



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'environnement OFEV

STATISTIQUE DES CRUES

RAPPORTS DES STATIONS

Guide de lecture

Contact : hydrologie@bafu.admin.ch

Table des matières

0	Introduction	2
1	Commentaires du chapitre 1 «Base de données»	2
2	Commentaires du chapitre 2 «Résultats des méthodes paramétriques»	6
2.1	Commentaires relatifs aux méthodes paramétriques	6
2.1.1	Méthode de Block Maximum (BLOCK)	6
2.1.2	Méthode de Peaks Over Threshold (POT)	7
2.1.3	Variantes utilisées	7
2.1.4	Périodes d'étude utilisées	10
2.2	Contenu du chapitre	11
2.2.1	Description du modèle et de ses données d'entrée	11
2.2.2	Tableau présentant l'estimation des valeurs paramétriques	13
2.2.3	Graphiques diagnostiques et leur évaluation	13
2.2.4	Tableau des niveaux de retour de HQ_T	17
2.2.5	Diagrammes de l'évolution des HQ_{100} calculés à l'aide de variantes non stationnaires	17
3	Commentaires du chapitre 3 «Comparaison des différents résultats»	19
4	Bibliographie	21
A	Annexe	22
I	Exemple de station présentant un point de rupture significatif	22
II	Exemples de graphiques diagnostiques	23

0 Introduction

Le présent guide vise à faciliter la lisibilité et la compréhension des rapports des stations de mesure sur la statistique des crues. Ces rapports servent à identifier les non-stationnarités dans les données, à fournir un aperçu des débits calculés au moyen de deux méthodes différentes pour des périodes de retour données (HQ_T) et à évaluer les écarts entre les données obtenues. Ces évaluations statistiques ne constituent toutefois que l'une des bases pour répondre à des questions pratiques, telle la détermination de débits de dimensionnement. D'autres connaissances sur les spécificités hydrologiques du bassin versant, des réflexions sur le pire scénario en matière de précipitations et de débits, etc. sont indispensables pour estimer le risque de crue. La division Hydrologie de l'OFEV préconise une manière de procéder «étayée par des arguments hydrologiques», telle qu'elle est décrite par Merz et Blöschl (2008, cités dans DWA 2012 :52).

1 Commentaires du chapitre 1 «Base de données»

Le chapitre 1 fournit des informations sur les séries de données disponibles pour la station de mesure considérée. Il présente la période couverte par les relevés, les éventuelles lacunes, l'influence anthropique sur le cours d'eau et le type de régime d'écoulement. Il indique également le débit maximum observé ainsi que la date à laquelle il a été mesuré.

Selon la méthode d'évaluation appliquée, les données sur les débits doivent présenter des résolutions différentes. L'OFEV dispose des maxima mensuels sous forme numérique depuis le début des relevés, mais les maxima journaliers n'existent sous cette forme que depuis 1974. Si la méthode de Block Maximum (BLOCK) peut se fonder sur les maxima mensuels, la méthode de Peaks Over Threshold (POT) utilise au contraire les maxima journaliers. Pour la plupart des stations, la période d'étude considérée dans la méthode BLOCK diffère dès lors de celle couverte par la méthode POT.

Les graphiques qui illustrent les séries chronologiques des maxima annuels, mensuels et journaliers (figures 1 à 4 du rapport de chaque station) donnent un premier aperçu des bases de données et peuvent fournir des indications sur la stationnarité des données.

Pour la méthode BLOCK, on extrait les maxima annuels (maximum mensuel le plus élevé de chaque année¹) de la série des maxima mensuels. Cette méthode n'utilise que les données mesurées à partir de l'installation d'un limnigraphe, c'est-à-dire depuis que le débit est mesuré en continu. Pour identifier d'éventuelles ruptures dans la série des maxima annuels, les données sont soumises à une analyse selon Bai et Perron (Bai et Perron 1998, cités dans KHR 2007).

Les points de rupture significatifs sont analysés sur la base de l'historique de la station ainsi que des influences anthropiques susceptibles de jouer un rôle dans le bassin versant. Dans la mesure où ils s'expliquent, compte tenu de l'intervalle de confiance du moment de leur survenue, la série de données sera subdivisée en conséquence. Les feuilles de résultat de la statistique des crues, qui sont publiées sur le site de l'OFEV, considèrent uniquement la période qui suit une éventuelle

1. L'indépendance des maxima annuels est vérifiée. Le cas échéant, ils sont corrigés (cf. 2.1.1)

subdivision de la série de données. Dans de tels cas, les rapports des stations contiennent une évaluation pour l'ensemble de la série chronologique des maxima annuels (cf. exemple à l'annexe A).

A titre d'exemple, la figure 1 reproduit les maxima annuels de la Muota à Ingenbohl. Un limniographe n'a été installé qu'au cours de l'année 1923, de sorte que la méthode BLOCK prend en compte seulement les données enregistrées à partir de 1924. Les valeurs des années 1917 à 1923 sont donc représentées en gris clair dans la figure 1. Appliquée à la série des maxima annuels dès 1924, l'analyse des ruptures met en évidence un point de rupture significatif entre 1997 et 1998 (intervalle de confiance 1987-2002). Pour cette période, les documents disponibles sur la station de mesure et le bassin versant ne font toutefois état d'aucune intervention à même de modifier le débit dans la mesure constatée. La mise en service d'une centrale hydroélectrique en 1970 n'a, à l'inverse, pas été considérée comme significative au terme de l'analyse des ruptures. La série des maxima annuels n'est donc pas subdivisée. Dans le cas de la Muota à Ingenbohl, la méthode BLOCK considère les données des années 1924 à 2015 (période d'étude totale) et 1974 à 2015 (période de comparaison). La méthode POT porte, quant à elle, sur la période d'étude POT (1974-2015) (cf. 2.1.4). (Un exemple de série comportant une subdivision figure dans l'annexe A.)

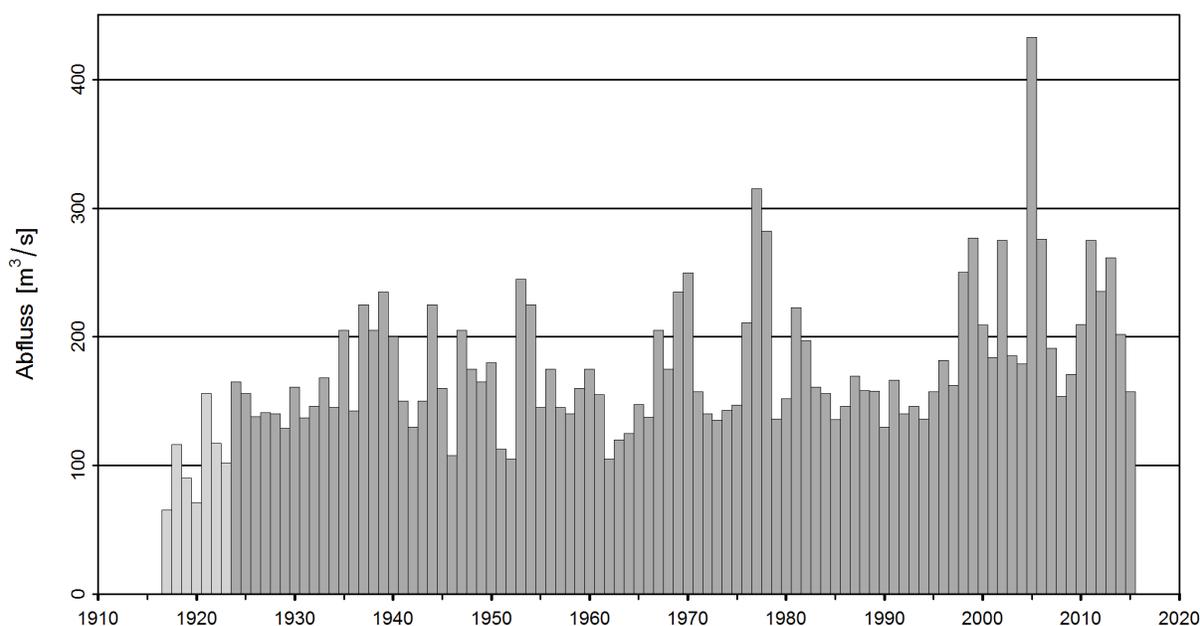


Figure 1 – Série chronologique des maxima annuels (Muota-Ingenbohl) [m^3/s] (1917 - 2015, gris clair : maxima non pris en compte dans la statistique ; gris foncé : maxima pris en compte)

Les illustrations de la série chronologique des maxima mensuels (figure 2), des variations saisonnières des maxima mensuels (figure 3) et de la série chronologique des maxima journaliers (figure 4) fournissent une image encore plus détaillée de la structure des données. Il est ainsi possible d'identifier des schémas spécifiques, par exemple ceux engendrés par la construction d'une centrale hydroélectrique. Les maxima mensuels de la Muota illustrent bien cette observation (figure 2) : la mise en service d'une centrale en 1970, mentionnée plus haut, n'engendre certes aucune rupture significative dans la série des maxima annuels. Dans la série des maxima mensuels, une nette hausse des valeurs les plus basses est cependant clairement perceptible à partir de 1970.

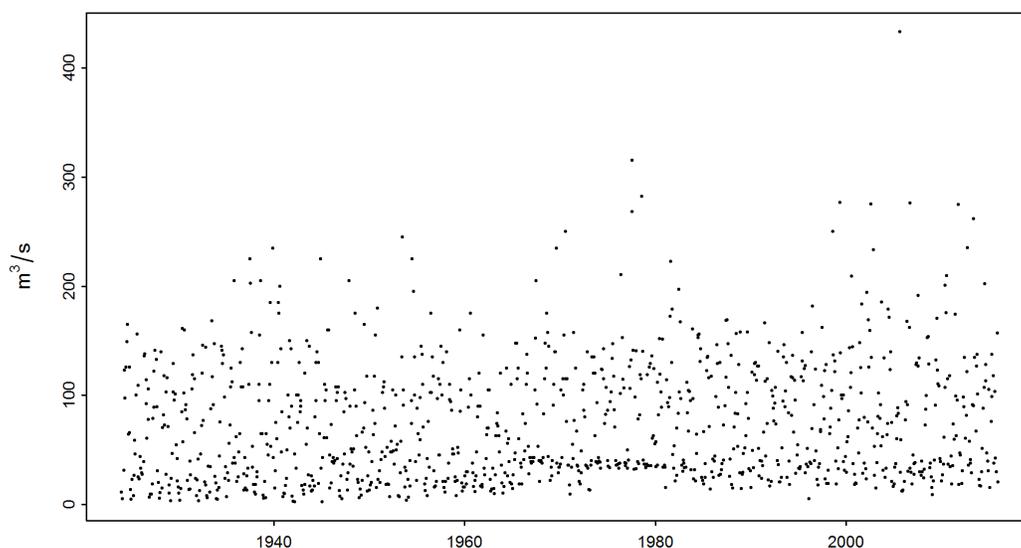


Figure 2 – Série chronologique des maxima mensuels (Muota-Ingenbohl) [m^3/s] (01.01.1924 - 31.12.2015)

La figure 3 du rapport de la station reproduit les données d'entrée ventilées par mois. Pour faciliter la lecture, les points correspondant aux données d'un même mois sont légèrement décalés («jitter», qui correspond à un décalage aléatoire volontaire, sans lien avec la date exacte de l'occurrence). L'illustration donne une impression de dispersion et peut refléter une certaine saisonnalité. La Muota présente en effet une saisonnalité relativement marquée (figure 3, à gauche), les maxima mensuels les plus élevés étant enregistrés durant l'été. Dans le cas de la Breggia (figure 3, à droite), la saisonnalité est nettement moins perceptible, bien que les valeurs les plus élevées aient également été mesurées en été et en automne.

