

C | OBSERVATOIRE DE LA DURANCE | C-007



C-007 | MISE A JOUR DES DEBITS CARACTERISTIQUES DE LA DURANCE A MIRABEAU SUR LA PERIODE 1830-2020

Mise à jour des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau

Rev	Rédigé par	Vérifié par	Approuvé par	Modifications	Date
D					
C					
B	Z. Kaufmann	F. Mercier	B. Jacopin	Intervalles de confiance	11/05/2023
A	Z. Kaufmann	F. Mercier	B. Jacopin	Document initial	21/07/2022
Réf.	Etude_Débits_Caractéristiques_Durance_1830_2020.docx			Diffusion	EXTERNE

Table des matières

INTRODUCTION	5
1. CONSTITUTION DU JEU DE DONNEES	6
1.1. CADRE METHODOLOGIQUE.....	6
1.2. HYPOTHESES RETENUES SUR LE TRAITEMENT STATISTIQUE DES PERIODES AVANT-APRES AMENAGEMENT	8
1.3. PERIODE 1830-1997.....	10
1.3.1. Données SOGREAH.....	10
1.3.2. Données SMAVD	10
1.3.3. Comparaison des jeux de données.....	15
1.4. PERIODE 1997-2020.....	16
2. MISE A JOUR DES DEBITS CARACTERISTIQUES DE LA DURANCE A MIRABEAU	18
2.1. MODELE STATISTIQUE : LOI DE GUMBEL	18
2.2. RESULTATS	21
2.2.1. Mise à jour des débits caractéristiques.....	21
2.2.2. Evolution des débits caractéristiques.....	32
2.2.3. Analyse de sensibilité	37
2.2.4. Analyse des incertitudes	38
BIBLIOGRAPHIE	44

Table des illustrations

Figure 1 : Types de séries de données pouvant être considérées pour une analyse statistique des débits de la Durance (source : Meylan et al, 2011)	6
Figure 2 : Surreprésentation des débits importants dans l'échantillon de données à Mirabeau (source : adaptation Toril et al, 2011)	8
Figure 3 : Relation linéaire entre le débit moyen journalier et le débit maximum instantané à Mirabeau	11
Figure 4 : Courbes de tarage utilisées à Mirabeau associées aux deux échelles limnimétriques (deux axes des ordonnées) (source : SOGREAH, 2001)	12
Figure 5 : Relation entre les échelles limnimétriques en rive droite et rive gauche à Mirabeau	13
Figure 6 : Relation entre le débit maximum instantané et la hauteur d'eau en rive droite à Mirabeau	14
Figure 7 : Débits constitutifs des jeux de données du SMAVD et de SOGREAH	15
Figure 8 : Origine des débits constituant les jeux de données du SMAVD et de SOGREAH.....	16
Figure 9 : Différence entre interpolation et extrapolation (source : datasciencecentral.com)	18
Figure 10 : Exemple de 4 types de comportements asymptotiques différents (source : adaptation Hydrologie fréquentielle, Meylan et al.)	18
Figure 11 : Ajustement et inter-comparaison de 15 modèles statistiques au sous-ensemble constitué des débits inférieurs ou égaux à 3160 m ³ /s sur la période 1830-1959	19
Figure 12 : Rejet des hypothèses nulles d'adéquation à une loi Log-normale et Gumbel.....	20
Figure 13 : Représentation des jeux de données du SMAVD pour la période 1830-1959 (orange) et de SOGREAH pour la période 1835-1957 (bleu) selon la variable réduite de Gumbel	21
Figure 14 : Ajustement statistique des débits naturels à Mirabeau (1830-1959) (source : SOGREAH, 2001)	22
Figure 15 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés de SOGREAH pour la période 1830-1959 (reproduction des résultats de l'étude SOGREAH de 2001).....	23
Figure 16 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés du SMAVD pour la période 1830-1959	24
Figure 17 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-1997	26
Figure 18 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-1997*	27
Figure 19 : Ajustements statistiques des débits à Mirabeau avant (1830-1959 SOGREAH, ligne rouge) et après (1830-1997 SOGREAH, ligne verte ; 1960-1997* SMAVD, ligne bleue) la construction des aménagements hydroélectriques (source : adaptation SOGREAH, 2001)	28
Figure 20 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-2020	30
Figure 21 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-2020*	31
Figure 22 : Evolution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau entre 1830-1959, 1960-1997* et 1960-2020*	34
Figure 23 : Diminution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau de 1830-1959 à 1960-1997* et de 1830-1959 à 1960-2020*	36
Figure 24 : Sensibilité des débits caractéristiques par rapport aux crues majeures	37

Introduction

L'Observatoire de la Durance a pour vocation d'analyser et d'intégrer l'évolution de l'ensemble des compartiments qui caractérisent le système durancien : physiques, biologiques, sociologiques, etc. A ce titre, l'hydrologie du bassin versant de la Durance constitue l'un de ses objets d'étude. En effet, disposer d'une bonne connaissance du régime hydrologique de la Durance, et notamment des débits extrêmes pouvant survenir périodiquement, est essentiel pour que le SMAVD puisse concevoir et réaliser de manière optimale ses projets d'aménagement, de restauration et de valorisation du territoire.

L'une des caractéristiques du débit d'un cours d'eau est de changer en permanence en réponse aux conditions météorologiques : après une période de sécheresse le débit est généralement faible, tandis qu'après un épisode pluvieux il augmente plus ou moins rapidement. Bien que le sens de l'évolution du débit soit intuitif, sa détermination précise est une tâche nettement plus compliquée. Pour cause : l'hydrologie constitue une vaste science caractérisée par une multitude de processus physiques, chimiques et biologiques qui interagissent continuellement entre eux et qui contribuent finalement à la formation d'un débit dans le cours d'eau. Dans ces conditions, difficile de juger si le débit observé à un instant donné est, dans l'absolu, faible ou important. La question est de savoir que représente un débit important ? Celui atteint au cours de la crue de 1994 et qui a marqué la mémoire récente ? Et si l'on considère qu'il s'agit d'un débit important : est-il important ou très important ? Et qu'en est-il si l'on observe des crues plus importantes dans les années à venir ?

Le problème, lorsqu'il s'agit d'évaluer l'importance d'une crue, réside dans le fait que sa grille d'évaluation change en permanence. En effet, étant donné que cette dernière est construite à partir de l'ensemble des crues passées qui ont été enregistrées (une crue particulière est comparée à l'ensemble des crues passées), chaque nouvelle crue observée vient modifier la grille d'évaluation.

Le concept de « débits caractéristiques » vient pallier ce problème en définissant un référentiel permettant d'évaluer de manière quantitative et objective l'importance d'un débit particulier par rapport à l'ensemble des débits connus sur un tronçon de cours d'eau. Ainsi, à un instant donné et considérant une chronique de débits donnée, il est possible de figer la grille d'évaluation des débits.

Les débits caractéristiques de la Durance correspondent aux débits statistiques associés à des périodes de retour définies : 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans. Ceux-ci sont déterminés à partir d'une chronique de débits observés à une station hydrométrique. Par exemple, le débit centennal (Q100) de la Durance à Mirabeau correspond au débit qui est atteint en moyenne une fois tous les 100 ans à Mirabeau. Cela ne signifie pas pour autant qu'un tel débit se produira exactement tous les 100 ans : deux épisodes centennaux consécutifs peuvent aussi bien être rapprochés dans le temps ($dt < 100$ ans) qu'espacés dans le temps ($dt > 100$ ans).

De manière concrète, les débits caractéristiques sont utilisés pour les applications suivantes :

- Débits de référence pour les Atlas Dynamiques des Zones Inondables (ADZI)
- Débits de référence pour le dimensionnement des aménagements et ouvrages hydrauliques, notamment les digues de protection et les ouvrages d'art
- Analyse de type coût-bénéfice ou analyse multicritère

Il est à noter que les textes réglementaires qui cadrent la réalisation d'opérations de construction et d'aménagement se réfèrent généralement à des débits de référence.

L'objet de la présente étude hydrologique, qui s'inscrit entièrement dans la démarche de l'Observatoire de la Durance, est d'une part de porter un regard critique sur les débits caractéristiques qui ont été définis par SOGREAH en 2001 dans le cadre de l'Etude Globale et qui font actuellement foi pour l'ensemble des études réalisées par le SMAVD ; et d'autre part d'évaluer si les débits

caractéristiques ont évolué depuis 1997 et de les mettre à jour le cas échéant.

1. Constitution du jeu de données

1.1. CADRE METHODOLOGIQUE

La première étape consiste à établir le jeu de données sur lequel portera l'analyse statistique et qui servira de base pour définir les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau. Ce dernier se présente sous la forme d'une chronique de données. Selon la qualité et la quantité de données disponibles ainsi que les objectifs de l'étude, différentes chroniques sont envisageables : série des débits maximaux annuels, méthode du renouvellement (POT), méthode des k plus grands débits annuels.

Lorsque la chronique de débits est suffisamment longue (>30 années), la méthode des débits maximaux annuels est à préconiser car elle aboutit à des résultats fiables et repose sur une théorie mathématique solide. La méthode du renouvellement est quant à elle à considérer en présence d'une chronique de débits courte car elle permet d'augmenter la taille de l'échantillon de données en incluant tous les débits supérieurs à un certain seuil. Elle peut aussi être considérée lorsque certaines années hydrologiques sont marquées par plusieurs crues majeures car elle permet de moins dégrader la donnée originale. Il a été démontré que la méthode du renouvellement aboutissait à de meilleurs résultats que celle des débits maximaux annuels uniquement lorsque la chronique de débits contient au moins 1,65 événements par année hydrologique.

Les données disponibles à Mirabeau présentent la particularité de remonter loin dans le temps (les premiers débits datent de 1830) et de n'inclure en général qu'un débit par année hydrologique. Dès lors, une analyse statistique basée sur les débits maximaux annuels a été retenue dans le cadre de la présente étude. Une telle approche présente également l'avantage d'être en cohérence avec celle réalisée par SOGREAH en 2001.

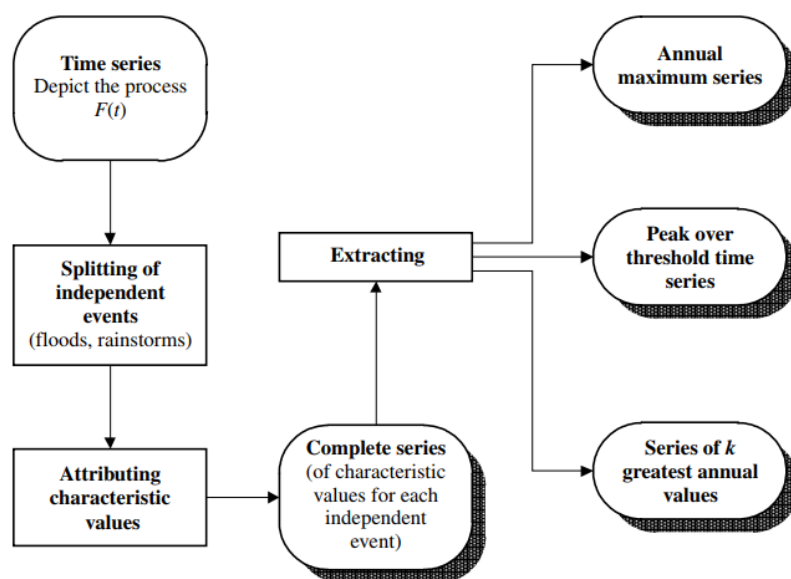


Fig. 3.9 The four types of series.

Figure 1 : Types de séries de données pouvant être considérées pour une analyse statistique des débits de la Durance (source : Meylan et al, 2011)

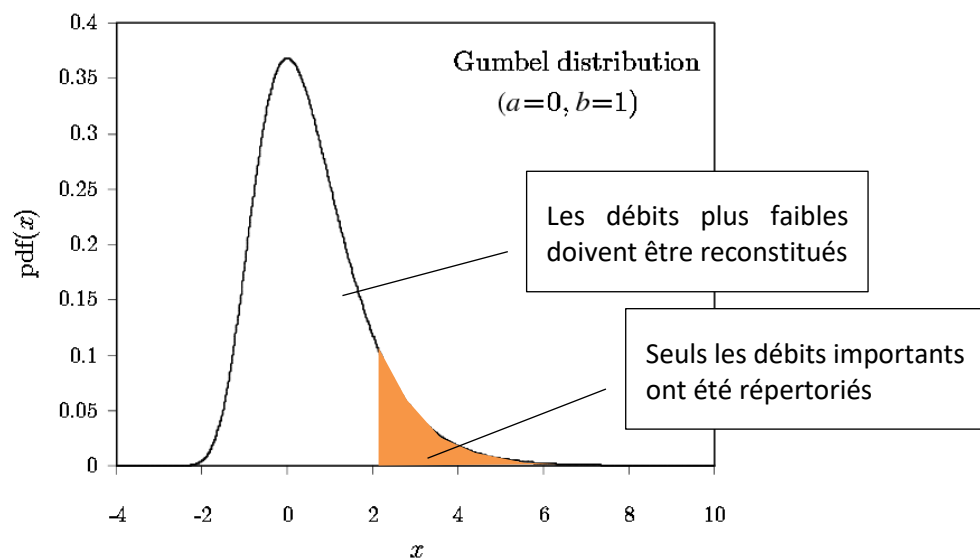
Les débits formant l'échantillon de données à analyser doivent présenter les propriétés suivantes :

- Débits vérifiés et validés
- Débits maximaux instantanés pour chaque année hydrologique
- Débits indépendants et identiquement distribués (iid)

Comme pour toute analyse statistique, les conditions d'indépendance et de distribution identique sont importantes. En effet, l'indépendance des données garantit que les débits de l'échantillon ne s'influencent pas mutuellement. Ceci serait le cas par exemple si l'on y incluait deux débits mesurés au cours de la même crue : en réalisant des mesures de manière rapprochée dans le temps, les débits associés sont probablement similaires étant donné la continuité du processus de formation de la crue (corrélation des données). Cela biaiserait les résultats de l'analyse statistique étant donné que certaines crues seraient surreprésentées. Pour éviter cela, il est nécessaire d'inclure dans l'échantillon uniquement des débits provenant d'épisodes hydrologiques distincts. C'est le cas d'un jeu de données constitué de débits maximaux annuels (en considérant l'année hydrologique).

D'autre part, pour que l'analyse statistique soit fiable, il est nécessaire que les données de l'échantillon soient identiquement distribuées. En effet, cela garantit que les données sont issues de la même population (également appelé modèle statistique ou loi de probabilité) qui est caractérisée par ses moments statistiques : moyenne, écart-type, asymétrie, kurtosis. Pour ce type d'analyse, l'homogénéité des données est essentielle étant donné que le but de la procédure est de déterminer les caractéristiques principales de la population à partir d'observations spécifiques. Dès lors, il est possible de déterminer les propriétés du modèle hydrologique (population) dont sont issus les débits mesurés à Mirabeau (échantillon), et notamment les débits caractéristiques, à la condition que les débits sur lesquels porte l'analyse soient homogènes. Les facteurs jouant sur l'homogénéité des données sont par exemple le changement climatiques (évolution de la moyenne des précipitations), la construction de barrages (modification du régime hydrologique), etc. Dès lors, il est nécessaire de distinguer dans le cadre de l'analyse statistique les débits mesurés avant et après la réalisation de la chaîne hydroélectrique de la Durance (1960).

