



HAL
open science

Expertise sur l'hydrologie du Rhin sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim

Michel Lang

► **To cite this version:**

Michel Lang. Expertise sur l'hydrologie du Rhin sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim. [Rapport de recherche] INRAE. 2020. hal-03295501

HAL Id: hal-03295501

<https://hal.science/hal-03295501>

Submitted on 22 Jul 2021

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.

Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2020

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2102897179.



>

Action 1 - Expertises

**EXPERTISE SUR L'HYDROLOGIE DU RHIN SUR LES BIEFS DE GAMBSHEIM ET
IFFEZHEIM**

Auteur : Michel LANG (INRAE, décembre 2020)



SOMMAIRE

1	Objet de l'expertise	3
2	Informations exploitées pour l'expertise.....	4
3	Plan du rapport.....	4
4	Collecte des données hydrométriques.....	5
4.1	Réseau hydrographique du bassin du Rhin.....	5
4.2	Configuration actuelle du Rhin supérieur.....	7
4.3	Station hydrométrique du Rhin à Bâle	9
4.4	Reconstitution des plus fortes crues du Rhin à Bâle depuis 1268	11
4.5	Longue série de débits de crues à Bâle.....	15
4.6	Station hydrométrique du Rhin à Maxau.....	16
4.7	Longue série de débits de crues à Maxau	17
5	Evaluation des incertitudes sur les débits des longues séries de Bâle et Maxau	19
5.1	Méthode BaRatin.....	19
5.2	Estimation des incertitudes sur les débits de crue à Bâle	21
5.3	Estimation des incertitudes sur les débits de crue à Maxau	24
6	Analyse de la distribution des crues à Bâle et Maxau.....	26
6.1	Méthode HBAY.....	26
6.2	Distribution des crues à Bâle	29
6.3	Distribution des crues à Maxau	32
7	Réponse à la question posée sur la caractérisation en fréquence des débits de référence sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim	36
7.1	Estimation de la période de retour associée à chaque débit de référence.....	36
7.2	Avis sur les estimations antérieures des débits de référence	41
7.3	Récapitulatif des débits de référence à Bâle, Maxau et les biefs de Gamsheim et Iffezheim	44
7.4	Recommandations sur l'estimation des débits de référence	45
8	Points d'approfondissement possibles	47
9	Bibliographie.....	48
10	Annexes.....	49
10.1	Documents et rapports mis à disposition pour l'expertise	49
10.2	Sources de données utiles aux séries hydrométriques de Maxau et Bâle	51
10.3	Analyse de la cohérence de la série des crues du Rhin à Bâle.....	54
10.4	Analyse de la cohérence de la série des crues du Rhin à Maxau.....	61
10.5	Détails sur l'analyse des courbes de tarage à Bâle.....	69
10.6	Détails sur l'analyse des courbes de tarage à Maxau.....	81

1 Objet de l'expertise

Le niveau de protection contre les inondations du Rhin supérieur, 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.

Suite à la demande de la partie allemande de réaliser des travaux pour respecter ces niveaux contractuels de digue, la Ministre de l'Environnement française a indiqué, dans un courrier daté du 10 février 2017 adressé au Ministre-Président du Land de Bade Wurtemberg responsable de la protection contre les inondations, que la France souhaitait lancer une expertise sur la caractérisation des débits extrêmes du Rhin. Il apparaît en effet de fortes différences d'appréciation sur la valeur des débits de référence associés à des périodes de retour. La crue millénale (resp. décennale) de l'étude de l'université technique de Karlsruhe (IWG) validé par la Commission Permanente de mai 2010 correspond à une crue centennale (resp. millénale) dans certaines études françaises.

Ainsi, les débits de référence retenus dans la convention de 1969 doivent être caractérisés pour la poursuite des discussions avec la partie allemande et l'application en France de la réglementation relative aux ouvrages.

Le Ministère de l'Environnement français (BETCGB¹) a été sollicité pour donner un avis le 9 mai 2012 sur l'origine des différences entre les études hydrologiques. Elles proviennent d'une part des données de débit de crue utilisées : dans l'étude réalisée en 2010 par l'Université de Karlsruhe, ce sont les données de débit du XX^e siècle qui ont été exploitées, les informations antérieures au cours du XIX^e siècle ayant été considérées comme trop incertaines, compte tenu des aménagements réalisés sur le Rhin depuis. Dans l'étude réalisée par EDF en 2002 sur les biefs de Fessenheim et Kembs, plus en amont, les grandes crues du Rhin au cours du XIX^e siècle ont été conservées en exploitant les annuaires hydrologiques suisses depuis 1808. D'autre part, les lois de probabilité retenues par les Allemands (loi Log Normale) et les Français (loi racine Gumbel) présentent des comportements asymptotiques différents qui ont une incidence sur l'extrapolation de la distribution des crues pour de fortes périodes de retour.

A noter qu'un travail important de réactualisation de l'hydrologie des crues du Rhin est en cours par les Suisses sur la partie en amont de Bâle.

INRAE a été sollicitée par la DREAL Grand Est pour avancer sur la question de la qualification des débits du Rhin sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim. L'objectif est de se prononcer sur la caractérisation en période de retour des débits de référence retenus pour ces deux biefs, à partir d'une méthodologie qui soit, si possible, acceptée au sein du groupe de travail franco-allemand en charge de la définition de l'hydrologie des crues du Rhin.

Quatre réunions sur l'avancement de l'étude ont été organisées par la DREAL Grand-Est à Strasbourg (21/09/2018, 12/03/2019, 08/07/2019, 09/12/2019). Une cinquième réunion est programmée le 16 octobre 2020. Ces réunions associent partenaires français, allemands dans le cadre du SGT Statistiques de la Commission Permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur. La Suisse est également tenue informée de ces travaux et réunions.

¹ Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages

2 Informations exploitées pour l'expertise

La liste des informations communiquées pour les besoins de l'expertise se trouve en annexes (sections 10.1 et 10.2).

3 Plan du rapport

L'analyse a porté sur les deux plus longues séries hydrométriques du secteur, à Bâle en Suisse et à Maxau en Allemagne. Le rapport est organisé de la façon suivante :

- **Section 4 : Collecte des données hydrométriques**

Après un rappel sur le réseau hydrographique du Rhin (section 4.1) et les aménagements réalisés sur le Rhin supérieur (section 4.2), on trouve un résumé des données hydrométriques disponibles à Bâle et Maxau (sections 4.3 et 4.6). Il est fait état du travail spécifique réalisé par des chercheurs de l'Université de Berne pour reconstituer les plus fortes crues du Rhin à Bâle depuis 1268 (section 4.4). Les longues séries de débit à Bâle et Maxau utilisées pour l'analyse fréquentielle des crues sont présentées en sections 4.5 et 4.7, après un travail de contrôle de l'homogénéité des séries (cf. annexes 10.3 et 10.4) et l'utilisation de corrections pour raisonner sur un même état de référence des conditions hydrauliques (situation 1977).

- **Section 5 : Evaluation des incertitudes sur les débits des longues séries de Bâle et Maxau**

La méthode BaRatin, utilisée pour estimer les incertitudes sur les débits de crue, est présentée en section 5.1. Elle consiste à croiser une expertise hydraulique *a priori* sur la relation hauteur-débit avec les jaugeages disponibles. Elle est déclinée en sections 5.2 et 5.3 pour les stations hydrométriques de Bâle et Maxau. L'incertitude sur les débits de crue est ensuite croisée avec celle sur la correction à réaliser pour raisonner sur un même état de référence. On dispose *in fine* d'une estimation des incertitudes multiplicatives sur les débits de crue des séries de Bâle et Maxau (détails de calcul en annexes 10.5 et 10.6).

- **Section 6 : Analyse de la distribution des crues à Bâle et Maxau**

Les principes de la méthode HBAY sont présentés en section 6.1, avec la possibilité de traiter un échantillon mixte, composé de valeurs maximales annuelles sur la période d'observations systématiques et d'une collection de crues historiques sur la période antérieure. Les incertitudes sur les débits de crue sont prises en compte pour l'estimation des paramètres de la distribution des crues et ses incertitudes. L'application aux séries de Bâle et Maxau, pour différentes lois de probabilité (Gumbel, LogNormale, GEV) et longueurs de chroniques, conduit à une première estimation des quantiles de crue de référence (sections 6.2 et 6.3).

- **Section 7 : Réponse à la question posée sur la caractérisation en fréquence des débits de référence sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim**

Une étape de consolidation régionale des ajustements fréquentiels obtenus à Bâle et Maxau permet d'éviter que les distributions se croisent au-delà d'une certaine période de retour. Les quantiles sont ensuite interpolés au niveau des biefs de Gamsheim et Iffezheim pour qualifier en période de retour les débits de référence à respecter (section 7.1). La distribution prédictive peut être une option retenue, pour majorer les estimations en tenant compte des incertitudes. Les périodes de retour obtenues sont ensuite comparées avec celles des études antérieures (IWG, 2000 ; EDF, 2002) (section 7.2). Les différents débits de référence sont résumés en section 7.3, avec la possibilité d'obtenir des quantiles pour une période de retour donnée ou un tronçon spécifique. Des recommandations sont données en section 7.4 sur l'estimation des débits de référence.

La section 8 liste des approfondissements possibles sur la connaissance des débits de crue, et la section 9 donne le détail des références bibliographiques citées dans le rapport.

4 Collecte des données hydrométriques

4.1 Réseau hydrographique du bassin du Rhin

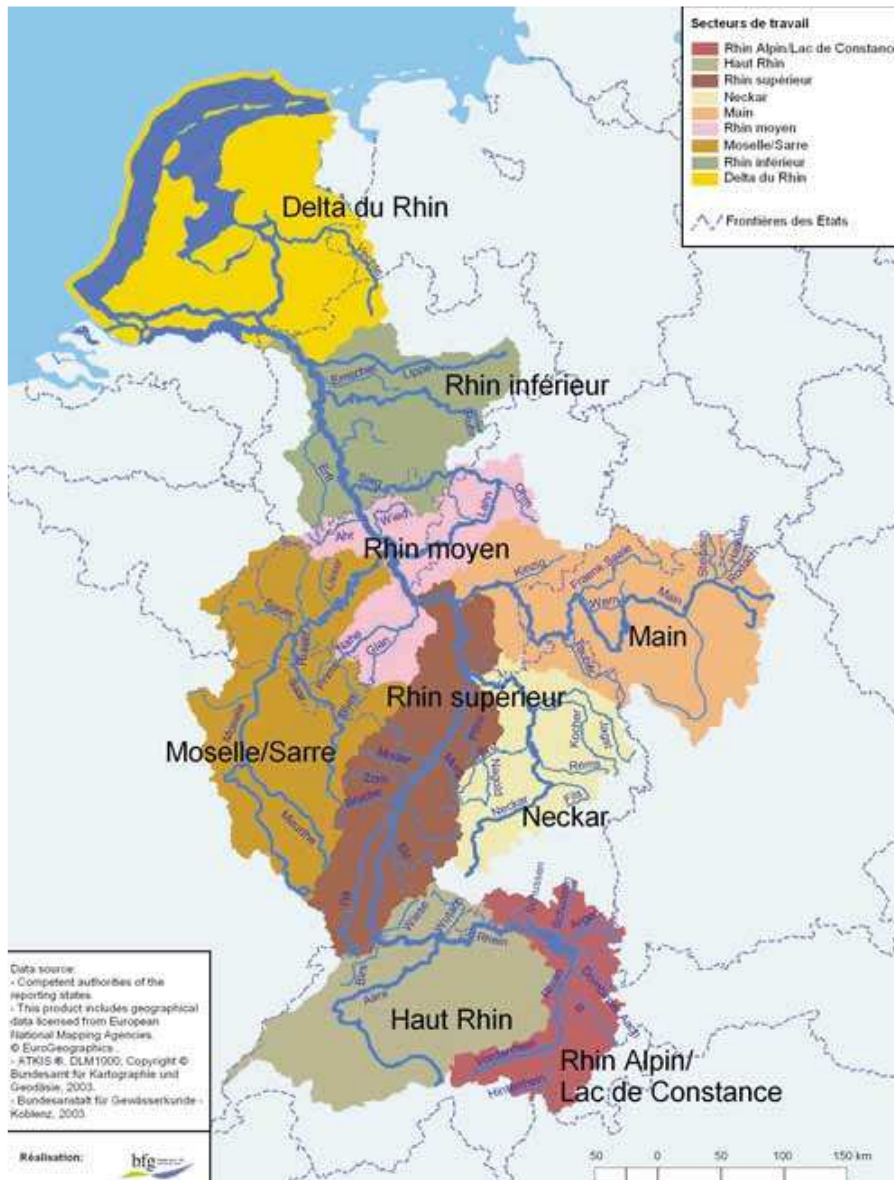


Figure 1 : Carte du bassin fluvial du Rhin (source : <https://www.iksr.org/fr/themes/rhin/les-sous-bassins/>)

Le texte descriptif qui suit est repris de Lang et Cœur (2014).

« Le Rhin prend sa source dans le massif du Saint-Gothard dans les Alpes suisses. Son bassin versant couvre une superficie totale d'environ 185 000 km². La partie française s'étend sur 23 500 km² et comprend, outre le Rhin lui-même, les parties françaises des bassins de la Moselle, de la Sarre et les affluents alsaciens.

Son cours s'étend sur une longueur totale de 1 325 km, dont 185 km environ en plaine d'Alsace (270 km si l'on intègre les parties canalisées et les tronçons court-circuités). Il est classiquement découpé en cinq parties :

- le Rhin alpin, jusqu'au lac de Constance (altitude 396 m) en Suisse, est issu de la confluence du Rhin antérieur (source au lac de Tuma, altitude 2 341 m) et du Rhin postérieur (source à 2216 m) ;
- le Haut-Rhin, jusqu'à Bâle (altitude 252 m), délimite la frontière entre la Suisse et l'Allemagne, et reçoit principalement les apports de l'Aar ;
- le Rhin supérieur, s'écoule dans le fossé Rhénan. Il constitue la frontière entre la France et l'Allemagne dans sa première moitié sud jusqu'à Lauterbourg (altitude 106 m), puis poursuit son parcours en Allemagne jusqu'à Bingen (altitude 89 m). Il reçoit les apports en rive gauche de l'Ill et en rive droite du Neckar et du Main ;
- le Rhin moyen, entièrement situé en Allemagne, traverse le massif Rhénan, jusqu'à Bonn (altitude 60 m) ;
- le Rhin inférieur termine son cours aux Pays-Bas, et se divise en trois bras au niveau de son delta jusqu'à la Mer du Nord.

D'un point de vue hydrologique, le lac de Constance (542 km²) joue un rôle de réservoir tampon et de piège des matériaux solides. Le Rhin a un débit relativement constant à sa sortie. Ses affluents aval, et notamment la Thur, la Tâss, la Reuss, l'Aar, l'alimentent en débits torrentiels et contribuent à la formation de crues rapides. Le régime hydrologique est ici fortement marqué par la présence des glaciers alpins : faibles apports d'eau en période hivernale, crues sévères lors des remontées de l'isotherme 0°C au-dessus de 1 500 m, avec une fonte massive des neiges qui peut se combiner avec d'importantes précipitations. Cette configuration caractérise les crues printanières du Rhin supérieur avec un régime de hautes eaux compris entre mai et juillet en lien avec la fonte des neiges d'altitude et des glaciers. A son débouché dans la plaine d'Alsace, le Rhin a un régime hydrologique de type nivoglaciare.

Le Rhin franco-allemand a fait l'objet d'aménagements successifs entrepris dès le milieu du XIX^e siècle avec des objectifs évolutifs :

- travaux de correction dits de Tulla (achevés vers 1860-1870) pour tenter de maîtriser le caractère dommageable des inondations, notamment dans la plaine centrale d'Alsace, mais aussi dans le but d'assainir les zones humides et gagner des terres pour l'agriculture;
- aménagement hydroélectrique du fleuve après la Première Guerre mondiale et jusqu'au milieu des années 1970, associé à l'amélioration de sa navigabilité compromise par les travaux réalisés au XIX^e siècle. Ces aménagements ont conduit à un endiguement généralisé et continu du fleuve depuis l'aval immédiat de Bâle jusqu'à la dernière chute aménagée à hauteur d'Iffezheim, 20 km environ avant la frontière nord de l'Alsace. Le linéaire du fleuve a été sensiblement réduit et surtout l'ancien champ d'expansion du Rhin dans la plaine d'Alsace a été amputé de près de 75%.

Ces deux séries de travaux ont conduit, d'une part, à une accélération de la vitesse de propagation des crues et, d'autre part, à une réduction très sensible de l'effet de laminage des débits et des volumes de crues qui autrefois pouvaient s'étaler dans la vaste plaine commune à l'Alsace et au Land du Bade-Wurtemberg.

Dans sa partie contrôlée par les aménagements hydro-électriques, entre Bâle et Iffezheim, le niveau des biefs est quasiment constant et dépend, sauf pour les débits très élevés, des manœuvres d'exploitation effectuées par les différents gestionnaires des barrages, le tout en lien avec les contraintes de la navigation. Les tronçons court-circuités du fleuve sont alimentés en période normale par un débit réservé. En situation de crue, ces tronçons reçoivent l'essentiel du débit du fleuve. C'est le cas notamment du Vieux-Rhin qui, depuis l'aval immédiat de Bâle, coule parallèlement au Grand Canal d'Alsace sur près de 50 km.

Les aménagements réalisés aux XIX^e et XX^e siècles sur le Rhin franco-allemand ont porté le niveau des digues au-dessus de la crue millénale entre Bâle et le barrage d'Iffezheim. Entre Kembs et Strasbourg, les ouvrages ont été dimensionnés pour évacuer une crue de 6 000 m³/s à minima (répartition entre le Grand Canal d'Alsace et le Vieux-Rhin)... Sur le Rhin dit à courant libre (en aval d'Iffezheim), le système d'endiguement est plus ancien (XIX^e siècle avec les travaux dits de Tulla), avec une crue de dimensionnement moins forte. »

4.2 Configuration actuelle du Rhin supérieur

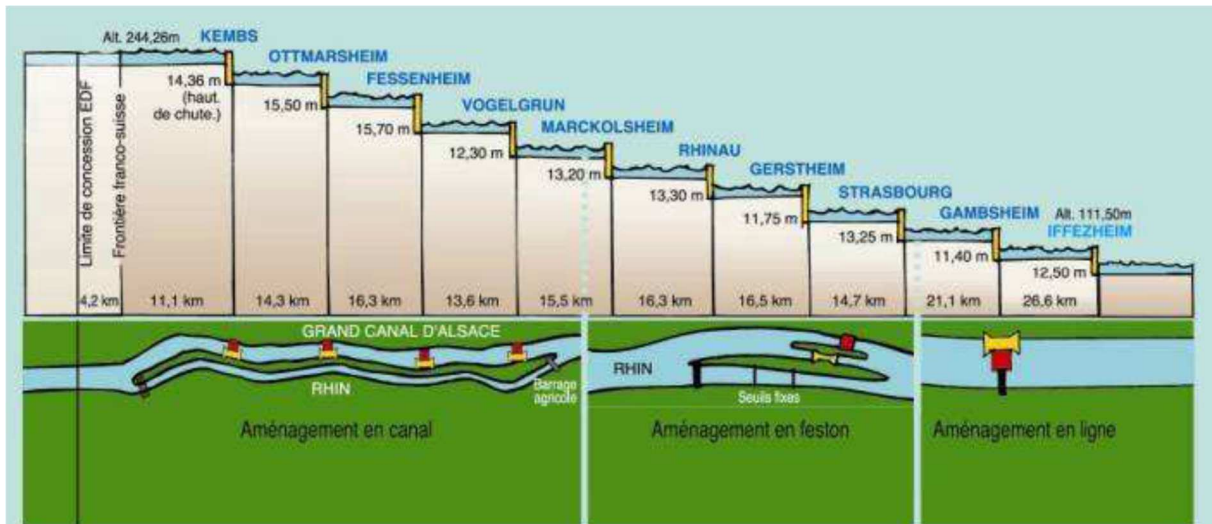


Figure 2 : Profil en long du Rhin supérieur, secteur Kembs-Iffezheim (source : EDF, 2010) (EDFJournéeCfbr16Oct2010.pdf)

Le Rhin supérieur a fait l'objet de travaux de canalisation et d'implantation de barrages et écluses, de Kembs à Iffezheim (cf. Figure 2 et Figure 3).

La caractérisation en fréquence du débit de débordement du Rhin est à vérifier sur les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim. Les revanches réglementaires à respecter (convention franco-allemande de 1969) sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Revanches contractuelles (m) à respecter sur les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim pour différents débits de référence (m³/s)

Revanche (m) à respecter par rapport à la crête de la digue	Gamsheim amont Kinzig	Gamsheim aval Kinzig	Iffezheim
1.2	4300	4600	4800
0.2	6500	7200	7500

Les deux stations hydrométriques du Rhin supérieur qui disposent des plus longues séries d'observation sont situées respectivement à Bâle (1808-2018), 10 km en amont du barrage de Kembs, et à Maxau (1821-2018) à l'ouest de Karlsruhe, 28 km en aval du barrage d'Iffezheim.



Figure 3 : Vue en plan du Rhin supérieur, secteur Kembs-Iffezheim (source : EDF, 2010) :
 ▲ localisation des stations hydrométriques de Maxau et Basel (EDFJournéeCfbr16Oct2010.pdf)

4.3 Station hydrométrique du Rhin à Bâle

Les premiers relevés systématiques de hauteur ont été réalisés à Schiffflände de 1808 à 1994 et sont disponibles à Rheinhalle de 1974 à aujourd'hui (cf. Figure 4). Les débits de crue sont disponibles en continu depuis 1808 (cf. Figure 5). 70 jaugeages ont été réalisés sur la période 1867-1933 et 90 jaugeages sur la période 1994-2018 ; on dispose de 9 courbes de tarage sur la période 1916-1932 et 25 courbes de tarage sur la période 1986-2018 (cf. Figure 6).

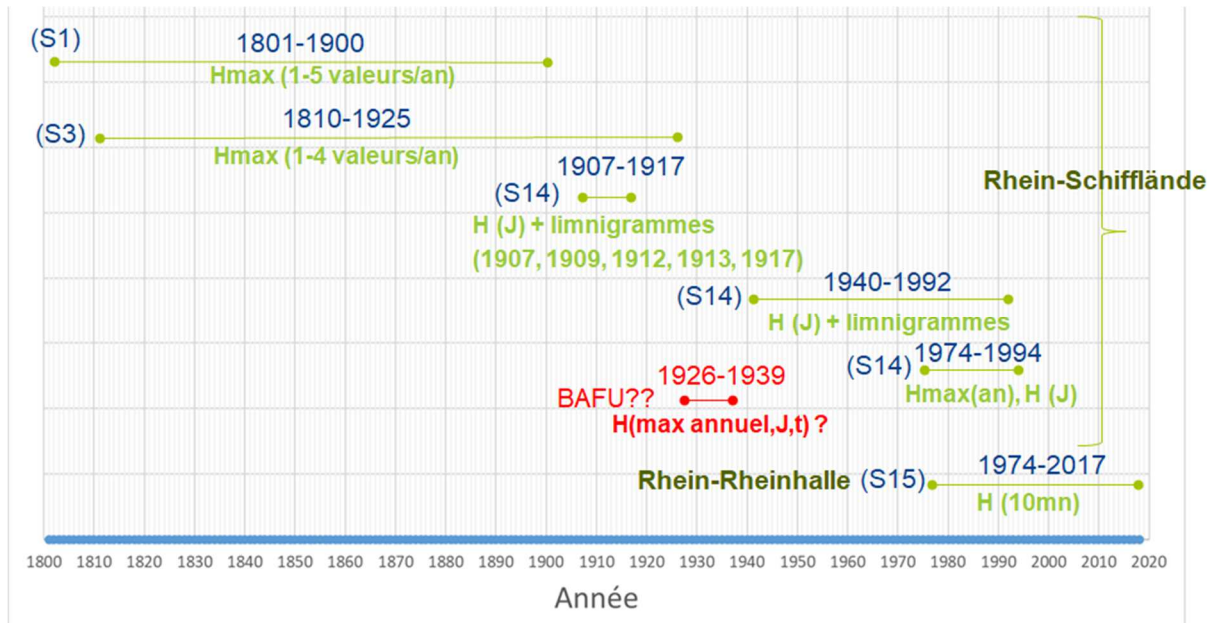


Figure 4 : Station hydrométrique du Rhin à Bâle : données de hauteur (Diapo4.png)

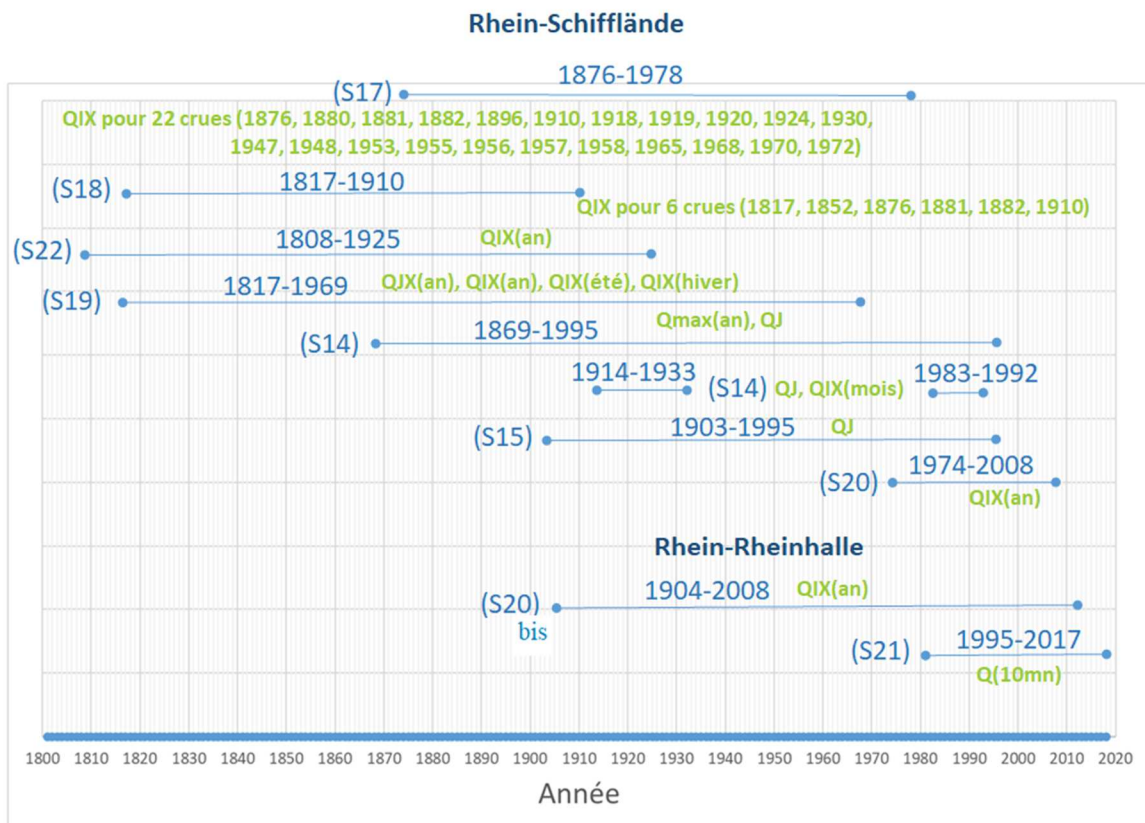


Figure 5 : Station hydrométrique du Rhin à Bâle : données de débit (Diapo5.png)

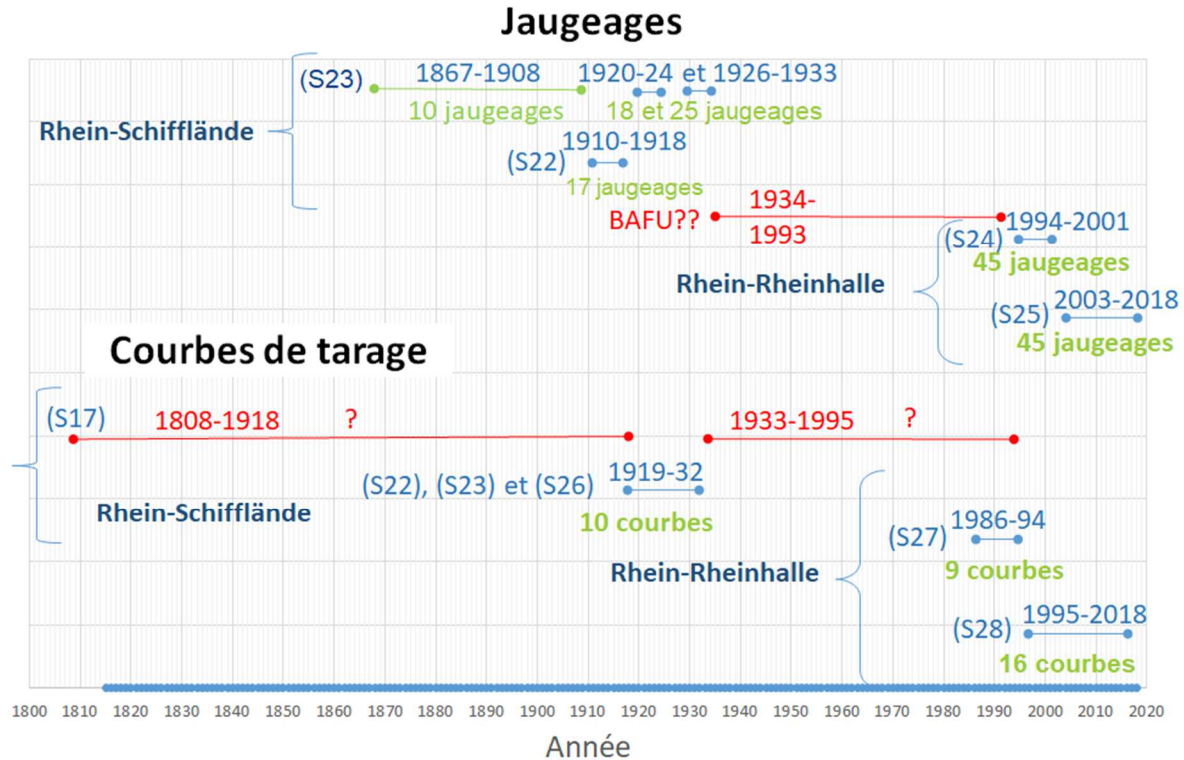


Figure 6 : Station hydrométrique du Rhin à Bâle : jaugeages et courbes de tarage (Diapo6.png)

La superficie du bassin versant au droit de la station hydrométrique de Schiffflände (resp. Rheinhalle) est de 35 930 km² (resp. 35 925 km²). Elle se situe sur le cours du Rhin au point kilométrique PK 166.7 (resp. PK 164.39). Les mesures de niveau de la station hydrométrique du Rhin à Schiffflände ont été sous influence aval à partir de la mise en service du barrage de Kembs en 1933. C'est ce qui a conduit les gestionnaires de la station à reconstituer certains débits du Rhin à Bâle sur la période 1933-1994 à partir de la station du Rhin à Rheinfelden plus en amont (pK 148.05) (cf. Figure 7) et du débit des deux affluents (Birs et Ergolz), ou de la station de Saint-Alban (1945-1983) (située entre Schiffflände et Rheinhalle). La station du Rhin à Rheinhalle a pris officiellement la suite de celle de Schiffflände à partir de 1995, même si des données de débit sont disponibles depuis 1904 (source S20).

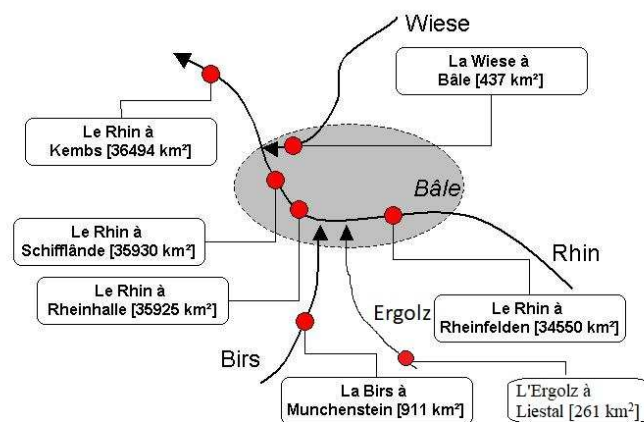


Figure 7 : Plan de situation des stations hydrométriques dans le secteur de Bâle (repris d'un schéma EDF et des informations fournies par l'OFEV) (PlanRhinBale.JPG)

4.4 Reconstitution des plus fortes crues du Rhin à Bâle depuis 1268

Un travail spécifique a été réalisé par Wetter *et al.* (2011) de l'université de Berne. A partir d'une enquête historique, ils ont recensé tous les événements de crue qui ont touché le centre historique de Bâle. La *Figure 8* donne la localisation des points « remarquables » qui ont été étudiés, et la *Figure 9* donne la position de ces points sur un plan actuel. A noter le report de 12 marques de crue (1641-1881) sur la Schönbeinhaus (93 Oberer Rheinweg), environ 500 m en amont de Schiffflände, en rive droite.

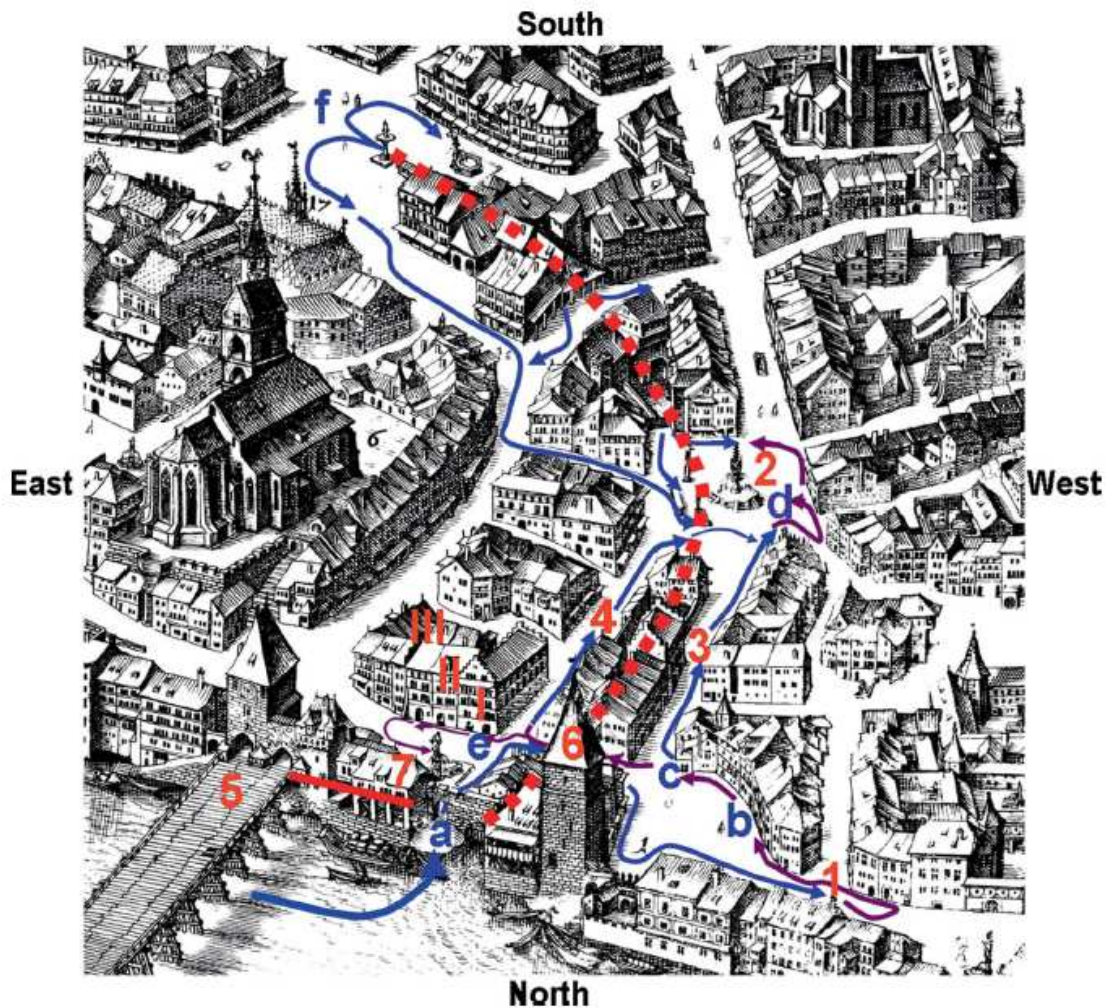


Figure 8 : Localisation des points remarquables du centre de Bâle analysés du point de vue des inondations (plan de 1615), d'après Wetter *et al.* (2011) (*PlanAncienBale.png*)

Légende : (a)-(f) limites successives d'extension du champ d'inondation ; 1. début des débordements ; 2. Fischmarkt ; 3. Schwanengasse ; 4. Kronengasse ; 5. Pont de la cité ; 6. Tour du sel ; 7. Guildhouse (également localisation de la station Schiffflände) ; I-II-III guest houses (Krone, Tête d'Or, Kopf)

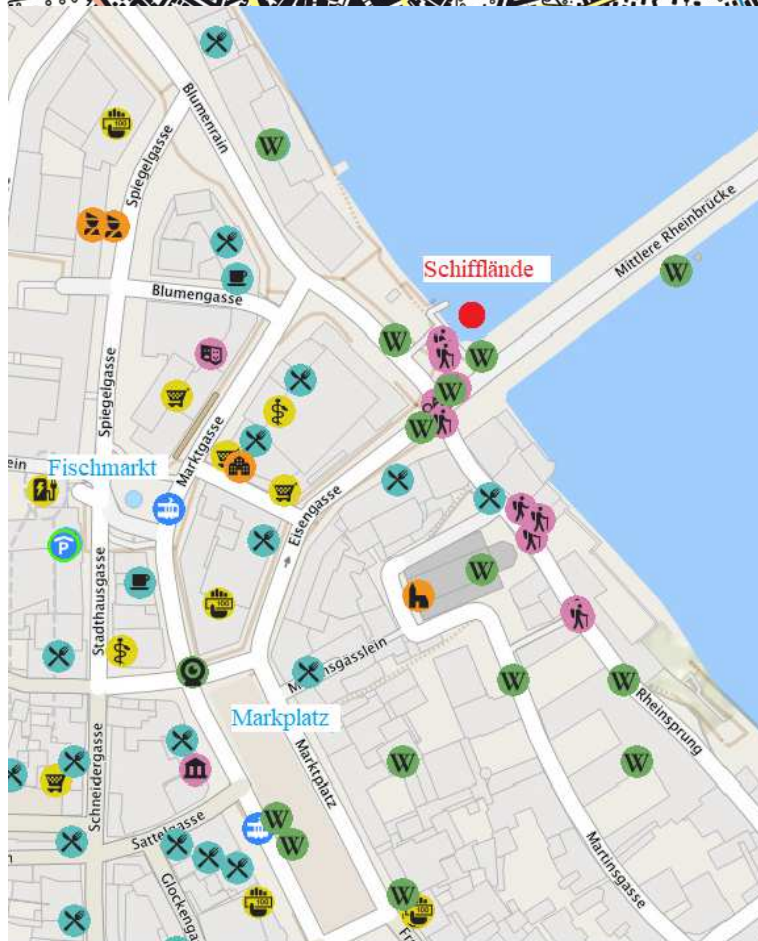
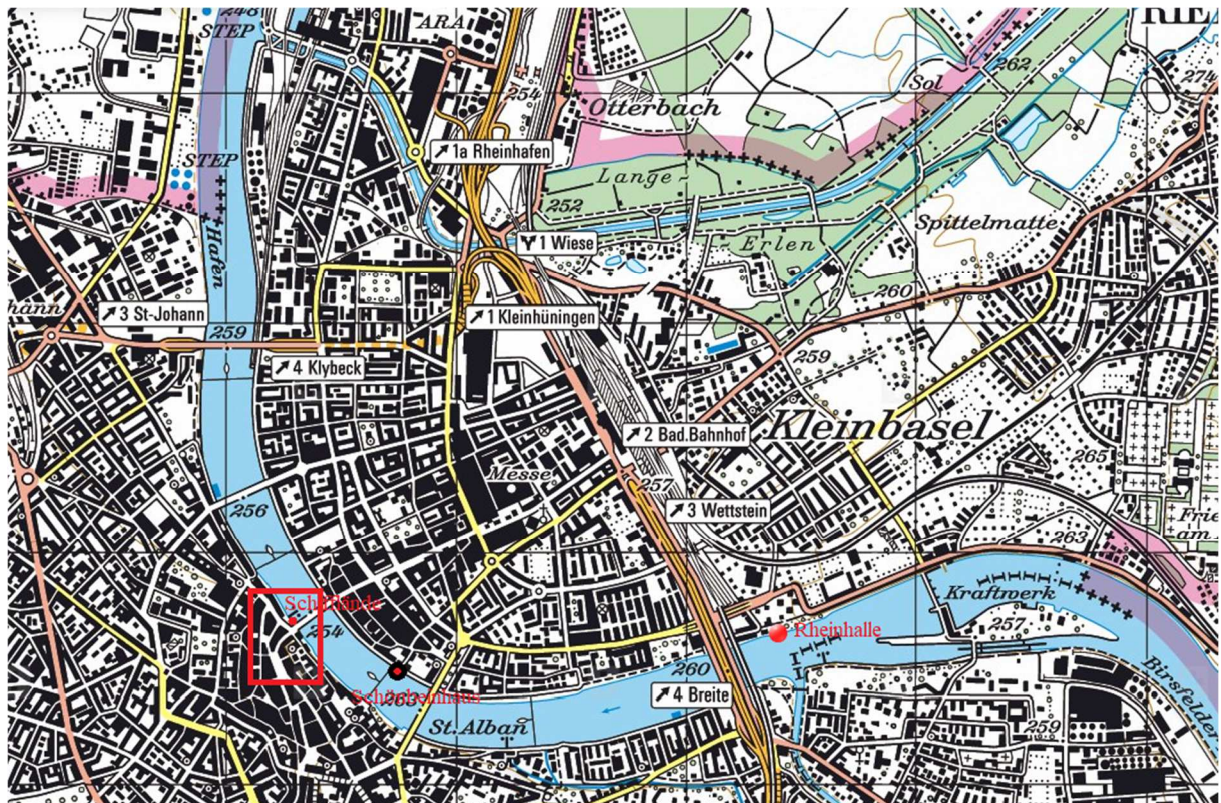


Figure 9 : Localisation du centre de Bâle sur un plan actuel : stations hydrométriques (Schifflande et Rheinhalle), maison avec repères de crue (Schönbeinhaus), et points remarquables (Fischmarkt et Markplatz) (CarteBale.png et PlanCentreBale.png)

Un modèle hydraulique a été utilisé pour associer à chaque point « remarquable » un débit de submersion, ce qui a permis de produire une chronologie des crues historiques depuis 1268, qui a été associée aux débits de la station hydrométrique de Bâle (1808-2013). On dispose ainsi d'une collection de 70 crues (cf. Figure 10a) : 27 crues avec $Q > 4911 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1268-1713 ; 11 crues avec $Q > 4322 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1714-1807. Il y a par ailleurs 32 crues avec $Q > 3369 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1808-2013.

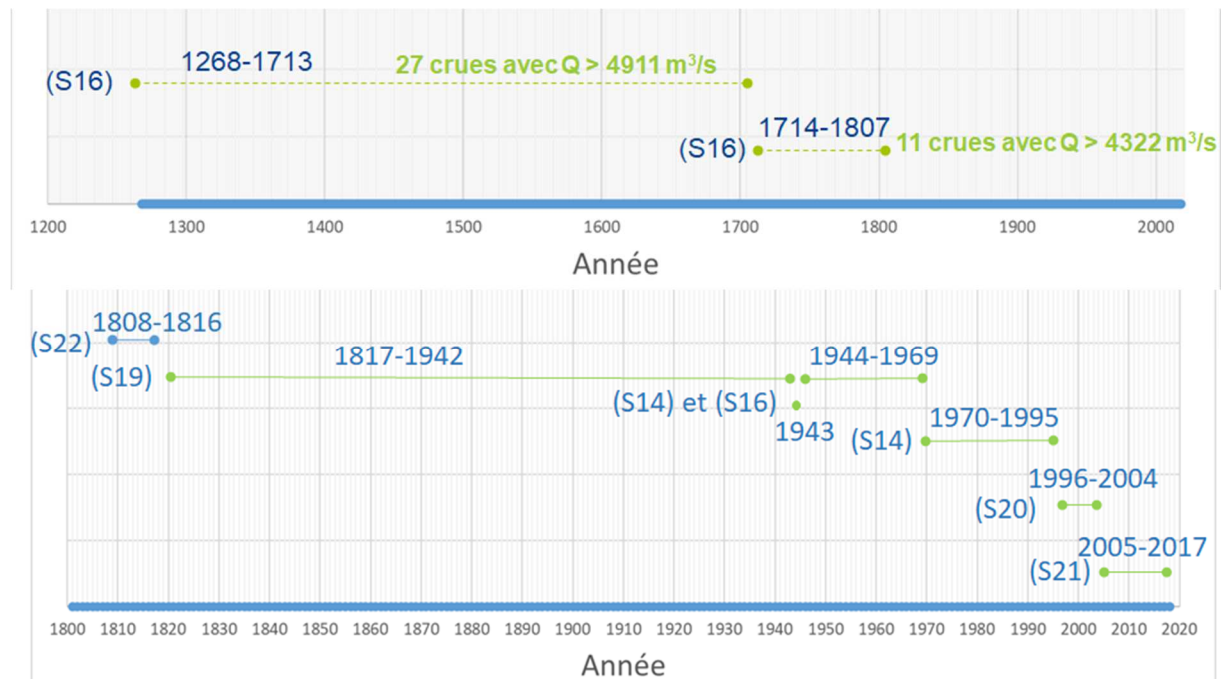


Figure 10 : Débits de crues du Rhin à Bâle : a/ collection de crues historiques sur la période 1268-1807 (source S16, Wetter et al., 2011) (Diapo7a.png) ; b/ Crues maximales annuelles sur la période 1808-2017 (concaténation à partir de plusieurs sources) (Diapo7b.png)

Le bassin versant du Haut-Rhin a fait l'objet d'aménagements hydrauliques importants aux XVIII^e et XIX^e siècles, qui ont modifié de façon significative la propagation des crues. Ceci nécessite de corriger les valeurs anciennes dans le contexte hydraulique actuel pour pouvoir disposer d'une série homogène.

Il y a d'abord eu **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. Le débit de pointe de crue de l'Aar à Stilli (environ 13 km en amont de la confluence avec le Rhin à Koblenz) de la crue d'août 2007 aurait été plus fort de $270 \text{ m}^3/\text{s}$ sans le laminage de la crue du Kander dans le lac Thun (Fig. 14 de Wetter *et al.*, 2011). **Les crues historiques de la période 1268-1713** étant supérieures à $4911 \text{ m}^3/\text{s}$ à Bâle, un débit voisin de celui de la crue d'août 2007 ($4807 \text{ m}^3/\text{s}$), les valeurs brutes issues de Wetter *et al.* (2011) (source S16) pour cette période **seront 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**.

Il y a eu ensuite **les premiers « travaux de correction des eaux du Jura » sur la période 1868-1891** (cf. Figure 11). Ils ont consisté à dériver le cours de l'Aar pour le faire transiter par le lac de Biemme (Bielersee) et à accroître les capacités d'échange entre ce lac et les lacs de Neuchâtel (Neuenburgersee) et Morat (Murtersee). L'impact de ces travaux a été significatif et a fait l'objet d'études hydrauliques par la Commission d'Etude des Crues du Rhin (1978) et Wetter *et al.* (2011). La Figure 12 montre que l'effet de laminage est effectif à partir d'un débit de $2600 \text{ m}^3/\text{s}$. **Il augmente jusqu'à $600 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la seconde étude (correction n°1) et**

jusqu'à 1300 m³/s (correction n°2) pour la plus ancienne (CECR, 1978). 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.



