



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 ÉTIAGES

RAPPORT DE STATION

Guide de lecture

Contact : hydrologie@bafu.admin.ch

Table des matières

0	Introduction	2
1	Définitions et principes	2
1.1	Définitions	2
1.2	Périodes utilisées	4
1.3	Identification d'étiages indépendants (pooling)	4
1.4	Attribution des NM7Q à une année (méthode BLOCK)	5
2	Explications concernant le chapitre 1 “ Bases de données ”	5
3	Explications concernant les méthodes utilisées	11
3.1	Méthode Block Minimum (BLOCK)	11
3.2	Méthode Peaks over Threshold (POT)	12
3.3	Variantes utilisées	13
4	Explications concernant les chapitres 2.1 à 2.3, consacrés aux résultats	16
4.1	Description du modèle et de ses données d'entrée	16
4.2	Tableau présentant l'estimation des valeurs paramétriques	18
4.3	Graphiques diagnostiques et leur évaluation	19
4.4	Tableaux des valeurs de retour de NQ_T , ND_T et DV_T	21
4.5	Comparaison des résultats des différentes méthodes (uniquement NQ_T)	22
5	Bibliographie	24
A	Annexe	25
A.1	Exemples de graphiques diagnostiques	25

0 Introduction

Le présent guide vise à faciliter la lisibilité et la compréhensibilité des rapports des stations sur la statistique des étiages. Ces rapports servent à identifier les non-stationnarités dans les données et à fournir un aperçu des débits d'étiage (NQ_T), des durées d'étiage (ND_T) et des volumes déficitaires (DV_T) calculés au moyen d'une voire de deux méthodes différentes pour des périodes de retour données. Ces évaluations statistiques ne constituent toutefois que l'une des bases pour répondre à des questions pratiques. D'autres connaissances sur les processus hydrologiques du bassin versant et des réflexions sur le scénario du pire en matière de précipitations et de débits sont importantes.

1 Définitions et principes

1.1 Définitions

Le présent chapitre explique succinctement les paramètres et d'autres notions centrales utilisés dans les rapports des stations sur la statistique des étiages. La figure 1 du présent guide illustre les différents paramètres et leurs interactions.

Débit d'étiage (NQ)

La division Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement (ci-après : l'OFEV) utilise les paramètres $M7Q$ et $NM7Q$ pour estimer les débits d'étiage.

Le paramètre $M7Q$ désigne la moyenne arithmétique mobile de sept valeurs journalières successives du débit.

Le paramètre $NM7Q$ reflète pour sa part le débit le plus faible en moyenne sur sept jours ($M7Q$) durant une période donnée (OFEV : un an).

La moyenne sur sept jours permet de réduire le plus possible l'influence des perturbations à court terme, en partie périodiques, comme les prélèvements, l'exploitation par éclusées des centrales hydroélectriques ou les rejets des stations d'épuration (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft 2005). Les valeurs moyennées sur sept jours sont également moins sensibles aux erreurs de mesure (Maurer et al. 2011).

Les paramètres $M7Q$ et $NM7Q$ servent de base au calcul des valeurs de retour des débits d'étiage : $M7Q$ en tant que donnée d'entrée pour la méthode de Peaks Over Threshold (POT, cf. point 3.2 du présent guide) et $NM7Q$ en tant que donnée d'entrée pour la méthode de Block Maximum (BLOCK, cf. point 3.1 du présent guide).

Durée d'étiage (ND)

La durée d'étiage constitue un autre paramètre important permettant de caractériser un étiage.

La *durée d'étiage* correspond au nombre de jours successifs durant lesquels le débit est inférieur à une valeur seuil donnée.

Se fondant sur une recherche bibliographique et sur ses propres études préliminaires, l'OFEV utilise comme valeur seuil le 80^e centile du débit (c.-à-d. le débit atteint ou dépassé 80 % des jours).

Volume déficitaire (DV)

Le volume déficitaire représente le troisième paramètre étudié en lien avec un étiage dans le cadre des rapports des stations.

Le *volume déficitaire* correspond aux débits déficitaires additionnés sur toute la durée d'étiage, qui équivaut à la différence entre le débit mesuré lors d'un jour d'étiage et la valeur seuil.

Pour faciliter la comparaison des volumes déficitaires estimés pour les différentes stations, l'unité hauteur de débit h_A [mm] est utilisée, comme c'est le cas dans l'analyse 121 de DWA (anciennement DVWK, 1992). Elle est déterminée comme suit :

$$h_A[mm] = \frac{V[m^3]}{A_E[km^2] * 1000} \quad (1)$$

où A_E correspond à la surface du bassin versant et V au volume déficitaire en m^3 .

Le volume déficitaire est obtenu en combinant la durée d'étiage et l'ampleur du débit d'étiage. Un très faible débit sur une courte période peut entraîner le même volume déficitaire qu'un débit d'étiage moins marqué sur une période plus longue.

Année d'étiage

L'*année d'étiage* couvre une période d'un an. Son début est fixé sur la base de la saisonnalité des étiages et, partant, diffère généralement de celui d'une année civile.

La détermination de l'année d'étiage vise à éviter, dans la mesure du possible, qu'un étiage se prolonge au-delà du changement d'année et que, par conséquent, le même événement soit pris en compte dans la statistique pour deux années consécutives. Si cela ne suffit pas, les événements sont attribués à l'une des deux années concernées conformément aux règles prévues (cf. point 1.4 du présent guide). Pour permettre la comparaison entre les stations, il convient de choisir le même mois de départ dans la mesure du possible. L'année d'étiage dure en général du 1^{er} juin au 31 mai pour les stations de la zone alpine et du 1^{er} avril au 31 mars pour les stations hors zone alpine.

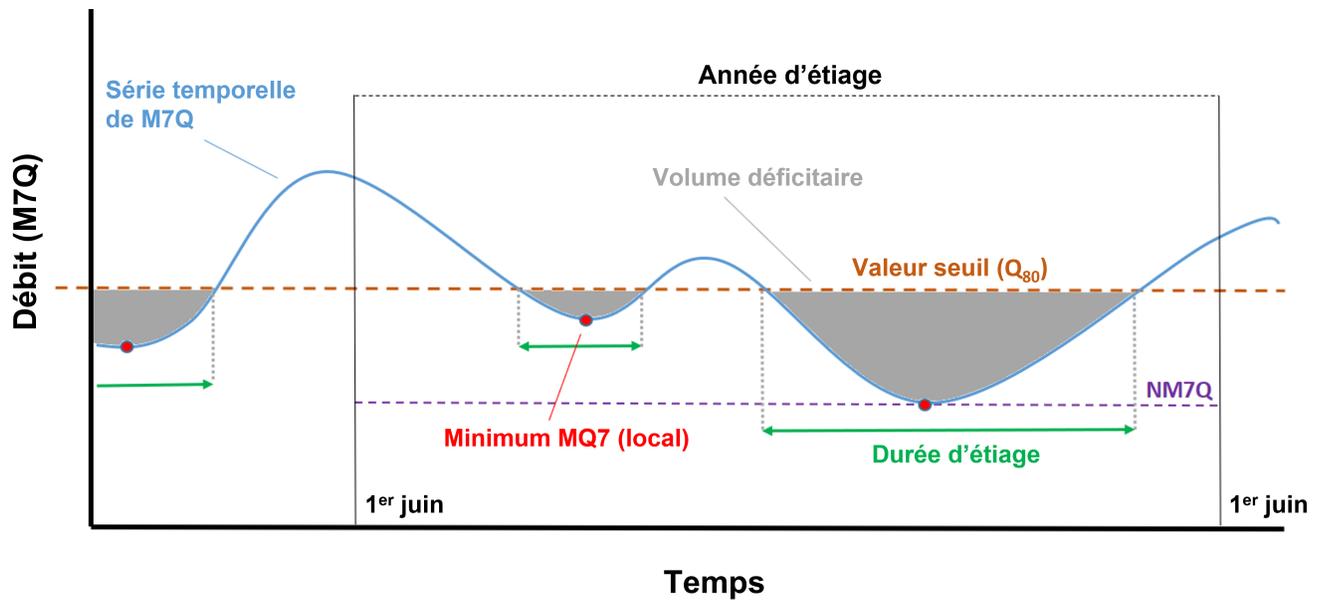


FIGURE 1 : Les différents paramètres de la statistique des étiages et leurs interactions

1.2 Périodes utilisées

Une distinction est opérée entre période d'observation et période d'étude.

La *période d'observation* couvre la période pour laquelle les débits journaliers moyens sont disponibles numériquement.

La *période d'étude* désigne la période pour laquelle les données sont évaluées dans le cadre du processus statistique. Elle peut différer de la période d'observation en fonction du moment de l'installation d'un limnigraphe et en fonction des résultats de l'analyse des points de rupture (cf. chapitre 2 du présent guide).

1.3 Identification d'étiages indépendants (pooling)

Seuls des étiages indépendants doivent être pris en compte dans l'analyse, dans le cadre tant de la méthode BLOCK que de la méthode POT (cf. chapitre 3 du présent guide). Pour identifier les événements indépendants, l'OFEV adopte une approche dynamique basée sur les volumes déficitaires et les volumes excédentaires. Dans ce contexte, deux étiages sont jugés dépendants dès lors que le volume excédentaire cumulé des deux événements ne parvient pas à compenser le volume déficitaire du premier événement. À l'inverse, si le volume excédentaire est identique au volume déficitaire ou y est supérieur, les deux étiages sont réputés indépendants.

Deux étiages dépendants entraînent les conséquences suivantes pour le calcul ou la correction des volumes déficitaires et des durées d'étiage :

- Pour calculer le volume déficitaire total, on additionne les deux volumes déficitaires, desquels on soustrait le volume excédentaire intermédiaire.
- Pour calculer la durée d'étiage totale, on additionne les durées des deux étiages et de la période entre eux-ci.

Indépendance/declustering des M7Q (méthode POT)

Dans le cadre de la méthode POT, on examine si des minimas M7Q successifs (locaux) résultent du même étiage. Si tel est le cas (cf. paragraphe précédent), seul le M7Q le plus faible est utilisé (declustering).

1.4 Attribution des NM7Q à une année (méthode BLOCK)

Dans le cadre de la méthode BLOCK (voir point 3.1 du présent guide), un événement NM7Q s'étalant sur deux années doit être attribué à une seule année. Pour ce faire, on se fonde sur les volumes déficitaires et excédentaires indépendants (cf. point précédent). Dans ce contexte, le NM7Q est attribué à l'année d'étiage ayant connu la plus grande part du volume déficitaire. S'agissant de l'autre année d'étiage, le deuxième M7Q le plus faible a alors valeur de nouveau NM7Q.

2 Explications concernant le chapitre 1 “ Bases de données ”

Le chapitre 1 du rapport de la station fournit des informations sur les séries de données disponibles pour la station 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.