Pour qu'un échantillon de données soit représentatif de la population dont il est issu, il est nécessaire qu'il ait été généré par tirage aléatoire. Dans le cas présent, des informations (relativement) précises sont disponibles pour les crues les plus importantes de la Durance depuis 1830. Les crues mineures sont peu ou pas documentées. L'échantillon de débits n'est donc pas représentatif de sa population étant donné que le choix a été fait de documenter uniquement les débits importants. Pour éviter que les résultats de l'analyse statistique ne soient biaisés et que les débits caractéristiques obtenus soient trop importants, il est nécessaire de compléter l'échantillon en y incluant les débits des années peu humides.



**Figure 2 : Surreprésentation des débits importants dans l'échantillon de données à Mirabeau
(source : adaptation Toril et al, 2011)**

Dans le cadre de son étude, SOGREAH a déterminé les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau en considérant l'ensemble des crues s'étant produites entre 1830 et 1997. Afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux de SOGREAH, il a été décidé d'étudier dans un premier temps cette même période temporelle puis de compléter l'analyse en intégrant les débits les plus récents.

1.2. HYPOTHESES RETENUES SUR LE TRAITEMENT STATISTIQUE DES PERIODES AVANT-APRES AMENAGEMENT

Le régime hydrologique de la Durance a fortement été influencé par la construction dans les années 60 de la chaîne hydroélectrique Durance-Verdon. Pour tenir compte de cette évolution, les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau ont été estimés dans le cadre de la présente étude sur des périodes aux caractéristiques hydrologiques homogènes, à savoir :

- la période avant aménagements (1830-1959)
- les périodes après aménagements (1960-1997 et 1960-2020)

Cette approche a le mérite d'être similaire à celle retenue par SOGREAH dans le cadre de l'Etude Globale de 2001 : les débits historiques ont été analysés en considérant la période avant aménagements (1830-1959 : débits naturels) et la période après aménagements (1960-1997 : débits réels influencés).

Compte tenu de l'absence de crues majeures après 1960, les calculs statistiques ont été réalisés en ajoutant les données des grandes crues historiques à la série des débits mesurés après 1960, à savoir les crues de mars 1836 (3600 m³/s), nov. 1840 (3250 m³/s), nov. 1843 (5200 m³/s), oct. 1882 (5100 m³/s), nov. 1886 (5200 m³/s), nov. 1906 (3700 m³/s) et nov. 1935 (3380 m³/s). Cette approche a été appliquée aussi bien par le SMAVD que par SOGREAH dans l'Etude Globale. L'intégration dans une chronique de débits de débits antérieurs à 1960 est indiquée par un astérisque après le nom de la chronique (ex : 1960-2020*).

*Voir partie 2.2.1.1 : Période 1960-1997**

1.3. PERIODE 1830-1997

1.3.1. Données SOGREAH

Les données utilisées par SOGREAH sont celles du tableau annexé à leur étude « Tableau des débits maximaux instantanés de la Durance » (p. 201). En fonction de la période considérée, l'information hydrométrique est donnée sous la forme :

- D'un débit instantané (en m^3/s)
- D'un débit journalier (en m^3/s)
- D'une hauteur d'eau (en m) rattachée à une échelle limnimétrique (rive gauche ou rive droite)

A la lecture de ce tableau, il apparaît qu'un débit n'a pas systématiquement été associé à chaque année.

Leurs courbes de débits caractéristiques à Mirabeau pour les périodes 1830-1959, 1960-1997 et 1830-1997 sont présentées aux figures A4-2 à A4-4 du rapport. Ce dernier n'indique toutefois pas explicitement quels débits ont été considérés pour établir ces courbes.

A la demande du SMAVD, SOGREAH (Bernard Couvert, superviseur de l'étude) nous a transmis la chronique des débits qui ont été utilisés dans le cadre de leurs analyses. Bien que leur analyse ait porté sur la période 1830-1997, seuls les débits entre 1835 et 1957 nous ont été transmis.

1.3.2. Données SMAVD

Comme expliqué précédemment, une analyse statistique basée sur des débits maximaux annuels est adaptée lorsque le nombre d'années disponibles est suffisamment important (>30 ans). La première étape est donc de reconstituer une chronique de débits couvrant la période 1830-1997 à partir des données et informations présentes dans le rapport de SOGREAH.

1.3.2.1. Débits maximaux instantanés observés

Le tableau des débits maximaux instantanés de la Durance, en annexe de l'étude de SOGREAH, recense les débits de certaines crues historiques. Les débits les plus importants qui ont été observés durant le XIXe et le début du XXe siècle ont été estimés par différents auteurs, notamment Pardé, Imbeaux et Auriol, à l'aide de courbes de tarage. Ceci peut aboutir à des estimations de débits très variables. Le temps a été découpé en années hydrologiques afin de décorréler autant que possible les événements hydrologiques.

Ces débits ont été repris tel quels pour alimenter le jeu de données du SMAVD.

1.3.2.2. Débits maximaux instantanés reconstitués à partir du débit moyen journalier

Pour certaines années, un débit moyen journalier (Q_j) est indiqué à la place du débit maximum instantané (Q_{ix}). Il est toutefois possible d'estimer le débit de pointe en déterminant au préalable la relation reliant ces deux grandeurs. Ceci est possible dès lors que certaines années disposent des deux informations simultanément. L'ajustement d'un modèle statistique permet ainsi d'exprimer le débit maximal instantané en fonction du débit moyen journalier. Ne disposant pas d'informations a priori sur le type de relation reliant ces deux variables, deux modèles simples ont été testés : la régression linéaire et la régression quadratique. L'indicateur de performance d'un modèle que représente l'erreur moyenne quadratique (MSE) a permis de montrer que le modèle linéaire est plus performant. Ce dernier a donc été retenu.

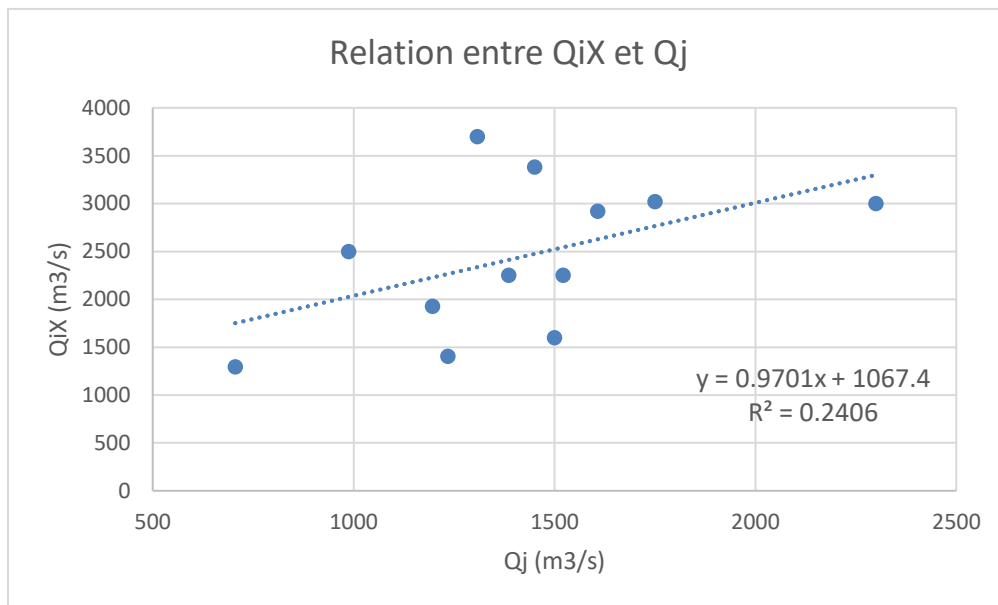


Figure 3 : Relation linéaire entre le débit moyen journalier et le débit maximum instantané à Mirabeau

La relation suivante a été obtenue :

$$QiX = 0,97 * Qj + 1067$$

1.3.2.3. Débits maximaux instantanés reconstitués à partir des courbes de tarage à Mirabeau

Pour certaines années, une hauteur d'eau maximale (H) est indiquée à la place du débit maximum instantané (QiX). Dans ces cas, il est possible d'estimer le débit de pointe à l'aide d'une courbe de tarage. D'après le rapport de SOGREAH, trois échelles limnimétriques ont existé à Mirabeau, deux ayant été utilisées principalement :

- L'échelle de la Madeleine en amont rive droite du pont qui a été utilisée jusqu'en 1935
- L'échelle du pont rive gauche (culée de l'ancien pont suspendu) qui est utilisée depuis 1914

Les relevés qui ont été effectués de manière concomitante sur les deux échelles entre 1914 et 1935 permettent de corréliser les deux échelles et même de les fusionner.

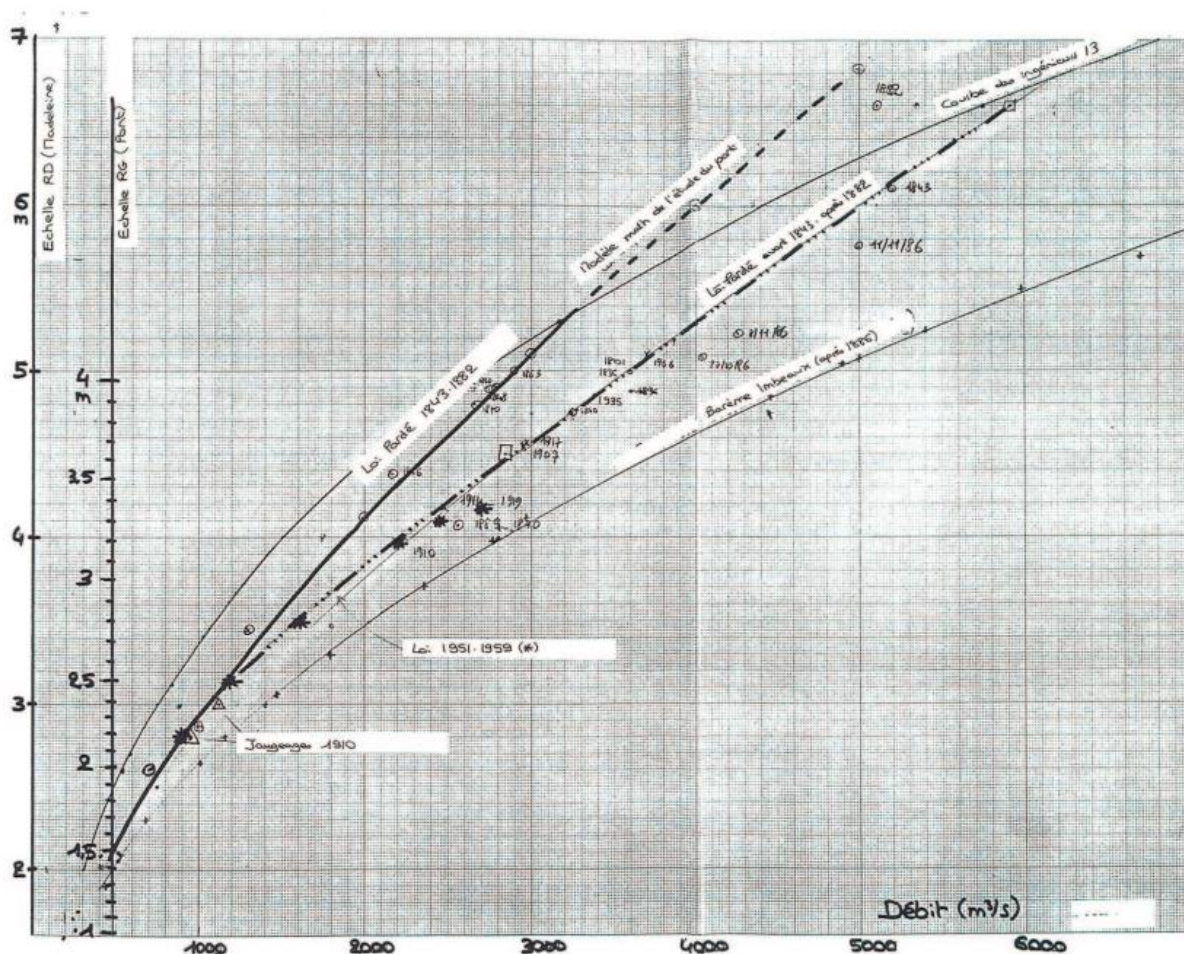


Figure 4 : Courbes de tarage utilisées à Mirabeau associées aux deux échelles limnimétriques (deux axes des ordonnées) (source : SOGREAH, 2001)

Dans son rapport, SOGREAH indique que l'axe central dénommé « Loi Pardé avant 1843 – après 1882 » est cohérent avec les jaugeages réalisés par EDF entre 1951 et 1959 et qu'en conséquence ils ont utilisé cette courbe pour interpréter les relevés effectués entre 1914 et 1959.

Ne disposant pas de l'équation de la courbe de tarage, et pour partir des observations plutôt que d'un modèle existant, une loi de puissance a été calée aux couples « hauteur – débit » disponibles sur la période 1830 – 1959. Afin de disposer du jeu de données le plus complet possible, les débits exprimés en fonction d'une hauteur d'eau rattachée à l'échelle en rive gauche ont été convertis pour correspondre à l'échelle en rive droite. La figure suivante présente l'ajustement d'un modèle linéaire. Il apparaît que le calage est bon avec un coefficient de détermination R^2 de 0,93. L'équation de la courbe est la suivante :

$$H_{RD} = 1,26 * H_{RG} - 0,16$$

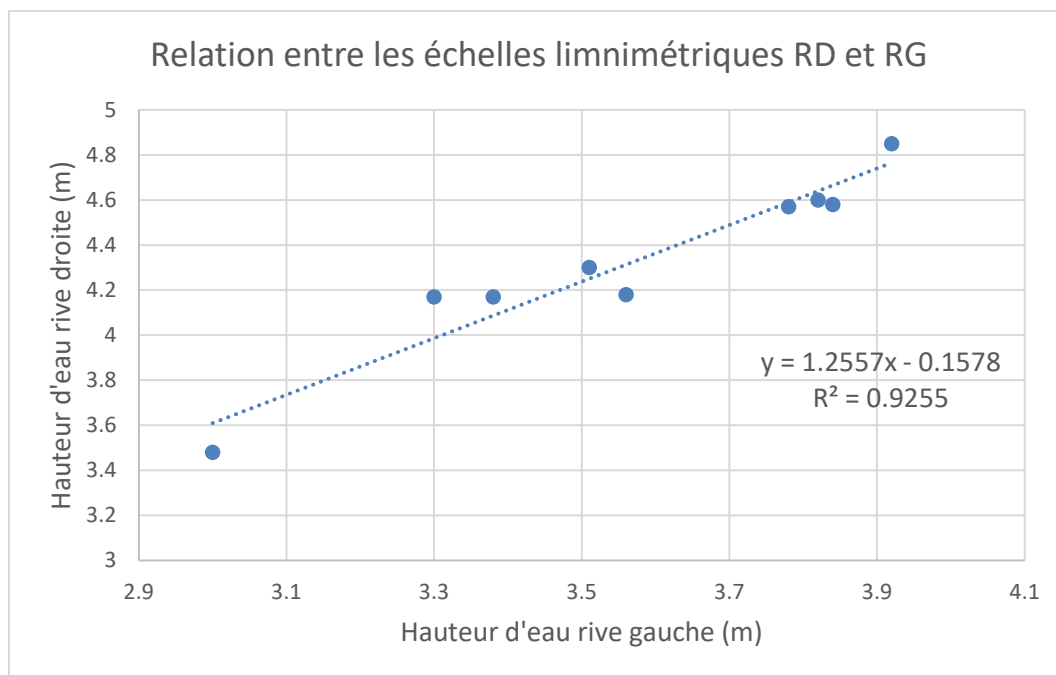


Figure 5 : Relation entre les échelles limnimétriques en rive droite et rive gauche à Mirabeau