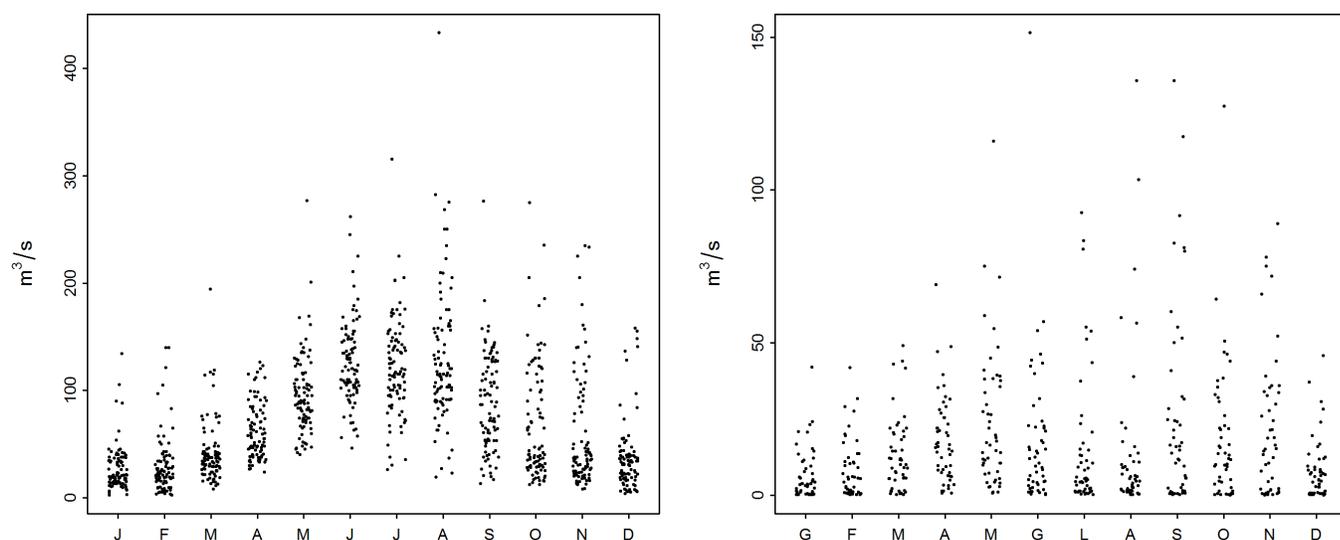


Figure 3 – Variations saisonnières des maxima mensuels de la Muota à Ingenbohl (à gauche) et de la Breggia à Chiasso (à droite) [m^3/s]

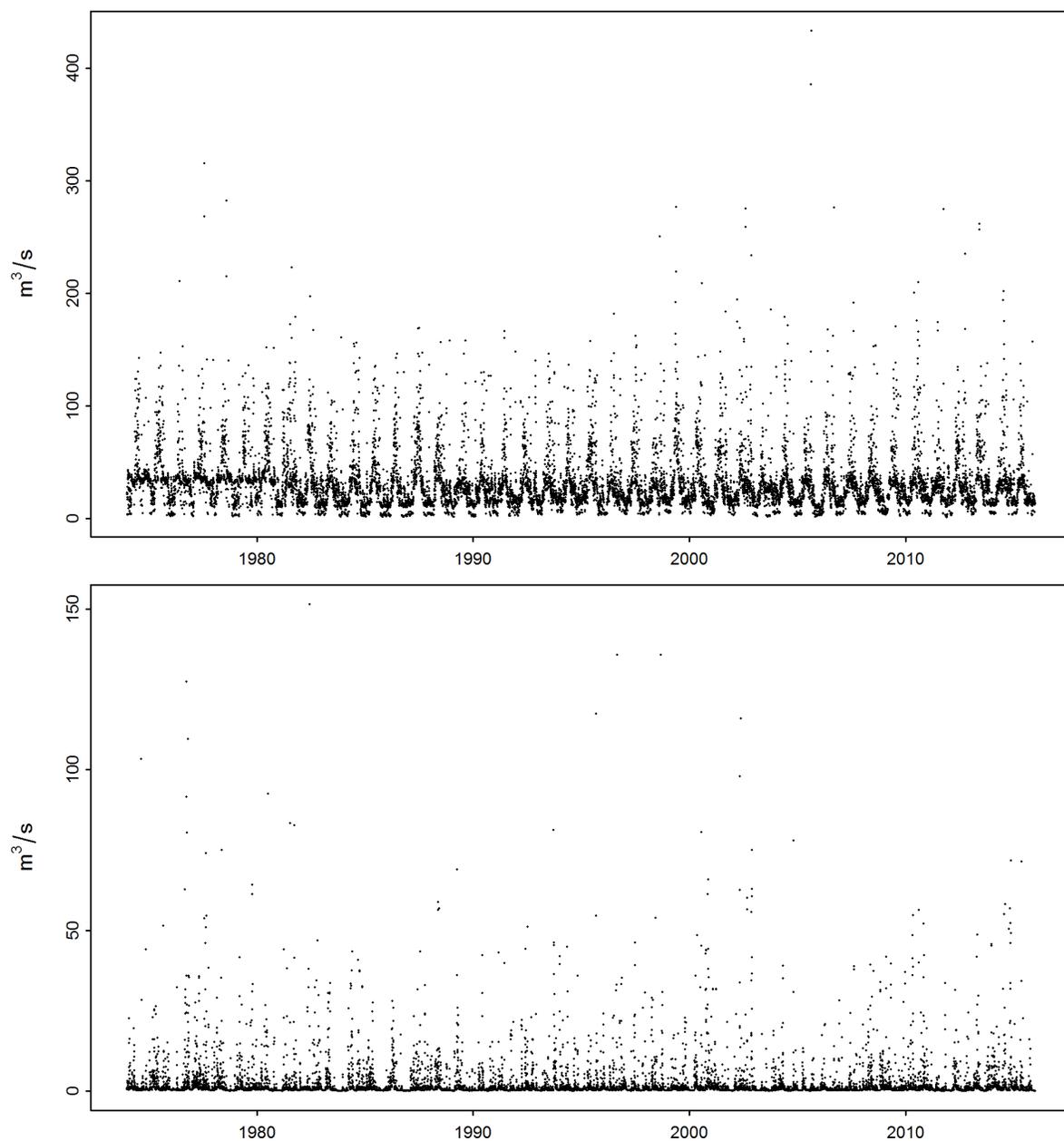


Figure 4 – Séries chronologiques des débits journaliers maximaux [m^3/s] (Muota-Ingenbohl en haut, Breggia-Chiasso en bas)

A titre d'exemple de la représentation des maxima journaliers, la figure 4 reproduit les séries chronologiques des stations de mesure du débit de Muota-Ingenbohl (en haut) et de Breggia-Chiasso (en bas). Au contraire de ceux de la Breggia, les maxima journaliers de la Muota affichent également une saisonnalité nettement perceptible.

2 Commentaires du chapitre 2 «Résultats des méthodes paramétriques»

2.1 Commentaires relatifs aux méthodes paramétriques

Le chapitre 2 du rapport de chaque station résume les résultats issus des deux méthodes paramétriques appliquées : Block Maximum (BLOCK) et Peaks Over Threshold (POT). Ces deux méthodes, qui se distinguent par leur manière d'identifier les valeurs extrêmes, se fondent sur les paramètres et les données d'entrée ci-après :

Méthode paramétrique	Paramètre	Données d'entrée
Block Maximum (BLOCK)	μ Paramètre de position	Maxima annuels
	σ Paramètre d'échelle	
	κ Paramètre de forme	
Peaks Over Threshold (POT)	λ Taux d'occurrences	Maxima journaliers
	σ Paramètre d'échelle ²	
	κ Paramètre de forme	

2.1.1 Méthode de Block Maximum (BLOCK)

Dans la méthode BLOCK, la valeur maximale enregistrée au cours d'un intervalle de temps (= bloc) correspond à la valeur extrême. Dans la présente évaluation, le bloc équivaut à une année. À l'instar de la méthode du DVWK (1979) appliquée jusqu'ici, elle considère donc les maxima annuels.³ La théorie des valeurs extrêmes montre que la distribution des probabilités de maxima annuels suit la loi d'extremum généralisée (Generalized Extreme Value Distribution, GEV). La GEV est décrite par le paramètre de position μ , le paramètre d'échelle σ et le paramètre de forme κ . La maximisation de la fonction logarithmique de vraisemblance, qui découle du modèle GEV, permet d'estimer ces trois paramètres (formule 1).

$$l(\mu, \sigma, \kappa) = -n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \kappa \frac{y_i - \mu}{\sigma}\right) - \sum_{i=1}^n \left(1 + \kappa \frac{y_i - \mu}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}} \quad (1)$$

y_i correspond au maximum annuel de l'année i . A l'aide des estimations obtenues pour μ , σ et κ , la formule 2 détermine ensuite la valeur annuelle T probable de HQ_T ($p = \frac{1}{T}$).

$$HQ_T = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\kappa} [1 - \{-\log(1-p)\}^{-\kappa}] & \text{si } \kappa \neq 0 \\ \mu - \sigma \log\{-\log(1-p)\} & \text{si } \kappa = 0 \end{cases} \quad (2)$$

2. La valeur numérique du paramètre d'échelle σ de la méthode POT n'est pas identique à celle du paramètre d'échelle σ de la méthode BLOCK.

3. Comme pour les maxima journaliers, l'indépendance des maxima annuels est vérifiée (cf. point 2.1.2). Lorsque deux maxima annuels ne remplissent pas le critère d'indépendance, la valeur inférieure est remplacée par le maximum mensuel indépendant le deuxième plus grand de l'année correspondante.

2.1.2 Méthode de Peaks Over Threshold (POT)

La méthode POT considère comme valeurs extrêmes celles qui dépassent une valeur seuil élevée u . Selon la théorie des valeurs extrêmes, lorsque la valeur u est élevée, le nombre des pics supérieurs à ce seuil correspond à la répartition du taux d'occurrences λ selon la loi de Poisson. Les amplitudes des dépassements du seuil respectent la distribution de la loi de Pareto généralisée (Generalized Pareto Distribution, GPD). Dans la méthode appliquée par l'OFEV, la série des maxima journaliers constitue la valeur d'entrée. La valeur seuil u est fixée à l'aide des méthodes d'ajustement graphiques «mean residual life plot» et «fitrange plot» (cf. Coles 2001). Les valeurs qui dépassent le seuil sont ensuite identifiées et la valeur des paramètres estimée par maximisation de la fonction logarithmique de vraisemblance, déduite à partir des distributions selon la loi de Poisson et de la loi de Pareto généralisée (formule 3).

$$l(\lambda, \sigma, \kappa) = n \log \lambda - \lambda t - n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \frac{\kappa w_i}{\sigma}\right) \quad (3)$$

w_i est un élément de la série des n dépassements de seuil observés. Le paramètre λ correspond au taux d'occurrences, c'est-à-dire au nombre de dépassements enregistrés au cours de l'intervalle de temps défini (une année). Dans la méthode POT, le paramètre σ correspond également au paramètre d'échelle, mais sa valeur numérique diffère de celle du paramètre σ de la méthode BLOCK. Compte tenu des estimations des paramètres, le débit HQ_T peut être calculé à l'aide de la formule 4.

$$HQ_T = u + \frac{\sigma}{\kappa} \left\{ \left(\frac{\lambda}{1-p} \right)^\kappa - 1 \right\}, T = \frac{1}{p} \quad (4)$$

La fonction logarithmique de vraisemblance (formule 3) ne peut être appliquée que dans l'hypothèse où les maxima journaliers sont indépendants les uns des autres. Comme il est très probable que des dépassements de seuil enregistrés durant plusieurs jours consécutifs correspondent à la même crue, les données sont au préalable corrigées de l'effet cluster. Beard (Cunnane 1989 cité dans Meylan et al. 2008) calcule l'intervalle de temps L entre deux événements indépendants dans un même bassin versant A en miles carrés (formule 5).

$$L = 5\text{jours} + \ln(A) \quad (5)$$

L'étude des débits appliquée par l'OFEV a montré que cette formule convient bien pour distinguer des événements indépendants, pour autant qu'un délai minimum de 11 jours soit respecté.