Figure 11 : Premiers « travaux de correction des eaux du Jura » sur la période 1868-1891 : 1. Dérivation de l'Aar dans le lac de Biènné ; 2-3-4. Travaux de correction en amont-aval des lacs ; 5. Assèchement de marais (source www.bafu.admin.ch/dangersnaturels)

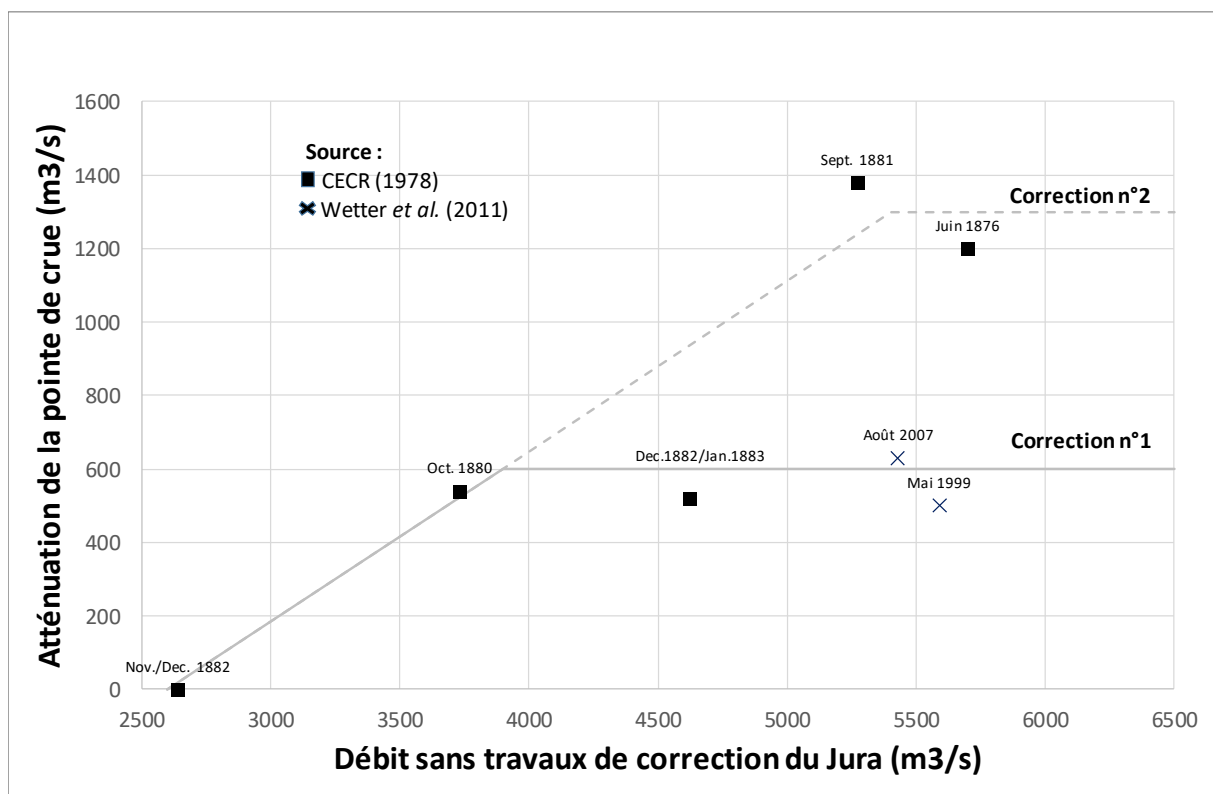


Figure 12 : Evaluation du laminage des travaux de correction du Jura (FJWC_Impact.xlsx)

La date exacte à partir de laquelle ces travaux ont eu un impact n'est pas facile à déterminer. La dérivation de l'Aar dans le lac de Biemme a été achevée en 1878, mais le canal de dérivation avait été volontairement réalisé de façon partielle avec une section profonde mais étroite, les ingénieurs prévoyant qu'en cas de prochaine crue, le lit serait « naturellement » agrandi. L'étude CECR (1978) a considéré que le laminage n'a été effectif que vers les années 1890, et a proposé de corriger les valeurs de débit observé pour les crues de 1876, 1880, 1881, 1882 et 1883 pour les ramener à un état postérieur aux travaux de correction des eaux du Jura, avec laminage.

De l'examen des débits de crue sur la période 1878-1891 (cf. *Tableau 2*), on note une série de crues significatives, supérieures à 3000 m³/s (en 1878, 1880, 1881, 1882, 1888 et 1890). Des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour statuer sur la date de mise en application de l'effet de laminage. **En l'absence d'éléments plus complets, nous corrigerons les débits de toutes les crues antérieures à 1890 pour les ramener à un état « post travaux du Jura ».**

Tableau 2 : Débit maximum annuel à Bâle sur la période 1878-1891 (source S19)

Année	1878	1879	1880	1881	1882	1883	1884
QIX annuel (m ³ /s)	3170	2380	3750	5280	4620	2560	1750
Année	1885	1886	1887	1888	1889	1890	1891
QIX annuel (m ³ /s)	2170	1860	1990	3320	2070	3320	2850

4.5 Longue série de débits de crues à Bâle

On dispose d'une reconstitution des plus fortes crues ayant touché le centre-ville depuis 1268 (cf. *Figure 10a*) :

- Période 1225-1713 : 27 crues ayant dépassé le seuil de 4911 m³/s (source S16) ;
- Période 1714-1807 : 11 crues ayant dépassé le seuil de 4322 m³/s (source S16).

Il existe par ailleurs 8 sources de données (S14, S15, S17, S18, S19, S20, S21 et S22) sur les débits du Rhin à Bâle (cf. *Figure 5*) sur la période 1808-2017. **Nous avons concaténé les données de la façon suivante** (cf. *Figure 10b*) :

- Période 1808-1816 : débit max annuel d'après la source (S22) (version papier d'un document de 1929, communiqué par le WSV) ;
- Période 1817-1969 : débit max annuel d'après la source (S19) (version papier d'un document de l'étude CECR (1972), communiquée par la DREAL Gd Est) ;
- Période 1970-1995 : débit max annuel d'après la source (S14) (données numériques communiquées par l'OFEV : Rhin à Schifflände) ;
- Période 1996-2004 : débit max annuel d'après la source (S20) (données numériques de l'étude IWG (2010), communiquées par le WSV) ;
- Période 2005-2017 : débit max annuel d'après la source (S21) (données numériques communiquées par l'OFEV : Rhin à Rheinhalle).

Nous avons vérifié la cohérence des débits entre sources, qui est bonne sauf sur trois points :

- Crue maxi de l'année en 1881 et 1910 : 4764 et 4040 m³/s (source S18), rapport EDF (2002), et 5280, 4300 m³/s pour les sources (S14), (S17), (S19) et (S22). Nous avons retenu la valeur commune donnée par les 4 sources cohérentes ;
- Crue maxi de l'année en 1924 : 2710 m³/s le 30/04/1924 pour la source (S17), étude CECR (1978), et 2950 m³/s le 15/06/1924 pour les sources (S14), (S19) et (S22). Nous avons retenu la valeur commune donnée par les 3 sources cohérentes ;

- Crue maxi de l'année 1944 (le 24/11/1944) : 3540 m³/s pour la source (S19), étude CECR (1972) et 3600 m³/s pour les sources (S14) et (S16). Nous avons retenu la valeur de 3600 m³/s (données de la source S14, OFEV, producteur de la station hydrométrique).

Nous avons considéré 3 jeux de données possibles (cf. *Figure 38*) : données brutes, données ramenées à l'état présent avec la prise en compte de la correction de la Kander en 1714 (-270 m³/s pour les crues antérieures à 1714) et au choix la correction n°1 ou 2 pour les travaux de correction du Jura (jusqu'à - 600 à -1300 m³/s pour les crues antérieures à 1890).

Un premier contrôle sur l'homogénéité de la séries des valeurs supérieures à un seuil sur plusieurs périodes (1225-2017 ; 1714-2017 ; 1808-2017) **montre qu'il est préférable d'utiliser la correction n°1** (cf. annexe 10.3). Un second contrôle sur l'homogénéité de la série continue des valeurs maximales annuelles de la période 1808-2017 montre qu'il subsiste une hétérogénéité, même après avoir introduit la correction n°1 (cf. annexe 10.3). **Une correction n°3 est rajoutée avec une majoration de +150 m³/s des débits antérieurs à 1977.**

4.6 Station hydrométrique du Rhin à Maxau

La superficie du bassin versant au droit de la station hydrométrique de Maxau est de 50 343 km². Elle se situe sur le cours du Rhin au point kilométrique PK 362.33, en rive droite, environ 300 m en aval de deux ponts (autoroute et voie ferrée).

D'après le cahier hydrométrique de la station (source S8), le zéro de l'échelle limnimétrique est resté au même niveau sur la période 1815-1973, qui est le même que celui actuel, à savoir : Z = 97.79 m.

Les premiers relevés systématiques de hauteur ont été réalisés à partir de 1815 (cf. *Figure 13*). D'après la source (S8), 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 hauts niveaux ont été relevés 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 (cf. *Figure 14*). Environ 850 jaugeages ont été réalisés depuis 1947, et 37 courbes de tarage ont été établies sur la période 1821-2018 (cf. *Figure 15*).

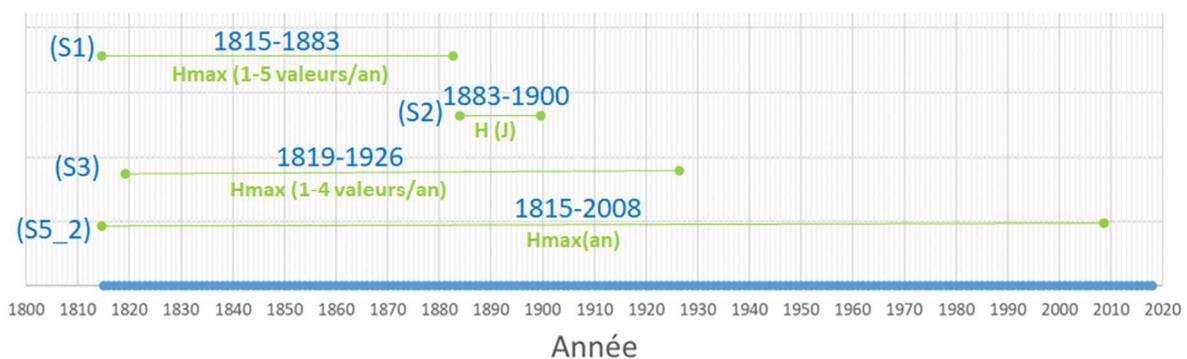


Figure 13 : Station hydrométrique du Rhin à Maxau : données de hauteur (Diapo1.png)

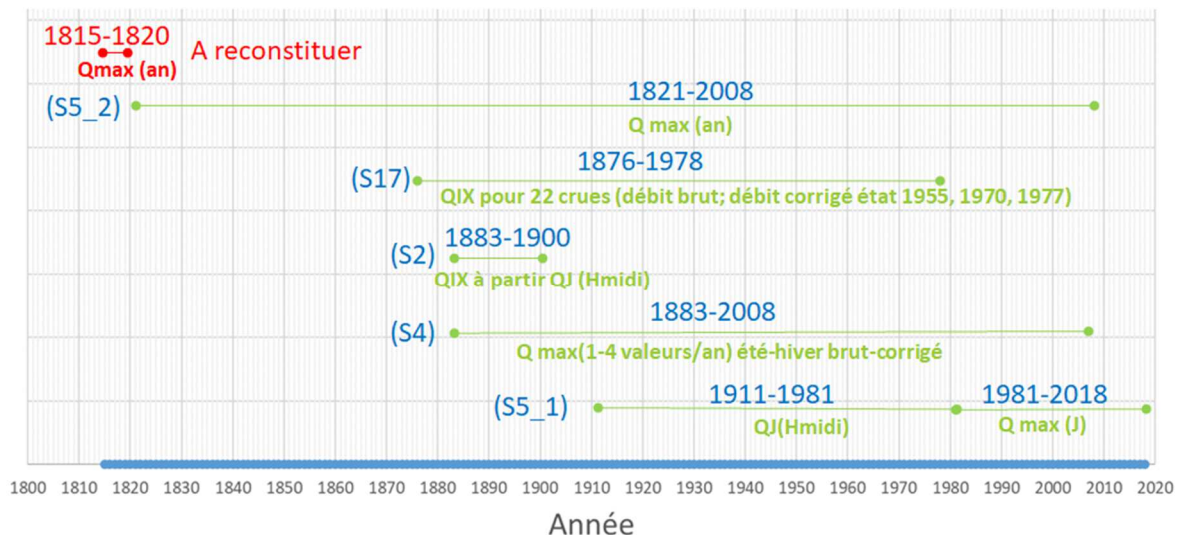


Figure 14 : Station hydrométrique du Rhin à Maxau : données de débit (Diapo2.png)

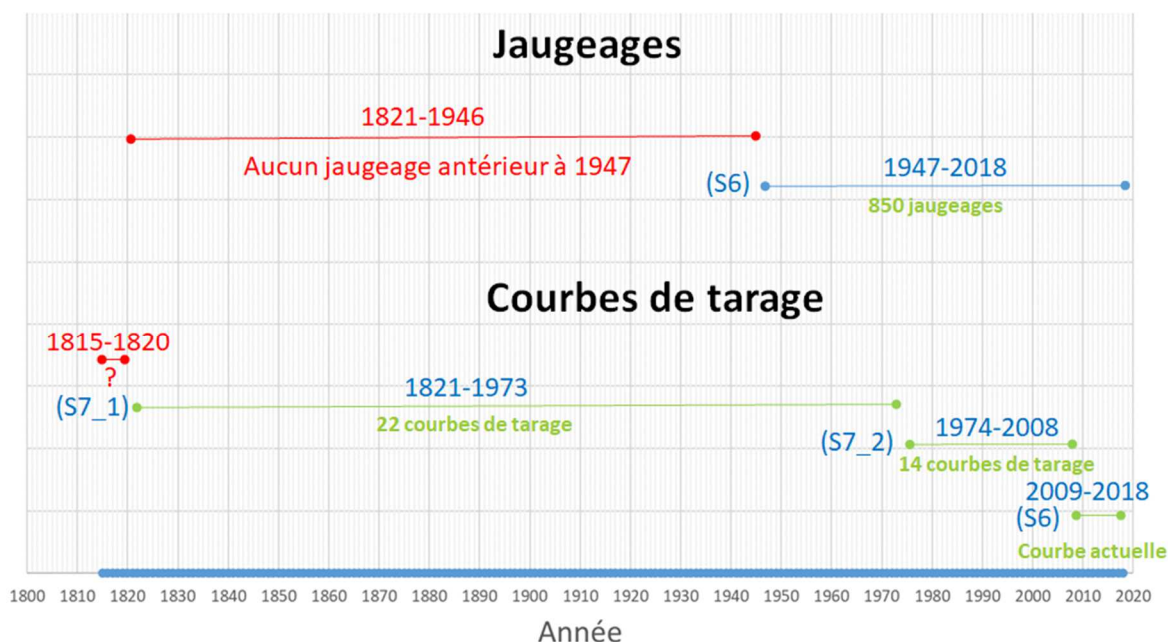


Figure 15 : Station hydrométrique du Rhin à Maxau : jaugeages et courbes de tarage (Diapo3.png)

4.7 Longue série de débits de crues à Maxau

La source (S32) « 2. Fleuves et rivières : Le Rhin », qui doit dater de 1859, mentionne (cf. pages 282-285) une série de 4 crues extraordinaires aux XVII^e et XVIII^e siècles : **1641**, 1758, 1778 et 1791, **la crue de 1641 étant la plus forte**. Elle donne une liste des plus fortes crues au XIX^e siècle (jusqu'à 1859) : **1801**, 1817, 1819, 1824, 1831, 1851 et 1852. Il est indiqué que la crue de **1801** a été aussi forte que celle de 1641, et que la crue de **1852** a dépassé celles de 1641 et 1801. La crue de 1824 est indiquée comme supérieure à toutes celles observées depuis 1801 (*a priori* non incluse). Le débit des crues de 1824 et 1852 étant respectivement de 4080 et 4170 m³/s, nous exploiterons les données de la source (S32) de la façon suivante. **Sur la période 1600-1814** (antérieure aux premiers relevés hydrométriques à Maxau, en 1815), **il y a eu 2 crues, en 1641 et 1801, supérieures à 4080 m³/s** (débit de la crue de 1824).

On dispose de 5 sources de données (S2, S4, S5_1, S5_2 et S17) sur les débits du Rhin à Maxau (cf. *Figure 14*) sur la période 1821-2018. Nous avons privilégié les données à pas de temps journalier (sources S2, S4 et S5_1), qui permettent une extraction de la valeur maximale annuelle et de la date associée. A noter que la source (S5_2) qui couvre la plus longue période ne donne pas la date du maximum dans l'année. Le maximum annuel est disponible sur l'année civile de 1821 à 1883, puis ensuite sur l'année hydrologique (novembre année $N-1$ – octobre année N).

Les données des sources (S5_2) et (S17) correspondent au maximum annuel, et celles de la source S4 aux 1-4 plus fortes valeurs par an. Nous avons exploité de préférence les données communiquées par le WSV, gestionnaire de la station hydrométrique, qui couvrent l'ensemble de la période (sources S5_1 et S5_2).

Nous avons concaténé les données de la façon suivante (cf. *Figure 16*) :

- Période 1815-1820 : reconstitution du débit max annuel à partir de la cote maximale sur l'année civile (janvier-décembre) (cf. source S5_2, données numériques communiquées par le WSV, cohérente avec la source S1, annuaire papier), et une estimation de la courbe de tarage de cette période (cf. source S7_1, plus ancienne courbe sur la période 1821-1827 et source S10_3, information sur l'évolution morphologique du Rhin entre 1820 et 1826);
- Période 1821-1882 : débit max annuel sur l'année civile (janvier-décembre) d'après la source (S5_2) (données numériques communiquées par le WSV) ;
- Période 1883-1900 : débit max annuel sur l'année hydrologique (novembre année $N-1$ – octobre année N) d'après la source (S2) ;
- Période 1901-1910 : débit max annuel sur l'année hydrologique d'après la source (S5_2)
- Période 1911-2018 : débit max annuel sur l'année hydrologique d'après la source (S5_1) (extraction du maximum annuel d'après les données numériques au pas de temps journalier communiquées par le WSV).

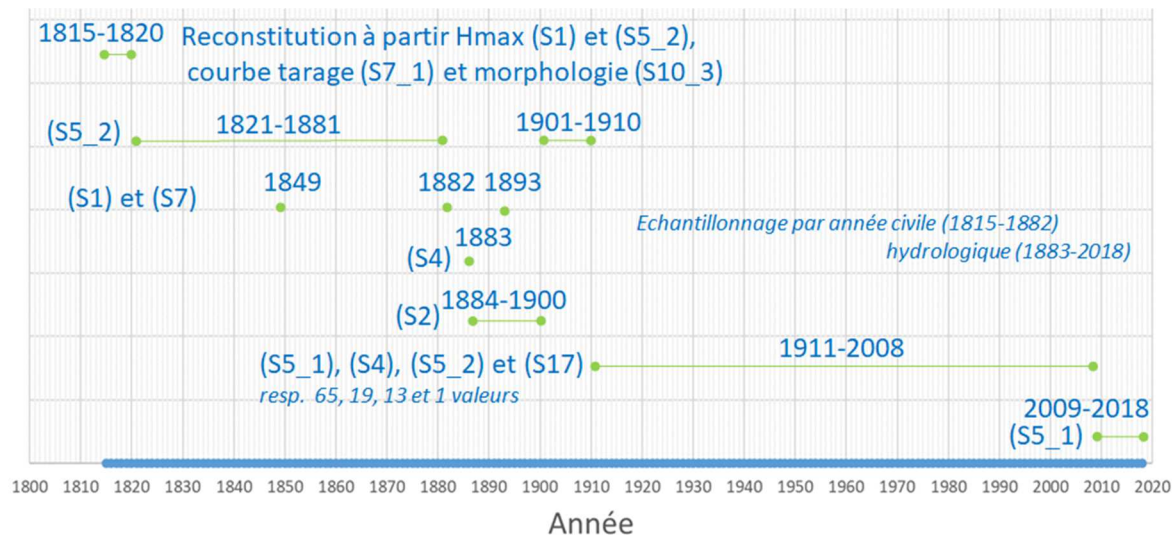


Figure 16 : Débits de crue du Rhin à Maxau : valeurs maximales annuelles sur la période 1821-2018 (Diapo2b.png ; fichiers de données tab_Q_Maxau_1821_2018.xlsx, VerificationCourbesTarageMaxau.xlsx et QIX_Maxau.xlsx)

La série de débits de crue a été corrigée pour raisonner sur un même état de référence des conditions hydrauliques de propagation des crues, celui de 1977. Nous avons introduit une correction N°1, qui reprend les résultats de l'étude CECR (1978) pour convertir les débits de la période 1891-1977 à l'état de référence de 1977, et un tableau produit par LUBW (2019)

qui donne l'effet du laminage des zones de rétention des crues sur la période 1982-2018 (cf. annexe 10.4). Une hypothèse a été faite sur la correction à apporter aux débits de la période 1815-1890.

Le contrôle sur la série continue de valeurs maximales annuelles sur la période 1815-2018 montre une forte hétérogénéité. Après la correction N°1, la série de Maxau est de meilleure qualité, mais comme pour la série de Bâle, **il est nécessaire d'introduire une correction supplémentaire de +150 m³/s sur la période 1815-1976 pour avoir une série homogène** (cf. annexe 10.4).

5 Evaluation des incertitudes sur les débits des longues séries de Bâle et Maxau

5.1 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) disponible. 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 H ;
- La configuration hydraulique du tronçon englobant la station hydrométrique : largeur B , pente S , strickler K .

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 :

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

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

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 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, exprimée en pourcentage du débit vaut $\pm 5\%$ (ADCP), $\pm 7\%$ (moulinet sur l'ensemble de la section), $\pm 10\%$ (moulinet à $0.6H$ et en surface), $\pm 15\%$ (moulinet en surface), $\pm 20\%$ (flotteurs). En considérant que cette incertitude correspond à l'intervalle de confiance à 95%, la largeur de l'intervalle correspond à $\pm 2u_{Q_i}$. 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 résiduelle 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 :

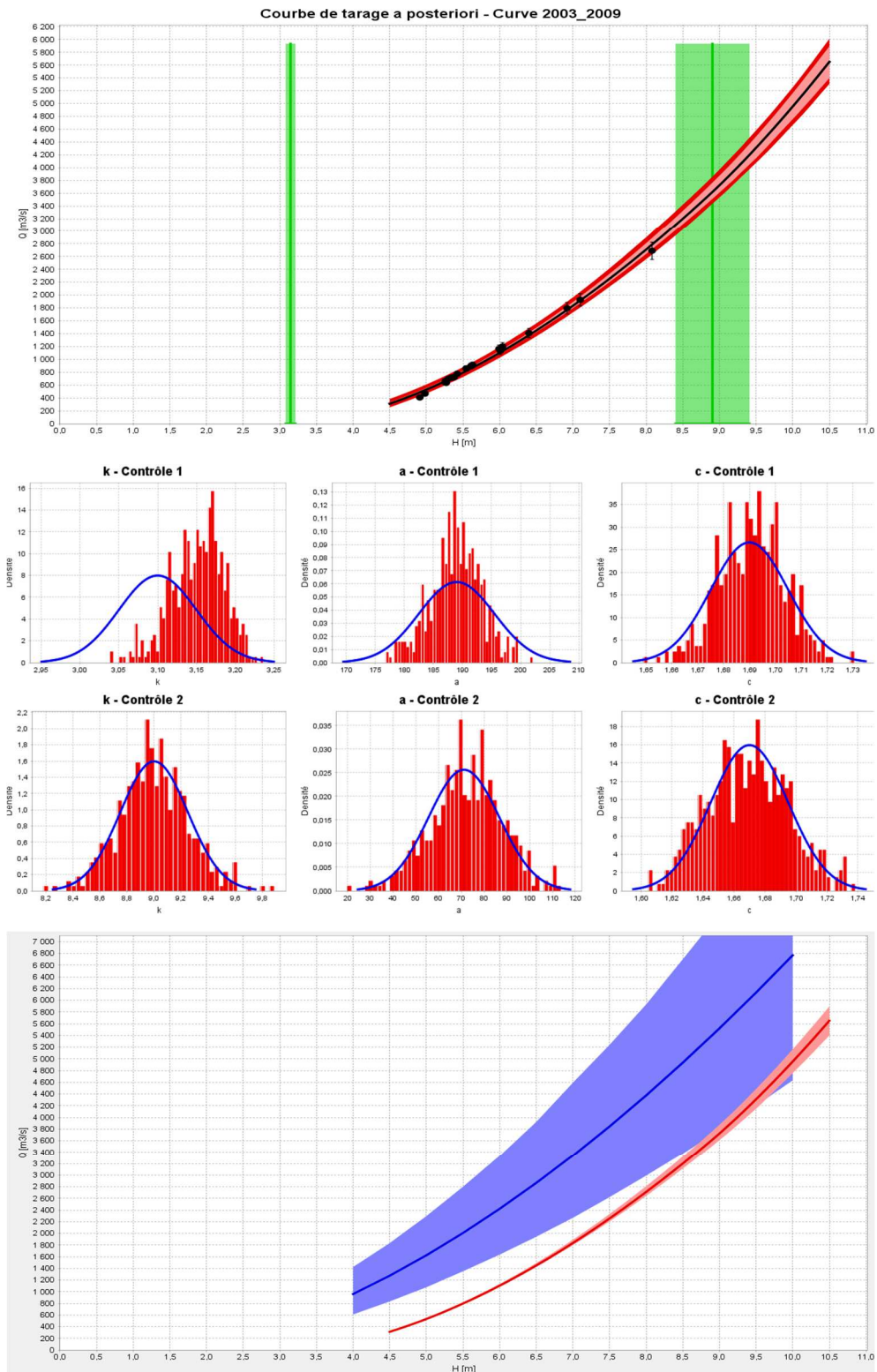


Figure 17 : Exemple de sorties graphiques du logiciel BaRatinAGE : 1/ courbe de tarage a posteriori (avec en rose l'incertitude paramétrique, en rouge l'incertitude totale) ; 2/ la distribution a priori (en bleu) et a posteriori (en rouge) de chacun des paramètres de la courbe de tarage ; 3/ la comparaison des courbes de tarage a priori (en bleu) et a posteriori (en rouge)

5.2 Estimation des incertitudes sur les débits de crue à Bâle

Comme indiqué en section 4.3, plusieurs emplacements ont été retenus au cours du temps pour estimer les débits du Rhin à Bâle. Des informations sur les plus fortes crues de la période 1225-1807 ont été reconstituées par Wetter *et al.* (2011), à partir des niveaux atteints dans la vieille ville (section 4.4), proche de la station hydrométrique de Bâle/Schiffhände. Cette dernière a été implantée en 1808 et a été la station de référence jusque 1933, date à laquelle la mise en service du barrage de Kembs a influencé la relation hauteur-débit. La période 1934-1993 est assez difficile à suivre, aucun jaugeage n'ayant pu être récupéré ni de courbes de tarage. 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.

Nous présentons ici les principaux résultats de l'analyse des courbes de tarage à Bâle, **le détail étant reporté en Annexe 10.3.**

Nous avons commencé par **la période récente 1994-2017** (Bâle/Rheinhalle) pour laquelle on dispose de la topographie détaillée de la section d'écoulement et d'une série de 90 jaugeages. La courbe BaRatin obtenue a une bonne précision, avec une incertitude sur les débits de crue de $\pm 7\%$.

Aucun jaugeage n'ayant pu être obtenu sur la période 1934-1993, nous avons poursuivi l'analyse sur la période 1867-1933 (Bâle/Schiffhände), pour laquelle une série de profils en travers (en 1914, 1916, 1918, 1922, 1930) et de profils en long (en 1830, 1852, 1895, 1902, 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 $[-12; +26\%]$, $[-5; +9\%]$, $[-7; +10\%]$. 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 $[-7; +10\%]$.

Sur la période antérieure 1808-1866, qui correspond à celle de l'activité de la station hydrométrique de Bâle/Schiffhände, mais sans jaugeage, nous avons repris les *valeurs a posteriori* de la courbe BaRatin de la période 1867-1909 qui a suivi, en dégradant l'information sur certains paramètres de la courbe de tarage. La courbe BaRatin obtenue a une incertitude de $[-18; +22\%]$, étendue à $[-18 ; +26\%]$ pour rester supérieure à celle de la période 1867-1909. A noter (cf. *Figure 59*) la bonne cohérence entre la courbe BaRatin et les couples hauteur-débit reconstitués par Wetter *et al.* (2011) pour trois niveaux de submersion de la vieille ville.

Sur la période antérieure 1225-1807, pour laquelle 38 crues ont été recensées (cf. *Figure 10*), nous avons fait une série d'hypothèses sur la valeur des paramètres de la courbe de tarage, qui conduisent à une incertitude de $[-35 ; +44\%]$.

Il reste enfin la période intermédiaire 1934-1993 pour laquelle aucun jaugeage ni courbe de tarage n'a pu être récupéré. Sur les deux périodes qui encadrent 1934-1993, à savoir 1910-1933 et 1994-2017, 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 ($\pm 19\%$).

Récapitulatif sur les incertitudes estimées sur les débits du Rhin à Bâle de 1225 à 2017

Au final, les valeurs retenues pour les incertitudes sont résumées dans le *Tableau 3* et la *Figure 18*.

Tableau 3 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Bâle

Période	1225-1807	1808-1866	1867-1909	1910-1933	1934-1993	1994-2017
Erreur multiplicative	[-35% ; +44%]	[-18% ; +26%]	[-12% ; +26%]	[-7% ; +10%]	[-20% ; +20%]	[-7% ; +7%]

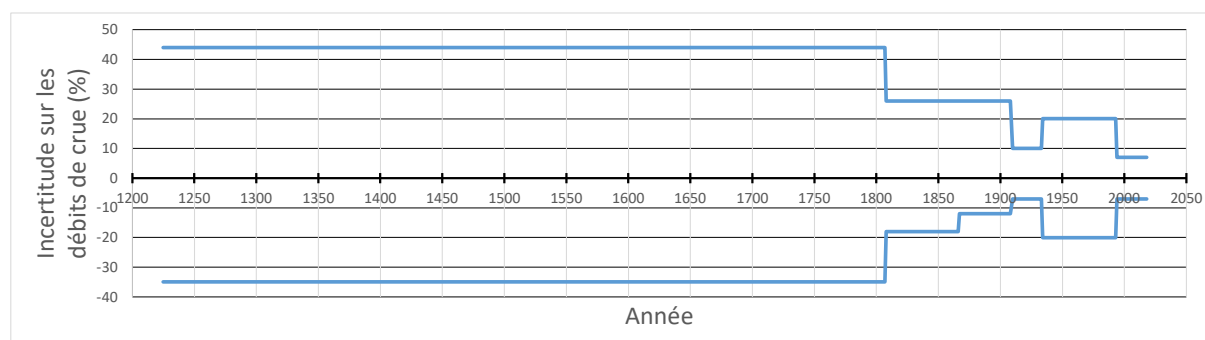


Figure 18 : Intervalle de confiance à 95% des débits du Rhin à Bâle de 1225 à 2017 (IncertitudesDebitsBale.xlsx)

Des incertitudes existent sur la correction à apporter à la série pour tenir compte des travaux de correction des eaux du Jura en 1890. Nous avons vu (cf. *Figure 40*) que la correction N°1, basée sur une modélisation hydraulique récente (Wetter *et al.*, 2011), est préférable à la correction N°2 de l'étude CECR (1978). Cette correction N°1 réduit de 600 m³/s les débits des crues antérieures à 1890 et supérieures à 3900 m³/s (cf. *Figure 12*). En notant le débit corrigé $Q^* = Q_{brut} (1 + c)$, nous rappelons dans le *Tableau 4* les valeurs retenues sur le coefficient de correction c , pour les 10 plus fortes crues de la période 1808-1889.

Tableau 4 : Valeurs du coefficient de correction c (en %) pour les 10 plus fortes crues à Bâle sur la période 1808-1889

Crue	13/06/1876	18/09/1852	03/09/1881	06/07/1817	28/12/1882
Q_{obs}	5700	5640	5280	4790	4620
$Q_{corr.}$	5100	5040	4680	4190	4020
c	-0,11	-0,11	-0,11	-0,13	-0,13
$[1.5 c ; 0.5 c]$	[-0.16 ; -0.05]	[-0.16 ; -0.05]	[-0.17 ; -0.06]	[-0.19 ; -0.06]	[-0.19 ; -0.06]
$Q^*(1.5c)$	4800	4740	4380	3890	3720
$Q^*(0.5c)$	5400	5340	4980	4490	4320
$\Delta Q^*/Q_{corr.}$	±6%	±6%	±6%	±6%	±7%
Crue	26/08/1824	21/12/1819	02/08/1851	05/09/1831	28/10/1880
Q_{obs}	3960	3930	3900	3890	3750
$Q_{corr.}$	3360	3330	3300	3295	3219
c	-0,15	-0,15	-0,15	-0,15	-0,14
$[1.5 c ; 0.5 c]$	[-0.23 ; -0.08]	[-0.23 ; -0.08]	[-0.23 ; -0.08]	[-0.23 ; -0.08]	[-0.21 ; -0.07]
$Q^*(1.5c)$	3060	3030	3000	2997	2954
$Q^*(0.5c)$	3660	3630	3600	3592	3485
$\Delta Q^*/Q_{corr.}$	±9%	±9%	±9%	±9%	±8%

Si on fait l'hypothèse que l'incertitude u_c sur le coefficient de correction est de $\pm 50\%$, on voit que l'incertitude associée sur le débit corrigé varie entre $\pm 6\%$ et $\pm 9\%$. L'ordre de grandeur est correct pour une modélisation hydraulique. Avec une incertitude $u_c = \pm 100\%$, l'incertitude sur les débits corrigés est doublée (entre $\pm 12\%$ et $\pm 18\%$) et semble un peu forte.

Nous croisons pour chaque débit de crue corrigé Q^* les deux incertitudes liées au débit brut Q et au coefficient de correction c . En supposant que Q suit une loi normale $N(\bar{Q}; u_Q)$ et c suit une loi normale $N(\bar{c}; u_c)$, et que les deux variables sont indépendantes, on a :

$$\begin{aligned} \text{Var}(Q^*) &= \text{Var}((1+c)Q) \\ &= \text{Var}(1+c)\text{Var}(Q) + (1+E(c))^2\text{Var}(Q) + E(Q)^2\text{Var}(1+c) \\ &= \text{Var}(c)\text{Var}(Q) + (1+E(c))^2\text{Var}(Q) + E(Q)^2\text{Var}(c) \\ \left(\frac{u_{Q^*}}{E(Q^*)}\right)^2 &= \left(1 + \left(\frac{u_c}{1+E(c)}\right)^2\right) \left(\frac{u_Q}{E(Q)}\right)^2 + \left(\frac{u_c}{1+E(c)}\right)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Les valeurs retenues pour les incertitudes sur la série des débits corrigés (correction N°1) sont résumées dans le *Tableau 5* et la *Figure 19*. L'incertitude additionnelle sur la correction ne s'applique que pour les débits de crue supérieurs à 2600 m³/s, qui font l'objet d'une correction.

Tableau 5 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Bâle après correction pour tenir compte des travaux du Jura

Période	1225-1713	1714-1807	1808-1866	1867-1889	1890-1909	1910-1933	1934-1993	1994-2017
Erreur u_Q	$\pm 40\%$	$\pm 40\%$	$\pm 22\%$	$\pm 19\%$	$\pm 19\%$	$\pm 9\%$	$\pm 20\%$	$\pm 7\%$
Correction c	-20%	-15%	-15%	-15%	0	0	0	0
Erreur u_c	$\pm 50\%$	$\pm 50\%$	$\pm 50\%$	$\pm 50\%$	0	0	0	0
Erreur u_{Q^*}	$\pm 48\%$	$\pm 41\%$	$\pm 24\%$	$\pm 21\%$	$\pm 19\%$	$\pm 9\%$	$\pm 20\%$	$\pm 7\%$

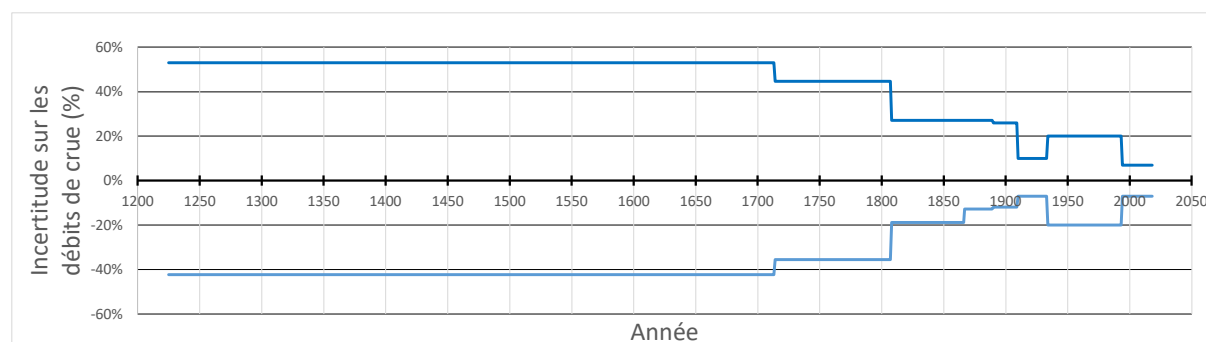


Figure 19 : Intervalle de confiance à 95% des débits du Rhin à Bâle de 1225 à 2018 : série corrigée (IncertitudesDebitsBale.xlsx)

5.3 Estimation des incertitudes sur les débits de crue à Maxau

Comme indiqué en section 4.6, les premiers relevés de hauteur à Maxau ont débuté en 1815, et on dispose de débits de crue en continu depuis 1821. Une série de 37 courbes de tarage ont été établies de 1821 à 2018. Nous présentons ici les principaux résultats de l'analyse des courbes de tarage à Maxau, **le détail étant reporté en Annexe 10.6.**

Nous avons commencé par **la période récente 1947-2017** pour laquelle on dispose de la topographie détaillée de la section d'écoulement et d'une série de 850 jaugeages. Une procédure de segmentation a permis de décomposer cette période 1947-2017 en 11 sous-périodes, au lieu des 37 courbes de tarage officielles. Une variante du modèle BaRatin (modèle SPD) 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_l du fonds du lit mineur pour les 11 sous-périodes. On note un rehaussement d'environ 50 cm de 1947 à 2017, qui est cohérent avec la source (S13_1) sur le suivi morphologique du lit du Rhin.

Sur la période antérieure 1815-1946, sans aucun jaugeage, nous avons repris les *valeurs a posteriori* de la courbe BaRatin de la période 1947-1968 qui a suivi, en dégradant l'information sur certains paramètres de la courbe de tarage, et en intégrant les informations disponibles sur l'évolution morphologique du lit du Rhin. Nous avons distingué 6 sous-périodes considérées comme homogènes : 1815-1820, 1821-1839, 1840-1874, 1875-1904, 1905-1929 et 1930-1946. 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 que les courbes BaRatin sont assez nettement inférieures aux courbes de tarage officielles sur la période 1840-1946 (-13 à 42% pour les cotes 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.

Récapitulatif sur les incertitudes estimées sur les débits du Rhin à Maxau de 1815 à 2018

Au final, les valeurs retenues pour les incertitudes issues des courbes de tarage sont résumées dans le *Tableau 6* et la *Figure 20*.

Tableau 6 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Maxau

Période	1815-1839	1840-1946	1947-1968	1969-2018
Erreur multiplicative u_Q	[-37% ; +47%]	[-27% ; +37%]	[-5% ; +4%]	[-3% ; +2%]

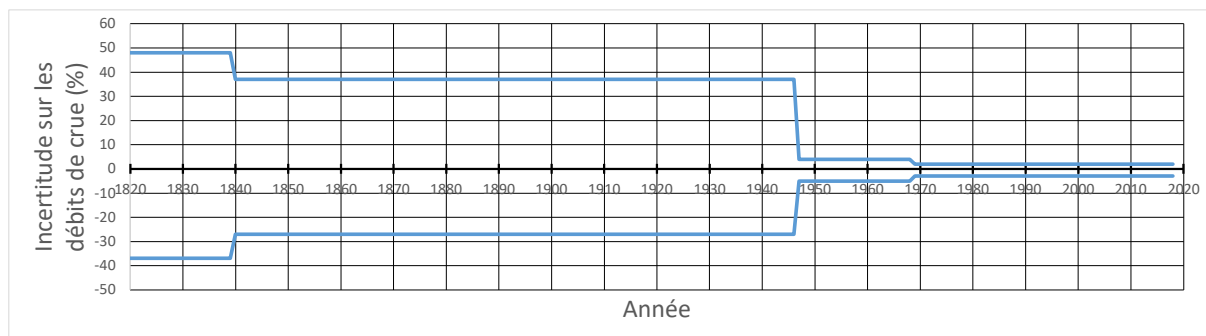


Figure 20 : Intervalle de confiance à 95% des débits du Rhin à Maxau de 1815 à 2018 : série brute (IncertitudesDebitsMaxau.xlsx)

Des incertitudes existent sur la correction à apporter à la série pour ramener tous les débits à un même état de référence, celui de 1977. En notant le débit corrigé $Q^* = Q_{brut} (1 + c)$, nous rappelons les valeurs retenues sur le coefficient de correction c , et des hypothèses sont faites sur l'incertitude associée.

Sur la période postérieure à 1977, on peut considérer que le **coefficient de correction c** du *Tableau 21* est **précis à $\pm 50\%$ près**. Cela donne (cf. *Tableau 7*) une incertitude sur le débit corrigé de $\pm 1\%$ à $\pm 6\%$, ce qui est possible avec un modèle hydraulique calé sur des crues récentes.

Tableau 7 : Valeurs du coefficient de correction c (en %) pour les crues à Maxau depuis 1982 ayant fait l'objet de laminage (LUBW, 2019)

Crue	Mars 1988	Février 1990	Février 1999	Mai 1999	Août 2007	Juin 2013	Janvier 2018
Q_{obs}	4080	4200	4090	4440	4060	4240	4060
$Q_{corr.}$	4345	4730	4490	4740	4160	4620	4140
c	6.5	12.6	9.8	6.8	2.5	9.0	2.0
$[0.5 c ; 1.5 c]$	[3.25 ; 9.75]	[6.30 ; 18.9]	[4.90 ; 14.7]	[3.40 ; 10.2]	[1.25 ; 3.75]	[4.50 ; 13.5]	[1.0 ; 3.0]
$Q^*(0.5c)$	4212,5	4465	4590	4110	4430	4100	4290
$Q^*(1.5c)$	4477,5	4995	4890	4210	4810	4180	4690
$\Delta Q^*/Q_{corr.}$	$\pm 3\%$	$\pm 6\%$	$\pm 3\%$	$\pm 1\%$	$\pm 4\%$	$\pm 1\%$	$\pm 4\%$

Sur la période 1891-1968, nous avons reporté sur la *Figure 21* les débits modélisés suivant l'état 1955 et 1977 de l'étude CECR (1978). Pour un débit $Q_{brut} = 4000 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit corrigé vaut $Q^* = 4400 \text{ m}^3/\text{s}$, et l'intervalle de confiance à 95% issu de la droite de régression est [4118 ; 4682], soit en terme de coefficient de correction $c = 0.10$ et un intervalle [0.03 ; 0.17]. Nous retenons une incertitude de $\pm 70\%$ sur le coefficient de correction. **Sur la période antérieure 1815-1890, une incertitude un peu large de $\pm 100\%$ a été retenue** sur le coefficient c (cf. évolution du temps de propagation - *Figure 43* et le résultat des tests sur l'homogénéité de la série - *Figure 44*).

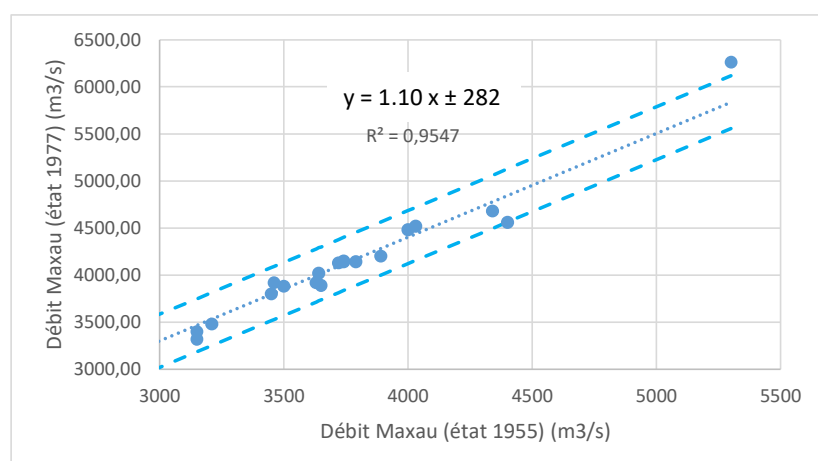


Figure 21 : Correction des débits du Rhin à Maxau pour revenir à l'état de 1977 (simulations étude CECR, 1978)(AttenuationCrues.xlsx)

Nous croisons ensuite pour chaque débit de crue les deux incertitudes u_Q et u_C , de la même façon que pour la série de Bâle. Les valeurs retenues pour les incertitudes sur la série des débits corrigés (correction N°3, cf. section 4.7) sont résumées dans le *Tableau 8* et la *Figure*

22. L'incertitude additionnelle sur la correction ne s'applique que pour les débits de crue supérieurs à 2600 m³/s, qui font l'objet d'une correction.

Tableau 8 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Maxau ramenées à l'état de référence en 1977

Période	1815-1839	1840-1890	1891-1946	1947-1968	1969-1976	1977-2018
Erreur u_Q	±42%	±32%	±32%	±5%	±3%	±3%
Correction c	16%	16%	10%	10%	10%	2.5 à 20%
Erreur u_c	±100%	±100%	±70%	±70%	±70%	±50%
Erreur u_{Q^*}	±45%	±35%	±33%	±9%	±8%	±5%

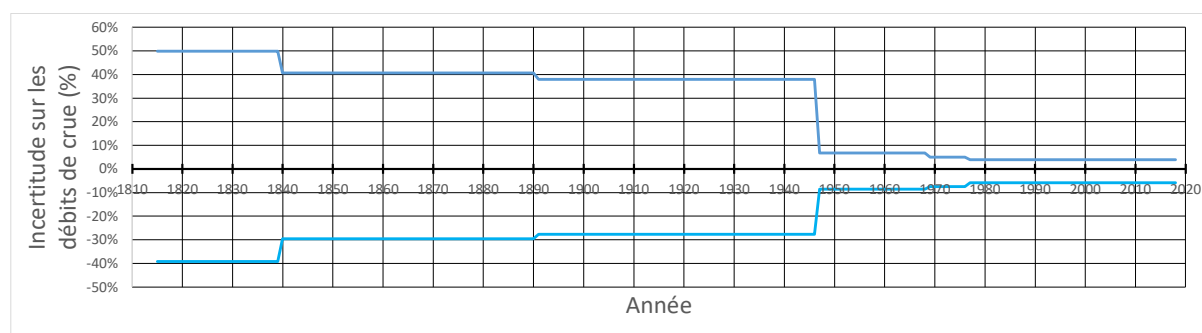


Figure 22 : Intervalle de confiance à 95% des débits du Rhin à Maxau de 1815 à 2018 : série corrigée (IncertitudesDebitsMaxau.xlsx)

6 Analyse de la distribution des crues à Bâle et Maxau

6.1 Méthode HBAY

HBAY est un programme d'ajustement des paramètres d'une loi de valeurs extrêmes, à partir d'un échantillon de valeurs maximales. Il a été développé par B. Renard (INRAE Lyon-Villeurbanne) et reprend la méthodologie proposée par Neppel *et al.* (2010) et Renard (2018).

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 avec HBAY

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 :

$$V(\mathbf{y}) = p(\mathbf{y}|\theta) = \prod_{i=1}^n f(y_i) = \prod_{i=1}^n p(y_i|\theta) \quad (4)$$

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} :

$$p(\theta|\mathbf{y}) \propto V(\mathbf{y})p(\theta) \quad (5)$$

Le logiciel 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 23).

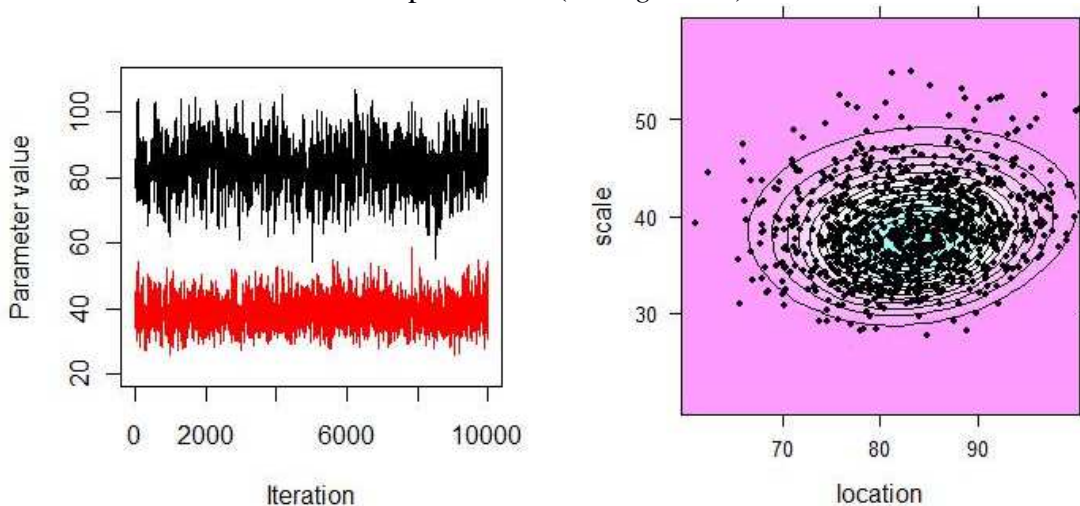
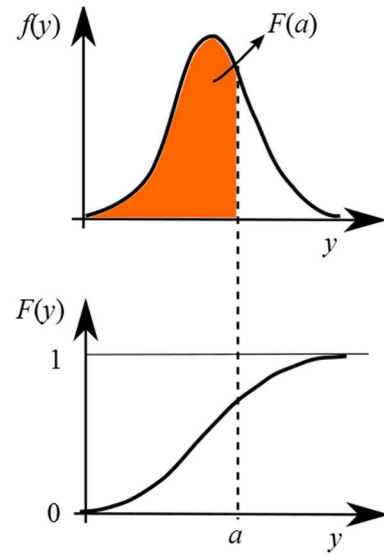


Figure 23 : Exemple à gauche de simulations MCMC successives de deux paramètres θ_1 et θ_2 (respectivement paramètres d'échelle et de position). Report à droite des valeurs simulées et tracé possible de contours associés à une probabilité donnée (NoticeHBAY_2018.docx)

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.



L'approche « classique » pour tenir compte des incertitudes consiste à raisonner sur la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la distribution des crues. Par exemple, pour le risque d'inondation concernant des installations nucléaires en France, c'est la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 70% (majorée ensuite de +15%) qui est considérée. Le choix de la largeur de l'intervalle de confiance (70%, 95%...) reste subjectif.

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

$$p(z|y) = \int p(z|\theta)p(\theta|y)d\theta \quad (6)$$

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 peut être voisine de l'estimation associée au jeu optimal θ^* ou au contraire être plus forte (cf. Figure 24).