La figure suivante montre l'ajustement d'un modèle de puissance sur l'ensemble des couples « hauteur d'eau RD – débit ». Sur ce graphique, les points violets correspondent aux années disposant d'une hauteur d'eau en rive droite, tandis que les points jaunes correspondent à celles disposant d'une hauteur d'eau en rive gauche, convertie par la suite en hauteur d'eau en rive droite. Il apparaît que le calage est satisfaisant avec un coefficient de détermination R^2 de 0,84. On observe toutefois que la courbe passe entre deux nuages de points situés au-dessus et en-dessous. L'équation de la courbe est la suivante :

$$Q_{iX} = 157,96 * H_{RD}^{1,89}$$

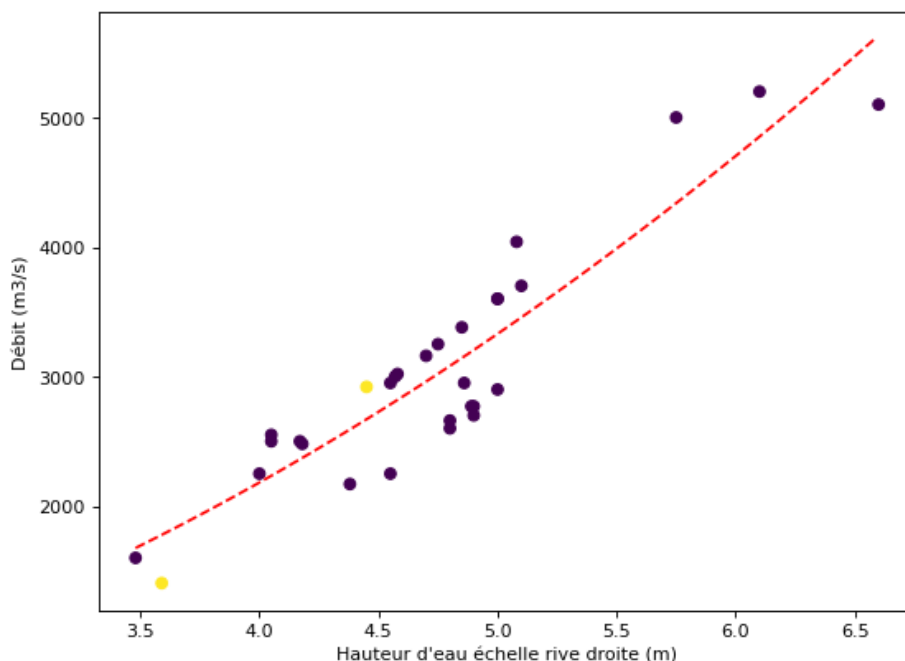


Figure 6 : Relation entre le débit maximum instantané et la hauteur d'eau en rive droite à Mirabeau

Les hauteurs d'eau mesurées à Mirabeau (en rive gauche et rive droite) ont pu être converties en débits maximaux instantanés à l'aide de cette courbe de tarage. Plusieurs cas de figure se présentent :

- La hauteur d'eau est connue précisément en rive droite (ex : 3,85 m en RD en 1879) : dans ce cas le débit est directement calculé à l'aide de la courbe de tarage ;
- La hauteur d'eau est connue précisément en rive gauche (ex : 3,59 m en RG en 1926) : dans ce cas la hauteur d'eau est convertie de l'échelle rive gauche à l'échelle rive droite puis le débit est calculé à l'aide de la courbe de tarage ;
- La hauteur d'eau est indiquée comme étant inférieure à une certaine valeur (ex : <3 m en 1936) : dans ce cas il faut d'abord rattacher cette hauteur d'eau à l'une des deux échelles limnimétriques (RD si année < 1914, RG si année > 1935, au cas par cas si 1914 < année < 1935), puis appliquer l'une des deux procédures décrites ci-dessus ;
- La hauteur d'eau n'est pas indiquée (ex : 1961) : dans ce cas la hauteur d'eau est définie en récupérant la valeur la plus proches (interpolation).

Si une hauteur d'eau est donnée pour la rive droite et la rive gauche, il convient de retenir celle de la rive droite.

1.3.2.4. Ordre de priorité des débits reconstitués

De manière générale, si plusieurs débits sont disponibles au terme de cette procédure, il convient de n'en retenir qu'un seul selon l'ordre de priorité suivant :

- Débit observé ($Q_{\text{observé}}$)
- Débit reconstitué à partir du débit moyen journalier ($Q_{\text{journalier}}$)
- Débit reconstitué à partir d'une hauteur d'eau connue précisément en rive droite ($Q_{\text{tarage RD}}$)
- Débit reconstitué à partir d'une hauteur d'eau connue précisément en rive gauche ($Q_{\text{tarage RG}}$)
- Débit reconstitué à partir d'une hauteur d'eau inférieure à une certaine valeur ($Q_{\text{tarage approx}}$)
- Débit reconstitué à partir d'une hauteur d'eau interpolée ($Q_{\text{tarage interp}}$)

1.3.3. Comparaison des jeux de données

La figure suivante compare le jeu de données de SOGREAH utilisé dans le cadre de l'Etude Globale à celui du SMAVD, utilisé dans le cadre de la présente étude. Bien qu'une partie des débits maximaux annuels considérés soit identique (alignement sur la ligne rouge), on observe quelques divergences. En particulier, lorsqu'aucun débit (instantané ou journalier) ou aucune hauteur d'eau exacte ne sont mentionnés dans le tableau des débits annexé à l'étude SOGREAH, un débit de 1000 m³/s a été retenu par SOGREAH. Dans le cadre de la présente étude, le débit a été déterminé à partir des courbes de tarage en considérant soit une hauteur d'eau approximative (ex : <3m), soit une hauteur d'eau interpolée à partir des mesures de débit antérieures et postérieures (ex : année hydrologique sans information de débit mais encadrée de deux mesures à <3,50m). D'autre part, un biais systématique s'observe pour les débits qui ont été déterminés à partir des courbes de tarage (points alignés sur la droite parallèle à la droite $y=x$ situés un peu en dessous). Ceci indique que les équations des courbes de tarage utilisées sont légèrement différentes.

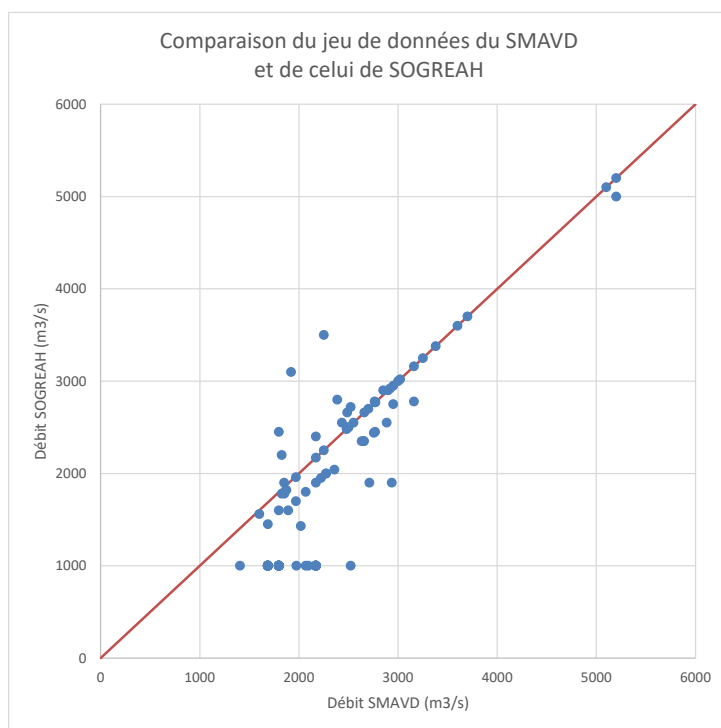


Figure 7 : Débits constitutifs des jeux de données du SMAVD et de SOGREAH

1.4. PERIODE 1997-2020

Le barrage de Cadarache se situe 8 km à l'amont de l'ancienne station de mesure de Mirabeau. Depuis 1976, EDF transmet les débits moyens journaliers au SMAVD. Les débits maximaux instantanés sont transmis depuis 2005. Il s'agit des données les plus fiables disponibles pour le secteur d'étude considéré. Ainsi, afin de mettre à jour les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau, les débits disponibles à Cadarache depuis 1997 ont été intégrés au jeu de données initial.

La figure suivante présente l'ensemble des débits qui constituent le jeu de données pour la période 1830-2020. La couleur de chaque point indique la provenance du débit. La légende des débits est explicitée au paragraphe 1.3.2.4 (à l'exception de Qtarage qui regroupe Qtarage RD et Qtarage RG). La figure d'après synthétise chaque sous-ensemble de données sous forme de boîte à moustache (code couleur identique).

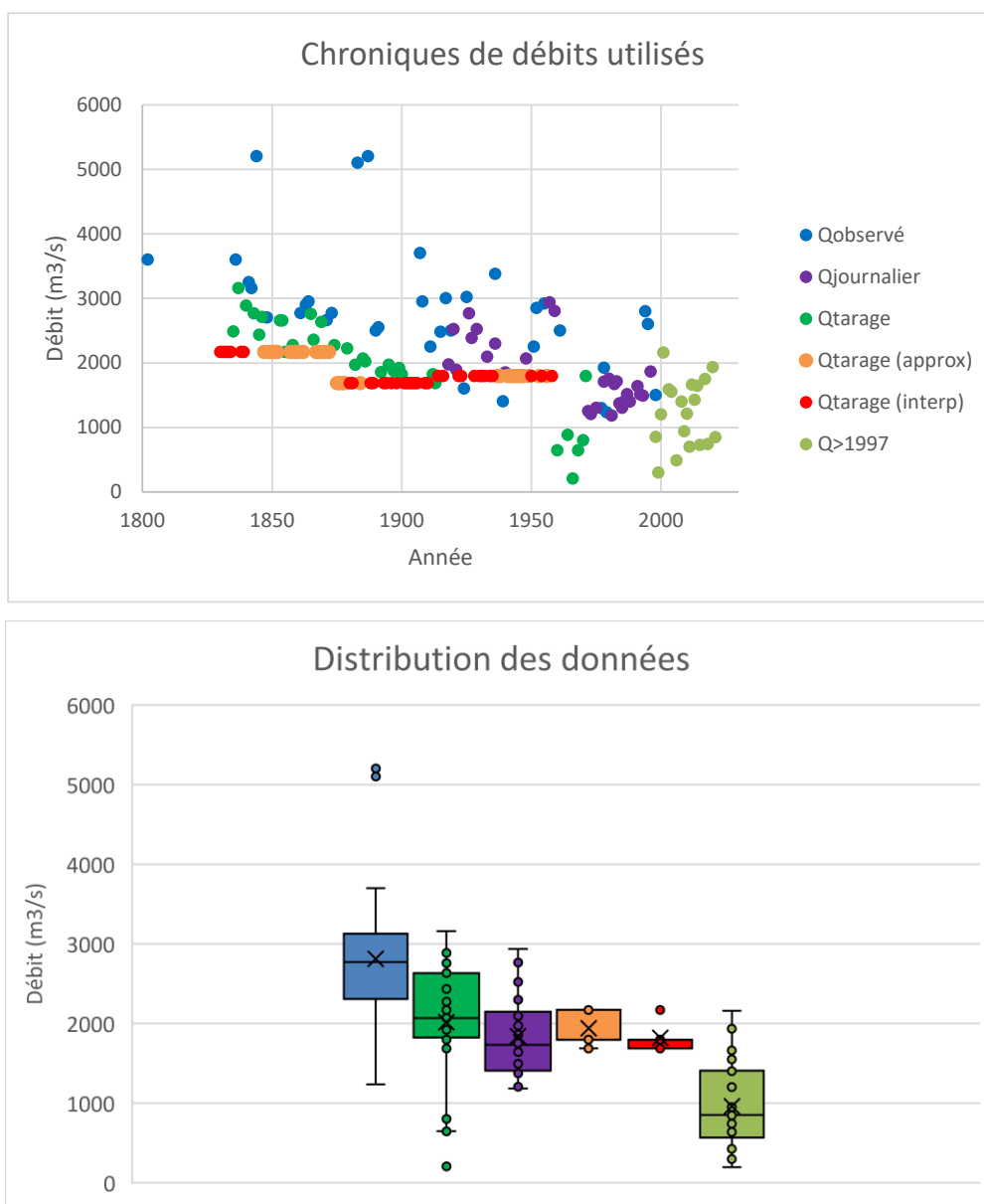


Figure 8 : Origine des débits constituant les jeux de données du SMAVD et de SOGREAH

Il ressort de ces figures que :

- les débits les plus importants sont indiqués explicitement dans le tableau des grandes crues historiques (estimations Pardé, Imbeaux ou Auriol durant le XIXe et le début du XXe siècle)
- les débits légèrement moins importants sont retranscrits sous forme de hauteur d'eau
- de nombreuses observations journalières ont été faites au cours du XXe siècle
- les débits ne descendent généralement pas en-dessous d'une valeur seuil inférieure avant 1959 compte tenu de la nécessité de combler une série de données lacunaire, tandis que les débits sont en moyenne nettement inférieurs après 1959 (construction de la chaîne hydroélectrique)

2. Mise à jour des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau

2.1. MODELE STATISTIQUE : LOI DE GUMBEL

L'ajustement d'un modèle statistique à des débits observés (jeu de données) permet de déterminer les débits caractéristiques d'un cours d'eau. D'un point de vue conceptuel, les débits les plus fréquents, à savoir ceux correspondant à des périodes de retour très inférieures au nombre d'années d'observations ($T \ll n$), peuvent être estimés de manière fiable étant donné le nombre important d'observations disponibles. Dans ce cas on parle d'interpolation des résultats. A l'inverse, les débits les moins fréquents, à savoir ceux correspondant à des périodes de retour supérieures au nombre d'années d'observations ($T > n$), ne peuvent pas être estimés de manière fiable étant donné le manque d'observations disponibles. Dans ce cas on parle d'extrapolation des résultats.

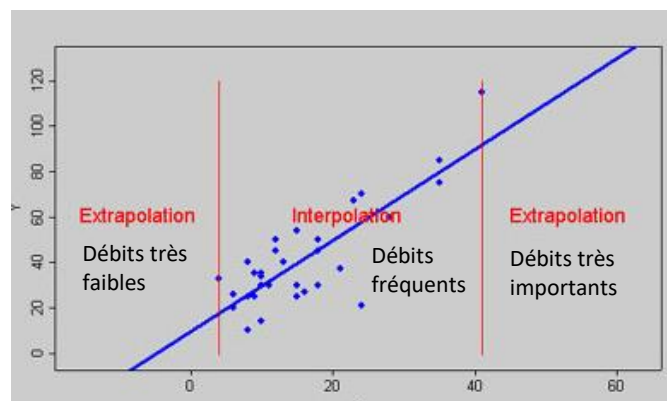


Figure 9 : Différence entre interpolation et extrapolation (source : datasciencecentral.com)

Le problème vient du fait qu'il est possible de caler différents modèles statistiques à comportements asymptotiques différents au même jeu de données et donc d'aboutir à des débits extrêmes très différents comme le montre la figure suivante. Compte tenu de la vitesse très lente à laquelle s'agrandit l'échantillon de données (un débit additionnel chaque année), le comportement asymptotique est très difficile à valider.