2.1.3 Variantes utilisées

Outre le modèle stationnaire, des variantes non stationnaires sont également testées dans les deux méthodes présentées ci-dessus. Dans le cas stationnaire, il est admis que tous les paramètres de la fonction de répartition demeurent constants sur toute la période étudiée. Dans le cas non stationnaire, ils sont modélisés en fonction du temps. Le recours à des paramètres non stationnaires implique que le HQ_T obtenu par calcul change au fil du temps. Dans l'ensemble de méthodes appliquées par l'OFEV, la non-stationnarité du paramètre de position μ et du paramètre d'échelle σ fait l'objet de tests. Le tableau 1 répertorie toutes les variantes de modèle étudiées par l'OFEV dans la méthode BLOCK ; le tableau 2 énumère celles étudiées dans la méthode POT.

Tableau 1 – Variantes utilisées dans la méthode BLOCK. μ paramètre de position (mu), σ paramètre d'échelle (sigma), κ paramètre de forme (kappa)

Variantes de la méthode BLOCK			
Nom	Description	Paramètres (t : année)	Nombre de paramètres
stat	Variante stationnaire	μ, σ, κ	3
mul	Tendance linéaire de μ	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma, \kappa$	4
muq	Tendance quadratique de μ	$\mu = a_1 + a_2 * t + a_3 * t^2, \sigma, \kappa$	5
sigl	Tendance linéaire de σ	$\mu, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	4
musigl	Tendance linéaire de μ et σ	$\mu = a_1 + a_2 * t, \sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	5
mujump	Evolution non continue de μ au moment t_0	$\mu = a_1 + a_2 * i, \sigma, \kappa, i = 0$ quand $t < t_0, i = 1$ quand $t \geq t_0$	4

Tableau 2 – Variantes utilisées dans la méthode POT. σ Paramètre d'échelle (sigma), κ paramètre de forme (kappa)

Variantes de la méthode POT			
Nom	Description	Paramètres (t : année)	Nombre de paramètres
stat	Variante stationnaire	σ, κ	2
sigl	Tendance linéaire de σ	$\sigma = b_1 + b_2 * t, \kappa$	3
sigjump	Evolution non continue de σ au moment t_0	$\sigma = b_1 + b_2 * i, \kappa, i = 0$ quand $t < t_0, i = 1$ quand $t \geq t_0$	3

Les variantes «mujump» et, respectivement, «sigjump» tiennent compte d'une évolution non continue de μ , respectivement de σ au moment t_0 et tentent ainsi de représenter des changements structurels abrupts dans le bassin versant, telle la construction d'un barrage. Le choix de t_0 intervient à l'aide d'un test de rupture selon Bai et Perron (Bai et Perron 1998, cités dans KHR 2007). Les informations disponibles sur d'éventuelles interventions sont toutefois décisives. Si de telles interventions sont survenues dans l'intervalle de confiance du point de rupture selon Bai et Perron, t_0 sera obligatoirement fixé à ce moment-là (cf. l'exemple de la Muota à Ingenbohl, p. 3). En cas de contradictions, celles-ci seront décrites dans le rapport de la station, qui motivera également la décision (cf. l'exemple de la Vispa à Visp, annexe A).

Un ordinogramme (figure 5) est utilisé afin de sélectionner la plus appropriée des différentes variantes. La statistique de déviance sert à évaluer l'adéquation d'un modèle pour un certain ensemble de données, car elle permet de vérifier si les variantes de ce modèle diffèrent de manière significative (cf. Coles 2001). Cette statistique ne peut toutefois pas être appliquée pour comparer des variantes non imbriquées. Si les modèles présentent le même nombre de paramètres («mul» et «mujump», p. ex.), il convient de comparer la vraisemblance logarithmique. Lorsque cette possibilité est également exclue (dans le cas de «muq» et de «mujump», p. ex.), le choix de la variante se fonde sur des considérations hydrologiques (si de l'eau est p. ex. déviée du bassin versant à partir d'un moment donné, la variante «mujump» est probablement plus plausible que la variante «muq»). Si le choix se porte sur un modèle non stationnaire, il importe d'examiner dans tous les cas si ce choix est plausible du point de vue hydrologique et si l'adéquation du modèle est probante. Ces critères sont toutefois très subjectifs. Le choix du modèle est brièvement décrit dans les rapports.

Ordinogramme: Sélection de la variante stationnaire ou non stationnaire la plus pertinente

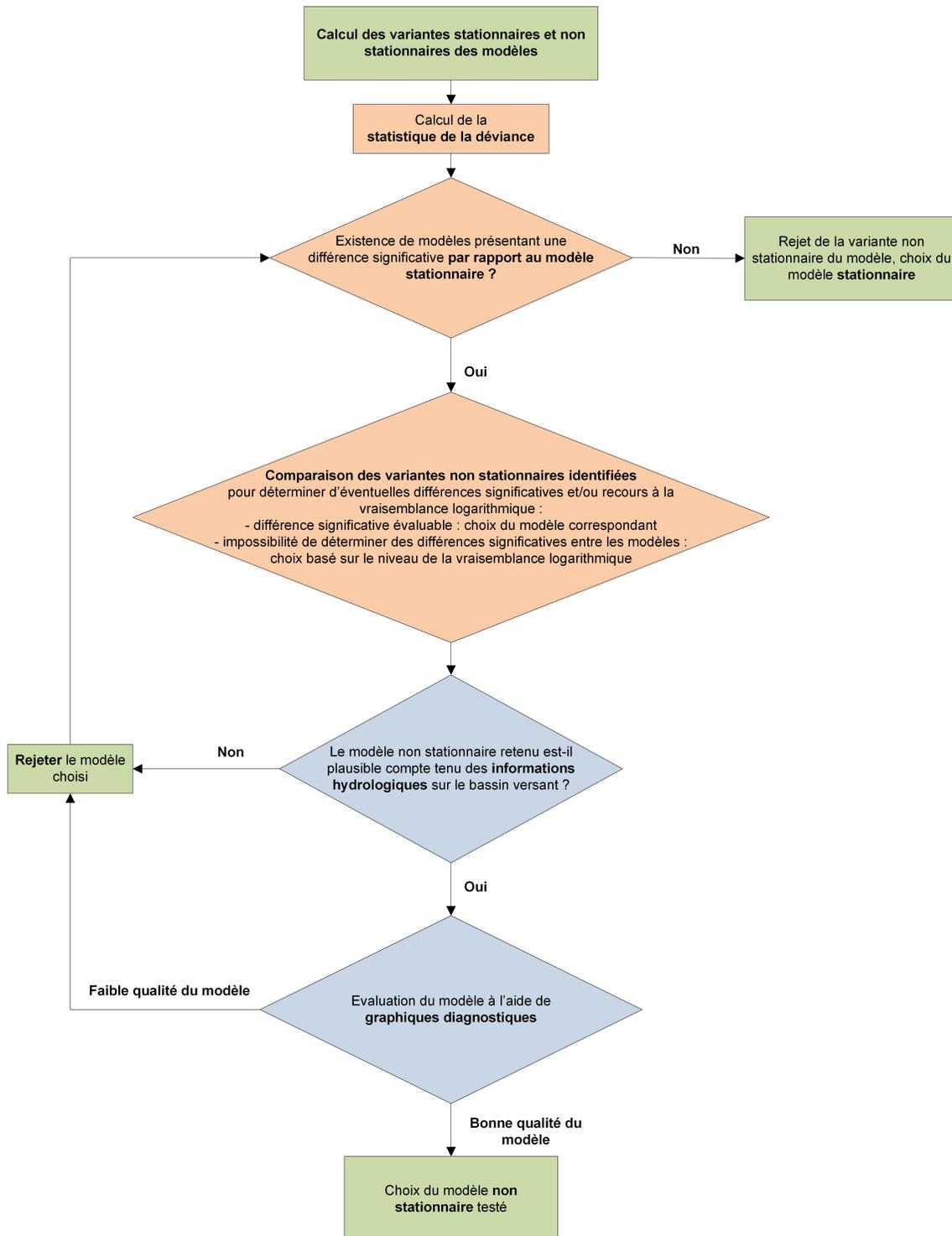


Figure 5 – Procédure de sélection de la variante stationnaire ou non stationnaire la plus pertinente.

2.1.4 Périodes d'étude utilisées

Selon la situation, une à trois (au maximum) périodes d'étude sont considérées dans les deux méthodes (BLOCK et POT).

Méthode BLOCK :

Période d'étude		Application
Période d'étude totale	Données collectées à partir de l'installation d'un limnigraphe resp. de l'enregistrement du débit en continu	Toujours
Période de comparaison	Données à partir de l'existence de maxima journaliers au format numérique	En cas d'écart avec la période étudiée précédemment
Période d'étude à partir du point de rupture	Données à partir d'un point de rupture significatif, ayant conduit à subdiviser une série chronologique	Lors de l'existence d'un point de rupture significatif

Méthode POT :

Période d'étude		Application
Période d'étude POT ⁴	Données à partir de l'existence de maxima journaliers au format numérique	Toujours
Période d'étude à partir du point de rupture	Données à partir d'un point de rupture significatif, ayant conduit à subdiviser une série chronologique	Lors de l'existence d'un point de rupture significatif

La période d'étude à partir du point de rupture correspond à la période qui est utilisée pour établir les feuilles de résultat de la statistique des crues sur le site Internet de l'OFEV, lorsqu'une subdivision de la série chronologique s'avère nécessaire.

Comme l'OFEV dispose de maxima journaliers au format numérique seulement depuis 1974, les analyses de la méthode POT portent le plus souvent sur une période plus brève que celles de la méthode BLOCK. La période d'étude à partir de l'existence des maxima journaliers au format numérique dans la méthode BLOCK (période de comparaison) sert à comparer directement les résultats de cette méthode avec ceux de la méthode POT (c'est-à-dire qu'il est possible d'exclure que d'éventuelles différences résultent de l'écart entre les périodes d'étude considérées).

4. Correspond à la période de comparaison de la méthode BLOCK.

2.2 Contenu du chapitre

Les deux méthodes paramétriques (BLOCK et POT) sont décrites dans deux sous-chapitres distincts (2.1 et 2.2) du rapport de la station. Ces sous-chapitres sont tous deux subdivisés comme suit :

- description du modèle et de ses données d'entrée
- tableau avec une estimation des valeurs paramétriques
- graphiques diagnostiques et leur évaluation
- tableau des niveaux de retour HQ_T
- diagrammes présentant l'évolution du débit HQ_{100} calculé à l'aide des variantes non stationnaires.

2.2.1 Description du modèle et de ses données d'entrée

En guise d'introduction, le rapport précise quel modèle et quelles données ont été utilisés. Dans la mesure où elles sont disponibles, il spécifie également les diverses périodes d'étude.