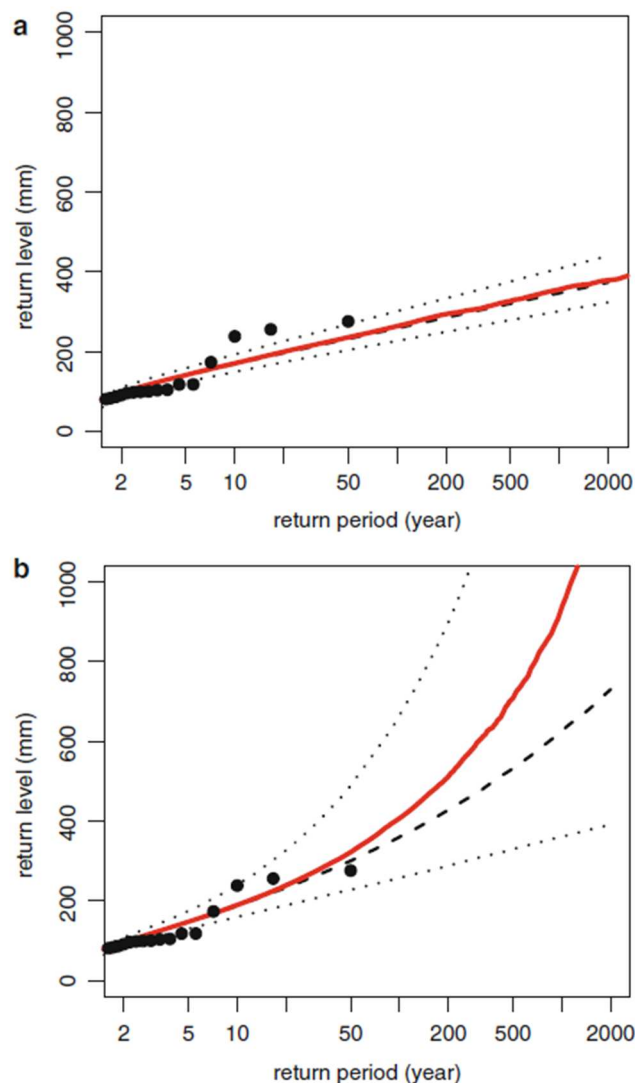


Figure 24 : Comparaison de la distribution max post associée au jeu optimal de paramètre θ^* (en noir trait tireté) et de la distribution prédictive (en rouge). L'intervalle de confiance à 90% est représenté en lignes pointillées : (a) loi de Gumbel ; (b) loi GEV (repris de Renard et al., 2013a : Fig. 3.7)

6.2 Distribution des crues à Bâle

Série de données disponibles et incertitudes associées

On dispose à Bâle d'une chronique continue de valeurs maximales annuelles sur la période 1808-2017 et d'une collection de crues supérieures à un seuil sur la période 1225-1807 (cf. *Figure 38* et *Figure 39*), avec un seuil de débit égal respectivement à 4911 et 4322 m³/s sur les sous-périodes 1225-1713 et 1714-1807. Compte-tenu des travaux réalisés sur le bassin du Rhin en Suisse (correction de la Kander en 1714 et correction du Jura en 1890), la série de débits a été corrigée pour ramener tous les valeurs maximales à un même état de référence :

- Période 1225-1713 : 27 crues avec $Q > S_1 = 4911 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{(corrigé)}} = Q_{\text{(brut)}} - dQ_1 - dQ_2$
avec : $dQ_1 = 270 \text{ m}^3/\text{s}$ (correction Kander en 1714) ;
 $dQ_2 = 600 \text{ m}^3/\text{s}$ (travaux du Jura en 1890)
- Période 1714-1807 : 11 crues avec $Q > S_2 = 4322 \text{ m}^3/\text{s}$ $Q_{\text{(corrigé)}} = Q_{\text{(brut)}} - dQ_2$
- Période 1808-1890 : 83 crues maximales annuelles $Q_{\text{(corrigé)}} = Q_{\text{(brut)}} - dQ_3$
avec : $dQ_3 = 0$ si $Q < 2600 \text{ m}^3/\text{s}$
 $dQ_3 = (Q-2600) (6/13)$ si $2600 < Q < 3900 \text{ m}^3/\text{s}$
 $dQ_3 = 600$ si $Q > 3900 \text{ m}^3/\text{s}$
- Période 1891-2017 : 128 crues maximales annuelles
Pas de correction (crues postérieures aux travaux réalisés sur le Rhin en Suisse)

Compte-tenu du fait que cette série de débits corrigés apparait comme fortement hétérogène (cf. section 10.3 : *Tableau 18* et *Figure 41* - correction N°1) avec un saut de 150 m³/s en 1976, tous les débits de la période 1808-1976 et les seuils S_1 et S_2 des périodes 1225-1713 et 1714-1807 ont été majorés d'une valeur $dQ_4 = 150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour les années de la période historique sans crue recensée, nous avons considéré que le débit maximum annuel corrigé était inférieur à 4191 m³/s ($S_1 - dQ_1 - dQ_2 + dQ_4$: période 1225-1713) ou 3872 m³/s ($S_2 - dQ_2 + dQ_4$: période 1714-1807).

Les incertitudes associées aux années où le débit maximum annuel est connu ont été estimées d'après les jaugeages disponibles et des informations *a priori* sur les paramètres hydrauliques de la courbe de tarage. Le *Tableau 9* rappelle les incertitudes estimées en section 5.2 pour différentes périodes.

Tableau 9 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Bâle

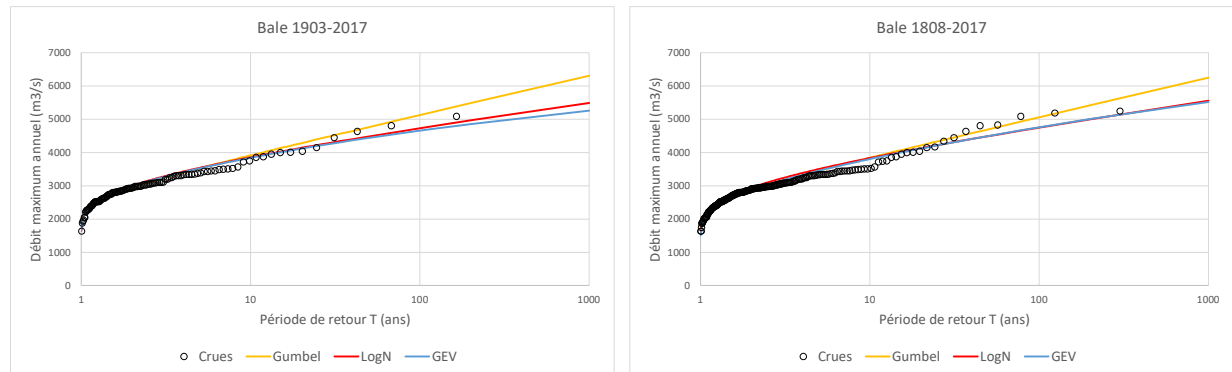
Période	1225-1713	1714-1807	1808-1866	1867-1889	1890-1909	1910-1933	1934-1993	1994-2017
Erreur multiplicative	±48%	±41%	±24%	±21%	±19%	±9%	±20%	±7%

Nous présentons les résultats de l'analyse de la distribution des crues obtenus avec le logiciel HBAY pour quatre périodes :

- Période 1903-2017 : période « récente », non impactée par les travaux de correction du Rhin. L'année 1903 correspond au début de la série utilisée comme référence dans le rapport allemand produit par IWG (2010) ;
- Période 1808-2017 : rajout d'un siècle de données (XIX^e siècle), à l'aide de la station hydrométrique de Bâle qui existe depuis 1808 ;

- Période 1714-2017 : rajout d'une collection de crues sur le XVIII^e siècle, à l'aide de documents historiques sur les inondations du centre ancien de Bâle (Wetter *et al.*, 2011). L'année 1714 correspond à la date de correction de la Kander.
- Période 1225-2017 : rajout d'une collection de crues sur 5 siècles supplémentaires (XIII^e au XVII^e siècles), antérieures à la date de correction de la Kander.

Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats avec trois lois de probabilité différentes : GEV, Gumbel et LogNormale (cf. *Figure 25*). La loi de Gumbel donne systématiquement des quantiles de crue plus forts et surestime la distribution empirique. Les lois GEV et LogNormale donnent des résultats voisins. Par la suite, nous continuerons avec la loi GEV qui est la loi adaptée aux valeurs extrêmes.



*Figure 25 : Distribution des crues du Rhin à Bâle, avec trois lois : GEV, Gumbel et LogNormale : 1/ période 1903-2017 ; 2/ période 1808-2017 (*Bale*Error3Lois.xlsm)*

Le *Tableau 10* donne les quantiles obtenus avec une loi GEV pour chacune de ces quatre périodes. Les estimations de la crue Q_{10} sont voisines, de l'ordre de 3800 m³/s. Les estimations des crues Q_{100} et Q_{1000} vont en augmentant, au fur et à mesure que la période est étendue. **La crue Q_{100} vaut environ 4800 m³/s, et la crue Q_{1000} environ 5800 m³/s (plage de variation respectivement de $\pm 5\%$ et $\pm 9\%$).**

Tableau 10 : Quantiles de crue (m³/s) du Rhin à Bâle avec une loi GEV : valeur modale et bornes de l'intervalle de crédibilité à 95% (QuantilesHBayBale.xlsm)

Période	Q10	Q100	Q1000	Q1500 ²
1903-2017	3842 [3620 ; 4151]	4660 [4335 ; 5441]	5263 [4781 ; 6720]	5352 [4841 ; 6976]
1808-2017	3805 [3614 ; 4083]	4761 [4494 ; 5318]	5522 [5110 ; 6450]	5640 [5200 ; 6708]
1714-2017	3908 [3627 ; 4149]	5093 [4572 ; 55589]	6201 [5339 ; 7223]	6390 [5443 ; 7536]
1225-2017	3883 [3718 ; 4236]	5098 [4834 ; 5864]	6274 [5860 ; 7795]	6479 [6026 ; 8152]

On voit sur la *Figure 26* une comparaison de la distribution empirique avec l'estimation de la distribution des crues par une loi GEV (valeur modale et intervalle de crédibilité à 95%). Les ajustements, sans être d'excellente qualité, sont plutôt corrects. On notera pour la plus longue période 1225-2017 une difficulté à représenter la distribution empirique des plus fortes crues, avec un plafonnement des huit plus fortes valeurs à 5687 m³/s (débit brut = 6407 m³/s) survenues entre 1342 et 1673. L'information sur le niveau maximum atteint à Bâle est

² Valeur de référence pour les digues de canaux ou rivières canalisées, arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, Journal officiel de la République française du 29 août 2018

disponible depuis 1641 (cf. marques de crue à Schönbeinhaus). Pour les crues antérieures, l'étude réalisée par Wetter *et al.* (2011) a estimé le débit minimum nécessaire pour atteindre un point déjà élevé du centre ancien de Bâle, sans disposer d'information sur l'extension maximale de la zone inondée.

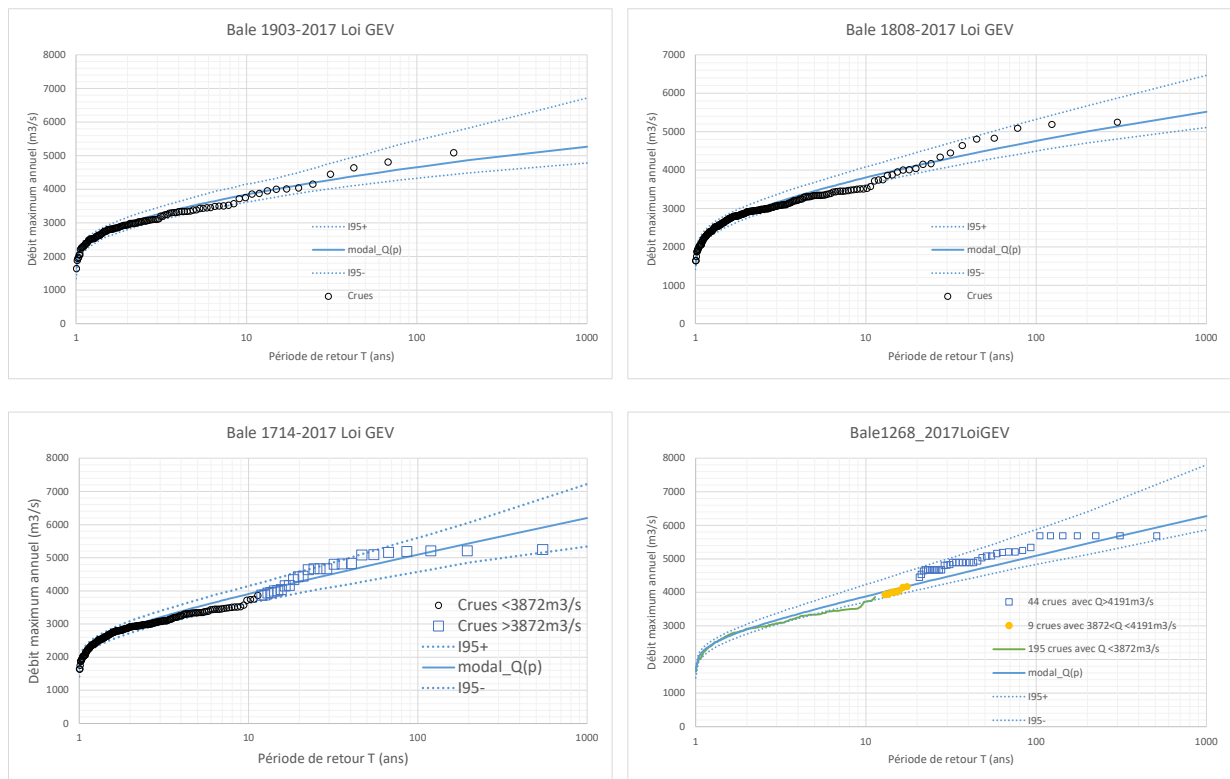


Figure 26 : Distribution des crues du Rhin à Bâle, avec une loi GEV : 1/ période 1903-2017 ; 2/ période 1808-2017 ; 3/ période 1714-2017 ; 4/ période 1225-2017 (*Bale*_2017_GEVError.xlsm)

La Figure 27 donne une illustration graphique des valeurs de quantiles de crue, avec la valeur modale issue du jeu de paramètres optimal θ^* , l'intervalle de crédibilité à 95% [$Q(0.025)$; $Q(0.975)$], la valeur médiane $Q(0.50)$ et la valeur $Q(\text{prédictif})$ issue de la distribution prédictive (cf. section 6.1). Comme déjà indiqué pour le Tableau 10, on voit que les valeurs d'un quantile de crue ont tendance à augmenter avec la longueur de la période, mais que les différentes estimations restent cohérentes. La largeur de l'intervalle de confiance varie peu d'une période à une autre : de 13 à 15% pour $Q100$, et de 29 à 33% pour $Q1000$. Ce résultat était loin d'être immédiat, les débits anciens avant 1807 ayant été « pénalisés » par une incertitude quatre fois plus forte que celle des débits postérieurs à 1910 (cf. Tableau 9).

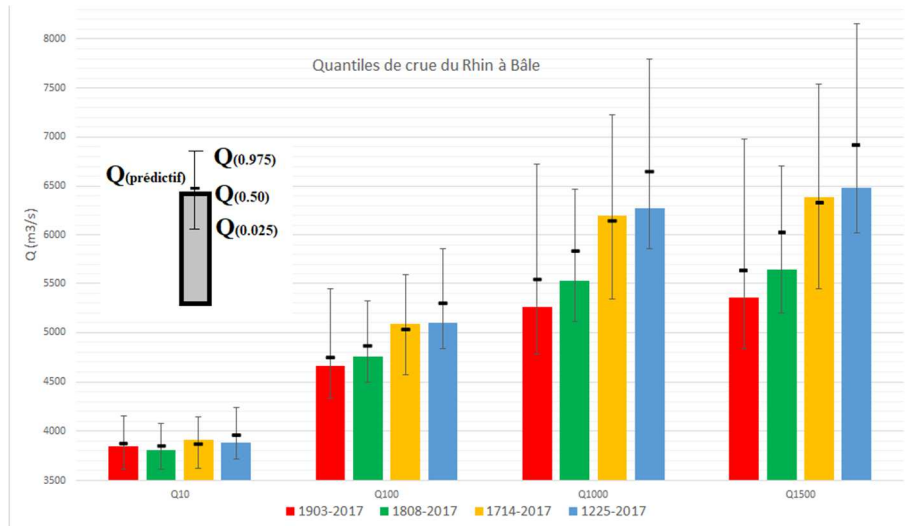


Figure 27 : Quantiles de crue Q_{10} , Q_{100} et Q_{1000} du Rhin à Bâle, avec une loi GEV : 1/ période 1903-2017 ; 2/ période 1808-2017 ; 3/ période 1714-2017 ; 4/ période 1225-2017 (*Bale*_2017_GEVError.xlsm ; QuantilesHBayBale.xlsm)

6.3 Distribution des crues à Maxau

Série de données disponibles et incertitudes associées

On dispose à Maxau d'une chronique continue de valeurs maximales annuelles sur la période 1815-2018 et d'une collection de deux crues (en 1641 et 1801) supérieures à un seuil de $4080 \text{ m}^3/\text{s}$ sur la période 1600-1814 (cf. section 4.7). Compte-tenu des travaux réalisés sur le Rhin entre Bâle et Mannheim, la série de débits $Q_{(brut)}$ a été corrigée pour ramener tous les valeurs maximales à un même état de référence en 1977 :

- Période 1600-1814 : 2 crues avec $Q_{(brut)} > S = 4080 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_{(corrigé)} = (1 + \alpha) Q_{(brut)} \text{ avec } \alpha = 0.16$$

- Période 1815-1890 : 76 crues maximales annuelles

$$Q_{(corrigé)} = (1 + \alpha) Q_{(brut)} \text{ avec } c = 0.16$$

où : $\alpha = 0$ si $Q_{(brut)} < 2600 \text{ m}^3/\text{s}$

$$\alpha = c (Q_{(brut)} - 2600) / 1300, \text{ si } 2600 < Q_{(brut)} < 3900 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\alpha = c \text{ si } Q_{(brut)} > 3900 \text{ m}^3/\text{s}$$

- Période 1891-1977 : 87 crues maximales annuelles

$$Q_{(corrigé)} = (1 + \alpha) Q_{(brut)} \text{ avec } c = 0.11$$

- Période 1978-2018 : 41 crues maximales annuelles

7 crues impactées par les zones de rétention (cf. Tableau 21).

Compte-tenu du fait que cette série de débits corrigés apparaît comme fortement hétérogène (cf. section 5.3 : Tableau 23 et Figure 44 - correction N°1) avec un saut de $150 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1976, tous les débits de la période 1815-1976 et le seuil S de la période 1600-1814 ont été majorés d'une valeur $dQ = 150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour les années de la période historique sans crue recensée, nous avons considéré que le débit maximum annuel corrigé était inférieur à $4883 \text{ m}^3/\text{s}$ ($1.16 S + dQ$).

Les incertitudes associées aux années où le débit maximum annuel est connu ont été estimées d'après les jaugeages disponibles et des informations *a priori* sur les paramètres hydrauliques de la courbe de tarage. Le *Tableau 11* rappelle les incertitudes estimées en section 5.3 pour différentes périodes.

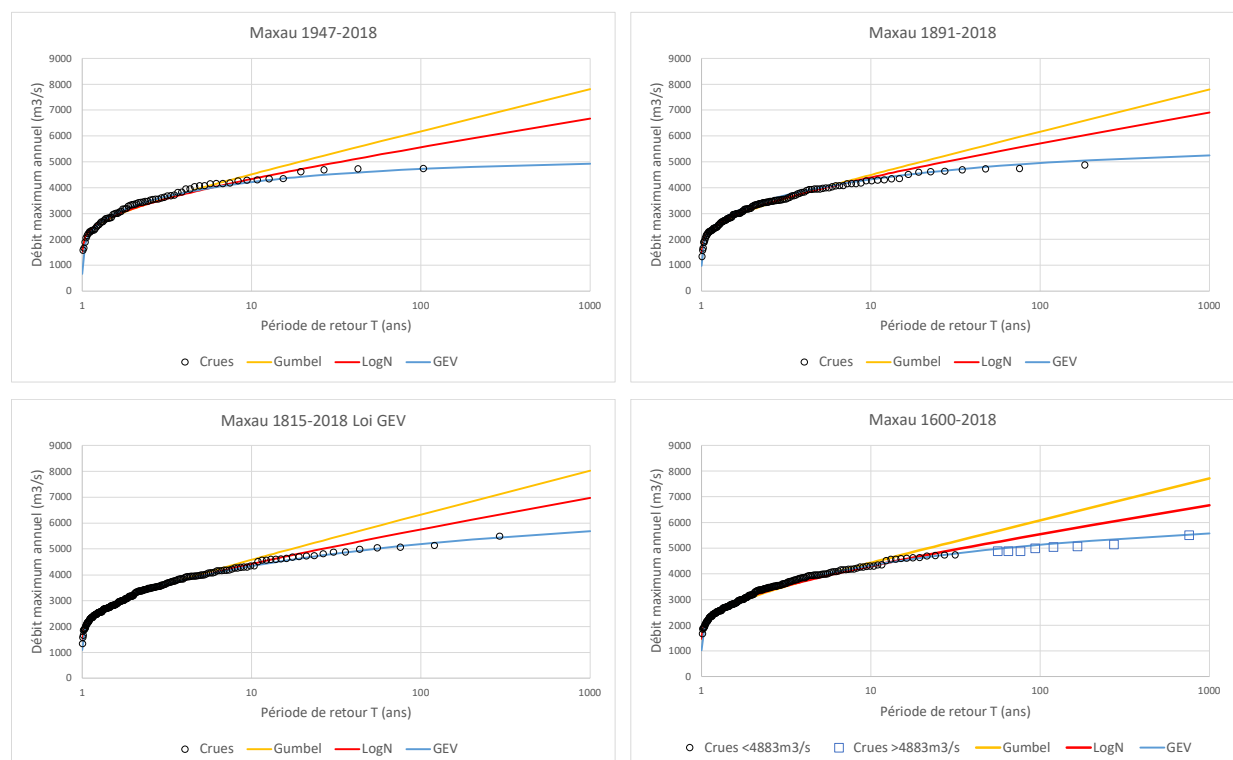
Tableau 11 : Incertitudes multiplicatives sur les valeurs de crue du Rhin à Maxau

Période	1815-1839	1840-1890	1891-1946	1947-1968	1969-1976	1977-2018
Erreur multiplicative	±45%	±35%	±33%	±9%	±8%	±5%

Nous présentons les résultats de l'analyse de la distribution des crues obtenus avec le logiciel HBAY pour quatre périodes :

- Période 1947-2018 : période « récente », avec de faibles incertitudes sur les débits de crue (nombreux jaugeages faiblement dispersés autour de chaque courbe de tarage) ;
- Période 1891-2018 : l'année 1891 correspond au début de la série utilisée comme référence dans le rapport produit par IWG (2010) ;
- Période 1815-2017 : rajout d'un siècle de données (XIX^e siècle), à l'aide de la station hydrométrique de Maxau qui existe depuis 1815 ;
- Période 1600-2017 : rajout d'une collection de 2 crues (1641 et 1801) à partir d'une source (S32) datant de 1859.

Dans un premier temps, nous avons comparé les résultats avec trois lois de probabilité différentes : GEV, Gumbel et LogNormale (cf. *Figure 28*). Les lois de Gumbel et LogNormale donnent systématiquement des quantiles de crue plus forts et surestiment la partie haute de la distribution empirique. Par la suite, nous continuerons avec la loi GEV qui est la loi adaptée aux valeurs extrêmes.



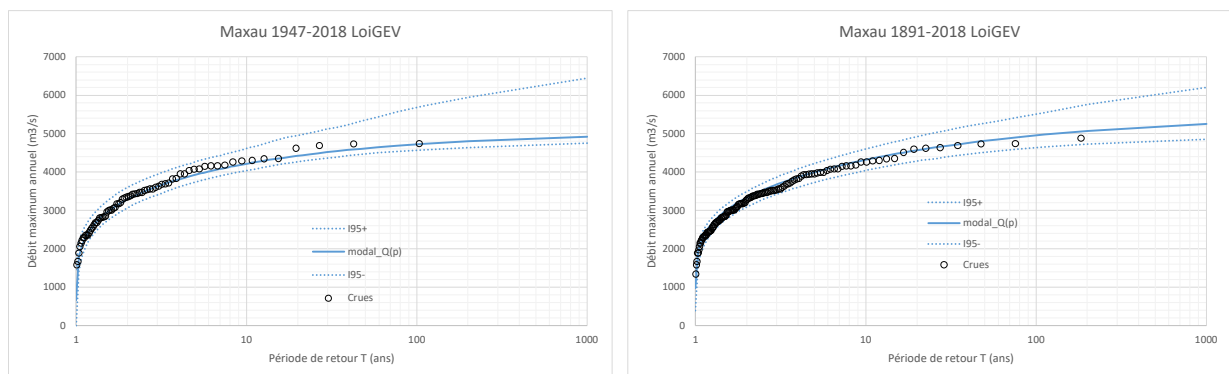
*Figure 28 : Distribution des crues du Rhin à Maxau, avec trois lois : GEV, Gumbel et LogNormale : 1/ période 1947-2018 ; 2/ période 1891-2018 ; 3/ période 1815-2018 ; 4/ période 1600-2018 (*Maxau*3Lois.xlsx)*

Le *Tableau 12* donne les quantiles obtenus avec une loi GEV pour chacune de ces quatre périodes. Les estimations de la crue $Q10$ sont voisines, de l'ordre de 4200-4300 m³/s. Les estimations des crues $Q100$ et $Q1000$ vont en augmentant pour les 3 premières périodes, au fur et à mesure que la période est étendue. **La crue $Q100$ varie entre 4700-5200 m³/s, et la crue $Q1000$ entre 4900-5700 m³/s (plage de variation respectivement de $\pm 5\%$ et $\pm 8\%$).**

Tableau 12 : Quantiles de crue (m³/s) du Rhin à Maxau avec une loi GEV : valeur modale et bornes de l'intervalle de crédibilité à 95% (QuantilesHBayMaxau.xlsm)

Période	Q10	Q100	Q1000	Q1500
1947-2018	4215 [4035 ; 4612]	4722 [4563 ; 5684]	4920 [4749 ; 6447]	4939 [4764 ; 6550]
1891-2018	4319 [4040 ; 4597]	4954 [4632 ; 5502]	5251 [4850 ; 6202]	5284 [4880 ; 6287]
1815-2018	4335 [4115 ; 4627]	5187 [4803 ; 5780]	5683 [5125 ; 6637]	5746 [5157 ; 6792]
1600-2018	4327 [4085 ; 4614]	5131 [4787 ; 5600]	5576 [5074 ; 6281]	5632 [5109 ; 6371]

On voit sur la *Figure 29* une comparaison de la distribution empirique avec l'estimation de la distribution des crues par une loi GEV (valeur modale et intervalle de crédibilité à 95%). Les ajustements sont de bonne qualité. L'incertitude sur la distribution des crues de la période 1947-2018 est importante pour les fortes périodes de retour, bien que les débits soient connus avec une bonne précision (mieux que 10%, cf. *Tableau 11*). La taille de l'échantillon (77 années) est encore insuffisante pour estimer correctement la crue centennale ou millénale. On voit qu'avec des années supplémentaires, même avec des débits de crue plus imprécis (incertitude de 30 à 45%, cf. *Tableau 11*), l'intervalle de confiance est moins large que celui de la période 1947-2018.



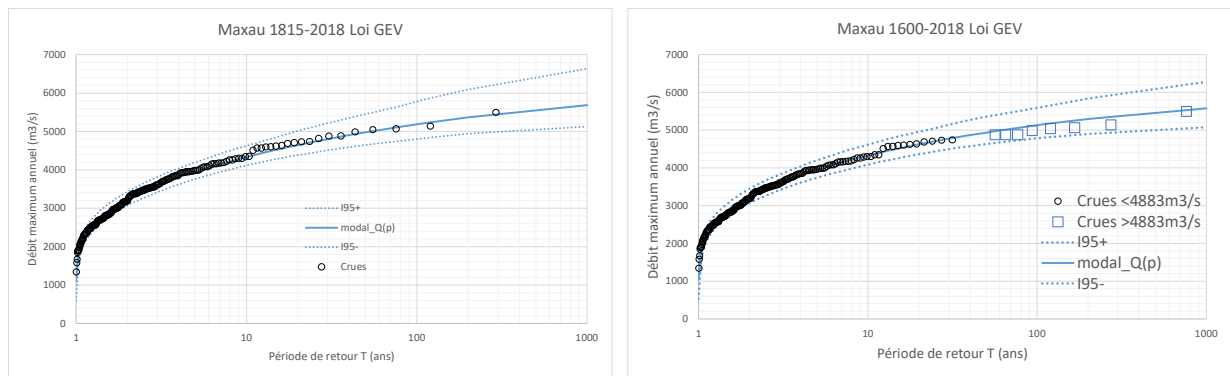


Figure 29 : Distribution des crues du Rhin à Maxau, avec une loi GEV : 1/ période 1947-2018 ; 2/ période 1891-2018 ; 3/ période 1815-2018 ; 4/ période 1600-2018 (*Maxau*_2018_GEV.xlsx)

L'ajustement sur la période 1600-2018 est de qualité, avec une faible incertitude, mais il repose sur le fait qu'uniquement deux crues sur la période 1600-1801 auraient dépassé la crue de 1824, d'après la source (S32). D'après Wetter *et al.* (2011), il y aurait 21 crues sur Rhin à Bâle pour la période 1600-1801, avec un débit supérieur à 4322 m³/s. Or le débit de la crue de 1824 du Rhin à Bâle est estimé à 3960 m³/s. Il semble douteux d'avoir sur 1600-1801 un tel écart entre Bâle et Maxau (respectivement 21 et 2 crues supérieures à celle de 1824). Au passage la source (S32) mentionne la crue exceptionnelle de 1641, alors que Wetter *et al.* (2011) n'indiquent aucune crue exceptionnelle en 1641, mais en 1651.

L'enquête historique menée sur les crues à Bâle résulte d'un travail documentaire poussé, couplé à une analyse hydraulique. Ce travail semble beaucoup plus fiable, que ce qui a été testé ici à partir d'une seule source. Il est vraisemblable que d'autres crues que celles de 1641 (en fait 1651 ?) et 1801 ont dépassé le seuil retenu ici. On notera ici que l'ajustement obtenu sur la période 1600-2018 donne des résultats un peu plus faibles que sur la période 1815-2018. La distribution donnerait des quantiles plus forts, si l'on rajoutait davantage de crues historiques.

La Figure 30 donne une illustration graphique des valeurs de quantiles de crue. Comme déjà indiqué pour le Tableau 12, on voit que les valeurs d'un quantile de crue ont tendance à augmenter avec la longueur de la période pour les trois premières périodes, mais que les différentes estimations restent cohérentes. La largeur de l'intervalle de confiance diminue entre la période 1947-2018 et les 2 autres périodes 1891-2018 et 1815-2018 : de 24 à 18-19% pour Q_{100} , et de 35 à 26-27% pour Q_{1000} . **Nous retiendrons par la suite les résultats de la période 1815-2018, soit $Q_{100} = 5200 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{1000} = 5680 \text{ m}^3/\text{s}$.**

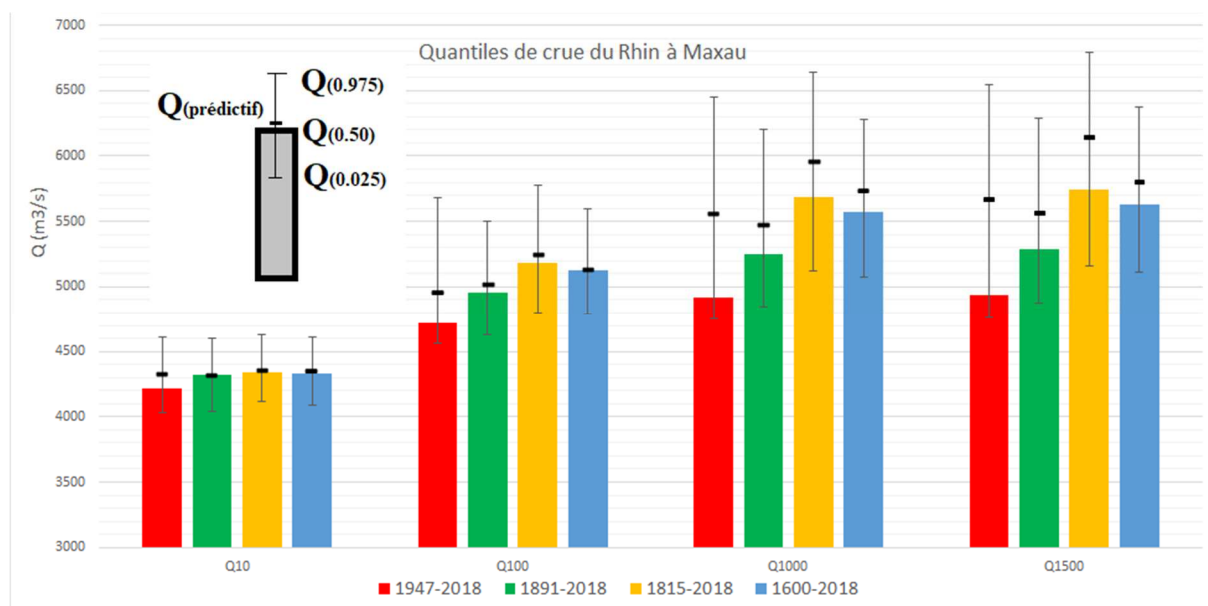


Figure 30 : Quantiles de crue Q_{10} , Q_{100} et Q_{1000} du Rhin à Maxau, avec une loi GEV : 1/ période 1947-2018 ; 2/ période 1891-2018 ; 3/ période 1815-2018 ; 4/ période 1600-2018 (*Maxau*_2018_GEV.xlsm ; QuantilesHBayMaxau.xlsm)

7 Réponse à la question posée sur la caractérisation en fréquence des débits de référence sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim

7.1 Estimation de la période de retour associée à chaque débit de référence

L'estimation des débits de référence varie suivant la période considérée (cf. *Figure 27* à Bâle, et *Figure 30* à Maxau). Nous considérons par la suite les périodes voisines 1808-2018 à Bâle et 1815-2017 à Maxau, qui correspondent aux relevés systématiques de hauteur aux deux stations hydrométriques. L'intérêt est d'exploiter l'information sur les crues du XIX^e siècle, qui complète utilement celles du XX^e siècle. Les débits de crue ont fait l'objet de corrections pour tenir compte de l'influence des aménagements réalisés sur le Rhin et revenir à un même état de référence (1976). Les tests statistiques ont montré vers 1976 une rupture significative dans les deux séries, et les débits ont été majorés de 150 m³/s avant cette date.

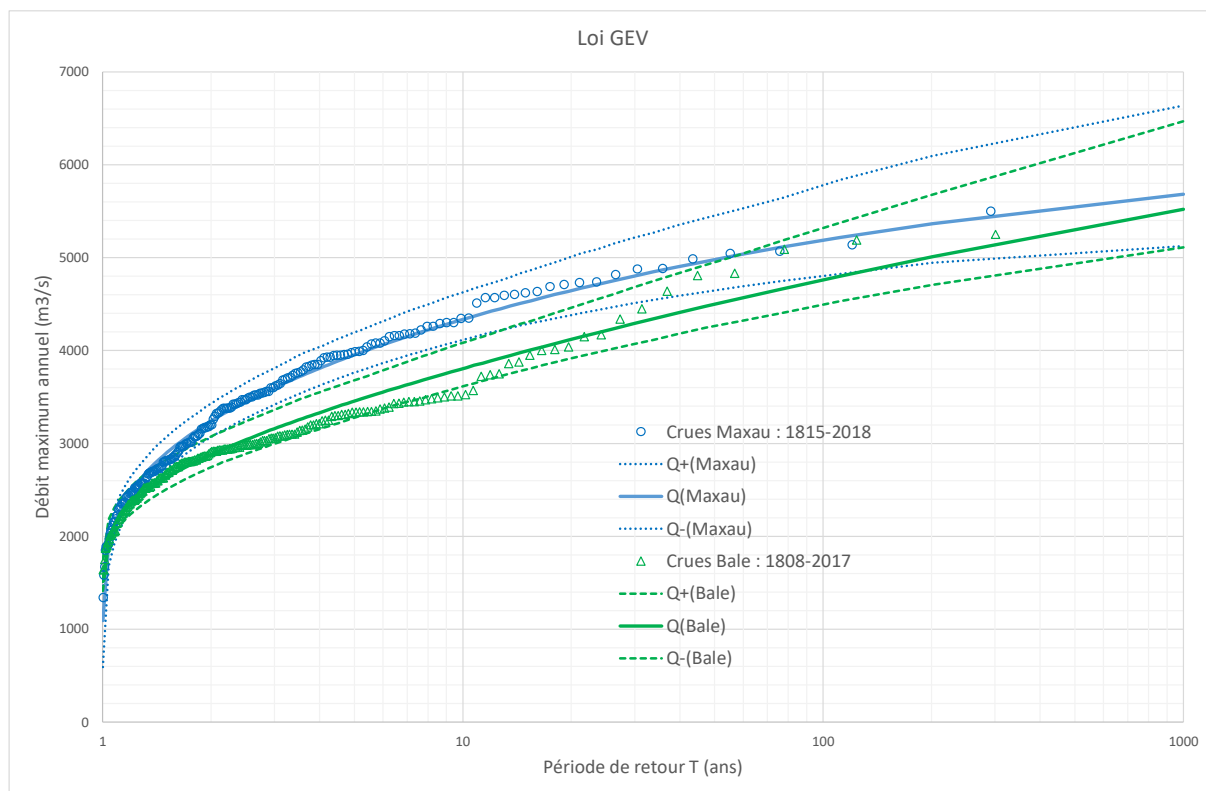


Figure 31 : Distribution des débits de crue du Rhin à Bâle et Maxau, avec une loi GEV (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

On note sur la Figure 31 que les deux distributions vont se croiser au-delà de la période de retour 1000 ans, et que les intervalles de confiance à 95% sont pratiquement identiques à cette période de retour. Pour assurer une cohérence amont-aval entre les deux distributions, nous allons reprendre le calcul de la distribution des crues en rajoutant une hypothèse sur le paramètre de forme k de la loi GEV. Théoriquement ce paramètre k doit rester identique entre stations d'un même cours d'eau ou d'une même région hydrologique.

Dans le cas présent, les estimations sont différentes, avec $k = 0.066$ à Bâle (comportement proche d'une loi de Gumbel, paramètre de forme voisin de zéro), et $k = 0.219$ à Maxau (loi type Weibull avec une borne supérieure, lorsque le paramètre de forme est significativement positif). Le logiciel HBAY fournit 500 valeurs possibles du paramètre de forme, ce qui permet d'extraire des valeurs caractéristiques de sa distribution. Nous avons concaténé les échantillons de Bâle et Maxau, ce qui a permis d'en extraire une distribution « régionale » ou mixte Bâle-Maxau (cf. Figure 32).

	Moyenne	Ecart-type
Bale	0,0666	0,037
Maxau	0,219	0,0576
Bale-Maxau	0,144	0,089

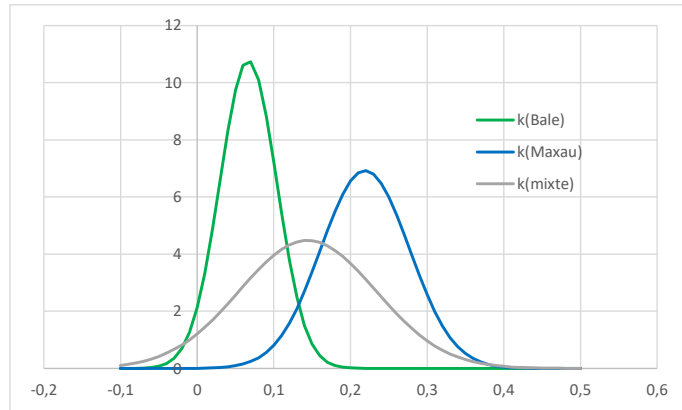


Figure 32 : Distribution du paramètre de forme de la loi GEV à Bâle et Maxau, et estimation d'une distribution mixte (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

Les calculs de la distribution des crues sont repris en faisant une hypothèse a priori sur le paramètre de forme, qui suit une loi normale $N(0.144 ; 0.089)$. Comme indiqué en section 5.1, le théorème de Bayes permet ensuite de combiner cet *a priori* « régional » sur le paramètre de forme dans l'intervalle $[-0.1 ; +0.4]$ avec la vraisemblance de l'échantillon de crues étudié (Bâle ou Maxau). La distribution a posteriori du paramètre de forme a été un peu modifiée du fait du choix d'un *a priori* régional (cf. Figure 33).

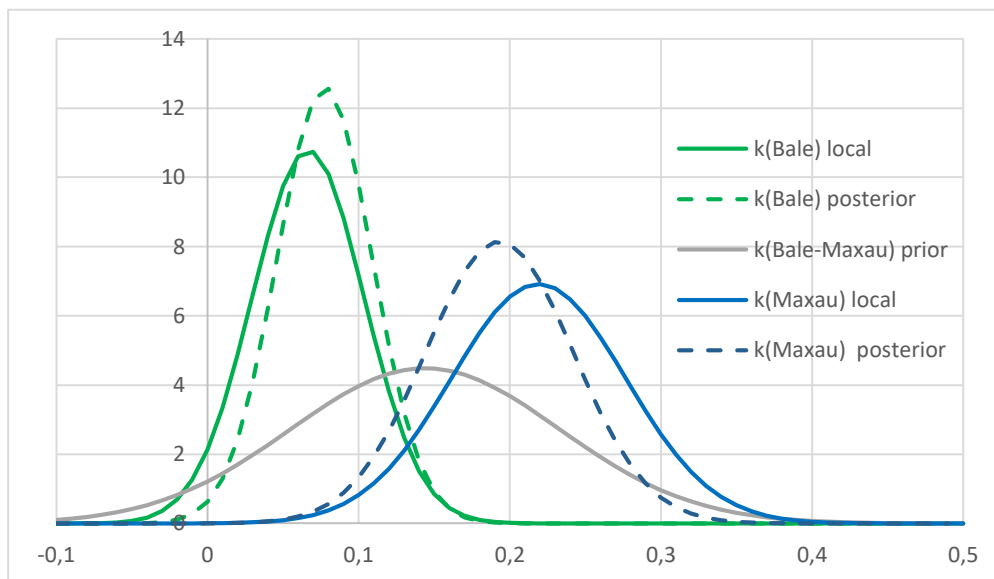


Figure 33 : Distribution a posteriori du paramètre de forme de la loi GEV à Bâle et Maxau, (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

Il y a peu de différence sur la Figure 34 entre le premier calcul (sans hypothèse *a priori* sur le paramètre de forme), et le second avec un *a priori* « régional », sauf sur l'extrapolation au-delà de 200 ans : on évite un croisement trop rapide entre les deux distributions, qui est repoussé à la période de retour 10 000 ans.

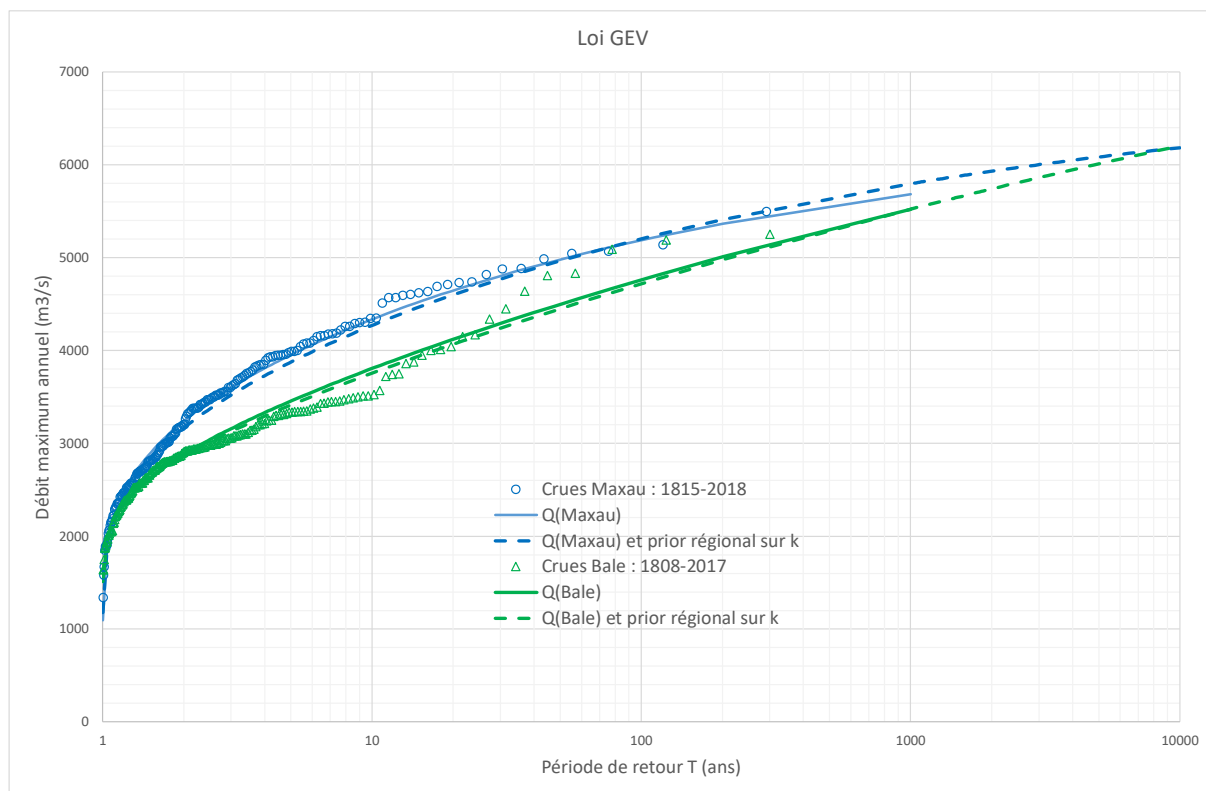


Figure 34 : Distribution des débits de crue du Rhin à Bâle et Maxau, avec un a priori régional sur le paramètre de forme de la loi GEV (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

Nous allons interpoler spatialement les deux distributions *a posteriori* de Bâle et Maxau (cf. Figure 34), en faisant l'hypothèse d'une relation $Q(T) = a S^b$, entre le quantile $Q(T)$ de période de retour T et la superficie S du bassin versant. Cela revient à interpoler linéairement sur un graphique : $\ln Q(T) = \ln(a) + b \ln(S)$. Soit pour un site cible, de superficie S_{cible} :

$$Q_{cible}(T) = Q_{Maxau}(T) \left[\frac{Q_{Bale}(T)}{Q_{Maxau}(T)} \right]^{\frac{\ln(S_{Maxau}/S_{cible})}{\ln(S_{Maxau}/S_{Bale})}} \quad (7)$$

Pour rappel, les superficies du bassin versant du Rhin à Bâle et Maxau sont respectivement égales à 35 925 et 50 343 km².

Les distributions interpolées sur les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim sont représentées en Figure 35 : 1/ à partir de la valeur max-post (la plus probable) de Bâle et Maxau ; 2/ à partir de la valeur prédictive de Bâle et Maxau. La seconde valeur intègre une majoration issue de l'analyse des incertitudes.