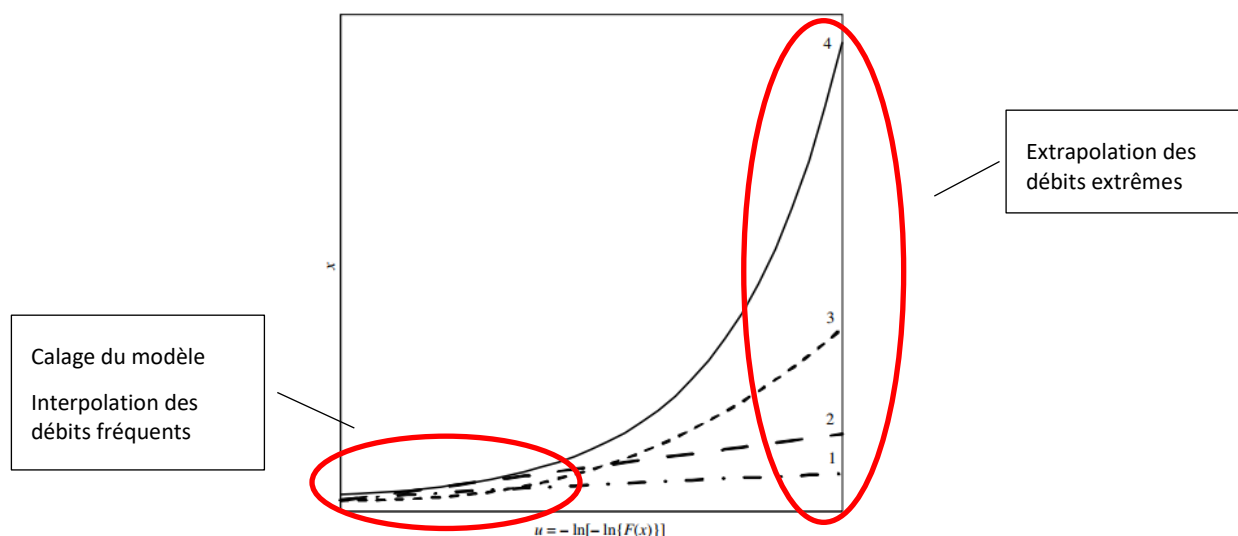


Figure 10 : Exemple de 4 types de comportements asymptotiques différents (source : adaptation Hydrologie fréquentielle, Meylan et al.)

Un autre problème est associé à l'absence d'homogénéité des données à partir d'un débit seuil à déterminer. Ceci se caractérise par une rupture de pente dans le graphique représentant le débit en fonction de la variable réduite de Gumbel (voir graphiques dans la partie « Résultats »). Cette évolution témoigne d'un changement des processus hydrologiques dominants à l'origine de la formation des crues. En effet, une partie des précipitations à l'origine des crues inférieures au débit seuil s'infiltre dans le sol (sol non saturé), ce qui n'est pas le cas des précipitations à l'origine des crues supérieures au débit seuil (sol saturé). Par conséquent, l'augmentation du débit en fonction de la fréquence (gradient) est plus marquée pour les crues supérieures au débit seuil que pour celles inférieures au débit seuil. Dès lors, il n'est pas possible d'analyser le jeu de données dans son ensemble : il est nécessaire de déterminer à partir de quelle valeur les débits évoluent de manière distincte puis d'analyser de manière individuelle les deux sous-échantillons constitués des valeurs inférieures et supérieures à la valeur seuil. Afin d'identifier quel modèle statistique représente au mieux notre jeu de données, différents modèles ont été calés au sous-ensemble de données composé des débits inférieurs ou égaux à 3160 m³/s sur la période 1830-1959. Le débit de 3160 m³/s correspond au point de rupture de pente observé dans les graphiques représentant l'ajustement de Gumbel (voir graphiques dans la partie « Résultats »). Les modèles ont ensuite été classés du plus pertinent au moins pertinent à l'aide du critère d'information d'Akaike (AIC). Cette approche permet de comparer un jeu de données non pas à un modèle statistique en particulier, mais à un ensemble de modèles.

La figure suivante représente les résultats des ajustements statistiques. Les noms des modèles ont été classés du plus pertinent (en haut) au moins pertinent (en bas) dans la légende. Le nombre de paramètres de chaque modèle est indiqué dans le nom par un chiffre allant de 1 à 3.

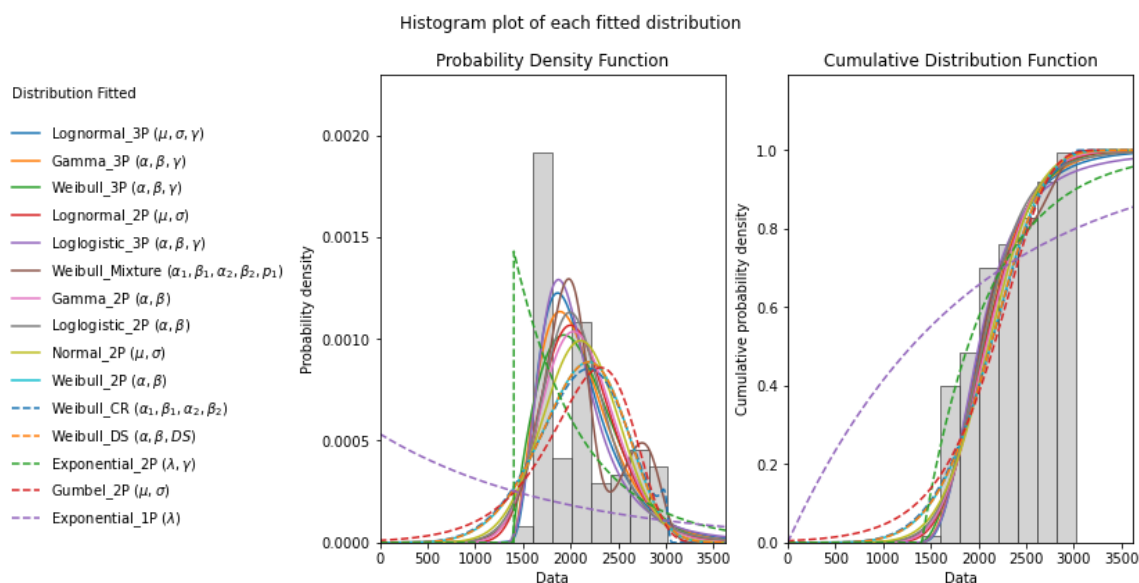


Figure 11 : Ajustement et inter-comparaison de 15 modèles statistiques au sous-ensemble constitué des débits inférieurs ou égaux à 3160 m³/s sur la période 1830-1959

Le détail des résultats de l'analyse sont repris dans le tableau ci-dessous. Le nom et la valeur de chaque paramètre sont indiqués ainsi que la valeur du critère de qualité AIC. Selon cette analyse, le meilleur modèle à 2 paramètres correspond à la loi Log-normale, tandis que le plus mauvais correspond à la loi de Gumbel. Toutefois, il apparaît que les AIC ont des valeurs relativement similaires (1756 et 1803, respectivement) ce qui indique que ces modèles ont des performances rapprochées.

Tableau 1 : Détail des ajustements des 15 modèles statistiques

Distribution	Alpha	Beta	Gamma	Alpha 1	Beta 1	Alpha 2	Beta 2	Proportion 1	DS	Mu	Sigma	Lambda	Log-likelihood	AICc	BIC	AD optimizer	
Lognormal_3P			1238.4							6.65679	0.46661		-870.303	1746.81	1754.94	3.08711	TNC
Gamma_3P	214.661	3.51566	1349.68										-870.468	1747.15	1755.27	3.13505	TNC
Weibull_3P	810.712	1.88346	1387.23										-871.896	1750	1758.13	3.21442	TNC
Lognormal_2P										7.63443	0.183919		-875.852	1755.81	1761.26	3.97885	L-BFGS-B
Loglogistic_3P	667.118	3.09836	1335.33										-873.684	1753.58	1761.71	3.17567	TNC
Weibull_Mixture				1999.49	9.412	2765.2	13.7109	0.73239					-870.45	1751.43	1764.8	3.36545	TNC
Gamma_2P	72.5564	29.0031											-877.674	1759.45	1764.91	4.21775	TNC
Loglogistic_2P	2041.77	9.12098											-879.954	1764.01	1769.47	3.89434	TNC
Normal_2P										2104.36	402.525		-882.587	1769.28	1774.73	4.83125	TNC
Weibull_2P	2275.51	5.38159											-888.402	1780.91	1786.36	5.10479	TNC
Weibull_CR				2282.74	5.1956	2997.67	93.9418						-885.706	1779.76	1790.53	5.04213	TNC
Weibull_DS	2275.51	5.38159							1				-888.402	1783.01	1791.14	5.10479	TNC
Exponential_2P			1405									0.00142988	-898.469	1801.04	1806.5	11.1032	TNC
Gumbel_2P										2317.63	428.31		-899.378	1802.86	1808.31	6.43942	TNC
Exponential_1P												0.000533531	-1030.39	2062.81	2065.56	42.5495	L-BFGS-B

Afin de déterminer lequel parmi ces deux modèles est le meilleur, le test d'adéquation de Kolmogorov-Smirnov a été appliqué au sous-ensemble de débits. D'après les résultats des tests le modèle log-normal représente un peu mieux les données que le modèle de Gumbel. Il apparaît toutefois qu'aucun ajustement n'est statistiquement significatif. En théorie, il n'est donc pas possible d'affirmer que les données suivent une loi log-normale ou de Gumbel. Il est probable que l'ajout de débits constants dans la série des débits maximaux annuels afin de combler les années hydrologiques lacunaires soit à l'origine de ces résultats. En effet, l'estimation de débits à partir d'hauteurs d'eau approximatives et par interpolation des débits antérieurs et postérieurs se traduit par deux pics dans l'histogramme des données localisés autour de 1700-1800 m³/s et 2200 m³/s (voir Figure 8).

Results from Kolmogorov-Smirnov test:

Kolmogorov-Smirnov statistic: 0.18114620841425316

Kolmogorov-Smirnov critical value: 0.12300722993368046

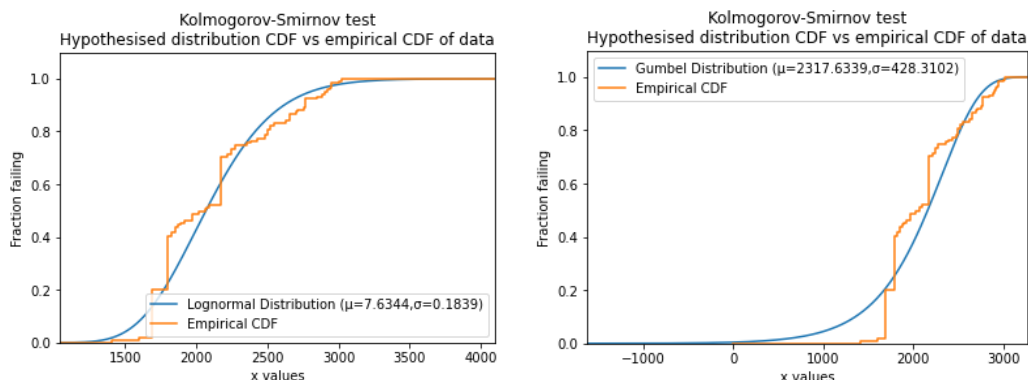
At the 0.05 significance level, we can REJECT the hypothesis that the data comes from a Lognormal Distribution ($\mu=7.6344, \sigma=0.1839$)

Results from Kolmogorov-Smirnov test:

Kolmogorov-Smirnov statistic: 0.19829384378450488

Kolmogorov-Smirnov critical value: 0.12300722993368046

At the 0.05 significance level, we can REJECT the hypothesis that the data comes from a Gumbel Distribution ($\mu=2317.6339, \sigma=428.3102$)

**Figure 12 : Rejet des hypothèses nulles d'adéquation à une loi Log-normale et Gumbel**

Au vu de ces résultats et considérations, et afin de rester en cohérence avec la méthode d'analyse de SOGREAH, la détermination des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau a été faite à l'aide d'un modèle de Gumbel. En tout état de cause, il est rappelé que ce type de modèles est adapté lorsque la série des débits maximaux annuels comporte au-moins 30 années.

2.2. RESULTATS

2.2.1. Mise à jour des débits caractéristiques

2.2.1.1. Période 1830-1959

La figure suivante représente les débits maximaux instantanés en fonction de la variable réduite de Gumbel. Les points orange correspondent au jeu de données pour la période 1830-1959 reconstitué par le SMAVD dans le cadre de la présente étude, tandis que les points bleus correspondent au jeu de données pour la période 1835-1957 utilisé par SOGREAH dans le cadre de l'Etude Globale (transmis par Bernard Couvert).

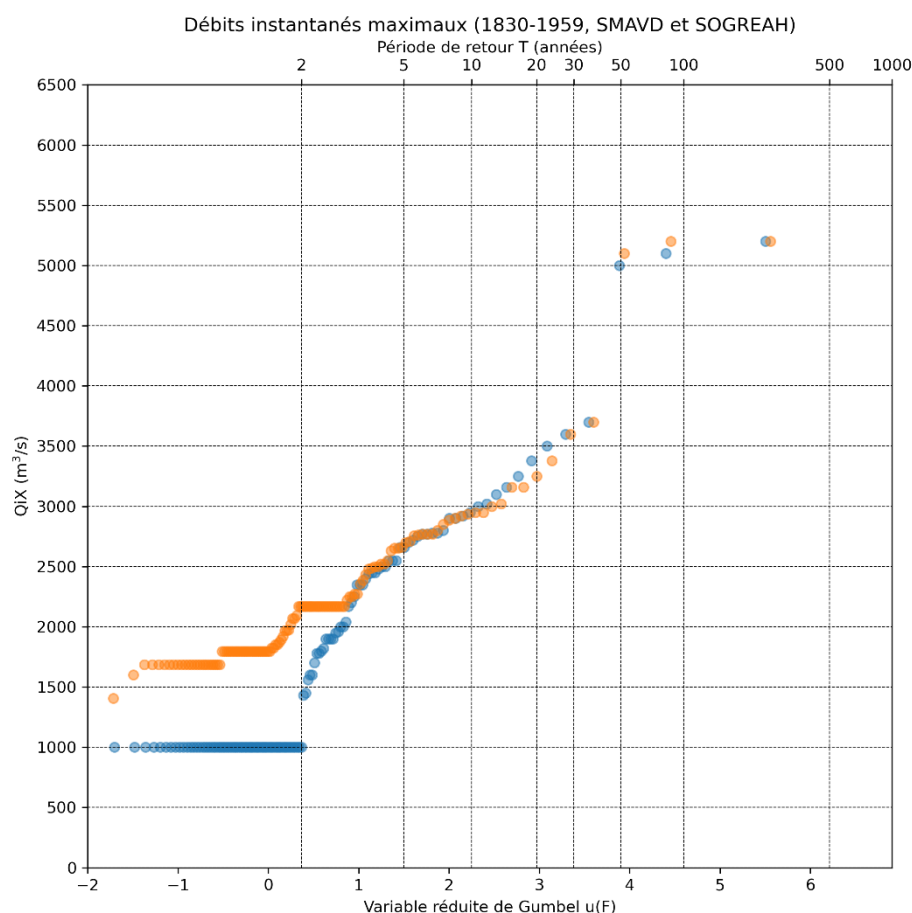


Figure 13 : Représentation des jeux de données du SMAVD pour la période 1830-1959 (orange) et de SOGREAH pour la période 1835-1957 (bleu) selon la variable réduite de Gumbel

Des différences notables sont visibles pour les débits les plus fréquents (à gauche du graphique). Celles-ci s'expliquent par les hypothèses différentes qui ont été retenues pour reconstituer les débits fréquents : conversion en débit d'une hauteur d'eau approximée ou interpolée par le SMAVD ; débit imposé à 1000 m³/s par SOGREAH. A contrario, les courbes sont relativement similaires lorsque la variable réduite de Gumbel u est supérieure à 1. Pour rappel, cette variable correspond à une double transformation logarithmique de la période de retour T d'une crue. Représenter les débits instantanés maximaux selon u plutôt que T permet de linéariser le modèle de Gumbel (interprétation visuelle facilitée).