Les données d'entrée disponibles sont reproduites dans les figures 1 à 4 du chapitre 1 du rapport de la station (cf. chapitre 1). Le chapitre 2 comprend quant à lui quelques illustrations complémentaires de la base de données qui correspondent à la méthode appliquée. Le rapport donne ensuite une description du modèle stationnaire (point 2.x.x.a), puis celle des variantes non stationnaires (point 2.x.x.b). Pour ces dernières, le rapport n'indique que les résultats de la variante qui a été jugée la plus pertinente. Il motive aussi brièvement le choix de la variante retenue.

Pour procéder aux calculs selon la méthode POT, il importe de fixer un seuil u . Cette fixation s'opère à l'aide de la méthode graphique «mean residual life plot». Le diagramme en question est reproduit à l'annexe A du rapport. Pour les fondements théoriques, nous renvoyons à Coles (2001). Dans la pratique, il n'est pas toujours facile d'interpréter un tel diagramme. Cette interprétation a pour objectif d'identifier la valeur la plus basse du seuil u à partir de laquelle le diagramme devient plus ou moins linéaire, l'intervalle de confiance à 95 % (traitillé) devant également être pris en compte. Dans le cas de la Muota, le seuil u est fixé à $130 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 6).

Le choix de u peut être vérifié à l'aide d'autres méthodes («fit range plot», p. ex.). Elles ne figurent toutefois pas dans le rapport de la station.

Pour se faire une idée des dépassements de seuil qui seront finalement utilisés dans la méthode POT, ceux-ci sont mis en regard de la base de données des maxima journaliers dans les premières illustrations du sous-chapitre 2.2.1 ou, respectivement, 2.2.2 du rapport de la station. La légende de cette figure spécifie le nombre d'événements extrêmes. Relevons qu'il s'agit là de valeurs corrigées de l'effet cluster, c'est-à-dire qu'elles correspondent à des événements indépendants. Dans le cas de la Muota, l'analyse identifie 91 dépassements (figure 7), soit un nombre de valeurs $2\frac{1}{3}$ fois plus élevé que celui utilisé dans la méthode BLOCK pour la période de comparaison (1974-2015). Dans la littérature consacrée à l'hydrologie, les auteurs admettent que les résultats s'améliorent par rapport à la méthode BLOCK à partir du moment où les données d'entrée sont multipliées par deux environ (cf. Meylan 2008).

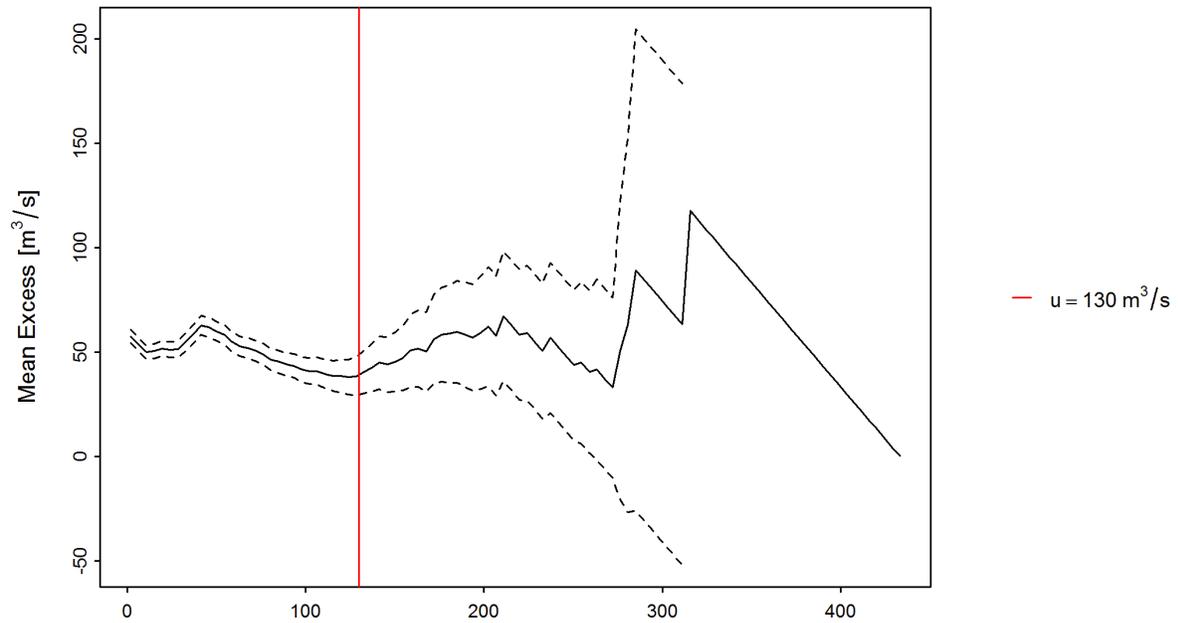


Figure 6 – «mean residual life plot» avec le seuil u (ligne rouge), dépassement moyen (ligne noire), intervalle de confiance à 95%-Konfidenzintervall (traitillés)

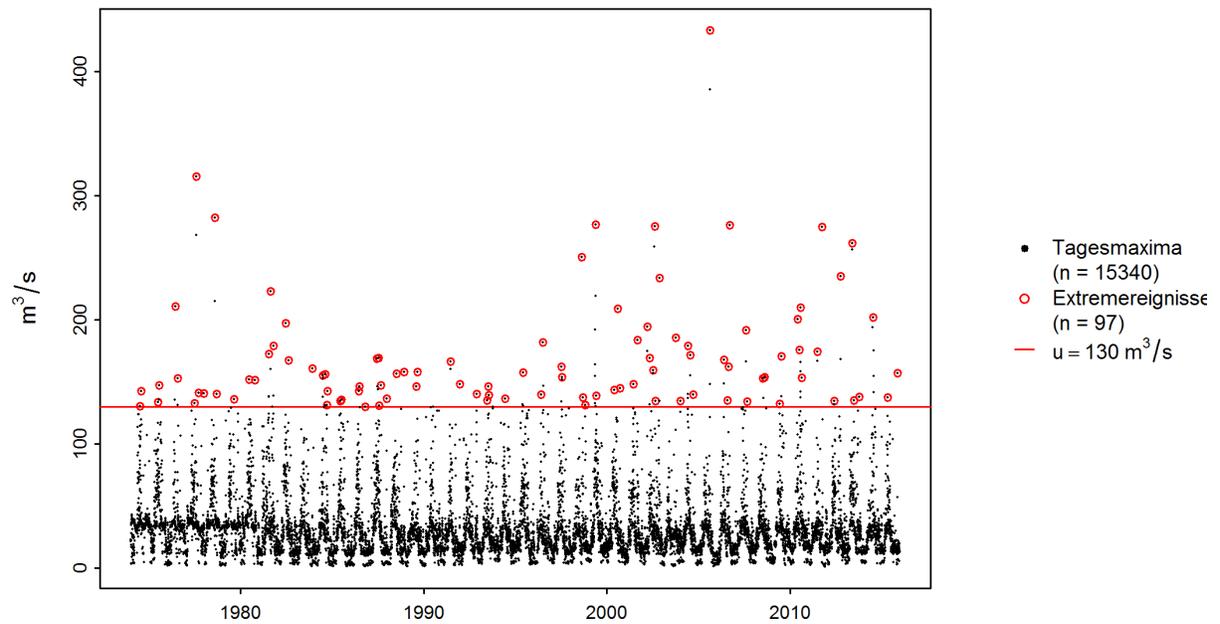


Figure 7 – Juxtaposition des maxima journaliers (en noir) et des valeurs extrêmes utilisées dans la méthode POT (en rouge) (Muota-Ingenbohl)

2.2.2 Tableau présentant l'estimation des valeurs paramétriques

Pour chaque variante, un tableau indique l'estimation des paramètres de distribution ainsi que le nombre des valeurs utilisées pour les calculer. Dans le cas de la méthode POT, le tableau comprend de plus la valeur seuil u utilisée (tableau 3 et tableau 4).

Tableau 3 – Nombre de valeurs utilisées et estimation des valeurs paramétriques dans la méthode BLOCK pour toute la durée d'évaluation 1924-2015, à l'exemple de la Muota à Ingenbohl :

Nombre de valeurs n	Paramètre de position $\hat{\mu}$	Paramètre d'échelle $\hat{\sigma}$	Paramètre de forme $\hat{\kappa}$
89	154.08	33.76	0.1332

Tableau 4 – Valeur seuil utilisée, nombre de valeurs et estimation des valeurs paramétriques dans la variante «sigjump» de la méthode POT, à l'exemple de la Muota à Ingenbohl :

Valeur seuil u	Nombre de Valeurs n	Taux d'occurrences $\hat{\lambda}$	Paramètre d'échelle $\hat{\sigma}$		Paramètre de forme $\hat{\kappa}$
			b_1	b_2	
130 m ³ /s	97	2.31	23.68	23.54	0.1462

Les valeurs a_1 et a_2 (paramètre de position) et/ou b_1 et b_2 (paramètre d'échelle) indiquées dans les variantes non stationnaires se réfèrent aux formules de non-stationnarité précisées dans le tableau 1 (BLOCK) et le tableau 2 (POT). Dans l'exemple ci-dessus (tableau 4), le paramètre d'échelle a les valeurs suivantes : $\hat{\sigma} = b_1$ pour la période avant le point de rupture ($t < t_0$) et $\hat{\sigma} = b_1 + b_2$ pour la période après le point de rupture ($t \geq t_0$; cf. tableau 2).

2.2.3 Graphiques diagnostiques et leur évaluation

La qualité du modèle appliqué dans les méthodes paramétriques BLOCK et POT est vérifiée à l'aide de graphiques diagnostiques. Dans le cas des variantes stationnaires, ceux-ci comprennent quatre diagrammes partiels :

- Le *Probability Plot* et le *Quantile Plot* montrent dans quelle mesure le modèle (*probabilité théorique* resp. *quantiles théoriques*) correspond aux données observées (*probabilité empirique* resp. *quantiles empiriques*). Plus les données sont proches de la première bissectrice ($Y = X$, ligne rouge), plus la qualité du modèle est grande (figure 8, en haut). Le Probability Plot compare la fréquence théorique totale et la fonction de répartition théorique cumulée. Le Quantile Plot compare les quantiles des débits observés et ceux des débits calculés à l'aide du modèle. Les quantiles théoriques étant calculés à partir de la fonction inverse de la fonction de répartition, les axes du Quantile Plot sont permutés afin de faciliter la comparaison visuelle directe avec le Probability Plot correspondant. Bien qu'ils utilisent une échelle différente, les deux diagrammes conduisent à la même conclusion. Cette manière de procéder permet de mieux évaluer la qualité du modèle. En effet, les faiblesses mises en évidence par le Probability Plot dans le domaine des valeurs extrêmes sont compensées par le Quantile Plot (cf. Coles 2001, pp. 58-59).

- Le *Return Level Plot* représente les débits pour différentes périodes de retour (figure 8, en bas à gauche). La courbe rouge correspond à l'estimation la plus précise, tandis que les courbes bleues délimitent l'intervalle de confiance à 95 %. Les points sont des observations auxquelles ont été attribuées des périodes de retour empiriques. La comparaison permet de tirer d'autres conclusions quant à la qualité du modèle.
- Le *Density Plot* présente un histogramme des valeurs extrêmes (colonnes : classes de valeurs ; points : valeurs isolées) ainsi que la fonction de répartition adaptée aux données empiriques (courbe en rouge) (figure 8, en bas à droite). La hauteur des colonnes devrait correspondre au mieux au tracé de la courbe. Le choix de la taille des classes de chacune des colonnes détermine toutefois nettement l'impression de pertinence que donne la courbe adaptée aux données empiriques.