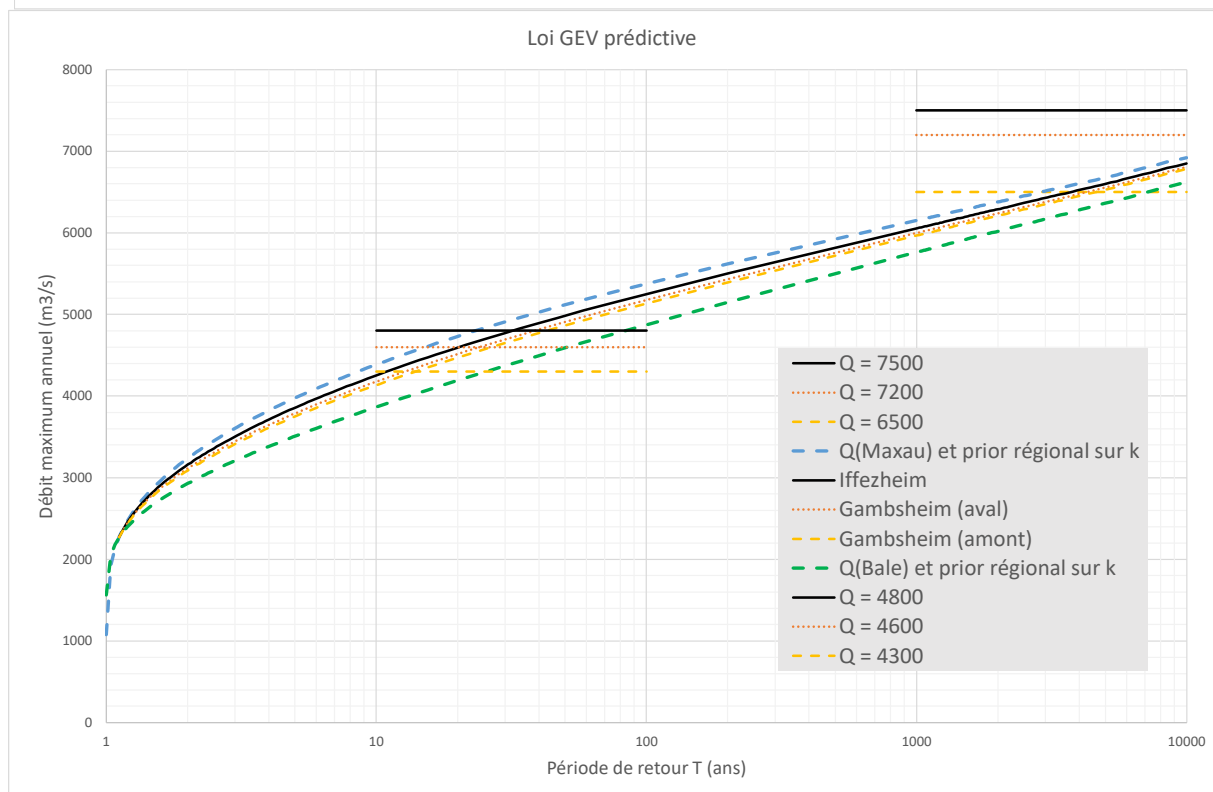
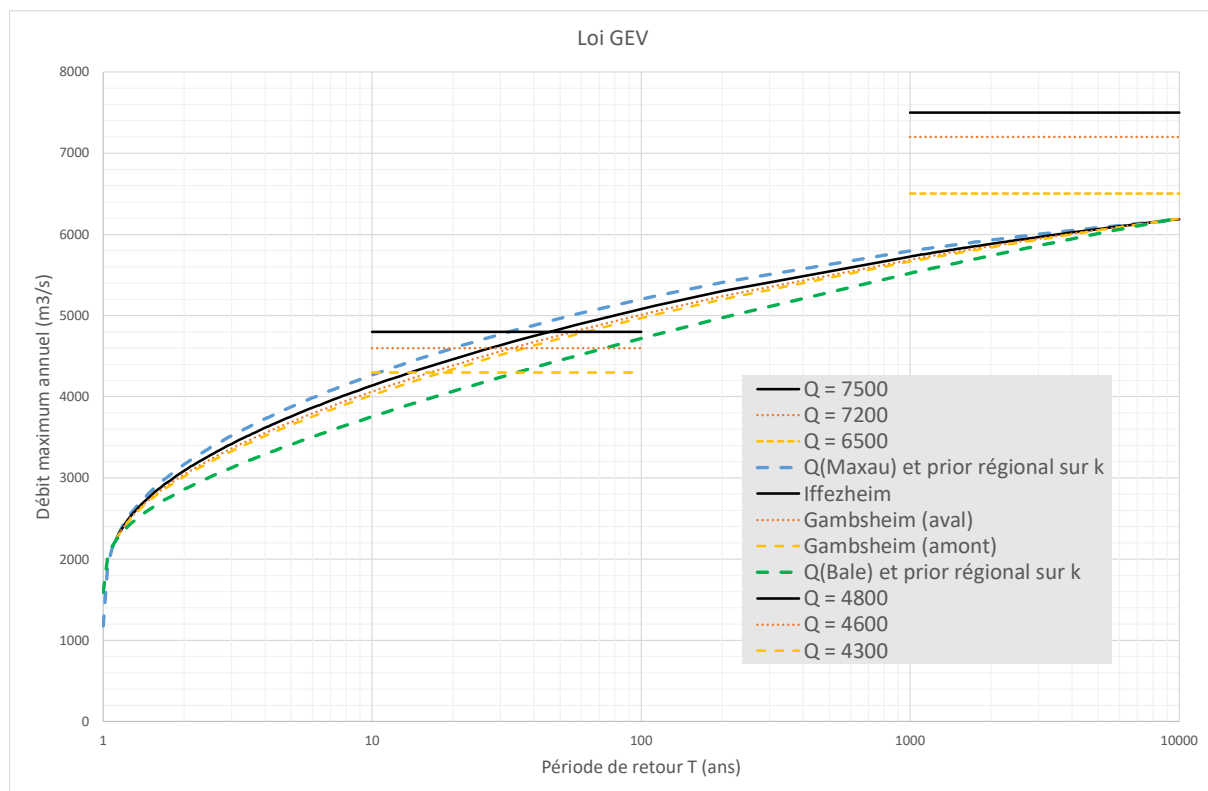


Figure 35 : Positionnement des débits de référence à respecter sur les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim : 1/ avec la distribution max post ; 2/ avec la distribution prédictive (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

Tableau 13 : Périodes de retour (an) associées aux revanches contractuelles à respecter sur les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim

	Gamsheim amont Kinzig	Gamsheim aval Kinzig	Iffezheim
Superficie (km ²)	43 000	44200	46 400
Débit de référence (revanche 1.2 m) (m ³ /s)	4300	4600	4800
Période de retour max post (prédictive) (an)	20 (15)	35 (25)	50 (35)
Débit de référence (revanche 0.2 m) (m ³ /s)	6500	7200	7500
Période de retour max post (prédictive) (an)	> 10 ⁴ (5000)	> 10 ⁴ (idem)	> 10 ⁴ (idem)

On note sur le *Tableau 13* que les **débits de référence pour une revanche de 1.2 m correspondent à une période de retour respectivement de 20, 35 et 50 ans sur les 3 biefs**. Si on considère la distribution prédictive, qui est une façon de majorer la distribution en tenant compte des incertitudes, on passe à 15, 25 et 35 ans.

Les débits de référence proches du débordement (revanche de 0.2 m) ont très peu de chances d'être atteint, avec une période de retour au-delà de 10 000 ans. Même avec la distribution prédictive, la période de retour est toujours bien supérieure à 1000 ans (5000 ans sur le bief de Gamsheim amont Kinzing, et supérieure à 10 000 ans pour le bief de Gamsheim aval Kinzing et celui d'Iffezheim).

7.2 Avis sur les estimations antérieures des débits de référence

Les deux études de référence disponibles pour évaluer la période de retour des débits de référence sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim sont celles de IWG (2010) pour l'Allemagne, et EDF (2002) pour la France. On voit dans le *Tableau 14* qu'à Bâle, la crue *Q100* estimée par EDF (2002) est à peu près la crue *Q1000* estimée par IWG (2010). La crue *Q1000* à Bâle estimée par EDF (2002) est voisine de la crue *Q10000* à Maxau estimée par IWG (2010).

Les valeurs prédictives à Maxau estimées dans la présente étude INRAE (2020) sont voisines de celles de l'étude IWG (2010) (cf. *Tableau 14* et *Figure 36*).

Tableau 14 : Quantiles de crue du Rhin à Bâle et Maxau, selon les études EDF (2002), IWG (2010) et INRAE (2020), et paramètres de la loi GEV

		Q10	Q100	Q1000	Q10000
Bâle	EDF (2002)	3970 I ₇₀ =[3780 ; 4220] I ₉₅ =[3590 ; 4450]	5420 I ₇₀ =[5000 ; 5920] I ₉₅ =[4580 ; 6420]	7030 I ₇₀ =[6400 ; 7910] I ₉₅ =[5760 ; 8780]	/
	IWG (2010)	3980	4780	5480	6230
	INRAE (2020) x ₀ =2670 ; a=522 ; k=0.0705	3750 I ₉₅ =[3630 ; 4080] Prédictive 3870	4720 I ₉₅ =[4470 ; 5280] Prédictive 4870	5520 I ₉₅ =[5120 ; 6440] Prédictive 5760	6200 I ₉₅ =[5580 ; 7600] Prédictive 6620
Maxau	IWG (2010)	4400	5300	6100	7000
	INRAE (2020) x ₀ =2900 ; a=743 ; k=0.185	4270 I ₉₅ =[4110 ; 4720] Prédictive 4390	5200 I ₉₅ =[4940 ; 5960] Prédictive 5380	5800 I ₉₅ =[5360 ; 6870] Prédictive 6150	6180 I ₉₅ =[5550 ; 7670] Prédictive 6920

Pour mémoire, le quantile $Q(T)$ de période de retour T d'une loi GEV a pour expression :

$$Q(T) = x_0 + \frac{a}{k} \{1 - [-\ln(1 - 1/T)]^k\} \quad (8)$$

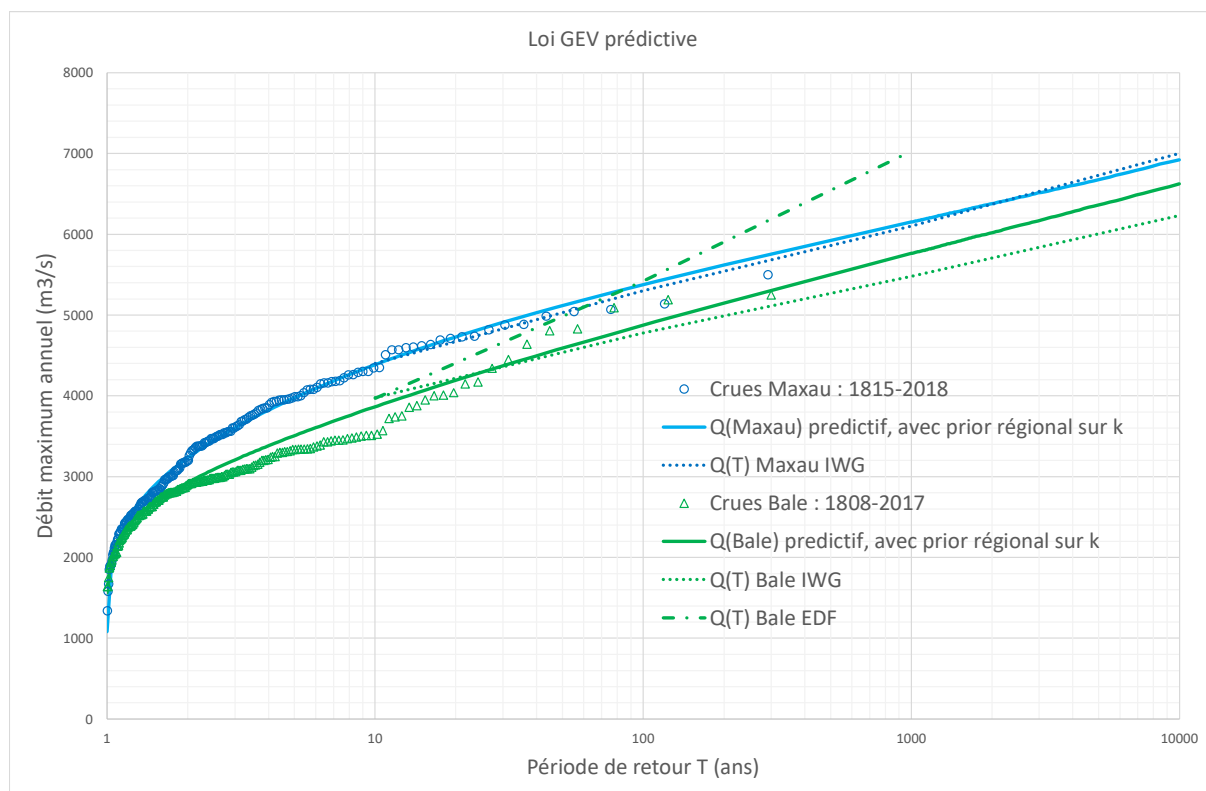


Figure 36 : Comparaison de la distribution prédictive des débits de crue du Rhin à Bâle et Maxau, avec les estimations EDF (2002) et IWG (2010) (ComparatifHBayBale_Maxau.xlsx)

Tableau 15 : Hypothèses retenues pour le calcul des quantiles de crue du Rhin à Bâle et Maxau, selon les études EDF (2002), IWG (2010) et INRAE (2020)

	Echantillon	Loi de probabilité	Commentaire
EDF (2002)	Bâle <ul style="list-style-type: none"> • Sup-seuil 1933-2000 ($Q > 2200 \text{ m}^3/\text{s}$) • 6 crues historiques 1802-1932 ($Q > 4000 \text{ m}^3/\text{s}$) • Débit journalier QJ 	Racine Gumbel	<ul style="list-style-type: none"> • Loi Racine Gumbel discutable • Passage au débit de pointe QIX avec ratio $QIX/QJ=1.15$ • Différence sur la valeur de 2 crues historiques $Q(1881) = 5280 \text{ m}^3/\text{s}$ (OFEV) vs $4764 \text{ m}^3/\text{s}$ (EDF) $Q(1910) = 4300 \text{ m}^3/\text{s}$ (OFEV) vs $4040 \text{ m}^3/\text{s}$ (EDF)
IWG (2010)	Bâle et Maxau <ul style="list-style-type: none"> • Max annuel/hiver/été 1903-2008 et 1891/2008 • Correction <i>a posteriori</i> (rupture vers 1972-1976) 	Log Normale	<ul style="list-style-type: none"> • Crues du XIX^e siècle non exploitées • Lacunes dans l'échantillon des crues (31 années manquantes) • Loi LogN parfois délicate en extrapolation (rencontré à Maxau) • Pas de correction <i>a priori</i> • Pas d'interprétation physique de la rupture vers 1972-1976
INRAE (2020)	Bâle et Maxau <ul style="list-style-type: none"> • Max annuel 1808-2017 et 1815-2018 (évaluation des incertitudes) • Correction <i>a priori</i> (travaux sur le Rhin) • Correction <i>a posteriori</i> (rupture vers 1976) 	GEV et GEV prédictive <ul style="list-style-type: none"> • Prise en compte des incertitudes • <i>a priori</i> régional sur le paramètre de forme 	<ul style="list-style-type: none"> • Débits max annuel repris des sources officielles (OFEV, WSV) • Corrections <i>a priori</i> reprises des sources officielles (CECR, Wetter <i>et al.</i>) • Pas d'interprétation physique de la rupture vers 1976

Nous avons résumé dans le *Tableau 15* les principales hypothèses faites dans les trois études. L'étude IWG (2010) a utilisé seulement les crues de la période 1903-2008 et une loi LogNormale. L'étude INRAE (2020) a exploité les crues du XIX^e et XX^e siècles avec une loi GEV. A Bâle, il y a en fait peu de différences entre les lois LogNormale et GEV (cf. *Figure 25*). Par contre le fait de rajouter un siècle de données conduit à revoir un peu à la hausse la

distribution, avec des valeurs plus fortes de quantiles (cf. *Figure 27*). A Maxau, le choix d'une loi LogNormale ne paraît pas justifié (cf. *Figure 28*) et surestime la distribution expérimentale. Le fait dans l'étude INRAE (2020) de rajouter un siècle de données et de consolider les ajustements de Bâle et Maxau avec un *a priori* régional sur le paramètre de forme de la loi GEV conduit à rehausser la distribution (cf. *Figure 30* et *Figure 34*).

Au final, **les résultats de l'étude IWG (2010) sont similaires à Maxau à ceux de la présente étude INRAE (2020), lorsque l'on utilise la distribution prédictive.** Deux effets opposés ont dû se compenser (valeurs plus fortes obtenues avec une loi LogNormale qu'avec une loi GEV, valeurs plus faibles obtenues sur la période 1891-2018 par rapport à 1815-2018). La *Figure 37* illustre les fluctuations d'estimation de la crue Q_{1000} , avec :

- l'échantillon incomplet de l'étude IWG (2010) : 86 années sur la période 1892-2008 (31 années manquantes)
 - ✓ loi LogNormale : $Q_{1000} = 6027 \text{ m}^3/\text{s}$ en sup-seuil d'hiver
 - ✓ loi LogNormale : $Q_{1000} = 6194 \text{ m}^3/\text{s}$ en max d'hiver
 - ✓ loi GEV : $Q_{1000} = 5767 \text{ m}^3/\text{s}$ en max d'hiver
- des échantillons de crue de l'étude INRAE (2020) et la loi GEV (max annuel)
 - ✓ 128 années sur 1891-2018 : $Q_{1000} = 6027 \text{ m}^3/\text{s}$
 - ✓ 204 années sur 1815-2018 : $Q_{1000} = 5683 \text{ m}^3/\text{s}$ (ajustement local)
 $Q_{1000} = 5800 \text{ m}^3/\text{s}$ (ajustement consolidé régionalement)
 $Q_{1000} = 6150 \text{ m}^3/\text{s}$ (marge de sécurité avec distribution prédictive).

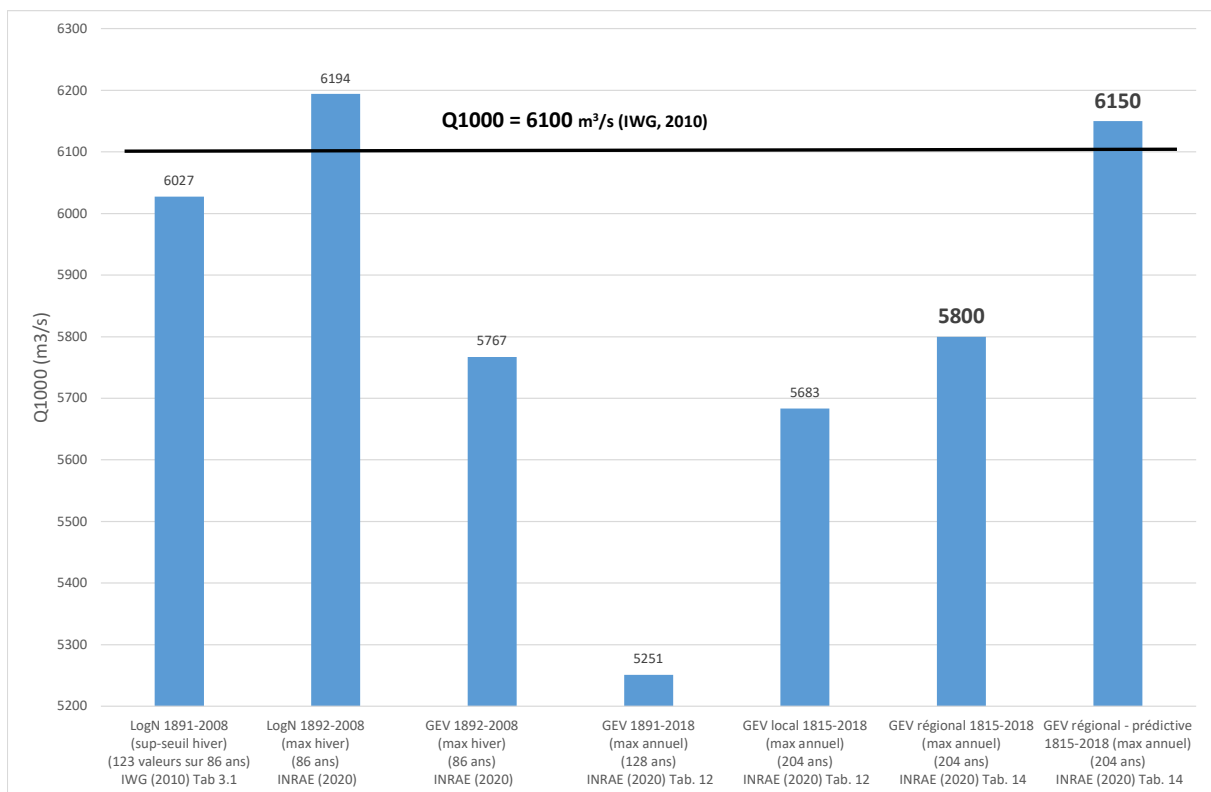


Figure 37 : Comparaison de la crue Q_{1000} du Rhin à Maxau, avec les estimations IWG (2010) et INRAE (2020) (SyntheseQ1000Maxau.xlsx)

Les résultats de l'étude EDF (2002) sont très différents et certainement surestimés (cf. Figure 36). L'extrapolation de la distribution des crues à Bâle dépasse à partir de la période de retour 60 ans la distribution expérimentale des crues de Maxau sur la période 1815-2018, et évidemment celle de la loi GEV estimée dans l'étude INRAE (2020). La pente de la distribution à Bâle estimée par EDF (2002) est très nettement supérieure à celle des distributions expérimentales à Bâle (1808-2017) et Maxau (1815-2018).

L'origine de cette surestimation est multiple :

- Les valeurs retenues pour les 6 crues historiques de la période 1808-1932 diffèrent pour 2 crues avec celles de l'OFEV, et n'ont pas fait l'objet de corrections pour tenir compte des travaux de correction du Jura en 1890 et de l'hétérogénéité détectée vers 1976. Elles sont nettement plus fortes que celles retenues dans l'étude INRAE (cf. Tableau 16) ;
- Les débits de crue ont systématiquement été majorés de 15% pour passer des valeurs d'annuaire de débit max journalier à des débits de pointe de crue (ce qui n'a pas été fait dans l'étude INRAE) ;
- Le choix d'une loi racine Gumbel n'est pas des plus classiques pour la distribution des crues et pourrait induire une différence en extrapolation.

Tableau 16 : Débit du Rhin à Bâle en m³/s pour les 6 crues supérieures à 4000 m³/s sur la période 1808-1932

Année	Etude EDF(2002)	Etude INRAE (2020)	
	Débit max journalier	Données brutes OFEV	Données avec correction n°3
1817	4800	4790	4340
1852	5650	5640	5190
1876	5705	5700	5250
1881	4764	5280	4830
1882	4600	4620	4170
1910	4040	4300	4450

7.3 Récapitulatif des débits de référence à Bâle, Maxau et les biefs de Gamsheim et Iffezheim

Le Tableau 17 donne les valeurs de quantiles de crue obtenues avec une loi GEV et GEV prédictive, après consolidation régionale, pour les périodes de retour 10, 100, 1000, 1500 et 3000 ans.

Tableau 17 : Quantiles de crues du Rhin (m³/s) entre Bâle et Maxau, avec une loi GEV et après consolidation régionale : valeur modale et intervalle de confiance à 95%, valeur prédictive

	Q10	Q100	Q1000	Q1500	Q3000
Bâle	3760 [3630 ; 4080] 3870	4720 [4470 ; 5280] 4870	5520 [5120 ; 6440] 5760	5650 [5220 ; 6600] 5910	5860 [5350 ; 7020] 6170
Maxau	4270 [4110 ; 4720] 4390	5200 [4940 ; 5960] 5380	5800 [5360 ; 6870] 6150	5880 [5410 ; 7000] 6280	6000 [5470 ; 7270] 6510
Gamsheim amont Kinzig	4020 4130	4970 5140	5670 5970	5770 6110	5940 6350
Gamsheim aval Kinzig	4060 4180	5010 5180	5700 6000	5790 6140	5950 6380
Iffezheim	4140 4250	5080 5250	5730 6050	5820 6190	5970 6430

Les valeurs de quantile de crue pour d'autres périodes de retour peuvent être obtenues de la façon suivante :

- loi GEV à Bâle et Maxau : cf. équation (8) avec les paramètres (x_0, a, k) dans le *Tableau 14* ;
- loi GEV prédictive à Bâle et Maxau : les valeurs ont été obtenues par simulation pour chaque période de retour cible. Une approximation sur une période de retour quelconque peut être obtenue en utilisant les jeux de paramètres équivalents d'une loi GEV :
Bâle : $x_0 = 2722$; $a = 547$; $k = 0.06$ (erreur < 1% pour $1 < T < 1000$ ans)
Maxau : $x_0 = 2930$; $a = 789$; $k = 0.162$ (erreur < 2% pour $1 < T < 1000$ ans)
- lois GEV et GEV prédictives sur les biefs de Gambsheim et Iffezheim : cf. équation (7) avec les quantiles correspondants à Bâle et Maxau, et les valeurs des superficies de bassin versant.

7.4 Recommandations sur l'estimation des débits de référence

La présente expertise a porté sur l'estimation des périodes de retour associées aux débits de référence à respecter sur les biefs de Gambsheim et Iffezheim (cf. section 7.1). Les différences d'appréciation entre les parties françaises (EDF, 2002) et allemandes (IWG, 2010) ont pour origine des choix différents sur les données de crue à utiliser et sur la loi de probabilité retenue pour représenter la distribution du maximum annuel (cf. section 7.2).

Le choix a été fait dans cette étude d'utiliser un cadre bayésien d'analyse permettant de prendre en compte les incertitudes sur les débits de crue. Ce point est essentiel dans la mesure où certains facteurs peuvent agir en sens opposé sur l'incertitude finale des quantiles de crue :

- plus la taille N de l'échantillon est grande, plus l'incertitude d'échantillonnage est réduite (proportionnelle à $1/\sqrt{N}$) ;
- plus on remonte dans le temps, plus il est difficile de connaître précisément les débits, ce qui va augmenter les incertitudes sur l'estimation de la distribution des crues.

Le fait ici de dégrader la connaissance des débits anciens de crue (incertitude jusqu'à $\pm 45-48\%$) par rapport aux débits récents (incertitude $\pm 5-7\%$) a permis d'analyser finement l'apport et les limites de l'information historique. Si les estimations à Bâle et Maxau fluctuent en fonction de la période considérée (cf. *Figure 27* et *Figure 30*), avec une variation de + 10% pour la crue centennale et de + 15-20% pour la crue millénale, la largeur des intervalles de confiance reste assez stable. Ce résultat était loin d'être acquis, les débits anciens ayant été pénalisés par une incertitude bien plus forte.

Malgré les évolutions importantes induites par les aménagements sur le Rhin aux XIX^e et XX^e siècles, il s'avère intéressant d'exploiter les données de crue du XIX^e siècle. On dispose de longues séries d'un peu plus de 200 ans (1808-2017 à Bâle ; 1815-2018 à Maxau) qui permettent d'estimer correctement la distribution des crues.

A noter qu'il est nécessaire de raisonner sur des séries « homogénéisées », en corrigeant les débits de crue pour raisonner sur un même état de référence, qui sur le Rhin est celui de 1977. Nous avons introduit des corrections sur les débits anciens pour tenir compte de l'évolution de la propagation des crues suite aux travaux de chenalisation du lit du Rhin, et sur les débits récents pour intégrer l'effet des aménagements récents de laminage des crues. La qualité des séries est améliorée après correction des débits de crue (cf. *Tableau 18* et *Tableau 23*), même s'il a fallu *in fine* constater une rupture inexplicée de + 150 m³/s à Bâle et Maxau

vers 1976. Ce point avait déjà été relevé dans l'étude IWG (2010) et mériterait des investigations complémentaires pour comprendre l'origine physique de cette hétérogénéité.

Le choix de la loi de probabilité (Gumbel, racine Gumbel, Log Normale, GEV...) a une incidence forte sur l'extrapolation de la distribution des crues. Une des conclusions du projet de recherche ExtraFlo (Lang *et al.*, 2014) sur la comparaison des méthodes d'estimation des pluies et crues extrêmes est que les approches statistiques basées le traitement d'une série de quelques dizaines d'années sont peu robustes. **Le choix d'une loi de probabilité est du second ordre par rapport à la taille de l'échantillon à analyser. Il est recommandé d'incorporer des informations complémentaires aux seules séries locales du réseau systématique d'observation hydrométrique :** exploitation de données historiques anciennes de crue lorsqu'elles sont disponibles, analyse à l'échelle régionale des records de crue, méthodes de simulation basées sur le couplage d'un simulateur d'averses et d'un modèle hydrologique.

Nous avons retenu ici la loi GEV qui présente l'intérêt d'être adaptée à l'étude des valeurs extrêmes (Coles, 2001), mais dont l'extrapolation reste sensible à la bonne estimation de son paramètre de forme. **Le fait de raisonner sur des séries de plus de 200 ans et de consolider régionalement le paramètre de forme a conduit à conforter la bonne estimation de la distribution des crues.** La largeur de l'intervalle de confiance à 95% [Q_{T-} ; Q_{T+}] d'un quantile Q_T , exprimée en valeur relative [$dQ-/Q_T$; $dQ+/Q_T$] vaut pour la crue Q_{100} [-5% ; +12%] à Bâle et [-5% ; +15%] à Maxau, et pour la crue Q_{1000} [-7% ; +17%] à Bâle et [-7% ; +18%] à Maxau (cf. *Tableau 17*).

Au final, nous suggérons de retenir les valeurs issues de la distribution prédictive de la loi GEV. Comme indiqué en section 6.1, cela revient à majorer l'estimation de la distribution des crues en prenant en considération les incertitudes sur l'estimation des paramètres de la loi (cf. equation 6). Renard *et al.* (2013b) ont montré sur un cas d'application en France pour 364 stations que l'on obtient ainsi de meilleures propriétés en terme de justesse et de robustesse sur l'estimation des quantiles de crue. Les estimations des crues Q_{100} et Q_{1000} sont majorées de +3-6% à Bâle et de +2-3% à Maxau (cf. *Tableau 17*), en utilisant la distribution prédictive.

8 Points d'approfondissement possibles

La présente étude a utilisé des séries de débits de crue sur plus de deux siècles : Bâle (1808-2017) et Maxau (1815-2018), avec une quantification des incertitudes associées aux débits et des corrections nécessaires pour tenir compte des aménagements sur le Rhin et obtenir des séries homogènes. Le choix a été fait de conserver les débits « bruts » issus des gestionnaires des deux stations hydrométriques (OFEV à Bâle ; WSW à Maxau). Nous listons ci-dessous une série de points d'approfondissements possibles sur la connaissance des débits de crue.

Bâle

- Estimation des incertitudes sur les débits de la période 1934-1993 : à partir du mode de calcul retenu (Rhin – Rheinfelden + apports Birs et Ergloz) et des jaugeages disponibles sur ces 3 stations. **Pour l'instant une incertitude forfaitaire de $\pm 20\%$ a été retenue.**
- Date effective de mise en service des travaux de correction du Jura (travaux terminés en 1878, avec incertitude sur l'élargissement « naturel » du canal de Bienne). **Pour l'instant, reprise de l'hypothèse de l'étude CECR (1978) : mise en application du laminage à partir de 1890, et donc correction nécessaire de toutes les crues avant 1890.**
- Recherche d'une explication physique sur l'origine de la rupture détectée vers 1966-1976. Sous-estimation de la correction n°3 pour revenir à l'état de 1977 ? (cf. *Tableau 18*). **Pour l'instant correction de $+150 \text{ m}^3/\text{s}$ avant 1976 pour obtenir une série homogène.**

Maxau

- Réévaluation des débits de la période 1815-1946 : reprise de la méthodologie issue de l'étude CECR (1978) basée sur les courbes de débits classés à Bâle et à Kaub, et les courbes de hauteurs classées à Maxau. Comparaison avec un modèle hydraulique. **Pour l'instant les 22 courbes de tarage issues de l'étude CECR (1978) sur la période 1821-1973 ont été conservées.**
- Correction à apporter aux débits de la période 1815-1890 : une modélisation hydraulique avec les profils anciens du lit du Rhin permettrait de mieux estimer la correction à appliquer pour revenir à un état 1977. Une vérification sur les temps de propagation observés entre Bâle et Strasbourg-Marlen et/ou Maxau permettrait d'aider au calage du modèle hydraulique. **Pour l'instant, des hypothèses ont été faites en prenant comme référence la correction CECR (1978) entre 1955 et 1977, et en exploitant les variations passées du temps de propagation des crues entre Bâle et Strasbourg-Marlen (*Figure 43*).**
- Dans l'étude CECR (1978), le débit de la crue du 30/12/1882 à Maxau est fortement revu à la hausse (+36%), en passant de $4610 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit « observé ») à $6260 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit corrigé). Nous avons retenu une correction identique à celle des autres crues de la même période (+16%), avec un débit corrigé de $5348 \text{ m}^3/\text{s}$. **La crue de décembre 1882 étant un événement de référence sur le Rhin supérieur, il serait utile de vérifier la propagation de cette crue avec un modèle hydraulique récent.**
- Recherche d'une explication physique sur l'origine de la rupture détectée en 1976. **Pour l'instant correction de $+150 \text{ m}^3/\text{s}$ avant 1976 pour obtenir une série homogène.**
- Peut-être du second ordre, mais les données anciennes de débit maximum annuel sont certainement calculées à partir d'une cote relevée à heure fixe → sous-estimation possible de la vraie pointe de crue (vérification faite sur la période récente avec des débits à pas de temps variable infra-horaires : erreur d'environ 8 % si on suit les débits à horaire fixe, par ex. 6h-12h-18h, au lieu d'avoir le maxi de la crue). Mais ce point reste à vérifier : souvent pour les grandes crues, les observateurs relevaient plus finement les niveaux, et une enquête de terrain pouvait être réalisée *a posteriori* pour reconstituer le niveau maximum atteint. **Pour l'instant aucune majoration des débits ni des incertitudes.**

9 Bibliographie

- Ceresta (1995)** *Aide-mémoire pratique des techniques statistiques pour ingénieurs et techniciens supérieurs*, Paris.
- Coles S. (2001)** *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer Series in Statistics, ed. Springer-Verlag. London: Springer-Verlag. 210 p.
- Convention (1982)** *Convention du 6 décembre 1982 modifiant et complétant la Convention additionnelle du 16 juillet 1975 à la Convention du 4 juillet 1969 entre la République Française et la République Fédérale d'Allemagne au sujet de l'aménagement du Rhin entre Strasbourg/Kehl et Lauterbourg/Neuburgweier*
- Darienzo M., Le Coz J., Renard B., Lang M. (2020)** Detection of stage-discharge rating shifts using gaugings: a recursive segmentation procedure accounting for observational and model uncertainties. Soumis à *Water Resources Research*
- 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, 640 p.
- Lang M., Ouarda T., Bobée B. (1999)** Towards operational guidelines for over-threshold modelling. *Journal of Hydrology*, 225, 103-117, doi : [10.1016/S0022-1694\(99\)00167-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00167-5)
- Lang M. et al. (2014)** Résultats du projet ExtraFlo (ANR 2009-2013) sur l'estimation des pluies et crues extrêmes, *La Houille Blanche*, 2, 5-13, doi [10.1051/lhb2014010](https://doi.org/10.1051/lhb2014010)
- 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)
- 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 Resour. Res.*, 55, <https://doi.org/10.1029/2018WR023389>
- Neppel et al. (2010)** Flood frequency analysis using historical data: accounting for random and systematic errors. *Hydrological Science Journal*, 55(2), 192-208, doi : [10.1080/02626660903546092](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.
- Renard (2018)**. *What is Bayesian inference ?* Support de cours sur les incertitudes. Irstea Lyon-Villeurbanne, 16p.
- Renard B., Sun X., Lang M. (2013a)**. Chap3. Bayesian methods for non-stationary extreme value analysis. In “*Extremes in a Changing Climate: Detection, Analysis and Uncertainty*”. Water Science and Technology Library. Ed. by A. AghaKouchak, D. Easterling, K. Hsu, S. Schubert, S. Sorooshian., Springer, Vol. 65, 39-95.doi: [10.1007/978-94-007-4479-0_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4479-0_3)
- Renard B. et al. (2013b)** Data-based comparison of frequency analysis methods: A general framework. *Water Resources Research*, 49, 1-19, 3, doi: [10.1002/wrcr.20087](https://doi.org/10.1002/wrcr.20087)

10 Annexes

10.1 Documents et rapports mis à disposition pour l'expertise

Données issues d'organismes français : DREAL Grand-Est, EDF

- **BETCGB (2012)**. Aménagements de Gamsheim et Iffezheim. Détermination des débits extrêmes – étude IWG septembre 2009. Revanches des digues latérales. *Courrier du 09/05/2012*, 9p. [4_AvisDGPR2012DebitsExtremesGetI-extrait.pdf](#)
- **Commission d'Etude des Crues du Rhin (1978)**. *Rapport principal (55p.) et annexes (84p.)* [hskschlussberichtteil1-1978.pdf](#) ; [hskschlussberichtteil2-4-1978.pdf](#)
- **Commission Permanente - SGT Statistiques du GT Manoeuvres (juin 2010)**. *Détermination des débits extrêmes pour les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim. Questions*, 2p. [3aFragen-franz-Experten-deutsch-franz.pdf](#)
- **Commission Permanente - SGT Statistiques du GT Manoeuvres (juin 2010)**. *Statistique des valeurs extrêmes à Gamsheim et d'Iffezheim. Récapitulatif des données limnimétriques transmises à l'IWG et explication de la collecte des valeurs des débits de pointe de crue pour les limnimètres de Maxau et de Worms*, 6p. [3bExtremwertstatistik-LUBW-deutsch-franz.pdf](#)
- **Commission Permanente pour l'aménagement du Rhin supérieur (date non indiquée)**. *Note sur les revanches des digues du Rhin*, 4p. [5_20170126_synthèse_revanches-1-2.odt](#).
- **Commission Permanente – SGT Démonstration de l'efficacité (novembre 2016)**. *Démonstration de l'efficacité des mesures de rétention des crues du Rhin Supérieur entre Bâle et Worms* , 24 p. [ZS_WN-C-Bericht-D-F-2016-11-04 formatiert.docx](#)
- **Commission Permanente – SGT Démonstration de l'efficacité (avril 2020)**. *Démonstration de l'efficacité des mesures de rétention des crues du Rhin Supérieur entre Bâle et Worms* , 23 p.+ annexes + consignes d'exploitation [WN-2020-Bericht-SK.PDF](#) + [WN-2020-Anlagen-SK.pdf](#) + [180702_comparaison_Q_zone_retention_2.xlsx](#)
- **EDF (2002)**. *Calcul du débit millénal à Fessenheim par la méthode du renouvellement dans le cadre de la réactualisation de la CMS du site*, 31p. [1_EDF20020510_ETUDE-DTG_Calcul-Q1000_Fessenheim.pdf](#)
- **EDF (2010)**. *Le Rhin environnement international. Environnement général*, 21p. Journée CFBR, 16 oct. 2010. [EDFJourneeCfbr16Oct2010.pdf](#)
- **EDF (2015)**. *Connaissance des débits entrants à Kembs. Estimation des incertitudes associées*. Document interne, 7 p. [QKembs_incertitudes_Projet.pdf](#)
- **Fichier 180227_TAB_comparaison_etude_hydraulique.ods**. *Commentaires de la DREAL Gd Est (2018) sur les études IWG (2010), EDF (2002), EDF (2007)*
- **Fichier KEMBS_QMJ_19002005_etude2007.xlsx**. *Fichier de données QJ Rhin à Kembs (1900-2005)*
- **Fichiers 180710_inventaire_donnees.xls et 180807_inventaire_donnees_F_D.xlsx**. *Inventaire des données à collecter à Bâle et Maxau pour l'expertise*
- **Ministère de l'Environnement (2017)**. *Courrier de Ségolène Royal au président du Land de Bade-Wurtemberg du 10/02/2017*, 2p. [6_2017-02-10-Royal-Krestchmann-digues.pdf](#)
- **Payet (2016)**. *Etude bibliographique des débits de pointe du Rhin*, 12p. [EtudeBiblioQIXRhin2016.docx](#)

Données issues d'organismes allemands

- **Dossier 26Sept2018EtudeIWG**: données issues de IWG (2010) débits de crue à Maxau (été : 1891-2007 ; hiver : 1882-2008) ; [Maxau_HQ_Winterhw_Uni KA_2009_08_04.xls](#) ; [Maxau_HQ_Sommerhw_Uni KA_2009_08_05.xls](#) (et *.xlsx)
- **Dossier DREAL (données récupérées par la DREAL Grand-Est)** : 14 jaugeages à Maxau (2013-2018) ; courbe de tarage récente à Maxau (post 1997) ([19 fichiers pdf](#) ; [courbe_tarage_maxau.txt](#) ; [180730_recap_date_jaugeage_DREAL.odt](#))
- **Dossier WSV (données récupérées par la DREAL Grand-Est)** : chroniques à Maxau QJ (1910-1981) ; Q(t) (1981-2018) pas de temps 15 mn. ; 850 jaugeages (1947-2017) ; courbe de tarage

récente à Maxau (post 2009. Maxau-Q-Tag-1910_1981_TagMax_1981_2018.xlsx ; Maxau-15-min-1981-2018.all ; 2018-07-19_Maxau_jaugeages_1930-2017.xlsx ; Maxau-Schlüsselkurve 26.1.xlsx ; 180803_mail_explications_donnees_limnimètre_Maxau.pdf)

- **Université de Karlsruhe (2010) ou IWG (2010).** Détermination des débits extrêmes pour les biefs de Gambshheim et d'Iffezheim. HY 8/4, 49p. + annexes A-E. 3_Bericht IWG 2010_f.pdf + Bericht_Anlage_A_B_C_D_E_F.pdf
- **Dossier 30Avril2020 (données récupérées par la DREAL Grand-Est) :** LUBW (2019) Utilisation antérieure de mesures de rétention sur le Rhin supérieur entre Bâle et Worms. Tableau (1 p.) Massnahmen-Einsatze-1988-2018-AGM.pdf

Données issues d'organismes suisses

- **BAFU (2007).** Hochwasserstatistik. Stationsbericht Rhein – Basel. Statistiques de crue sur le Rhin à Bâle, 24p. 2289_hq_Bericht_rapport_station_bale_BAFU.pdf
- **Dossier 13Sept2018 (données récupérées par la DREAL Grand-Est) :** 9 courbes de tarage à Bâle (1916-1932) ; Rhein - Basel, Schifflande_Abflusskurve*.pdf ; Lieferschein5752.pdf ; Abflusskurven_Schifflande.xlsx ; 180807_inventaire_donnees_F_D_15.08.2018.xlsx
- **Dossier 8Aout2018 (données récupérées par la DREAL Grand-Est) :** 45 jaugeages à Bâle (2003-2018) ; 16 courbes de tarage à Bâle (1995-2016) ; Abflussmessungen Rhein-Rheinhalde (2289).xlsx ; toussirost_PQ_2289_basel_rheinhalde_00811_abflusskurve_kontinuierlich_mittel_version_10_25*.csv ; toussirost_PQ_2289_Basel_Rheinhalde_kurvenguelteig.pdf ; 180808_mail_envoi_donnees_BAFU_2_.pdf
- **Dossier BAFU1 (données récupérées par la DREAL Grand-Est) :** chroniques à Bâle H(t) (1974-2017) pas de temps 10 mn ; QJ (1903-1995) ; Q(t) (1995-2017) pas de temps 10 mn. Tableau données disponibles à Bâle ; Stationsgeschichte Rhein – Basel (traduction approximative du document « Histoire de la station du Rhin à Bâle ; 6 pages). H_2289_Rheinhalde_10MinMittel_1974_2017.asc ; Q_2001_Schifflande_Tagesmittel_1903_1995.xlsm ; Q_2289_Rheinhalde_10MinMittel_1995_2004.xlsm ; Q_2289_Rheinhalde_10MinMittel_2005_2017.xlsm ; Zeitstrahl_Rhein_Basel.pdf ; Zeitstrahl_Rhein_Basel_Ausfuhrlich_Extern.pdf ; Zeitstrahl_Rhein_Basel_Ausfuhrlich_Extern_FR.docx
- **Dossier DocOFEV (données récupérées par Irstea) :** données hydrométriques à Bâle : Schifflande, Rheinhalde, Saint Alban (928 fichiers, 5.9 Go)
- **Dossier DocUnivBerne (données récupérées par Irstea) :** débits de crue à Bâle (1268-2013) ; LIST_Rhine_floods_Basel.xlsx
- **Scherrer (2004).** Szenarien für die extremen Hochwasser des Rheins bei Basel, 36p. szenarien_fuer_dieextremenhochwasserdesrheinsbeibasel.pdf et ScenariosCrue RhinScherrer2004.docx (traduction approximative du document)
- **Site internet de l'OFEV (BAFU) :** www.bafu.admin.ch/dangersnaturels. Correction des eaux du Jura (Eau) ; Régulation des lacs du pied du Jura ; Régulation du lac de Lugano ; Régulation du lac des Quatre-Cantons ; Régulation du lac de Zurich ; Régulation du lac Majeur

10.2 Sources de données utiles aux séries hydrométriques de Maxau et Bâle

- **Source (S1)** *Zentral Bureau für Meteorologie and Hydrographie (Bern, 1908).*
[1908_tab_H_max_Bale_Maxau_1801_1900.pdf](#)
[1908_tab_H_max_Bale_Maxau_1801_1900.xlsx](#) (*)
- **Source (S2)** *Arbeitsgruppe Statistik HX-Oberrhein (?,?)*
[tab_H_journalier_Maxau_1883_1900.pdf](#)
[tab_H_journalier_Maxau_1883_1900.xlsx](#) (*)
[tab_Q_journalier_Maxau_1883_1900.pdf](#)
[tab_Q_journalier_Maxau_1883_1900.xlsx](#) (**)
- **Source (S3)** *Ermittlung der mittleren jährlichen geschiefbeführenden Wasserstände Basel – Maxau – Blatt 3 (?,?)*
[1930_modification_pente_B_M_1810_1927_tab_H_max_B_M_1810_1926.pdf](#) (*)
[1930_tab_H_max_M_1819_1926.png](#)
- **Source (S4)** *IWG (2010). Ermittlung von extremen Abflüssen für die Staustufen Gamsheim und Iffezheim. Détermination des débits extrêmes pour les biefs de Gamsheim et d'Iffezheim.*
[Maxau_HQ_Sommerhw_Uni KA_2009_08_05.xlsx](#)
[Maxau_HQ_Winterhw_Uni KA_2009_08_05.xlsx](#) (*)
- **Source (S5_1)** *Données communiquées par WSV (2019)*
[Maxau-Q-Tag-1910_1981_TagMax_1981_2018.xlsm](#) (***)
- **Source (S5_2)** *Données communiquées par WSV (2019)*
[Maxau-HW-HQ-Werte 1815-2008.xlsx](#)
- **Source (S6)** *Données communiquées par WSV (2019)*
[GaugingMaxau1947_2017.xlsx](#) (***)
- **Source (S7_1)** *Données WSV (1974)*
[1974_tab_maxau_courbes_tarage_1821_1973.pdf](#)
[1974_tab_maxau_courbes_tarage_1821_1973.xlsx](#) (*)
- **Source (S7_2)** *Données WSV (2019)*
[Maxau-Q-Kurven-1974-2008.xlsx](#)
- **Source (S8)** *Pegelstammbuch Maxau (WSV, 1975)*
[1975_livre_bord_limnimetre_Maxau.pdf](#)
[1975_livre_bord_limnimetre_Maxau_FR.docx](#) (*)
- **Source (S9)** *Modèle hydraulique du Rhin (HKV, 2011)*
Coefficients de Strickler ; Pente du Rhin [Daten_Basel_Maxau.xlsx](#)
- **Source (S9_1)** *Modèle hydraulique du Rhin (HKV, 2011)*
Profils en travers [CrossProfileMaxau.xlsx](#)
- **Source (S9_2)** *WSV (12/03/2019)*
Profils en travers (version papier)
- **Source (S10_1)** *Die Veränderungen im Langenschnitt des Rheins zwischen Basel and Mannheim seit dem Jahr 1830 (Bad Wasser und Strassenbaudirektion in Karlsruhe, 1930)*
[Veränderungen-1830-1926.pdf](#)
- **Source (S10_2)** *Beiträge zur Hydrographie des Grossherzogthums Baden. Atlas zum dritten Heft (OberDirektion des Wasser und Strassenbaues, Karlsruhe, 1885) (*)*
Dossier AtlasRhin1885: Vues en plan [Cartes*.jpg](#); *Profils en long* [Blatt*.jpg](#) (*)
- **Source (S10_3)** *Die Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle von Basel bis Mannheim in den Jahren 1810 bis 1927 (Bad. Wasser- und Straßenbaudirektion in Karlsruhe, 1930)*
[Die Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle von Basel bis Mannheim von 1810 bis 1927, Teil I_II_III.pdf](#)
[MorphologieRhinBaleMannheim1810_1927.docx](#)
- **Source (S10_4)** *Der Abfluss des Rheins am Pegel Maxau (Landesstelle für Gewässerkunde Karlsruhe, 1950?)*
[Abfluss des Rheins am Pegel Maxau von 1851 bis 1949.pdf](#)
[DebitMaxau1851_1949.docx](#)

- **Source (S11)** *Langenprofil des Rheins* (WSD, 1988)
[Längenprofil-Rhein-1987.pdf](#)
- **Source (S12)** *Wasserspiegelaufhöhung Pegel Maxau* (WsV, 2015)
[2015_06_08-Aufhöhung Maxau-FSG-BAW-final-1.pdf](#)
- **Source (S13_1)** *Veränderungen am Pegel Maxau* (BAW, 2015)
[2015-06-08_GWDS-Länder_Praesentation.pptx](#)
- **Source (S13_2)** *Berechnung historischer Wasserspiegel und Sohllagen des Rheins* *Veränderungen am Pegel Maxau* (Vollmer et Schulz, 2019)
[VollmerSchulz2019.pdf](#)
[BWK Rheintag18_vollmer.docx](#)
- **Source (S13_3)** *Über Stoffströme und die Eintiefung des Rheins den letzten zwei Jahrhunderten* (Vollmer, 2019)
[BWK Rheintag18_vollmer.pdf](#)
[BWK Rheintag18_vollmer.docx](#)
- **Source (S14)** *Données OFEV*
[\DocOFEV\2001 Basel, Schifflande 00001](#)
- **Source (S15)** *Données OFEV*
[BAFU1\H_2289_Rheinhalle_10MinMittel_1974_2017.asc](#)
[BAFU1\Q_2001_Schifflande_Tagesmittel_1903_1995Bis.xlsm](#) (***)
- **Source (S16)** Article Wetter *et al.* (2011) HSJ <https://doi.org/10.1080/02626667.2011.583613>
[LIST_Rhine floods Basel.xlsx](#)
- **Source (S17)** *Commission d'Etude des Crues du Rhin* (1978)
[hskschlussberichtteil1-1978.pdf](#), [hskschlussberichtteil2-4-1978.pdf](#)
- **Source (S18)** *EDF*(2002)
[EDF20020510_ETUDE-DTG_Calcul-Q1000_Fessenheim.pdf](#)
- **Source (S19)** *Commission d'Etude des Crues du Rhin* (1972)
[1972_tab_Q_max_journalier_Bale_1817_1969.pdf](#) (*)
- **Source (S20)** *IWG* (2010)
[endg_Werte_Basel_Liestal_berechnet_Ihringer.xls](#)
- **Source (S20_bis)** *IWG* (2010)
[Schweiz_Q_*.asc](#)
- **Source (S21)** *OFEV*(2017)
[Q_2289_Rheinhalle_10MinMittel_1995_2017.asc](#)
- **Source (S22)** *WSV*(12/03/2019)
[WSV_DieAbflussverhaeltnisseDesRheinsInBasel1929_1808_1925.pdf](#) et [.xlsm](#)
- **Source (S23)** *Données OFEV*
[DocOFEV\2001 Basel, Schifflande 00001\PQ-Beziehungen\1-PQPlan\Jpeg_150DPI, *.jpg](#)
- **Source (S24)** *Données OFEV*
[DocOFEV\2289 Basel, Rheinhalle 00811 00811-PQPlan-001.jpg](#)
- **Source (S25)** *Données OFEV*
[Abflussmessungen Rhein-Rheinhalle \(2289\).xlsx](#)
- **Source (S26)** *Données OFEV*
[DocOFEV\2001 Basel, Schifflande 00001\PQ-Beziehungen\1-PQTable: *.pdf](#)
- **Source (S27)** *Données OFEV*
[Dossier DocOFEV\2289 Basel, Rheinhalle 00811: 00811-PQTab-001.pdf](#)
- **Source (S28)** *Données OFEV*
[toussiroat_PQ_2289_basel_rheinhalle_00811_abflusskurve_*.csv](#)
- **Source (S29)** *Mail du 05/03/2019* (vonwiller@tkconsult.ch; TK CONSULT AG, Zurich) (associé à article Wetter et al., 2011). Coefficient de Strickler utilisé pour la reconstitution des plus forts débits de crue depuis 1300
- **Source (S30)** *Données OFEV : profils en travers du Rhin à Bâle en 1914, 1916, 1918, 1922, 1930*
[Dossier DocOFEV\2001 Basel, Schifflande 00001\Pläne *.pdf](#)
- **Source (S31)** Defontaine (1833) *Des travaux du fleuve du Rhin*, 63 pages + tableaux

Defontaine1883.pdf

- **Source (S32)** Auteur non indiqué (1859) 2^e *Fleuves et rivières. Le Rhin*, extrait pages 230-325
[Le_Rhin_annee_inconnue.pdf](#)
- **Source (S33)** Service Navigation de Strasbourg (1980) *Les voies d'eau et les ports de la circonscription du service de la navigation de Strasbourg*, Regards sur la France, janvier 1980, 143 pages
[LivreVoieEauPorts1980_i-3.pdf](#) (i=1,3)

(Les versions papier de certaines de ces sources ont été scannées, puis traitées par un logiciel de reconnaissance de caractères (ABBYY FineReader 11) pour numérisation. Le texte en allemand de certaines sources a été traduit approximativement en français (via GoogleTrad) pour comprendre le sens général du texte.*

*(**) données saisies manuellement*

*(***) données traitées par informatique (par ex. extraction du maximum annuel via macro Visual Basic, ou conversion de format)*

10.3 Analyse de la cohérence de la série des crues du Rhin à Bâle

Un premier contrôle consiste à vérifier l'homogénéité de la série des valeurs supérieures à un seuil S , en supposant que le processus d'occurrence suit une loi de Poisson. Pour chaque jeu de données (série brute ou série avec correction N°1 ou n°2), nous avons constitué un échantillon des crues supérieures à un seuil $S1$ (plus petit débit historique connu de la période 1225-1713) sur la totalité de la période 1225-2017, et un échantillon des crues supérieures à un seuil $S2$ (plus petit débit historique connu sur la période 1714-1807) sur la totalité de la période 1714-2017 ou sur la période 1808-2017. La *Figure 39* donne le dénombrement des crues supérieures à un seuil dans les différentes configurations testées (période considérée, jeu de données). Le début de la période historique a été fixé à 1225, date à laquelle le pont de la cité a été construit (Wetter *et al.*, 2011). Il est vraisemblable que si des crues importantes avaient eu lieu avant la première crue recensée en 1268, celles-ci auraient laissé une trace dans les archives documentaires. Pour information, une analyse de sensibilité (non reproduite dans le rapport) a montré que les résultats obtenus sur le test d'homogénéité et plus loin sur la distribution des crues variaient peu si on fixait le début de la période historique en 1268.