La relation liant la variable de Gumbel u à la période de retour T (en années) est la suivante :

$$u = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)$$

De manière générale, les différences observables correspondent aux écarts mis en évidence à la Figure 7.

Les trois figures suivantes représentent l'ajustement de modèles statistiques aux jeux de données du SMAVD et de SOGREAH pour la période 1830-1959.

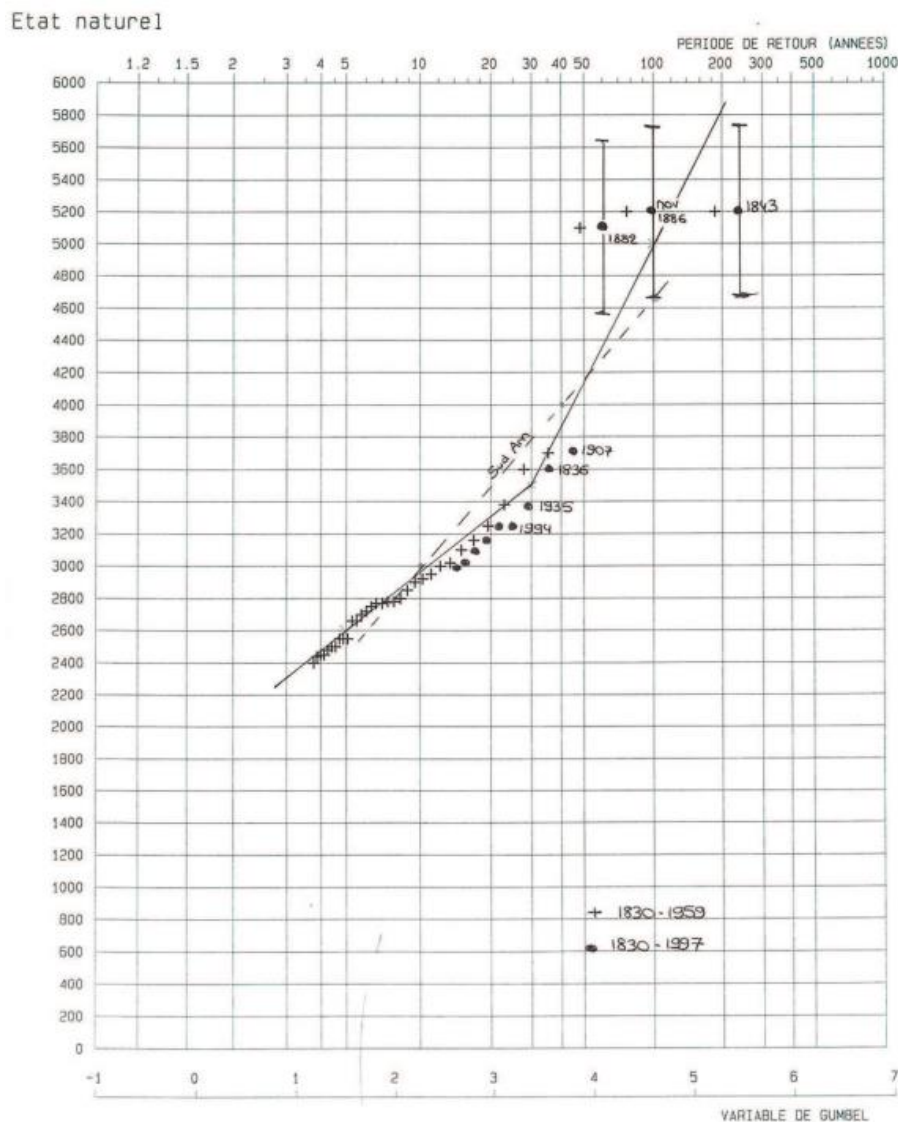


Figure 14 : Ajustement statistique des débits naturels à Mirabeau (1830-1959)
(source : SOGREAH, 2001)

La procédure de calage appliquée par SOGREAH n'est pas explicitement décrite dans son rapport d'étude. Ce dernier mentionne que « la forme générale du graphe nous conduit à admettre des cassures de l'ajustement », que « Pardé "espère" que ses estimations des trois grandes crues du XIXe siècle, entre 5 100 et 5 200 m³/s, sont valables à 10% près » et sur cette base l'étude conclue en indiquant que « l'ordre de grandeur de 5 000 m³/s [pour la crue centennale à Mirabeau] est satisfaisant et il est illusoire de prétendre annoncer une valeur plus affinée ». A partir de ces constats, il semblerait

que SOGREAH ait procédé à un ajustement manuel de son modèle statistique, en faisant en sorte que la courbe du modèle passe par certains points caractéristiques, notamment $Q_5 = 2\,600 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{30} = 3\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{100} = 5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$. Il est possible de voir que ces couples de valeurs ont été reportés manuellement sur le graphique A4-2 (p. 37 étude SOGREAH). En effet, l'approche historique de SOGREAH était de donner plus de poids au jugement de l'expert qu'à des régressions linéaires "aveugles" (B. Couvert, nov. 2021).

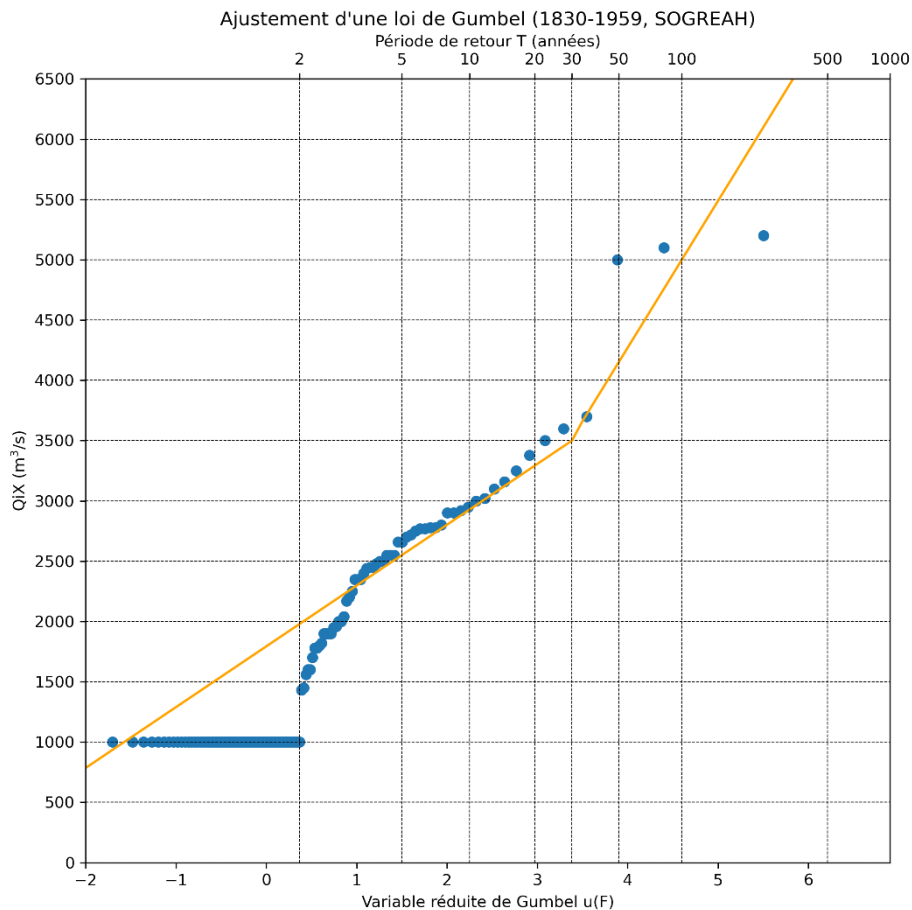


Figure 15 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés de SOGREAH pour la période 1830-1959 (reproduction des résultats de l'étude SOGREAH de 2001)

Les équations du modèle de SOGREAH pour la période 1830-1959 sont les suivantes :

$$\text{Pour } Q \leq Q_{30} \quad Q(u) = 504 * u + 1794$$

$$\text{Pour } Q \geq Q_{30} : Q(u) = 1217 * u - 600$$

La procédure de calage appliquée dans le cadre de la présente étude consiste d'abord à identifier visuellement à partir de quel débit s'opère un changement de tendance dans le nuage de points représentant les débits classés selon la variable de Gumbel, et ensuite à déterminer à l'aide de régressions linéaires les équations des deux droites représentant au mieux ces sous-ensembles de données. En pratique, un débit pivot de $3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$ a été retenu.

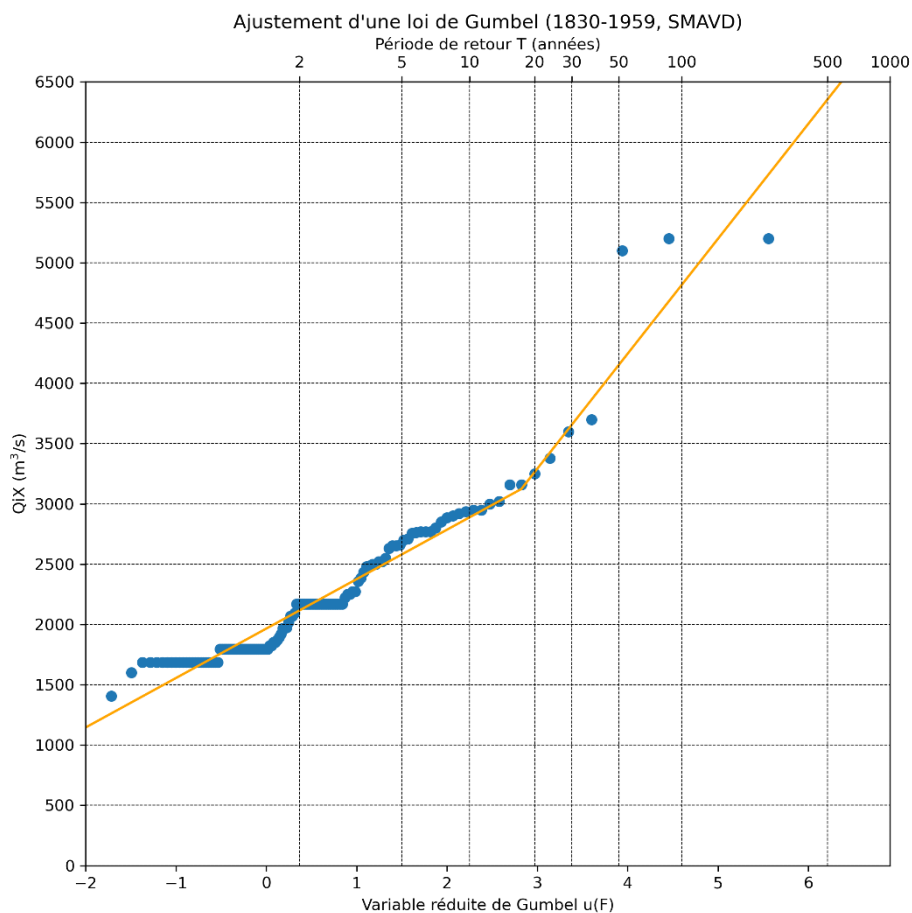


Figure 16 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés du SMAVD pour la période 1830-1959

Les équations du modèle du SMAVD pour la période 1830-1959 sont les suivantes :

$$\text{Pour } Q \leq 3160 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 410 * u + 1966$$

$$\text{Pour } Q \geq 3160 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 953 * u + 433$$

A partir des équations des modèles, il est possible de calculer les débits théoriques associés aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50, 100 années pour la période 1830-1959. Ceux-ci sont repris dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Comparaison des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau pour la période 1830-1959 estimés par le SMAVD et par SOGREAH

Période de retour	Débits (m ³ /s) avant aménagements (1830-1959)		
	SMAVD	SOGREAH	Différence
Q5	2600	2550	-50
Q10	2900	2950	50
Q20	3250	3300	50
Q30	3650	3500	-150
Q50	4150	4150	0
Q100	4800	5000	200

De manière générale, il ressort du tableau que les débits caractéristiques estimés par le SMAVD et SOGREAH sont globalement similaires sur la période 1830-1959. Les différences notables peuvent s'expliquer par l'utilisation de jeux de données légèrement différents et par l'application de méthodes de calage différentes (calage par régression linéaire et calage manuel, respectivement).

L'analyse du SMAVD aboutit à une crue centennale légèrement moins importante que celle estimée par SOGREAH (-180 m³/s, soit -3,7%) étant donné que la pente de la droite des débits les plus importants a été réévaluée à la baisse sur la base des données disponibles. L'estimation de la crue centennale par SOGREAH reste néanmoins cohérente. On retiendra donc également Q100 = 5 000 m³/s sur la période 1830-1959.

2.2.1.1. Période 1960-1997*¹

L'estimation des débits caractéristiques pour la période 1830-1997 est plus complexe étant donné que l'hydrologie de la Durance a été impactée par la construction à partir de 1960 des aménagements hydrauliques de la chaîne hydroélectrique Durance-Verdon exploitée par EDF. D'un point de vue statistique, ceci se traduit par le fait que les débits mesurés avant et après la mise en place des barrages n'appartiennent pas à la même population et doivent donc être décrits par deux modèles statistiques différents.

Compte tenu de l'absence d'homogénéité des débits sur la période 1830-1997, il n'est en théorie pas possible de procéder à une analyse portant sur l'intégralité de cette période temporelle. A contrario, les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau peuvent être estimés sur la période 1960-1997 qui peut être considérée comme étant homogène.

La figure suivante représente l'ajustement d'un modèle de Gumbel par régression linéaire aux débits maximaux instantanés observés entre 1960 et 1997. Il apparaît que le nuage de points est correctement représenté par le modèle linéaire pour l'ensemble des débits.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

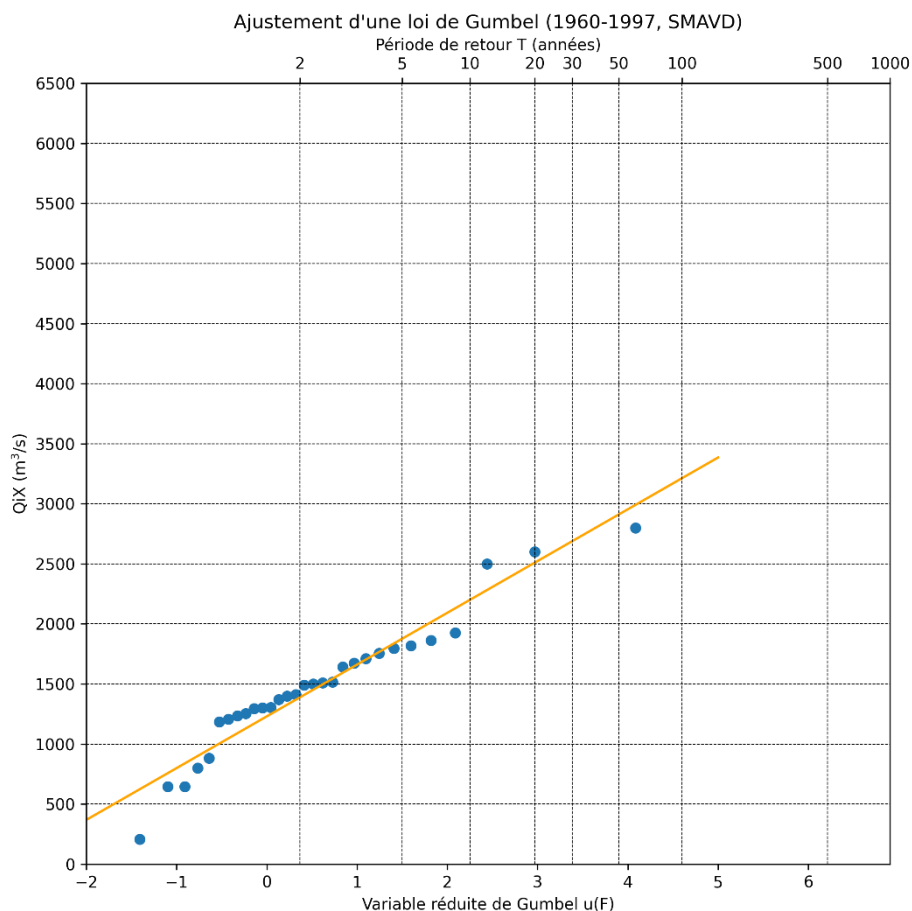


Figure 17 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-1997

Afin de pallier le manque de crues majeures sur la période 1960-1997, ce qui rend l'identification d'un débit pivot et l'extrapolation des débits pour les périodes de retour rares à exceptionnelles difficile, il est possible d'inclure dans le jeu de données les débits les plus importants s'étant réalisés avant 1960 ($Q > 3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$) en partant du principe que l'hydrologie de la Durance n'est pas influencée par les aménagements hydroélectriques au-delà d'un certain débit dans la rivière. En effet, les barrages sont mis en transparence lors des crues majeures et la rivière retrouve son régime naturel (non influencé). La période 1960-1997*¹ se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à $3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$ s'étant produites avant 1960.

