & Naef, F. (2010b). More frequent flooding? Changes in flood frequency in Switzerland since 1850. *Journal of Hydrology*, 381(1–2), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.022>
- Wetter, O., Pfister, C., Weingartner, R., Luterbacher, J., Reist, T., & Trösch, J. (2011). The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. *Hydrological Sciences Journal*, 56(5), 733–758. <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.583613>
- WSV. (1975). *Pegelstammbuch Maxau*. 20. Germany: Wasserstrassen and Schifffahrtsverwaltung des Bundes.