La figure 8 du présent guide de lecture présente les graphiques diagnostiques établis pour la variante stationnaire de la méthode BLOCK appliquée à la station de mesure Muota-Ingenbohl. Le Probability Plot dénote une bonne adéquation globale du modèle aux observations. Le Quantile Plot montre cependant que le modèle ne parvient à représenter que relativement mal la pointe de débit la plus élevée qui a été mesurée. Cette discordance transparait également dans le Return Level Plot, où la valeur observée la plus élevée est relativement éloignée de la courbe rouge, mais se situe néanmoins dans l'intervalle de confiance. Le Density Plot débouche, quant à lui, sur d'assez bons résultats. Dans cet exemple, il est possible de conclure à une assez bonne qualité du modèle.

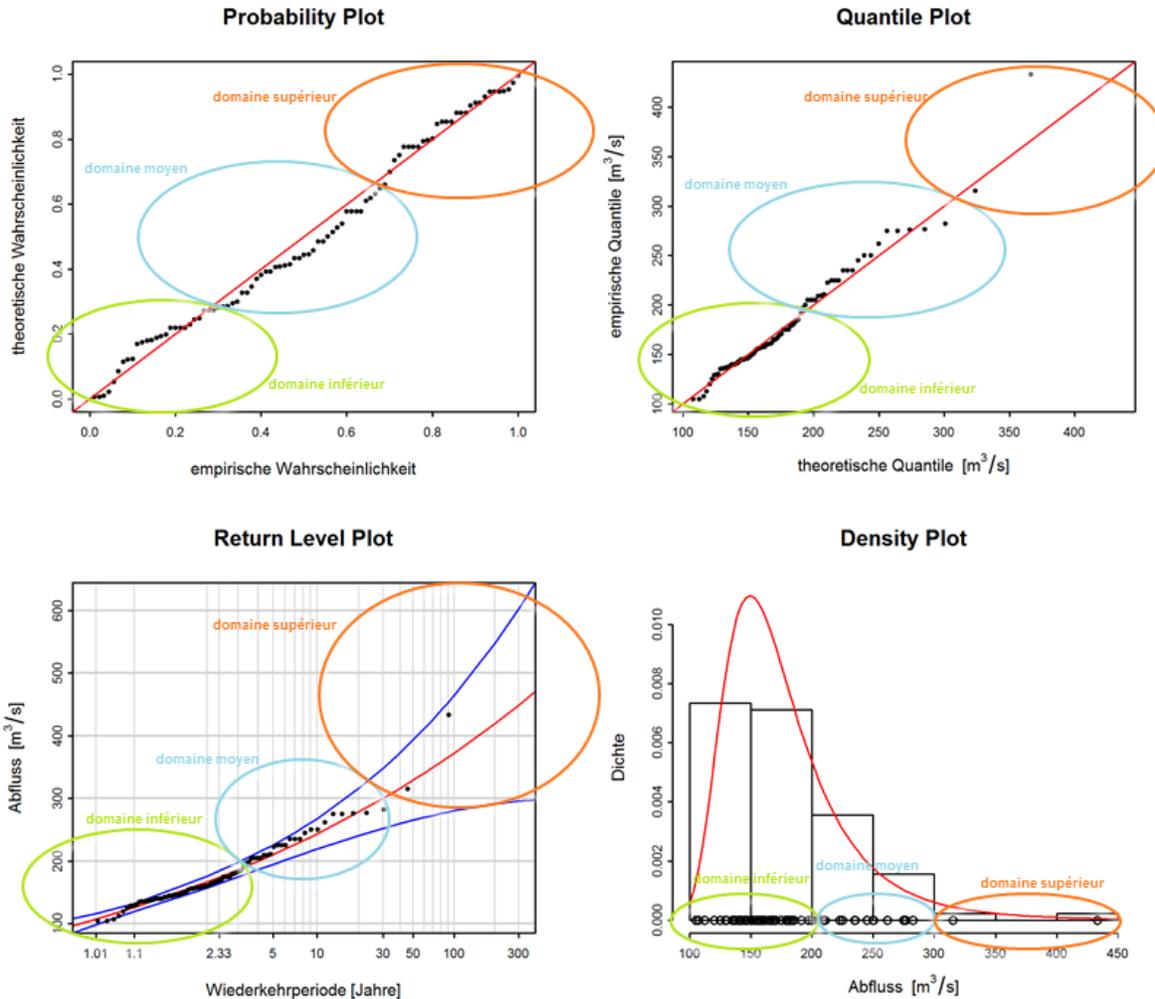


Figure 8 – Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante stationnaire du modèle (Muota-Ingenbohl)

Pour faciliter l'interprétation, les rapports des stations tentent d'évaluer les graphiques diagnostiques à l'aide de différents critères. Ils apprécient notamment la pertinence dans les domaines «inférieur», «moyen» et «supérieur». La délimitation de ces domaines étant subjective, elle peut dès lors varier légèrement d'une station de mesure à l'autre. En principe, ces domaines correspondent toutefois approximativement à ceux encadrés dans la figure 8. L'évaluation de la pertinence est résumée dans un tableau (tableau 5). La largeur de l'intervalle de confiance fait également l'objet d'une évaluation.

Tableau 5 – Exemples d'évaluation des graphiques diagnostiques (figure 8) :

Critères	Evaluation	Remarques
Adéquation domaine inférieur	bonne	-
Adéquation domaine moyen	bonne	-
Adéquation domaine supérieur	médiocre	Sous-estimation de la valeur maximale
Intervalle de confiance	moyenne	-

D'autres exemples de graphiques diagnostiques et leur interprétation figurent à l'annexe B.

Dans les variantes non stationnaires, seuls le Quantile Plot et le Probability Plot peuvent être représentés, moyennant une standardisation des valeurs. Dans la méthode BLOCK, celle-ci recourt à la distribution de Gumbel et dans la méthode POT, à la distribution exponentielle. Le Quantile Plot dépend de la distribution de référence qui est choisie. Lors de son interprétation, il importe néanmoins de veiller, comme pour les graphiques diagnostiques des modèles stationnaires, à la distribution des données par rapport à la première bissectrice. La figure 9 reproduit les graphiques diagnostiques de la variante «mujump» de la méthode BLOCK pour la station de mesure Muota-Ingenbohl. Le Residual Quantile Plot montre que la variante non stationnaire permet de mieux tenir compte de la valeur maximale observée que la variante stationnaire (comparaison avec la figure 8). Le Residual Probability Plot ne révèle pratiquement aucune différence.

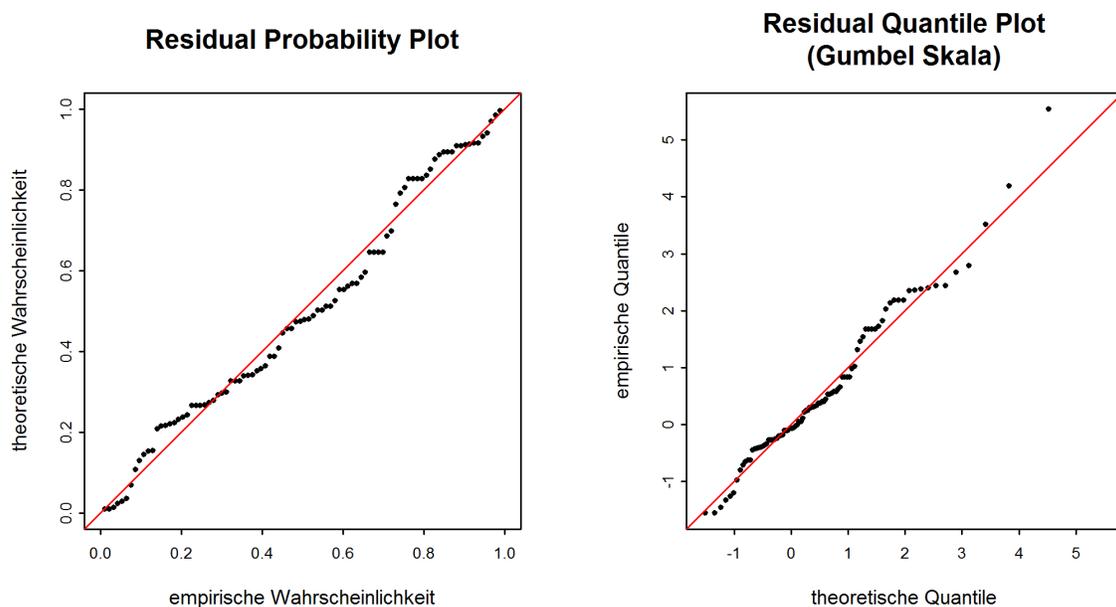


Figure 9 – Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante non stationnaire du modèle (Muota-Ingenbohl)

D'autres exemples de graphiques diagnostiques établis pour des variantes non stationnaires figurent à l'annexe B.

2.2.4 Tableau des niveaux de retour de HQ_T

Après les graphiques diagnostiques, le rapport présente un tableau qui énumère les débits HQ_T déterminés à l'aide du modèle pour une période de retour T prédéfinie. Le tableau 6 reprend l'exemple de la variante stationnaire de la méthode BLOCK pour la station Muota-Ingenbohl. Dans les variantes stationnaires, les HQ_T énumérés valent pour la période d'étude totale considérée; dans les variantes non stationnaires, les HQ_T calculés évoluent au fil du temps. Le tableau fournit toujours les valeurs de l'année la plus récente, cette année étant précisée dans la légende du tableau.

Tableau 6 – Débits pour différentes périodes de retour (y c. l'intervalle de confiance à 95 %, méthode delta) sur la période d'étude totale (1924-2015)

HQ_T	Limite de confiance inférieure [m^3/s]	Débit [m^3/s]	Limite de confiance supérieure [m^3/s]
HQ_2	158	167	176
HQ_{10}	219	243	266
HQ_{30}	252	298	345
HQ_{100}	280	368	456
HQ_{300}	297	442	588

L'intervalle de confiance spécifié permet de tirer des conclusions quant à l'incertitude des niveaux de retour obtenus par calcul, cette incertitude provenant des variations aléatoires dans l'échantillon (c'est-à-dire la série de mesures). L'intervalle de confiance ne tient pas compte d'autres incertitudes, surtout pas de celles qui relèvent de la justesse du modèle appliqué.

L'OFEV calcule l'intervalle de confiance à l'aide de la méthode delta. Cette méthode se fonde sur un développement de Taylor de la fonction servant à calculer les HQ_T et sur une distribution asymptotique normale. Il est difficile d'évaluer la pertinence des intervalles ainsi obtenus et cette pertinence varie de cas en cas. Il est toutefois facile d'appliquer la méthode delta à toutes les variantes non stationnaires des modèles. Pour les détails techniques, nous renvoyons à Coles (2001, pp. 56-57 et 82).

2.2.5 Diagrammes de l'évolution des HQ_{100} calculés à l'aide de variantes non stationnaires

Dans les variantes non stationnaires, les HQ_T calculés diffèrent d'une année à l'autre ou montrent un changement brusque à un moment donné (variantes «mujump» et «sigjump»). Tandis que le tableau des niveaux de retour ne présente que les HQ_T de l'année la plus récente, une représentation au fil des années des HQ_{100} calculés permet d'identifier ces variations. Dans le cas de la station Muota-Ingenbohl (figure 10), l'année 1998 a été choisie comme t_0 pour la variante «mujump» de la méthode BLOCK. Avant 1998, le HQ_{100} calculé se situe à $337 m^3/s$, à partir de 1998, à $380 m^3/s$ (lignes continues). Les traitillés délimitent l'intervalle de confiance. La figure 11 donne un autre exemple d'une modification, linéaire cette fois, du HQ_{100} obtenu par calcul.