La figure suivante représente les débits maximaux instantanés considérés pour la période 1960-1997* en fonction de la variable de Gumbel. Ce graphique résulte de l'assemblage de deux jeux de données différents : les points bleus correspondent aux débits observés sur la période 1960-1997 (identiques à ceux de la figure précédente), tandis que les points verts correspondent aux débits supérieurs à $3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$ observés sur la période 1830-1997 (les petits débits naturels ont été exclus car ils ne font pas partie de la même population que les petits débits influencés).

En prolongeant l'échantillon de données de la sorte, il devient possible d'identifier plus précisément le débit pivot à partir duquel les modèles divergent. Celui-ci se situe autour de $2\,050 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette valeur est inférieure au débit pivot du régime hydrologique naturel qui était situé autour de $3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$. Cette

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à $3\,160 \text{ m}^3/\text{s}$ s'étant produites avant 1960.

réduction est une conséquence directe de la mise en place de la chaîne hydroélectrique et n'indique en aucun cas que les processus hydrologiques du bassin versant ont évolué (le point pivot naturel se situe bien autour de 3 160 m³/s). Les débits compris entre 2 050 et 3 160 m³/s se situent dans une zone de transition.

Le graphique combiné montre que les débits les plus importants observés entre 1960 et 1997 (3 derniers points bleus) se situent dans cette zone de transition. En effet, ces débits se rapprochent de la droite du modèle des débits extrêmes, sans pour autant y coller parfaitement (débits légèrement inférieurs).

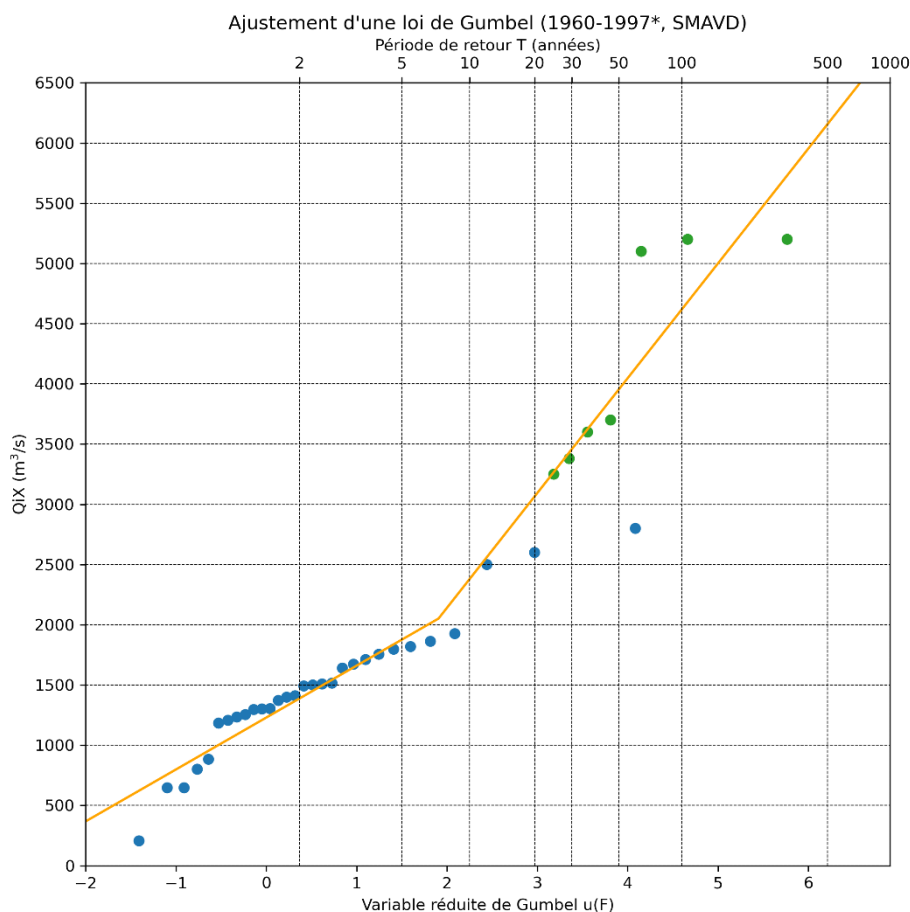


Figure 18 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-1997*

Les équations du modèle du SMAVD pour la période 1960-1997*¹ sont les suivantes :

$$\text{Pour } Q \leq 2050 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 431 * u + 1230$$

$$\text{Pour } Q \geq 2050 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 953 * u + 235$$

Les résultats de l'ajustement statistique réalisé par SOGREAH pour la période 1960-1997* sont représentés à la figure suivante. Il est à noter que la période dénommée 1830-1997 dans l'étude de

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

SOGREAH correspond à la période dénommée 1960-1997*¹ du SMAVD.

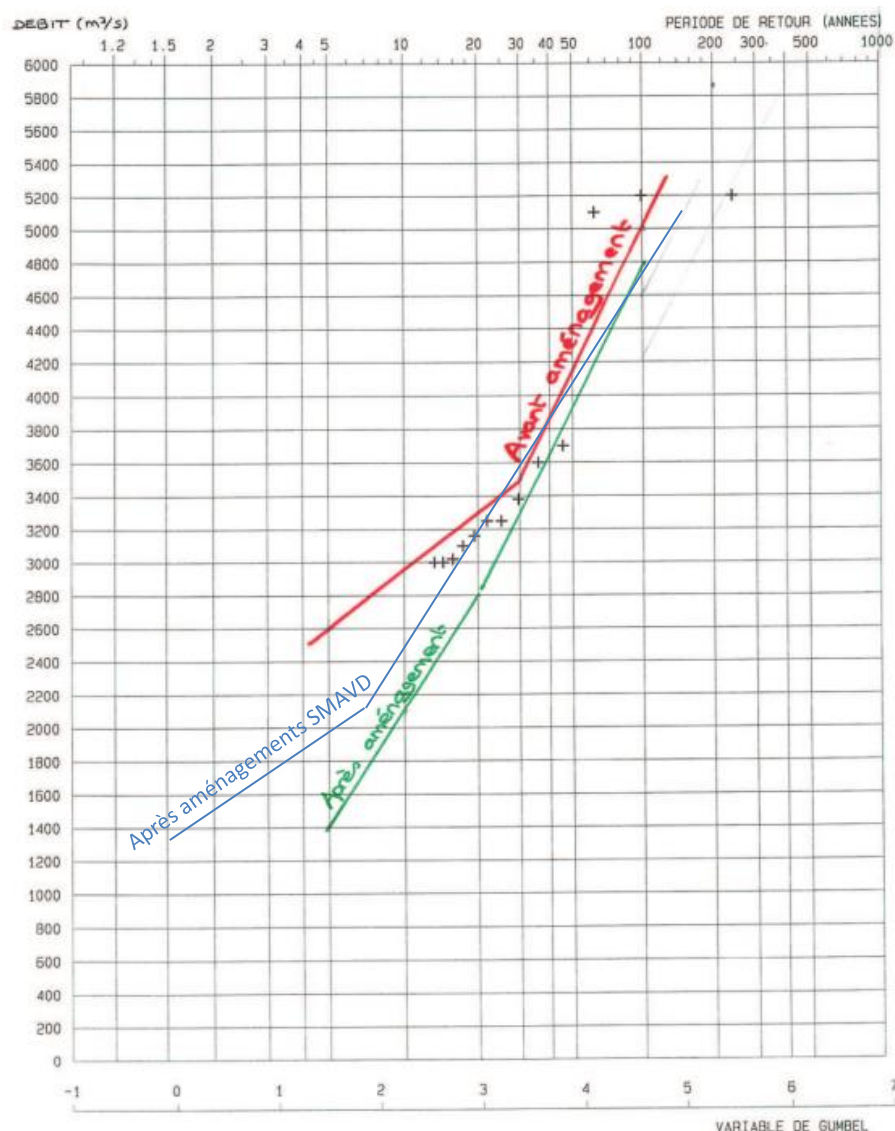


Figure 19 : Ajustements statistiques des débits à Mirabeau avant (1830-1959 SOGREAH, ligne rouge) et après (1830-1997 SOGREAH, ligne verte ; 1960-1997* SMAVD, ligne bleue) la construction des aménagements hydroélectriques (source : adaptation SOGREAH, 2001)

A partir des équations des modèles, il est possible de calculer les débits théoriques associés aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50, 100 années pour la période 1960-1997*. Ceux-ci sont repris dans le tableau suivant.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

Tableau 3 : Comparaison des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau pour la période 1960-1997*¹ estimés par le SMAVD et par SOGREAH

Période de retour	Débits (m ³ /s) après aménagements (1960-1997* SMAVD et 1830-1997 SOGREAH)		
	SMAVD	SOGREAH	Différence
Q5	1876	1400	476
Q10	2379	2100	279
Q20	3065	2800	265
Q30	3460	3300	160
Q50	3953	3950	3
Q100	4619	4800	-181

Le tableau met en évidence l'existence d'un écart assez important entre les débits fréquents estimés par le SMAVD et par SOGREAH. Cet écart s'amenuise progressivement pour disparaître complètement autour de la crue centennale où les courbes des deux modèles se croisent. L'analyse du SMAVD aboutit à une crue centennale à nouveau légèrement moins importante que celle estimée par SOGREAH (-181 m³/s, soit -3,8%) pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

2.2.1.1. Période 1960-2020*¹

Une analyse similaire à celle réalisée pour la période 1960-1997 a permis de mettre à jour les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau en tenant compte des crues s'étant produites après 1997. Pour ce faire, les débits maximaux instantanés mesurés à Cadarache depuis 1997 ont été intégrés au jeu de données initial.

La figure suivante représente l'ajustement d'un modèle de Gumbel par régression linéaire aux débits maximaux instantanés observés entre 1960 et 2020. A nouveau, il apparaît que le nuage de points est correctement représenté par le modèle linéaire pour l'ensemble des débits.

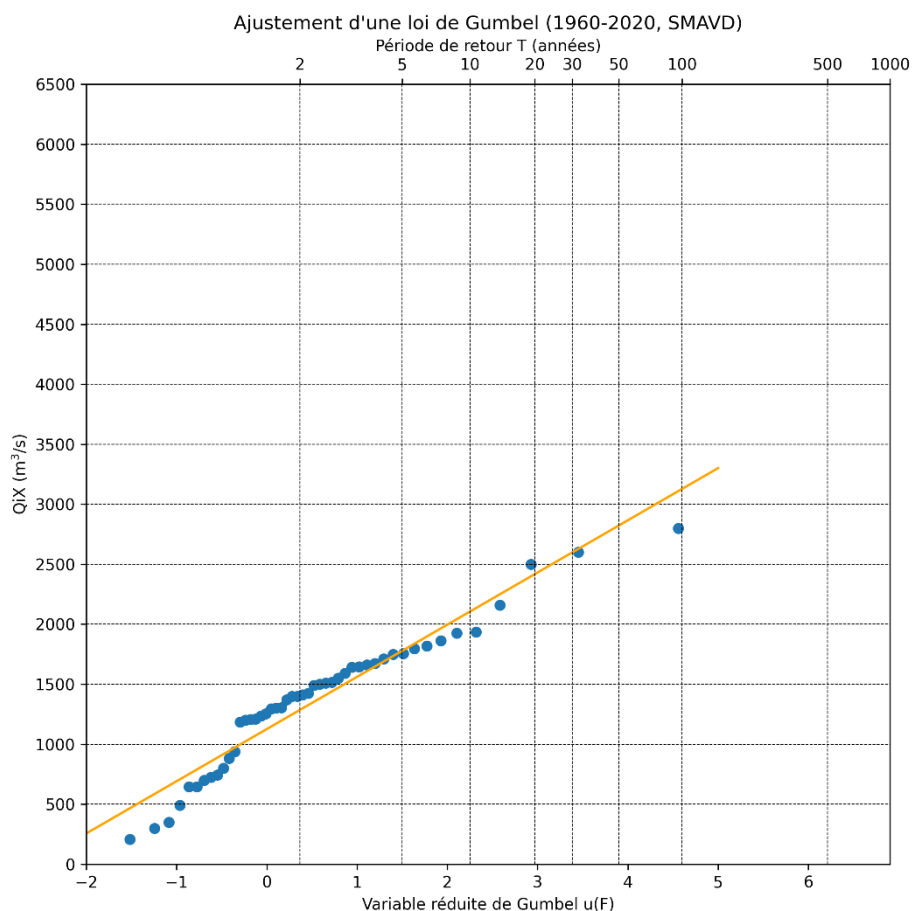


Figure 20 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-2020

La figure ci-dessous représente le jeu de données combiné contenant d'une part les débits observés durant la période 1960-2020 (points bleus) et les débits supérieurs à 3 160 m³/s observés sur l'ensemble de la période 1830-2020 (points verts). La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960. Le débit pivot se situe autour de 1 960 m³/s. L'interprétation de ce graphique est similaire à celle de la Figure 18.

¹ La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

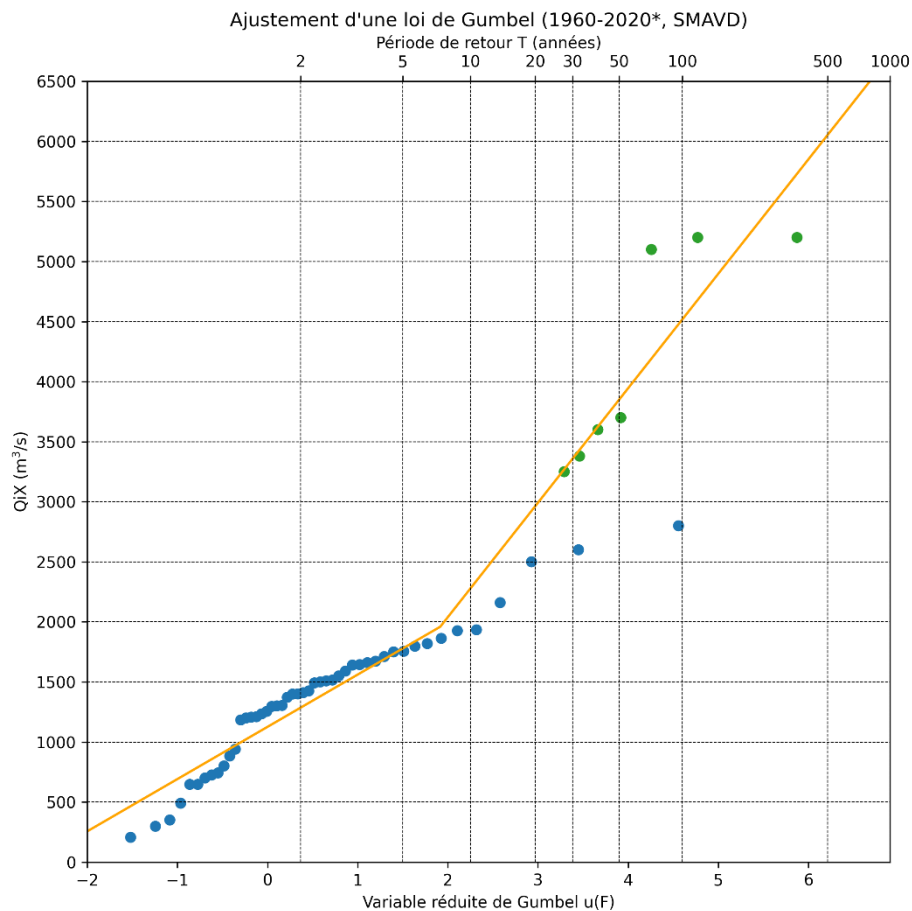


Figure 21 : Ajustement d'un modèle statistique aux débits maximaux instantanés pour la période 1960-2020*

Les équations du modèle du SMAVD pour la période 1960-2020*¹ sont les suivantes :

$$\text{Pour } Q \leq 1960 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 435 * u + 1126$$

$$\text{Pour } Q \geq 1960 \text{ m}^3/\text{s} : Q(u) = 953 * u + 133$$

A partir des équations du modèle, il est possible de calculer les débits théoriques associés aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50, 100 années pour la période 1960-2020*. Ceux-ci sont repris dans le tableau suivant.

¹ La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

Tableau 4 : Débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau pour la période 1960-2020* estimés par le SMAVD

Période de retour	Débits (m ³ /s) après aménagements (1960-2020* SMAVD et 1830-1997 SOGREAH)		
	SMAVD	SOGREAH	Différence
Q5	1778	1400	378
Q10	2278	2100	178
Q20	2964	2800	164
Q30	3358	3300	58
Q50	3852	3950	-98
Q100	4517	4800	-283

2.2.2. Evolution des débits caractéristiques

La figure suivante représente l'évolution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau entre 1830-1959, 1960-1997*¹ et 1960-2020*². Les modèles de Gumbel représentés aux Figure 16, Figure 18 et Figure 21 ont été superposés sur le même graphique. Pour rappel, ces modèles ont été calés sur les jeux de données reconstitués par le SMAVD à partir des informations présentes dans l'étude SOGREAH et des débits mesurés à la station de Cadarache.

A la lecture du graphique, il apparaît que les débits fréquents (à gauche du graphique) ont fortement diminués entre 1830-1959 et 1960-1997*. Les deux facteurs principaux permettant d'expliquer cette réduction sont d'une part l'absence de crues importantes depuis 1960 (voir Figure 8), et d'autre part l'aménagement de la chaîne hydroélectrique Durance-Verdon également à partir de 1960.

Des études ont montré que les variables climatiques (précipitations, températures) et hydrologiques (débits) évoluent en suivant des cycles multi-décennaux (Boé et Habets, 2014 ; Hall et al., 2014 ; Lun et al., 2020). Cette périodicité du climat est connue sous le terme « phénomène de Hurst ». Il a été observé que ces évolutions dépendent fortement de la localisation des stations de mesure et de la période de l'année considérée. Des conclusions similaires ont été formulées pour les précipitations extrêmes (Willems, 2013). Ces variations spatio-temporelles ont été décrites à l'échelle de l'Europe et de la France pour différents cours d'eau. A ce jour, aucune étude n'a été réalisée à l'échelle de la Durance et son bassin versant. Toutefois, les résultats des études synoptiques (à large échelle) permettent de mieux comprendre les évolutions observées à l'échelle du bassin versant de la Durance. Par exemple, Lun et al. (2020) ont identifié des périodes anormalement humides ou sèches dans 2021 chroniques de débits maximaux annuels correspondant à différents cours d'eau européen sur la période 1960-2010. Leur analyse montre que la fréquence des périodes humides ou sèches est 2 à 3 fois plus élevée qu'elle ne le serait par le fruit du hasard. Il apparaît que les stations présentant des périodes anormalement humides ou sèches sont réparties de manière homogène à l'échelle de l'Europe si l'on considère l'ensemble de la période 1960-2010. A contrario, des tendances évolutives

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

régionales se profilent lorsque l'analyse porte sur des périodes consécutives de 10 ans. Ceci met en évidence que les augmentations et diminutions des débits maximaux annuels dépendent fortement de la localisation géographique des stations de mesure et de la période temporelle considérée.

L'hydrologie du sud de l'Europe est caractérisée par la succession d'une période anormalement humide de 1960-1970 suivie d'une période anormalement sèche de 1970-2010 (Lun et al., 2020). Les facteurs pouvant expliquer cette évolution sont d'une part l'augmentation des températures et de l'évaporation (liée à l'activité des aérosols) induisant une diminution de l'humidité des sols à partir de 1970, et d'autre part la diminution des précipitations (liée à la migration vers le nord du courant-jet) également à partir de 1970. L'humidité des sols étant le paramètre qui influence le plus la genèse des crues dans le sud de l'Europe, ces dernières se sont faites plus rares à partir de 1970.

A notre connaissance, aucune étude n'a tenté d'estimer dans quelle mesure la diminution des débits maximaux annuels depuis 1960 peut être imputée à l'aménagement de la chaîne hydroélectrique ou aux changements climatiques en cours.

Les débits associés aux crues rares et extrêmes ont également diminué durant cette période. Cette baisse découle de l'absence de crue majeure qui aurait nécessité de recalculer la courbe des débits les plus importants (partie droite du graphique). En effet, l'ajout au jeu de données initial (1830-1959) de débits faibles uniquement a pour conséquence de décaler les points du graphique correspondant aux débits les plus importants vers la droite, sans pour autant modifier la pente du modèle statistique correspondant. Il s'agit donc d'une simple translation vers la droite de la droite modélisant les débits les plus importants. Par conséquent, les courbes bleue et orange sont parallèles en partie droite du graphique.

Les crues de la Durance ont été particulièrement faibles depuis 1997 (voir Figure 8). Dès lors, les débits caractéristiques à Mirabeau ont globalement diminué durant cette période. On observe également une translation vers la droite de la courbe des débits majeurs en raison de l'absence de crue importante associée à une chronique de données plus longue. Cette diminution des débits caractéristiques est moins marquée sur la période 1960-1997^{*1} (38 ans) que 1997-2020^{*2} (24 ans).

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

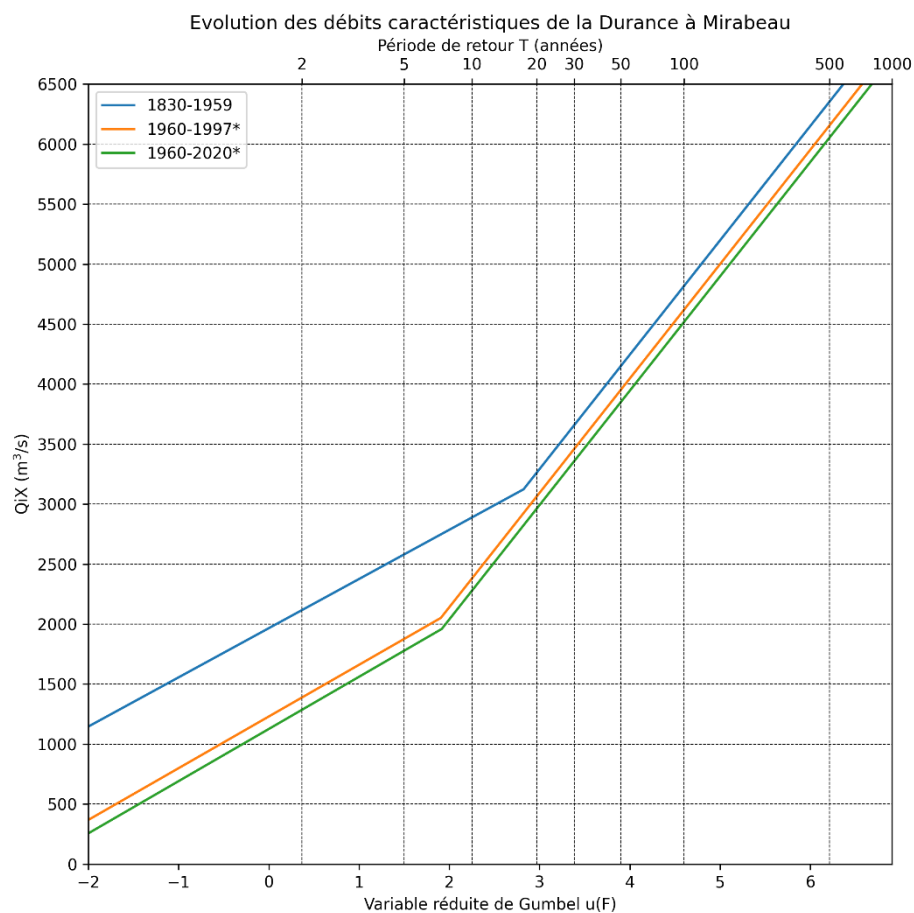


Figure 22 : Evolution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau entre 1830-1959, 1960-1997* et 1960-2020*

Les débits caractéristiques correspondant aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans pour les trois périodes temporelles étudiées sur la base du jeu de données établi dans le cadre de la présente étude sont repris dans le tableau suivant.

Tableau 5 : Evolution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau entre 1830-1959, 1960-1997*¹ et 1960-2020*² (résultats SMAVD)

Période de retour	Evolution des débits caractéristiques (m ³ /s) à Mirabeau		
	1830-1959 (naturel)	1960-1997* (aménagé)	1960-2020* (aménagé)
Q5	2581	1876	1778
Q10	2889	2379	2278
Q20	3264	3065	2964
Q30	3658	3460	3358
Q50	4152	3953	3852
Q100	4817	4619	4517

A titre de comparaison, les débits caractéristiques correspondant aux périodes de retour 10, 30 et 100 ans de l'Etude Globale sont repris au tableau suivant.

Tableau 6 : Evolution des débits caractéristiques de la Durance entre 1830-1959 et 1830-1997 (source : SOGREAH, 2001)

	Sup BV	Q10		Q30		Q100	
	km2	naturel m3/s	aménagé m3/s	naturel m3/s	aménagé m3/s	naturel m3/s	aménagé m3/s
L'Escale	6800	1700	1100	2300	2000	3300	3000
Manosque	9300	2350	1600	2900	2600	4200	4000
Cadarache	11700	2950	2300	3500	3100	5000	4800
Cavaillon		2950	2300	3500	3100	4600	4400
Bonpas	14200	2950	2300	3600	3200	4700	4500

La figure ci-dessous représente l'évolution des débits caractéristiques entre les périodes 1830-1959 et 1960-1997* ainsi que 1830-1959 et 1960-2020*.

Comme expliqué précédemment, les débits fréquents ont fortement diminués de 1830-1959 à 1960-1997* d'une part en raison des faibles débits qui ont été observés depuis 1960, d'autre part en raison de la mise en place de la chaîne hydroélectrique. La réduction est de l'ordre de 800 m³/s pour la crue quinquennale (Q5) et 600 m³/s pour la crue décennale (Q10). Pour les débits plus importants, l'absence de crue majeure a conduit à un abaissement généralisé d'environ 200 m³/s.

De 1960-1997* à 1960-2020*, l'ensemble des débits ont été réduits d'environ 100 m³/s.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

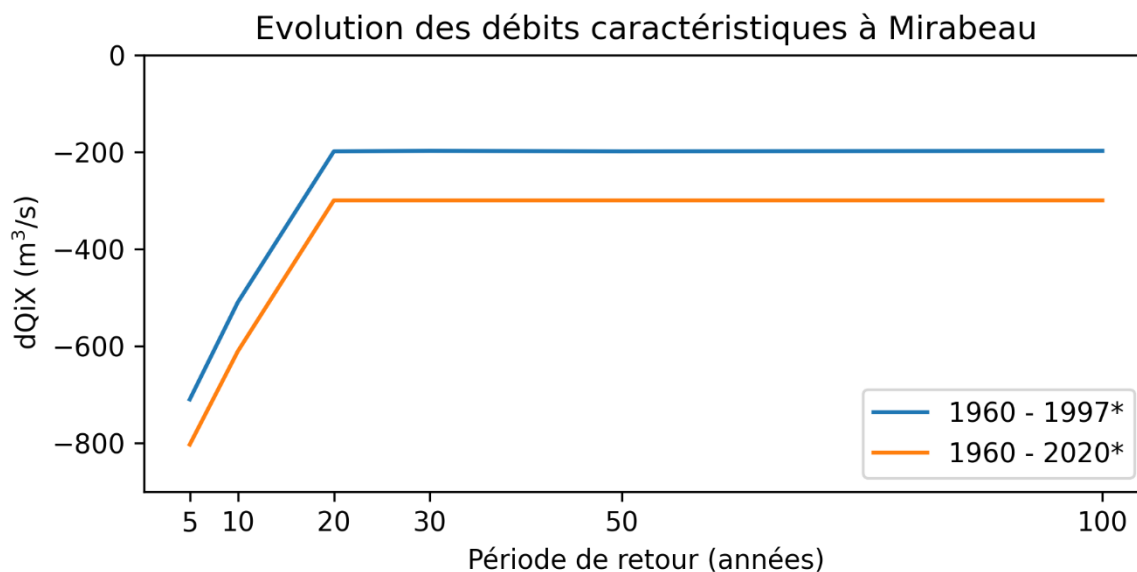


Figure 23 : Diminution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau de 1830-1959 à 1960-1997*¹ et de 1830-1959 à 1960-2020*²

Sur la base de ces résultats, il est possible de déterminer à quelle vitesse le débit centennal s'amenuise au cours du temps :

- De 1830-1959 à 1960-1997* : diminution de 5,3 m³/s/an
- De 1830-1959 à 1960-2020* : diminution de 4,9 m³/s/an
- De 1960-1997* à 1960-2020* : diminution de 4,2 m³/s/an

Ainsi, bien que le débit centennal décroisse au fil du temps, on constate une décélération de ce phénomène.

Les modèles statistiques permettent de déterminer à quelle période de retour correspond le débit « extrême », usuellement défini à 6 500 m³/s, en fonction de la période considérée.

Tableau 7 : Période de retour associée au débit « extrême » défini à 6 500 m³/s

Période de référence	Période de retour de $Q_{\text{extrême}} = 6\,500 \text{ m}^3/\text{s}$
1830 – 1959	580 années
1960 – 1997*	720 années
1960 – 2020*	800 années

Il ressort du tableau ci-dessus que le débit de 6 500 m³/s se produit à ce jour en moyenne une fois tous les 800 ans (Q800).

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

2.2.3. Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée afin de déterminer l'influence des débits les plus importants sur les débits caractéristiques de la Durance. A cette fin, les débits supérieurs à 3 160 m³/s ont été diminués de 10 et 20% et les débits caractéristiques ont été recalculés à partir de ces nouveaux jeux de données. Cette diminution permet d'illustrer l'influence hypothétique des grandes retenues de la Durance et du Verdon sur les crues naturelles les plus fortes.