Pour un échantillon de N crues ($X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_N)$) supérieures à ce seuil S , si l'on reporte sur un graphique en abscisse la date et en ordonnée le N° de la crue (par ordre chronologique), on devrait avoir une courbe expérimentale proche d'une droite régulière. Il suffit de comparer cette courbe expérimentale à l'intervalle de confiance du nombre de crues m_t sur un intervalle $[0 ; t]$ (Lang *et al.*, 1999). La *Figure 40* donne les résultats du test pour les différentes configurations testées.

Avec les données brutes, la courbe expérimentale sort de l'intervalle de confiance à 90% pour les périodes 1225-2017 et 1714-2017. Sur la période récente 1808-2017, le seuil $S2$ trop élevé n'a été dépassé que 8 fois, et il est difficile de conclure. Il en ressort clairement que la série n'est pas homogène, ce qui n'est pas surprenant compte-tenu des aménagements réalisés en 1714 et vers 1890.

La série reconstituée avec la correction N°1 peut en revanche être considérée comme homogène (avec un risque d'erreur de 10 %), ce qui n'est pas le cas avec la correction N°2 qui conduit à réduire fortement le nombre de fortes crues anciennes supérieures au seuil $S1$ ou $S2$.

Cette première analyse nous conforte dans la nécessité de raisonner sur une série de débits de crue ramenés à un même état de référence, dans la configuration actuelle. Comme présumé, il semble préférable d'utiliser la correction N°1 basée sur des études hydrauliques récentes (Wetter *et al.*, 2011) plutôt que la correction N°2 (CECR, 1978).

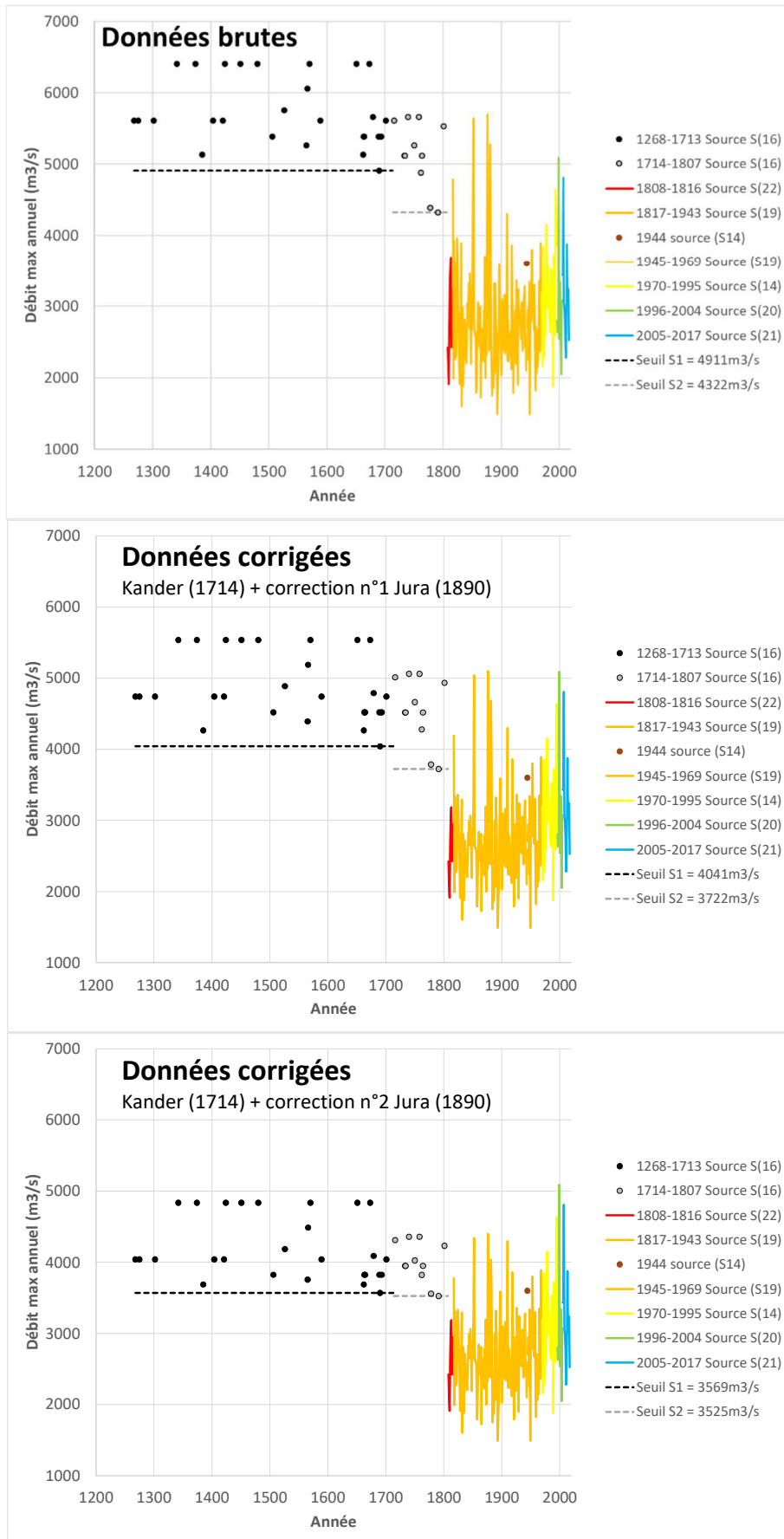


Figure 38 : Série chronologique des débits de crue du Rhin à Bâle (série brute, série corrigée n°1 ou n°2) (ChroniqueBale*.xlsx)

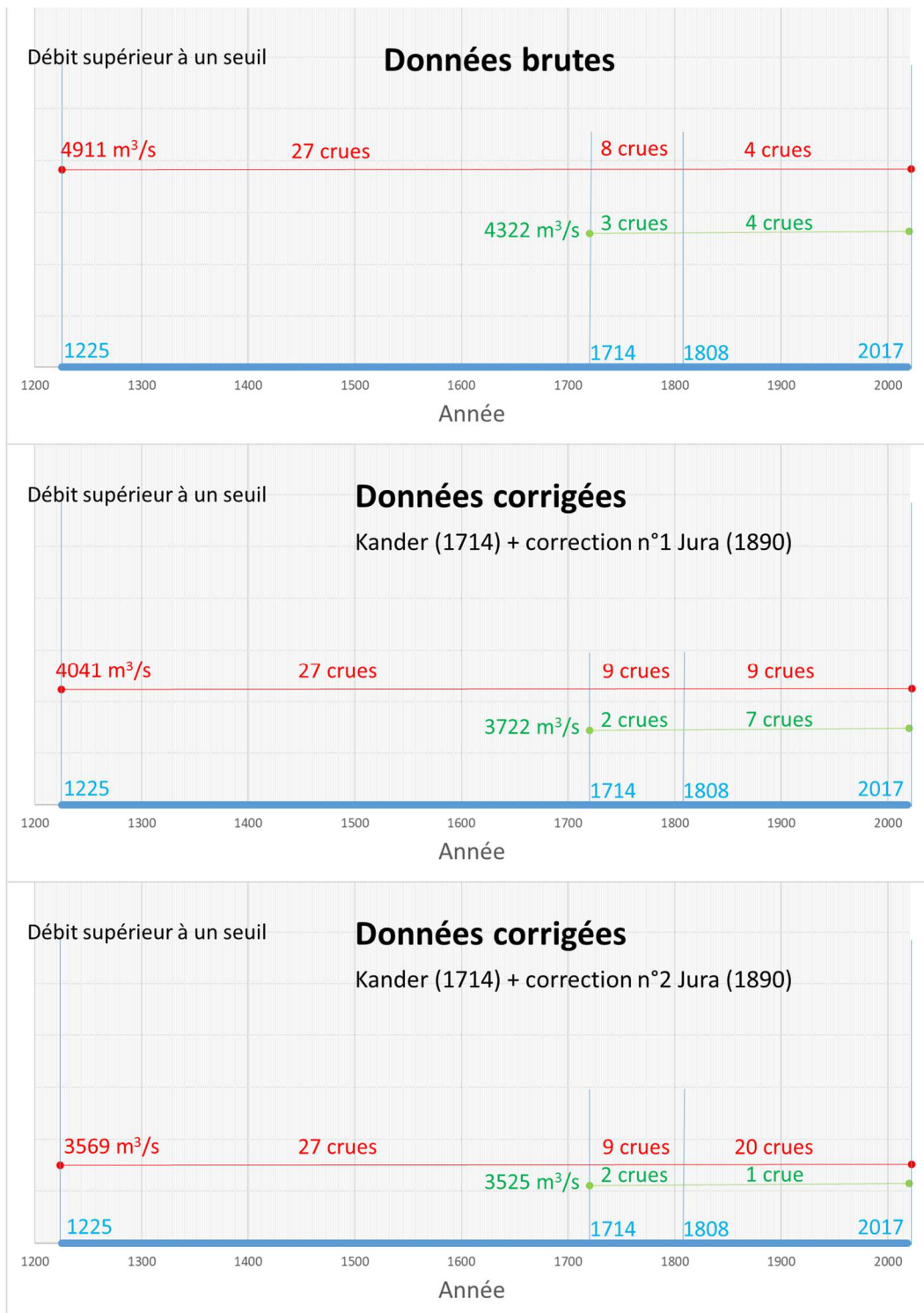


Figure 39 : Effectif des échantillons de débits de crue du Rhin à Bâle supérieurs à un seuil, pour 3 périodes 1225-2017, 1714-2017 et 1808-2017, et pour 3 jeux de données (série brute, série corrigée n°1 ou n°2) (Diapo.pptx)

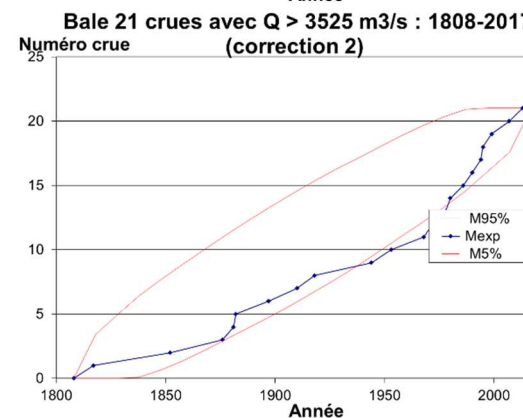
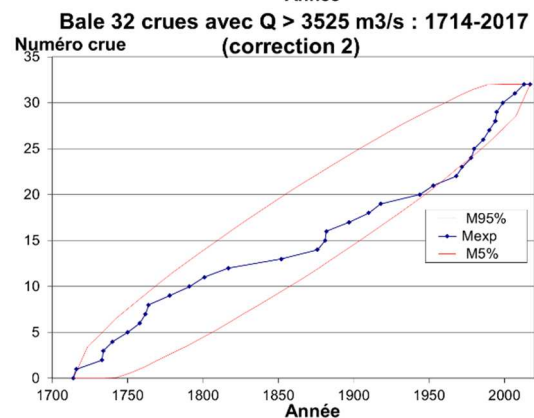
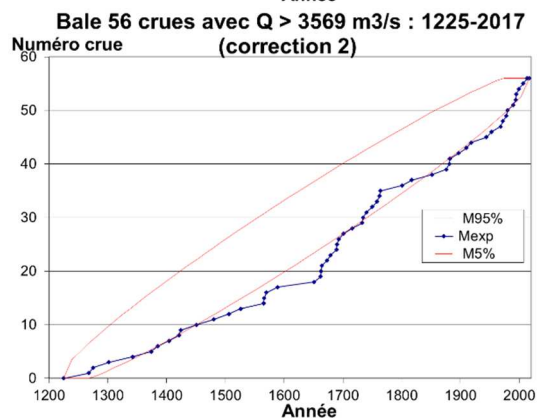
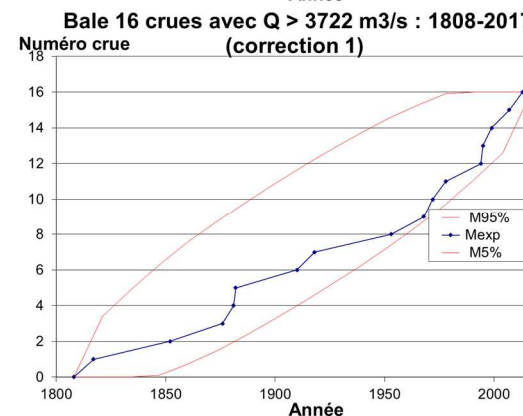
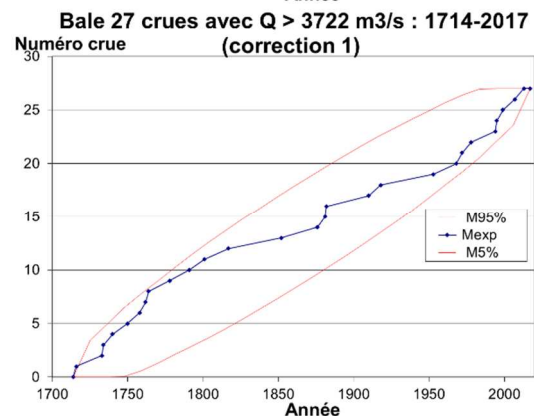
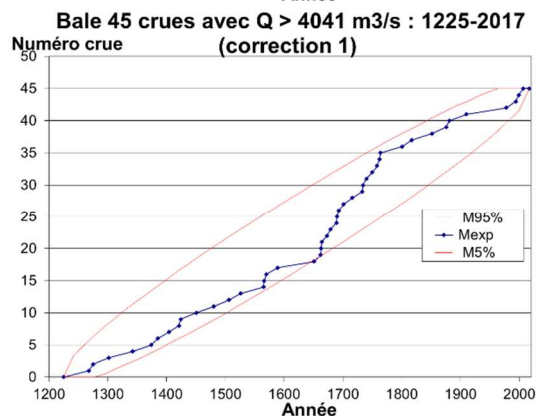
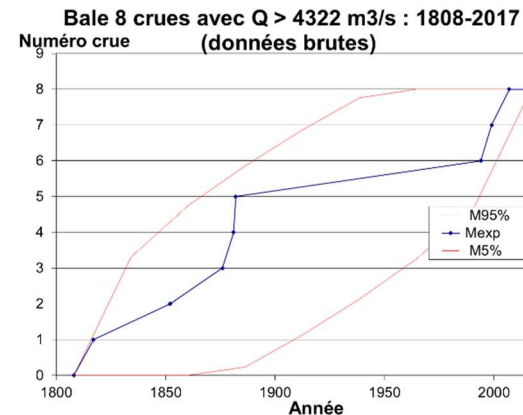
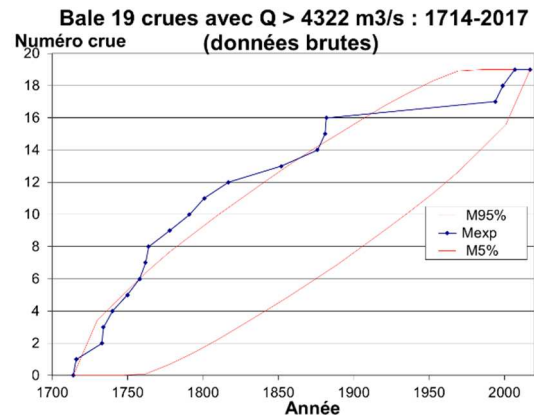
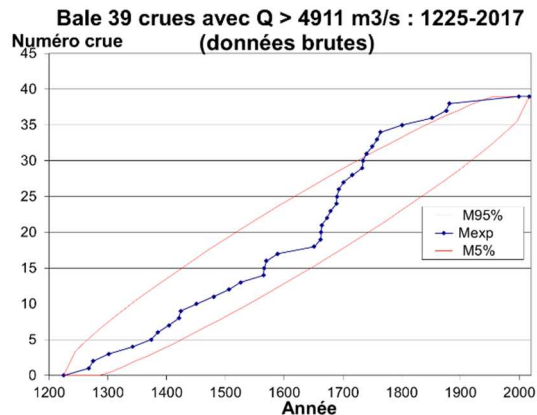


Figure 40 : Test de Poisson sur l'homogénéité de la série de débits de crue du Rhin à Bâle supérieurs à un seuil (TestPoissonBale*.xls)

Un second contrôle a porté sur l'homogénéité de la série continue de débit maximum annuel sur la période 1808-2017 et sur la période 1890-2017 (postérieure aux premiers travaux de correction des eaux du Jura). Nous avons appliqué quatre tests :

- Test de Mann-Kendall sur l'absence de tendance dans un échantillon (Kendall, 1975) ;
- Test de Pettitt sur l'absence de rupture dans un échantillon (Pettitt, 1979) ;
- Test de Student sur l'égalité des moyennes de deux échantillons (Ceresta, 1995) ;
- Test bayésien sur la segmentation de séries chronologiques (Darienzo *et al.*, 2020).

Une statistique de test T est calculée sur l'échantillon (valeur observée $Tobs$), et le résultat est donné sous forme d'une probabilité $p = \text{Prob}[T > Tobs]$ appelée en anglais p-value. En pratique, l'hypothèse testée est acceptée si la statistique $Tobs$ a une valeur faible, avec une p-value > 0.1 .

Si la probabilité calculée est très faible, il y a :

- $p \leq 0.01$, une très forte présomption contre l'hypothèse testée ;
- $0.01 < p \leq 0.05$, une forte présomption contre l'hypothèse testée ;
- $0.05 < p \leq 0.1$, une faible présomption contre l'hypothèse testée.

Tableau 18 : Test d'homogénéité de la série continue de débit maximum annuel à Bâle sur la période 1890-2017 et la période 1808-2017

Période	Données	Test statistique			
		Pas de tendance	Pas de rupture	Egalité de moyennes	Pas de segmentation
		<i>Mann-Kendall</i>	<i>Pettitt</i>	<i>Student</i>	<i>Darienzo</i>
1890-2017	Brutes	$p = 3E-3$ Rejet	$p = 2E-3$ Rejet → rupture en 1933	$p = 1E-3$ Rejet (1890-1930/1931-2017)	1 rupture vers 1929-1930
1808-2017	Brutes	$p = 2E-3$ Rejet	$p = 2E-4$ Rejet → rupture en 1929	$p = 1E-3$ Rejet (1808-1930/1931-2017)	1 rupture vers 1930-1933 saut 398 m ³ /s espacement 195% : 82 m ³ /s
	correction n°1 (travaux correction Jura 1890)	$p = 3E-4$ Rejet	$p = 1E-3$ Rejet → rupture en 1964	$p = 2E-5$ Rejet (1808-1964/1965-2017)	1 rupture en 1966 ou 1976 saut 450 m ³ /s espacement 195% : 150 m ³ /s
	correction n°3 (+ 150 m ³ /s sur 1808-1976)	$p = 8E-3$ Rejet	$p = 0.02$ Rejet → rupture en 1925	$p = 0.02$ Rejet (1808-1924/1925-2017) $p = 2E-3$ Rejet (1808-1964/1965-2017)	1 rupture vers 1964-1966, mais peu significative saut 338 m ³ /s espacement 195% : 0 m ³ /s
	correction n°4 (+ 300 m ³ /s sur 1808-1976)	$p = 0.13$ OK	$p = 0.22$ OK	$p = 0.11$ OK (1808-1930/1931-2017) $p = 0.06$ OK (1808-1964/1965-2017)	OK

Le Tableau 18 montre des résultats cohérents sur la **forte hétérogénéité de la série brute**. Les travaux de correction des eaux du Jura (vers 1878-1890) ne semblent pas avoir introduit de modification majeure (pas de rupture détectée à cette date). Les séries brutes 1890-2017 et 1808-2017 sont considérées comme hétérogènes, avec une **rupture vers 1929-1933, qui pourrait correspondre à la mise en service du barrage de Kembs (1933)**, et au déplacement de la station plus en amont.

La série corrigée pour tenir compte du fait du laminage introduit par les travaux de correction du Jura (vers 1890) est considérée comme hétérogène, avec une rupture vers 1964-1966 ou 1976. A ce stade, il est difficile de trouver une explication sur l'origine de cette rupture. Sur le site internet de l'OFEV :

<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/dossiers/jurage-waesserkorrektio n/150-jahre-juragewaesserkorrektio n-die-zweite-etappe-der-juragewaesserkorrektio n-drei-seen-ein-einziges-rueckhaltebecken.html>

il est mentionné en 1939 la mise en service du barrage de régulation de Port en sortie du lac de Biemme pour gérer le laminage des crues de l'Aar, puis plus en aval les seconds travaux de correction des eaux du Jura (1962-1973), qui ont consisté en la mise en place d'un barrage de régulation à Flumenthal, environ 2 km en aval de la confluence Emme-Aar pour laminier les crues. Ces travaux ont eu pour objectif de réduire la fréquence des inondations en aval de Biemme et de réduire le débit de pointe de crue vers l'aval.

On voit sur la *Figure 41* que la série avec la correction N°1 présente un dernier segment (à partir de 1964 ou 1968) plus fort en moyenne que celui qui le précède. Cette augmentation des débits peut difficilement être reliée à des travaux à la même période, censés réduire les pointes de crue à l'aval. Il est plus vraisemblable qu'il s'agisse d'un problème métrologique (cf. section 5.2), sur la période 1933-1994 pendant laquelle le débit à Bâle a été calculé à partir de 3 stations hydrométriques (Rhin/Rheinfelden, Ergloz/Liestal, Birs/Munckenstein).

Sur la *Figure 41* (série avec correction N°1), on note un espacement de 150 m³/s entre la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne de la période 1815-1968 et la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne de la période 1969-2018. La position de la rupture est incertaine, avec deux modes dans la distribution de la date (en 1966 et 1976).

Au final, nous retenons une correction supplémentaire de tous les débits de la période 1815-1976, avec une majoration de 150 m³/s (correction N°3). Cette dernière série reste considérée comme hétérogène pour les tests de Pettitt, Mann-Kendall et Student (p-value un peu plus forte qu'avec la correction N°1). Le test de segmentation continue de trouver deux segments, mais les intervalles de confiance des moyennes sont tout juste disjoints. Il faudrait en fait introduire une majoration de 300 m³/s (correction N°4) pour que la série soit considérée comme homogène (cf. *Tableau 18*).

A noter que cette correction finale de +150 m³/s sur les débits de la série de Bâle (1815-1876) est identique à celle qui va être retenue (cf. section 4.7) pour les débits de la série de Maxau (1815-1976).

La série de Bâle avec la correction N°3 sera utilisée pour l'analyse de la distribution des crues.

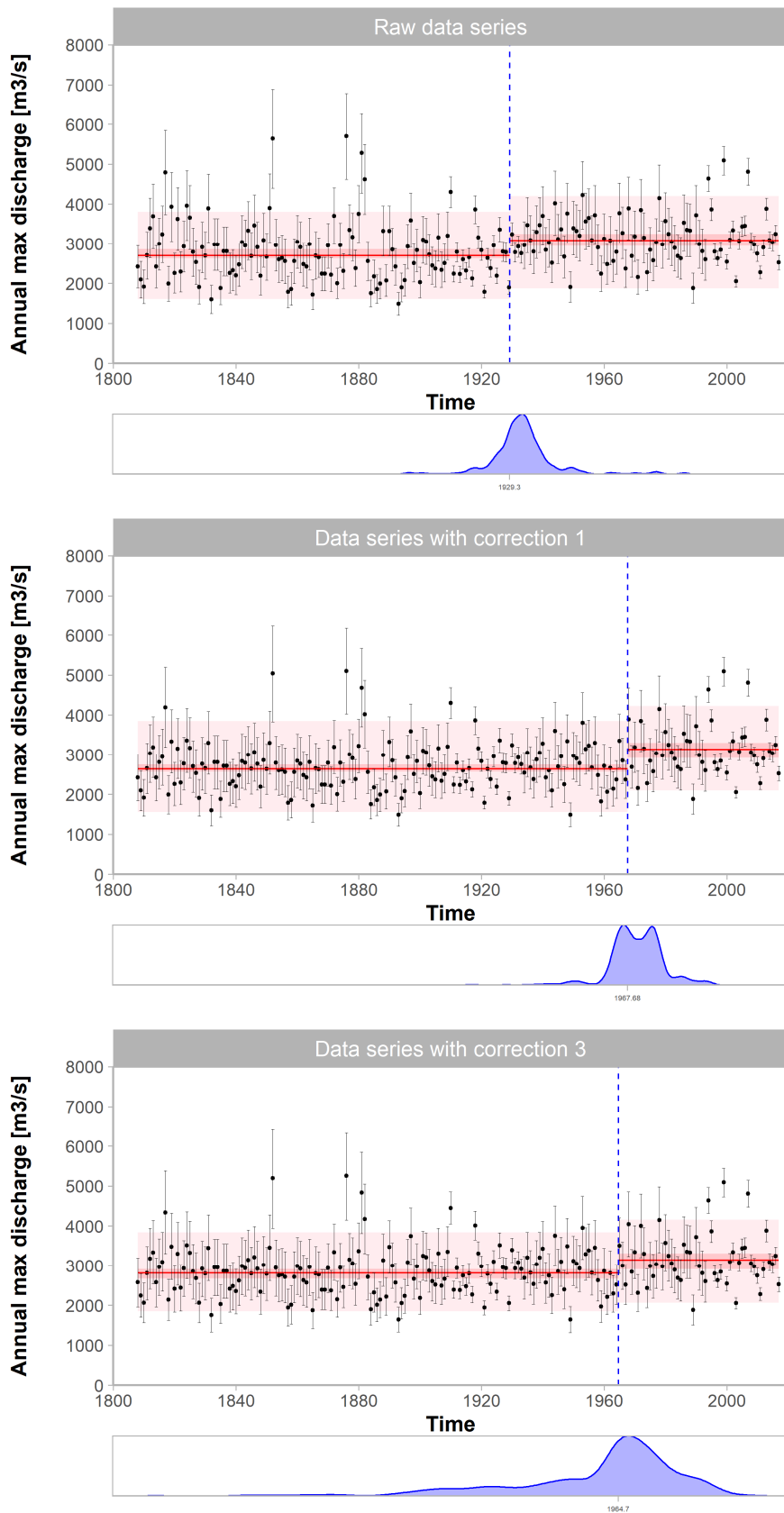


Figure 41 : Test de segmentation sur la série continue de débit maximum annuel à Bâle sur la période 1808-2017 : (TestSegmentationBale1808_2017*.png)

10.4 Analyse de la cohérence de la série des crues du Rhin à Maxau

Période 1815-1820

Il est possible de reconstituer le débit maximal annuel de la période 1815-1820, en exploitant les données sur les hauteurs maximales annuelles (sources S1 et S5_2), la courbe de tarage la plus ancienne, de la période 1821-1827 (source S7_1), et des informations sur l'évolution morphologique du lit du Rhin (source S10_3). Le *Tableau 19* donne les valeurs de débit estimées, qui semblent beaucoup trop fortes si on exploite l'information donnée par la source (S32), qui date de 1859 : « la crue de 1824 est supérieure dans le Bas-Rhin à toutes celles observées depuis 1801 » (page 284). Or d'après la source (S5_2), le débit de la crue maximale de 1824 vaut 4080 m³/s, qui aurait été dépassé par les crues de 1816, 1817 et 1819 (*Tableau 19*). Les gros travaux de chenalisation du Rhin ont débuté dans le secteur Lauterbourg-Mannheim dès 1818 (CECR, 1978, annexe 2.6), et ont eu pour effet une forte incision du lit mineur. D'après la source (S10_3), le fonds du lit a baissé de 0.74 m entre 1820 et 1826 (cf. *Figure 74*).

Tableau 19 : Reconstitution du débit maximum annuel à Maxau sur la période 1815-1820

Année	1815	1816	1817	1818	1819	1820
Date	29/06/1815	21/12/1816	09/07/1817	/	24/12/1819	20/01/1820
H_{max}	7.80	8.73	8.82	7.02	8.37	7.89
$Q=f(H_{max})$	3740	4713	4813	3018	4329	3830
$Q=f(H_{max}-0.74)$	3054	3930	4024	2404	3579	3135

En translatant de 0.74 m la courbe de tarage de la période 1821-1827, on obtient des valeurs de crue qui sont toutes inférieures au débit de la crue de 1824. **Nous retiendrons les valeurs de la dernière ligne du *Tableau 19*.**

Période 1821-1882

Sur la période 1821-1882 (découpage en année civile), **nous avons retenu les valeurs de la source (S5_2). La cohérence des débits entre sources est bonne sauf pour les années suivantes :**

- **Crue maximale annuelle de l'année en 1849 :** 2940 m³/s pour la source (S5_2) et $Q(H=6.87) = 3103$ m³/s d'après la cote maximale annuelle (source S1) et la courbe de tarage correspondante (source S7). C'est la seule année sur la période 1821-1881 où la différence entre les deux estimations diffère de plus de 5% (cf. *Figure 42*) ;
- **Crue maximale de l'année en 1882 :** 4573 et 4610 m³/s le 28/12/1882 pour les sources (S2) et (S4), mais à rattacher à l'année hydrologique 1883. Nous avons retenu la valeur du 22/09/1882, la plus forte sur les mois 1 à 10 de l'année 1882 (cote maximale annuelle $H = 6.83$ m, source S1), convertie ensuite en débit $Q = 3207$ m³/s d'après la courbe de tarage (source S7).

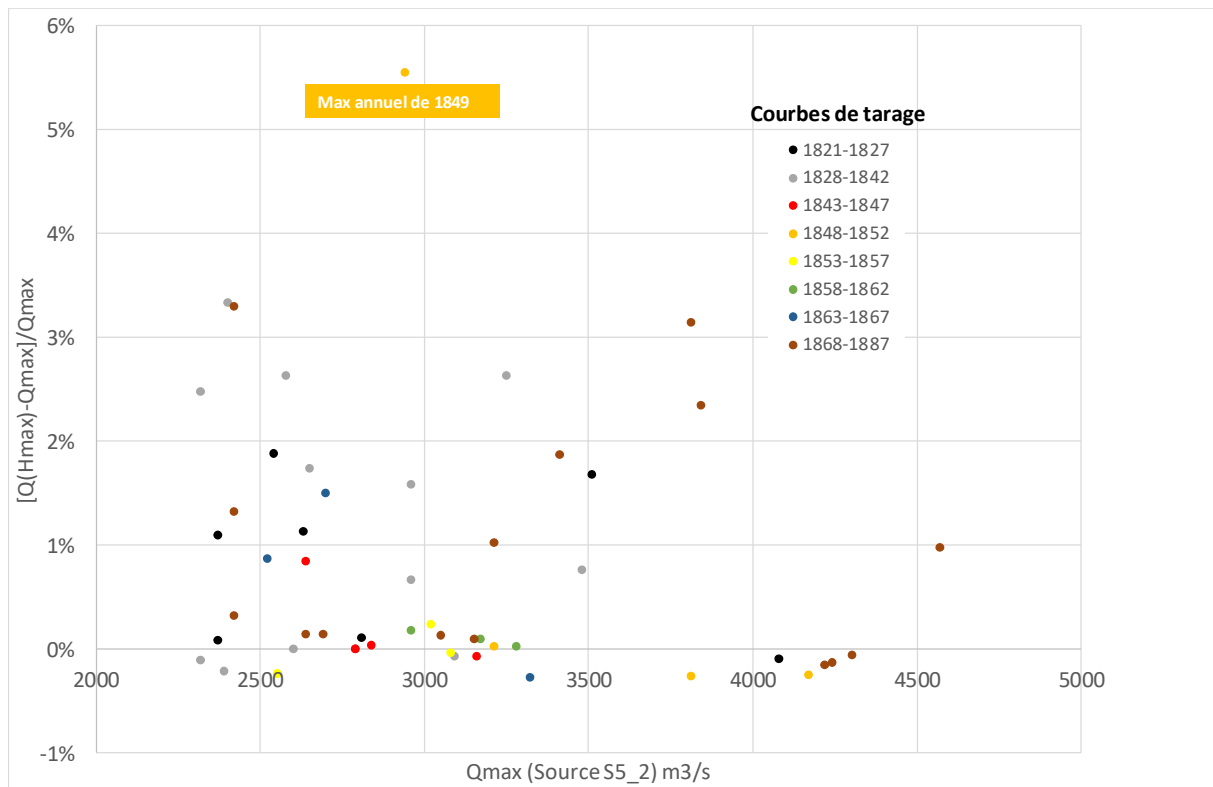


Figure 42 : Contrôle de cohérence sur les débits de la période 1821-1881 (VerificationCourbesTarageMaxau.xlsx)

Période 1883-1900

Sur la période 1883-1900 (découpage en année hydrologique : novembre année $N-1$ à octobre année N), nous avons retenu les valeurs issues de la source (S2) sauf pour les années suivantes :

- **Crue maximale de l'année en 1883** : 4010 m³/s (max année civile, sans date précise, source S5_2), et respectivement 4573 et 4610 m³/s (sources S2 et S4). Nous avons retenu la valeur issue de la source (S4), cohérente avec le débit $Q(H=8.25) = 4615$ m³/s (resp. sources S1 et S7_1 pour la cote et la courbe de tarage);
- **Crue maximale de l'année en 1893** : 1600 m³/s pour une cote $H = 4.80$ m (source S2, le 04/02/1893), et $Q(H = 5.02) = 1744$ m³/s (source S3 pour la cote maxi en 1893) avec la courbe de tarage $Q(H)$ de la période 1888-1897 (source S7_1).

A noter pour les crues maximales des années 1884-1885-1886 des différences de débit entre la source (S5_2) et la source (S2), qui viennent uniquement de la définition de l'année (resp. civile ou hydrologique). Nous avons retenu les valeurs maximales sur l'année hydrologique (extraction à partir de la source S2) : respectivement 1967, 2039 et 2674 m³/s. Elles sont cohérentes avec le débit $Q(Hmax)$ obtenu avec $Hmax$ (source S3) et la courbe de tarage $Q(H)$ de la période 1868-1887 (source S7_1) :

- Année 1884 : le 28/12/1883, $Q(H=5.36) = 2012$ m³/s (écart relatif +2%) ;
- Année 1885 : le 09/03/1885, $Q(H=5.44) = 2070$ m³/s (écart relatif +2%) ;
- Année 1886 : le 10/12/1885, $Q(H=6.26) = 2711$ m³/s (écart relatif +1%).

On note une différence significative pour la crue maximale de l'année 1900 : 2288 m³/s pour la source (S2) et 2560 m³/s pour la source (S5_2). Nous avons retenu la valeur de la source (S2), qui est cohérente avec le débit $Q(H=5.83) = 2304$ m³/s (respectivement sources S3 et S7_1 pour la cote et la courbe de tarage).

Période 1901-1910

Sur la période 1901-1910 (découpage en année hydrologique), **nous avons retenu les valeurs de la source (S5_2). On note une différence de débit significative pour l'année 1910** : 3790 m³/s pour la source (S4) et **3970 m³/s** pour la source (S5_2). Le débit $Q(H=7.66) = 3840$ m³/s (respectivement sources S3 et S7_1 pour la cote et la courbe de tarage) est situé entre ces deux valeurs, légèrement plus proche du débit de la source (S5_2).

Période 1911-2018

Sur la période 1911-1920 (découpage en année hydrologique), **nous avons retenu les valeurs de la source (S5_1)**. Elles sont cohérentes avec les valeurs $Q(H_{max})$ (sources S3 et S5_2 pour la cote, source S7_1 pour la courbe de tarage).

Sur la période 1921-2008 (découpage en année hydrologique), **nous avons noté un nombre important de différences sur les débits issus des différentes sources (S5_1, S5_2, S4 et S17)**. Nous avons systématiquement comparé ces valeurs avec celles issues des courbes de tarage. Lorsque les différentes valeurs sont cohérentes, nous avons exploité de préférence les données communiquées par le WSV, gestionnaire de la station hydrométrique (source S5_2 pour 1921-2018). Dans le cas contraire, nous avons retenu la source qui donne la valeur la plus proche de celle $Q(H_{max})$ obtenue avec la courbe de tarage (cf. *Tableau 20*).

Sur les 98 années de cette période 1911-2008, la valeur retenue pour $Q_{max}(an)$ provient respectivement 65, 19, 13 et 1 fois des sources (S1), (S4), (S5_2) et (S17).

Sur la période 2009-2018, nous avons repris les données de la source (S5_1). En l'absence de données sur les cotes maximales, aucune vérification n'a été faite par rapport avec $Q(H_{max})$ avec la courbe de tarage.

Tableau 20 : Différences constatées entre sources sur le débit maximum annuel à Maxau sur la période 1911-2008

An	Date maxi	Hmax (m)	Q(Hmax) (m ³ /s)	Différence constatée sur Qmax (m ³ /s)	Valeur retenue
1924	03/05/1924	7.36	3362	Incohérence sources S5_1(Q=3310) et S5_2 (Q=3566)	3310
1934	12/09/1934	5.80	2140	Différence débit : 2030 (S5_1), 2079 (S5_2)	2079
1935	31/10/1935	6.91	3044	Différence débit : 2810 (S5_1), 3055 (S5_2)	3055
1936	15/01/1936	7.42	3509	Différence débit : 3510 (S4) , 3410 (S5_1), 3499 (S5_2)	3510
1937	24/02/1937	6.36	2578	Différence débit : 2580 (S4) , 2470 (S5_1), 2602 (S5_2)	2580
1938	16/06/1938	6.79	3032	Différence débit : 3030 (S4) , 2830 (S5_1), 2954 (S5_2)	3030
1939	25/05/1939	7.10	3310	Différence débit : 3310 (S4) , 3090 (S5_1), 3217 (S5_2)	3310
1940	18/09/1940	7.30	3495	Différence débit : 3490 (S4) , 3270 (S5_1), 3392 (S5_2)	3490
1941	16/06/1941	6.84	3076	Différence débit : 3080 (S4) , 2920 (S5_1)	3080
1942	14/03/1942	6.86	3094	Différence débit : 3100 (S4) , 2930 (S5_1), 3010 (S5_2)	3100
1943	19/06/1943	5.78	2145	Différence débit : 2070 (S5_1), 2160 (S5_2)	2160
1944	04/09/1944	5.57	1989	Différence débit : 1860 (S5_1), 2000 (S5_2)	2000
1946	26/06/1946	6.86	3014	Différence débit : 2910 (S5_1), 2970 (S5_2)	2970
1947	24/03/1947	5.95	2273	Différence débit : 2270 (S4) , 2140 (S5_1), 2230 (S5_2)	2270
1948	10/07/1948	7.66	3690	Différence débit : 3690 (S4) , 3580 (S5_1), 3550 (S5_2)	3690
1951	29/11/1950	7.21	3260	Différence débit : 3220 (S5_1) , 3160 (S5_2)	3220
1953	29/06/1953	7.85	3790	Différence débit : 3790 (S4) , 3670 (S5_1), 3690 (S5_2)	3790
1956	05/03/1956	6.89	2907	Différence débit : 2910 (S4) , 2840 (S5_1), 2860 (S5_2)	2910
1957	28/02/1957	7.88	3820	Différence débit : 3820 (S4) , 3670 (S5_1), 3910 (S5_2)	3820
1958	27/02/1958	7.41	3309	Différence débit : 3310 (S4) , 3180 (S5_1), 3400 (S5_2)	3310
1959	25/01/1959	6.16	2250	Différence débit : 2210 (S5_1) , 2290 (S5_2)	2210
1962	15/01/1962	6.85	2813	Différence débit : 2820 (S4) , 2720 (S5_1), 2850 (S5_2)	2820

1963	13/06/1963	5.81	1927	Différence débit : 1910 (S5_1) , 2030 (S5_2)	1910
1964	07/05/1964	6.21	2218	Différence débit : 2140 (S5_1) , 2310 (S5_2)	2140
1965	13/06/1965	7.64	3438	Différence débit : 3340 (S4) , 3330 (S5_1), 3650 (S5_2)	3340
1966	11/02/1966	7.31	3139	Différence débit : 3220 (S4) , 2960 (S5_1), 3300 (S5_2)	3220
1967	29/01/1967	6.55	2490	Différence débit : 2530 (S4) , 2370 (S5_1)	2530
1968	24/09/1968	7.94	3653	Différence débit : 3650 (S4) , 3540 (S5_1), 3980 (S5_2)	3650
1969	29/08/1969	6.79	2622	Différence débit : 2760 (S4), 2590 (S5_1) , 2800 (S5_2)	2590
1970	25/02/1970	8.3	4010	Différence débit : 4010 (S4) , 3950 (S5_1), 4400 (S5_2)	4010
1971	21/06/1971	6.08	2070	Différence débit : 2070 (S5_1) , 2190 (S5_2)	2070
1972	23/07/1972	5.60	1740	Différence débit : 1740 (S5_1) , 1840 (S5_2)	1740
1973	25/11/1972	7.96	3672	Différence débit : 3560 (S5_1), 4000 (S5_2), 3670 (S17)	3670
1974	30/10/1974	6.29	2210	Erreur source (S4): 3670, le 25/11/1973, au lieu de 1040 (S5_2) ; Différence débit : 2110 (S5_1), 2200 (S5_2) , le 30/10/1974	2200
1975	26/08/1975	7.10	2866	Différence débit : 2890 (S4), 2770 (S5_1), 2860 (S5_2)	2860
1976	22/11/1975	6.20	2144	Différence débit : 2050 (S5_1), 2140 (S5_2)	2140
1977	12/02/1977	7.87	3562	Différence débit : 3560 (S4), 3410 (S5_1), 3560 (S5_2)	3562
1978	25/05/1978	8.47	4188	Différence débit : 4140 (S5_1), 4180 (S5_2)	4180
1979	11/02/1979	7.73	3397	Différence débit : 3340 (S4), 3220 (S5_1), 3340 (S5_2)	3340
1980	06/02/1980	8.41	4153	Différence débit : 4160 (S4), 3890 (S5_1), 4160 (S5_2)	4160
1982	17/12/1981	8.11	3694	Erreur sur la date du maximum (S4); Différence débit : 3690 (S5_1) , 3810 (S5_2)	3690
1984	25/09/1984	7.27	2811	19/12/1983 : Différence débit : 3410 (S4), 683 (S5_1) ; maxi retenu le 25/09/1984, 2810 (S5_1)	2810
1998	31/10/1998	7.12	2575	23/12/1997: Différence débit : 2650 (S4), 2540 (S5_1), 2680 (S5_2); Maxi retenu le 31/10/1998, 2570 (S5_1)	2570
1999	14/05/1999	8.84	4472	Différence débit : 4440 (S4), 4440 (S5_1) , 4540 (S5_2)	4440
2000	20/12/1999	7.78	3179	Différence débit : 3310 (S4), 3180 (S5_1) , 3310 (S5_2)	3180
2005	24/08/2005	7.92	3205	Différence débit : 3280 (S4), 3200 (S5_1) , 3280 (S5_2)	3200
2006	10/03/2006	8.03	3323	Différence débit : 3320 (S4), 3320 (S5_1) , 3220 (S5_2)	3320
2007	10/08/2007	8.58	4062	Différence débit : 4000 (S4), 4060 (S5_1) , 4000 (S5_2)	4060
2008	24/04/2008	7.73	3005	Différence débit : 3010 (S4), 3130 (S5_1), 3010 (S5_2)	3010

Série corrigée pour ramener tous les débits à un même état de référence

Les aménagements hydrauliques réalisés sur le Rhin supérieur aux XIX^e et XX^e siècles ont sensiblement modifié la propagation des crues, ce qui nécessite de raisonner sur un état de référence commun à l'ensemble de la série des crues. L'état de référence retenu dans l'étude CECR (1978) et celles qui ont suivi est celui de 1977, date du dernier aménagement sur le lit mineur du Rhin. Il y a eu successivement :

- des travaux de correction du Rhin (coupures-rectifications de 1815 à 1831 vers Maxau et l'aval, travaux de Tulla de 1842 à 1860), qui ont eu pour effet de passer d'un cours d'eau à bras multiples à un lit unique ;
- des travaux de régularisation du Rhin pour la navigabilité : 1906-1924 de Strasbourg à Sondernheim, 1930-1939 en aval de Bâle ;
- l'implémentation d'une série de 10 barrages et écluses : 1928-1932 (Kembs) ; 1948-1949 (Grand Canal d'Alsace : Ottmarsheim, Fessenheim, Vogelgrun) ; 1957-1970 (aménagements en feston : Markolsheim, Rhinau, Gerstheim, Strasbourg) ; 1974-1977 (aménagements en ligne : Gamsheim, Iffezheim).

Suite à l'étude CECR (1978), une série de mesures de rétention des crues ont été décidées dans le cadre de la convention franco-allemande de 1982 (Convention, 1982), avec un volume de rétention d'environ 270 millions de m³.

On trouve dans les études existantes des informations pour passer du débit Q_{obs} d'une crue donnée (d'après la courbe de tarage) à un débit corrigé $Q_{corr.}$, si cette crue était survenue dans la configuration du lit du Rhin en 1977 :

- Dans l'étude CECR (1978), un modèle hydraulique a été utilisé pour calculer le débit d'un échantillon de 27 crues (période 1876-1972), pour différentes configurations du lit du Rhin : historique au moment de la crue, et état en 1955, 1970 et 1977 (cf. annexe 4.4, source S17) ;
- Dans l'étude IWG (2010), pour un échantillon de 234 crues (période 1891-2008), sont indiquées la valeur du débit au moment de la crue, et la valeur correspondante pour un état en 1977. La correction utilisée pour la période 1891-1977 reprend la régression calée dans l'étude CECR (1978) (annexe 4.2) : aucune correction pour un débit $Q < 2600 \text{ m}^3/\text{s}$, un facteur multiplicatif $Q_{corr.} / Q_{obs} = 1.11$ si $Q > 3240 \text{ m}^3/\text{s}$, et un facteur correctif interpolé de façon linéaire suivant le débit pour $2600 < Q < 3240 \text{ m}^3/\text{s}$ (entre 1.0 et 1.11).
- Dans un tableau récapitulatif produit par LUBW (2019), les nouvelles zones de rétention réalisées depuis 1982 ont eu un effet de laminage pour 7 crues de la période 1982-2018 (cf. *Tableau 21*).

Tableau 21 : Impact des zones de rétention du Rhin sur les crues à Maxau depuis 1982 (LUBW, 2019) : débit observé et débit corrigé (m^3/s) ; correction en % pour un état du Rhin en 1977

Crue	Mars 1988	Février 1990	Février 1999	Mai 1999	Août 2007	Juin 2013	Janvier 2018
Q_{obs}	4080	4200	4090	4440	4060	4240	4060
$Q_{corr.}$	4345	4730	4490	4740	4160	4620	4140

Dans l'étude CECR (1978), les données de crues antérieures à 1871 n'ont pas été exploitées, considérant que la faible connaissance de l'état du lit du Rhin avant 1871 ne permettait pas de proposer de correction des débits Q_{obs} vers un état en 1977. Dans l'étude IWG (2010), les données de crue sont exploitées à partir de la crue de décembre 1882, la plus forte observée à Maxau.