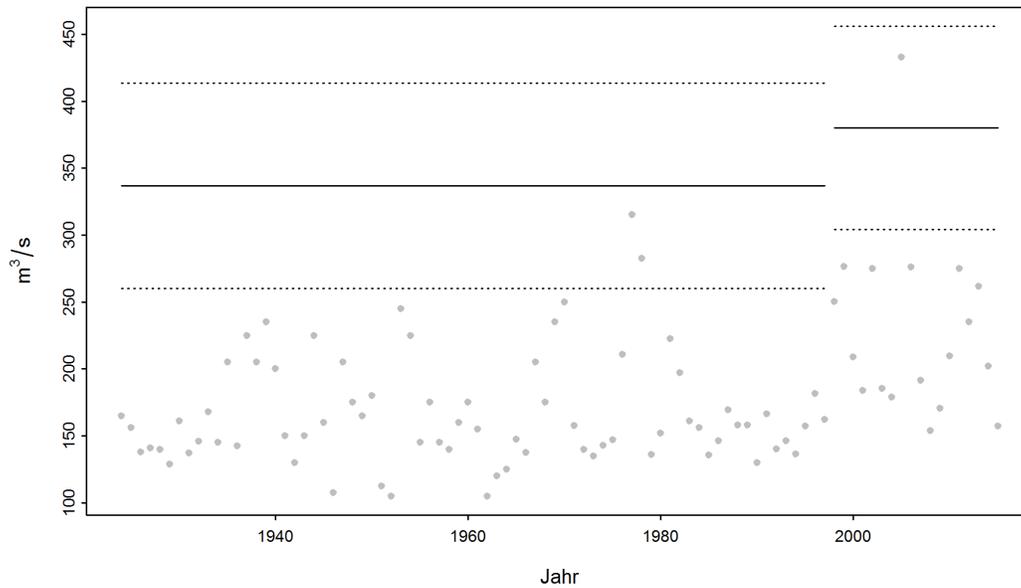


Figure 10 – Modification des HQ_{100} calculés à l'aide d'une variante non stationnaire (lignes continues) et de l'intervalle de confiance à 95 % (lignes en traitillé; méthode delta) durant la période 1974-2015 (Muota-Ingenbohl)

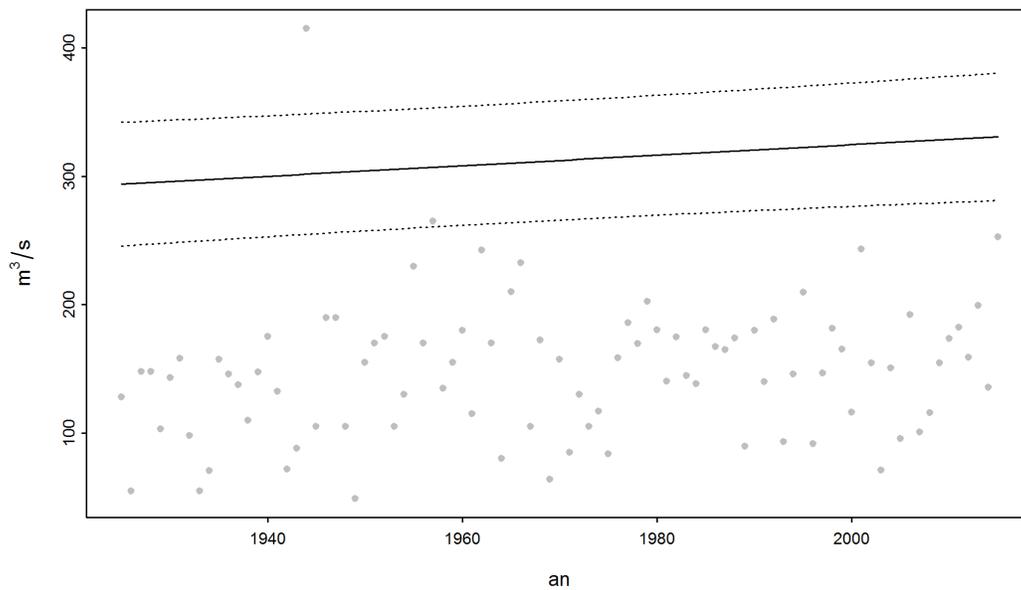


Figure 11 – Modification des HQ_{100} calculés à l'aide d'une variante non stationnaire (lignes continues) et de l'intervalle de confiance à 95 % (lignes en traitillé; méthode delta) durant la période 1925-2015 (Broye-Payerne)

3 Commentaires du chapitre 3 «Comparaison des différents résultats»

Le dernier chapitre des rapports des stations résume et compare les résultats issus des différentes méthodes.

Un graphique (figure 12) donne une vue d'ensemble des HQ_T obtenus à l'aide des variantes les mieux adaptées aux données dans les deux méthodes paramétriques considérées. Pour chacune des méthodes, le graphique indique également les résultats de la variante stationnaire. Outre le HQ_T estimé (trait horizontal), le graphique spécifie l'intervalle de confiance (ligne délimitée par deux triangles, qui marquent la limite inférieure et supérieure de l'intervalle). Dans toutes les variantes non stationnaires, les HQ_T calculés ne sont valables que pour un moment donné. Comme dans le chapitre précédent, les valeurs utilisées sont celles de l'année la plus récente, celle-ci étant indiquée dans la légende de la figure. Il faut savoir que les échelles de l'axe y (débit en m^3/s ou en l/s) peuvent varier selon la période de retour. Les résultats sont toujours comparés avec le débit le plus élevé mesuré dans chaque station (ligne bleue).

Cette représentation (figure 12) permet de comparer directement les résultats présentés séparément sous forme de tableaux dans le chapitre précédent. Pour éviter de comparer des résultats se rapportant à des périodes différentes, des couleurs sont utilisées pour distinguer ces périodes (fond blanc ou orange). L'OFEV dispose des maxima mensuels et annuels sous forme numérique depuis le début des relevés, tandis que les maxima journaliers ne sont le plus souvent disponibles sous cette forme que depuis 1974. Il arrive donc souvent que les méthodes BLOCK et POT ne couvrent pas la même période. C'est le cas dans l'exemple de la Muota (figure 12 du guide), où la méthode BLOCK se fonde sur la série chronologique 1924-2015, tandis que la méthode POT utilise les données de la période 1974-2015. Voilà pourquoi, comme l'explique le sous-chapitre 2.1.4 du présent guide, la série chronologique à partir de 1974 fait l'objet d'une évaluation distincte (période de comparaison) dans la méthode BLOCK.

La figure 12 souligne que l'écart entre les bases de données exerce une influence décisive dans le cas de la Muota, puisque l'on observe en moyenne des crues annuelles plus élevées après 1974. Si l'intervalle de confiance des débits HQ_{100} et HQ_{300} durant la période de comparaison 1974-2015 dans la méthode BLOCK est nettement plus large que celui de la méthode POT durant la même période, c'est parce que le nombre de données d'entrée diffère grandement entre ces deux méthodes (BLOCK : 42 événements, POT : 91). Pour le débit HQ_{300} , l'intervalle de confiance est si large qu'il englobe, d'une part, des valeurs négatives et, d'autre part, des valeurs d'un niveau irréaliste pour la Muota à Ingenbohl ($-145 m^3/s$ à $1982 m^3/s$). Ces résultats mettent en évidence la grande incertitude qui grève les niveaux de retour calculés à l'aide de ce modèle.

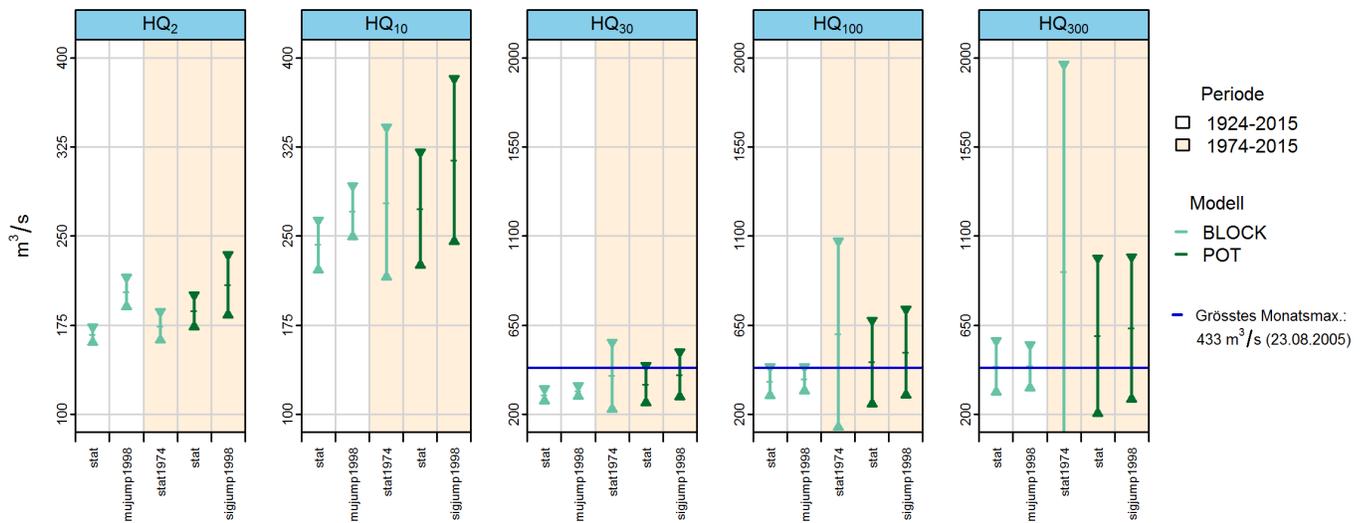


Figure 12 – Les HQ_T [m^3/s] et leurs intervalles de confiance à 95 %, calculés à l’aide de la variante stationnaire et de la variante la plus appropriée des méthodes BLOCK et POT pour l’année 2015 (Muota-Ingenbohl)

Dans les deux méthodes (BLOCK et POT), le recours à des variantes non stationnaires améliore la qualité du modèle dans le cas de la Muota à Ingenbohl, car ces variantes permettent de tenir compte de la multiplication de fortes crues ces dernières années. En conséquence, les niveaux de retour calculés sont plus élevés que dans les variantes stationnaires. Les formules mathématiques simples (tableaux 1 et 2) servant à prendre en considération les non-stationnarités ne fournissent qu’un reflet très approximatif de la réalité. De plus, les résultats ne permettent pas de savoir si une tendance se maintient. L’historique de la station ne permet certes pas de se prononcer quant à l’avenir, mais il peut contribuer à identifier les raisons d’un changement. En connaissant ces raisons, il est plus facile d’estimer l’évolution future.

Dans l’ensemble, force est de constater que tous les modèles présentent des avantages et des inconvénients, de sorte qu’il est impossible d’en choisir un pour l’appliquer de manière générale. Même à l’issue d’une seule évaluation, il est impossible de savoir quelle approche correspond le mieux à la réalité.

La différence fondamentale entre les deux méthodes paramétriques réside dans l’identification des extrêmes. Contrairement à la méthode BLOCK, la méthode POT renonce à former des blocs de données et évite ainsi de négliger des valeurs extrêmes uniquement parce qu’un même bloc de données comporte une valeur plus élevée encore (Coles 2001). Dans la méthode POT, un choix judicieux du seuil u permet de diminuer le risque d’évaluer des débits non extrêmes. Comme les données de base font le plus souvent défaut sous forme numérique pour la période avant 1974, le champ d’application de la méthode POT est limité.