Les débits journaliers moyens disponibles sous forme numérique servent de données d'entrée pour les différentes évaluations. La période d'observation complète est utilisée pour les figures 1 à 6 du rapport de la station. Celles-ci visent à donner un premier aperçu des bases de données employées. Elles peuvent fournir des indications visuelles concernant la stationnarité et l'influence des données et sont utilisées pour déterminer l'année d'étiage et pour évaluer la plausibilité de l'analyse des points de rupture réalisée par la suite.

La figure 1 du rapport de la station (figure 2 du présent guide) montre l'occurrence des périodes d'étiage dans l'année. Les traits noirs indiquent les jours de débit d'étiage. La succession de jours de débit d'étiage se traduit, dans l'illustration, par une barre noire. La longueur de la barre reflète celle de la période d'étiage. Cette figure permet de déterminer l'année d'étiage (cf. point 1.1 du présent guide).¹ La figure 2 du présent guide ci-après montre l'exemple de la station Vispa-Visp. À celle-ci, les étiages se produisent en hiver, aucun débit d'étiage n'étant observé entre le 1^{er} juin et le 1^{er} octobre. Le mois de juin y a été choisi comme mois de début, si bien qu'une année d'étiage couvre la période allant du 1^{er} juin de l'année en cours au 31 mai de l'année suivante.

¹La période d'observation complète y est représentée. Toutefois, seule la période d'étude est prise en compte dans le cadre de la détermination de l'année d'étiage.

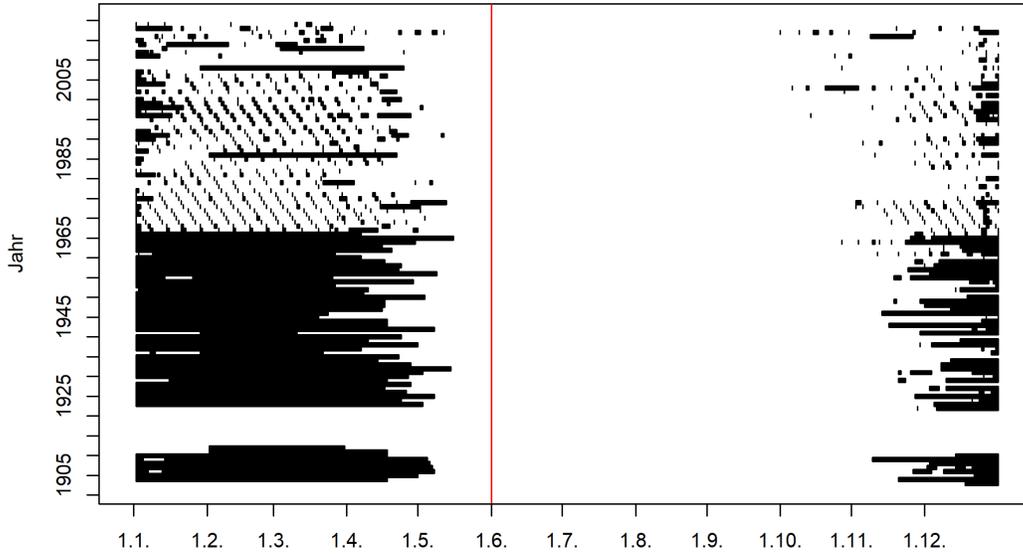


FIGURE 2 : Occurrence des périodes d’étéage durant l’année et mois de début de l’année d’étéage (ligne rouge) à l’exemple de la station Vispa-Visp

La figure 2 du rapport de la station (figure 3 du présent guide) montre les minima mensuels des M7Q utilisés, ventilés par mois. Pour faciliter la lecture, les points correspondant aux données d’un même mois sont légèrement décalés (“ jitter”, qui équivaut à un décalage aléatoire volontaire, sans lien avec la date exacte de l’occurrence). L’illustration donne une impression de la dispersion et peut refléter une certaine saisonnalité. La Vispa présente en effet une saisonnalité relativement marquée (figure 3 du présent guide, à gauche), les plus petits M7Q mensuels étant enregistrés durant l’hiver. Dans le cas de la Tresa (figure 3 du présent guide, à droite), la saisonnalité est nettement moins perceptible.

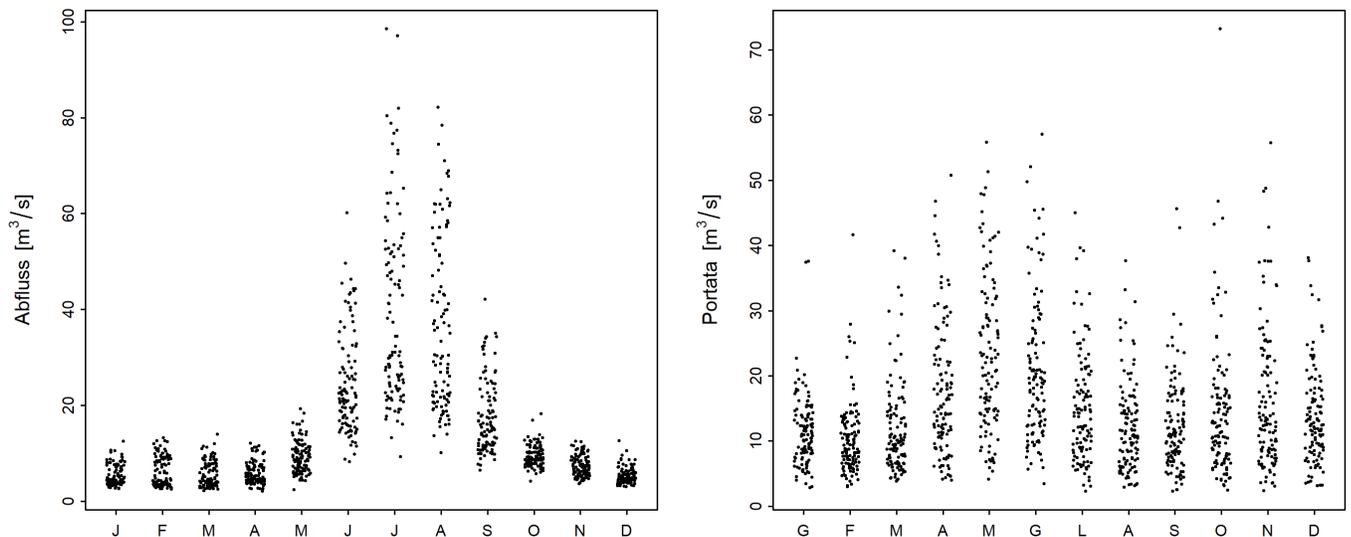


FIGURE 3 : Variations saisonnières des minima mensuels des M7Q de la Vispa à Viège (à gauche) et de la Tresa à Ponte Tresa (à droite) [m^3/s]

Les figures 3 à 5 du rapport de la station (figures 4 à 6 du présent guide) montrent les séries chronologiques des minima mensuels des M7Q, des durées d'étiage et des volumes déficitaires pour toute la période d'observation. Elles permettent d'identifier les non-stationnarités. Il est ainsi possible de constater des tendances particulières par exemple du fait de la construction d'une centrale hydroélectrique. La série chronologique des minima mensuels des M7Q à la station Vispa-Visp (figure 4 du présent guide, en haut) montre que, depuis 1967, les valeurs les plus hautes ont nettement diminué et qu'elles ne sont aujourd'hui guère plus élevées que les autres valeurs. La station Tresa-Ponte Tresa n'affiche pas la même tendance (figure 4 du présent guide, en bas).

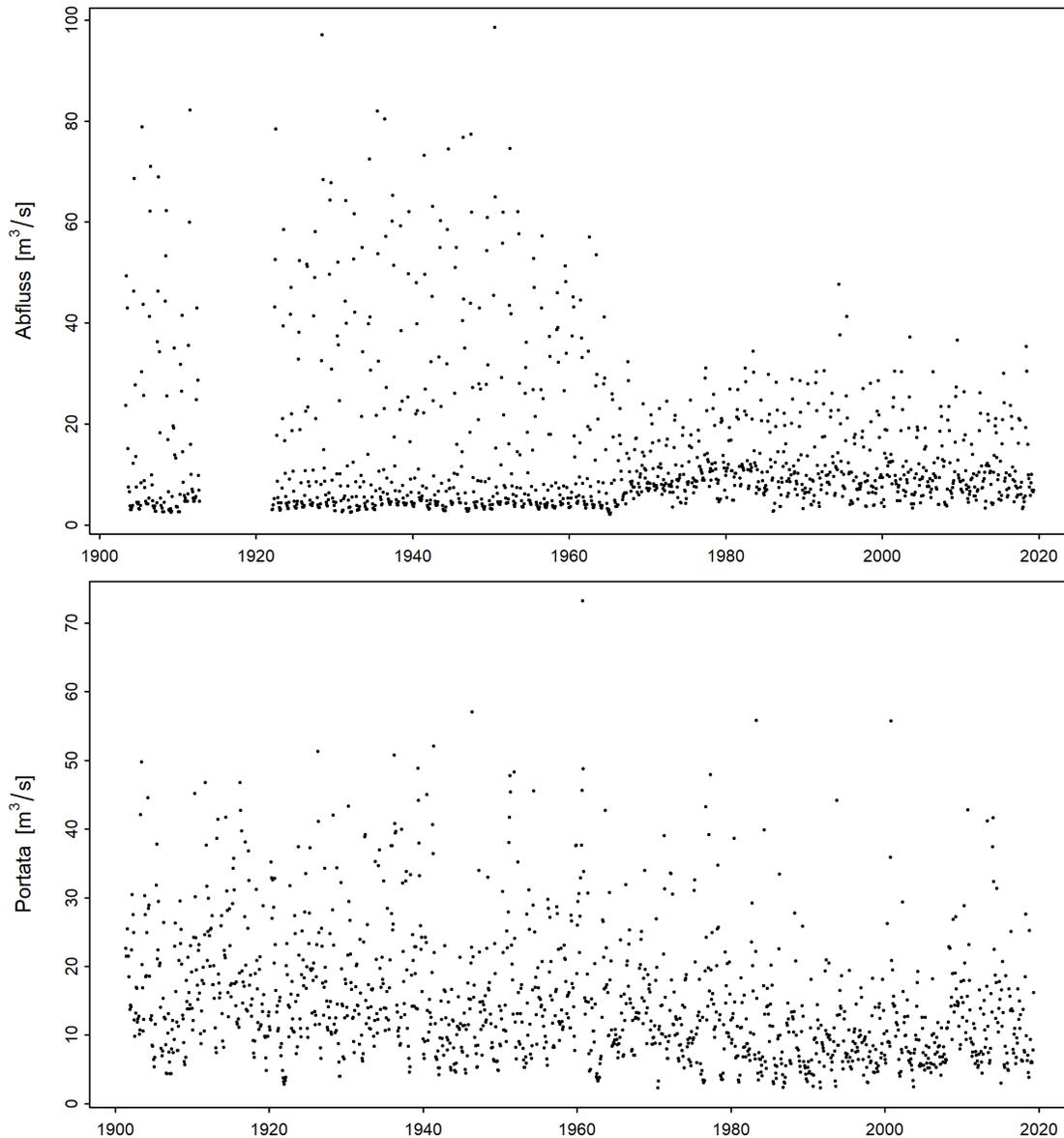


FIGURE 4 : Séries chronologiques des minima mensuels des M7Q [m^3/s] (Vispa-Visp en haut, Tresa-Ponte Tresa en bas)

La série chronologique des durées d'étiage présente également, s'agissant de la Vispa, un net recul à partir de 1967 (figure 5 du présent guide, en haut). Depuis lors, les événements ne durent que

quelques jours. À nouveau, la Tresa n'affiche pas la même tendance (figure 5 du présent guide, en bas).