On dispose d'informations intéressantes sur l'évolution du temps de propagation des crues entre Bâle et Marlen (6 km amont Strasbourg) de 1821 à 1977. La *Figure 43*, issue de l'étude CECR (1978), montre pour les crues d'hiver un temps de propagation de 25-30 h de 1820 à 1850, qui passe à 25-40 h vers 1875, baisse ensuite progressivement vers 25-35h vers 1950 et chute à 15-20h vers 1977. Le comportement est le même pour les crues d'été, quoiqu'amplifié.

Les travaux réalisés au XIX^e siècle ont fortement modifié la morphologie du lit du Rhin, avec une augmentation de la pente du lit mineur et une incision du lit, ce qui aurait dû réduire les temps de propagation. Cela semble avoir été compensé par un développement de la végétation en lit majeur, et au final il y a moins de différence entre les périodes 1820-1850 et 1875-1950, qu'entre les périodes 1875-1950 et 1950-1977. Il apparaît que ce sont les aménagements de la période 1948-1977 (9 barrages et écluses, et endiguement du lit mineur) qui ont le plus modifié les conditions de propagation des crues, avec des temps fortement réduits.

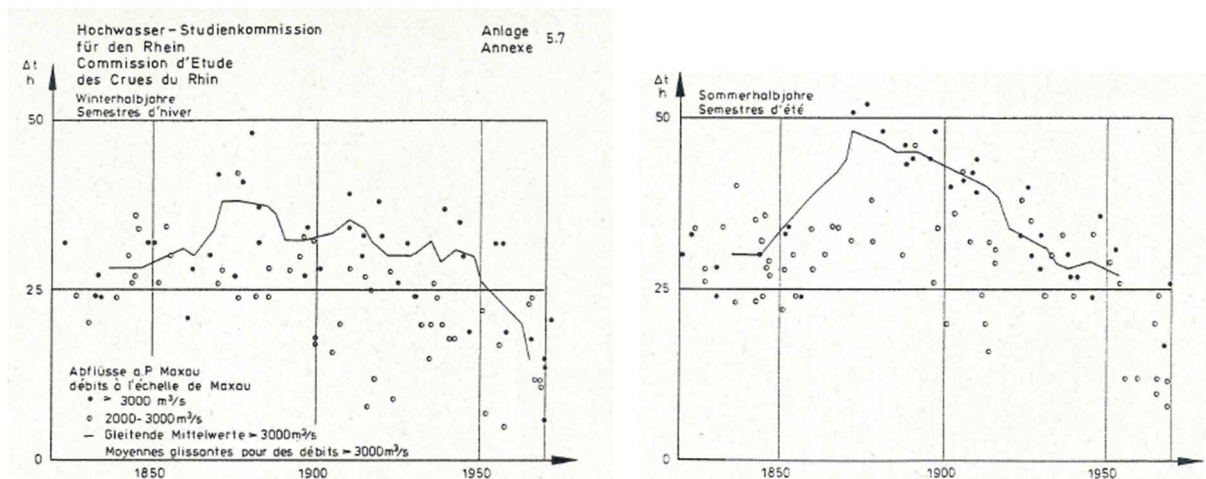


Figure 43 : Temps de propagation des crues du Rhin entre les échelles de Bâle et de Marlen (annexe 5.7, CECR, 1978) (hskschlussberichtteil2-4-1978.pdf)

On trouve dans l'étude CECR (1978) une estimation de la correction à apporter pour 4 crues de la période 1876-1883, en considérant que les travaux de correction du Jura n'avaient pas encore été réalisés. L'étude CECR (1978) donne pour les crues de 1876 et 1882 un débit corrigé à Bâle qui serait plus faible que celui observé, du fait du laminage des crues suite aux travaux de correction des eaux du Jura (16/06/1876 : $Q_{obs} = 5700$ et $Q_{corr.} = 4500$ m³/s ; 30/12/1882 : $Q_{obs} = 4620$ et $Q_{corr.} = 4100$ m³/s). Par contre, la propagation de crues entre Bâle et Maxau est accélérée, ce qui conduit à une majoration des débits à Maxau de +9% pour la crue de 1876, et de +36% la crue de 1882 (cf. Tableau 22). Il est d'ailleurs étonnant de constater que le débit de la crue de 1882, dans les conditions actuelles, serait de 4100 m³/s à Bâle et de 6260 m³/s à Maxau, progression qui semble beaucoup trop forte.

Tableau 22 : Correction des débits de crue à Maxau pour 4 crues de la période 1876-1883 (CECR, 1978) : débit observé et débit corrigé (m³/s) pour un état du Rhin en 1977

Crue	16/06/1876	31/10/1880	06/09/1881	30/12/1882
Q_{obs}	4300	4210	4230	4610
$Q_{corr.}$	4680	4130	3920	6260
$Q_{corr.} / Q_{obs}$	1.09	0.98	0.93	1.36

Compte-tenu du fait que l'évolution des temps de propagation des crues au XIX^e siècle est moins importante que celle observée sur la période 1950-1977 (cf. Figure 43), nous allons tester l'homogénéité de plusieurs variantes de la série de débit à Maxau (1815-2018) :

- **Série brute** : concaténation des données sur les périodes 1815-1820, 1821-1882, 1883-1900, 1901-1910, 1911-2018 ;
- **Série avec correction N°1** : sur la période 1891-1977, reprise des débits corrigés issus des études CECR (1978) et de l'étude IWG (2010), avec application d'une correction variable 0-11% suivant la valeur des débits; sur la période 1978-2018, prise en compte de l'effet des nouvelles zones de rétention (cf. Tableau 21); sur la période 1815-1890 majoration de la correction variable de la période 1891-1977 en retenant la valeur plafond de 16 % qui correspond au maximum des corrections appliquées sur les débits de la période 1891-1977 (cf. Figure 43: temps de propagation plus élevé en 1815-1890 qu'en 1891-1977) :

- ✓ aucune correction pour un débit $Q < 2600$ m³/s ;
- ✓ un facteur multiplicatif $Q_{corr.} / Q_{obs} = 1.16$ si $Q > 3240$ m³/s ;

- ✓ un facteur correctif interpolé de façon linéaire suivant le débit pour $2600 < Q < 3240$ m³/s (entre 1.0 et 1.16).
- **Série avec correction N°2** : majoration de +150 m³/s de tous les débits de la période 1815-1976 avec la correction N°1 (cf. rupture détectée en 1976 sur la série N°1, et espacement des intervalles de confiance).

Comme pour la série de Bâle, nous avons appliqué quatre tests statistiques sur l'homogénéité de la série de Maxau. Le *Tableau 23* montre que la série de débits bruts est fortement hétérogène pour les 4 tests, avec une rupture détectée vers 1976 (entre 1970 et 1979). On ne voit pas de problème d'hétérogénéité avant/après 1891.

Quand on raisonne sur les débits avec correction N°1, deux tests sont négatifs, et la rupture en 1976 reste significative, bien qu'elle soit un peu moins forte. Sur la *Figure 44* (série avec correction N°1), on note un espacement de 150 m³/s entre la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne de la période 1815-1976 et la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 95% de la moyenne de la période 1977-2018. **C'est ce qui a conduit in fine à corriger tous les débits de la période 1815-1976 avec une majoration de 150 m³/s (correction N°2). Cette dernière série est considérée comme homogène, sans rupture ni tendance pour les 4 tests. Elle sera utilisée pour l'analyse de la distribution des crues.**

Tableau 23 : Test d'homogénéité de la série continue de débit maximum annuel à Maxau sur la période 1815-2018

Données	Test statistique			
	Pas de tendance	Pas de rupture	Egalité de moyennes	Pas de segmentation
	<i>Mann-Kendall</i>	<i>Pettitt</i>	<i>Student</i>	<i>Darienzo</i>
Brutes	$p = 3E-3$ Rejet	$p = 2 E-3$ Rejet → rupture en 1976	$p = 1 E-5$ Rejet (1815-1975/1976-2018)	1 rupture en 1976 saut 633 m ³ /s espacement I95% : 315 m ³ /s
correction n°1 (aménagement sur le Rhin)	$p = 0.14$ OK	$p = 0.13$ OK	$p = 1E-2$ Rejet (1815-1889/1890-2017)	1 rupture en 1976 saut 533 m ³ /s espacement I95% : 150 m ³ /s
correction n°2 (+ 150 m ³ /s sur 1815-1976)	$p = 0.44$ OK	$p = 0.62$ OK	$p = 0.15$ OK (1815-1889/1890-2017)	OK

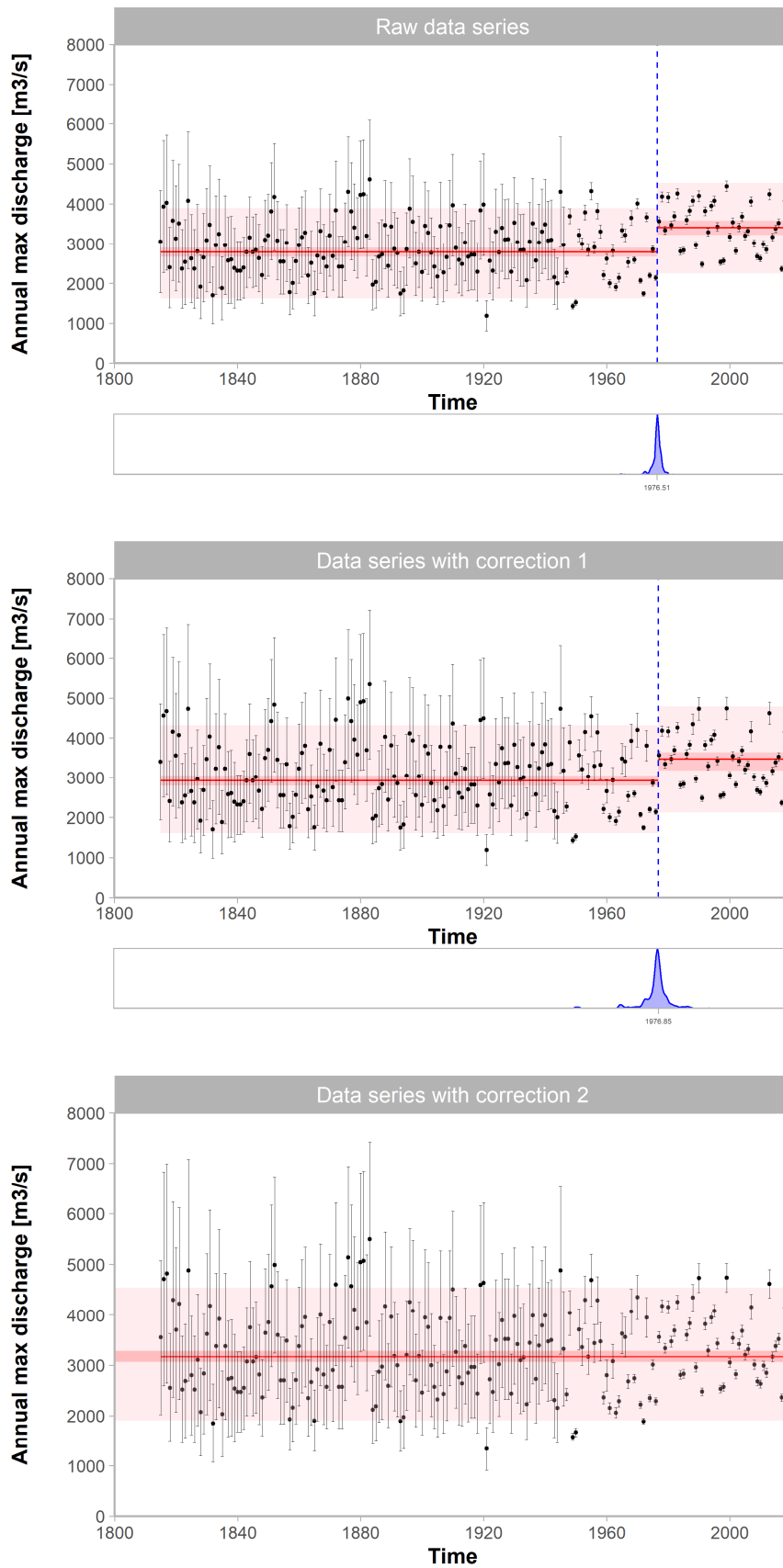


Figure 44 : Test de segmentation sur la série continue de débit maximum annuel à Maxau sur la période 1815-2018 (TestSegmentationMaxau1815_2018*.png)

10.5 Détails sur l'analyse des courbes de tarage à Bâle

Rhin à Bâle/Rheinhalle (pK 164.39) : courbe de tarage récente, période 1994-2018

A priori hydraulique

A partir d'un profil en travers levé en 2011 (source S9), 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 la Figure 9 (distance entre les points remarquables Fischmarkt et Markplatz à la berge de la rive gauche).

Les études hydrauliques existantes sont basées sur un coefficient de Stricker en lit mineur respectivement égal à 30 et à 40 (sources S29 et S9). Nous avons retenu un coefficient $K_1 = 35 \pm 5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Pour le lit majeur, avec un écoulement en milieu urbanisé, nous avons retenu un coefficient $K_2 = 15 \pm 5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. D'après les levés topographiques récents (source S9), la pente du lit est égale à 10^{-3} . Nous avons retenu une pente identique pour le lit mineur et le lit majeur : $S_1 = S_2 = 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$.

La cote du fond de la section rectangulaire équivalente est $Z_{fond} = 241.3$ m et le zéro de l'échelle limnimétrique est $Z_0 = 240$ m. Nous considérons que la hauteur d'activation du lit mineur correspond à 1.3 m ($241.3 - 240$), et nous retenons une hauteur $k_1 = 1.3 \pm 0.5$ m. La cote de débordement du lit mineur en rive gauche étant à une altitude de l'ordre de 249 m (cote = $249 - 240 = 9$ m), nous retenons une hauteur d'activation du lit majeur $k_2 = 9 \pm 0.5$ m.

Les exposants des lois puissance des équations (1a) et (1b) sont pris égaux à $c_1 = c_2 = 1.67 \pm 0.05$, d'après la formule de Strickler utilisable pour un contrôle hydraulique par un chenal rectangulaire large : $Q = BKS^{1/2}H^{5/3}$.

La courbe de tarage *a priori* est obtenue à partir du jeu de paramètres résumé dans le Tableau 24, et est représentée Figure 46.

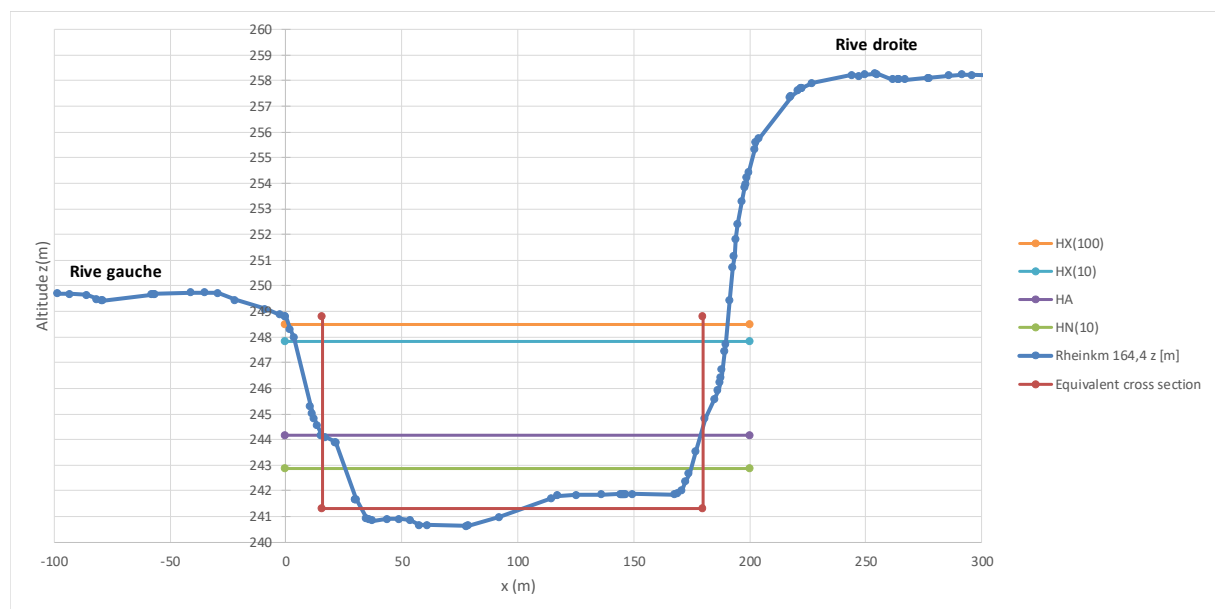


Figure 45 : Profil en travers du Rhin à Bâle/ Rheinhalle (source S9, levé en 2011) avec une section rectangulaire équivalente, et le report approximatif des niveaux associés à différents débits (crue de période de retour 100 et 10 ans, débit moyen annuel, débit d'étiage décennal) (CrossProfileRheinhalle.xlsx)

Tableau 24 : Paramètres retenus pour le tracé a priori de la courbe de tarage du Rhin à Bâle/ Rheinhalle (période récente)

Paramètres physiques	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
	1.3 ± 0.5	35 ± 5	165 ± 20	10 ⁻³ ± 510 ⁻⁴	1.67 ± 0.05	9 ± 0.5	15 ± 5	130 ± 20	10 ⁻³ ± 5 10 ⁻⁴	1.67 ± 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 ± 57			idem	idem	71.1 ± 31			idem

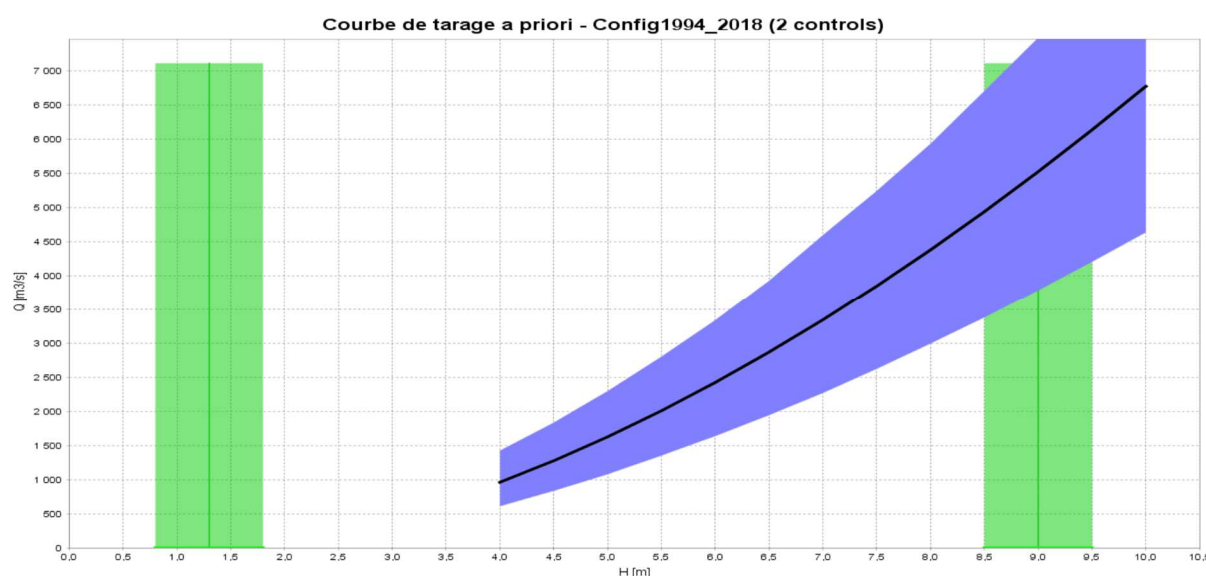


Figure 46 : Courbe de tarage a priori du Rhin à Bâle/ Rheinhalle (période récente 1994-2018) (BaleRheinhalle1994_2018.bar.zip)

Jaugeages

La Figure 6 indique que 90 jaugeages sont disponibles sur la période 1994-2018 et que 25 courbes de tarage ont été établies sur la période 1986-2018. Les jaugeages de la période 2003-2018 ont été fournis sur support numérique. Ceux de la période 1994-2001 étaient disponibles sur support papier (source S24) et ont été saisis manuellement. La Figure 47 montre que le nuage des points de jaugeages (H_i , Q_i) est plutôt stable, ce qui est confirmé sur la Figure 48, avec le report des différentes courbes de tarage. Les jaugeages ont été réalisés par mesure ADCP : nous considérons une incertitude de $\pm 5\%$ sur la mesure des débits Q_i jaugeés.

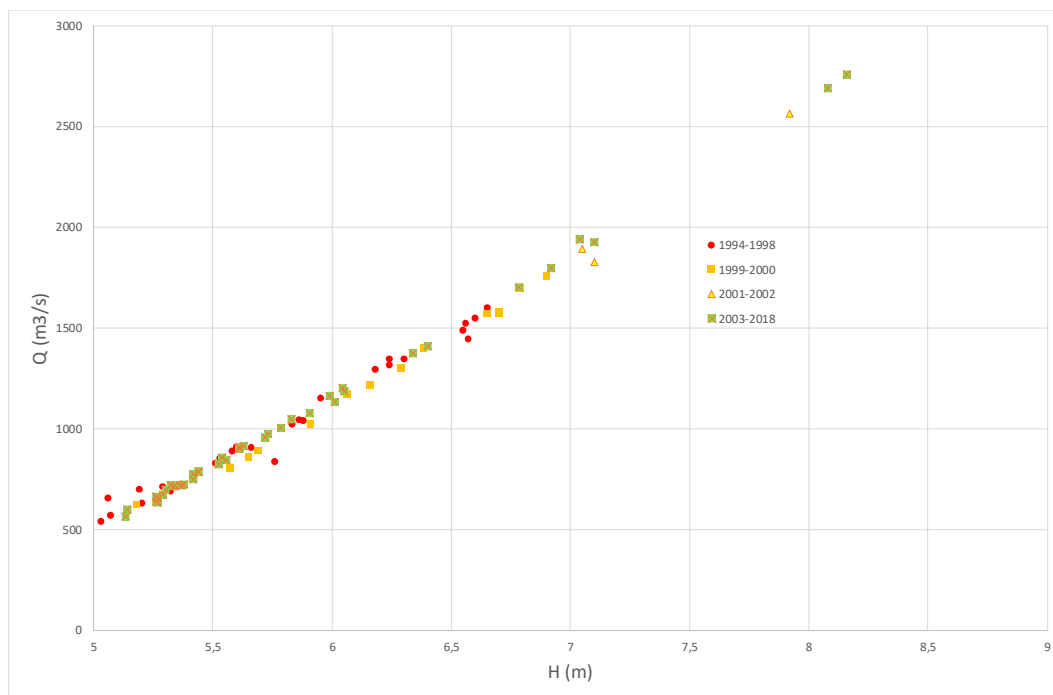


Figure 47 : Nuage des points de jaugeages sur le Rhin à Bâle/ Rheinhalle (période 1994-2018) (GaugingRheinhalle.xlsx)

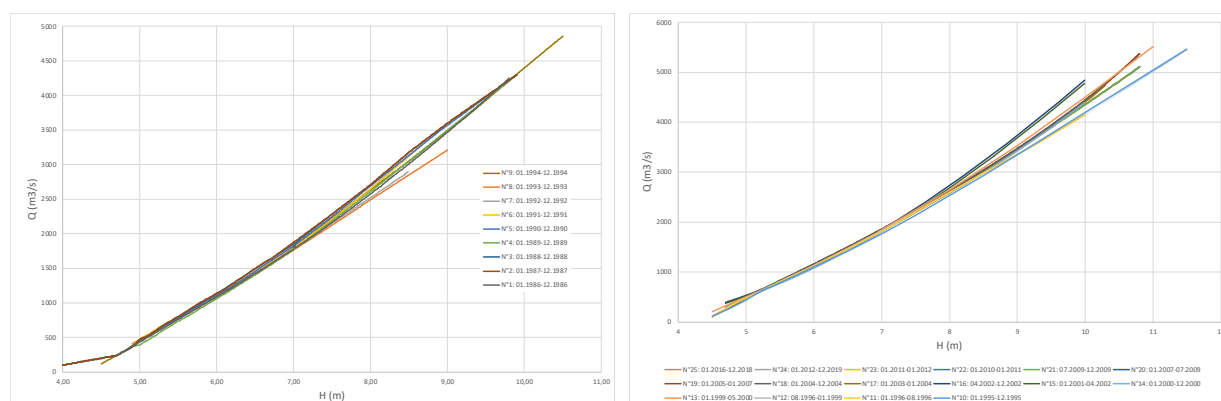


Figure 48 : Courbes de tarage sur le Rhin à Bâle/ Rheinhalle : 1/ N°1-9 : période 1986-1994 ; 2/ N°10-25 : période 1995-2018 (RatingCurvesRheinhalle.xlsm)

Courbe de tarage BaRatin a posteriori

Nous avons croisé les *a priori* hydrauliques de la courbe de tarage (cf. *Tableau 24*), avec l'ensemble des jaugeages disponibles (cf. *Figure 47*), à l'exception du jaugeage ($H = 5.76$; $Q = 836.25$), complètement en-dehors du nuage de points. L'objectif étant ici d'évaluer les incertitudes sur les débits de crue (le débit maximum annuel du Rhin à Bâle est compris entre 1490 et 5532 m^3/s ; *Figure 39*), un meilleur ajustement a été obtenu en se focalisant sur les jaugeages dont la hauteur H est supérieure à 5.5 m (possible influence aval du barrage de Kembs pour les cotes inférieures). La *Figure 49* donne la courbe de tarage BaRatin *a posteriori* sur la période 1994-2018 : 1/ avec tous les jaugeages ; 2/ avec les jaugeages pour lesquels $H > 5.5$ m.

Nous avons reporté sur la *Figure 50* la courbe de tarage BaRatin *a posteriori* de la période 1994-2018 (jaugeages avec $H > 5.5$ m) avec les limites de l'intervalle de confiance à 95%,

ainsi que 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.

L'incertitude de la courbe de tarage BaRatin est de l'ordre de $\pm 4\%$, celle sur les deux courbes extrêmes de $\pm 6\%$. 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 1994-2018.**

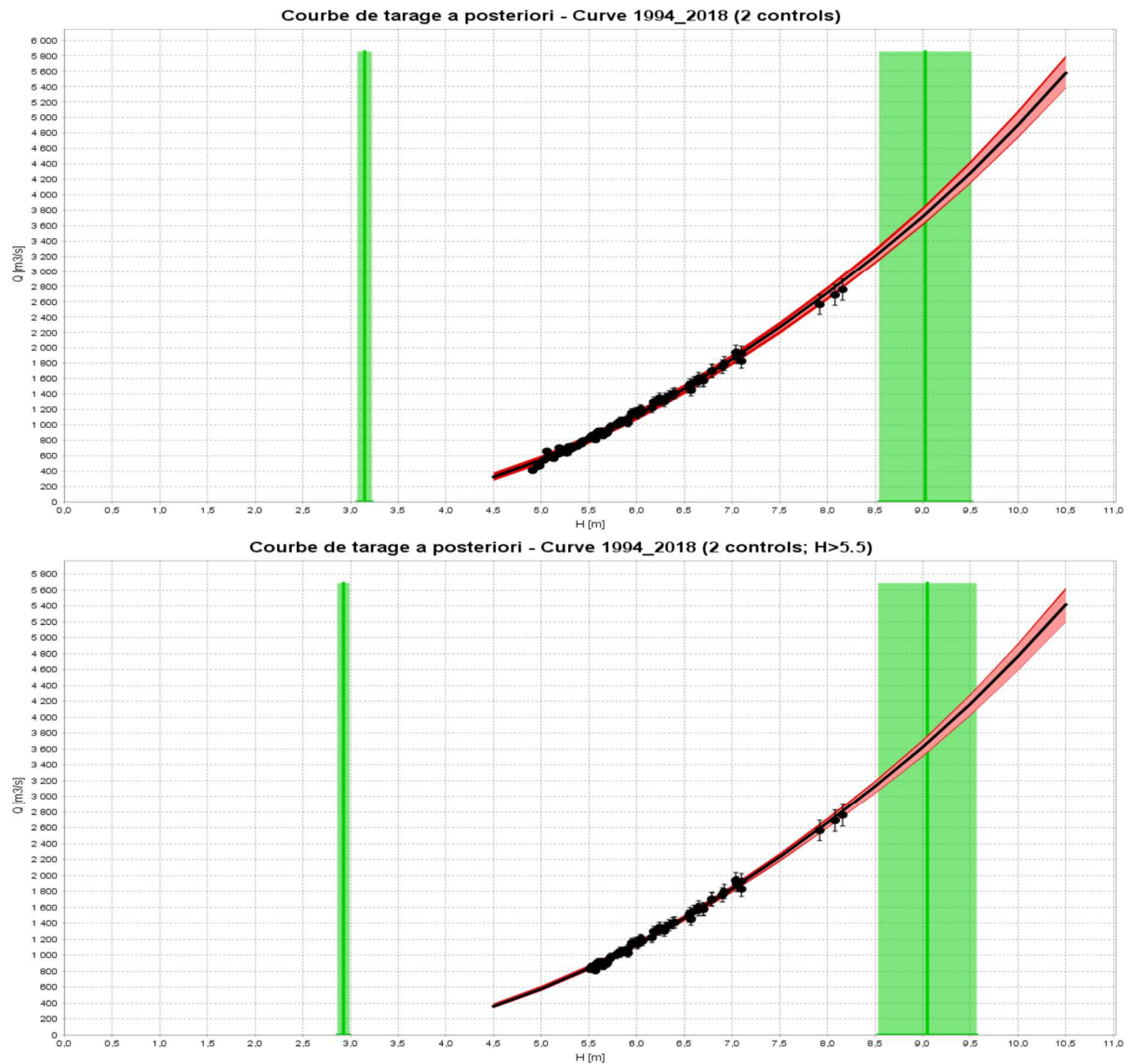


Figure 49 : Courbe de tarage BaRatin a posteriori sur le Rhin à Bâle/ Rheinhalle, période 1994-2018 : 1/ avec tous les jaugeages ; 2/ avec les jaugeages pour lesquels $H > 5.5$ m (BaleRheinhalle1994_2018.bar.zip)

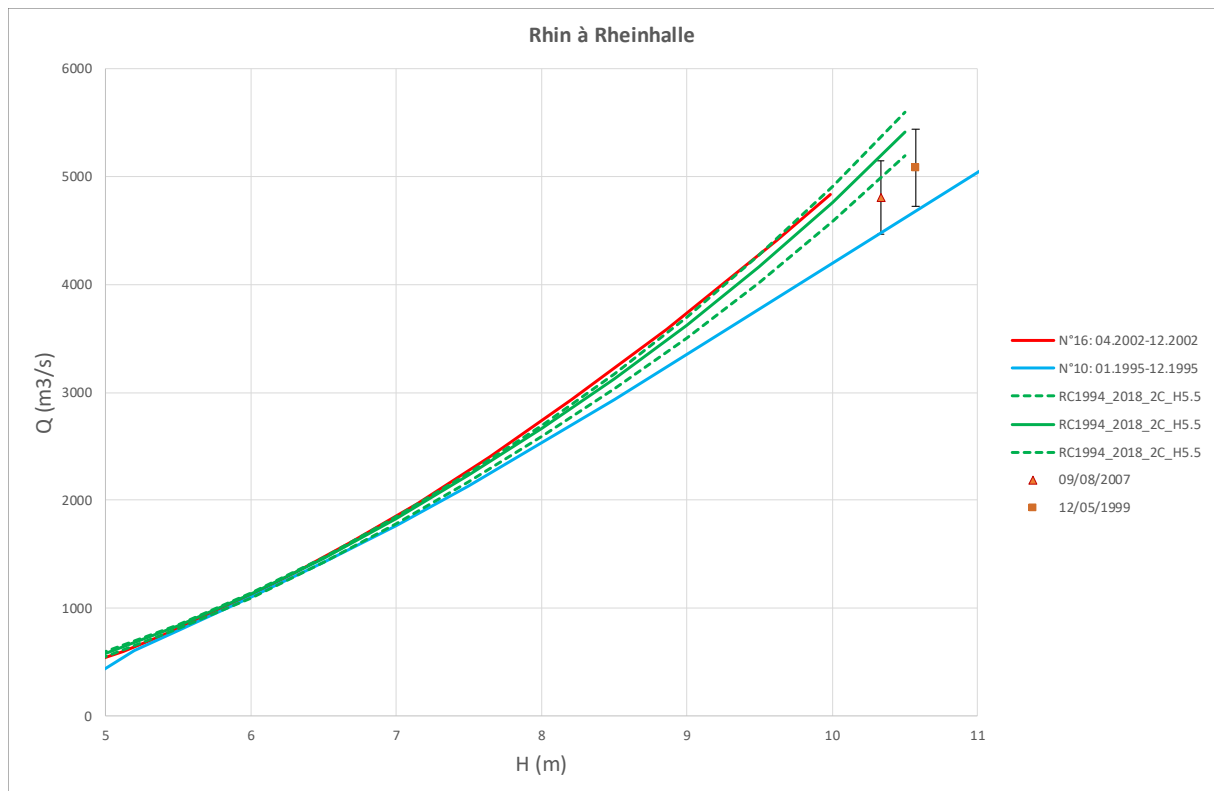


Figure 50 : Incertitudes sur les débits du Rhin à Bâle/ Rheinhalles (période 1994-2018)
 (ComparisonRC1994_2018_2C_SmallGaugesCurves10_16.xlsx)

Rhin à Bâle/Schifflände (pK 166.7) : courbes de tarage anciennes
Données anciennes sur la morphologie du Rhin (pentes et fond du lit)

Parmi les données communiquées par l'OFEV, on trouve une série de profils en travers anciens de la section du lit mineur du Rhin (levés le 21/12/1914, 02/11/1916, 09/11/1918, 31/01/1922, 07/03/1930) sous forme papier (tableau de valeurs x-z). Les documents (dossier DocOFEV/ 2001 Basel, Schifflände 00001/Pläne : *Basel, Querprofil_09.pdf* et *Basel__15.pdf*) ont été numérisés via le logiciel ABBYY FineReader 11 de reconnaissance de caractères, avec un traitement manuel pour interpréter les signes non reconnus par le logiciel. La Figure 51 montre 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.

L'article de Wetter *et al.* (2011) sur la reconstitution des débits de crue à Bâle depuis 1268 indique que la section d'écoulement est restée stable sur plusieurs siècles. Un profil en travers levé le 15/02/1819 est reproduit (figure 5 de l'article), mais il est difficilement lisible et n'a pas pu être exploité pour ce rapport.

Un document allemand de 1930 (source S10_1) représente le profil en long du Rhin de Bâle à Mannheim pour différentes dates : 1830, 1852, 1895, 1902, 1926. On peut noter sur le *Tableau 25* que la pente du Rhin est restée stable (autour de 10^{-3}), et une incision du lit.

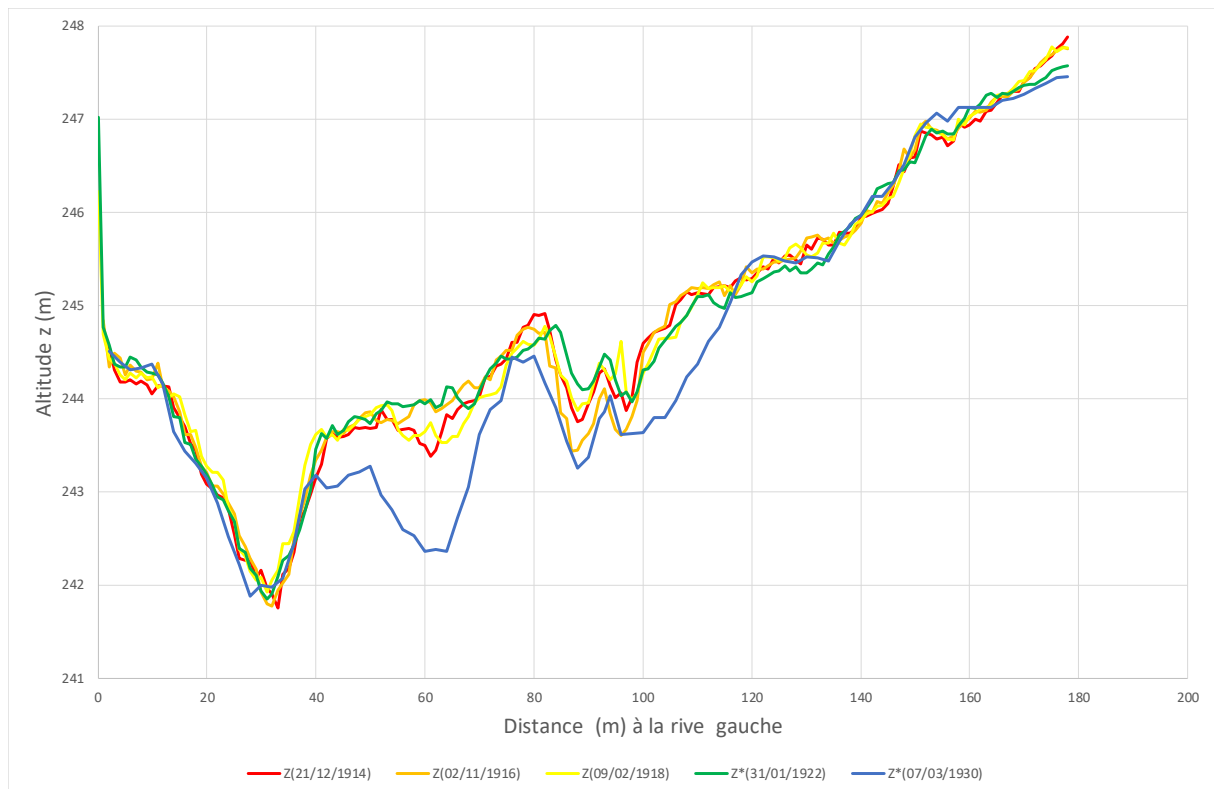


Figure 51 : Profils en travers du Rhin à Bâle/ Schiffflände : 1914-1930
(Bale.SchifffländeCrossSection.xls.x)

Tableau 25 : Evolution de la pente et de l'altitude du fond du lit mineur du Rhin à Bâle (période 1830-1926)

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	244.5	244.5	244	244	243

Les stations hydrométriques de Rheinhalle et de Schiffflände étant distantes de 2 km, sans modification sensible de la géométrie du Rhin, nous partirons du *Tableau 24* pour la définition du tracé *a priori* de la courbe de tarage établi sur la période récente à Bâle/ Rheinhalle, et il sera modifié pour les périodes anciennes en prenant en compte les informations disponibles sur la pente et le fond du lit mineur.

Jaugeages et courbes de tarage

La *Figure 6* indique que 70 jaugeages sont disponibles sur la période 1867-1933 et que 10 courbes de tarage ont été établies sur la période 1919-1932. On notera que si des données de débit ont été produites de façon continue à Bâle depuis 1808 et ont été communiquées par les services hydrométriques suisses et allemands, **il n'a pas été possible d'obtenir les courbes de tarage établies avant 1919, ni celles de la période 1933-1985. Par ailleurs, aucun jaugeage n'est disponible sur la période 1934-1993.**

Les jaugeages de la période 1867-1933 étaient disponibles sur support papier (sources S22 et S23) et ont été saisis manuellement. La *Figure 52* montre des différences assez nettes dans le nuage des points de jaugeages (H_i , Q_i), entre 1867- 1908, 1910-1924 et 1926-1933. Les courbes de tarage de la période 1919-1932 étaient disponibles sous forme de barème (tableau *H-Q*, sources S22, S23 et S26) et ont été saisis manuellement. Sur la *Figure 53*, on voit que les courbes de tarage de la période 1919-1932 sont assez voisines pour les débits de crue.

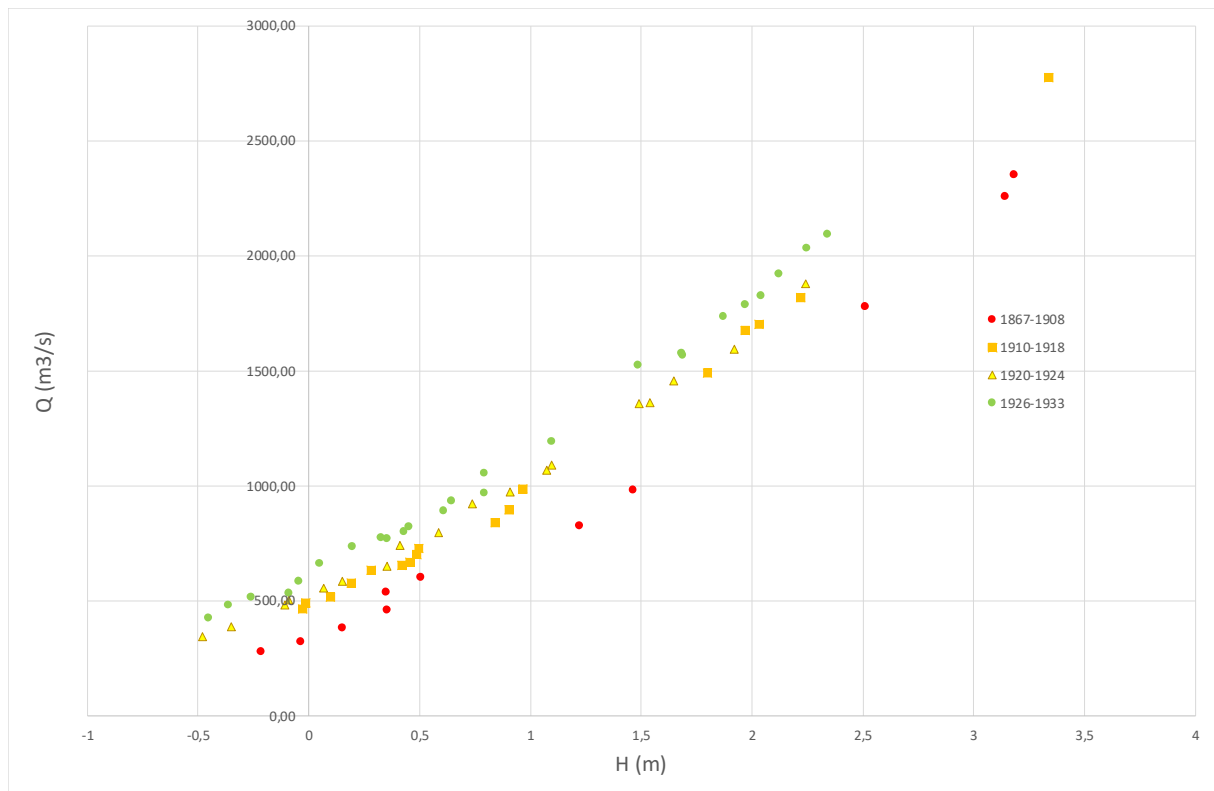


Figure 52 : Nuage des points de jaugeages sur le Rhin à Bâle/ Schifflande : 1867-1933 (GaugingSchifflande.xlsx)

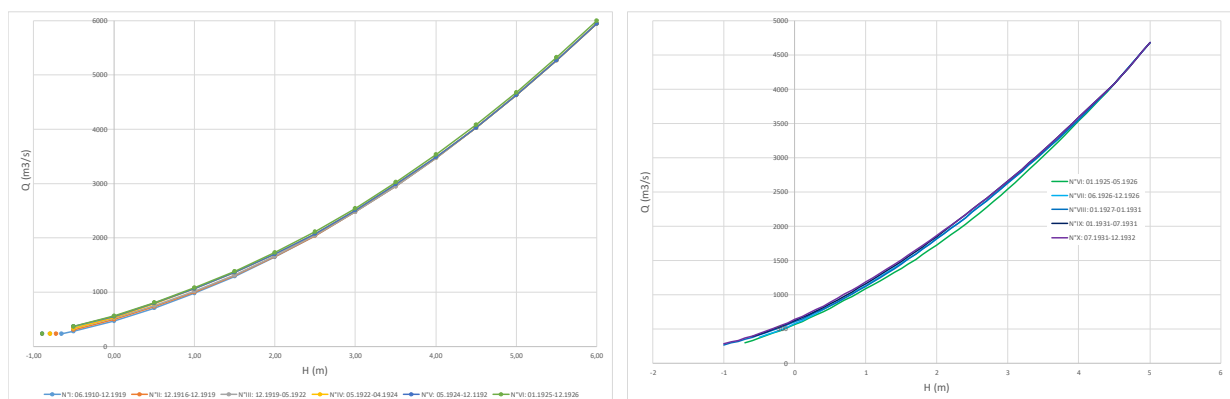


Figure 53 : Courbes de tarage sur le Rhin à Bâle/ Schifflande : 1/ N°I-VI : période 1919-1926 ; 2/ N°I-X : période 1926-1932 (RatingCurvesSchifflande.xlsm)

Courbe de tarage BaRatin a posteriori de la période 1926-1933

Nous commençons l'analyse sur la période 1926-1933 pour laquelle jaugeages et courbes de tarage sont disponibles. Compte-tenu de l'époque et d'un mode opératoire a priori par mesure de la vitesse de surface avec un moulinet, nous avons retenu une incertitude de $\pm 15\%$ sur la mesure des débits Q_i jaugeés. Nous avons repris les *a priori* hydrauliques de la courbe de tarage récente à Rheinhalle (cf. *Tableau 24*), puis effectué deux modifications, la première sur la largeur moyenne B_l du lit mineur, la seconde sur les hauteurs d'activation du lit mineur et du lit majeur.

On trouve dans les documents communiqués par l'OFEV le fichier *1-PQPlan-001.jpg*, version scannée d'un document papier avec le tracé d'une courbe de tarage à Schifflande, valable à partir du 01/07/1910. Sur ce document figurent 9 jaugeages de la période 1910-

1913, avec mention du couple (H, Q) mais aussi de la vitesse moyenne V_m et de la section mouillée S_m . L'ajustement d'une régression linéaire de la section S_m en fonction de H (cf. *Figure 54*) donne une relation du type $S_m = 173 (H+2)$. Ce qui correspond à une estimation $B = 173$ m de la largeur moyenne de la section, peu différente de celle à Rheinhalle ($B = 165$ m). Nous avons retenu comme *a priori* : $B_1 = 173 \pm 20$ m.

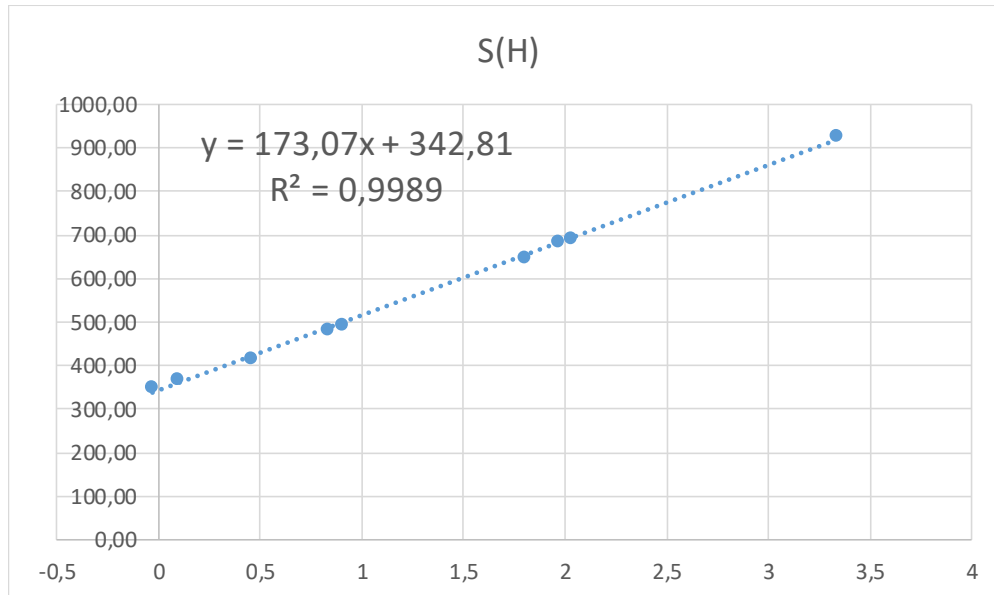


Figure 54 : Ajustement d'une régression linéaire sur la section moyenne du Rhin à Bâle/Schiffplände à partir de 9 jaugeages de la période 1910-1913 (GaugingSchiffplände.xlsx)

D'après le cahier limnimétrique établi par Ghezzi (1926) (source S22), le zéro de l'échelle limnimétrique à Schiffplände est $Z_0 = 243.90$ m. Il est indiqué qu'il est resté stable sur la période 1808-1903 et n'a varié au maximum que de 3 cm sur la période 1903-1925 (affaissement du quai sur lequel est implantée l'échelle). Les barèmes des courbes de tarage de la *Figure 53* commençant vers la hauteur $H = -1$ m, nous retiendrons $k_1 = -1 \pm 0.5$ m pour le lit mineur. Pour la cote de débordement en lit majeur, nous conservons la valeur $Z = 249$ m retenue à Rheinhalle, ce qui conduit à $k_2 = 5 \pm 0.5$ m.

La courbe de tarage *a posteriori* est obtenue en combinant ces *a priori* hydrauliques avec les jaugeages de la période 1926-1933, entachés d'une incertitude de $\pm 15\%$ (pas d'indication sur le mode de mesure, supposé vu l'époque par moulinet avec mesure en surface). On notera sur la *Figure 55* que l'estimation *a posteriori* de la hauteur d'activation du lit mineur est revue à la baisse, après incorporation des jaugeages : k_1 (posterior) = -2.1 ± 0.1 m (au lieu de k_1 (prior) = -1 ± 0.5 m). Cette valeur est cohérente avec la régression $S_m = 173 (H+2)$ obtenue à partir des 9 jaugeages de la période 1910-1913.

L'incertitude finale sur les débits est comprise dans l'intervalle : [-7% ; + 10%] pour la période 1926-1933. On notera sur la *Figure 56* la bonne correspondance entre la courbe BaRatin estimée pour la période 1926-1933 et les courbes officielles N° VII, VII, IX et X.