Les résultats de ces applications statistiques ne constituent que l’une des bases pour répondre à des questions concrètes. D’autres connaissances sur les spécificités hydrologiques du bassin versant, des réflexions sur le pire scénario en matière de précipitations et de débits, etc. sont en effet indispensables pour estimer le risque de crue. La division Hydrologie de l’OFEV préconise une manière de procéder «étayée par des arguments hydrologiques», telle qu’elle est décrite par Merz et Blöschl (2008, cités dans DWA 2012 :52).

4 Bibliographie

Baumgartner, E., Boldi, M.-O., Kan, C., Schick, S. (2013). Hochwasserstatistik am BAFU - Diskussion eines neuen Methodensets. Wasser Energie Luft, Heft 2/2013. Baden.

Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer. London.

DWA (éd.) (2012). Merkblatt DWA-M 552. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. Hennef.

KHR (éd.) (2007), Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. Bericht Nr. I-22 der KHR, Lelystad.

Meylan, P., Favre, A.-C., Musy, A.(2008). Hydrologie fréquentielle. Une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne.

Merz, R., Blöschl, G.(2008). Flood frequency hydrology : 2. Combining data evidence. Water Resources Research, 44 (8), cité dans DWA (2012).

OFEG (éd.) (2003a). Dictionnaire de la protection contre les crues. Haupt Verlag, Bern.

OFEG (éd.)(2003b). Évaluation des crues dans les bassins versants de Suisse. Guide pratique. Rapports de l'OFEG, série Eaux, no 4, Berne.

A Annexe

I Exemple de station présentant un point de rupture significatif

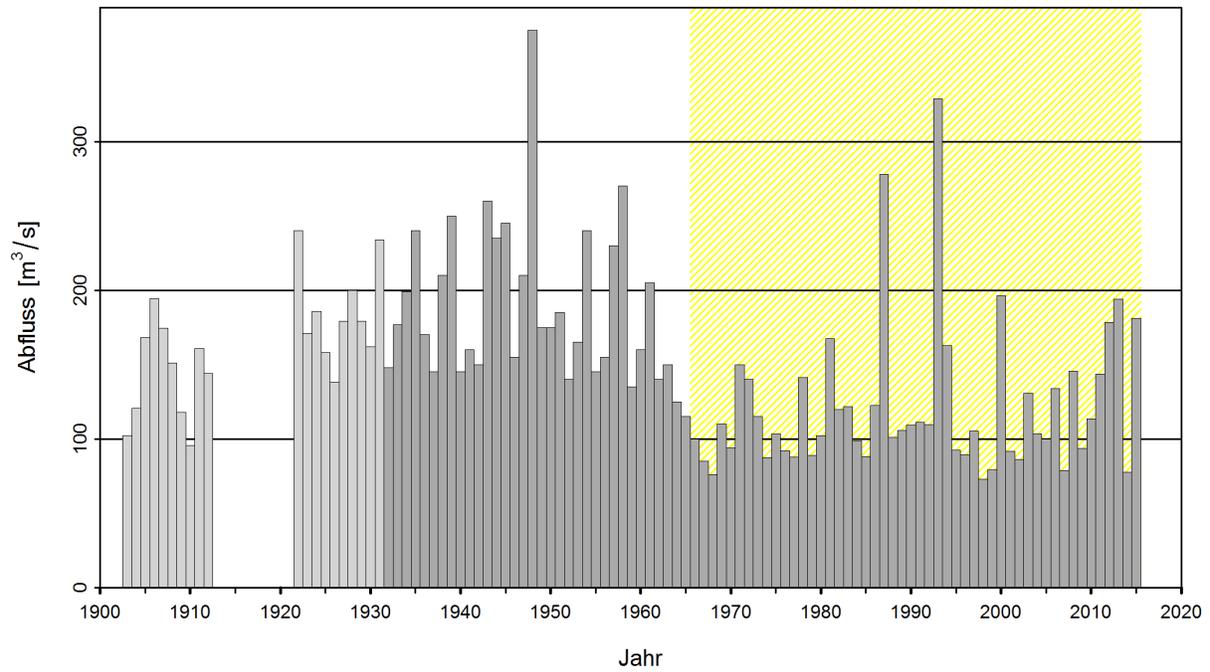


Figure 13 – Série chronologique des maxima annuels (Vispa-Visp)

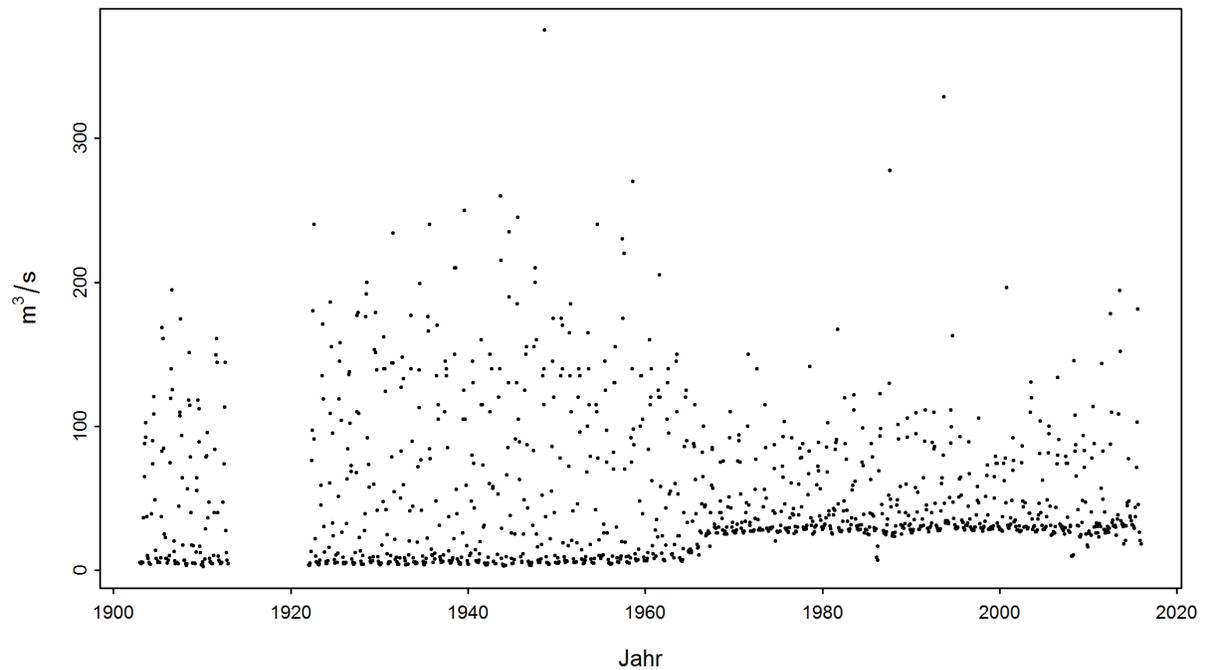


Figure 14 – Série chronologique des maxima mensuels (Vispa-Visp)

Dans le cas de la station Vispa-Visp, des maxima mensuels sont disponibles pour la période 1903-1913 et à partir de 1922. Un limnigraphe a été installé le 9 mars 1922. Les données ne sont dès lors dépouillées qu'à partir de 1923. Les maxima annuels de la station présentent un net point de rupture en 1962 (intervalle de confiance : 1956-1968). Compte tenu de l'influence exercée par la centrale hydroélectrique de Mattmark (barrage de Mattmark 1965, ainsi que les prélèvements et les déversements dans le bassin versant), la feuille de résultats publiée sur Internet se fonde sur les maxima annuels enregistrés depuis 1966. Dans le rapport de la station, les calculs de la méthode BLOCK portent sur les périodes suivantes : 1923-2015 (où $t_0=1966$) (période d'étude totale), 1966-2015 (période d'étude à partir du point de rupture) et 1974-2015 (période de comparaison). L'analyse des résultats de la méthode POT porte sur la période d'étude POT (1974-2015).

II Exemples de graphiques diagnostiques

Variante stationnaire

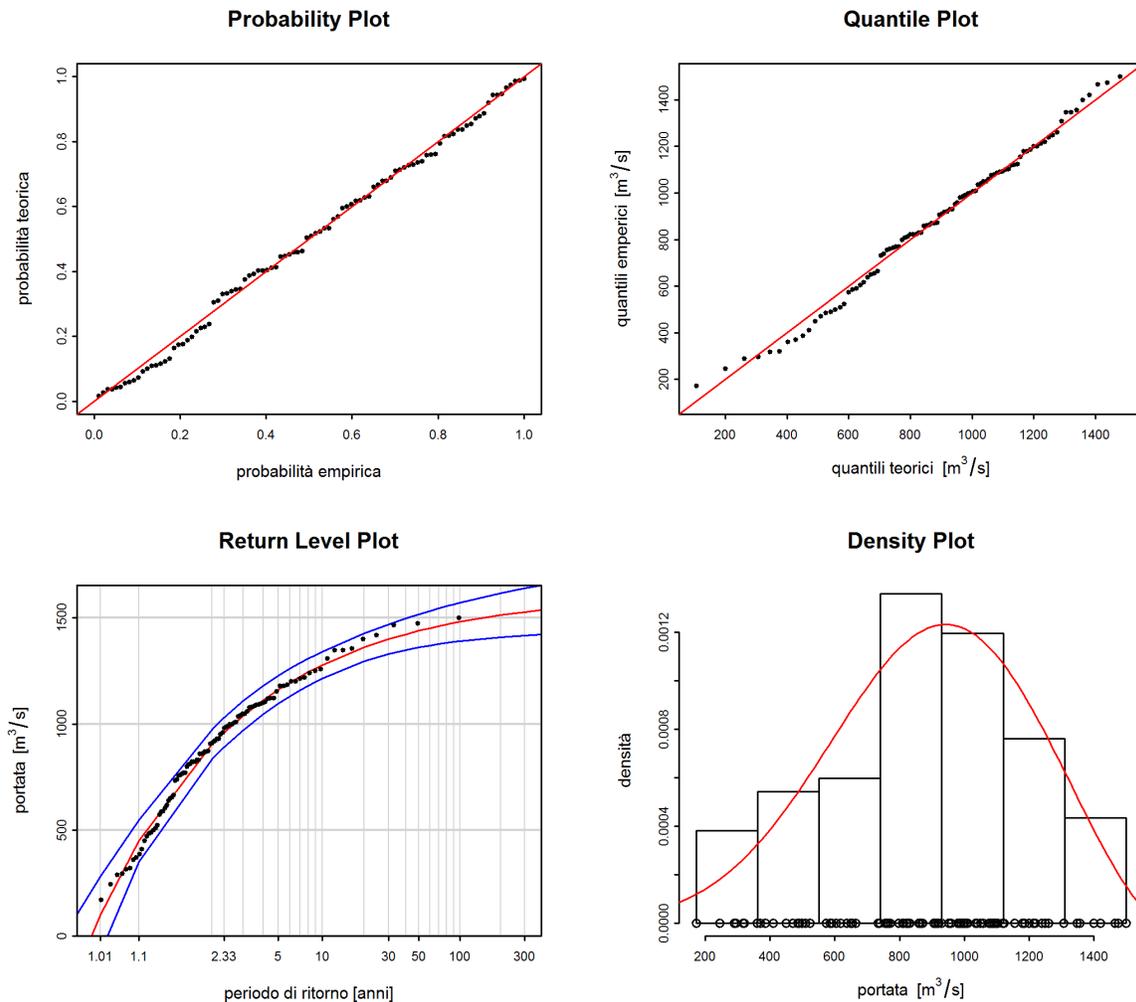


Figure 15 – Graphiques diagnostiques d'une variante stationnaire présentant une bonne adéquation dans tous les domaines (méthode BLOCK, Ticino-Bellinzona)

Le Probability Plot de même que le Quantile Plot révèlent une bonne adéquation du modèle aux observations, même si de légers écarts apparaissent dans le domaine inférieur. Toutes les observations se situent de plus dans l'intervalle de confiance, qui est relativement étroit. Dans l'ensemble, cet exemple présente une bonne pertinence.