Les résultats obtenus pour la période 1960-2020*¹ sont représentés à la figure suivante. Compte tenu de l'absence de débit supérieur à 3 160 m³/s au cours de la période 1960-2020 (voir Figure 17), seuls les débits caractéristiques associés à une période de retour supérieure à 10 ans sont impactés.

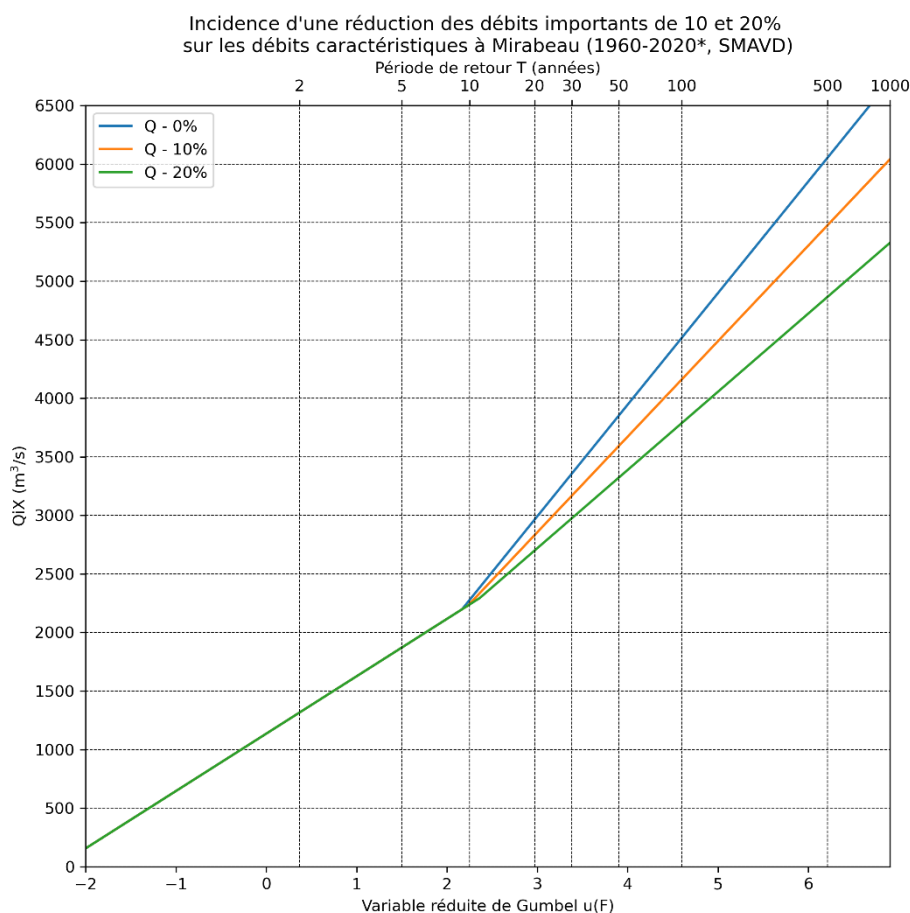


Figure 24 : Sensibilité des débits caractéristiques par rapport aux crues majeures

Les débits caractéristiques associés aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans pour la période 1960-2020* sont indiqués dans le tableau suivant. Les débits de référence (Q - 0%) sont comparés à ceux obtenus après diminution des débits de 10 et 20%. Les pourcentages de diminution des débits par rapport aux débits de référence sont également indiqués.

Il apparaît que l'écart entre les courbes se creuse à partir de la crue décennale : l'écart est approximativement deux fois plus important lorsque les débits sont réduits de 20% que de 10%. Il est

¹ La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

intéressant de constater qu'une réduction de 10 ou 20% des débits observés aboutit à une réduction moins importante des débits caractéristiques pour les crues d'occurrence inférieure à 100 ans. En ce qui concerne le débit centennal, ce dernier passe de 4 500 m³/s à 4 150 m³/s lorsque les débits sont minorés de 10%, et à 3 800 m³/s lorsque les débits sont minorés de 20%.

Tableau 8 : Evolution des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau sur la période 1960-2020*¹ en considérant une réduction de 0, 10 et 20 pourcents des débits supérieurs à 3 160 m³/s (résultats SMAVD)

Période de retour	Evolution des débits caractéristiques (m ³ /s) à Mirabeau				
	1960-2020* (Q - 0%)	1960-2020* (Q - 10%)	Ratio (%)	1960-2020* (Q - 20%)	Ratio (%)
Q5	1778	1778	0.0	1778	0.0
Q10	2278	2244	-1.5	2239	-1.7
Q20	2964	2831	-4.5	2700	-8.9
Q30	3358	3169	-5.6	2976	-11.4
Q50	3852	3592	-6.8	3322	-13.8
Q100	4517	4161	-7.9	3789	-16.1

2.2.4. Analyse des incertitudes

La fiabilité des modèles statistiques développés dans le présent rapport peut en partie être évaluée à travers la procédure de l'intervalle de confiance. En pratique, l'intervalle de confiance est la seule incertitude qui peut être estimée par une approche statistique. Néanmoins, il est important de garder à l'esprit que certaines incertitudes intrinsèques à la donnée hydrologique ne peuvent pas être estimées : évolution progressive ou spontanée de la courbe de tarage, absence d'informations historiques sur les débits, non-stationnarité des débits sur de longues périodes, inadéquation du modèle fréquentiel retenu, etc.

L'intervalle de confiance d'un débit donné peut être estimé par la formule suivante :

$$\Pr(x_{est,q} - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_{x_q} < X_q < x_{est,q} + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sigma_{x_q}) = 1 - \alpha$$

Avec :

$X_{est,q}$: débit de période de retour q estimé par le modèle de Gumbel

$Z_{1-\alpha/2}$: centile d'ordre $1-\alpha/2$ issu d'une loi normale standard

σ_{xq} : écart-type du jeu de données des débits

¹ La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

L'écart-type est quant à lui donné par la formule de Dick et Darwin :

$$\sigma_{x_q} = \frac{s}{\sqrt{n-1}} \sqrt{0.709923 + 0.11657u_q + 0.668725u_q^2}$$

Avec u_q la variable réduite de Gumbel associée à une période de retour q .

Les intervalles de confiance à 90% ont été déterminés pour les débits du jeu de données 1960 – 2020* ayant une période de retour inférieure à 20 ans. La valeur des débits associés à ces occurrences de crue a 9 chances sur 10 d'être incluse dans le domaine délimité par l'enveloppe des débits résultante. Cette approche n'a pas été répliquée pour les débits d'occurrence supérieure à 20 ans en raison du très faible nombre de données de l'échantillon correspondant.

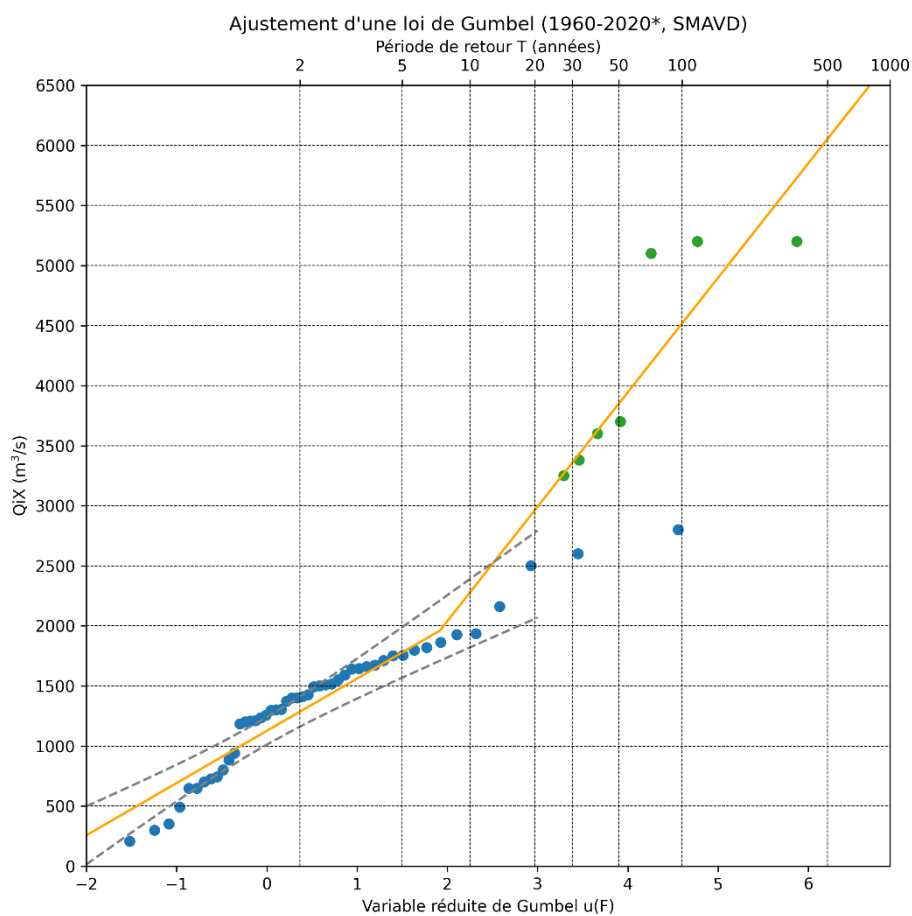


Figure 25 : Intervalle de confiance à 90% des débits statistiques associés à une période de retour inférieure à 20 ans calculés sur la période 1960 – 2020*

Les débits statistiques associés aux crues d'occurrence 2, 5, 10 et 20 ans, ainsi que les bornes inférieures et supérieures associées, sont indiqués dans le tableau suivant.

Période de retour (années)	Q - IC (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Q + IC (m ³ /s)
2	1160	1285	1410
5	1568	1779	1989
10	1821	2105	2389
20	2059	2418	2777

L'intervalle de confiance est de +/- 100 m³/s (+/- 10%) pour la crue biennale. Il grossit pour atteindre +/- 350 m³/s (+/- 15%) pour la crue vicennale.

Conclusion

L'Observatoire de la Durance a pour mission de suivre l'évolution des compartiments qui caractérisent le système durancien : physiques, biologiques, sociologiques, etc. L'objet de la présente étude, qui s'inscrit dans ce cadre, est de déterminer dans quelle mesure les débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau ont évolué au cours du dernier quart de siècle. En effet, leur estimation la plus récente correspond à celle réalisée par SOGREAH dans le cadre de l'Etude Globale de 2001 et concernait la période 1830-1997.

La présente étude a notamment permis de :

- Mettre à jour les valeurs mathématiques des débits caractéristiques correspondant aux périodes de retour 5, 10, 20, 30, 50 et 100 ans en considérant les crues s'étant produites après 1997 ;
- Décrire l'évolution des débits caractéristiques sur les périodes 1830-1959, 1960-1997^{*1} et 1960-2020^{*2} ;
- Estimer à quelle période de retour correspond le débit de la crue exceptionnelle fixée à 6 500 m³/s ;

Les données utilisées correspondent à celles de l'Etude Globale de SOGREAH (annexe p. 201 : « Tableau des débits maximums instantanés de la Durance ») auxquelles ont été ajoutés les débits disponibles à Cadarache depuis 1997. Une chronique de données couvrant la période 1830-2020 a ainsi été reconstituée tout en pointant les incertitudes associées.

Les débits caractéristiques déterminés en considérant les périodes 1830-1959 et 1960-1997* ont été comparés à leurs homologues de l'Etude Globale afin de voir si les méthodes de calages aboutissent à des résultats similaires. Dans l'ensemble, ces résultats ont permis de valider les débits de référence estimés par SOGREAH dans le cadre de l'Etude Globale de 2001, notamment le débit centennal correspondant à 5 000 m³/s. Cette comparaison a également permis de valider nos données et notre méthode de calage.

Les équations des modèles statistiques calés permettent de déterminer un débit en fonction d'une période de retour, et vice versa.

Les résultats de l'étude montrent que les valeurs mathématiques des débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau ont diminué de 1830-1959 à 1960-1997* et de 1960-1997* à 1960-2020*. Entre 1959 et 1997, les débits correspondant à Q5 et Q10 ont fortement diminué (-800 à -600 m³/s respectivement), tandis que les débits plus importants ont diminué dans une moindre mesure (-200 m³/s). Entre 1997 et 2020, l'ensemble des débits ont diminué de 100 m³/s.

Les facteurs principaux permettant d'expliquer la réduction des débits fréquents sont l'absence de crues importantes depuis 1960 d'une part et l'influence de la chaîne hydroélectrique Durance-Verdon également à partir de 1960 d'autre part. Toutefois, il n'est à ce jour pas possible de déterminer dans quelle mesure la diminution des débits fréquents observée depuis 1960 à Mirabeau doit être attribuée au climat ou aux aménagements hydroélectriques.

Les débits associés aux crues rares et extrêmes ont également diminué. Cette baisse découle de l'absence de crue très importante depuis 1960.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

La valeur numérique du débit centennal de la Durance à Mirabeau a été réévalué 4 800 m³/s sur la période 1830-1959, 4 600 m³/s sur la période 1960-1997*¹ et 4 500 m³/s sur la période 1960-2020*².

Le débit extrême de 6 500 m³/s correspondrait, dans l'état des connaissances, à une période de retour de 800 ans sur la période 1960-2020*.

En appliquant une diminution de 10 et 20% des débits supérieurs à 3 160 m³/s (toutes antérieures à 1960) afin d'introduire l'effet maximal des aménagements sur le laminage des plus fortes crues, on observe une réduction du débit centennal de 4 500 m³/s à 4 150 m³/s (Q-10%), et de 4 500 m³/s à 3 800 m³/s (Q-20%).

Au vu de l'ensemble de ces résultats, et malgré une évolution globalement à la baisse des débits caractéristiques de la Durance au cours du quart de siècle passé, il semble raisonnable et justifié de **conserver les débits de référence définis par SOGREAH dans le cadre de l'Etude Globale de 2001**. En effet, ces derniers avaient été retenus après une large concertation dans une logique sécuritaire. Ils font à ce titre office de référence pour l'ensemble des documents techniques et réglementaires. Leur maintien en l'état, en dehors d'éviter une multitude de mises à jour administratives, permet de conserver une marge vis-à-vis d'une augmentation « mécanique » qu'engendreraient la survenance de très fortes crues ou encore de maintenir une forme de prudence vis-à-vis des conséquences encore peu connues du réchauffement climatique sur les crues extrêmes.

¹ La période 1960-1997* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 1997 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

² La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

Tableau 9 : Débits caractéristiques de la Durance à Mirabeau mis à jour en considérant la période 1960-2020*¹(arrondis à 50 m³/s près) et débits caractéristiques retenus

Période de retour	Débits caractéristiques mis à jour (1960-2020*)	Débits caractéristiques retenus
Q5	1800	-
Q10	2300	2500
Q20	2950	-
Q30	3350	-
Q50	3850	4000
Q100	4500	5000

¹ La période 1960-2020* se réfère au jeu de données constitué des crues s'étant réalisées entre 1960 et 2020 et des crues supérieures à 3 160 m³/s s'étant produites avant 1960.

Bibliographie

Boé et Habets (2014). *Multi-decadal river flow variations in France.*

Hall et al. (2014). *Understanding flood regime changes in Europe: a state-of-the-art assessment.*

Lun et al. (2020). *Detecting Flood-Rich and Flood-Poor Periods in Annual Peak Discharges Across Europe.*

Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (2001). *Moyenne et Basse Durance Schéma d'Aménagement et de Gestion.*

Willems (2013). *Multidecadal oscillatory behaviour of rainfall extremes in Europe.*