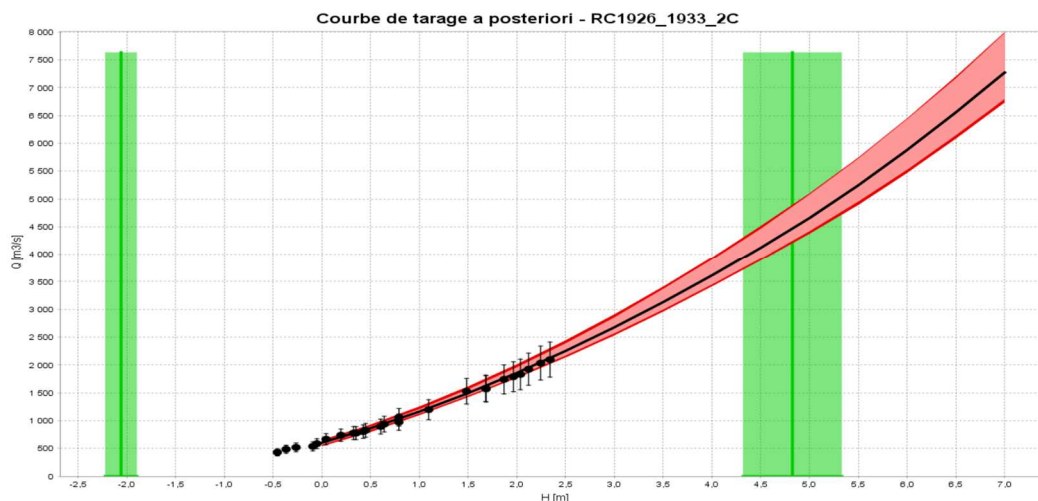


Figure 55 : Courbe de tarage BaRatin a posteriori sur le Rhin à Bâle/ Schiffflände, période 1926-1933 (BaleSchifflande1808_1993.bar.zip)

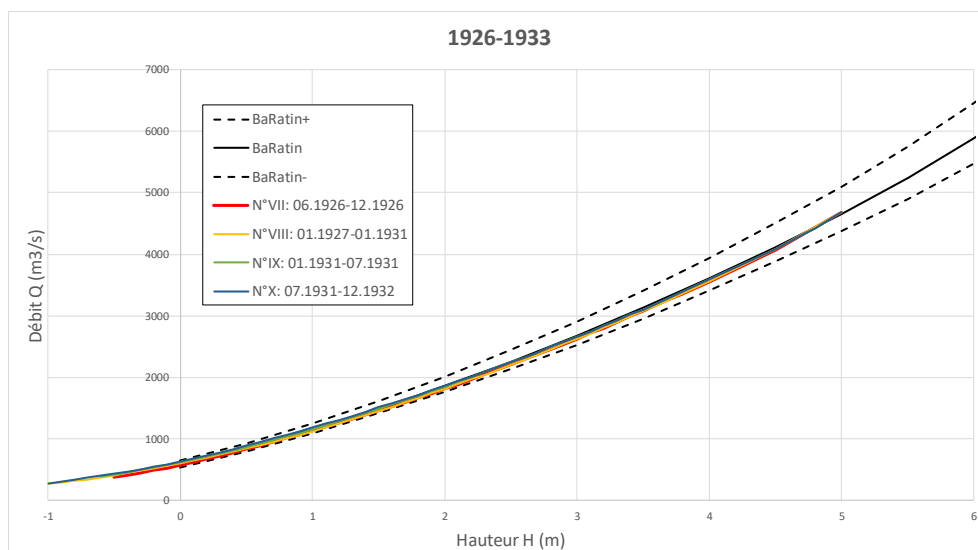


Figure 56 : Comparaison de la courbe BaRatin de la période 1926-1933 et des courbes officielles VII-X sur le Rhin à Bâle/ Schiffflände, (RC1926_1933_2C.xlsx)

Incertitudes sur la période 1910-1925

Par une démarche analogue, en croisant sur la période 1910-1924 *a priori* hydraulique et jaugeages, on obtient une incertitude comprise dans l'intervalle [-5 ; +9%]. A titre conservatoire, nous conservons l'incertitude plus large obtenue sur la période 1926-1933, à savoir [-7% ; +10%].

Incertitudes sur la période 1867-1909

On dispose de 10 jaugeages sur la période 1867-1908 (source S23) : les jaugeages étaient disponibles sur support papier et ont été saisis manuellement. Compte-tenu de l'époque et d'un mode opératoire *a priori* par mesure de la vitesse de surface avec des flotteurs, nous avons retenu une incertitude $u_{Q_i} = \pm 20\%$ sur la mesure des débits Q_i jaugeés (cf. Figure 57).

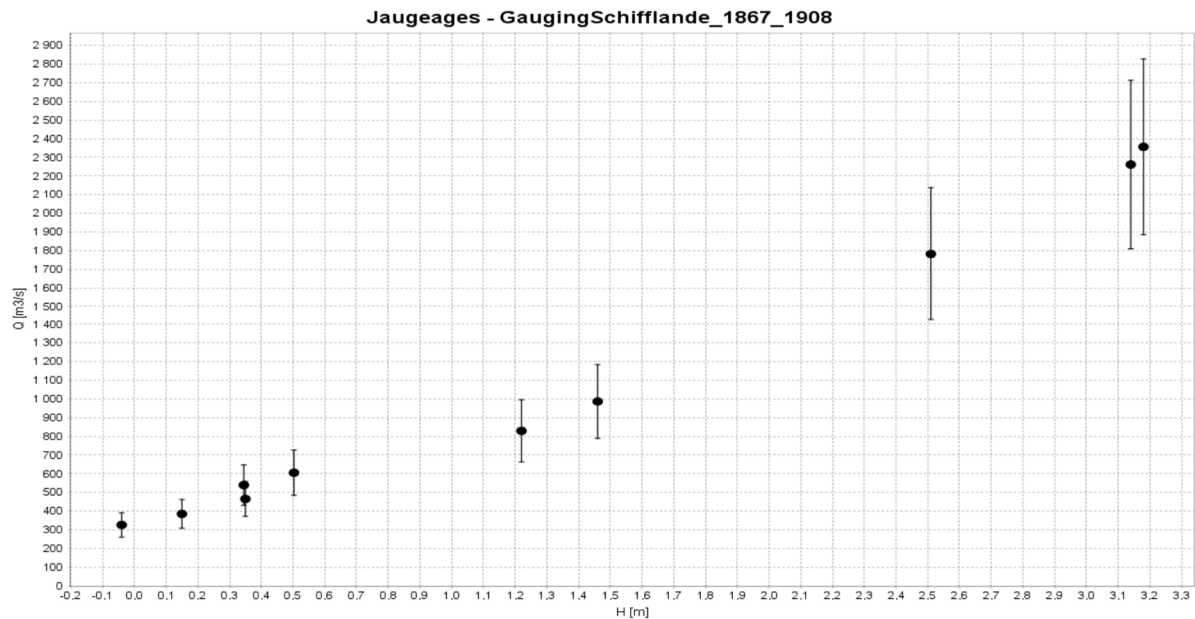


Figure 57 : Jaugeages avec incertitude sur le Rhin à Bâle/ Schifflande, période 1867-1908 (BaleSchifflande1808_1993.bar.zip)

Nous conservons les mêmes *a priori* hydrauliques entre la période 1926-1933 et la période 1867-1908, sauf pour la hauteur d'activation k_l du lit mineur. D'après la source S10_1 et le Tableau 25, le lit s'est incisé de 1.5 m entre 1852 et 1926. Nous retenons :

$$k_l (1867-1908) = k_l (1926-1933) + 1.5 = -1 + 1.5 = +0.5 \pm 1 \text{ m}$$

La pente du lit aurait également évolué en passant de $0.8 \cdot 10^{-3}$ en 1830-1852 à $1.1 \cdot 10^{-3}$ en 1926, mais elle reste comprise dans l'*a priori* retenu en 1926-1933 : $S_l = 10^{-3} \pm 5 \cdot 10^{-4}$

Le croisement de la courbe de tarage *a priori* avec les jaugeages donne une courbe de tarage *a posteriori* (Figure 58) avec une **incertitude finale sur les débits de la période 1867-1909** (rajout d'une année pour précéder la période 1910-1993 qui a été traitée juste avant) **comprise dans l'intervalle [-12% ; +26%]**.

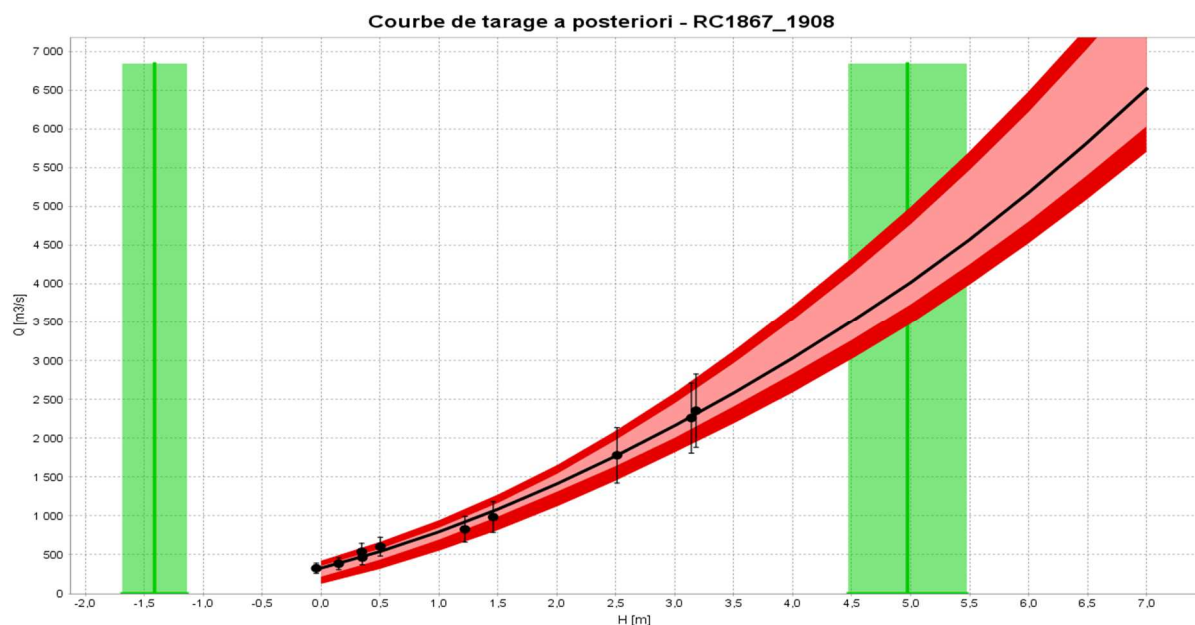


Figure 58 : Courbe de tarage BaRatin *a posteriori* sur le Rhin à Bâle/ Schifflande, période 1867-1908 (BaleSchifflande1808_1993.bar.zip)

On note sur la *Figure 58*, comme pour la période 1926-1933, que l'estimation *a posteriori* de la hauteur d'activation du lit mineur est revue à la baisse, après incorporation des jaugeages : k_l (posterior) = -1.4 ± 0.1 m (au lieu de k_l (prior) = 0.5 ± 1 m). Pour le modèle BaRatin, l'incision du lit mineur entre 1867-1908 et 1926-1933 serait plutôt de -0.7 m :

$$k_l \text{ (posterior) } 1926-1933 - k_l \text{ (posterior } 1867-1908) = (-2.1) - (-1.4) = -0.7 \text{ m.}$$

Incertitudes sur la 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 (cf. *Tableau 26*). D'après le *Tableau 25*, nous voyons que le fond du lit a baissé de 0.5 m entre 1852 et 1892 : nous retenons une hauteur d'activation du lit mineur plus haute de 0.5 m sur la période 1808-1866, et augmentons l'incertitude : $k_l = -0.9 \pm 0.5$. Nous retenons pour le Strickler K_1 une fourchette [35 ; 40], pour la largeur B_l une fourchette [165 ; 175] et pour la pente S_l une fourchette : $[6 \cdot 10^{-4} ; 10^{-3}]$.

Pour le lit majeur, les jaugeages de la période 1867-1909 étant en nombre limité, 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 26 : Paramètres retenus pour l'estimation des incertitudes sur les débits du Rhin à Bâle/ Rheinhalle : période 1808-1866 et 1225-1807

Période		Lit mineur					Lit majeur				
		k_l (m)	K_1 (m ^{1/3} /s)	B_l (m)	S_l	c_l	k_2 (m)	K_2 (m ^{1/3} /s)	B_2 (m)	S_2	c_2
1867-1909	prior	0.5 ± 0.5	35 ± 5	173 ± 20	10 ⁻³ ± 5 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05	9 ± 0.5	15 ± 5	130 ± 20	10 ⁻³ ± 5 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05
		$a_1 = K_1 B_l \sqrt{S_l} = 191.5 \pm 59.4$						$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2} = 61.7 \pm 13.8$			
	posterior	-1.4 ± 0.1	$a_1 = 185.2 \pm 18.1$			1.66 ± 0.02	5 ± 0.3	$a_2 = 66.9 \pm 13.8$			1.67 ± 0.02
		38.5 ± 1	170 ± 2	8 10 ⁻⁴ ± 1.5 10 ⁻⁴				17 ± 3	130 ± 10	9 10 ⁻⁴ ± 1.5 10 ⁻⁴	
1808-1866	Prior	-0.9 ± 0.5	37.5 ± 2.5	170 ± 5	8 10 ⁻⁴ ± 2 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05	5 ± 0.5	15 ± 5	130 ± 20	8 10 ⁻⁴ ± 2 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05
		$a_1 = 180.3 \pm 26.1$						$a_2 = 55.2 \pm 21.4$			
1225-1807	prior	-1 ± 1	35 ± 5	170 ± 5	8 10 ⁻⁴ ± 5 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05	5 ± 0.5	20 ± 5	130 ± 20	8 10 ⁻⁴ ± 5 10 ⁻⁴	1.67 ± 0.05
		$a_1 = 168.3 \pm 58.0$						$a_2 = 232.6 \pm 68.6$			

Nous avons reporté sur la *Figure 59* 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 : $Z = 249.6$ m, $Q = 4300$ m³/s ;
- Début d'inondation de « Fischmarkt » : $Z = 250.1$ m, $Q = 4900$ m³/s ;
- Fortes inondations de « Fischmarkt » : $Z = 251.1$ m, $Q = 6400$ m³/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.

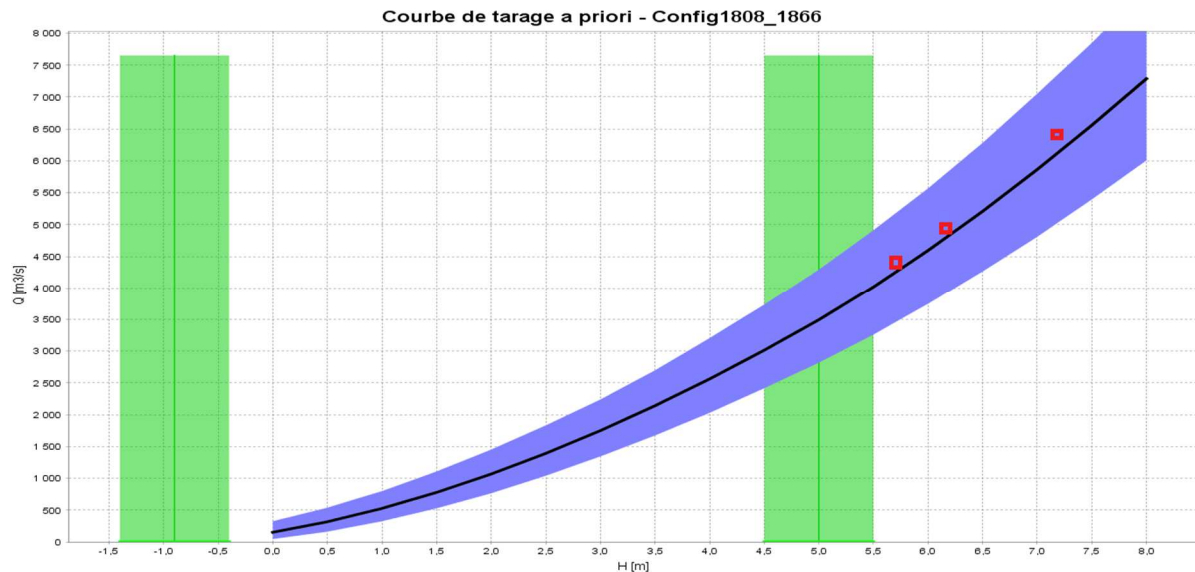


Figure 59 : Courbe de tarage BaRatin *a priori* sur le Rhin à Bâle/ Schiffflände, période 1808-1866 : report de trois couples (H, Q) issues des estimations de débit de Wetter et al. (2011) (BaleSchiffflände1808_1993.bar.zip et RC1808_1866.png)

La courbe de tarage Baratin obtenue avec ces valeurs *a priori* (cf. Figure 59) donne une incertitude [-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%]**.

Incertainces sur la période 1225-1807

Nous continuons à dégrader l'information sur les paramètres hydrauliques (cf. Tableau 26). **Pour le lit mineur**, une hauteur d'activation du lit mineur $k_1 = -1 \pm 1$ (incertitude plus forte), un coefficient de Strickler K_1 dans la fourchette [30 ; 40] (incertitude plus forte), pour la largeur B_1 une fourchette [165 ; 175] (pas de changement) et pour la pente S_1 une fourchette [$3 \cdot 10^{-4}$; $1.3 \cdot 10^{-3}$] (incertitude plus forte). **Pour le lit majeur**, une hauteur d'activation du lit majeur $k_2 = 5 \pm 0.5$ (pas de changement), un coefficient de Strickler K_2 dans la fourchette [15 ; 25] (incertitude plus forte), pour la largeur B_2 une fourchette [110 ; 150] (pas de changement) et pour la pente S_2 la même fourchette [$3 \cdot 10^{-4}$; $1.3 \cdot 10^{-3}$] que pour le lit mineur. La courbe de tarage Baratin obtenue avec ces valeurs *a priori* (cf. Figure 60) donne **une incertitude finale sur les débits de la période 1225-1807 comprise dans l'intervalle [-35% ; +44%]**.

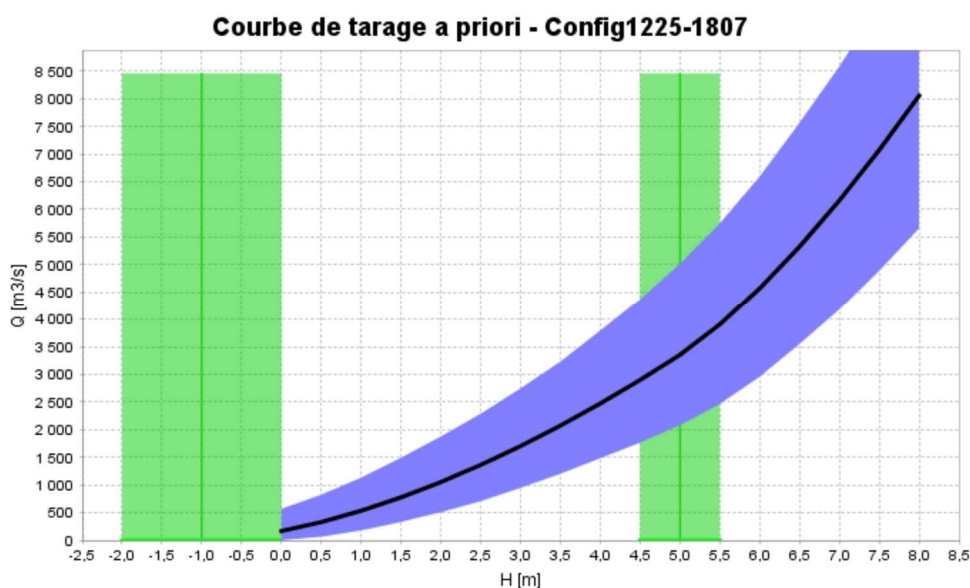


Figure 60 : Courbe de tarage BaRatin a posteriori sur le Rhin à Bâle/ Schiffflände, période 1225-1807 (BaleSchifflande1808_1993.bar.zip)

Retour sur les incertitudes sur la période 1934-1993

Nous n'avons pas eu d'information sur les jaugeages et les courbes de tarage sur la période 1934-1993. L'année 1932 correspond à la date de mise en service du barrage de Kembs qui a dû impacter la station de Schiffflände par effet de remous. C'est pour cette raison qu'à terme la mesure hydrométrique à Bâle a été déplacée 2 km en amont, de Schiffflände vers Rheinhalle. Pendant cette période 1934-1993, le débit à Bâle a été calculé à partir de 3 stations (cf. Figure 7) :

$$Q_{\text{Rhin}}(\text{Bâle}) = Q_{\text{Rhin}}(\text{Rheinfelden}) + Q_{\text{Ergolz}}(\text{Liestal}) + Q_{\text{Birs}}(\text{Munchenstein}).$$

Aucun jaugeage n'ayant pu être récupéré sur la station de Rheinfelden, nous avons retenu **une incertitude sur les débits de la période 1934-1993 de $\pm 20\%$, voisine des périodes 1808-1866 et 1867-1903** (intervalles $[-18\% ; +22\%]$ et $[-12\% ; +26\%]$).

10.6 Détails sur l'analyse des courbes de tarage à Maxau

Période 1947-2017

On dispose d'un jeu de 850 jaugeages (source S6). Deux jaugeages ont été jugés douteux, car positionnés très différemment des autres jaugeages sur un graphe Hauteur-Débit : le 28/03/1991, $H = 4.85$ m ; $Q = 1360$ m³/s ; le 18/06/2001, $H = 6.14$ m ; $Q = 2270$ m³/s.

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 ± 10 et ± 5 % sur les débits. Cette incertitude a été majorée pour les débits de crue (débit supérieur à 3000 m³/s) d'un facteur multiplicatif égal à 2. Le Tableau 27 récapitule les incertitudes retenues sur les débits jaugés.

Tableau 27 : Incertitudes retenues sur les débits jaugés du Rhin à Maxau de 1947 à 2017

Période	Jaugeage	$Q < 3000$ m ³ /s ou $H < 7.6$ m	$Q > 3000$ m ³ /s ou $H > 7.6$ m
1947-1999	Moulinet	$\pm 10\%$	$\pm 20\%$
2000-2017	ADCP	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$

Nous avons utilisé une procédure de segmentation (Darioenzo *et al.*, 2020), qui consiste à rechercher de façon itérative la présence de sauts significatifs dans la relation hauteur-débit $H-Q$, en s'intéressant au résidu entre le débit jaugé Q_i et le débit $Q_{RC}(H_i)$ estimé à l'aide de la courbe de tarage RC : $\varepsilon(Q_i) = Q_i - Q_{RC}(H_i)$. La *Figure 61* illustre un premier découpage en trois sous-périodes à la première itération, puis l'ajout d'une quatrième sous-période à la seconde itération.

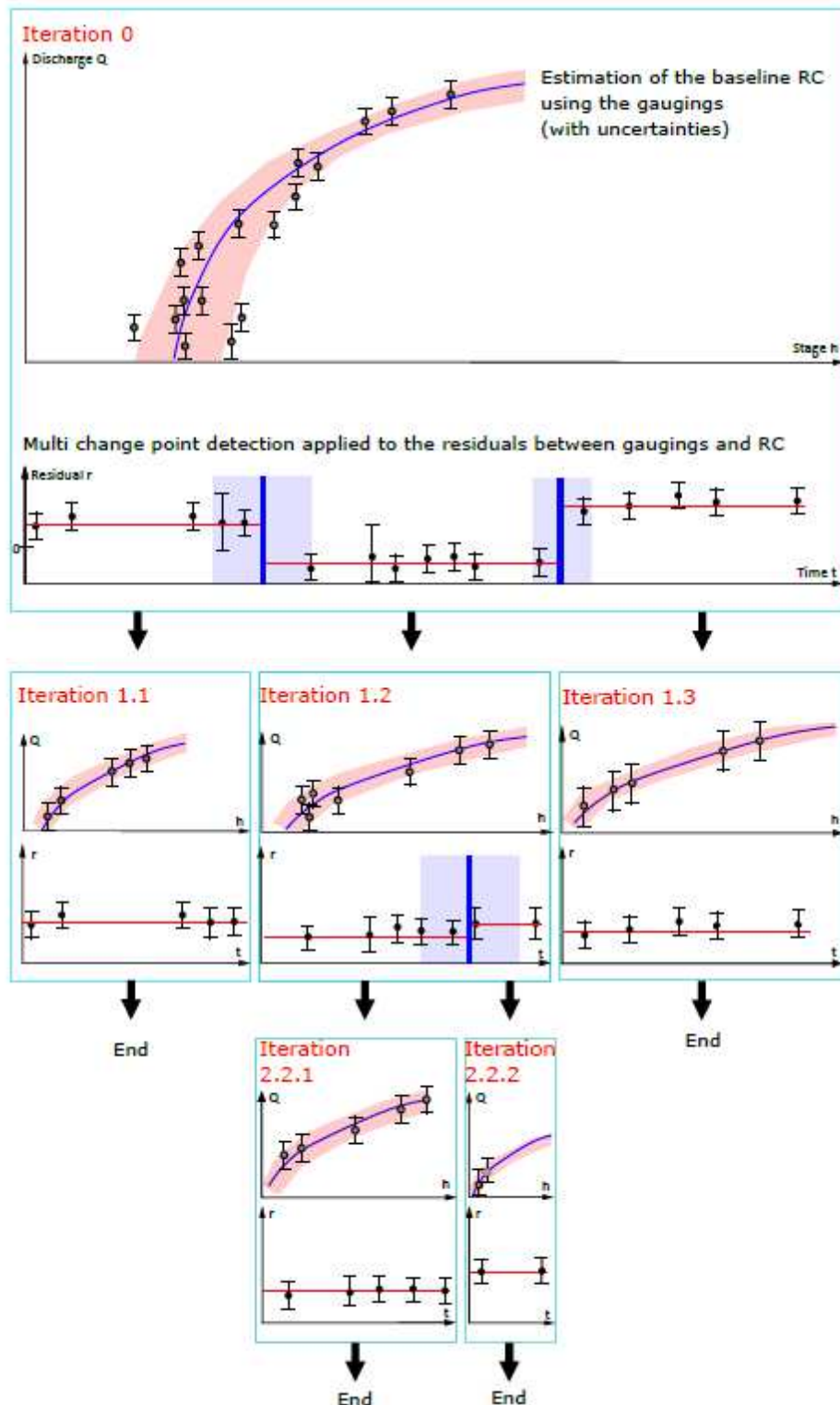


Figure 61 : Procédure itérative de segmentation des jaugeages et d'estimation des décalages entre courbes de tarage (SchemaTestSegmentationDarioenzo.png)

Une originalité de cette approche est de prendre en compte les incertitudes sur les jaugeages. La *Figure 62* montre qu'ignorer les incertitudes sur les jaugeages peut conduire à segmenter de façon erronée.

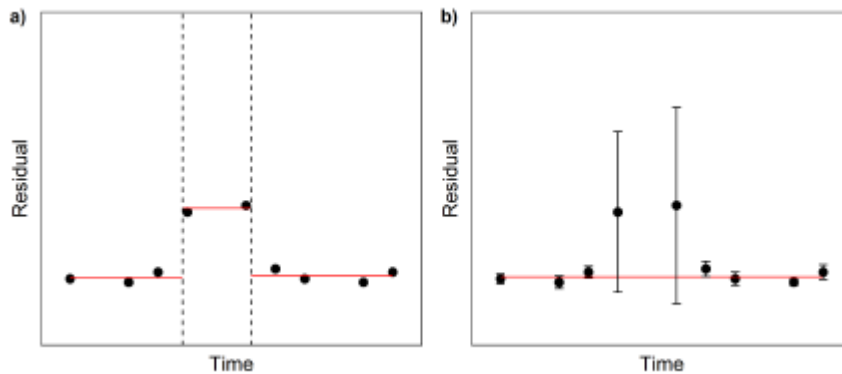


Figure 62 : Illustration d'une procédure de segmentation : a/ en négligeant les incertitudes (2 sauts détectés) ; b/ en considérant les incertitudes (aucun saut détecté) (IllustrationSegmentationVsIncertitudes.png)

L'application de cette procédure de segmentation conduit à un découpage en 11 sous-périodes (*Figure 63*), au lieu des 37 courbes de tarages établies sur la période 1947-2017 (*Figure 15*).

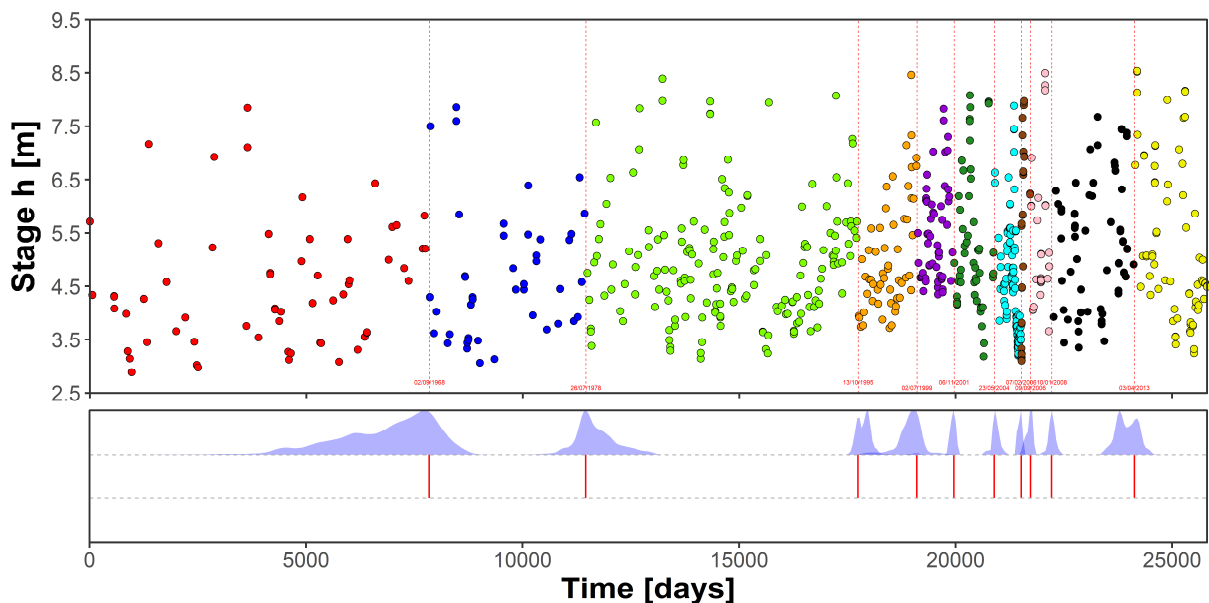


Figure 63 : Segmentation des jaugeages du Rhin à Maxau (période 1947-2017) (le second graphe donne les densités de probabilité des dates de rupture – en bleu, et la date la plus probable – en rouge) (SegmentationJaugeagesMaxau1947_2017Simu2.png)

Nous avons ensuite appliqué le modèle BaRatin sur ces 11 sous-périodes, en supposant que dans la relation hauteur-débit décrite par l'équation (1), seuls les coefficients b_i avaient évolué dans le temps : niveaux du fonds du lit mineur et du lit majeur. Les estimations ont été réalisées à l'aide du modèle SPD (Mansanarez *et al.*, 2019), Stage-Period-Discharge, qui calcule en une seule itération l'ensemble des paramètres (a_i , b_i , c_i) pour les différentes sous-périodes.

L'intérêt par rapport à une approche classique où l'on estime une courbe de tarage par sous-période, avec uniquement les jaugeages réalisés pendant cette sous-période, est que

l'information apportée par les jaugeages peut être partagée sur l'ensemble de la période pour les paramètres supposés invariants. Cela concerne par exemple la partie haute de la courbe de tarage, qui si on suppose que lit majeur n'a pas été modifié, mérite d'être pouvoir construite avec l'ensemble des plus forts jaugeages en crue.

A priori hydraulique

A partir d'un profil en travers levé en 2011 (source S9_1), nous avons déterminé la section rectangulaire équivalente du lit mineur, et retenu une largeur $B_1 = 220 \pm 20$ m. Nous avons estimé la largeur du lit majeur à $B_2 = 750 \pm 250$ m, d'après une vue en plan du Rhin via GoogleMap.

Les études hydrauliques existantes sont basées sur un coefficient de Strickler en lit mineur compris entre 30 et à 40 suivant la hauteur d'écoulement (source S9). Nous avons retenu un coefficient $K_1 = 35 \pm 5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. Pour le lit majeur, avec un écoulement en milieu mixte (zones construites et secteurs végétalisés), nous avons retenu un coefficient $K_2 = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$. D'après les levés topographiques récents (source S9), la pente du lit mineur a pour valeur $S_1 = (3.5 \pm 0.5) 10^{-4}$. Nous avons retenu une pente un peu plus forte pour le lit majeur : $S_2 = (4 \pm 1) 10^{-4}$, du fait de « raccourci » possible de l'écoulement (par rapport au tracé en plan du lit mineur).

La cote du fond de la section rectangulaire équivalente (cf. Figure 64) est $Z_{fond} = 98.9$ m et le zéro de l'échelle limnimétrique est $Z_0 = 97.79$ m. Nous considérons que la hauteur d'activation du lit mineur correspond à 1.1 m ($98.9 - 97.8$), et nous retenons une hauteur $k_1 = 1.1 \pm 1.0$ m (cf. source S13_1 sur la variabilité de la section entre 1970 et 2013). La cote de débordement du lit mineur en rive droite est à une altitude de l'ordre de 106.5 m (cote = $106.5 - 97.8 = 8.7$ m), mais elle est assez variable suivant les sections en amont et en aval. On observe un changement de pente du nuage de point des jaugeages sur un graphe hauteur-débit vers la cote 7.6 m. Nous retenons une hauteur d'activation du lit majeur $k_2 = 7.6 \pm 1.0$ m.

Les exposants des lois puissance des équations (1a) et (1b) sont pris égaux à $c_1 = c_2 = 1.67 \pm 0.05$, d'après la formule de Strickler utilisable pour un contrôle hydraulique par un chenal rectangulaire large : $Q = BKS^{1/2}H^{5/3}$.

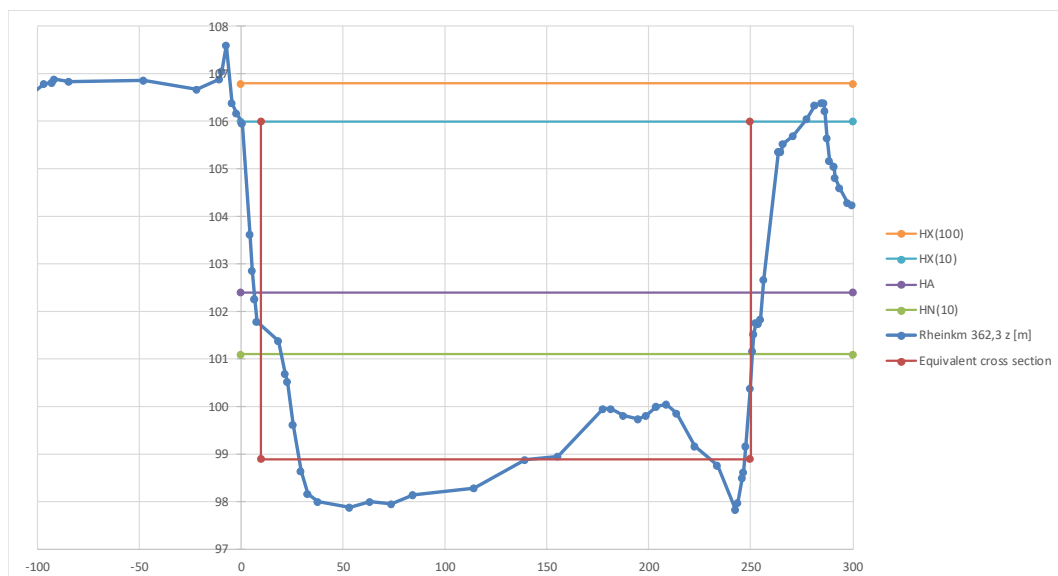


Figure 64 : Profil en travers du Rhin à Maxau (source S9_1, levé en 2011) avec une section rectangulaire équivalente, et le report approximatif des niveaux associés à différents débits (crue de période de retour 100 et 10 ans, débit moyen annuel, débit d'étiage décennal) (CrossProfileRheinhalle.xlsx)

La courbe de tarage *a priori* est obtenue à partir du jeu de paramètres résumé dans le *Tableau 28*, et est représentée *Figure 65*.

Tableau 28 : Paramètres retenus pour le tracé a priori de la courbe de tarage du Rhin à Maxau (période 1947-2017)

Paramètres physiques	Lit mineur					Lit majeur				
	k_1 (m)	K_1 ($m^{1/3}/s$)	B_1 (m)	S_1 (10^{-4})	c_1	k_2 (m)	K_2 ($m^{1/3}/s$)	B_2 (m)	S_2 (10^{-4})	c_2
	1.1 ± 1.0	35 ± 5	220 ± 20	3.5 ± 0.5	1.67 ± 0.05	7.6 ± 1.0	25 ± 5	750 ± 250	4.0 ± 1	1.67 ± 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	144.1 \pm 26.5			idem	idem	375.0 \pm 151			idem

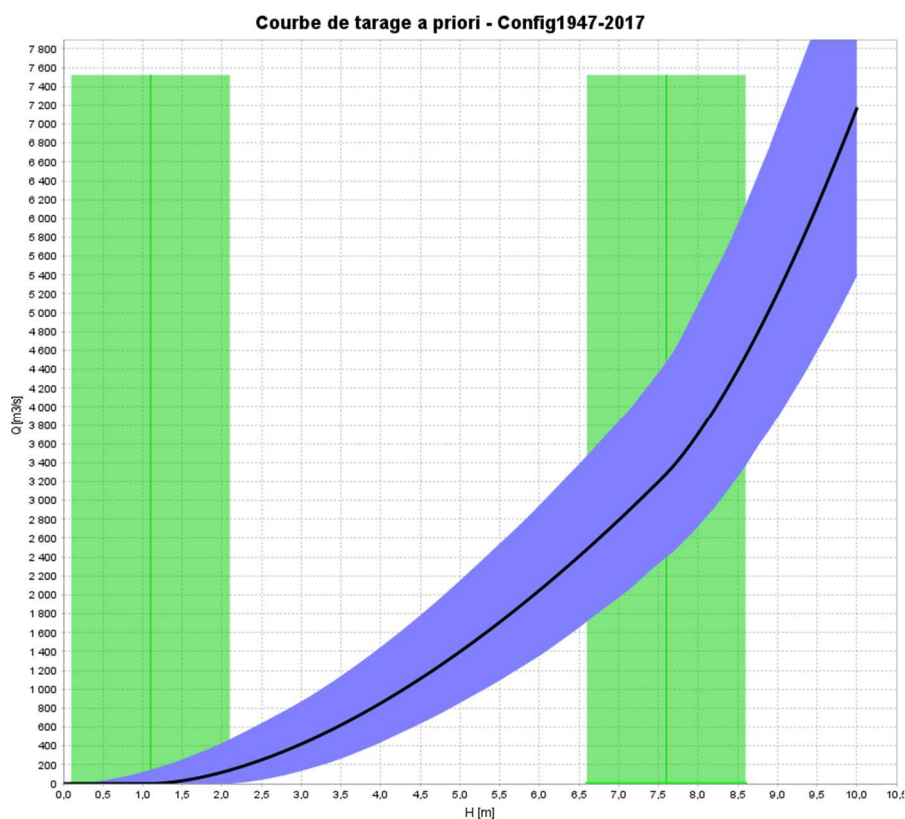


Figure 65 : Courbe de tarage a priori du Rhin à Maxau (période 1947-2017) (Maxau2009_2017V2.bar.zip)

Courbes de tarage SPD1 à SPD11

Les courbes de tarage sur les 11 sous-périodes (SPD1 à SPD11) ont été obtenues en exploitant les 848 jaugeages et en retenant une série d'hypothèses *a priori* sur la valeur des paramètres physiques de la courbe de tarage (cf. *Tableau 28*). Elles sont reportées pour chaque sous-période avec les jaugeages de la période associée et les courbes de tarage officielles (*Figure 66* à *Figure 70*). On peut noter une bonne cohérence entre les jaugeages et les courbes SPD sur la période récente 2004-2017 (SPD7 à SPD11), un peu moins bonne sur la période 1968-2004 (SP2 à SPD6) où plusieurs jaugeages sortent de l'intervalle de confiance à 95%, et mauvaise sur la période la plus ancienne 1947-1968 (SPD1).

A titre illustratif, nous avons reporté sur la *Figure 70* la courbe BaRatin11 obtenue avec le même *a priori* (cf. *Tableau 28*), mais uniquement les jaugeages de la sous-période n°11 (2013-2017). L'intervalle de confiance de la courbe SPD11 est un peu plus étroit que celui de la courbe BaRatin 11, du fait de l'exploitation des jaugeages sur une période plus large.

On voit sur la *Figure 66* que la courbe SPD1 n'est pas cohérente avec les jaugeages de cette période. Il est vraisemblable que l'hypothèse qui a été faite que seul le fond du lit mineur et du lit majeur a changé n'est plus vérifiée sur 1947-1968 (les autres paramètres : largeur – pente – Strickler étant supposés fixes). Nous avons repris l'analyse classique BaRatin sur cette période 1947-1968, en croisant l'*a priori* des paramètres physiques issu de la courbe SPD2 (période 1968-1978 qui suit) avec les jaugeages de la période 1947-1968. La courbe BaRatin1 (cf. *Figure 66*) est en bonne adéquation avec les jaugeages, avec une extrapolation assez différente (entre 4000 et 5000 m³/s) des courbes officielles.

La *Figure 71* montre que **les incertitudes sur cette période 1947-2017 restent faibles**. Pour un débit de crue de 4000 m³/s, on obtient une erreur multiplicative inférieure à ± 5% :

- **Période 1947-1968: [-5 ; +4%]** (courbe BaRatin 1) ;
- **Période 1968-2017: [-3 ; +2%]** (courbes SPD5 et SPD11).

Le modèle SPD a donné une estimation du paramètre b_l du fonds du lit mineur pour les 11 sous-périodes (cf. *Figure 72*). On note un rehaussement d'environ 50 cm de 1947 à 2017 ($b_l = 0.46$ sur la période n°1 / 1947-1968, et $b_l = 0.94$ sur la période n°11 / 2013-2017), qui est cohérent avec la source (S13_1) sur le suivi morphologique du lit du Rhin (cf. *Figure 73*).

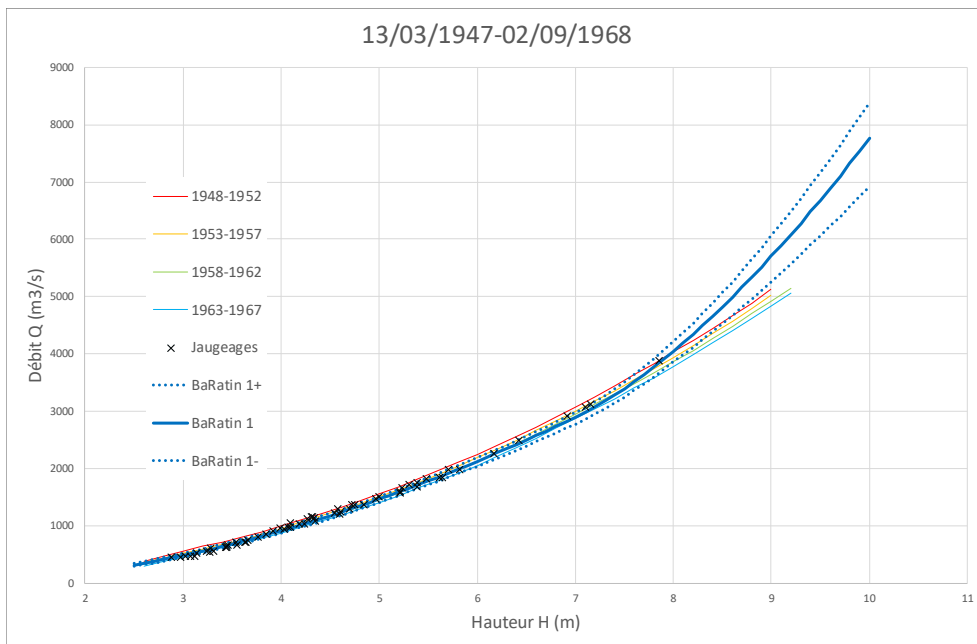
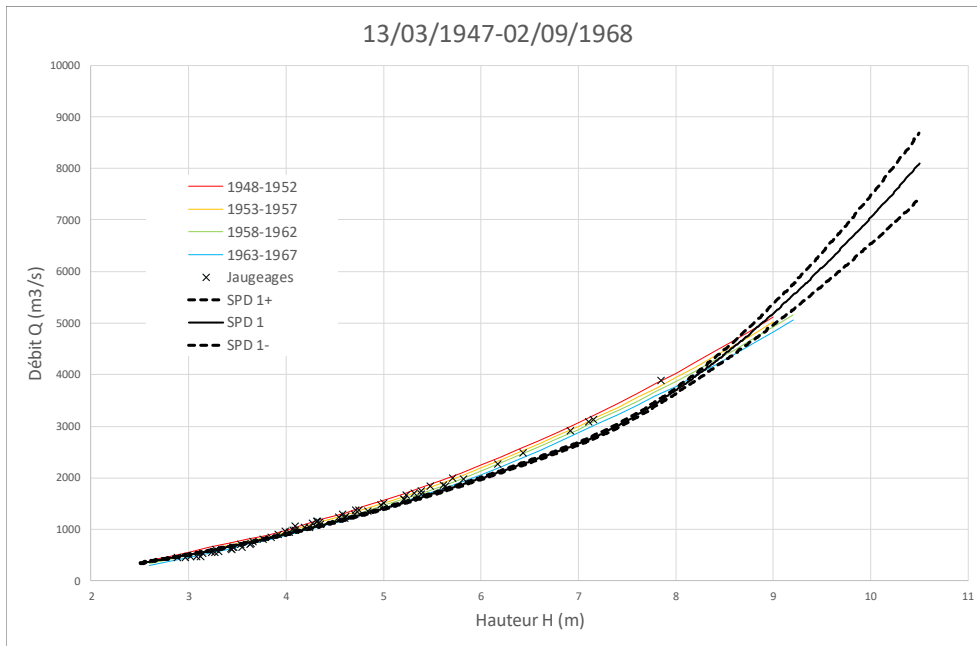


Figure 66 : Courbe de tarage SPD1 et BaRatin1 du Rhin à Maxau (CourbesTarageMaxauV2c.xlsx)

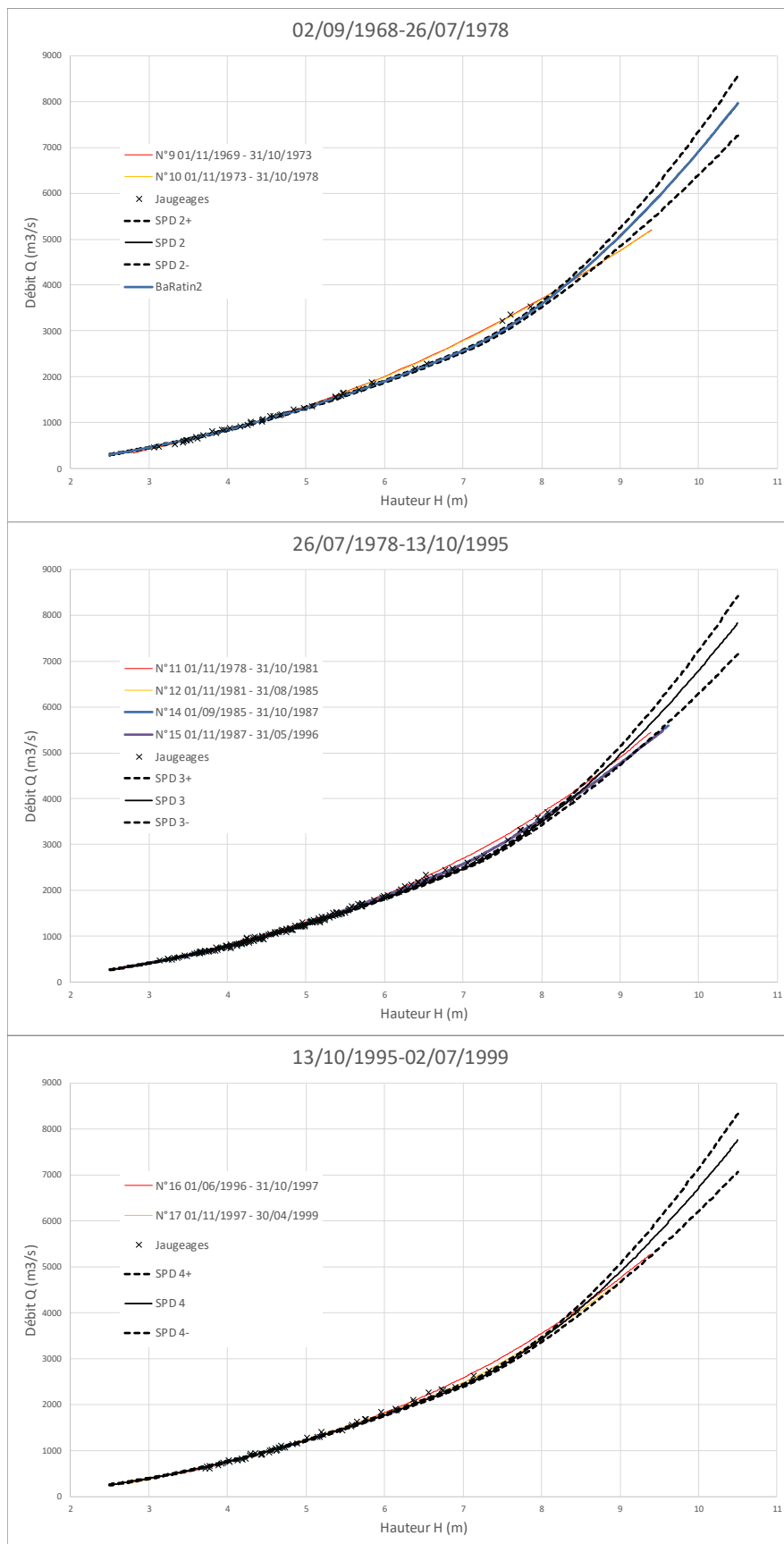


Figure 67 : Courbe de tarage SPD2-SPD3-SPD4 du Rhin à Maxau (CourbesTarageMaxauV2c.xlsx)