La figure 6 du présent guide, qui illustre la série chronologique des volumes déficitaires, brosse un tableau similaire. Ainsi, la Vispa (en haut) affiche un volume déficitaire en baisse à partir de 1967 et tout juste supérieur à la valeur 0, alors que la Tresa (en bas) ne présente aucun changement notable.

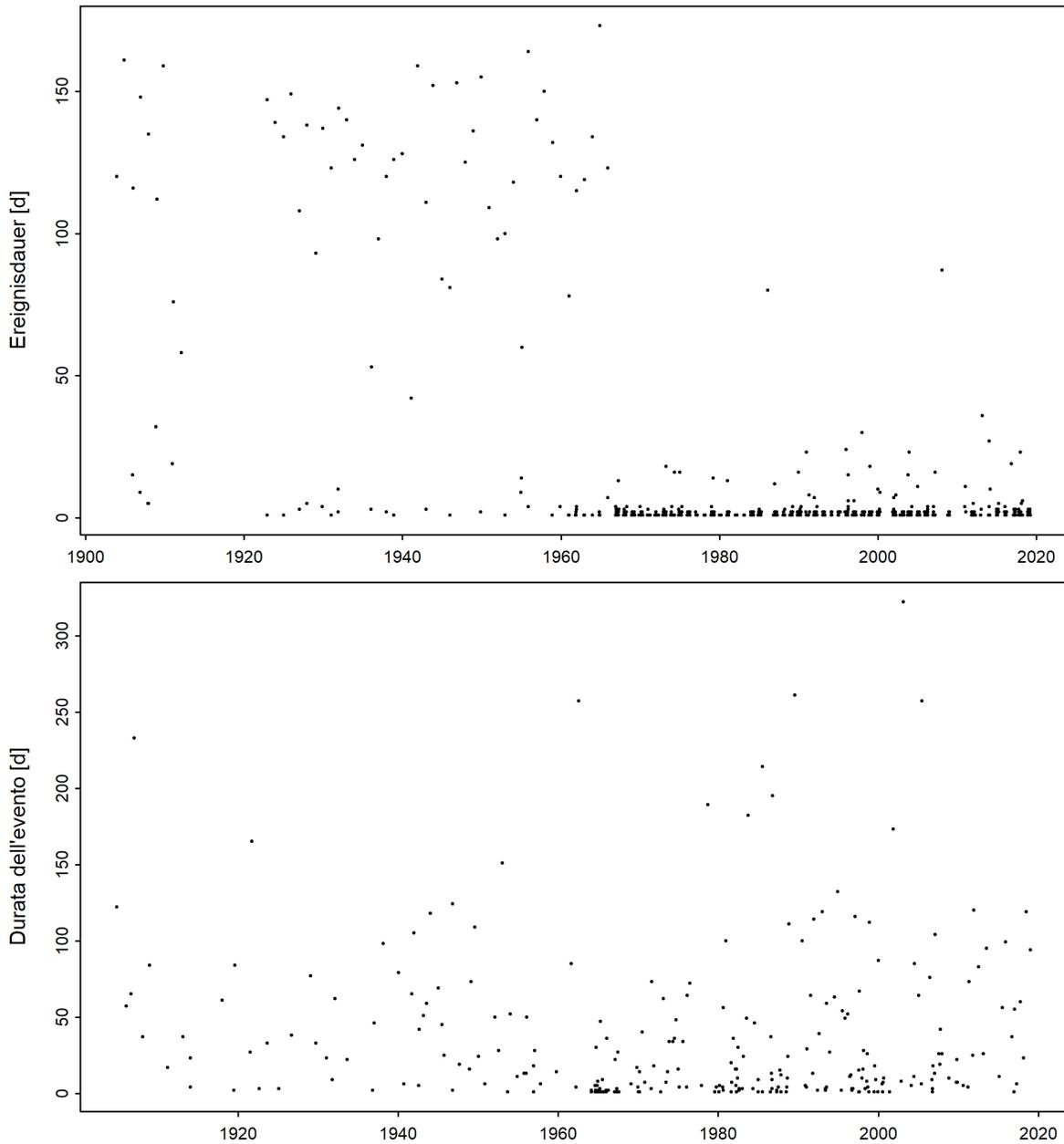


FIGURE 5 : Série chronologique des durées d'étiage observées [d=jours] (Vispa-Visp en haut, Tresa-Ponte Tresa en bas)

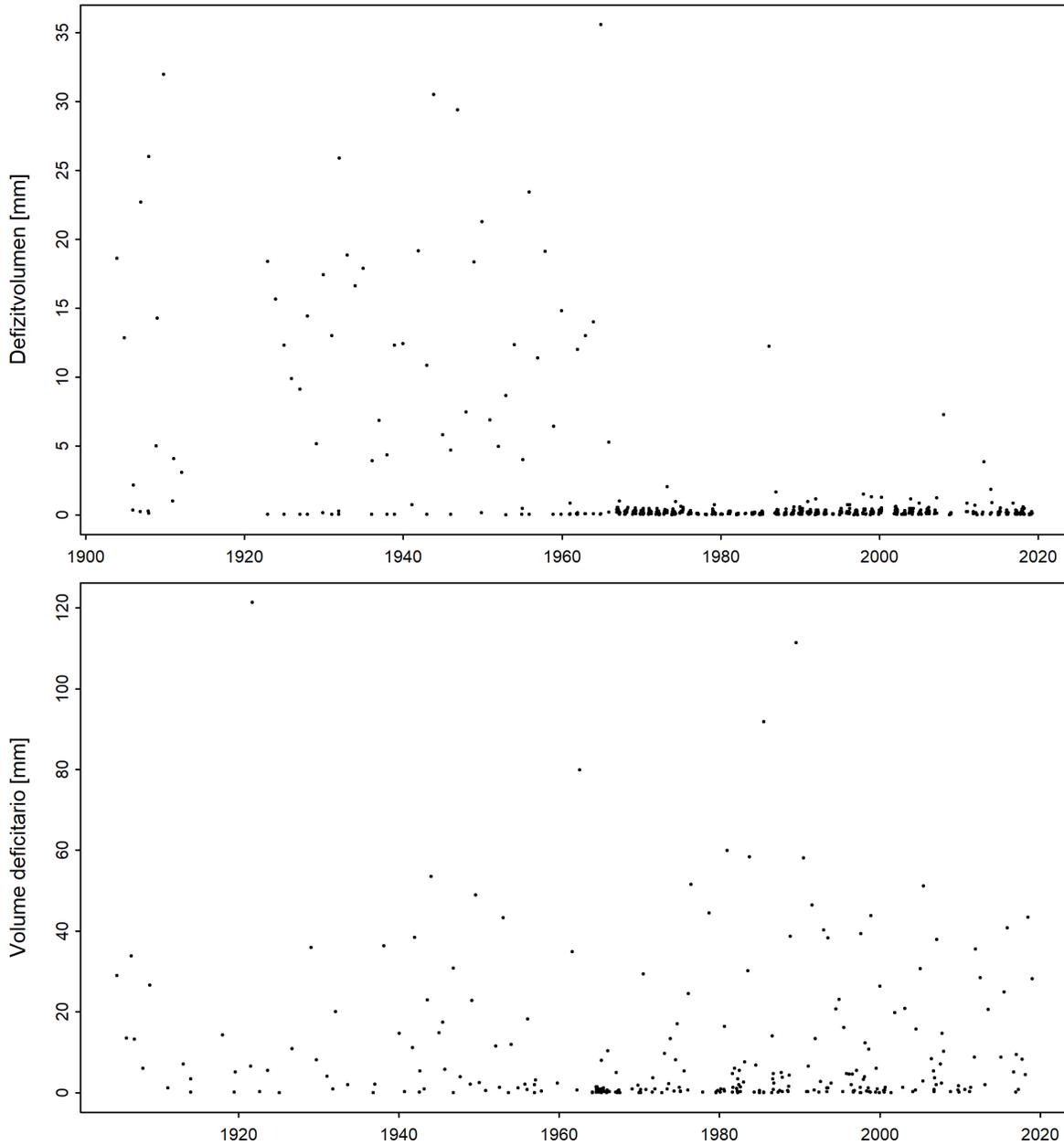


FIGURE 6 : Série chronologique des volumes déficitaires [mm] (Vispa-Visp en haut, Tresa-Ponte Tresa en bas)

Seules les données relevées à partir de l'installation d'un limnigraphe sont prises en compte dans le cadre des évaluations suivantes. La période d'étude peut être restreinte davantage en raison de points de rupture dans la série de données. Cette manière de procéder vise à garantir que des séries chronologiques les plus homogènes possible sont évaluées.

Pour identifier d'éventuelles ruptures dans la série des M7Q, des durées d'étiages et des volumes déficitaires, 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 connues qui sont susceptibles de jouer un rôle dans le

bassin versant. Lorsqu'ils peuvent être expliqués compte tenu de l'intervalle de confiance valable au moment de leur occurrence, il convient de subdiviser la série de données en conséquence et de considérer uniquement la période la plus actuelle comme période d'étude. L'expérience montre que les points de rupture dans les paramètres que sont le débit d'étiage, la durée d'étiage et le volume déficitaire ne divergent guère et peuvent être affectés à la même perturbation dans le bassin versant. Par conséquent, la même période d'étude est déterminée pour tous les paramètres d'une station.

La figure 6 du rapport de la station (figure 7 dans le présent guide) montre la série chronologique des NM7Q à l'exemple de la station Vispa-Visp. Appliquée à la série des NM7Q dès l'installation d'un limnigraphe en mars 1922, l'analyse des ruptures met en évidence un point significatif vers l'année 1967 (intervalle de confiance 1963-1968). Il ressort des documents relatifs à la station et au bassin versant que le lac de barrage de Mattmark a été mis en service en 1967. Le point de rupture est donc jugé plausible et la série chronologique est raccourcie à la période 1967-2018 (période d'étude) pour tous les paramètres. C'est pourquoi les valeurs de la période 1903-1966 sont représentées en gris clair à la figure 7 du présent guide.

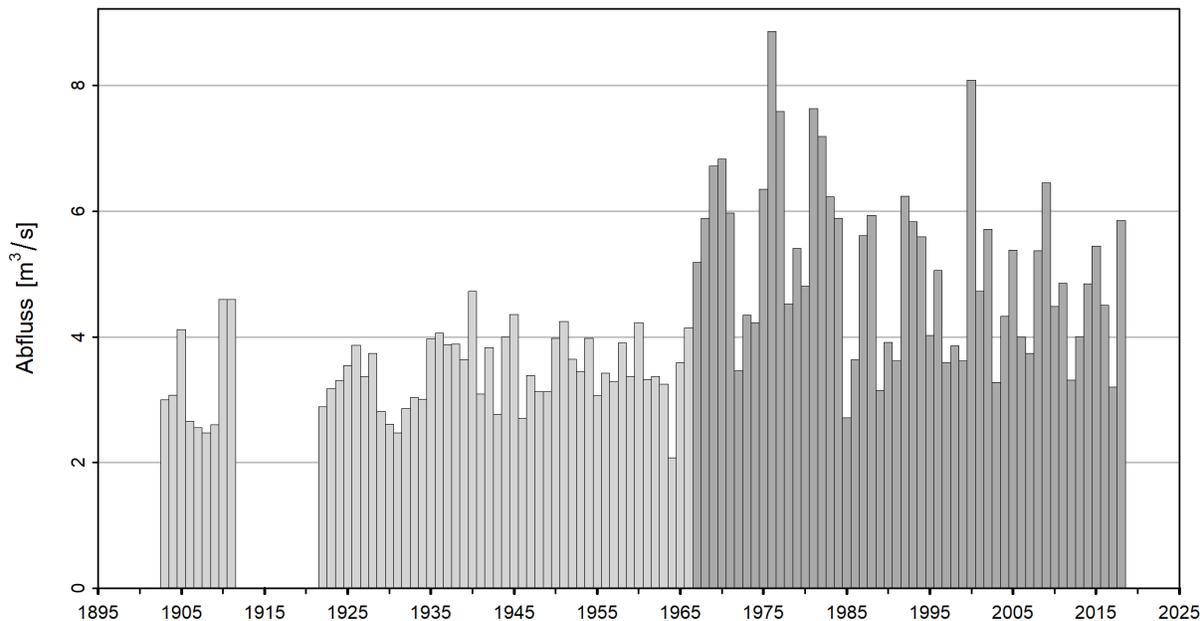


FIGURE 7 : Série chronologique des NM7Q (Vispa-Visp [m^3/s] (1903-2018), gris clair : NM7Q non pris en compte dans la statistique, gris foncé : NM7Q pris en compte)

3 Explications concernant les méthodes utilisées

Pour calculer les valeurs de retour des débits d'étiage NQ_T , l'OFEV utilise deux méthodes paramétriques : Block Maximum (BLOCK) et Peaks Over Threshold (POT). Pour calculer les valeurs de retour des durées d'étiage ND_T et des volumes déficitaires DV_T , il n'emploie que la méthode 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 présentées dans le tableau ci-dessous :

Méthode paramétrique	Paramètres	Données d'entrée
Block Minimum (BLOCK)	μ Paramètre de position σ Paramètre d'échelle κ Paramètre de forme	NM7Q
Peaks Over Threshold (POT)	λ Taux d'occurrences σ Paramètre d'échelle ² κ Paramètre de forme	M7Q / Durées d'étiages / Volumes déficitaires

Les méthodes ne peuvent être appliquées que dans l'hypothèse où les valeurs relatives aux débits d'étiage, aux durées d'étiage et aux volumes déficitaires prises en compte dans la statistique sont indépendantes les unes des autres. Par conséquent, l'indépendance des valeurs est au préalable contrôlée et celles-ci sont, si nécessaire, corrigées (cf. point 1.3 du présent guide).

3.1 Méthode Block Minimum (BLOCK)

Dans la méthode BLOCK, la valeur minimale enregistrée au cours d'un intervalle de temps (= bloc) correspond à la valeur extrême. L'OFEV prend comme bloc l'année d'étiage. S'agissant du débit d'étiage, les minima annuels des M7Q (c.-à-d. les NM7Q, cf. point 1.1 du présent guide) représentent les valeurs d'entrée. 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 2). Afin de pouvoir appliquer la méthode de manière identique pour ce qui est des minima annuels, il y a lieu de convertir les données d'entrée en une valeur négative (multiplier par -1). L'estimation obtenue pour μ doit être reconvertie en une valeur positive ensuite, avant la détermination des valeurs de retour.

$$l(\mu, \sigma, \kappa) = -n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \kappa \frac{y_i - \hat{\mu}}{\sigma}\right) - \sum_{i=1}^n \left(1 + \kappa \frac{y_i - \hat{\mu}}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\kappa}} \quad (2)$$

Dans le cas du débit d'étiage, y_i correspond au minimum converti en négatif de l'année i et $\hat{\mu} = -\mu$ (cf. Coles, 2001). À l'aide des estimations obtenues pour μ , σ et κ la formule 3 détermine ensuite la valeur annuelle T probable de NQ_T ($p = \frac{1}{T}$).

²La 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.

$$NQ_T = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\kappa} \{1 - [-\log(1-p)]^{-\kappa}\} & \text{si } \kappa \neq 0 \\ \mu - \sigma \log[-\log(1-p)] & \text{si } \kappa = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Pour calculer les valeurs de retour des durées d'étiage et des volumes déficitaires, l'OFEV n'applique pas la méthode BLOCK. En effet, l'expérience a montré que les durées d'étiage et les volumes d'étiage les plus faibles d'une année équivalaient souvent à zéro, ce qui entraîne des problèmes lors du calcul. Des valeurs nulles peuvent également survenir s'agissant des NM7Q; ce cas de figure ne se présente toutefois guère aux stations de mesure de l'OFEV. Si de telles valeurs se font jour, il convient d'appliquer une méthode de probabilité conditionnelle (cf. DWA 2022).

3.2 Méthode Peaks over Threshold (POT)

La méthode POT considère comme valeurs extrêmes celles qui dépassent une valeur seuil u élevée. Selon la théorie des valeurs extrêmes, lorsque la valeur u est élevée, le nombre de pics supérieurs à cette valeur seuil correspond à la répartition du taux d'occurrences λ selon la loi de Poisson. Les amplitudes des dépassements de la valeur seuil respectent la distribution de la loi de Pareto généralisée (Generalized Pareto Distribution). Dans le cas du débit d'étiage, toute valeur inférieure à une valeur seuil basse est de manière analogue considérée comme un événement extrême. Dans le cadre de la préparation des données d'entrée M7Q, seules les valeurs inférieures au quantile Q_{80} sont considérées comme des étiages (cf. chap. 1 du présent guide). Dans les rapports des stations, cette valeur seuil est appelée u_{80} .

La valeur seuil u est fixée à l'aide des méthodes d'ajustement graphiques Mean Residual Life Plot et Fitrage Plot (cf. Coles 2001). Les valeurs qui dépassent ce 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 4). Dans le cas du débit d'étiage, les valeurs sont converties en négatif avant l'adaptation du modèle, comme dans le cadre de la méthode BLOCK.

$$l(\lambda, \sigma, \kappa) = n \log \lambda - \lambda t - n \log \sigma - \left(1 + \frac{1}{\kappa}\right) \sum_{i=1}^n \log \left(1 + \frac{\kappa w_i}{\sigma}\right) \quad (4)$$

w_i est un élément de la série des n franchissements à la hausse ou à la baisse des valeurs seuils observés. Le paramètre λ correspond au taux d'occurrences, c'est-à-dire au nombre de franchissements 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. Les valeurs de retour (NQ_T , ND_T , DV_T) peuvent être calculées au moyen des estimations de paramètre figurant dans la formule 5.

$$NQ_T/ND_T/DV_T = u + \frac{\sigma}{\kappa} \left[\left(\frac{\lambda}{1-p} \right)^\kappa - 1 \right], T = \frac{1}{p} \quad (5)$$

3.3 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 NQ_T , ND_T et DV_T obtenus par calcul changent 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 du présent guide répertorie toutes les variantes de modèle étudiées par l'OFEV dans la méthode BLOCK ; le tableau 2 du présent guide énumère celles étudiées dans la méthode POT.

Tableau 1 : Variantes utilisées dans la méthode BLOCK ; paramètre de position μ (mu), paramètre d'échelle σ (sigma), paramètre de forme κ (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	Évolution non continue de μ au moment t_0	$\mu = a_1 + a_2 * i, \sigma, \kappa,$ $i = 0$ si $t < t_0, i = 1$ si $t \geq t_0$	4

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

Modellvarianten 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	Évolution non continue de σ au moment t_0	$\sigma = b_1 + b_2 * i, \kappa,$ $i = 0$ si $t < t_0, i = 1$ si $t \geq t_0$	3

Les variantes “ mujump ” et “ sigjump ” tiennent compte d'une évolution non continue respectivement de μ et de σ au moment t_0 et tentent ainsi de représenter des changements structurels abrupts dans le bassin versant, tels que la construction d'un barrage ou la mise en service d'une centrale hydroélectrique ou d'une station d'épuration des eaux usées. 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 points de rupture significatifs causés par de tels changements entraînent une réduction de la période d'étude (cf. fin du chap. 2 du présent guide). À l'inverse, les points de rupture jugés non compréhensibles ou non significatifs sont considérés comme moment t_0 des variantes “ mujump ” et “ sigjump ”.

Un ordinogramme (figure 8 du présent guide) est utilisé afin de sélectionner la plus appropriée des différentes variantes. La statistique de déviance sert à évaluer l'adaptabilité d'un modèle à un

certain ensemble de données. Elle permet de vérifier si les variantes de ce modèle diffèrent de manière significative (cf. Coles 2001). Si aucune divergence n'est constatée, le modèle le plus simple est choisi. 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

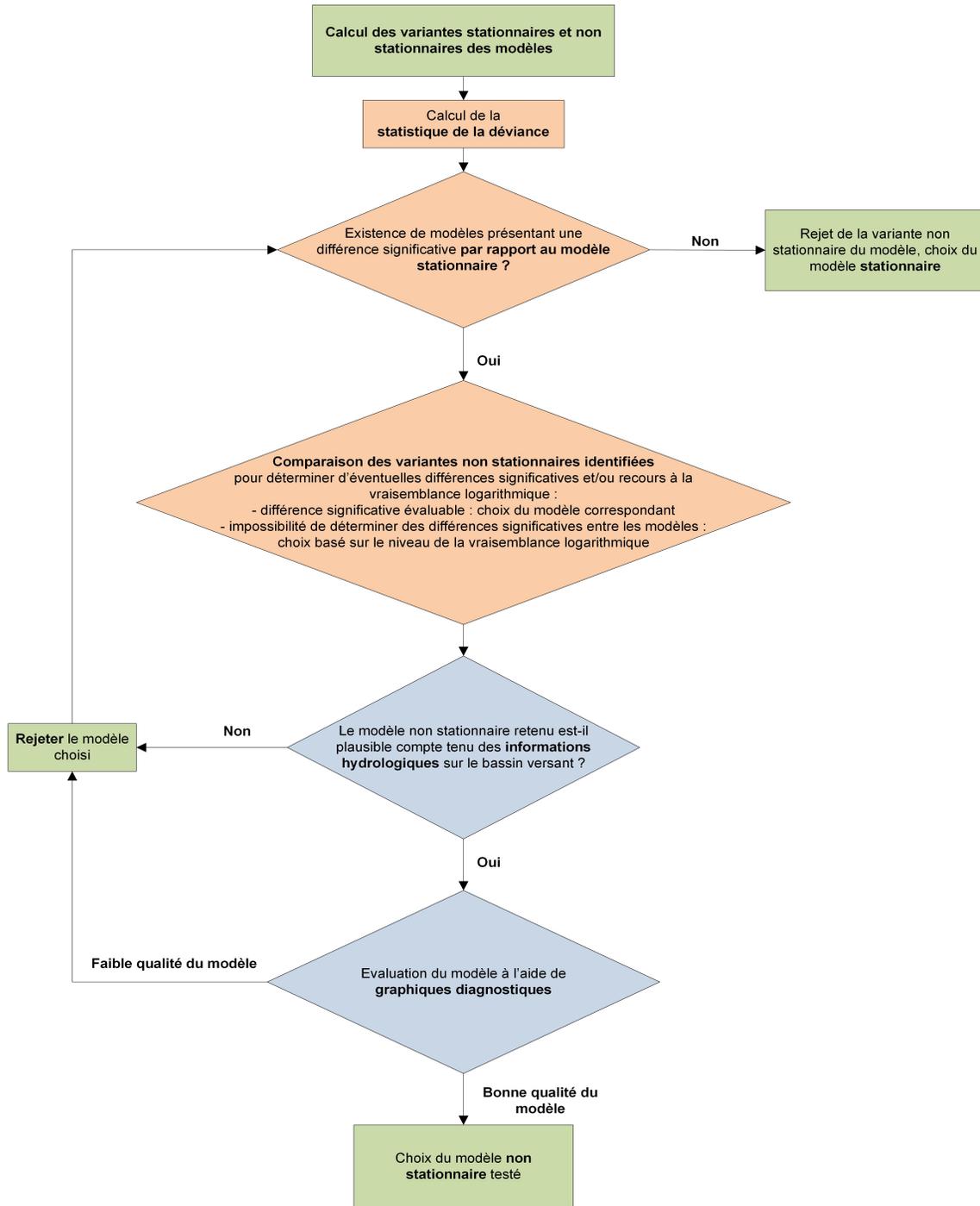


FIGURE 8 : Procédure de sélection de la variante stationnaire ou non stationnaire la plus pertinente

4 Explications concernant les chapitres 2.1 à 2.3, consacrés aux résultats

Les points 2.1 à 2.3 du rapport de la station présentent les résultats des méthodes paramétriques pour chacun des paramètres. Pour ce qui est du débit d'étiage, les méthodes BLOCK et POT sont appliquées. C'est pourquoi il convient de séparer le point 2.1 du rapport de la station en deux et de prévoir un point supplémentaire comparant les résultats des deux méthodes. Les points consacrés aux résultats s'articulent autour des contenus suivants :

- description du modèle et de ses données d'entrée ;
- tableau avec une estimation des valeurs paramétriques ;
- graphiques diagnostiques et évaluation ;
- tableau des valeurs de retour NQ_T , ND_T ou DV_T

À noter qu'il y a lieu de ne présenter dans ces points que la méthode jugée la plus pertinente.

4.1 Description du modèle et de ses données d'entrée

Les données d'entrée du modèle disponibles et la détermination de la période d'étude sont expliquées au chapitre 1, consacré aux bases de données, du rapport de la station (cf. chap. 2 du présent guide). Le chapitre 2 du rapport de la station comprend quant à lui quelques illustrations complémentaires de la base de données qui correspondent à la méthode appliquée. Il motive aussi brièvement le choix de la variante retenue.

Pour procéder aux calculs selon la méthode POT, il importe de fixer une valeur seuil u (cf. point 3.2 du présent guide). 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 de la station. Pour les fondements théoriques, il convient de référer à Coles (2001). Dans la pratique, il n'est pas toujours facile d'interpréter un tel diagramme. Dans le cas des maxima (durée d'étiage et volume déficitaire), l'interprétation a pour objectif d'identifier la valeur la plus basse de la valeur 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 des minima (débit d'étiage), la valeur seuil la plus élevée est par conséquent recherchée.

Le choix de u peut être vérifié à l'aide d'autres méthodes (Fit Range Plot, p. ex), qui ne sont toutefois pas contenues dans le rapport de la station. Dans le cas de la Vispa, la valeur seuil u est fixée à 5.8 m³/s (figure 9 du présent guide).

Pour se faire une idée des franchissements à la hausse ou à la baisse des valeurs seuils 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 des points 2.1.2, 2.2 et 2.3 du rapport de la station. La légende de cette figure spécifie le nombre d'événements extrêmes. Il convient de relever qu'il s'agit là de valeurs corrigées de l'effet cluster, ce qui signifie qu'elles ne correspondent qu'à des événements indépendants (cf. point 1.3 du présent guide). Dans le cas de la Vispa,

l'évaluation identifie 50 événements (cf. figure 10 du présent guide), c'est-à-dire presque autant que les valeurs utilisées dans le cadre de la méthode BLOCK pour la période d'étude 1967-2018. Dans la littérature consacrée à l'hydrologie (en lien avec la statistique des crues), 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). L'expérience a montré que cela n'est souvent pas possible pour ce qui est des étiages. En effet, le petit nombre d'événements importants/très extrêmes et le grand nombre d'événements peu importants/de faible ampleur constituent un problème spécifique à l'adaptation du modèle dans le cas des étiages (Engeland et al. 2004). Dans le cadre de la détermination de la valeur seuil u pour le débit d'étiage, il convient donc de tenir compte d'un nombre de valeurs au moins équivalent au nombre d'années d'observation (au moins autant que dans le cadre de la méthode BLOCK), pour autant que cela se justifie par le Mean Residual Life Plot et le Fit Range Plot. Ce nombre n'est souvent pas atteint pour la durée d'étiage et le volume déficitaire.

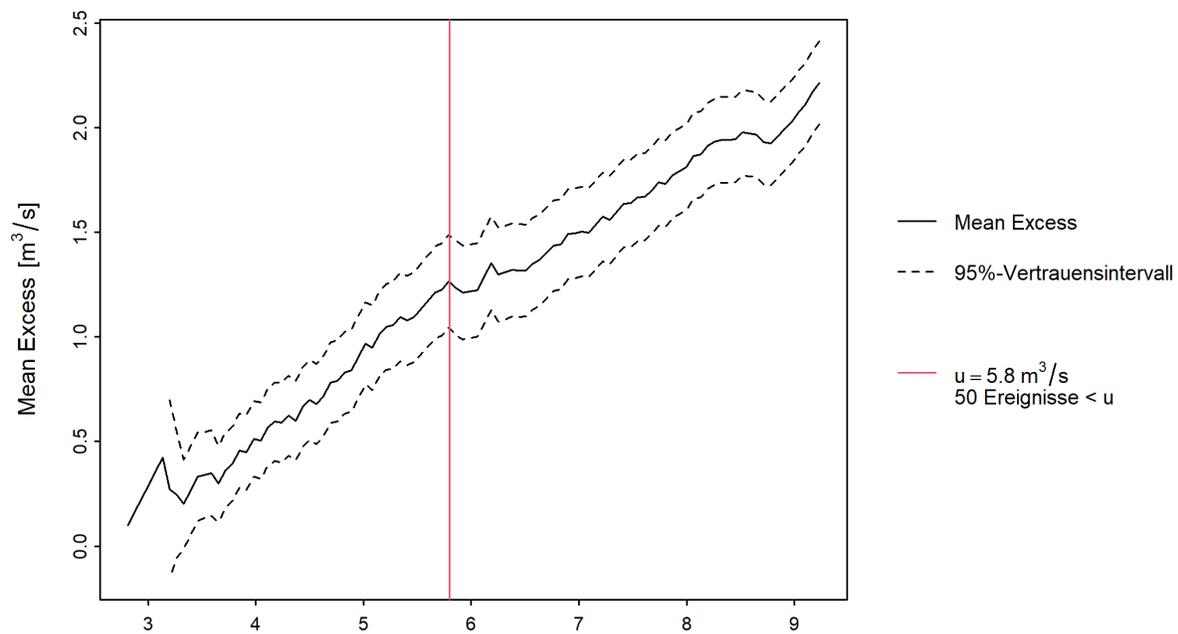


FIGURE 9 : Mean Residual Life Plot avec la valeur seuil u (ligne rouge), dépassement moyen (ligne noire), intervalle de confiance à 95 % (traitillés) (Vispa-Visp)

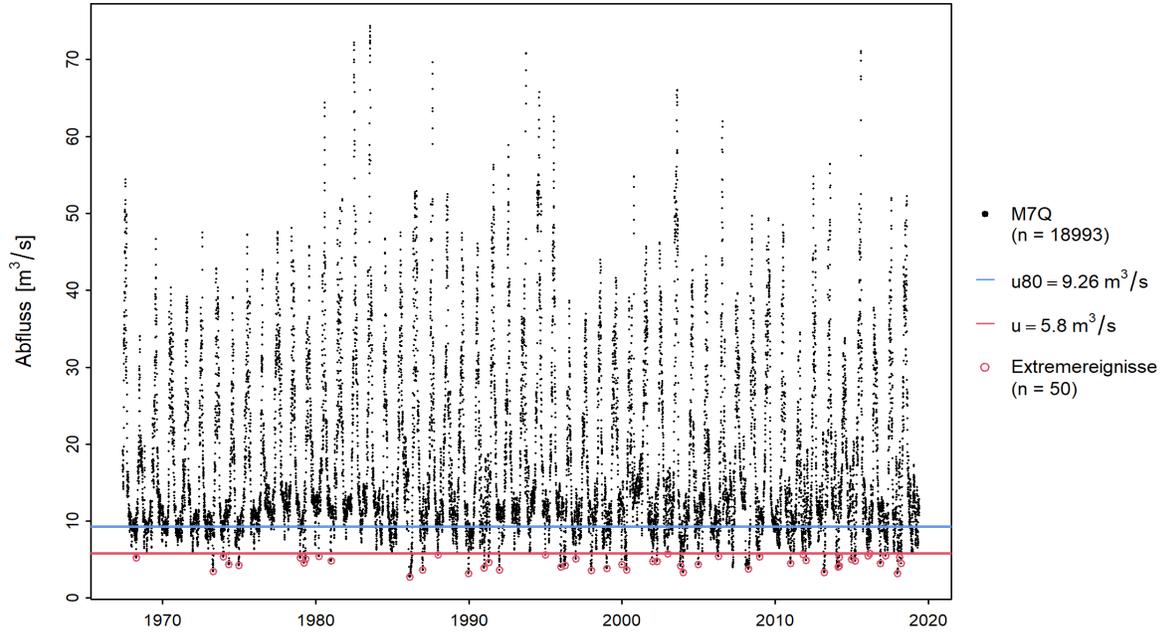


FIGURE 10 : Juxtaposition des M7Q (en noir) et des valeurs extrêmes utilisées dans la méthode POT (en rouge) (Vispa-Visp)

4.2 Tableau présentant l'estimation des valeurs paramétriques

Pour la variante utilisée, 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 du présent guide).

Tableau 3 : Nombre de valeurs utilisées et estimation des valeurs paramétriques dans la variante non stationnaire de la méthode BLOCK, à l'exemple de la station Vispa-Visp

Nombre de valeurs n	Moment t_0	Paramètre de position $\hat{\mu}$		Paramètre d'échelle $\hat{\sigma}$	Paramètre de forme $\hat{\kappa}$
		a_1	a_2		
52	1985	-6.04	0.95	1.34	-0.4794

Tableau 4 : Valeur seuil utilisée, nombre de valeurs et estimation des valeurs paramétriques dans la variante stationnaire de la méthode POT, à l'exemple de la station Ticino-Bellinzona

Valeur seuil u	Nombre de valeurs n	Taux d'occurrences $\hat{\lambda}$	Paramètre d'échelle $\hat{\sigma}$	Paramètre de forme $\hat{\kappa}$
23.14 m ³ /s	110	1.09	5.03	-0.44

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) du présent guide. Dans l'exemple ci-dessus (tableau 3 du présent guide), le paramètre de position a les valeurs suivantes : $\hat{\mu} = a_1$ pour la période avant le point de rupture ($t < t_0$) et $\hat{\mu} = a_1 + a_2$ pour la période après le point de rupture ($t \geq t_0$; cf.

tableau 2 du présent guide).

4.3 Graphiques diagnostiques et leur évaluation

L'adéquation 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 et quantiles théoriques*) correspond aux données observées (*probabilité empirique et quantiles empiriques*). Plus les données sont proches de la première bissectrice ($Y = X$, ligne rouge), plus l'adéquation du modèle est grande (figure 11 du présent guide, en haut). Le *Probability Plot* compare la fréquence théorique totale et la fonction de répartition théorique cumulée. Le *Quantile Plot* compare quant à lui 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 l'adéquation 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 11 du présent guide, 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 l'adéquation 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 11 du présent guide, 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 d'adéquation que donne la courbe adaptée aux données empiriques.

La figure 11 présente les graphiques diagnostiques établis pour la variante stationnaire de la méthode BLOCK appliquée à la station Vispa-Visp. Dans l'ensemble, le *Probability Plot* dénote une adaptation moyenne à bonne du modèle aux observations. Les valeurs s'écartent quelque peu de la diagonale en particulier dans le secteurs moyen. Le *Quantile Plot* montre également une adaptation moyenne à bonne. Dans ce cas, ce sont les débits d'étiage moins extrêmes (en bas à gauche) qui s'écartent très légèrement de la diagonale. Enfin, dans le *Return Level Plot*, les observations ne divergent que très peu de la courbe rouge et demeurent dans l'intervalle de confiance. Dans cet exemple, il est possible de conclure à une bonne adaptation du modèle.

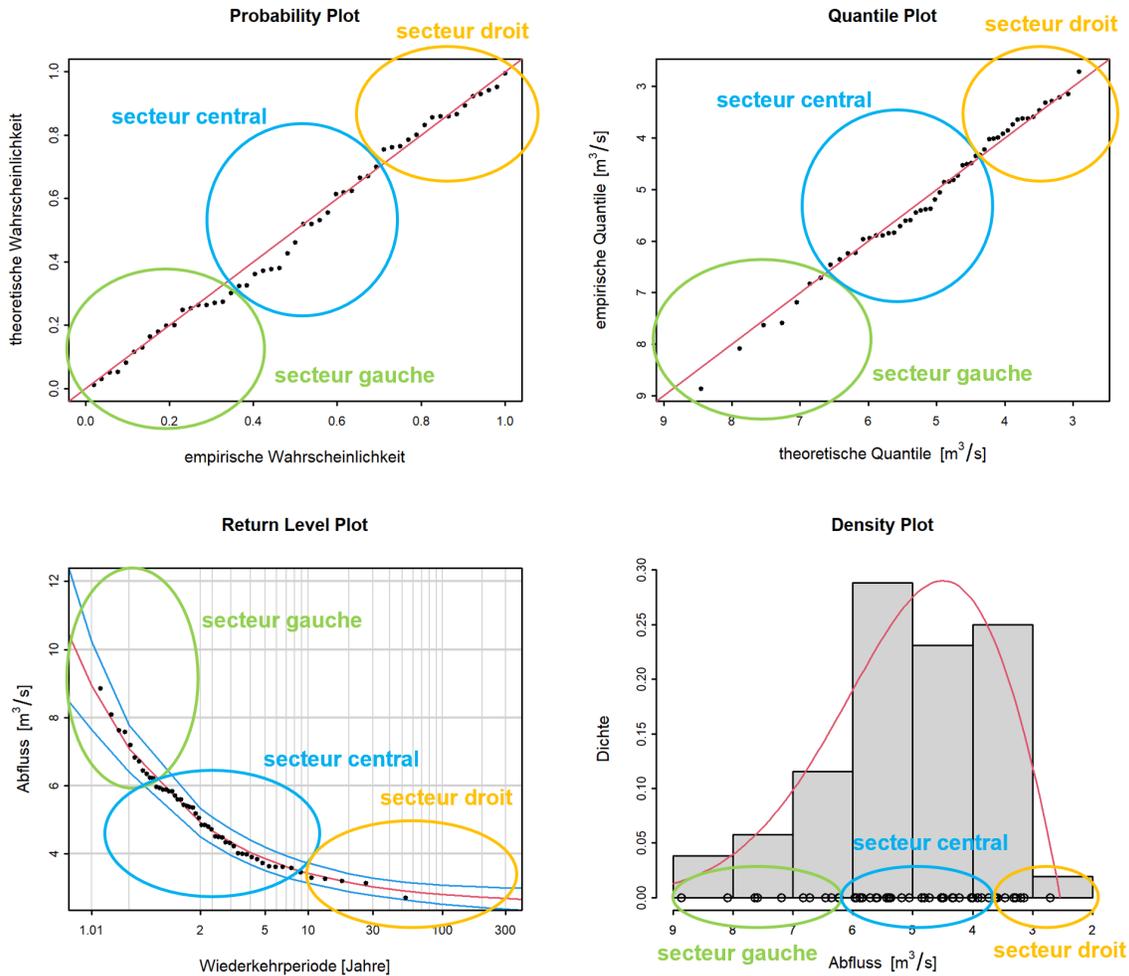


FIGURE 11 : Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante stationnaire du modèle (Vispa-Visp)

Pour faciliter l'interprétation, les rapports des stations tentent d'évaluer les graphiques diagnostiques à l'aide de différents critères. Ils apprécient notamment l'adaptation dans les secteurs gauche, central et droit. La délimitation de ces domaines étant subjective, elle peut dès lors varier légèrement d'une station à l'autre. En principe, ces domaines correspondent toutefois approximativement à ceux encadrés dans la figure 11 du présent guide. L'évaluation de l'adaptation est résumée dans un tableau (tableau 5 du présent guide). La largeur de l'intervalle de confiance fait également l'objet d'une évaluation.

Tableau 5 : Exemple d'évaluation des graphiques diagnostiques (figure 11 du présent guide).

Critère	Évaluation	Remarque
Adaptation secteur gauche	moyenne-bonne	-
Adaptation secteur central	bonne	-
Adaptation secteur droit	bonne	-
Intervalle de confiance	faible	-

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 12 du présent guide reproduit les graphiques diagnostiques de la variante “ mujump ” de la méthode BLOCK pour la station Vispa-Visp. Le Residual Probability Plot ne permet pas d’identifier d’adaptation nettement meilleure dans les trois secteurs (cf. figure 11 du présent guide). Les valeurs du secteur gauche sont légèrement mieux adaptées dans le Residual Quantile Plot. Dans le secteur droit, en revanche, les valeurs sont moins bien adaptées et sont sous-estimées.

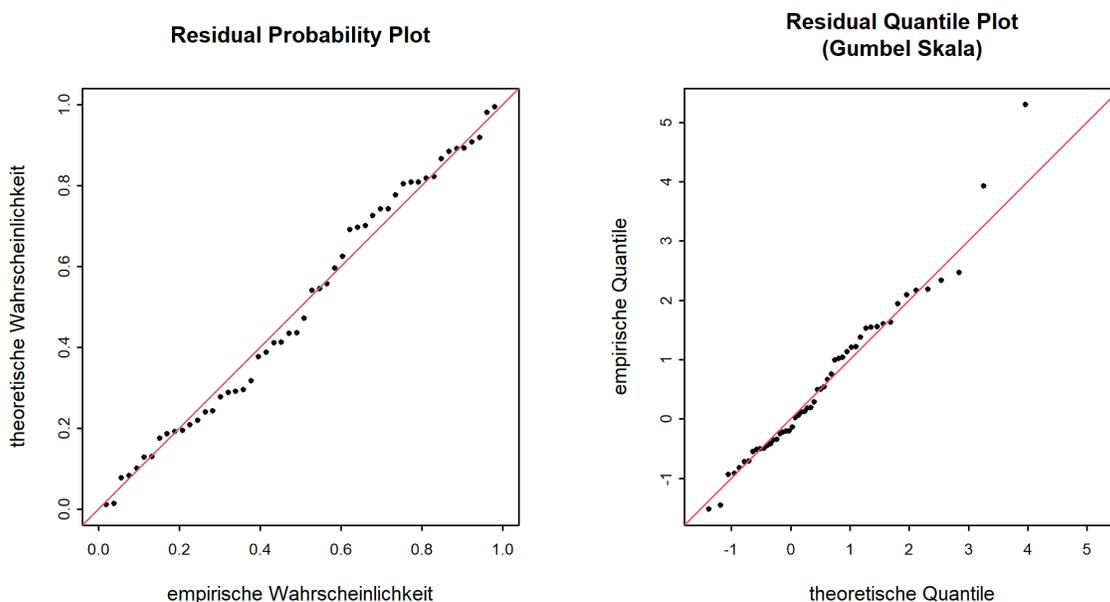


FIGURE 12 : Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante non stationnaire du modèle (Vispa-Visp)

D’autres exemples de graphiques diagnostiques de variantes tant stationnaires que non stationnaires de la méthode BLOCK figurent en annexe.

4.4 Tableaux des valeurs de retour de NQ_T , ND_T et DV_T

Après les graphiques diagnostiques, le rapport présente un tableau qui énumère les débits (NQ_T), les durées d’étiages (ND_T) et les volumes déficitaires (DV_T) déterminés à l’aide du modèle pour une période de retour T prédéfinie. Le tableau 6 du présent guide reprend l’exemple de la variante stationnaire de la méthode POT pour le débit NQ_T à la station Ticino-Bellinzona. Dans les variantes stationnaires, les NQ_T énumérés valent pour la période d’étude totale considérée ; dans les variantes non stationnaires, les NQ_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. intervalle de confiance de 95 %, méthode Delta) pour la station Ticino-Bellinzona, calculé pour l’année la plus récente (2018)

NQ_T (NM7Q)	Limite de confiance inferiore [m^3/s]	Débit [m^3/s]	Limite de confiance supérieure [m^3/s]
NQ_2	19.0	19.8	20.7
NQ_{10}	14.8	15.7	16.7
NQ_{30}	13.3	14.2	15.1
NQ_{100}	12.3	13.2	14.2
NQ_{300}	11.6	12.7	13.7

L’intervalle de confiance spécifié permet de tirer des conclusions quant à l’incertitude des valeurs de retour obtenues par calcul, cette incertitude provenant des variations aléatoires dans l’échantillon (c.-à-d. la série de mesures). L’intervalle de confiance ne tient pas compte d’autres incertitudes, notamment 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 NQ_T , les ND_T et les DV_T et sur une distribution asymptotique normale. Il est difficile d’évaluer l’adéquation 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, il convient de se référer à Coles (2001, pp. 56-57 et 82).

4.5 Comparaison des résultats des différentes méthodes (uniquement NQ_T)

Au point 2.1.3 du rapport de la station, les variantes jugées les plus adaptées de la méthode BLOCK et de la méthode POT sont comparées entre elles pour ce qui est du débit d’étiage. La comparaison se fait sous forme de graphique (cf. figure 13 du présent guide et figure 10 du rapport de la station). Outre le NQ_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 NQ_T calculés ne sont valables que pour un moment donné. Comme dans les points 2.1.1 et 2.1.2, 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 faible mesuré à chaque station (ligne bleue). Cette représentation permet de comparer directement les résultats présentés séparément sous forme de tableaux dans les deux points précédents.

L’exemple de la station Vispa-Visp (figure 13 du présent guide) montre que le débit calculé avec la méthode POT est pour presque toutes les périodes de retour légèrement plus élevé que le débit de la variante “ mujump ” de la méthode BLOCK ; l’écart se creuse légèrement lors de périodes de retour plus longues. Avec la variante “ mujump ” de la méthode BLOCK, l’intervalle de confiance concernant NQ_2 est faible, mais augmente lors de périodes de retour plus longues. Lorsque la méthode POT est appliquée, l’intervalle de confiance diminue en revanche lors de périodes de retour plus longues et est très faible pour NQ_{300} .

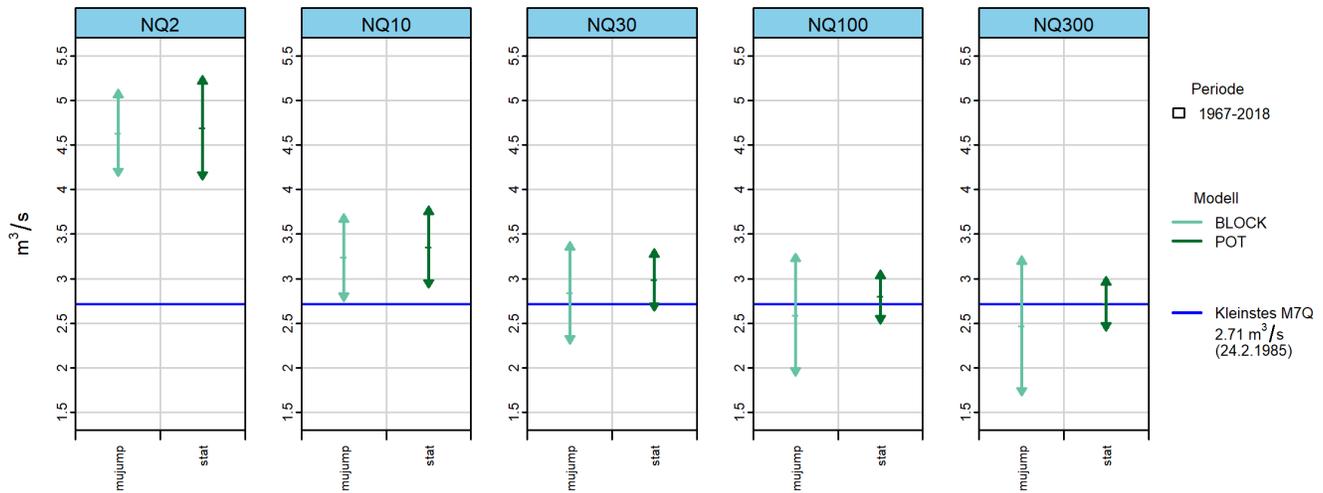


FIGURE 13 : Les NQ_T [m^3/s] et leurs intervalles de confiance à 95 %, calculés à l'aide de la variante stationnaire des méthodes BLOCK et POT (Vispa-Visp)

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 encore plus basse. Dans la méthode POT, un choix judicieux de la valeur seuil u permet de diminuer le risque d'évaluer des débits non extrêmes.

5 Bibliographie

Bai, J., Perron, P. (1998). Estimating and Testing Linear Models with Multiple Structural Changes. *Econometrica*, 66(1), 47–78.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (éd.) (2005). Wasserwirtschaftlicher Bericht - Niedrigwasserperiode 2003. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 162p. ISBN 3-937911-03-0.

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

DWA/DVWK (éd.) (1992). DVWK-R 121 - Niedrigwasseranalyse. Teil II : Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits.

Engeland, K., Hisdal, H., Frigessi, A. (2004). A Practical Extreme Value Modelling of Hydrological Floods and Droughts : A Case Study. *Extremes* 7, 5-30 (2004).

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

Maurer, T., Nilson, E., Krahe, P. (2011). Entwicklung von Szenarien möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Abfluss- und Wasserhaushaltskenngrößen in Deutschland. acatech MATERIALIEN, Nr. 11. Diskussionspapier für die acatech Projektgruppe “Georessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel”.

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

A Annexe

A.1 Exemples de graphiques diagnostiques

Variante stationnaire

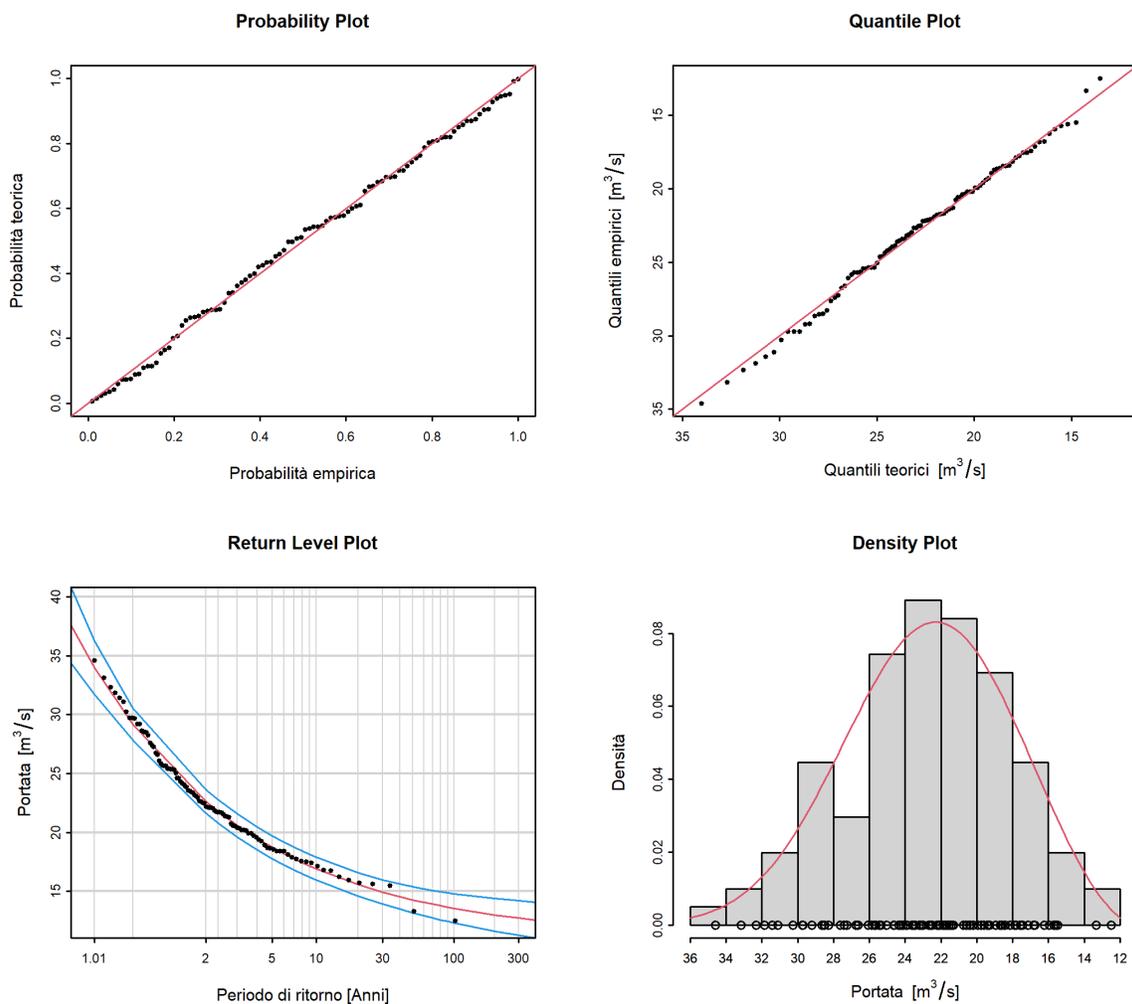


FIGURE 14 : Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante stationnaire du modèle présentant une bonne adaptation dans tous les secteurs (méthode BLOCK, Ticino-Bellinzona)

Tableau 7 : Interprétation des graphiques diagnostiques (figure 14 du présent guide).

Critère	Évaluation	Remarque
Adaptation secteur gauche	bonne	-
Adaptation secteur central	bonne	-
Adaptation secteur droit	moyenne-bonne	-
Intervalle de confiance	faible	-

Le Probability Plot de même que le Quantile Plot révèlent une bonne adaptation du modèle aux observations (figure 14 du présent guide), même si de légers écarts apparaissent dans le secteur droit. Toutes les observations se situent de plus dans l'intervalle de confiance, qui est relativement étroit. Dans l'ensemble, cet exemple présente une bonne adaptation.

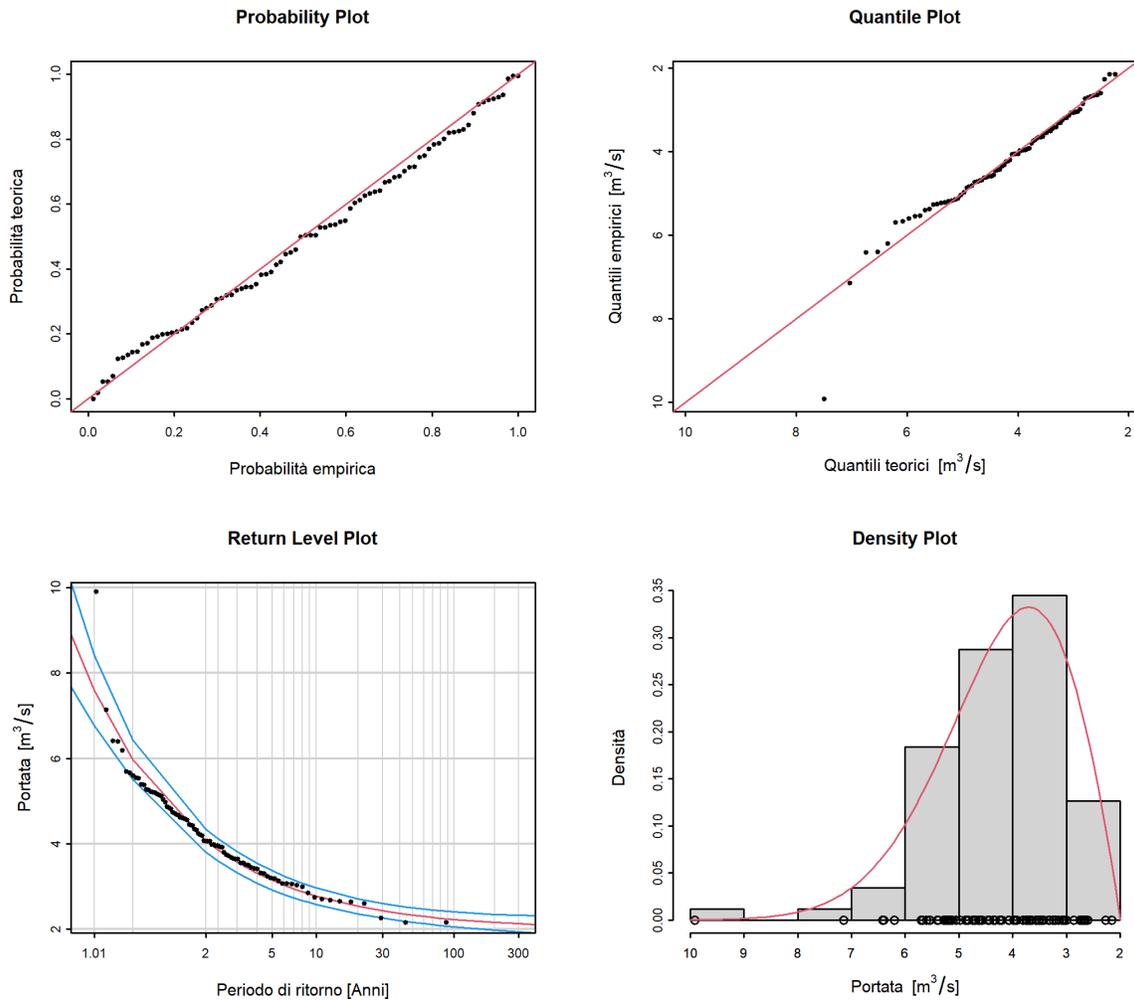


FIGURE 15 : Exemple de graphiques diagnostiques pour une variante stationnaire du modèle présentant une mauvaise adaptation dans le secteur gauche (méthode BLOCK, Moesa-Lumino)

Tableau 8 : Interprétation des graphiques diagnostiques (figure 15 du présent guide).

Critère	Évaluation	Remarque
Adaptation secteur gauche	moyenne	Une valeur fortement sous-estimée, sinon bon.
Adaptation secteur central	moyenne-bonne	-
Adaptation secteur droit	bonne	-
Intervalle de confiance	fiable	Une valeur non comprise dans l'intervalle de confiance.

Le Probability Plot de même que le Quantile Plot révèlent une adaptation moyenne à bonne du modèle aux observations (figure 15 du présent guide). Le Quantile Plot révèle une bonne adaptation dans le secteur droit. Il montre cependant que le modèle représente relativement mal le débit NM7Q le plus élevé (secteur gauche). Cet écart transparait également dans le Return Level Plot, où l'observation la plus élevée se situe à l'extérieur de l'intervalle de confiance. Le Density Plot débouche à nouveau sur une appréciation moyenne à bonne. Dans l'ensemble, cet exemple présente une adaptation moyenne.

Variante non stationnaire

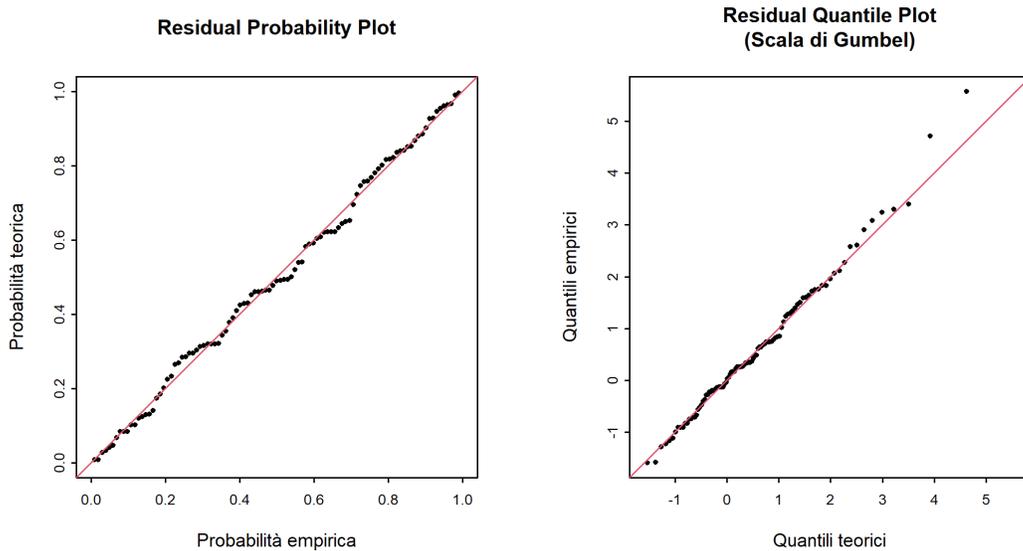


FIGURE 16 : Exemple de graphiques diagnostiques d'une variante non stationnaire (méthode BLOCK, " mujump 1950 ", Ticino-Bellinzona)

La figure 16 du présent guide reproduit les graphiques diagnostiques de la variante " mujump " de la méthode BLOCK pour la station Ticino-Bellinzona. Dans les deux diagrammes, l'adaptation est la même que dans la variante stationnaire (figure 14 du présent guide). Un changement n'est guère perceptible.

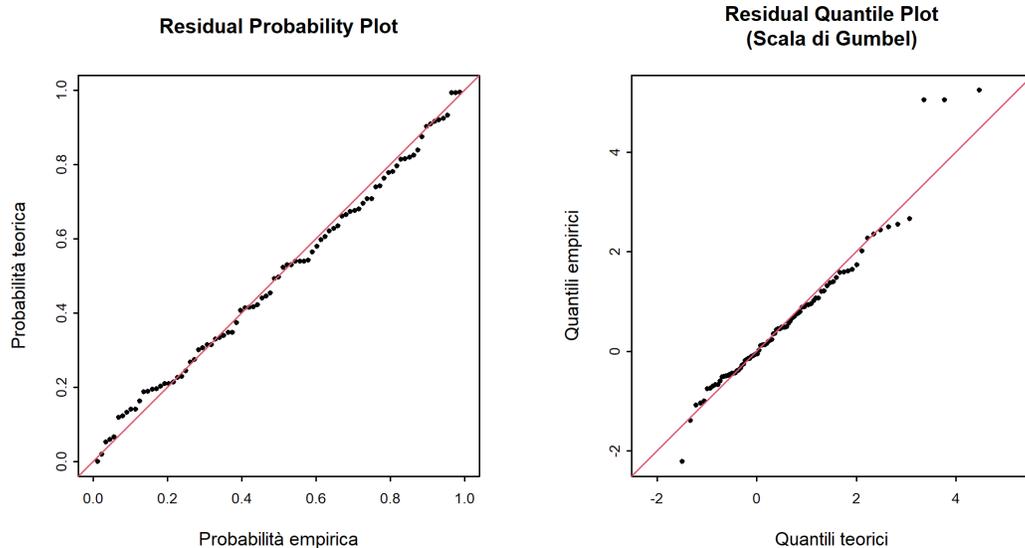


FIGURE 17 : Exemple de graphiques diagnostiques d’une variante non stationnaire (méthode BLOCK, “ mujump 1936 ”, Moesa-Lumino, Sassello

La figure 17 du présent guide montre les graphiques diagnostiques de la variante “ mujump ” de la méthode BLOCK pour la station Moesa-Lumino. Avec le Residual Probability Plot, l’adaptation ressemble à celle de la variante stationnaire (figure 15 du présent guide). Avec le Residual Quantile Plot, elle est notamment plus mauvaise dans le secteur droit et légèrement meilleure dans le secteur gauche.

Index

A

Année d'étiage 3, 5, 6
Attribution des NM7Q à une année 5

B

Bases de données 5

D

Declustering 5
Durée d'étiage (ND) 2, 4, 7, 8, 21
Débit d'étiage (NQ) 2, 11, 12, 21

G

Generalized Extreme Value Distribution 11
Generalized Pareto Distribution 12
Graphiques diagnostiques (non stationnaire) 21
 Residual Probability Plot 21
 Residual Quantile Plot 21
Graphiques diagnostiques (stationnaire) 19, 20
 Density Plot 19, 20
 Probability Plot (P-P-Plot) 19, 20
 Quantile Plot (Q-Q-Plot) 19, 20
 Return Level Plot 19, 20

I

Indépendance des événements (POT) 5, 11
Interactions paramètres des étiages 3
Intervalle de confiance 22

M

M7Q 2, 5–7, 11, 18
Mean residual life plot 12, 16, 17
Méthode delta 22
Méthodes paramétriques 11, 22, 23
 Block Minimum (BLOCK) 11, 22
 Peaks Over Threshold (POT) ... 11, 12, 22

N

NM7Q 2, 5, 10, 11

P

Paramètres de distribution 11, 18
 Paramètre d'échelle σ 11–13
 Paramètre de forme κ 11, 12
 Paramètre de position μ 11, 13

Taux d'occurrences λ 11, 12

Procédure de sélection du modèle 15

Période d'observation 4, 5

Période d'étude 4, 9, 10

Périodes de retour 19, 21, 22

S

Saisonnalité 6

T

Test de rupture 9, 10, 13

V

Valeur seuil 2, 12, 16–18, 23

Valeurs de retour 11, 12

 DV_T 12, 21

 ND_T 12, 21

 NQ_T 12, 21

Variantes non stationnaires 13, 18, 21

Variantes stationnaires 13, 18, 20

Volume déficitaire (DV) 3, 4, 8, 9, 21