Tableau 7 – Interprétation des graphiques diagnostiques (figure 15)

Critères	Evaluation	Remarques
Adéquation domaine inférieur	bonne	-
Adéquation domaine moyen	bonne	-
Adéquation domaine supérieur	bonne	-
Intervalle de confiance	petit	-

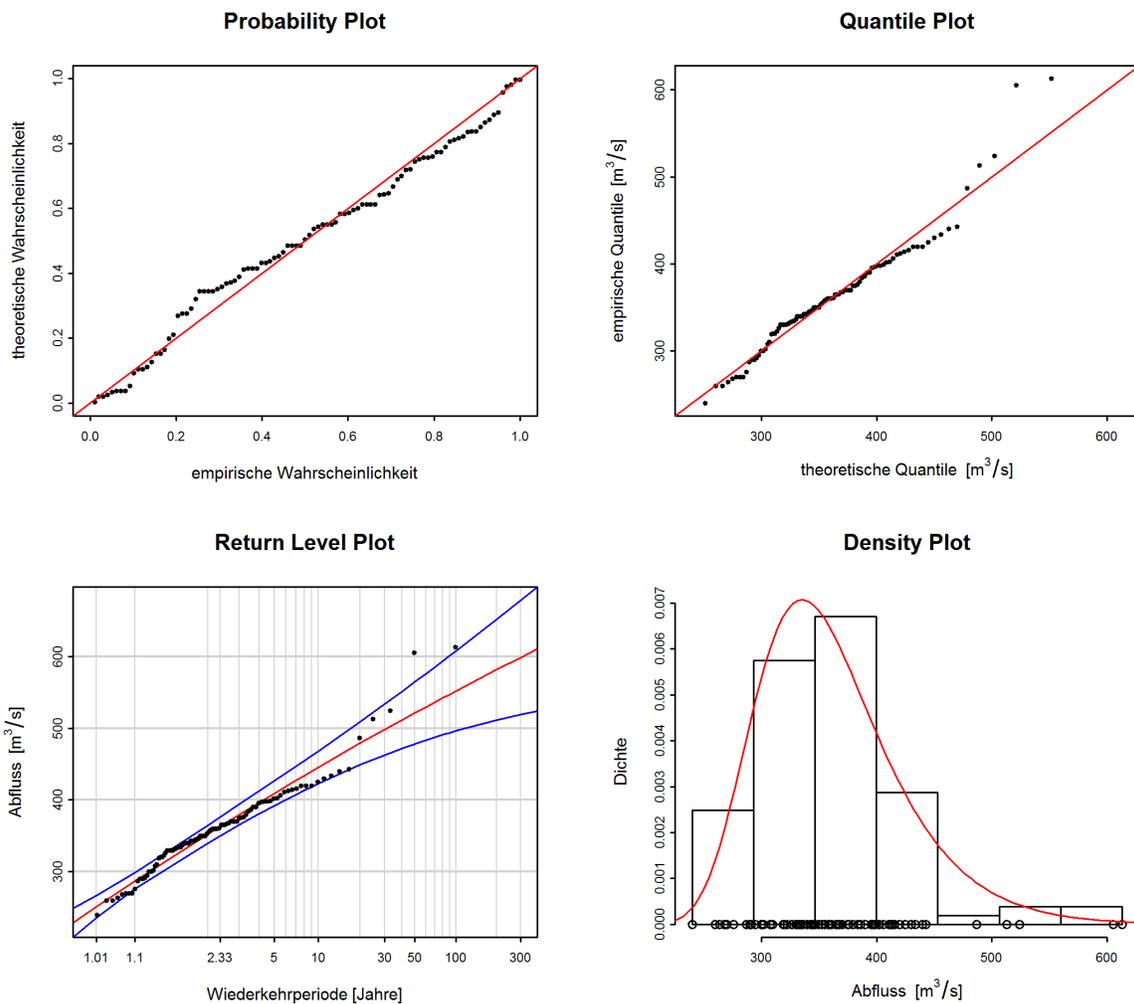


Figure 16 – Graphiques diagnostiques d'une variante stationnaire présentant une mauvaise adéquation dans le domaine supérieur (méthode BLOCK, Aare-Bern)

Le Probability Plot suggère dans l'ensemble une adéquation moyenne du modèle aux observations. Le Quantile Plot révèle une meilleure adéquation dans le domaine inférieur. Il montre cependant que le modèle ne représente que très mal le débit de pointe le plus élevé qui a été observé. Cet écart transparaît également dans le Return Level Plot, où les observations les plus élevées se situent à l'extérieur de l'intervalle de confiance. Le Density Plot débouche à nouveau sur une bonne appréciation. Dans l'ensemble, cet exemple présente une pertinence moyenne.

Tableau 8 – Interprétation des graphiques diagnostiques (figure 16)

Critères	Evaluation	Remarques
Adéquation domaine inférieur	moyenne	-
Adéquation domaine moyen	moyenne	-
Adéquation domaine supérieur	médiocre	Sous-estimation des valeurs élevées
Intervalle de confiance	petit	-

Variante non stationnaire

La figure 17 reproduit les graphiques diagnostiques de la variante «mujump» de la méthode BLOCK pour la station de mesure Aare-Bern. Dans les deux diagrammes, l'adéquation est la même que dans la variante stationnaire (figure 16). Un changement n'est guère perceptible.

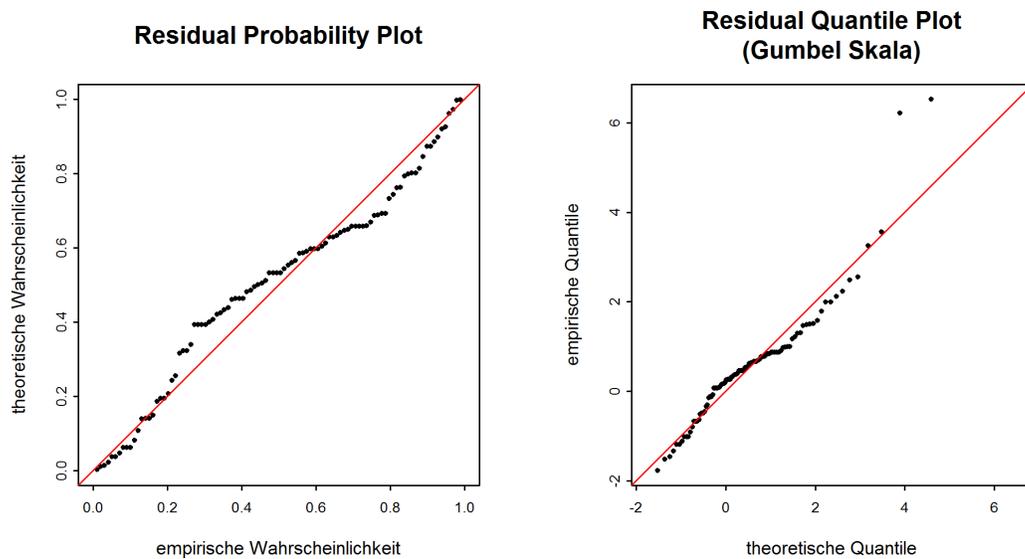


Figure 17 – Graphiques diagnostiques d'une variante non stationnaire (méthode BLOCK, «mujump 1993», Aare-Bern)

La figure 18 montre les graphiques diagnostiques de la variante «sigjump» de la méthode POT pour la station de mesure Aare-Bern. Le Probability Plot révèle dans l'ensemble une adéquation légèrement meilleure que dans la variante stationnaire (non représentée). Le Quantile Plot témoigne d'une meilleure adéquation que dans la variante stationnaire, en particulier dans les domaines moyen et supérieur.

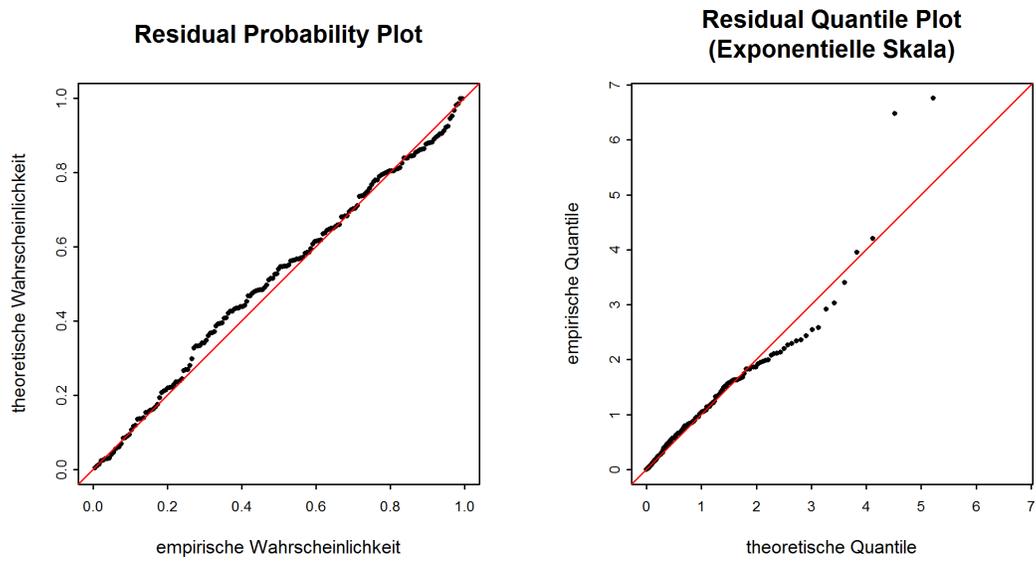


Figure 18 – Graphiques diagnostiques d’une variante non stationnaire (méthode POT, «sigjump 1993», Aare-Bern)

Index

A		Paramètre de position μ	6
Analyse des points de rupture	2, 8	Taux d'occurrences λ	6
B		S	
Base de données	2, 10, 20	Saisonnalité	4
C		V	
Cas non stationnaire	7, 16, 20	Valeur seuil	7, 12, 13
Variante non stationnaire du modèle .	7, 18		
Cas stationnaire	7, 15, 20		
Variante stationnaire du modèle	7		
Cluster	7		
G			
Graphique diagnostique	14, 15		
Density Plot	14, 15		
Probability Plot (P-P-Plot)	14, 15		
Quantile Plot (Q-Q-Plot)	14, 15		
Return Level Plot	14, 15		
H			
HQ _T	17, 19		
I			
Indépendance des événements	7		
Intervalle de confiance	17		
M			
Méthode paramétrique	6, 20		
Block Maximum (BLOCK)	6, 20		
Peaks Over Threshold (POT)	6, 20		
mean residual life plot	12		
O			
Ordinogramme	9		
P			
Période d'étude	10, 23		
Période d'étude (Point de rupture) .	10, 23		
Période d'étude POT	10, 23		
Période d'étude totale	10, 23		
Période de comparaison	10, 19, 23		
Paramètre de distribution	6, 13		
Paramètre d'échelle σ	6		
Paramètre de forme κ	6		