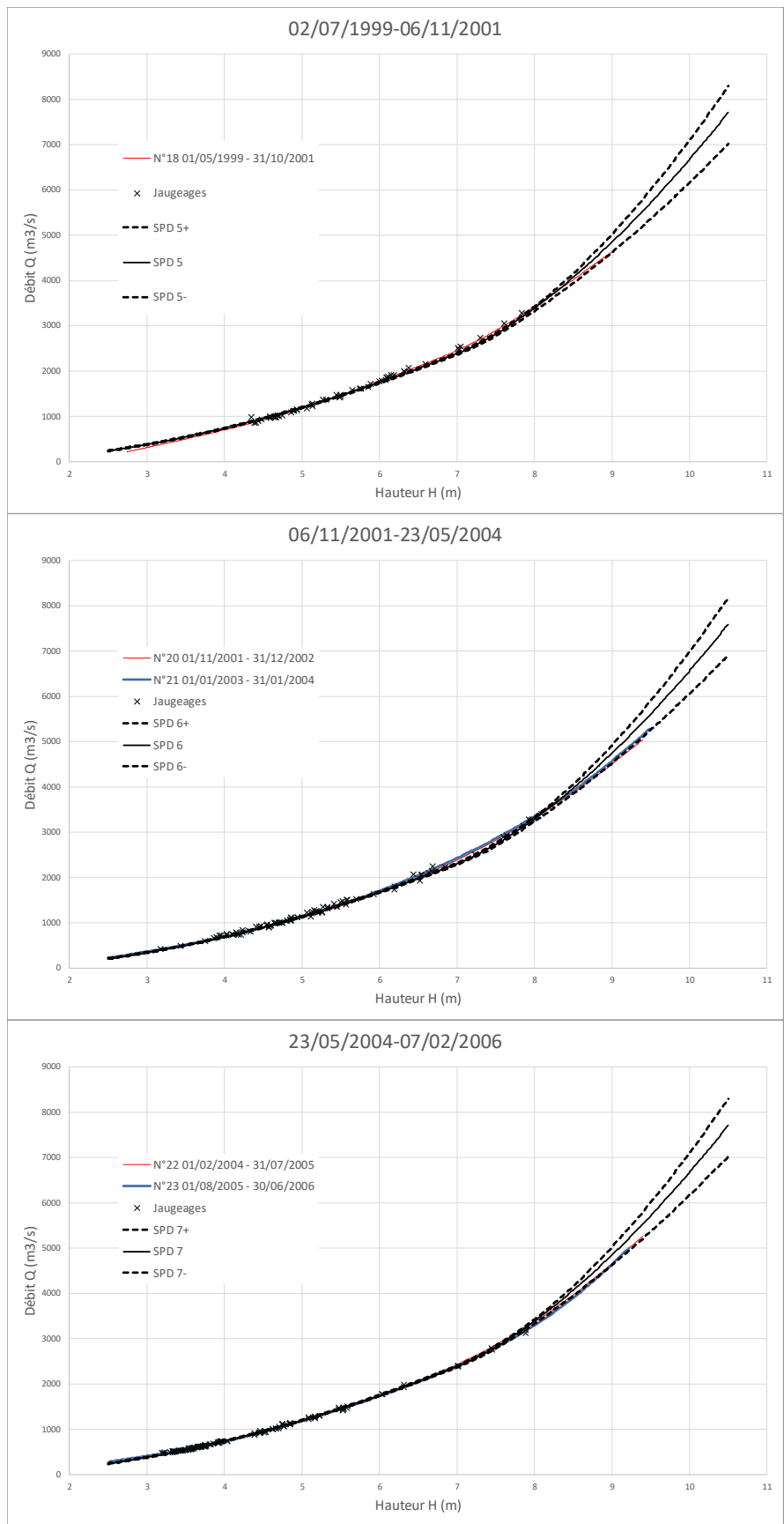


Figure 68 : Courbes de tarage SPD5-SPD6-SPD7 du Rhin à Maxau (CourbesTarageMaxauV2c.xlsx)

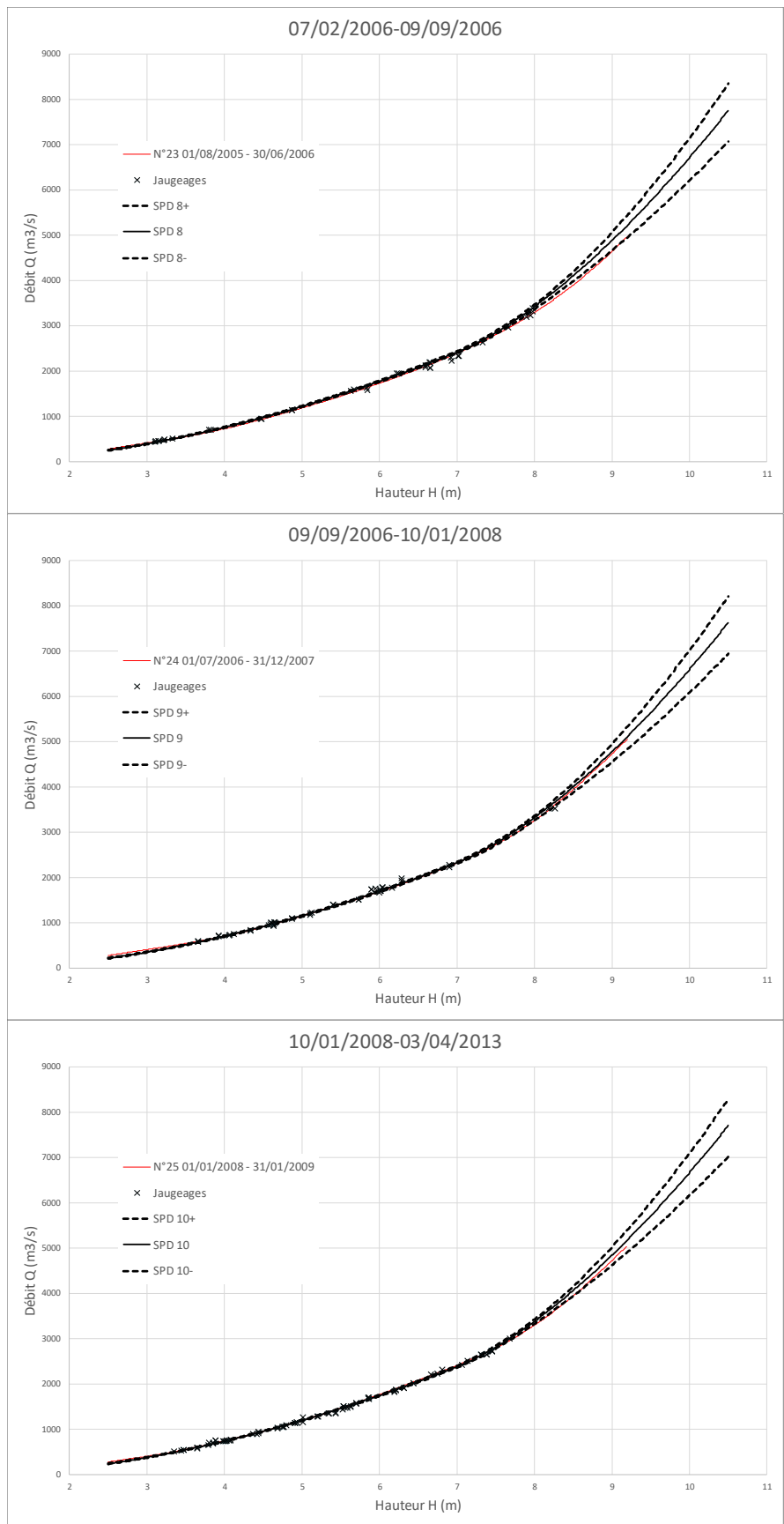


Figure 69 : Courbes de tarage SPD8-SPD9-SPD10 du Rhin à Maxau (CourbesTarageMaxauV2c.xlsx)

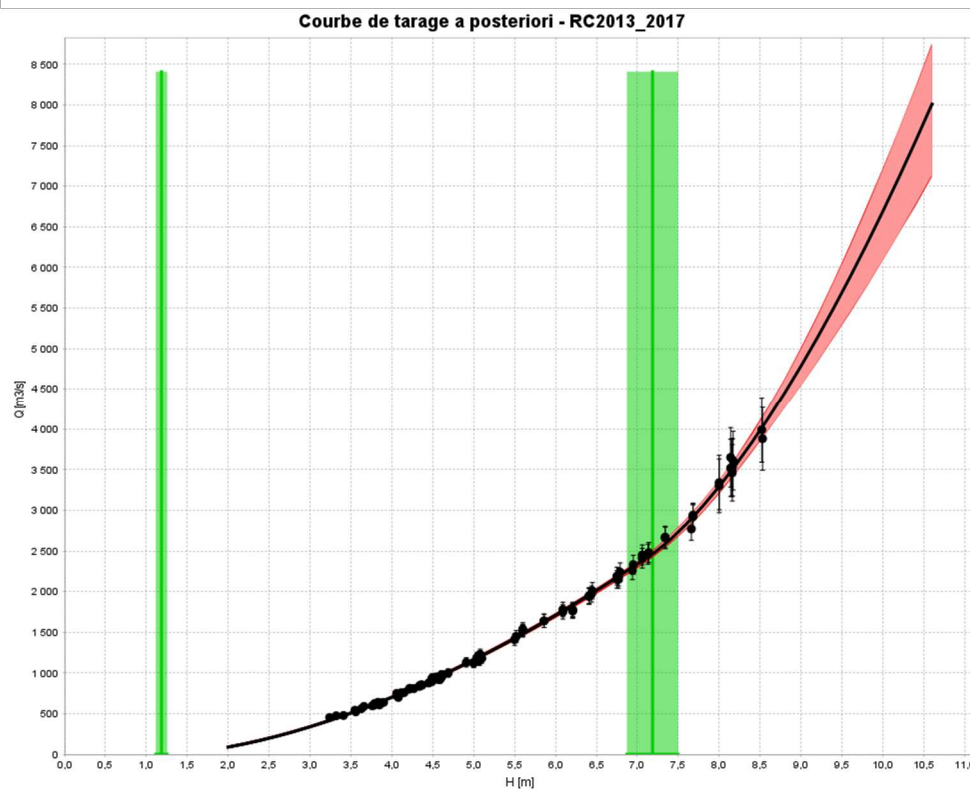
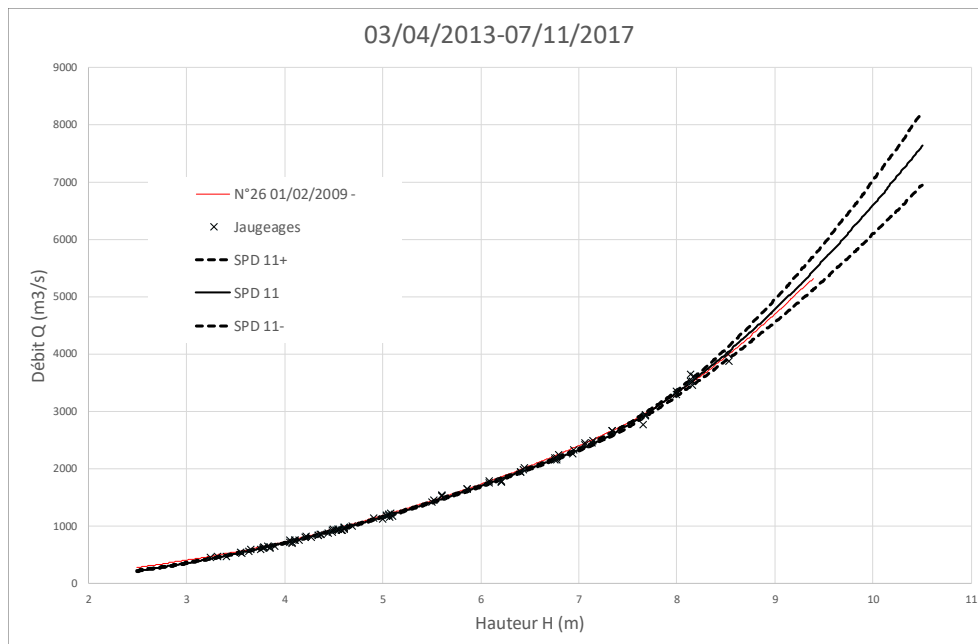


Figure 70 : Courbes de tarage SPD11 et BaRatin11 du Rhin à Maxau (CourbesTarageMaxauV2c.xlsx et RCMaxau2013_2017.png)

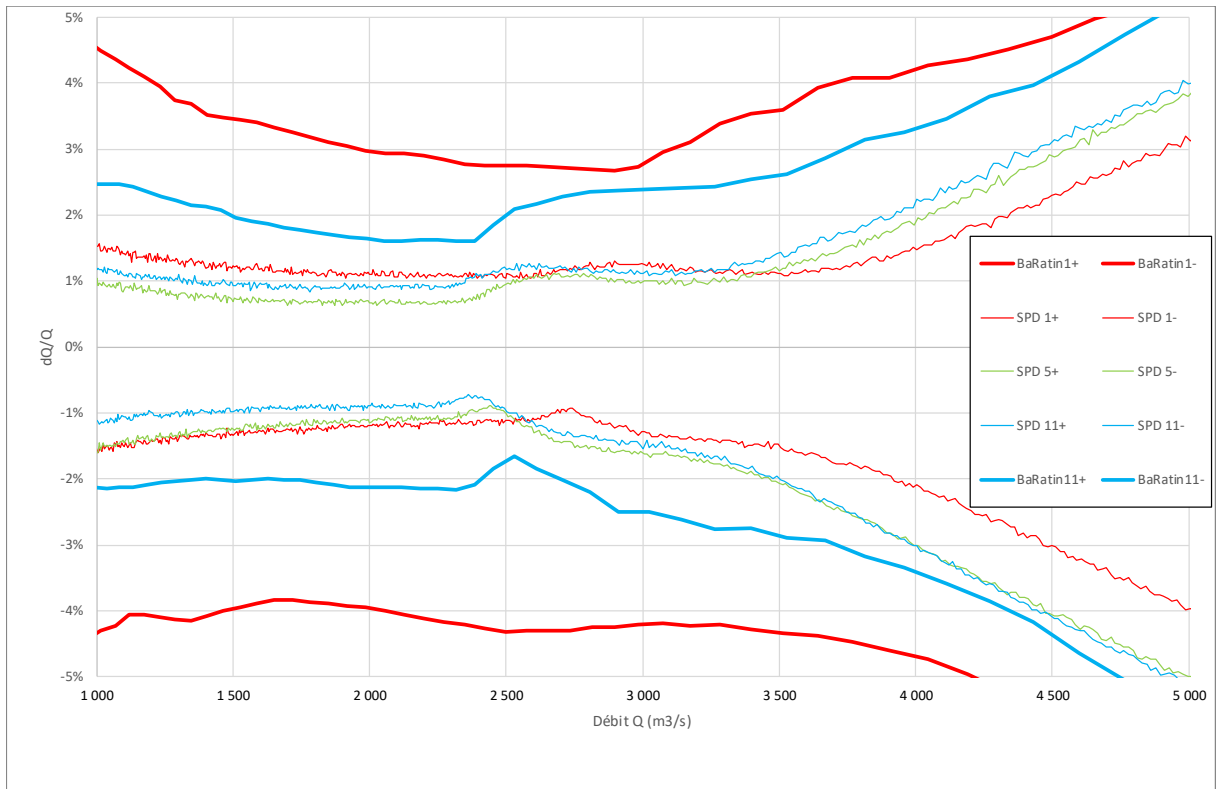


Figure 71 : Incertitudes sur les courbes de tarage SPD1, SPD5, SPD11 et BaRatin 11 du Rhin à Maxau (périodes 1947-1968, 1999-2001, 2013-2017) (Maxau2009_2017V2.bar.zip)

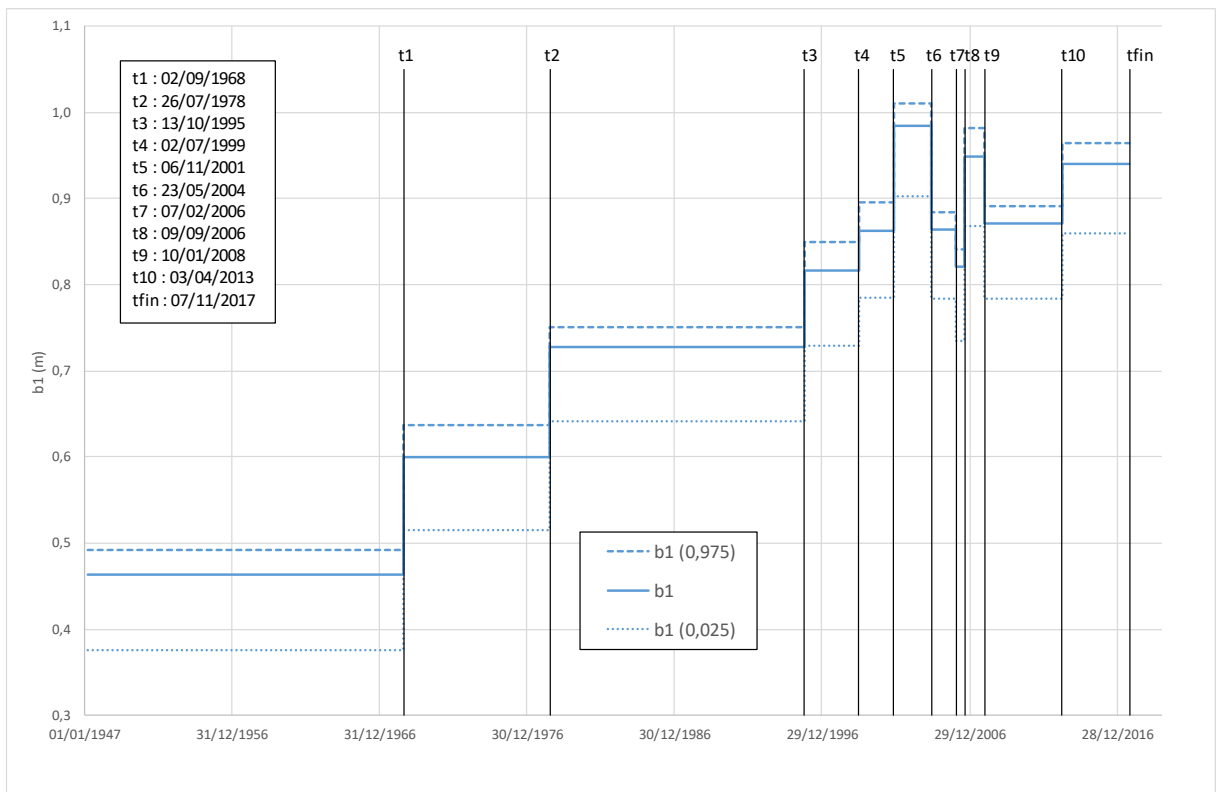


Figure 72 : Variations du paramètre b_1 (fonds du lit mineur) du Rhin à Maxau, pour les 11 périodes SPD1 à SPD11 (valeur estimée et intervalle de confiance à 95%) (Results_MCMC_CookedMaxau.xlsx)

Période 1815-1946

Aucun jaugeage n'est disponible sur cette période. L'estimation des incertitudes sur les débits va être réalisée de proche en proche, en remontant dans le temps à partir de la courbe Baratin1 de la période 1947-1968 (Figure 66). Nous exploitons les informations des sources (S12), (S13_1) et (S13_2) sur l'analyse de l'évolution morphologique du Rhin, ainsi que les sources (S10_1), (S10_2) et (S10_3), rapports anciens contenant des informations sur la géométrie du Rhin au XIX^e siècle.

La Figure 73 montre globalement un abaissement de la ligne d'eau à Maxau d'environ 50 cm de 1820 à 1880, suivie par un rehaussement d'environ 1 m de 1880 à 2010. La première phase s'explique par les travaux de correction du Rhin (coupures-rectifications de 1815 à 1831 vers Maxau et l'aval, travaux de Tulla de 1842 à 1860). A noter ensuite les travaux de régularisation du Rhin pour la navigabilité (1906-1924 de Strasbourg à Sondernheim, 1930-1939 en aval de Bâle).

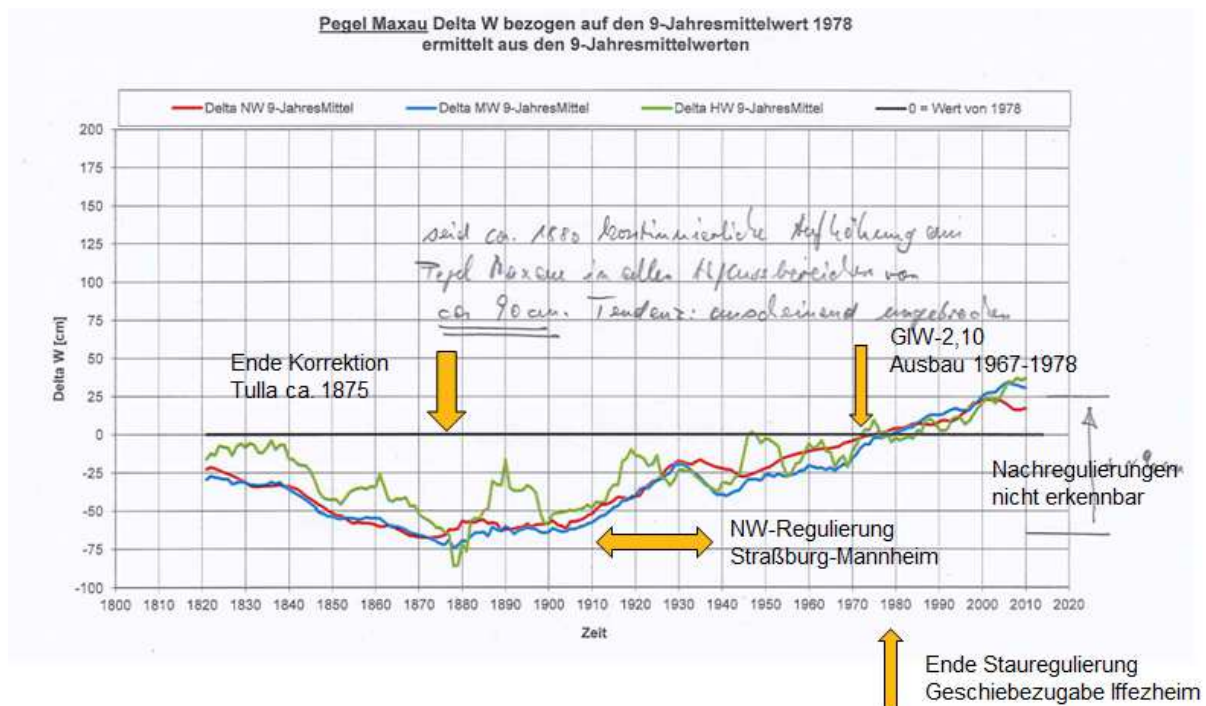


Figure 73 : Evolution de la ligne d'eau moyenne du Rhin à Maxau par rapport à un état de référence en 1978 (Source S13_D14.png)

La source (S10_3) décrit avec précision les évolutions du lit du Rhin de Bâle à Mannheim, sur la période 1810-1927. Il s'agit d'un fonctionnement assez complexe : à une incision d'ensemble se superpose un transit des sédiments vers l'aval, dû à la coupure-rectification des méandres. On trouve pour 62 sites (N°1 à 62, Basel-Schiffflände à Lauterburg) et 21 sites (N°1 à 21, Roxheim à Au), une série de relevés aux échelles et des commentaires sur les évolutions du niveau du Rhin. Nous avons reporté sur la Figure 74 les évolutions du fonds du lit du Rhin à partir de la source (S10_3) sur la période 1810-1927, et de la source (S13_1) sur la période 1820-2010. Six périodes homogènes ont été retenues : 1815-1820 ; 1821-1839 ; 1840-1874 ; 1875-1904 ; 1905-1929 et 1930-1946.

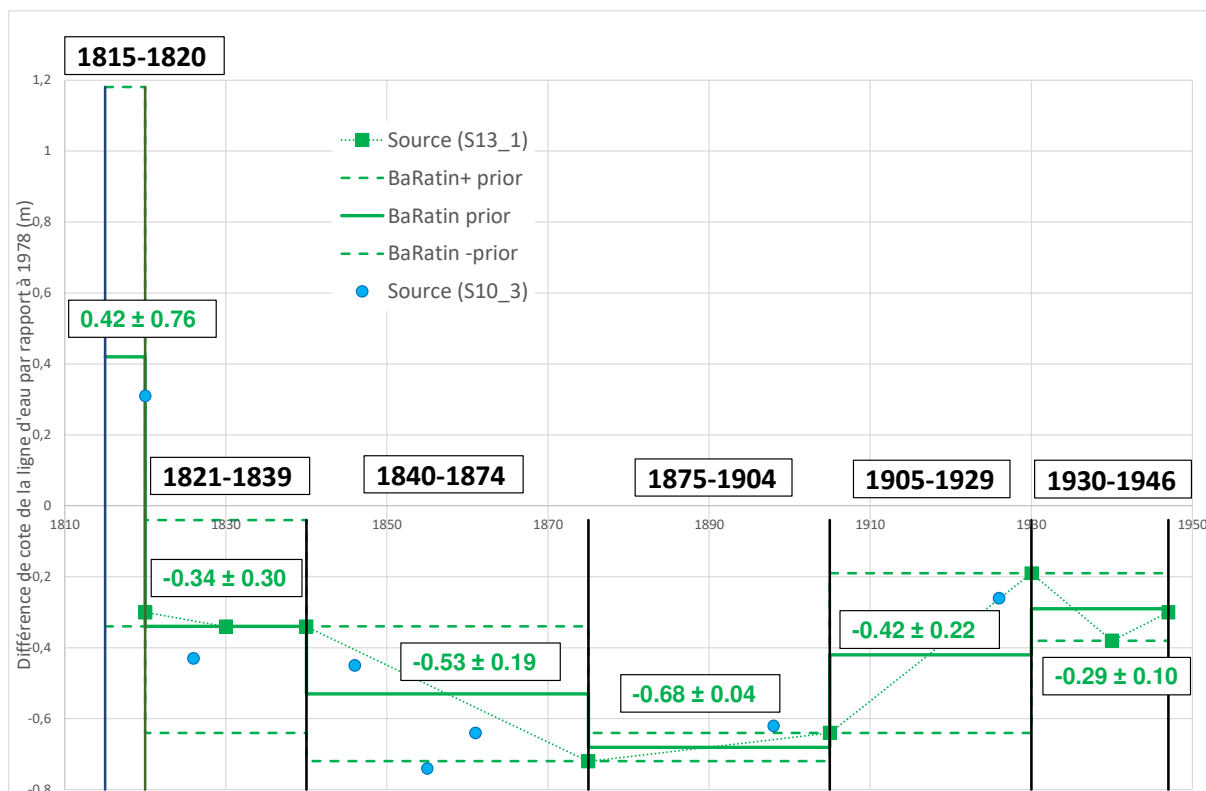


Figure 74 : Hypothèses d'évolution du fonds du lit du Rhin à Maxau retenues de 1821 à 1946 (RCMaxau1821_2020.xlsm)

Les valeurs retenues pour le tracé *a priori* de la courbe de tarage du Rhin à Maxau sur ces six sous-périodes sont résumées dans le Tableau 29.

Tableau 29 : Paramètres retenus pour le tracé *a priori* de la courbe de tarage du Rhin à Maxau (6 périodes sur 1815-1946)

Période	Lit mineur			Lit majeur		
	k_1 (m)	$a_1 = K_1 B_1 \sqrt{S_1}$ (m ^{4/3} /s)	c_1	k_2 (m)	$a_2 = K_2 B_2 \sqrt{S_2}$ (m ^{4/3} /s)	c_2
Prior 1947-2017	1.1 ± 1.0	$K_1 = 35 \pm 5$ $B_1 = 220 \pm 20$ $S_1 = 3.5 \pm 0.5 (10^{-4})$ 144.1 ± 26.5	1.67 ±0.05	7.6 ± 1.0	$K_2 = 25 \pm 5$ $B_2 = 750 \pm 250$ $S_2 = 4 \pm 1 (10^{-4})$ 375.0 ± 151.0	1.67 ±0.05
Posterior 1947-1968	0.63 ± 0.03	101.3 ± 1.9	1.81 ±0.01	7.09 ± 0.10	316.4 ± 53.9	1.69 ±0.02
Prior 1930-1946	0 cm % 1947-1968 0.63 ± 0.10					
Prior 1905-1929	-13 cm % 1930-1946 0.50 ± 0.20	$K_1 = 30 \pm 5$ $B_1 = 200 \pm 20$ $S_1 = 3 \pm 0.5 (10^{-4})$		7.1 ± 0.2	$K_2 = 25 \pm 5$ $B_2 = 725 \pm 250$ $S_2 = 3 \pm 0.5 (10^{-4})$	
Prior 1875-1904	-26 cm % 1905-1929 0.24 ± 0.04	103.9 ± 22.0	1.67 ±0.05		313.9 ± 127.8	1.67 ±0.05
Prior 1840-1874	+15 cm % 1875-1904 0.39 ± 0.19					
Prior 1821-1839	+19 cm % 1840-1874 0.58 ± 0.30	$K_1 = 30 \pm 5$ $B_1 = 280 \pm 40$ $S_1 = 2 \pm 1 (10^{-4})$		7.1 ± 0.5	$K_2 = 20 \pm 5$ $B_2 = 725 \pm 250$ $S_2 = 3 \pm 0.5 (10^{-4})$	
Prior 1815-1820	+76 cm % 1821-1839 1.34 ± 0.76	118.8 ± 39.5			251.1 ± 109.0	

Nous avons utilisé les paramètres *a posteriori* de la plus ancienne période avec des jaugeages (1947-1968) comme information *a priori* pour la première période 1930-1946 sans jaugeage et exploité les informations disponibles sur l'évolution morphologique du Rhin. Puis nous

avons recommencé sur la seconde période 1905-1929, en raisonnant en relatif par rapport à la période 1930-1946. Ceci a été répété pour les différentes périodes :

- Période 1947-1968: nous exploitons les valeurs *a posteriori* de la courbe BaRatin1 (cf. *Figure 66b* et seconde ligne Posterior1947-1968 du *Tableau 29*) ;
- Période 1930-1946 : stabilité du fonds du lit mineur par rapport à la période 1947-1968 (cf. *Figure 73*) et même cote d'activation k_2 du lit majeur, avec une plus forte incertitude ; choix des paramètres (K_1, B_1, S_1) et (K_2, B_2, S_2) de façon à retrouver a_1 (posterior) et a_2 (posterior) 1947-1968, avec majoration des incertitudes ; reprise de la valeur standard pour c_1 et c_2 (contrôle chenal) ;
- Période 1905-1929 : évolution du fonds du lit mineur (cf. *Figure 74*) ;
- Période 1875-1904 : évolution du fonds du lit mineur (cf. *Figure 74*) ;
- Période 1840-1874 : évolution du fonds du lit mineur (cf. *Figure 74*) ;
- Période 1821-1839 : évolution du fonds du lit mineur (cf. *Figure 74*) ; morphologie différente du lit avant-pendant-après les travaux de Tulla. Dans la situation 1820, le lit mineur était composé de plusieurs bras (cf. *Figure 75*) (largeur B_1 plus importante), et la pente était moins forte. La distance entre Maxau et Rusheim (cf. lignes horizontales en vert sur la *Figure 76*) est passée de 34 km en 1817 à 20.75 km en 1880. Aujourd'hui la distance entre Maxau (PK 362-363) et Gemersheim-Sondernheim (PK 384-385) est de 22 km. D'après l'annexe 2.7 de l'étude CECR (1978) la dénivelée entre Maxau et Rusheim/Sondernheim a augmenté de 1.25 m entre 1820 et aujourd'hui. Dans la situation actuelle, la pente vaut $S_0 = 3.5 \cdot 10^{-4}$ pour une distance de 22 km, soit une dénivelée de 7.7 m. Dans la situation 1820, la pente serait $S_0 = (7.7 - 1.25 = 6.45 \text{ m}) / 34 \text{ km} = 1.9 \cdot 10^{-4}$. Compte-tenu des incertitudes, nous avons retenu $S_0 = 2.0 \pm 1 \cdot 10^{-4}$. Pour le lit majeur, la hauteur d'activation est incertaine (niveau mal connu de l'altitude des berges avant travaux) et nous avons supposé une plus grande résistance à l'écoulement du fait de la végétation ;

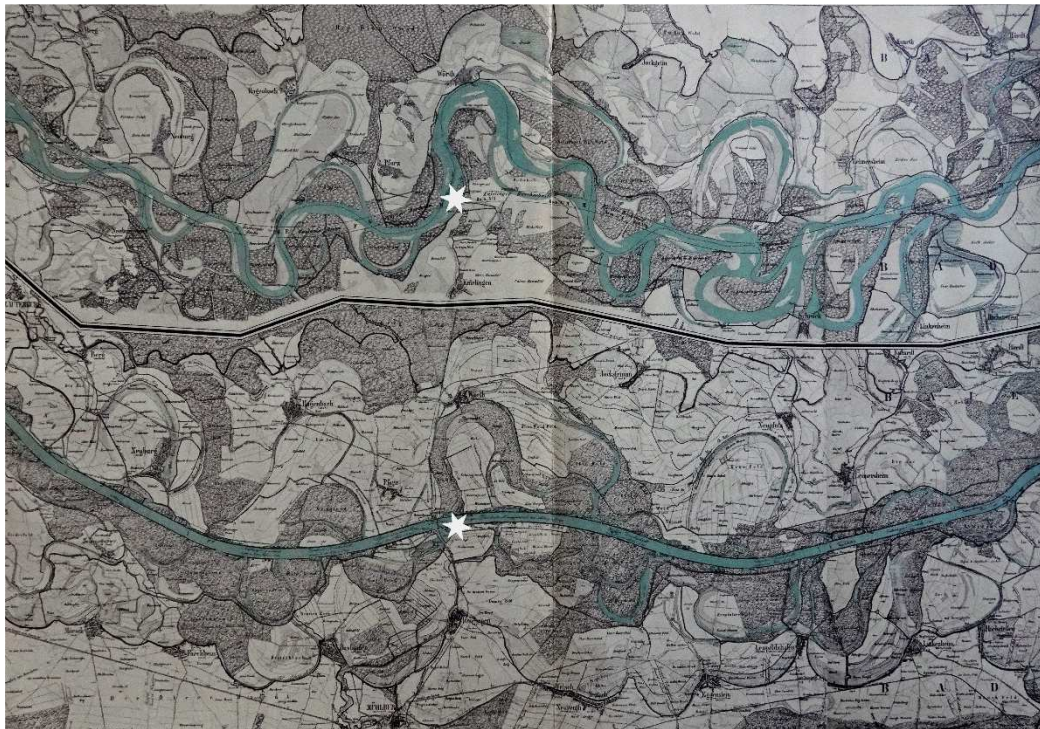


Figure 75 : Vue en plan du Rhin dans le secteur de Maxau : en haut en 1817-1819, en bas en 1882. L'étoile blanche donne la position de la station hydrométrique (Source S10_2, Carte4aRetouche.jpg)

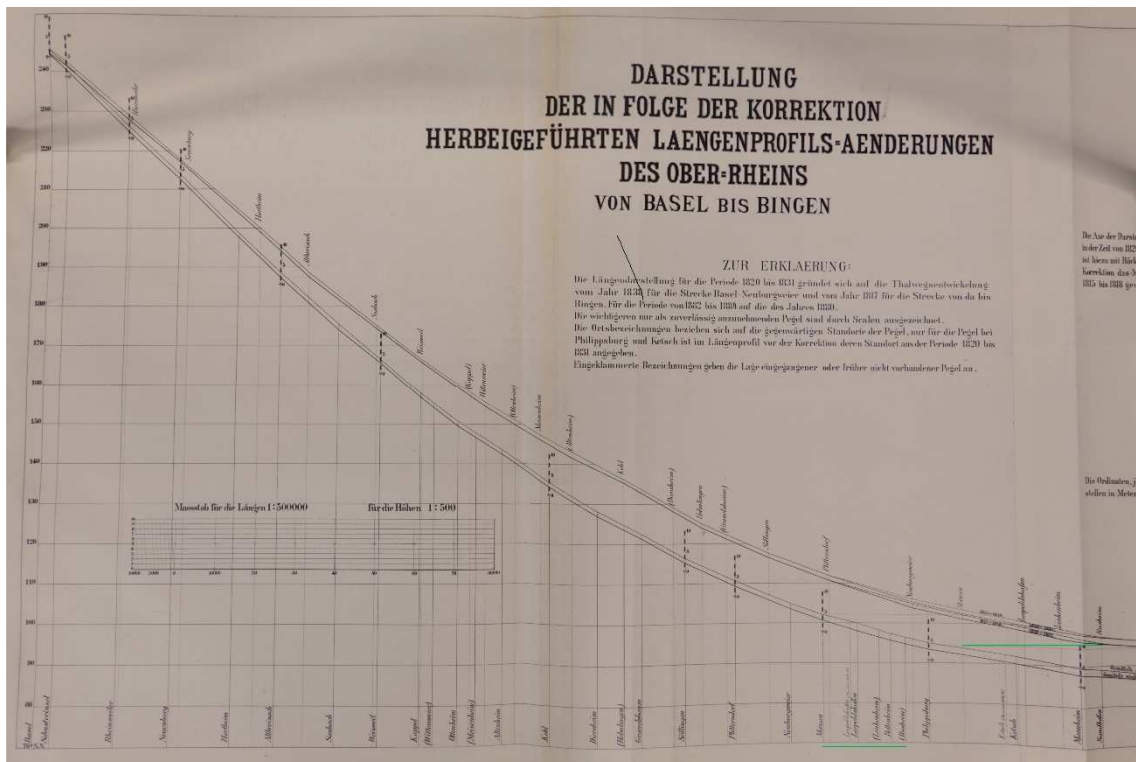


Figure 76 : Profil en long du Rhin dans le secteur de Maxau : développement des abscisses, en haut en 1817, en bas en 1880 (Source S10_2, S10_2Atlas1885Blatt2aBis.jpg)

- Période 1815-1820 : la série de débits à Maxau était disponible sur la période 1821-2018. Elle a été complétée sur 6 années supplémentaires en utilisant les cotes maximales annuelles de la période 1815-1820. Les hauteurs ont été converties en débit à l'aide de la courbe de tarage de 1821-1827. Compte-tenu des changements morphologiques induits par les travaux de chenalisation entre Lauterbourg et Mannheim qui ont commencé en 1818, avec une incision de 0.74 m entre 1820 et 1826 (source S10_3), les débits de la période 1815-1820 ont été calculés avec $Q_{1821-1827}(H - 0.74)$. Nous avons conservé les mêmes paramètres hydrauliques que ceux de la période 1821-1839, à l'exception du fond du lit mineur (cf. Figure 74) : $k_I = 1.34 \pm 0.76$.

Les courbes de tarage BaRatin sur les six périodes (1815-1820 ; 1821-1839 ; 1840-1874 ; 1875-1904 ; 1905-1929 et 1930-1946) sont représentées en Figure 77, ainsi que les courbes de tarage officielles (source S7_1). On note des différences assez faibles pour les deux premières périodes pour $7 \leq H \leq 8.8$ m : un écart de -3 à 8% entre la courbe BaRatin 1815-1820 et la courbe de 1821-1827 translaturée de 0.74 m ; un écart de 4 à 16% entre la courbe BaRatin 1821-1839 et les courbes officielles (1821-1827 et 1828-1842). **Pour les quatre autres périodes, les différences sont plus importantes** (respectivement 13-38%, 14-32%, 12-36% et 17-42% pour $7 \leq H \leq 8.8$ m).

Les 22 courbes de tarage officielles sur la période 1821-1973 ont été obtenues à partir d'une méthodologie basée sur l'interpolation des courbes de débits classés (CDC) à Bâle et à Kaub (50 km en aval de la confluence Rhin-Neckar). Elle repose sur les étapes suivantes :

1. Annexe 3.4 (CECR, 1978) : calcul des courbes CDC à Bâle, Maxau et Kaub par période de 10 ans (1928-38, 1938-48, 1948-58, 1958-68) et en distinguant 2 saisons (été, hiver) ;

2. Annexe 3.5 (CECR, 1978) : mise au point d'une régression ΔQ (Maxau – Bâle) vs ΔQ (Kaub – Bâle), en raisonnant par débits successifs Q_i (Bâle) (incrément 100 m³/s). La courbe CDC de Bâle est utilisée pour calculer la probabilité p_i associée au débit Q_i (Bâle). Les débits correspondants à Maxau et Kaub sont déduits de leur courbe CDC respective, pour la même probabilité p_i ;
3. Mise au point des 22 courbes de tarage à Maxau. Pour chaque courbe (période de validité donnée), calcul du débit Q_i associé à une hauteur H_i (itération sur différentes hauteurs H_i) :
 - calcul de la probabilité $p(H_i)$ associée à l'aide de la courbe de hauteurs classées de Maxau ;
 - recherche dans les courbes CDC de Bâle et Maxau des débits Q (Bâle) et Q (Kaub) associés à la probabilité $p(H_i)$;
 - calcul de l'accroissement ΔQ (Maxau – Bâle) à partir de la régression de l'étape n°2 ;
 - valeur du débit $Q_i = Q$ (Bâle) + ΔQ (Maxau – Bâle).

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** reposent sur une méthodologie d'interpolation des courbes de régime entre Bâle et Kaubs.

Pour trancher entre ces deux reconstitutions, il faudrait évaluer les incertitudes dans l'approche proposée dans l'étude CECR (1978) :

- incertitude des courbes de tarage sur la station de référence à Kaub (mention d'un lit rocheux, resté stable au cours du temps ; mention de courbes de tarage depuis 1857 à Kaub et 1821 à Saint-Goar – 9 km en aval de Kaub) ;
- incertitudes sur les courbes de débit classé à Bâle et Kaub ; sur les courbes de hauteur classée à Maxau ; sur la régression entre les accroissements ΔQ (Maxau – Bâle) vs ΔQ (Kaub – Bâle).

En l'état, nous conservons les valeurs de débit de crue issues des courbes officielles. Les erreurs multiplicatives obtenues avec les courbes BaRatin pour un débit de 4000 m³/s sont les suivantes :

- Période 1930-1946 : [-27 ; +35%] ;
- Période 1905-1929 : [-27 ; +37%] ;
- Période 1875-1904 : [-27 ; +36%] ;
- Période 1840-1874 : [-27 ; +36%] ;
- Période 1821-1839 : [-37 ; +46%] ;
- Période 1815-1820 : [-35 ; +47%].

A titre de simplification, **nous retenons une valeur d'incertitude [-27 ; +37%] sur la période 1840-1946 et [-37 ; +47%] sur la période 1815-1839.**

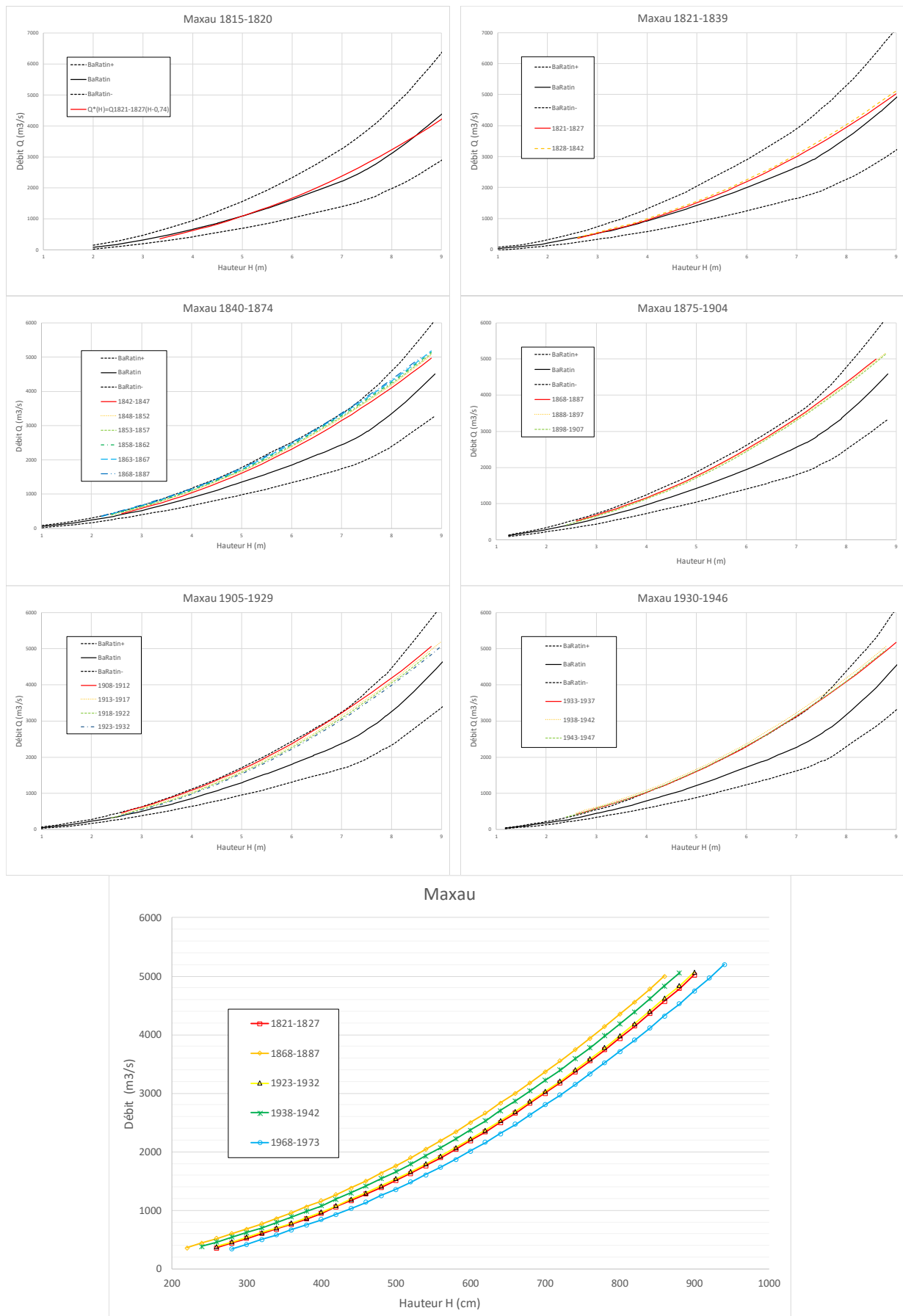


Figure 77 : Courbes de tarage à Maxau sur la période 1815-1946 : courbes BaRatin avec intervalle de confiance à 95% ($RC_{Maxau}^*.xlsx$), et courbes officielles (source S7_1)

RESUME

Ce rapport vise à répondre à une demande d'expertise de la DREAL Grand-Est sur le niveau de protection des digues du Rhin contre les crues, sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim. L'analyse a été réalisée à partir de deux longues séries hydrométriques, Bâle (1808-2017) et Maxau (1815-2018), communiquées par les gestionnaires (respectivement OFEV et WSV). Un travail de critique des données a permis de valider les séries de valeurs maximales annuelles de crue à utiliser, et de contrôler l'homogénéité des deux séries. Les incertitudes sur les débits de crue ont été évaluées à l'aide du modèle BaBatin, qui croise une expertise hydraulique a priori sur la relation hauteur-débit avec les données de jaugeage disponibles. Les incertitudes sont de l'ordre de $\pm 5-7\%$ pour les débits récents, et augmentent jusqu'à $\pm 45-48\%$ pour les débits les plus anciens.

L'analyse de la distribution des crues a été réalisée à l'aide du modèle HBay, qui permet de traiter un échantillon mixte de données (série continue et collection de crues historiques), de prendre en compte les incertitudes sur les débits de crue, et de faire éventuellement une hypothèse a priori sur les paramètres de la distribution (cf. approche régionale). Les résultats obtenus avec une loi GEV montrent l'intérêt d'exploiter les débits de crue du XIXe siècle, même s'ils sont moins bien connus que les débits plus récents. Les débits de référence à respecter sur les biefs de Gamsheim et Iffezheim correspondent à une période de retour de 20-50 ans pour une revanche de 1.2 m par rapport à la crête de digue, et supérieure à 10 000 ans pour une revanche de 0.2 m. En prenant une marge de sécurité supplémentaire, avec une distribution prédictive, les périodes de retour passent respectivement à 15-35 ans pour la revanche de 1.2 m, 5000 ans sur le bief amont de Gamsheim et sont supérieures à 10 000 ans pour le bief aval de Gamsheim et le bief d'Iffezheim pour la revanche de 0.2 m.

Les résultats obtenus à Maxau sont cohérents avec ceux de l'étude IWG (2010), même si deux effets opposés ont dû se compenser : utilisation d'une loi LogNormale qui surestime la distribution empirique à Maxau, et choix de ne pas exploiter les crues du XIXe siècle avec une estimation à Maxau sur la période 1903-2008 inférieure à celle de 1815-2018. Les résultats de l'étude EDF (2002) à Bâle semblent surestimés, avec des quantiles de crue Q100 et Q1000 nettement supérieurs à la distribution empirique 1808-2017, et une valeur Q1000 à Bâle supérieure à celle estimée à Maxau. L'origine de cette surestimation provient pour partie du choix fait de ne pas prendre en compte le laminage des crues postérieur aux travaux de correction du Jura en Suisse, à partir de 1890, et de ne pas corriger à la baisse les crues antérieures à 1890 pour raisonner sur un état de référence identique.



Centre siège Antony-Paris
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

www.inrae.fr



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE