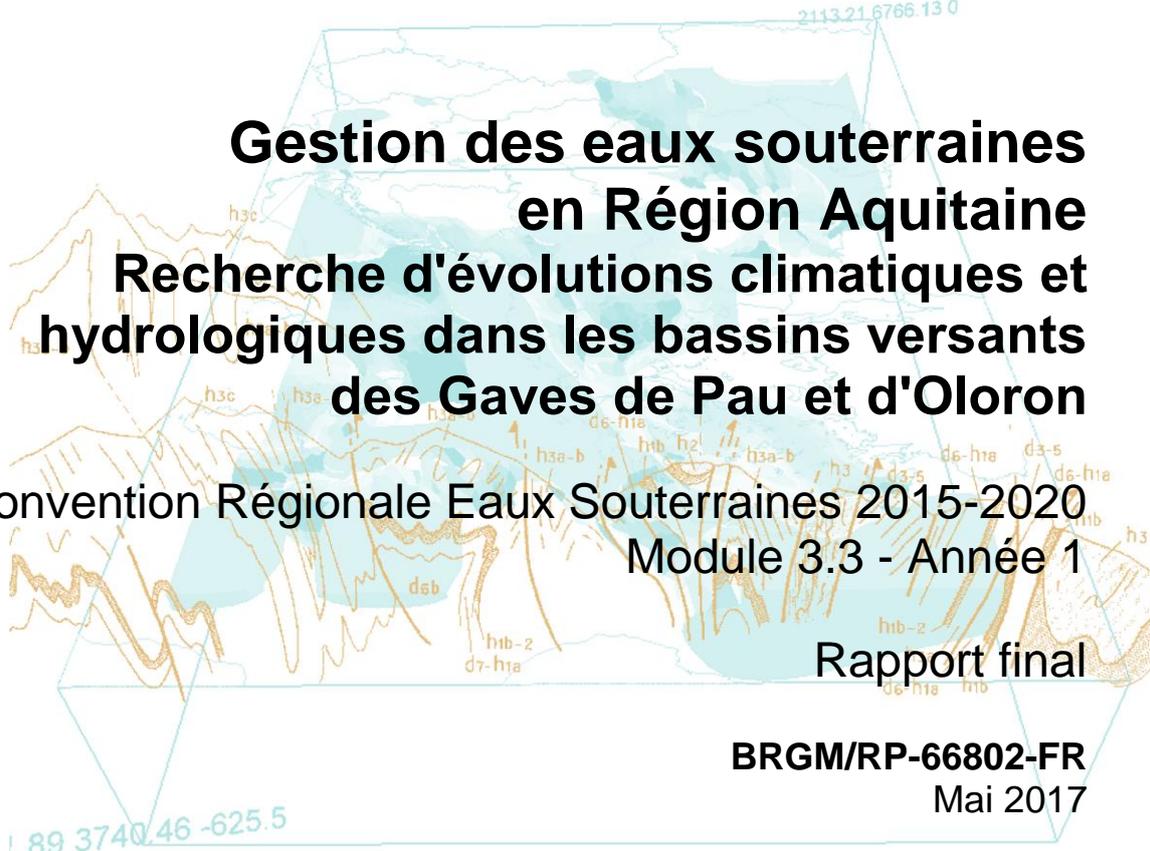


Document public



# Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

## Recherche d'évolutions climatiques et hydrologiques dans les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020  
Module 3.3 - Année 1

### Rapport final

BRGM/RP-66802-FR  
Mai 2017



Ce projet est cofinancé  
par l'Union européenne.  
L'Europe s'engage en Aquitaine  
avec le Fonds européen de  
développement régional (FEDER).





Document public

# Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine

## Recherche d'évolutions climatiques et hydrologiques dans les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron

Convention Régionale Eaux Souterraines 2015-2020  
Module 3.3 - Année 1

Rapport final

BRGM/RP-66802-FR  
Mai 2017

Étude réalisée dans le cadre des opérations  
de Service public du BRGM AP15AQI024

J.J. Seguin et A. Wuilleumier



### Vérificateur :

Nom : Y. CABALLERO  
Fonction : Responsable scientifique  
de programme

Date : 24/04/2017

Signature : 

### Approbateur :

Nom : N. PEDRON  
Fonction : Directeur du BRGM  
Nouvelle-Aquitaine

Date : 17/05/2017

Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement  
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.



Ce projet est cofinancé  
par l'Union européenne.  
L'Europe s'engage en Aquitaine  
avec le Fonds européen de  
développement régional (FEDER).



**Mots-clés** : Gave de Pau, Gave d'Oloron, Tests de tendance, Evolution climatique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**Seguin J.J., Wulleumier A. (2017)** - Gestion des eaux souterraines en Région Aquitaine - Recherche d'évolutions climatique et hydrologique dans les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron - Module 3.3 - Année 1. Rapport final. BRGM/RP-66802-FR, 122 p., 67 fig., 30 tab., 8 ann.

## Synthèse

Le présent rapport s'inscrit dans le cadre de la convention régionale eaux souterraines 2015-2020 signée entre la Région Aquitaine, l'Etat et le BRGM avec le concours financier de l'Union Européenne au travers du programme FEDER, du Département des Pyrénées-Atlantiques et de l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG). Ce rapport porte plus particulièrement sur le module 3.3 de la convention, à savoir l'étude des évolutions climatique, hydrologique et des usages de l'eau dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron.

La première année de l'étude a eu notamment pour objectifs de :

- suivre et participer aux travaux de l'étude Adour 2050, afin de s'assurer de la bonne cohérence des investigations conduites à l'aide de fonds publics sur des territoires et thématiques connexes ;
- préciser, sur la base des données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques disponibles, les évolutions constatées dans le cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron ;
- conduire un monitoring continu ou temporaire du débit et des paramètres physico-chimiques de sources de montagne dans l'optique d'améliorer la compréhension de l'hydrodynamique des eaux souterraines dans les Pyrénées Atlantiques et de la constitution, à termes, d'un réseau de suivi du changement climatique, réseau préconisé par ailleurs dans le cadre de l'OPCC ;
- identifier les évolutions des usages de l'eau survenues au cours de la période 1975-2010 dans ces bassins versants.

Ce rapport restitue la partie relative à la recherche de tendances dans le cycle de l'eau, les autres éléments de l'étude faisant l'objet d'un rapport spécifique (Wuilleumier et al., 2017).

Les analyses statistiques conduites dans le cadre du rapport font apparaître des tendances qui diffèrent selon la période considérée.

Ainsi, **sur le long terme**, il existe une tendance à la baisse pour les pluies efficaces : elle est significative sur la partie amont du Gave d'Oloron mais non significative sur celle du Gave de Pau. Cette tendance à la baisse observée sur les pluies efficaces est due essentiellement à une tendance à la hausse de l'ETP, à partir du milieu des années 1980.

Concernant les débits, l'analyse effectuée montre l'existence d'une tendance à la baisse systématique du débit moyen annuel des 8 stations hydrométriques des gaves présentant une chronique complète ou quasi-complète sur la période 1967-2011, tandis que 75% des mêmes stations présentent une tendance à la baisse pour le QMNA. L'application de la pente de Sen sur les 45 années permet d'estimer une baisse du débit annuel moyen sur la période, qui peut représenter jusqu'à plus de la moitié du module de certaines des stations concernées. Il est important de noter que des stations ne présentant pas de tendance à la baisse (au sens statistique) sur une période plus étendue (Q7412910, Q5501010) en présentent systématiquement une sur la période 1967-2011. Ceci est notamment à mettre en lien avec la cyclicité des débits observée durant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.

Si l'on considère la totalité de la période de mesure (certaines chroniques débutent au début du 20<sup>ème</sup> siècle), 8 stations sur 12 sont caractérisées par une baisse significative à très significative

des débits pour l'une ou l'autre des variables considérées (moyennes annuelles, médianes annuelles QMNA, valeurs journalières minimales et maximales), dont 7 pour le QMNA et/ou la valeur moyenne du débit. Le nombre de stations affichant une baisse est plus faible pour les valeurs minimales (5) et le QMNA (5).

Quant aux niveaux piézométriques, le faible nombre d'années de mesure ne permet pas de dégager des tendances sur le long terme corrélables à celles observées sur les pluies efficaces et les débits.

**Sur les dernières années** (2000-2015), on note une remontée des niveaux et une augmentation des débits, en raison de pluies efficaces plus importantes. Il est intéressant de noter que les tendances à la hausse observées sur la piézométrie sont cohérentes avec des observations similaires qui peuvent être faites sur les débits au cours de la même période. Par contre, comme mentionné plus haut, les débits présentent en règle générale une tendance à la baisse sur une période de temps plus étendue.

Par ailleurs, l'analyse du décalage temporel annuel du pic de débit par rapport au début de l'année hydrologique sur la station de la Neste de Cap de Long montre l'existence d'une survenue du pic devenant plus tardive au cours de la période 1958-1973. Cette tendance s'inverse sur la deuxième partie de la chronique (1975-2011), le pic de débit survenant plus tôt dans la saison. On observe que cette légère modification du comportement hydrologique s'accompagne sur l'ensemble de la période d'une baisse importante du débit maximal annuel.

## Sommaire

<b>1. Introduction .....</b>	<b>13</b>
1.1. CONTEXTE .....	13
1.2. DONNÉES UTILISÉES.....	13
1.3. DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE .....	17
<b>2. Caractérisation des séries temporelles de niveaux et de débits .....</b>	<b>19</b>
2.1. CHRONIQUES DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES .....	19
2.1.1. Valeurs journalières .....	19
2.2. CHRONIQUES DE DEBITS .....	27
2.2.1. Valeurs journalières .....	27
2.2.2. Valeurs moyennes annuelles .....	29
2.2.3. Analyse spectrale .....	29
<b>3. Tests de tendance et rupture.....</b>	<b>31</b>
3.1. PRÉSENTATION DES TESTS.....	31
3.1.1. Précisions sur la notion de tendance .....	31
3.1.2. Détection d'une tendance : le test de Man-Kendall .....	31
3.1.3. Détection d'une rupture : le test de Pettitt.....	33
3.1.4. Précisions sur les tests utilisés dans l'étude.....	33
3.2. TESTS SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES .....	34
3.2.1. Tests sur les moyennes annuelles (année hydrologique).....	34
3.2.2. Tests sur les valeurs moyennes mensuelles minimales année civile (HMNA) .....	40
3.2.3. Tests sur les valeurs minimales annuelles .....	46
3.2.4. Tests sur les valeurs maximales annuelles .....	50
3.2.5. Synthèse sur les tendances détectées dans les chroniques piézométriques .....	54
3.2.6. Date des minima mensuels (HMNA) et des maxima mensuels (HMXA).....	56
3.3. TESTS SUR LES DÉBITS.....	58
3.3.1. Tests sur les valeurs moyennes annuelles (années hydrologiques).....	58
3.3.2. Tests sur les débits moyens mensuels minimum (QMNA) .....	63
3.3.3. Tests sur les valeurs minimales journalières de chaque année.....	68
3.3.4. Tests sur les valeurs maximales journalières de chaque année.....	73
3.3.5. Tests sur les valeurs médianes.....	79
3.3.6. Synthèse sur les tendances détectées dans les chroniques de débits .....	82
3.4. RELATIONS NIVEAUX-DÉBITS .....	86

<b>4. Autres variables du régime des cours d'eau analysées.....</b>	<b>93</b>
4.1. ÉCOULEMENT DE BASE ET BASE FLOW INDEX .....	93
4.2. MINIMA MENSUELS (QMNA) ET MAXIMA MENSUELS DES DEBITS .....	94
4.2.1. Dates des minima et maxima mensuels .....	94
4.2.2. Etude des pics de débits .....	97
4.3. DATE DES MAXIMA JOURNALIERS .....	100
<b>5. Relations pluies-débits.....</b>	<b>101</b>
5.1. DONNEES DISPONIBLES ET CARACTERISATION .....	101
5.1.1. Mailles Safran situées le long du Gave d'Oloron.....	101
5.1.2. Mailles Safran situées le long du Gave de Pau.....	104
5.2. MAILLES SAFRAN SITUEES DANS LE BASSIN DU GAVE D'OLORON : TENDANCES ET RUPTURES SUR LES PLUIES EFFICACES.....	106
5.2.1. Un exemple de relations entre pluies efficaces et débits .....	106
5.2.2. Tendance et rupture : maille Safran 1761 et débits moyens annuels de la station hydrométrique Q7002910.....	109
5.2.3. Tendance et ruptures : autres mailles Safran le long du Gave d'Oloron .....	112
5.3. MAILLES SAFRAN SITUEES DANS LE BASSIN DU GAVE DE PAU : TENDANCES ET RUPTURES SUR LES PLUIES EFFICACES.....	115
<b>6. Conclusion .....</b>	<b>119</b>
<b>7. Bibliographie.....</b>	<b>121</b>

## Liste des figures

Figure 1 - Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage dont les données ont été analysées	16
Figure 2 - Localisation des 6 piézomètres régulièrement suivis (en bleu clair)	21
Figure 3 - Piézomètre ayant le plus fort taux de mesures journalières sur la période de mesures	23
Figure 4 - Piézomètre ayant le plus faible taux de mesures journalières sur la période de mesures	24
Figure 5 - Comparaison des niveaux moyens annuels (en valeurs centrées réduites) aux 6 piézomètres régulièrement suivis	26
Figure 6 - Débits à la station hydrométrique Q7002910 : journaliers pour le graphique du haut, en valeurs moyennes annuelles (en bleu), minimales (en rouge) et maximales(en vert) pour le graphique du bas	28
Figure 7 - Périodogrammes de la série de débits de la station hydrométrique Q4801010	30
Figure 8 - Corrélogrammes de 4 séries piézométriques pour des ouvrages régulièrement suivis	32
Figure 9 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10305X0083 (n° 1 du tableau 7, régulièrement suivi)	36
Figure 10 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10293X0154 (n° 2 du tableau 7, régulièrement suivi)	37
Figure 11 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10305X0234 (n° 3 du tableau 7, régulièrement suivi)	38
Figure 12 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10306X0247	39
Figure 13 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10305X0234 (régulièrement suivi)	41
Figure 14 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10295X0032 (régulièrement suivi)	42
Figure 15 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)	43
Figure 16 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10306X0247 (faible taux de suivi)	44
Figure 17 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10292X0110 (faible taux de suivi)	45
Figure 18 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10295X0032 (régulièrement suivi)	47
Figure 19 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)	48
Figure 20 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10035X0012 (faible taux de suivi)	49
Figure 21 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10305X0234 (régulièrement suivi)	51
Figure 22 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)	52
Figure 23 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10305X0232 (taux de suivi intermédiaire - 38%)	53

Figure 24 - Influence des durées d'acquisition des mesures sur la mise en évidence des tendances (source : Guide d'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine (Ministère de l'Ecologie, 2012))	55
Figure 25 - Mois (de 1 à 12) où le HMNA est atteint (piézomètre 10293X0154)	57
Figure 26 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique O0105110	59
Figure 27 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique Q7322510	60
Figure 28 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique Q6404010	61
Figure 29 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q4844010	64
Figure 30 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q7322510	65
Figure 31 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q6332510	66
Figure 32 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q4801010	67
Figure 33 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q6332510	69
Figure 34 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4844010	70
Figure 35 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4124010	71
Figure 36 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4654310	72
Figure 37 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique O0105110	74
Figure 38 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7322510	75
Figure 39 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4654310	76
Figure 40 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7412910	77
Figure 41 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7002910	78
Figure 42 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux valeurs médianes annuelles de la station hydrométrique Q7322510	80
Figure 43 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux valeurs médianes annuelles de la station hydrométrique Q4844010	81
Figure 44 - Stations concernées par une baisse du QMNA ou du débit moyen qui soit significative (en orange) ou non, mais d'une ampleur de l'ordre de ou supérieure à 10% de la valeur de référence (en jaune)	84
Figure 45 - Débit moyen annuel du gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie (en haut) et du gave de Pau à Bérenx (en bas)	85

Figure 46 - Superpositions niveaux-débits pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part	87
Figure 47 - Corrélogrammes croisés niveaux-débits au pas de temps mensuel pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part	88
Figure 48 - Diagramme niveaux-débits pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part	89
Figure 49 - Relations niveaux et débits année par année pour le couple piézomètre 10355X009 et station hydrométrique Q7412910	90
Figure 50 - Relations niveaux et débits année par année pour le couple piézomètre 10295X0032 et station hydrométrique Q7002910	91
Figure 51 - Comparaison entre QMNA et HMNA (période 2003-2015) pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part	92
Figure 52 - Mois (de 1 à 12) où le QMNA est atteint pour la station Q4801010	96
Figure 53 - Mois (de 1 à 12) où le QMXA est atteint pour la station Q4801010	97
Figure 54 - Evolution de l'intervalle de temps séparant deux pics successifs de débits (station O105110)	99
Figure 55 - Durée (jours) entre le début de l'année hydrologique et l'occurrence du pic de débit (station O105110)	100
Figure 56 - Localisation des mailles SAFRAN desquelles les données de pluies et l'ETP ont été extraites	101
Figure 57 - Evolution de l'ETP et des pluies efficaces (moyennes interannuelles) de 1959 à 2014 (6 mailles Safran le long du Gave d'Oloron)	102
Figure 58 - Evolution de l'ETP et des pluies efficaces (moyennes interannuelles) de 1959 à 2014 (6 mailles Safran le long du Gave de Pau)	105
Figure 59 - Précipitations, pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) en moyennes mensuelles	106
Figure 60 - Précipitations, pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) en moyennes annuelles	107
Figure 61 - Corrélations croisées entre pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) au pas de temps mensuel (haut) et journalier (bas)	108
Figure 62 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles de la maille Safran 1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910	109
Figure 63 - Tendances à la hausse sur les années récentes pour les pluies efficaces (maille 1761), les débits (station Q7002910) et les niveaux (piézomètre 10295X0032)	111
Figure 64 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 1769,1777,1785 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910	113
Figure 65 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 1793,1801 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910	114
Figure 66 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 404-1801, 404-1793,404-1785 et sur les débits moyens annuels de la station Q4801010	116
Figure 67 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 404-1777, 404-1769, 404-1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q4801010	117

## Liste des tableaux

Tableau 1 - Stations hydrométriques utilisées pour l'étude	14
Tableau 2 - Piézomètres utilisés pour l'étude	15
Tableau 3 - Statistiques de base sur les données journalières des 20 piézomètres de l'étude	19
Tableau 4 - Statistiques de base sur les moyennes annuelles des niveaux (années hydrologiques) calculées aux 20 piézomètres de l'étude	25
Tableau 5 - Statistiques de base sur les données journalières des 12 stations hydrométriques de l'étude	27
Tableau 6 - Statistiques de base sur les moyennes annuelles de débits (années hydrologiques) calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées	29
Tableau 7 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués sur les moyennes annuelles des 20 piézomètres	34
Tableau 8 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes mensuelles minimales calculées aux 20 piézomètres	40
Tableau 9 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs minimales enregistrées aux 20 piézomètres étudiés.	46
Tableau 10 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales enregistrées aux 20 piézomètres étudiés	50
Tableau 11 - Synthèse des résultats du test de Mann-Kendall pour les chroniques piézométriques régulièrement suivies	54
Tableau 12 - Fréquence d'occurrence des mois où le HMNA et le HMXA sont atteints	56
Tableau 13 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes annuelles calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées	58
Tableau 14 - Comparaison entre les résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes annuelles années civiles et ceux des tests appliqués aux valeurs moyennes annuelles années hydrologiques	62
Tableau 15 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs de QMNA calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées	63
Tableau 16 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs minimales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées	68
Tableau 17 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées	73
Tableau 18 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées	79
Tableau 19 - Synthèse des résultats du test de Mann-Kendall. En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1)	82
Tableau 20 - Quantification de la baisse déduite de la tendance (pente de Sen) identifiée en proportion du module ou du QMNA5	83
Tableau 21 - Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux valeurs moyennes annuelles et aux QMNA des stations hydrométriques disposant d'une chronique sur la période 1967-2011	84
Tableau 22 - Valeurs du Base Flow Index à différentes périodes	93
Tableau 23 - Gave de Pau à Bérenx - Parts des écoulements de base et rapides déduites des valeurs de BFI calculées	94
Tableau 24 - Fréquence d'occurrence des mois où le QMNA et le QMXA sont atteints	95

Tableau 25 - Tests de Mann-Kendall appliqué aux intervalles séparant les pics	98
Tableau 26 - Statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace (en moyennes interannuelles), sur la période 1959 à 2014	103
Tableau 27 - Statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace (en moyennes interannuelles) sur la période 1959 à 2014	104
Tableau 28 - p-values des tests de Mann-Kendall et de Pettitt calculées sur les pluies efficaces annuelles de la maille Safran 1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910	109
Tableau 29 - Résultats des tests appliqués aux pluies efficaces des mailles Safran situées le long du Gave d'Oloron.	112
Tableau 30 - Résultats des tests appliqués aux pluies efficaces des mailles Safran situées le long du Gave de Pau	115

## Liste des annexes

Annexe 1 Evolution des niveaux journaliers mesurés sur les 6 piézomètres régulièrement suivis	123
Annexe 2 Evolution des débits journaliers mesurés aux 12 stations hydrométriques retenues	131
Annexe 3 Principe des tests de tendance et rupture	145
Annexe 4 Corrélogramme et périodogramme	153
Annexe 5 Une méthode de calcul du Base Flow Index	159
Annexe 6 Analyse spectrale des chroniques de débits	163
Annexe 7 Base Flow Index	171
Annexe 8 Analyse des pics de débits	195



# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Dans le cadre de la Convention Régionale Eaux souterraines 2015-2020 signée entre la Région Aquitaine, l'Etat et le BRGM avec le concours financier de l'Agence de l'eau Adour-Garonne (AEAG), le BRGM a proposé de travailler sur l'impact du changement climatique en Aquitaine, notamment en étudiant les conséquences sur les eaux souterraines des adaptations envisagées par les acteurs économiques.

Par ailleurs, l'EPTB Institution Adour réalise, avec le soutien de l'Etat et des collectivités territoriales, une étude prospective « Adour 2050 » portant sur les besoins et les ressources en eau à l'échelle du bassin versant de l'Adour.

Il a donc été décidé de choisir les bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron comme terrain d'application pour l'étude du BRGM.

Le travail du BRGM est prévu sur une durée de 3 ans. Outre la rédaction d'une synthèse hydrogéologique du territoire, l'année 1 (2016-2017) a comme objectifs :

1. La participation aux travaux de l'étude « Adour 2050 » ;
2. La quantification, sur la base des données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques disponibles, des évolutions constatées dans le cycle de l'eau à l'échelle des bassins versants des Gaves de Pau et d'Oloron ;
3. La réalisation de campagnes de jaugeages sur des sources situées dans les bassins versants et la mise en place d'un équipement automatisé sur l'une d'entre elles ;
4. L'identification des évolutions socio-économiques en matière d'usage de l'eau survenues au cours de la période 1975-2010 dans ces bassins versants.

Le présent rapport rend compte du point 2 de ce programme de travail. Il fait suite à des analyses du même type conduites à l'échelle nationale (Giuntoli, 2010) et comportant quatre stations hydrométriques de ces bassins versants.

## 1.2. DONNÉES UTILISÉES

Les stations hydrométriques utilisées pour l'analyse des séries temporelles de débits sont au nombre de 12 (tableau 1). Elles sont localisées sur la figure 1. Elles ont été sélectionnées sur la base de la longueur de la chronique disponible d'une part et du caractère représentatif de la station d'autre part. Ce second aspect a été pris en compte au travers des indications figurant dans la banque HYDRO dans les champs « Statut » – recherche de station « avec signification hydrologique » – et « Régime influencé » – station au régime « pas ou faiblement influencé ». Les barrages hydroélectriques, dont le volume cumulé global est faible au regard des débits totaux écoulés dans les bassins versants (Wuilleumier et al., 2017), est susceptible de jouer en effet un rôle dans l'étalement dans le temps des écoulements.

Les piézomètres utilisés pour l'analyse des séries temporelles de niveaux sont au nombre de 20 (tableau 2). Ils sont localisés sur la figure 1.

Code Banque hydro	Nom	Mesures	Superficie du bassin versant (km2)
O0105110	La Neste de Cap de Long à Aragnouet [Les Edelweiss]	1948-2011	5
Q4124010	Le Gave d'Héas à Gèdre	1948-1995	84
Q4801010	Le Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre [Pont de Rieulhes]	1959-2016	1120
Q5501010	Le Gave de Pau à Bérenx [Pont de Bérenx]	1923-2016	2575
Q6142910	Le Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-Sainte-Croix]	1912-2013	488
Q6332510	Le Gave d'Aspe à Bedous [Pont d'Escot]	1948-2011	425
Q7002910	Le Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-SNCF]	1912-2016	1085
Q7322510	Le Saison à Mauléon-Licharre [Berrogain Laruns - Cibi]	1967-2011	480
Q7412910	Le Gave d'Oloron à Escos	1949-2016	2456
Q6404010	Le Lourdios-Ichère à Lourdios-Ichère	1920-1962	46
Q4844010	L'Ouzom à Arthez-d'Asson	1927-1954	129
Q4654310	Le Gave d'Estaing à Estaing [Las Counces]	1927-1954	38.5

*Tableau 1 - Stations hydrométriques utilisées pour l'étude*

Code national BSS	Commune	Coordonnées		Début des mesures	Fin des mesures
		XL93	YL93		
10295X0032/PZ4	MOUMOUR	403168	6240395	06/03/2004	09/09/2016
10305X0083/S1	ASSAT	431387	6244336	28/04/2002	09/09/2016
10293X0154/PZ	TARSACQ	414381	6256507	08/12/2001	09/09/2016
10305X0234/PZ	UZOS	429133	6247101	06/12/2001	09/09/2016
10522X0030/ERH	COARRAZE	438088	6233643	06/12/2001	09/09/2016
10035X0009/F2	AUTERRIVE	376790	6271256	19/05/2002	25/08/2016
10305X0232/F	BALIOS	432085	6242357	17/01/2002	09/09/2016
10292X0110/P	LABASTIDE-CEZERACQ	412025	6259768	16/01/2002	09/09/2016
10306X0247/F	BORDES	434903	6243632	18/01/2002	18/08/2016
10293X0152/P	SIROS	416799	6255459	15/01/2002	22/08/2016
10046X0136/PZ	BESINGRAND	410897	6260052	16/01/2002	22/08/2016
10305X0228/F	BOEIL-BEZING	433664	6241175	21/01/2002	25/08/2016
10305X0231/F	PARDIES-PIETAT	432332	6241955	17/01/2002	16/08/2016
10035X0012/F5	AUTERRIVE	376013	6270553	17/05/2002	24/08/2016
10522X0193/PZ	LESTELLE-BETHARRAM	438933	6230832	21/01/2002	16/08/2016
10305X0235/PZ	MAZERES-LEZONS	428438	6246982	15/01/2002	17/08/2016
10033X0067/F	BERENX	385419	6276215	14/01/2002	24/08/2016
10306X0245/F	BAUDREIX	434446	6239080	07/10/2002	16/08/2016
10035X0010/F3	AUTERRIVE	376813	6271515	17/05/2002	24/08/2016
10045X0183/P	MONT	402997	6264832	14/01/2002	23/08/2016

*Tableau 2 - Piézomètres utilisés pour l'étude*

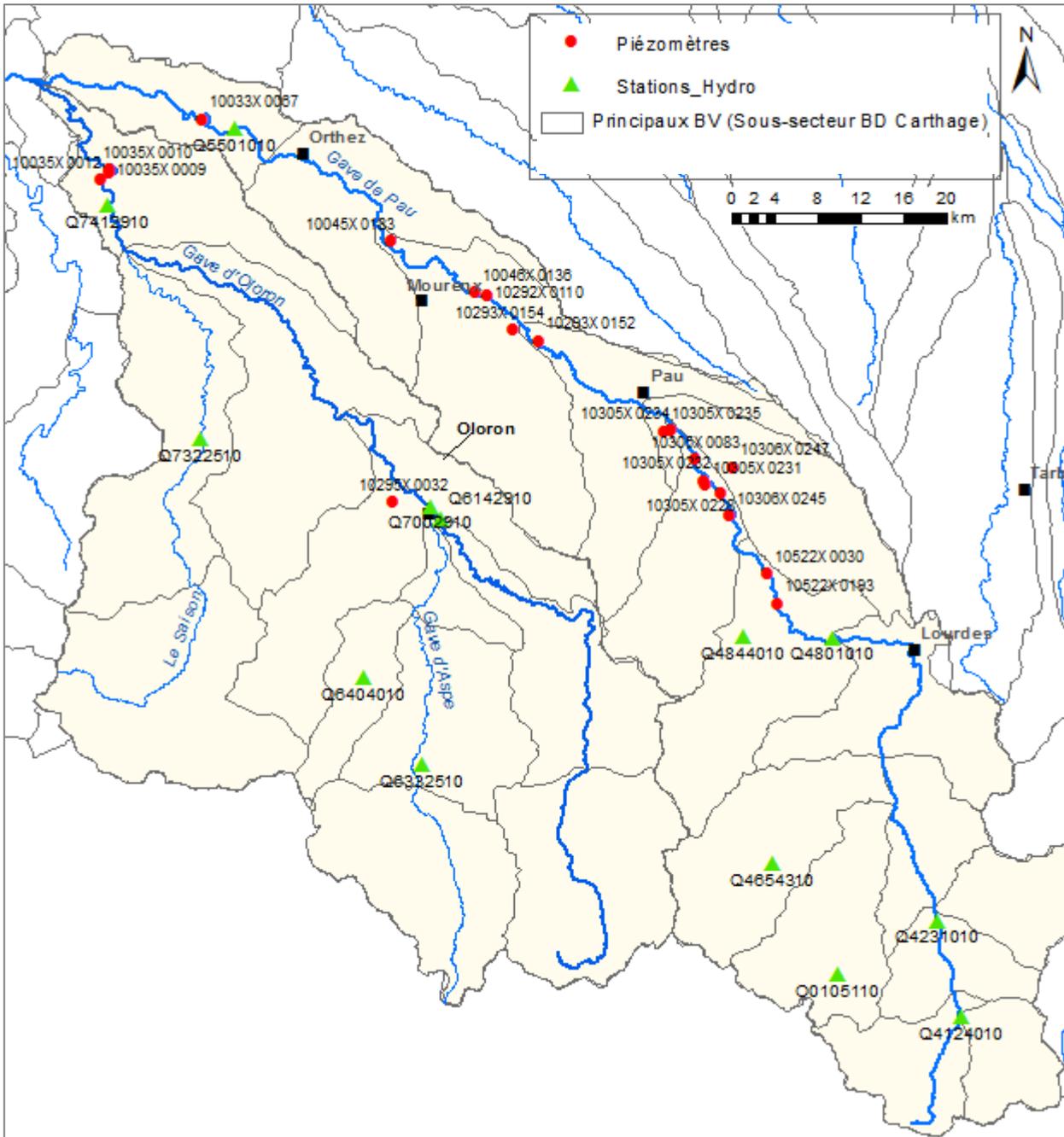


Figure 1 - Localisation des piézomètres et des stations de jaugeage dont les données ont été analysées

Enfin, les données climatiques, pluies et ETP, ont été extraites de quelques mailles de la grille nationale du système SAFRAN<sup>1</sup> de Météo France (voir chapitre 4). SAFRAN est un algorithme qui utilise des observations de surface combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires suivants : température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident. Ces paramètres

<sup>1</sup> SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie) est un système d'analyse de variables atmosphériques intégré dans la chaîne SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU). (<http://www.cnrm.meteo.fr/>).

sont analysés par pas de 300 m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). La France est alors couverte par 9892 mailles. Cette grille, qui fournit des données élaborées, vient en complément des données disponibles à chaque station météorologique de MétéoFrance et propose avantageusement une vision spatialisée cohérente de variables climatiques.

### 1.3. DÉROULEMENT DE L'ÉTUDE

Les étapes suivies pour rechercher d'éventuelles évolutions climatiques et hydrologiques dans les bassins versant des Gave de Pau et d'Oloron et en estimer l'ampleur, sont les suivantes :

- Caractérisation des chroniques piézométriques et de débits des cours d'eau (chapitre 2).
- Application à ces chroniques de tests statistiques de tendance et de rupture (chapitre 3). Les variables sur lesquelles les tests ont été appliqués sont :
  - les moyennes annuelles, les minima et maxima relevés chaque année dans les chroniques (sur des années hydrologiques)
  - le QMNA, débit moyen mensuel minimal année civile,
  - le HMNA niveau moyen mensuel minimal année civile (par analogie avec le QMNA).
- Analyse de quelques autres caractéristiques du régime des cours d'eau (chapitre 4) :
  - écoulement de base (alimentation des cours d'eau par les seuls apports des nappes),
  - dates des minima et des maxima de débits et fréquence d'occurrence des pics de débits.
- Relations entre niveaux et débits (chapitre 4).
- Analyse des séries de pluies et d'ETP des mailles SAFRAN sélectionnées le long des Gaves de Pau et d'Oloron, recherches de tendances sur les pluies efficaces et mises en relation avec les débits (chapitre 5).

Tous les traitements statistiques et représentations graphiques ont été réalisés avec le logiciel ESTH'R du BRGM (Etude de Séries Temporelles en Hydrogéologie avec R). ESTH'R est écrit en langage R et utilise des fonctionnalités graphiques et statistiques du logiciel R (<https://www.r-project.org/>).



## 2. Caractérisation des séries temporelles de niveaux et de débits

### 2.1. CHRONIQUES DE NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

#### 2.1.1. Valeurs journalières

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des séries temporelles de niveaux mesurés sur les 20 piézomètres étudiés.

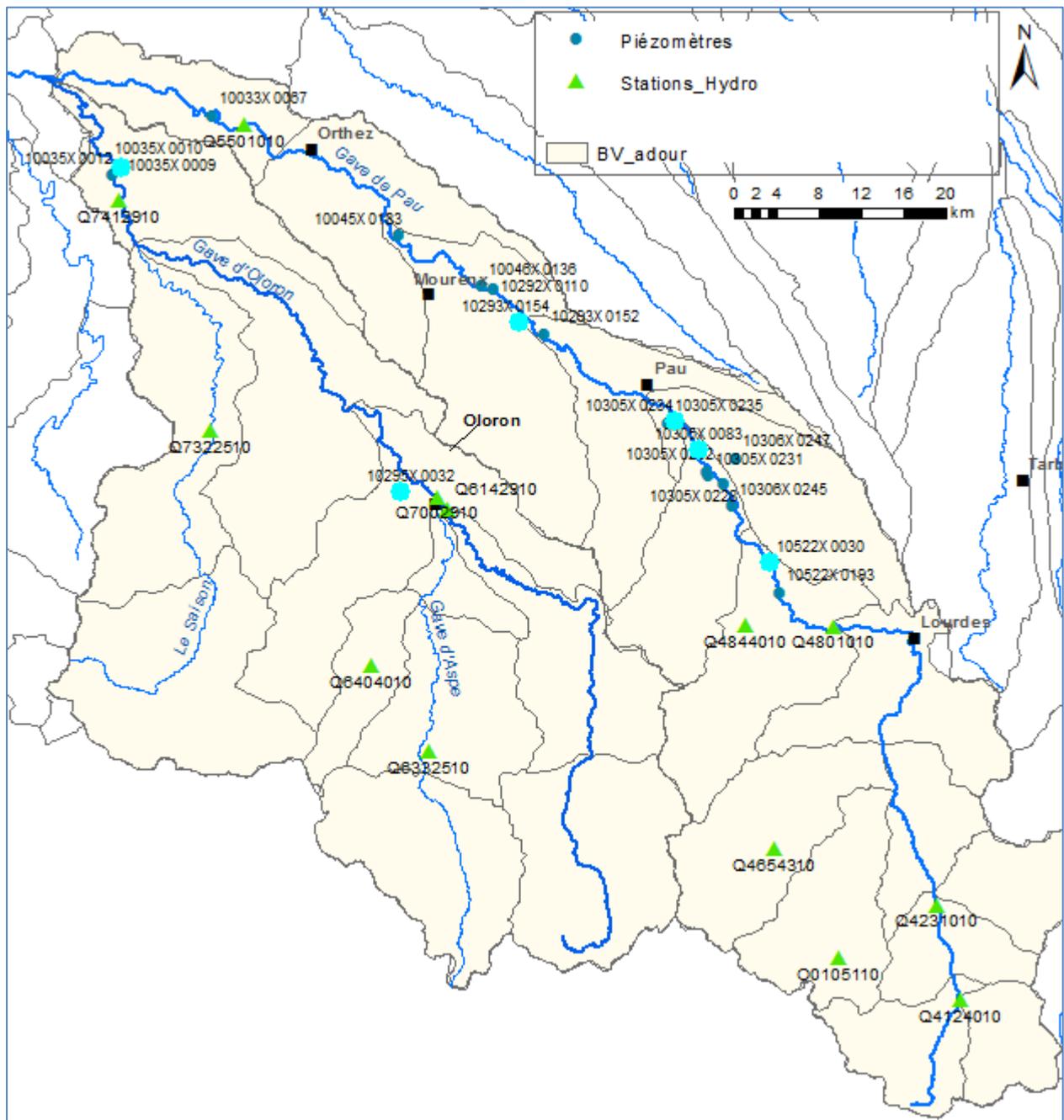
n° BSS	Début	Fin	Années de mesures	Jours de mesures	Taux (%)	Moyenne (m)	Ecart-type (m)	Max. (m)	Mini. (m)	Amplitude (m)
10522X0193	21/01/2002	12/09/2016	15	145	2.7	288.28	0.31	289.5	286.85	2.65
<b>10522X0030</b>	<b>06/12/2001</b>	<b>07/10/2016</b>	<b>16</b>	<b>4754</b>	<b>87.7</b>	<b>275.84</b>	<b>0.31</b>	<b>277.74</b>	<b>274.14</b>	<b>3.6</b>
10306X0245	07/10/2002	19/09/2016	15	134	2.6	231.98	0.29	232.97	231.26	1.71
10305X0228	21/01/2002	25/08/2016	15	233	4.4	224.52	0.17	225.09	224.12	0.97
10305X0231	17/01/2002	12/09/2016	15	147	2.7	216.42	0.25	217.99	215.92	2.07
10305X0232	17/01/2002	07/10/2016	15	2066	38.4	213.06	0.2	214.21	212.21	2
<b>10305X0083</b>	<b>28/04/2002</b>	<b>07/10/2016</b>	<b>15</b>	<b>4911</b>	<b>93.1</b>	<b>202.83</b>	<b>0.27</b>	<b>204.74</b>	<b>202.36</b>	<b>2.38</b>
<b>10305X0234</b>	<b>06/12/2001</b>	<b>07/10/2016</b>	<b>16</b>	<b>4740</b>	<b>86.9</b>	<b>185.25</b>	<b>0.59</b>	<b>188.90</b>	<b>183.96</b>	<b>4.94</b>
10305X0235	15/01/2002	13/09/2016	15	144	2.7	181.95	0.63	183.49	180.37	3.12
10293X0152	15/01/2002	19/09/2016	15	149	2.8	129.52	0.5	131.2	128.75	2.45
<b>10293X0154</b>	<b>08/12/2001</b>	<b>06/10/2016</b>	<b>16</b>	<b>5187</b>	<b>95.8</b>	<b>123.88</b>	<b>0.62</b>	<b>126.51</b>	<b>122.91</b>	<b>3.6</b>
10292X0110	16/01/2002	07/10/2016	15	383	7.1	110.15	0.4	112.59	109.13	3.46
10046X0136	16/01/2002	19/09/2016	15	148	2.8	108.4	0.4	109.56	107.8	1.76
10045X0183	14/01/2002	20/09/2016	15	148	2.8	83.97	0.42	85.16	83.28	1.88
10033X0067	14/01/2002	21/09/2016	15	143	2.7	25.24	0.54	27.65	23.26	4.39
10035X0012	17/05/2002	21/09/2016	15	143	2.7	14.05	0.51	16.14	13.42	2.72
<b>10035X0009</b>	<b>19/05/2002</b>	<b>02/10/2016</b>	<b>14</b>	<b>4389</b>	<b>83.6</b>	<b>19.43</b>	<b>0.46</b>	<b>22.49</b>	<b>18.01</b>	<b>4.48</b>
10035X0010	17/05/2002	21/09/2016	15	122	2.3	18.74	0.48	20.46	17.99	2.47
10306X0247	18/01/2002	14/09/2016	15	155	2.9	219.93	0.67	221.45	218.62	2.83
<b>10295X0032</b>	<b>06/03/2004</b>	<b>07/10/2016</b>	<b>13</b>	<b>4485</b>	<b>97.5</b>	<b>199.32</b>	<b>0.66</b>	<b>202.28</b>	<b>198.38</b>	<b>3.9</b>

*Tableau 3 - Statistiques de base sur les données journalières des 20 piézomètres de l'étude  
 Les lignes en caractères gras représentent les points pour lesquels les chroniques sont les plus complètes.*

Sur les 20 piézomètres, 12 ont un taux de mesures (*nombre de jours de mesures/nombre total de jours de la période de mesures*) inférieur à 5 %.

Seuls 6 d'entre eux (identifiés en caractère gras dans la tableau ci-dessus) ont fait l'objet de mesures régulières (taux supérieur à 80 %, avec un maximum de 97.5 % pour le piézomètre 10295X0032). Ils sont localisés sur la figure 2 ci-après.

Les graphiques représentant l'évolution des niveaux journaliers mesurés sur ces six piézomètres sont reportés en annexe 1.



Le long du Gave de Pau :		Le long du Gave d'Oloron :	
n° BSS	Commune	n° BSS	Commune
10522X0030	Coarraze	10035X0009	Auterrive
10305X0083	Assat	10295X0032	Moumour
10305X0234	Uzos		
0293X0154	Tarsacq		

Figure 2 - Localisation des 6 piézomètres régulièrement suivis (en bleu clair)

Pour ces 6 piézomètres, l'amplitude de variation sur la période de mesure (valeur maximale de la chronique journalière – valeur minimale) est relativement forte, comprise entre 2.4 m et 4.5 m pour 5 piézomètres et atteignant 5 m pour le piézomètre 10305X0234 (qui présente des niveaux anormalement hauts au printemps 2012 et au printemps 2016). L'écart-type est compris entre 0.3 m et 0.7 m.

Les figures 3 et 4 montrent deux exemples d'évolution des niveaux : pour le piézomètre 10295X0032 qui a le plus fort taux de mesures, 97.5 % (figure 2) et pour le piézomètre 10035X0010 qui a le taux le plus faible, 2.3% (figure 3).

### **Remarque**

**Les tests statistiques de tendance et rupture (chapitre 3) ont été appliqués à l'ensemble des piézomètres. Compte tenu du peu de mesures effectuées sur 14 piézomètres parmi les 20, les résultats obtenus (significativité de la tendance par exemple) doivent être considérés comme peu fiables. Ils sont fournis à titre indicatif et peuvent éventuellement être interprétés en les confrontant avec les résultats des tests appliqués aux 6 piézomètres régulièrement suivis.**

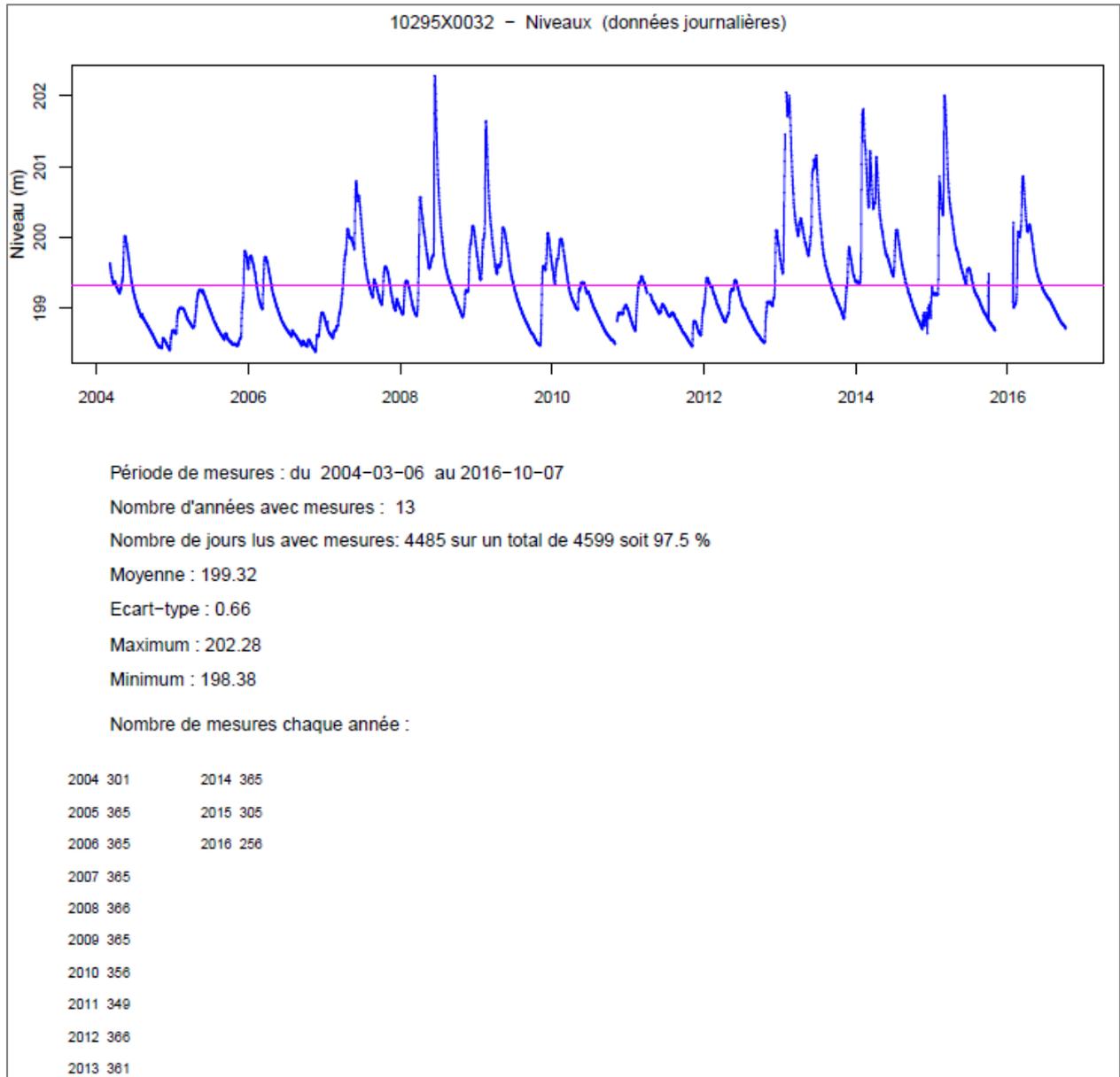


Figure 3 - Piézomètre ayant le plus fort taux de mesures journalières sur la période de mesures

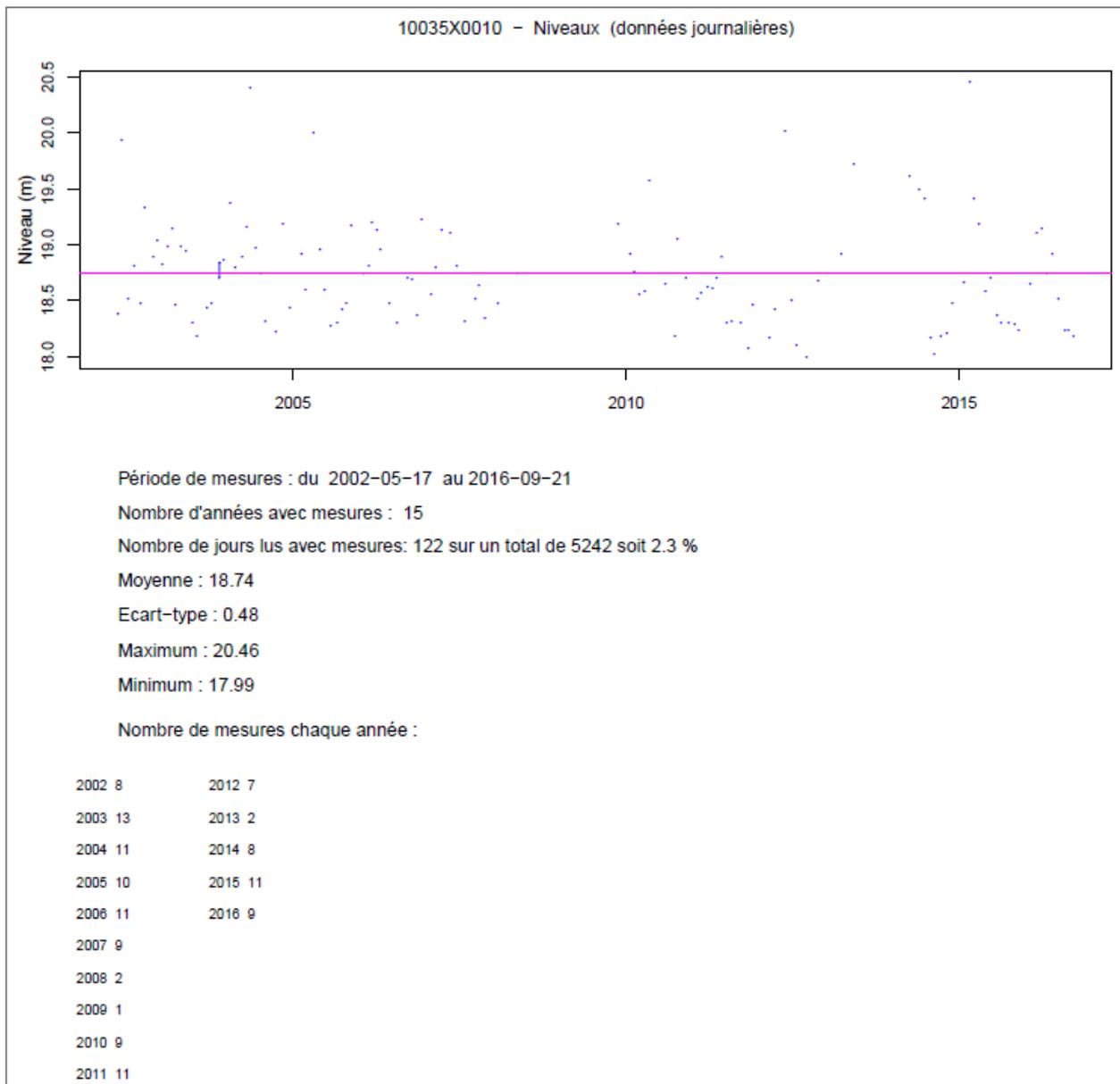


Figure 4 - Piézomètre ayant le plus faible taux de mesures journalières sur la période de mesures

### Valeurs moyennes annuelles

Le tableau 4 présente les mêmes descripteurs statistiques que le tableau 3 mais en valeurs moyennes annuelles sur des années hydrologiques (du 1<sup>er</sup> octobre au 30 septembre, l'année 2003, par exemple, correspond à l'année hydrologique 2002-2003).

n° BSS	Début	Fin	Années de mesures	Manquantes	Moyenne (m)	Ecart-type (m)	Maximum (m)	Minimum (m)	Amplitude (m)
10522X0193	2003	2016	14	0	288.31	0.14	288.66	288.11	0.55
<b>10522X0030</b>	<b>2002</b>	<b>2016</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>275.85</b>	<b>0.09</b>	<b>276</b>	<b>275.65</b>	<b>0.35</b>
10306X0245	2003	2016	14	0	231.99	0.15	232.35	231.8	0.55
10305X0228	2003	2016	14	0	224.58	0.11	224.76	224.39	0.37
10305X0231	2003	2016	14	0	216.43	0.12	216.7	216.27	0.43
10305X0232	2003	2016	14	0	213.06	0.09	213.2	212.92	0.28
<b>10305X0083</b>	<b>2003</b>	<b>2016</b>	<b>14</b>	<b>0</b>	<b>202.84</b>	<b>0.17</b>	<b>203.13</b>	<b>202.62</b>	<b>0.51</b>
<b>10305X0234</b>	<b>2002</b>	<b>2016</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>185.25</b>	<b>0.18</b>	<b>185.71</b>	<b>185.03</b>	<b>0.68</b>
10305X0235	2003	2016	14	0	181.99	0.46	183.07	181.47	1.6
10293X0152	2003	2016	14	0	129.56	0.28	130.26	129.3	0.96
<b>10293X0154</b>	<b>2002</b>	<b>2016</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>123.89</b>	<b>0.21</b>	<b>124.32</b>	<b>123.53</b>	<b>0.79</b>
10292X0110	2003	2016	14	0	110.10	0.26	110.73	109.79	0.94
10046X0136	2003	2016	14	0	108.45	0.30	109.05	108.07	0.98
10045X0183	2003	2016	14	0	84.02	0.19	84.53	83.74	0.79
10033X0067	2003	2016	14	0	25.25	0.23	25.72	24.94	0.78
10035X0012	2003	2016	14	0	14.06	0.17	14.39	13.87	0.52
<b>10035X0009</b>	<b>2003</b>	<b>2016</b>	<b>14</b>	<b>1</b>	<b>19.44</b>	<b>0.08</b>	<b>19.59</b>	<b>19.31</b>	<b>0.28</b>
10035X0010	2003	2016	14	1	18.75	0.17	19.11	18.47	0.64
10306X0247	2003	2016	14	0	220.01	0.48	220.99	219.12	1.87
<b>10295X0032</b>	<b>2005</b>	<b>2016</b>	<b>12</b>	<b>0</b>	<b>199.32</b>	<b>0.37</b>	<b>199.94</b>	<b>198.78</b>	<b>1.16</b>

*Tableau 4 - Statistiques de base sur les moyennes annuelles des niveaux (années hydrologiques) calculées aux 20 piézomètres de l'étude*

*Les lignes en caractères gras représentent les points pour lesquels les chroniques sont les plus complètes.*

Par rapport aux valeurs journalières, les maxima et minima sont bien sûr plus atténués. Pour les piézomètres régulièrement suivis (en gras dans le tableau 4), l'amplitude de variation est comprise entre 0.3 m et 1.2 m (piézomètre 10295X0032 pour cette valeur).

La figure 4 ci-après montre les variations en valeurs moyennes annuelles centrées (par rapport à la moyenne) et réduites (par l'écart-type) des niveaux aux 6 piézomètres régulièrement suivis. La superposition graphique de ces séries de valeurs met clairement en évidence une hausse des niveaux survenant après 2011 aux piézomètres 10522X0030, 10305X0083, 10305X0234 et après 2012 au piézomètre 10293X0154 (ce qui est confirmé par le test statistique de rupture de Pettitt, cf. § 3.2.1).

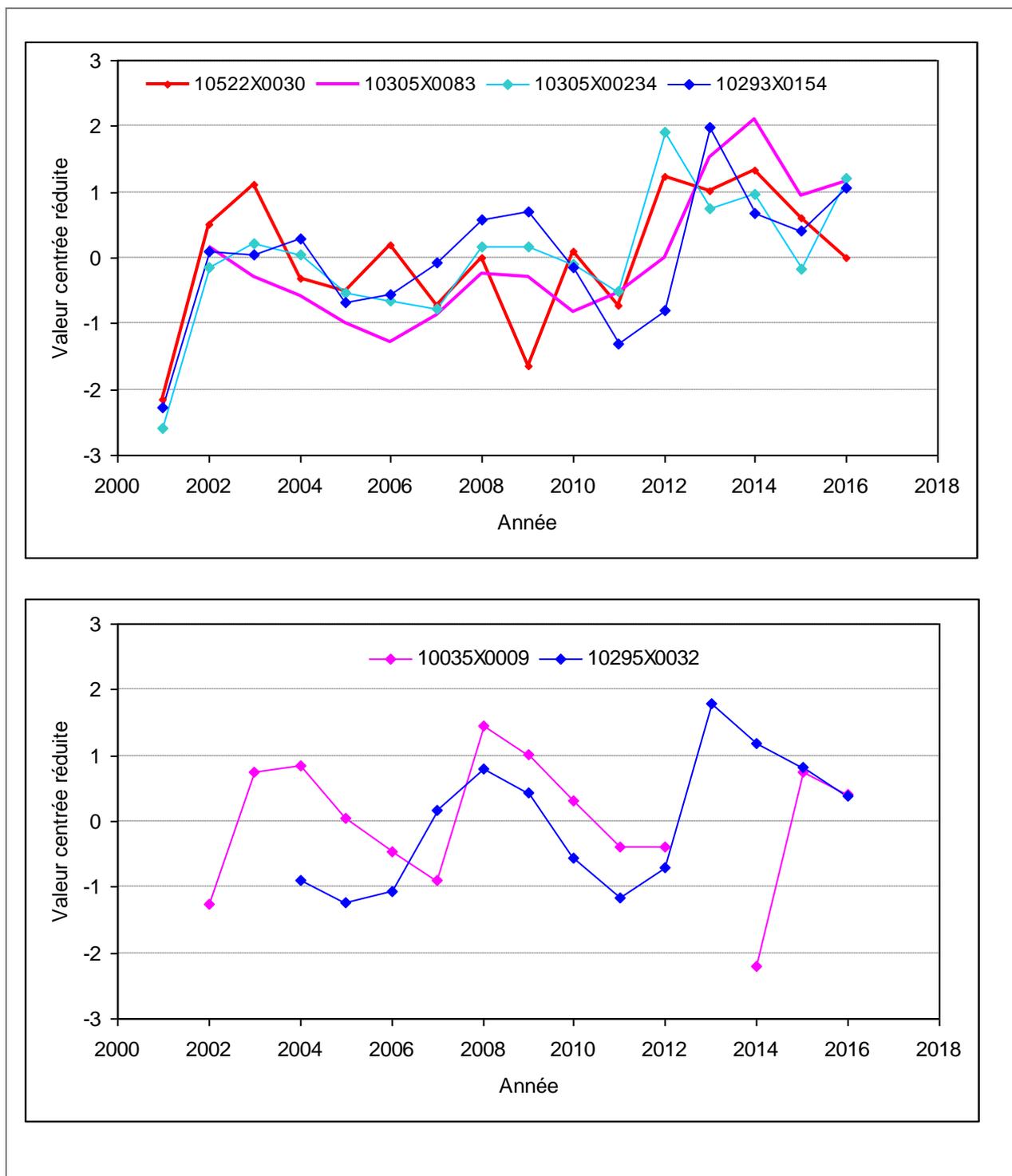


Figure 5 - Comparaison des niveaux moyens annuels (en valeurs centrées réduites) aux 6 piézomètres régulièrement suivis  
 Deux graphiques sont présentés afin d'améliorer la lisibilité des figures.

## 2.2. CHRONIQUES DE DEBITS

### 2.2.1. Valeurs journalières

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques des séries temporelles des débits journaliers mesurés aux 12 stations hydrométriques retenues pour l'étude.

Station	Début	Fin	Années de mesures	Taux (%)	Moyenne (m <sup>3</sup> /s)	Ecart-type (m <sup>3</sup> /s)	Maximum (m <sup>3</sup> /s)	Minimum (m <sup>3</sup> /s)	Amplitude (m <sup>3</sup> /s)
O0105110	01/01/1948	31/12/2011	64	96.6	0.26	0.38	4.84	0	4.84
Q4124010	01/01/1948	14/05/1995	48	100	3.54	3.4	42	0	42
Q4801010	01/09/1959	21/02/2016	58	100	46.03	28.42	429	7.44	421.56
Q5501010	01/09/1923	21/02/2016	92	97	81.1	65.8	1420	6.25	1413.75
Q6142910	01/01/1912	05/10/2013	101	98.7	19.49	16.59	267	1.03	265.97
Q6332510	01/01/1948	31/12/2011	64	99.9	23.45	20.07	352	1.1	350.9
Q7002910	01/01/1912	21/02/2016	105	100	51.68	43.14	755	7.3	747.7
Q7322510	01/01/1967	11/12/2011	45	100	23.88	27.95	522	1.01	520.99
Q7412910	01/01/1949	21/02/2016	68	100	101.78	104.86	1620	9.02	1610.98
Q4654310	01/01/1927	31/12/1954	28	100	1.97	1.74	17.2	0.325	16.88
Q4844010	01/09/1927	31/12/1954	28	100	6.65	7.65	77.5	1.25	76.25
Q6404010	01/01/1920	31/12/1962	43	100	2.65	3.69	68	0.154	67.85

Tableau 5 - Statistiques de base sur les données journalières des 12 stations hydrométriques de l'étude

Contrairement aux piézomètres, les mesures de débits ont été faites quasiment tous les jours depuis le début de la période de mesures.

La figure 6 ci-après présente l'évolution des débits à la station hydrométrique Q7002910, suivie depuis 1912, en valeurs journalières et en valeurs moyennes annuelles (année hydrologique).

Les graphiques représentant l'évolution des débits journaliers mesurés aux 12 stations hydrométriques sont reportés en annexe 2.

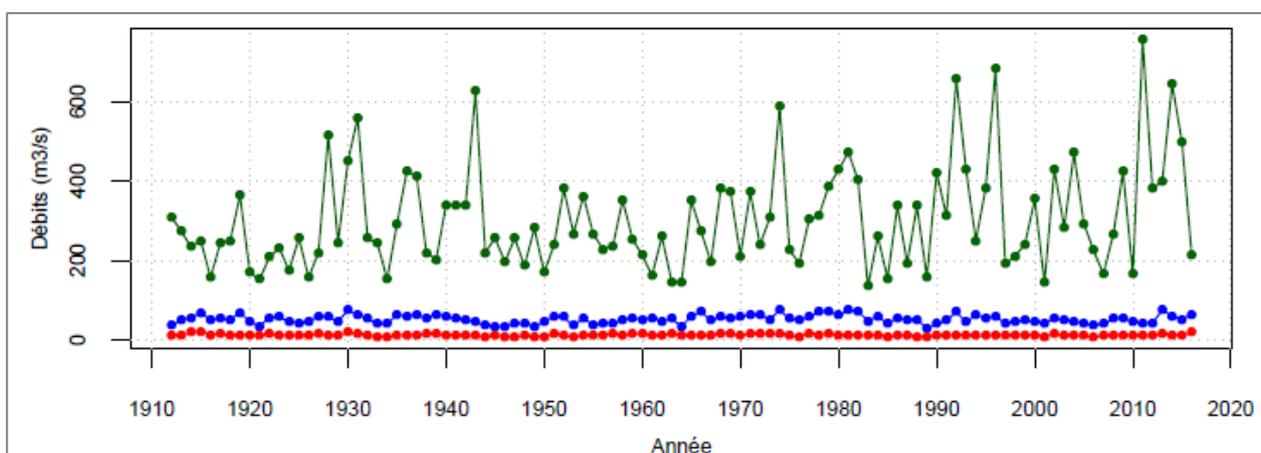
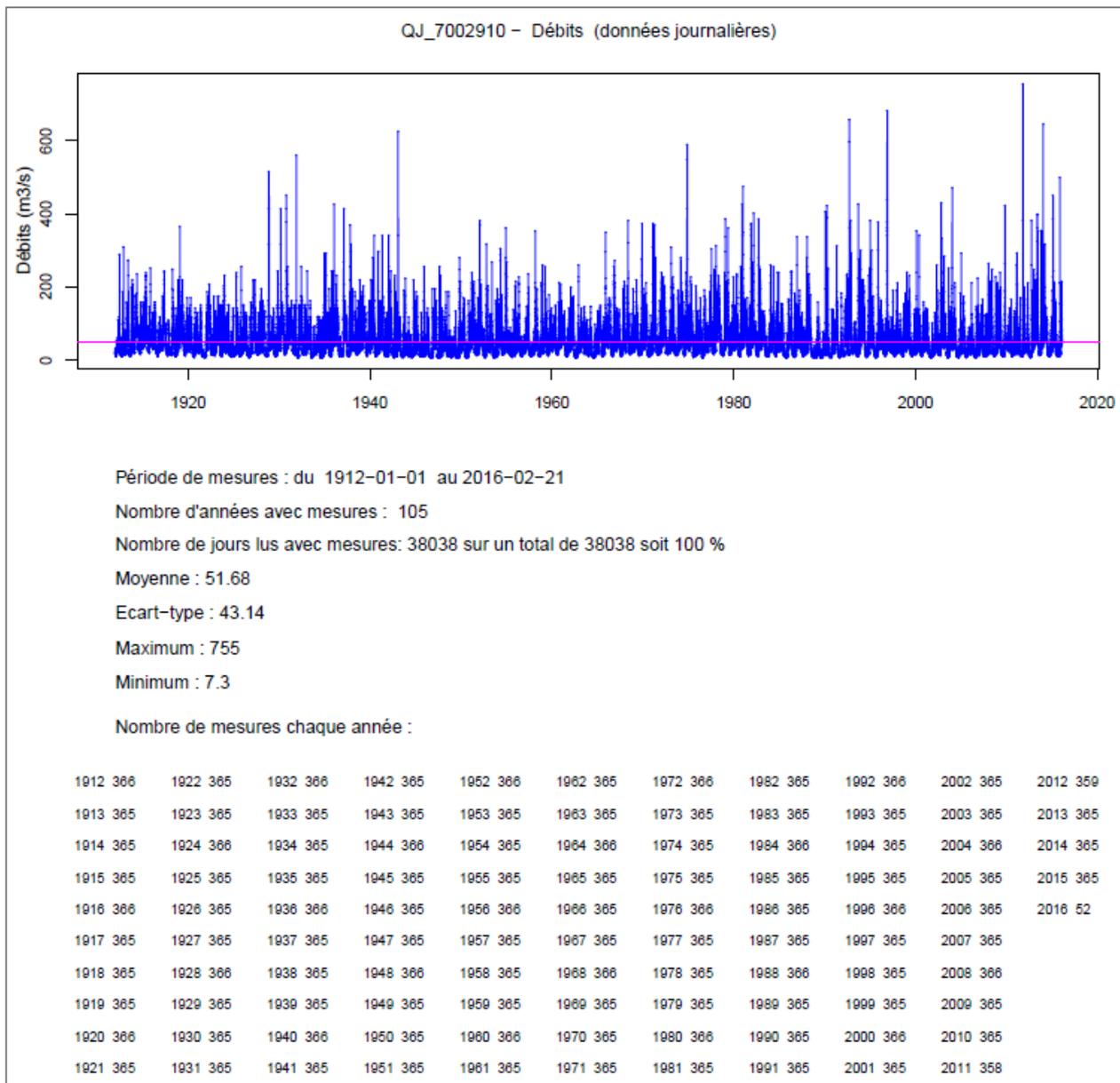


Figure 6 - Débits à la station hydrométrique Q7002910 : journaliers pour le graphique du haut, en valeurs moyennes annuelles (en bleu), minimales (en rouge) et maximales(en vert) pour le graphique du bas

## 2.2.2. Valeurs moyennes annuelles

Le tableau 6 présente les mêmes descripteurs statistiques que le tableau 5 mais en valeurs moyennes annuelles sur des années hydrologiques (du 1<sup>er</sup> octobre au 30 septembre, l'année indiquée 2003 par exemple correspond à l'année hydrologique 2002-2003).

Station	Début	Fin	Années de mesures	Manquantes	Moyenne (m <sup>3</sup> /s)	Ecart-type (m <sup>3</sup> /s)	Maximum (m <sup>3</sup> /s)	Minimum (m <sup>3</sup> /s)	Amplitude (m <sup>3</sup> /s)
O0105110	1949	2011	63	0	0.267	0.064	0.45	0.13	0.32
Q4124010	1949	1995	47	0	3.535	0.643	4.81	1.71	3.1
Q4801010	1960	2016	57	0	45.901	9.618	71.94	27.26	44.68
Q5501010	1924	2016	93	2	80.789	20.24	136.36	29.52	106.84
Q6142910	1913	2013	101	1	19.537	4.88	33.15	8.84	24.31
Q6332510	1949	2011	63	0	23.435	4.232	33.74	11.86	21.88
Q7002910	1913	2016	104	0	51.774	10.756	75.02	22.1	52.92
Q7322510	1968	2011	44	0	23.985	5.941	39.03	13.04	25.99
Q7412910	1950	2016	67	0	102.366	20.987	162.93	53.35	109.58
Q4654310	1928	1954	27	0	1.969	0.485	3.07	0.99	2.08
Q4844010	1928	1954	27	0	6.636	1.66	10.27	4.35	5.92
Q6404010	1921	1962	42	0	2.666	0.633	4.48	1.25	3.23

Tableau 6 - Statistiques de base sur les moyennes annuelles de débits (années hydrologiques) calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées

## 2.2.3. Analyse spectrale

L'analyse spectrale (cf. annexe 2) permet de détecter dans une série temporelle quelles sont les fréquences qui contribuent le plus à la dynamique de la série. La détection se fait par l'intermédiaire d'un périodogramme (cf. annexe 4).

Cette analyse a été faite sur les 12 séries de débits. Toutes montrent très clairement un « pic » de 12 mois correspondant à une cyclicité annuelle (cf. annexe 4) et secondairement un pic à 6 mois que l'on peut associer à l'effet de la fonte des neiges.

Un exemple est fourni par la figure 7 ci-après.

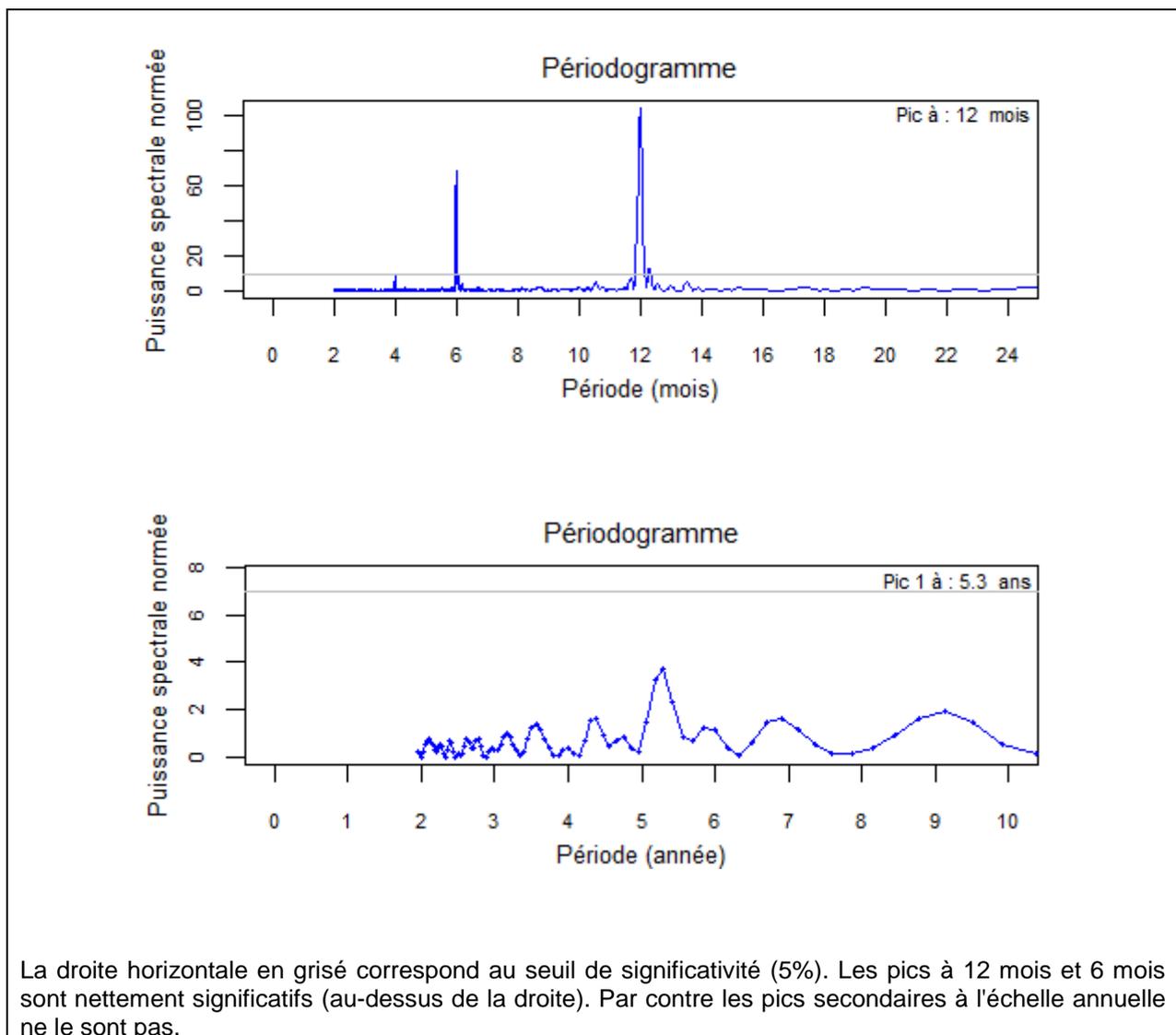


Figure 7 - Périodogrammes de la série de débits de la station hydrométrique Q4801010

## 3. Tests de tendance et rupture

### 3.1. PRÉSENTATION DES TESTS

#### 3.1.1. Précisions sur la notion de tendance

Dans son acception classique, le terme de tendance appliqué à une série temporelle désigne un changement graduel, observable sur une période de temps suffisamment longue, de la valeur d'une variable, par exemple une moyenne annuelle.

Dans le glossaire statistique de l'OCDE, une tendance est ainsi définie (traduction) :

*"Une évolution à long terme dans une série temporelle, que l'on peut considérer, en association avec des oscillations et une composante aléatoire, comme génératrice des valeurs observées".*  
<https://stats.oecd.org/glossary/>

Dans un rapport sur le changement climatique (IPCC, Climate Change, 2013, cf. Références bibliographiques), il est recommandé que (traduction) :

*"La série de données doit être aussi longue que possible. De courtes séries peuvent être fortement affectées par la variabilité climatique, ce qui peut conduire à des résultats erronés. Pour des investigations sur le changement climatique, un minimum de 50 ans est souhaitable, bien que cette durée puisse même ne pas être suffisante".*

Pour les nappes libres exploitées, à la variabilité climatique se superpose la variabilité des prélèvements, les deux influences pouvant s'exercer dans le même sens en période de sécheresse. En général, une baisse prolongée correspond à des prélèvements croissants.

Remarque : Il n'y a aucune certitude qu'une tendance mise en évidence sur une certaine période de temps se prolonge au-delà, sauf forte inertie du processus physique considéré

#### 3.1.2. Détection d'une tendance : le test de Man-Kendall

De très nombreux articles ont été consacrés aux tests statistiques de détection de tendance dans des séries temporelles, en particulier en climatologie et hydrologie. Dans ces articles, les cas traités pour illustrer les tests sont relatifs à des séries longues, à cycles assez courts, avec assez peu ou pas d'autocorrélation.

Le test de Mann-Kendall (et ses variantes) est très souvent utilisé ainsi que ses adaptations pour tenir compte de l'autocorrélation éventuelle dans les séries (le test est décrit en annexe 3).

Tous les tests statistiques, qu'ils soient paramétriques (nécessitant une hypothèse sur la distribution de probabilité de la variable étudiée) ou non paramétriques (comme le test de tendance Mann-Kendall), sont assortis de conditions d'applications : la condition première est l'indépendance (probabiliste) des valeurs de la série, qui ne doivent pas être autocorrélées (cf. annexe 4 pour la définition de l'autocorrélation).

Or, pour les nappes, le niveau d'un mois donné est souvent lié aux niveaux des mois précédents. La portée temporelle de cette dépendance est d'autant plus grande, dépassant parfois l'année, que "l'inertie" de la nappe est importante. L'inertie d'une nappe peut se traduire par un "effet mémoire", qui peut être mis en évidence par un corrélogramme.

Pour les piézomètres étudiés, l'autocorrélation est en général assez faible, traduisant la réactivité de la nappe captée.

La figure 8 ci-après montre des corrélogrammes calculés à partir des valeurs moyennes annuelles (année civile) sur 4 piézomètres régulièrement suivis.

L'autocorrélation d'ordre 1 (au bout d'une année) est de :  
 0.089 pour 10522X0030, 0.128 pour 10305X0234 et 0.133 pour 10293X0152.

Par contre, l'autocorrélation est beaucoup plus forte, 0.74 à l'ordre 1 (au bout d'une d'une année), pour le piézomètre 10305X0083 et subsiste encore à l'ordre 2 (0.416 au bout de 2 ans).

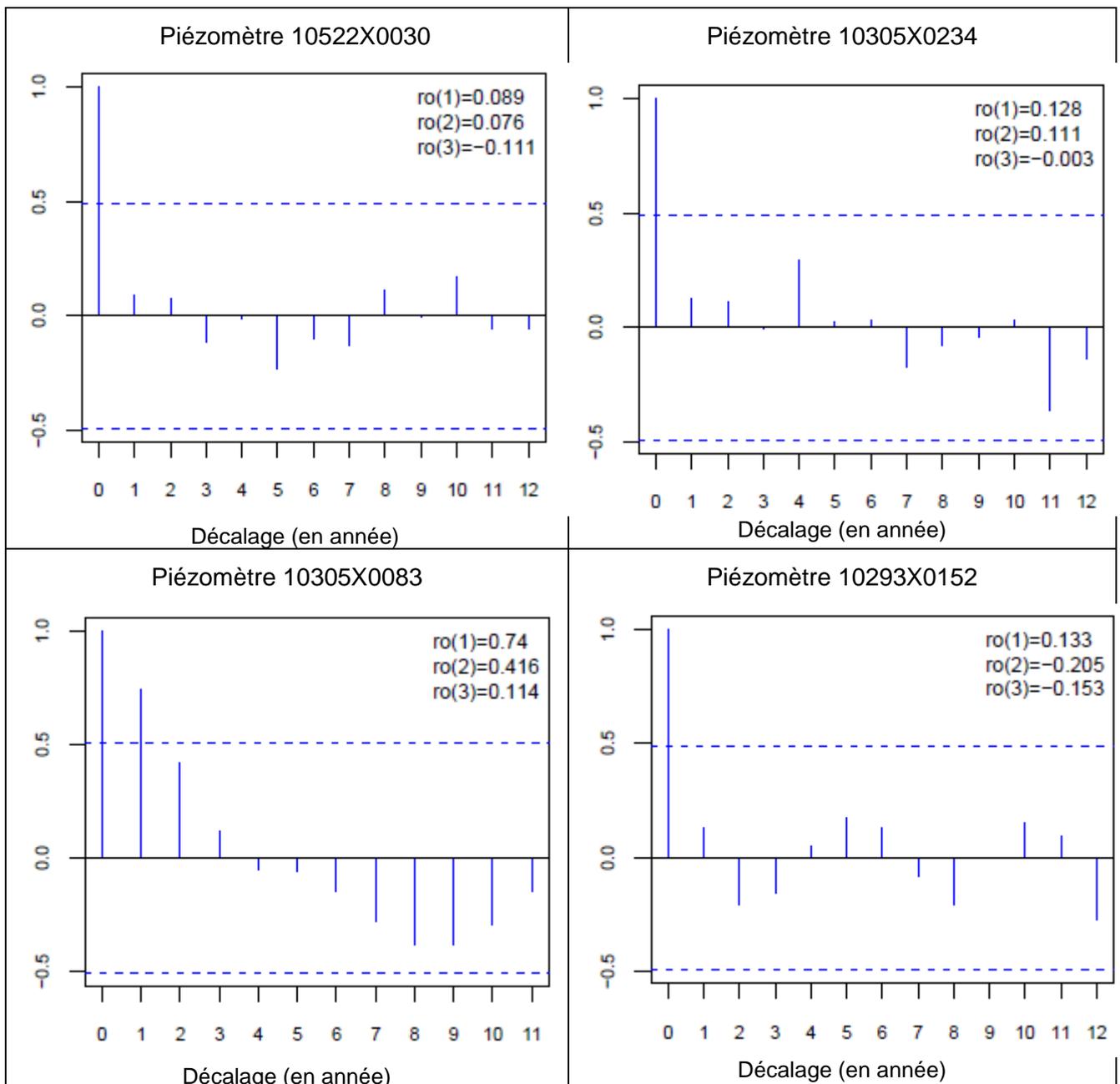


Figure 8 - Corrélogrammes de 4 séries piézométriques pour des ouvrages régulièrement suivis (en ordonnée, la valeur du coefficient d'autocorrélation ; en pointillés, leurs seuils de significativité).

L'existence d'autocorrélation dans les séries temporelles conduit à rejeter l'hypothèse testée, à savoir la stationnarité de la série (pas de tendance), beaucoup plus souvent qu'il n'y aurait lieu (et donc à indiquer une tendance).

Le problème de l'autocorrélation dans les séries chronologiques a été étudié par de nombreux auteurs, en particulier : Woodward et Gray (1993), Hamed et Rao (1998), Yue et al.(2002c), Yue et Wang (2002a), Yue et Pilon (2003), Yue et al. (2003), Yue et Wang (2004), Hamed (2008). Les méthodes proposées par ces auteurs pour adapter le test classique de Mann-Kendall ne fournissent pas toutes le même résultat (la même significativité).

Pour une synthèse, on pourra se reporter aussi à la thèse de B. Renard (2006). Dans la présente étude, c'est la méthode proposée par Hamed et Rao (1998) qui a été utilisée. Elle est implémentée dans le package "fume" du logiciel R (fonction "mkTrend").

### **3.1.3. Détection d'une rupture : le test de Pettitt**

Le test de Pettitt peut être utilisé pour savoir si la série étudiée présente une rupture significative. Il s'agit, comme le test de Mann-Kendall, d'un test non paramétrique. Il est décrit en annexe 1.

L'hypothèse qui est testée est "absence de rupture" (série homogène).

### **3.1.4. Précisions sur les tests utilisés dans l'étude**

Les tests de Mann-Kendall et de Pettitt ont été appliqués aux chroniques de valeurs annuelles de niveaux piézométriques et de débits des cours d'eau : moyennes annuelles (années hydrologiques ou civiles), minima et maxima annuels, moyennes mensuelles minimales années civiles : QMNA pour les débits, HMNA pour les niveaux piézométriques (par analogie avec le QMNA).

Pour les chroniques de niveaux piézométriques, on est en limite d'utilisation des tests, qui requièrent au moins une dizaine de valeurs.

Pour les piézomètres qui ne sont pas régulièrement suivis, les calculs de significativité ont été faits aussi, malgré le faible nombre de mesures effectués chaque année (le calcul d'une moyenne est donc biaisé). Les résultats (pente et significativité) doivent donc être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs.

La significativité des tests est sensible à une valeur près : suivant la présence ou l'absence de la valeur, on peut passer par exemple d'une significativité au risque de 5 % à une significativité au risque de 10 %, voire à une non significativité.

Lorsqu'il existe une tendance, le test de Pettitt, qui est un test d'homogénéité, indique très généralement une rupture, qui n'est pas vraiment une rupture au sens strict, à savoir une partition de la série en 2 ou plusieurs sous-séries séparées par un "saut" de valeurs. La rupture découle de l'existence de la pente.

Le test de Wilcoxon, qui accompagne dans cette étude le test de Pettitt, est un test d'homogénéité, complémentaire du test de Pettitt, et qui le confirme en général.

Interprétation d'un test (détails en annexe 3).

Le résultat d'un test est fourni sous la forme d'une probabilité, une p-value, que l'on compare à un seuil de risque (ou niveau de signification) que l'on s'est donné **a priori** (par exemple 5 % ou 10%). Le risque c'est celui de rejeter l'hypothèse testée alors qu'elle est vraie.

Si la p-value calculée est inférieure au niveau de signification que l'on s'est fixé, on doit rejeter l'hypothèse testée (par exemple pas de tendance) et retenir l'hypothèse alternative (il existe une tendance).

## 3.2. TESTS SUR LES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES

### 3.2.1. Tests sur les moyennes annuelles (année hydrologique)

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les piézomètres y sont classés en 2 groupes : ceux qui sont régulièrement suivis, au nombre de 6, situés en tête du tableau et ceux pour lesquels il y a peu de mesures. Dans chaque groupe, les piézomètres sont classés par p-value croissante.

Les piézomètres régulièrement suivis sont indiqués en caractères gras lorsque la pente de la droite de Sen est considérée comme significative aux seuils de risque de 5% et 10% (p-value < 0.1).

Pour les autres piézomètres, les calculs de significativité ont été faits aussi malgré le faible nombre de mesures effectuées chaque année. Les résultats (pente et significativité) doivent donc être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs.

Piézomètre	Moyenne (m)	Amplitude de variation (m)	Autocorrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (cm/an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
<b>10305X0083</b>	<b>202.84</b>	<b>0.51</b>	<b>0.777</b>	<b>2.7</b>	<b>0.0425</b>	<b>0.0459</b>	<b>2011</b>
<b>10293X0154</b>	<b>123.89</b>	<b>0.79</b>	<b>0.102</b>	<b>1.2</b>	<b>0.0574</b>	<b>0.2306</b>	<b>2012</b>
<b>10305X0234</b>	<b>185.25</b>	<b>0.68</b>	<b>0.204</b>	<b>2.0</b>	<b>0.0594</b>	<b>0.1057</b>	<b>2011</b>
10295X0032	199.32	1.16	0.399	5.6	0.1285	0.3157	2012
10522X0030	275.85	0.35	0.227	0.6	0.6190	0.5414	2011
10035X0009	19.44	0.28	-0.003	0	0.9267	0.9990	2007
10046X0136	108.45	0.98	0.693	5.2	0.0052	0.0182	2008
10522X0193	288.31	0.55	0.356	1.4	0.0351	0.2814	2007
10293X0152	129.56	0.96	0.382	1.3	0.1567	0.6795	2007
10292X0110	110.10	0.94	0.311	2.6	0.1705	0.1420	2012
10306X0247	220.01	1.87	0.415	6.1	0.2975	0.6173	2012
10045X0183	84.02	0.79	0.122	1.7	0.3244	0.6173	2006
10305X0235	181.99	1.6	0.122	-3.6	0.3811	0.9574	2005
10035X0010	18.75	0.64	-0.105	-1	0.3898	0.8794	2006
10305X0231	216.43	0.43	-0.052	0.7	0.4421	0.5034	2012
10035X0012	14.06	0.52	0.223	0.5	0.5207	0.7448	2012
10305X0228	224.58	0.37	0.292	0.7	0.5464	0.8131	2007
10305X0232	213.06	0.28	-0.35	0.4	0.6605	0.6795	2007
10033X0067	25.25	0.78	0.108	-0.6	0.7840	0.9990	2004
10306X0245	231.99	0.55	0.142	0	0.9990	0.9990	2004

Tableau 7 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués sur les moyennes annuelles des 20 piézomètres

La pente de la droite de Sen est très généralement positive, traduisant une hausse des niveaux (17 piézomètres sur les 20). D'après le test de Mann-Kendall, 3 piézomètres du groupe des 6 sont caractérisés par une tendance à la hausse significative au seuil de risque de 10%. Il s'agit des 3 premiers du tableau ci-dessus : 10305X0083, 10293X0154 et 10305X0234.

*Pour ces trois piézomètres, les dates probables de rupture indiquées (2011 et 2012) correspondent à celles mises en évidence par le graphique de la figure 5 au § 2.1.2 ci-avant.*

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour les 3 premiers piézomètres du tableau 7 sont présentés par les figures 9, 10 et 11.

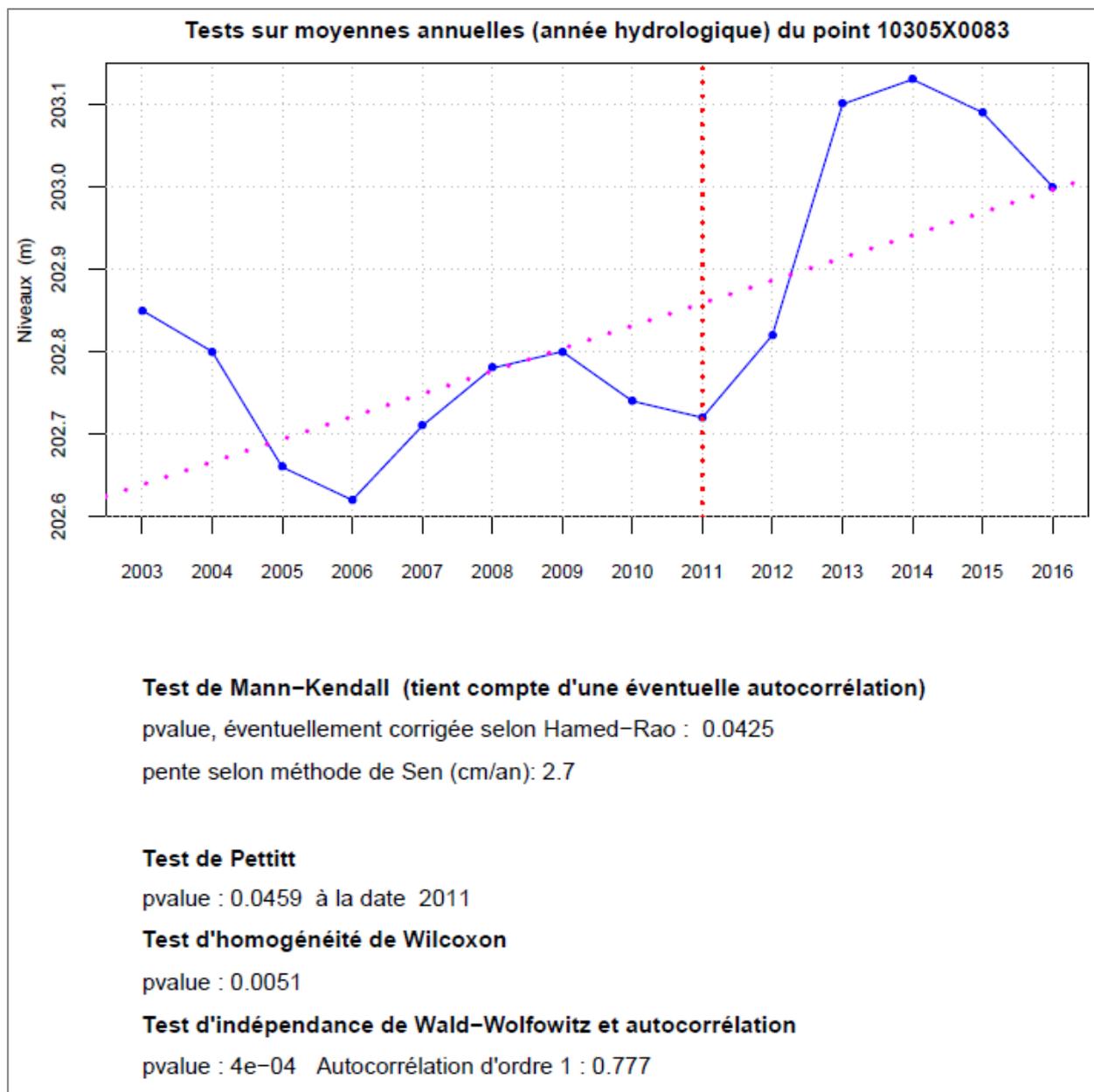


Figure 9 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10305X0083 (n° 1 du tableau 7, régulièrement suivi)

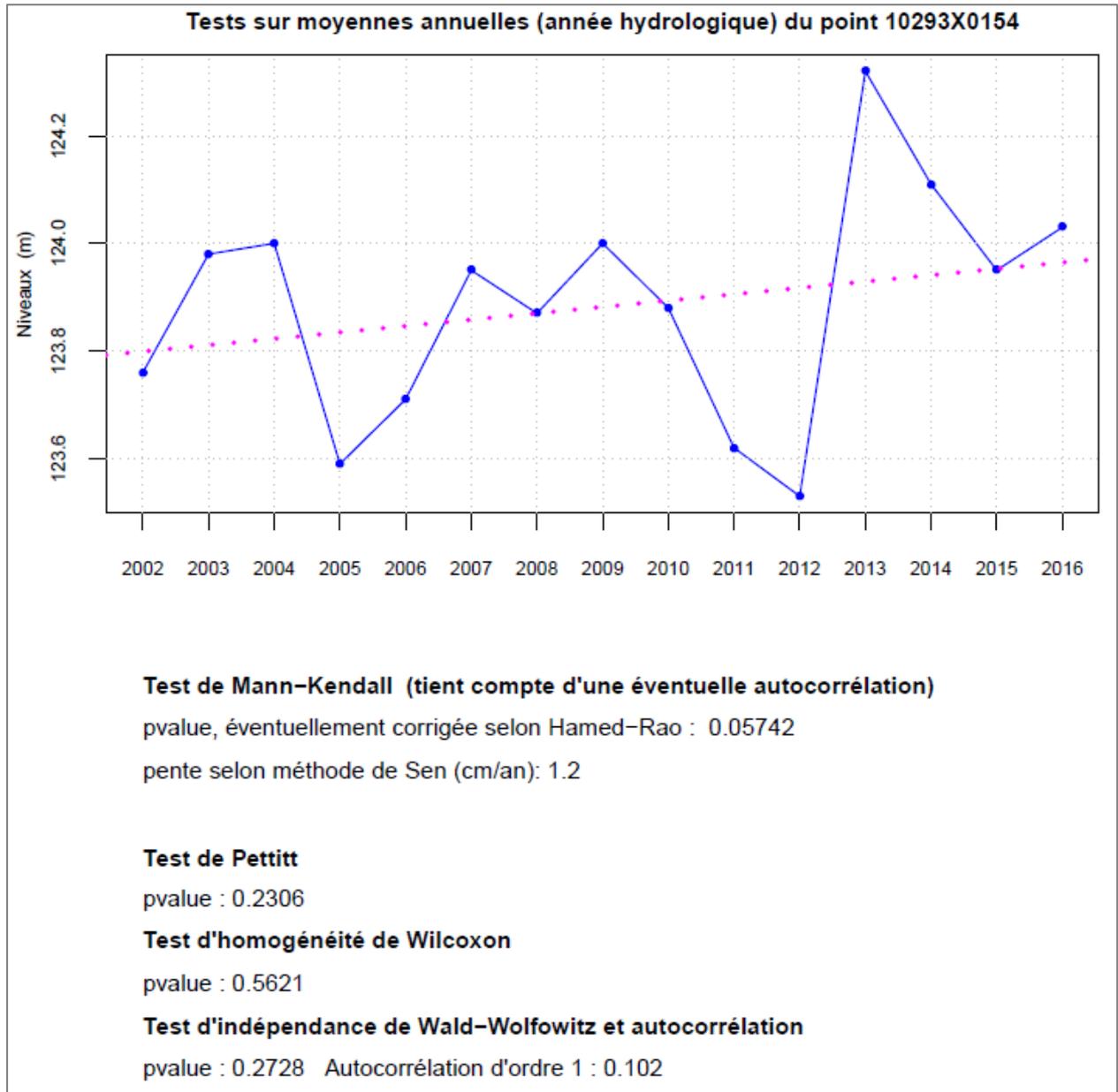


Figure 10 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10293X0154 (n° 2 du tableau 7, régulièrement suivi)

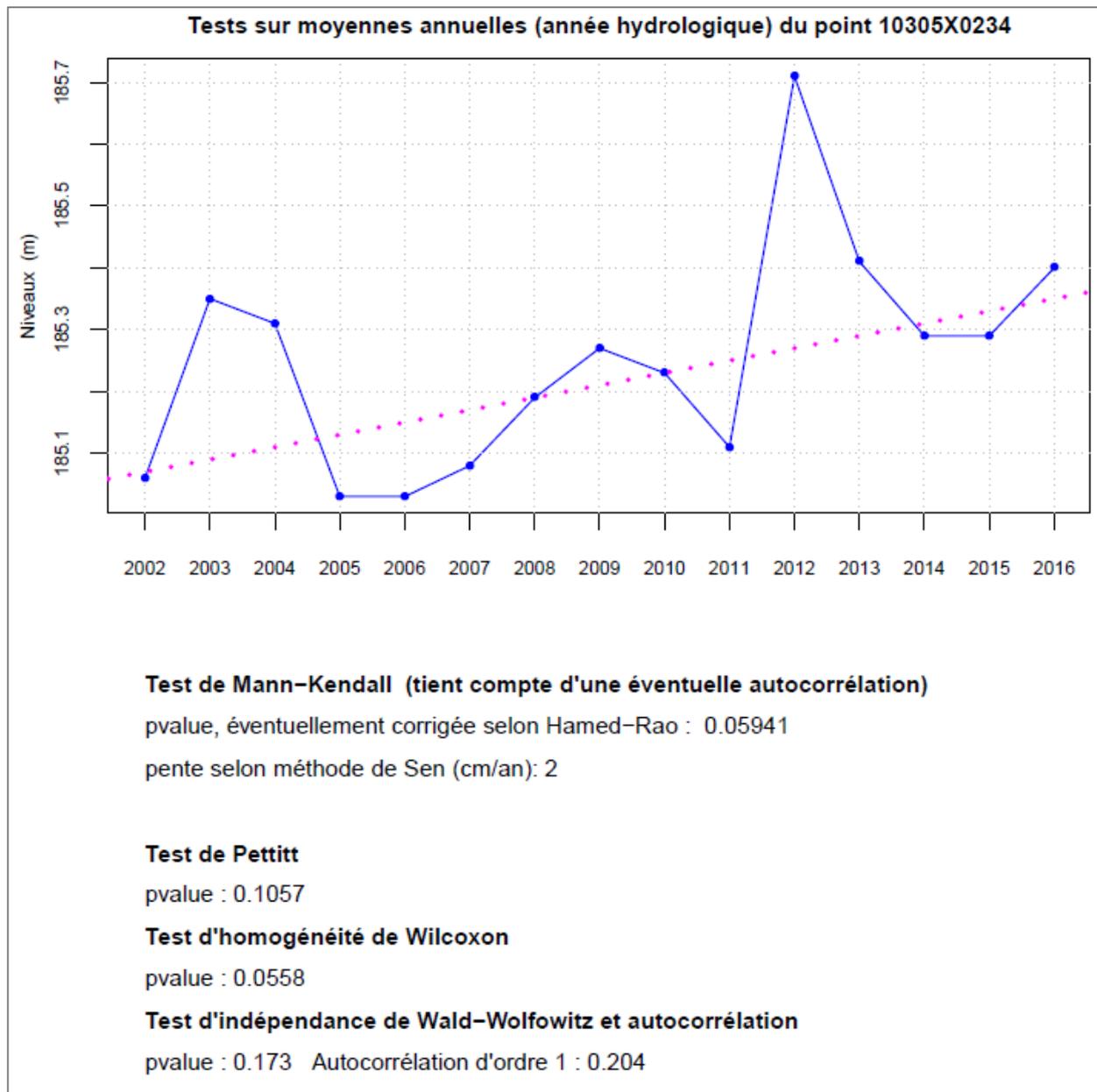


Figure 11 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10305X0234 (n° 3 du tableau 7, régulièrement suivi)

Les résultats obtenus pour le piézomètre 10306X0247 sont aussi représentés graphiquement (figure 12). Cette illustration a été choisie car le piézomètre est caractérisé (en moyenne annuelle) par la pente la plus forte (6.1 cm/an), considérée comme non significative au seuil de risque de 5% ou de 10% (p-value=29.7%). Le résultat du test s'explique par l'amplitude de variation, qui est aussi la plus forte (1.9 m). Mais ce piézomètre n'est pas régulièrement suivi (taux de mesures journalières de 2.9 %, cf. tableau 3), les résultats sont donc à considérer avec prudence et ne sont présentés qu'à titre indicatif.

Remarque: Il peut paraître surprenant qu'une pente de 3.6 cm/an ne soit pas considérée comme significative alors qu'une pente de 1.2 cm/an l'est. Cela dépend de l'amplitude de variations dans la série.

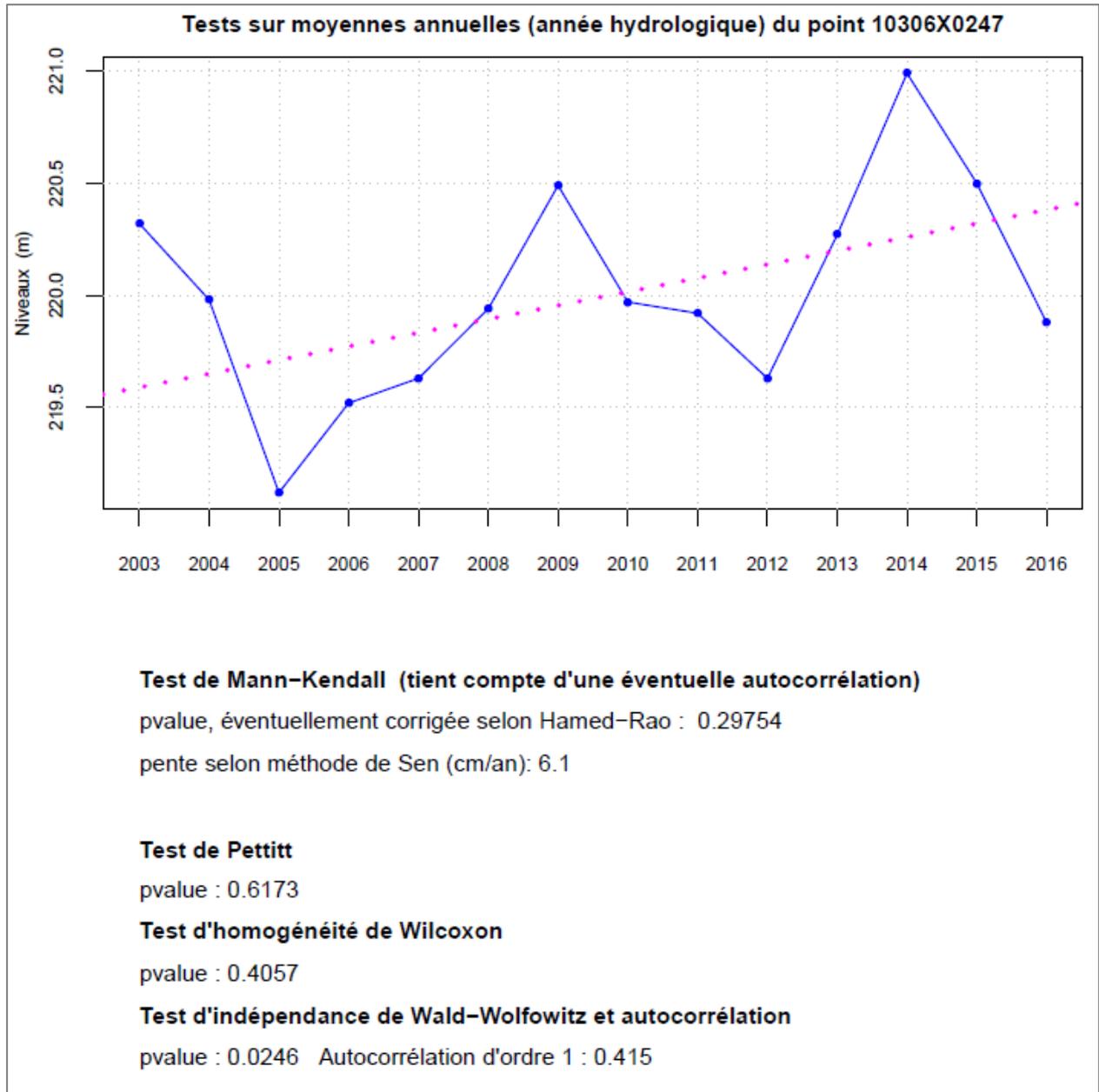


Figure 12 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens annuels (année hydrologique) du piézomètre 10306X0247

### 3.2.2. Tests sur les valeurs moyennes mensuelles minimales année civile (HMNA)

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les piézomètres y sont classés en 2 groupes : ceux qui sont régulièrement suivis, au nombre de 6, situés en tête du tableau et ceux pour lesquels il y a peu de mesures. Dans chaque groupe, les piézomètres sont classés par p-value croissante.

Les piézomètres régulièrement suivis sont indiqués en caractères gras lorsque la pente de la droite de Sen est considérée comme significative aux seuils de risque de 5% et 10%.

Pour les autres piézomètres, les calculs de significativité ont été faits aussi malgré le faible nombre de mesures effectuées chaque année. Les résultats (pente et significativité) doivent donc être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs.

Piézomètre	Moyenne (m)	Amplitude de variation (m)	Autocorrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (cm/an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
<b>10305X0234</b>	<b>184.77</b>	<b>0.72</b>	<b>0.172</b>	<b>1.8</b>	<b>0.0005</b>	<b>0.3350</b>	<b>2006</b>
<b>10295X0032</b>	<b>198.66</b>	<b>0.55</b>	<b>0.24</b>	<b>2.1</b>	<b>0.0124</b>	<b>0.2041</b>	<b>2006</b>
10305X0083	202.61	0.75	0.513	2.1	0.2315	0.0430	2011
10522X0030	275.50	1.39	-0.001	-0.6	0.3444	0.7875	2004
10035X0009	18.96	0.37	0.021	-0.3	0.9128	0.6173	2003
10293X0154	123.23	0.56	0.709	0.4	0.9260	0.1082	2012
10046X0136	108.03	0.68	0.732	3.5	0.0122	0.0310	2008
10306X0247	219.34	1.82	0.355	5.8	0.0258	0.0430	2007
10292X0110	109.62	0.38	-0.036	1.1	0.0472	0.2913	2009
10305X0228	224.33	0.69	0.103	2.2	0.0829	0.3629	2009
10033X0067	24.52	1.58	-0.22	-1.3	0.1508	0.5414	2007
10522X0193	287.91	1.61	-0.32	0.7	0.1971	0.6482	2007
10293X0152	128.93	0.86	0.052	0.8	0.2488	0.8927	2014
10306X0245	231.61	0.65	0.154	-1.5	0.3211	0.6482	2003
10035X0012	13.56	0.34	-0.129	0.7	0.3465	0.2913	2007
10305X0235	181.09	1.66	0.178	-3.4	0.3996	0.6482	2006
10305X0231	216.08	0.28	-0.008	-0.2	0.4010	0.8927	2013
10035X0010	18.34	1.2	-0.226	-0.6	0.5503	0.2913	2009
10045X0183	83.52	0.45	0.292	0.1	0.6895	0.6482	2003
10305X0232	212.81	0.98	-0.006	0.2	0.9212	0.8927	2005

Tableau 8 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes mensuelles minimales calculées aux 20 piézomètres

Par rapport aux valeurs moyennes annuelles, il y a davantage de séries à pente négative ou quasi-nulle (8) que de séries à pente positive (12). On note qu'aucune des séries à pente négative ne présente une tendance au sens du test de Mann-Kendall (p-value supérieure à 0.1).

D'après le test de Mann-Kendall, 2 piézomètres seulement dans le groupe des 6 sont caractérisés par une tendance à la hausse significative au seuil de 5%. Il s'agit des piézomètres 10305X0234 et 10295X0032. Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour ces 2 piézomètres sont présentés par les figures 13 et 14.

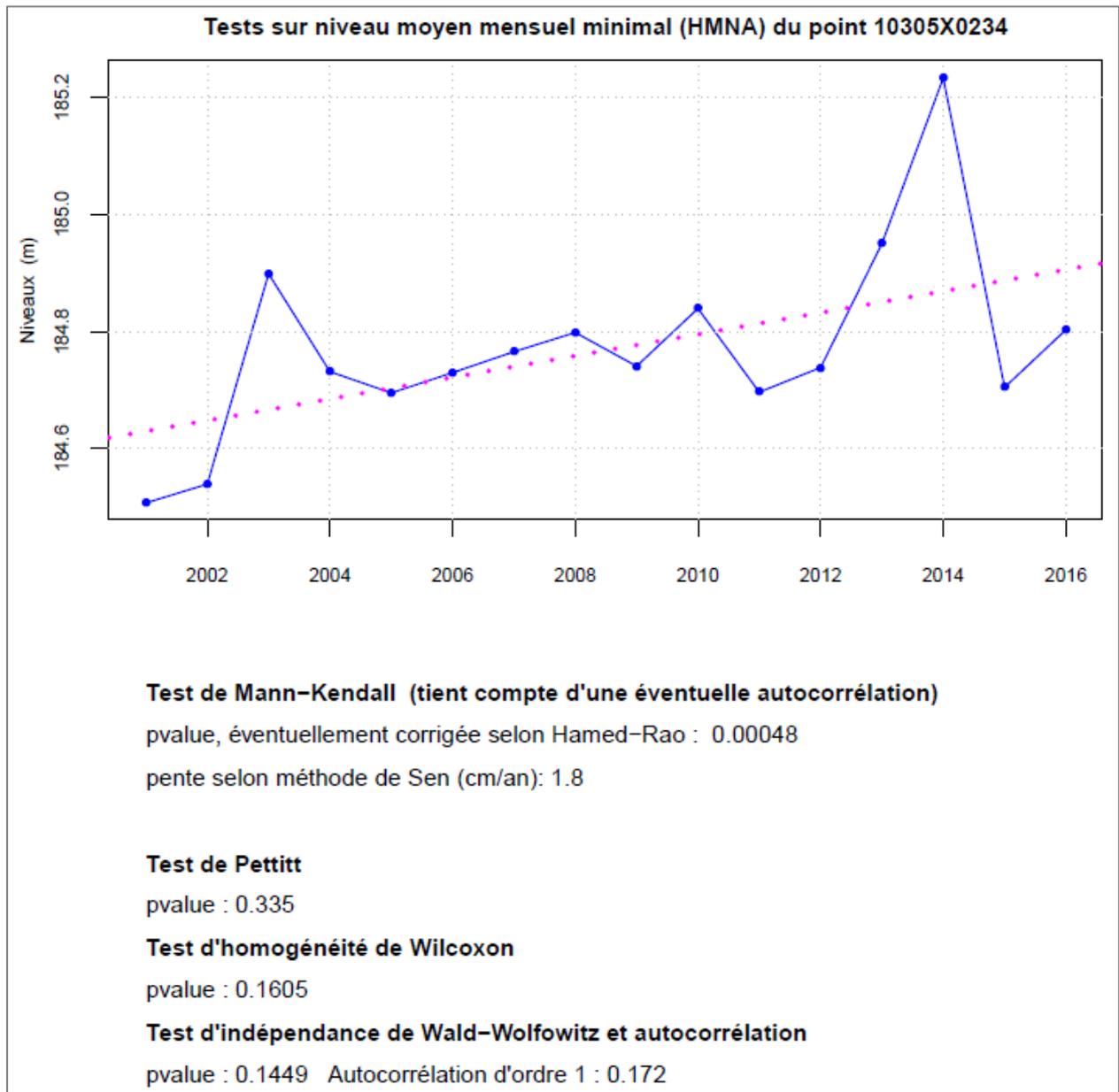


Figure 13 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10305X0234 (régulièrement suivi)

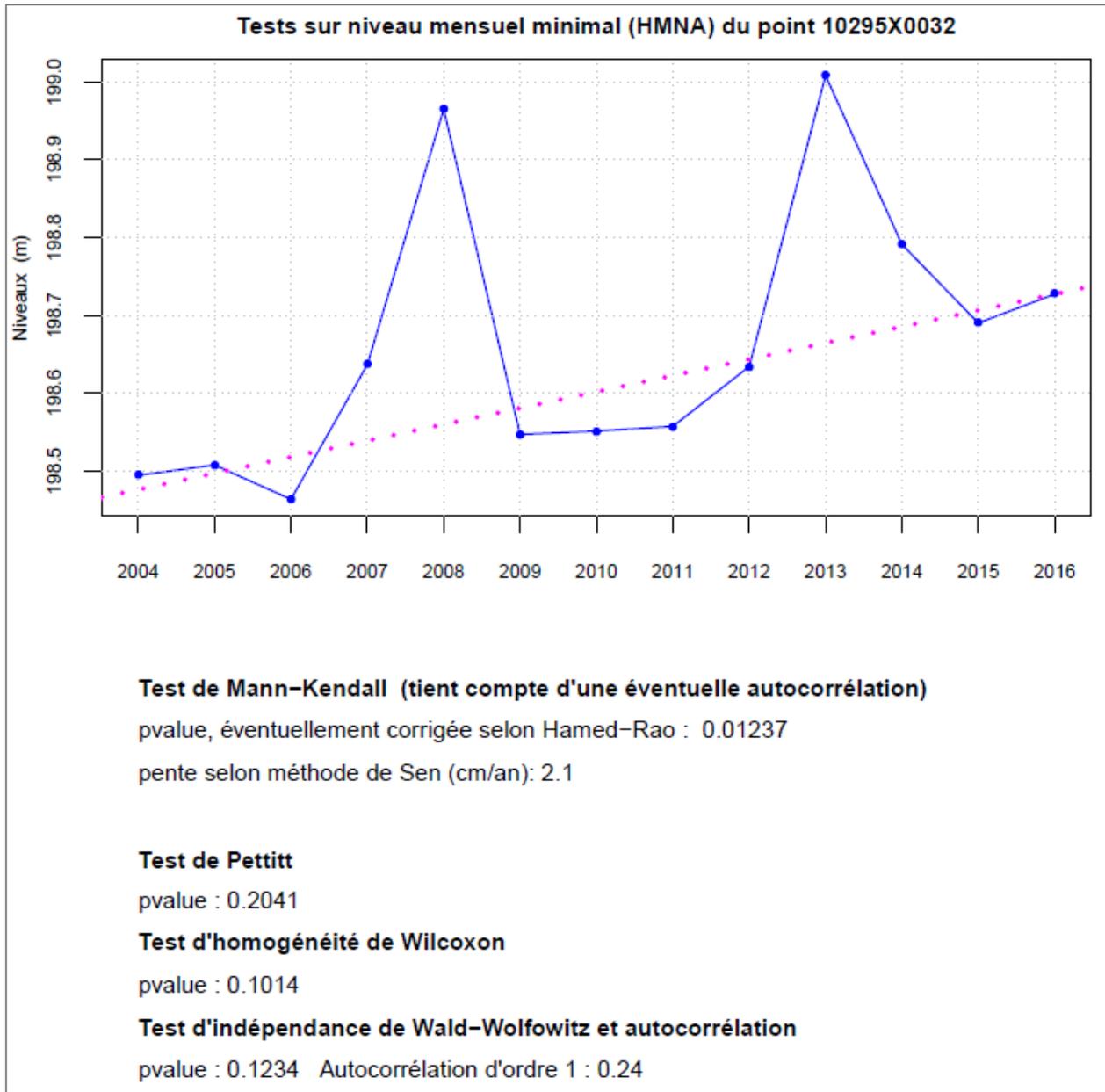


Figure 14 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10295X0032 (régulièrement suivi)

Pour les piézomètres 10046X0136, 10306X0247 et 10292X0110, il existe une pente considérée comme significative au seuil de risque de 5% (figures 15, 16 et 17 pour les graphiques). Mais, comme déjà mentionné, les résultats des tests (pente et significativité) pour les piézomètres qui ne sont pas régulièrement suivis doivent être interprétés avec prudence.

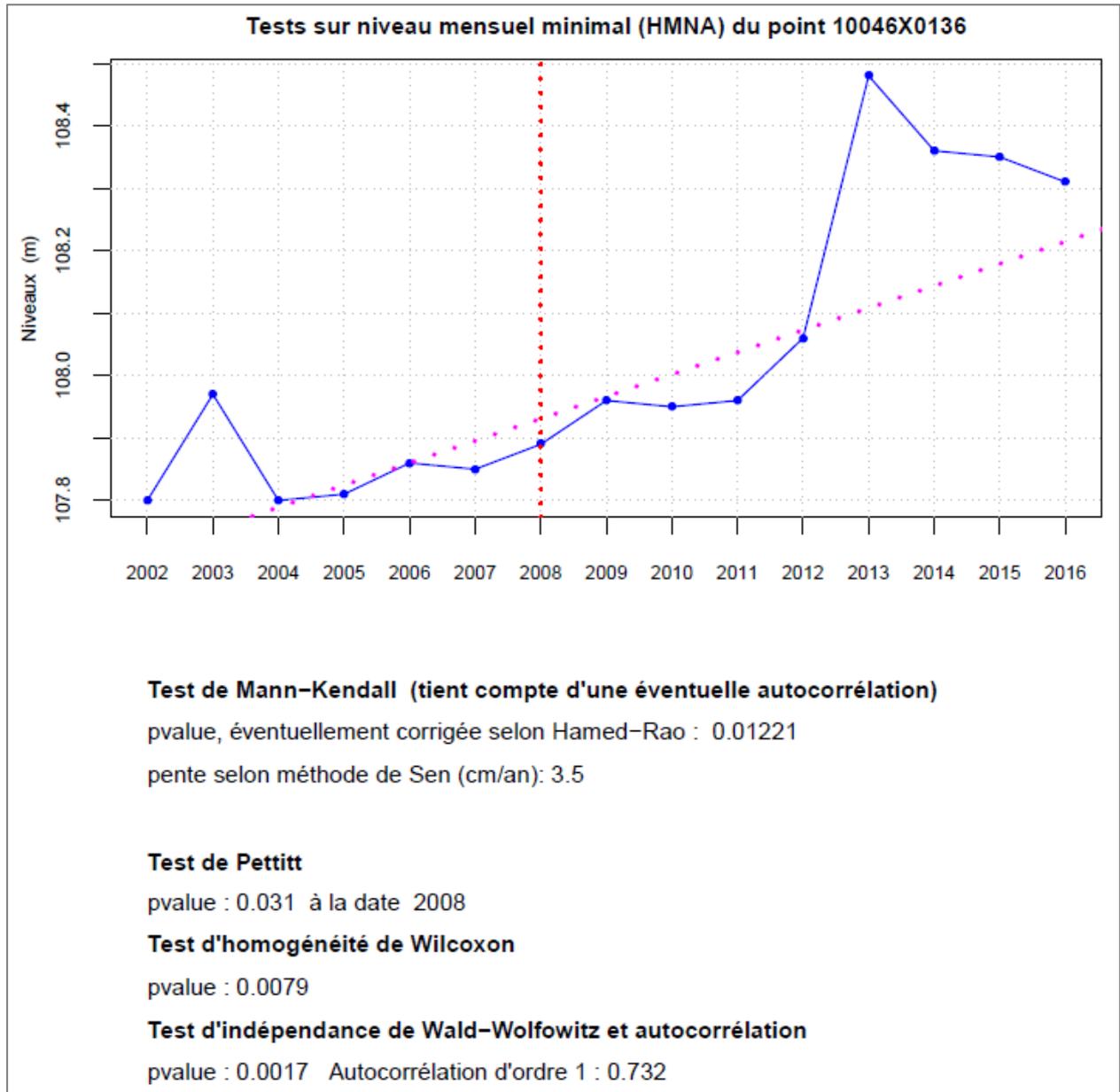


Figure 15 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)

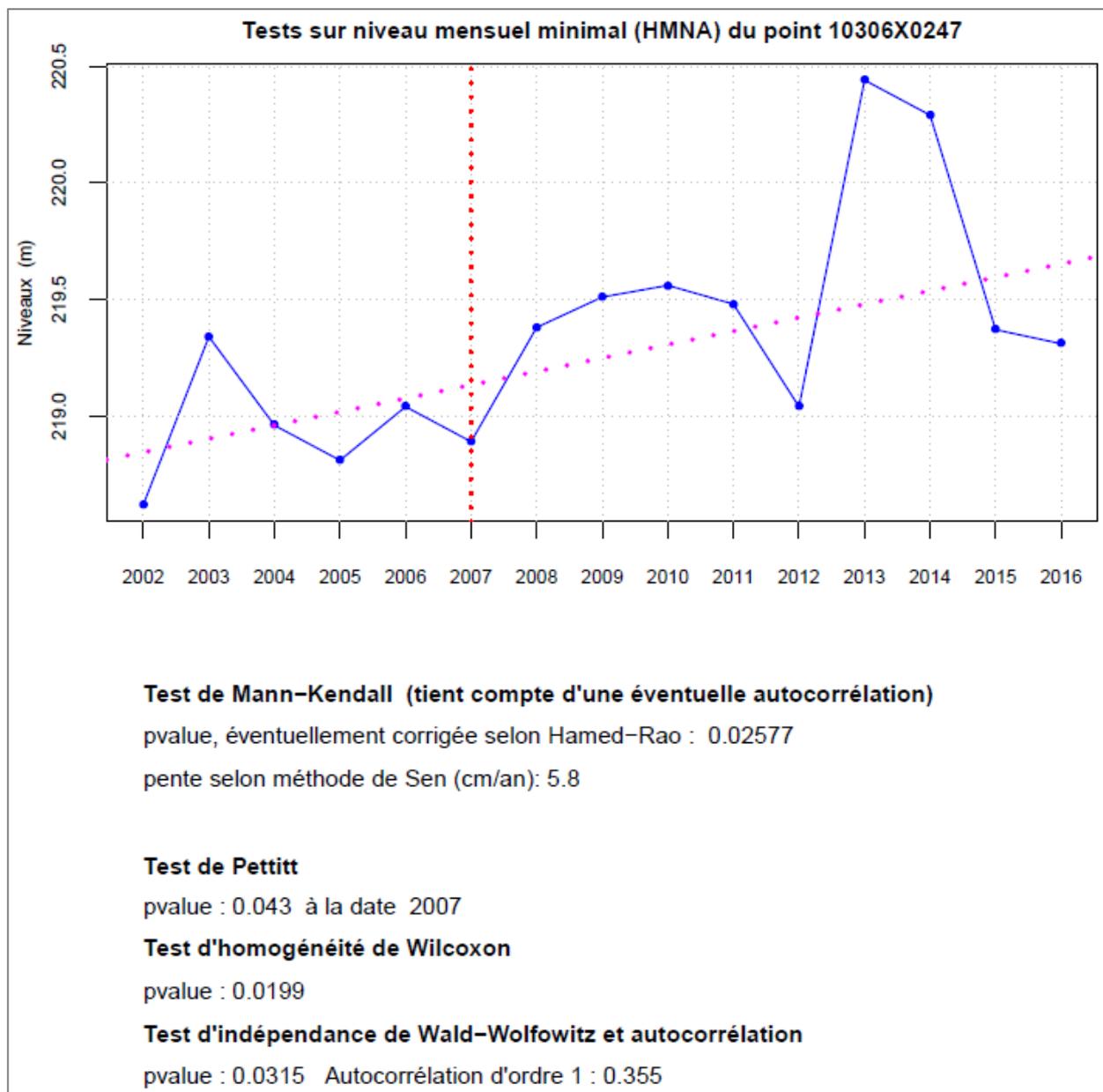


Figure 16 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10306X0247 (faible taux de suivi)

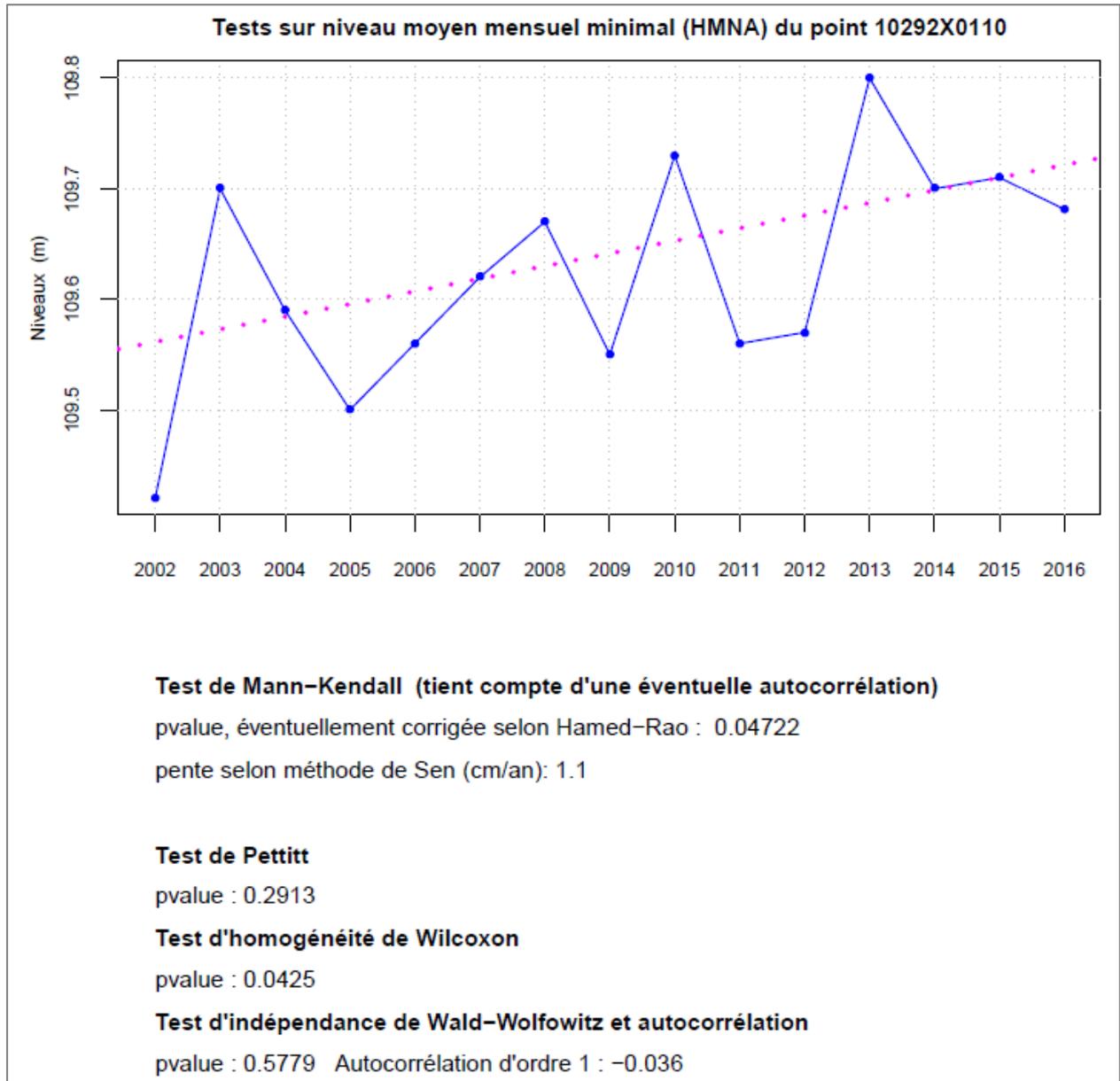


Figure 17 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux moyens mensuels minimum du piézomètre 10292X0110 (faible taux de suivi)

### 3.2.3. Tests sur les valeurs minimales annuelles

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les piézomètres y sont classés en 2 groupes : ceux qui sont régulièrement suivis, au nombre de 6, situés en tête du tableau et ceux pour lesquels il y a peu de mesures. Dans chaque groupe, les piézomètres sont classés par p-value croissante.

Les piézomètres régulièrement suivis sont indiqués en caractères gras lorsque la pente de la droite de Sen est considérée comme significative aux seuils de risque de 5% et 10%.

Pour les autres piézomètres, les calculs de significativité ont été faits aussi malgré le faible nombre de mesures effectuées chaque année. Les résultats (pente et significativité) doivent donc être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs.

n°BSS	Moyenne (m)	Ecart maxi-mini (m)	Autocorrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (cm/an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
<b>10295X0032</b>	<b>198.58</b>	<b>0.51</b>	<b>0.071</b>	<b>2.1</b>	<b>0.0641</b>	<b>0.2698</b>	<b>2007</b>
10305X0083	202.50	0.4	0.707	2	0.1230	0.07637	2012
10035X0009	18.82	0.96	-0.108	-0.5	0.2198	0.36018	2008
10305X0234	184.60	0.86	-0.225	0.4	0.3435	0.89269	2006
10522X0030	275.33	1.42	-0.074	0.4	0.4863	0.44626	2012
10293X0154	123.15	0.51	0.581	-0.6	0.9707	0.23065	2013
10046X0136	108.03	0.75	0.715	4	0.0001	0.01489	2009
10035X0012	13.55	0.57	0.076	1.2	0.0246	0.05465	2008
10522X0193	287.89	1.53	-0.433	1.1	0.0704	0.28137	2007
10306X0247	219.36	1.68	0.334	4.8	0.0798	0.12237	2007
10292X0110	109.60	1.01	-0.03	1	0.2270	0.50336	2006
10305X0235	181.18	2.38	0.097	-3.1	0.2736	0.31867	2006
10033X0067	24.54	1.82	-0.128	-1.1	0.2961	0.55858	2013
10306X0245	231.60	0.7	0.185	-1.6	0.3796	0.81314	2005
10293X0152	128.93	0.72	0.148	2	0.4094	0.74482	2012
10305X0232	212.73	0.7	-0.073	-0.5	0.5100	0.35945	2011
10305X0231	216.08	0.46	-0.28	0.3	0.5846	0.50336	2006
10305X0228	224.31	0.44	0.379	0.6	0.7418	0.95735	2007
10035X0010	18.25	0.69	-0.644	0	0.8535	0.58611	2008
10045X0183	83.54	0.83	0.109	-0.3	0.9128	0.61732	2004

Tableau 9 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs minimales enregistrées aux 20 piézomètres étudiés.

La pente de la droite de Sen est positive pour 11 piézomètres sur 20. D'après le test de Mann-Kendall, 1 piézomètre seulement du groupe des 6 est caractérisé par une tendance à la hausse significative au seuil de risque de 10%. Il s'agit du piézomètre 10295X0032 (figure 18). Comme pour les HMNA, on note qu'aucune des séries à pente négative ne présente une tendance au sens du test de Mann-Kendall (significativité supérieure à 10%).

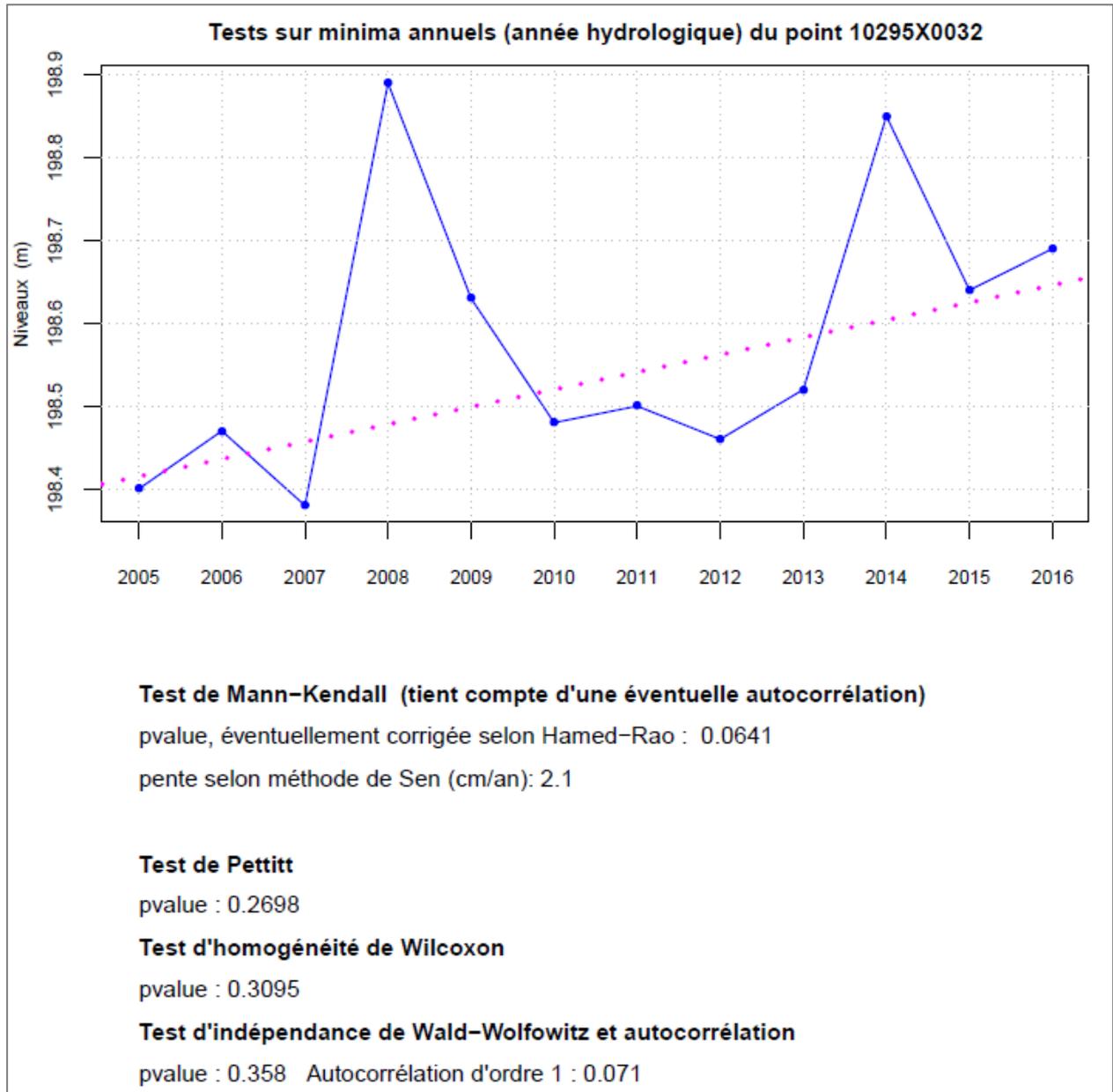


Figure 18 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10295X0032 (régulièrement suivi)

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour les 2 premiers piézomètres du deuxième groupe (pente significative au seuil de risque de 5%) sont présentés par les figures 19 et 20.

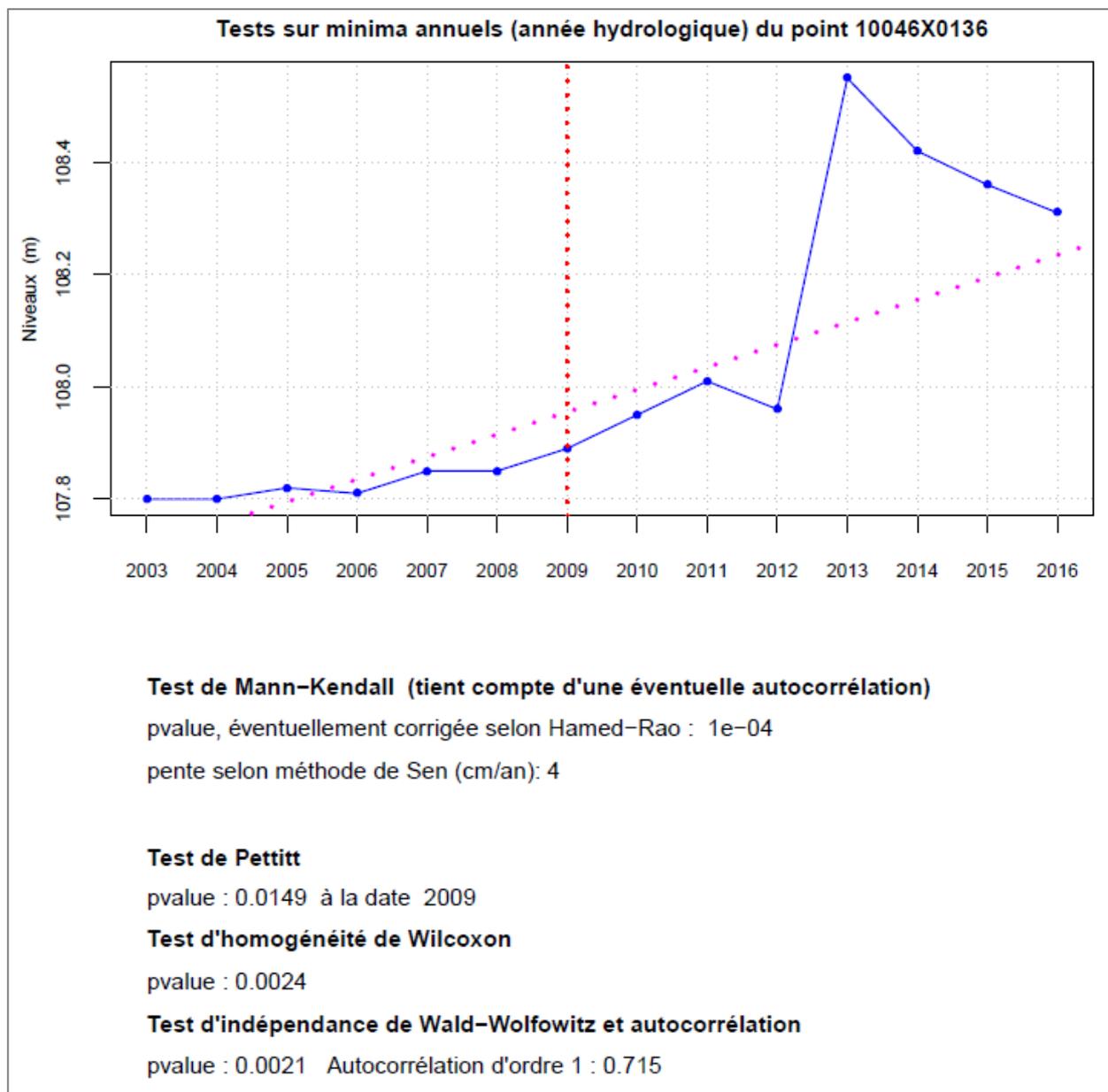


Figure 19 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)

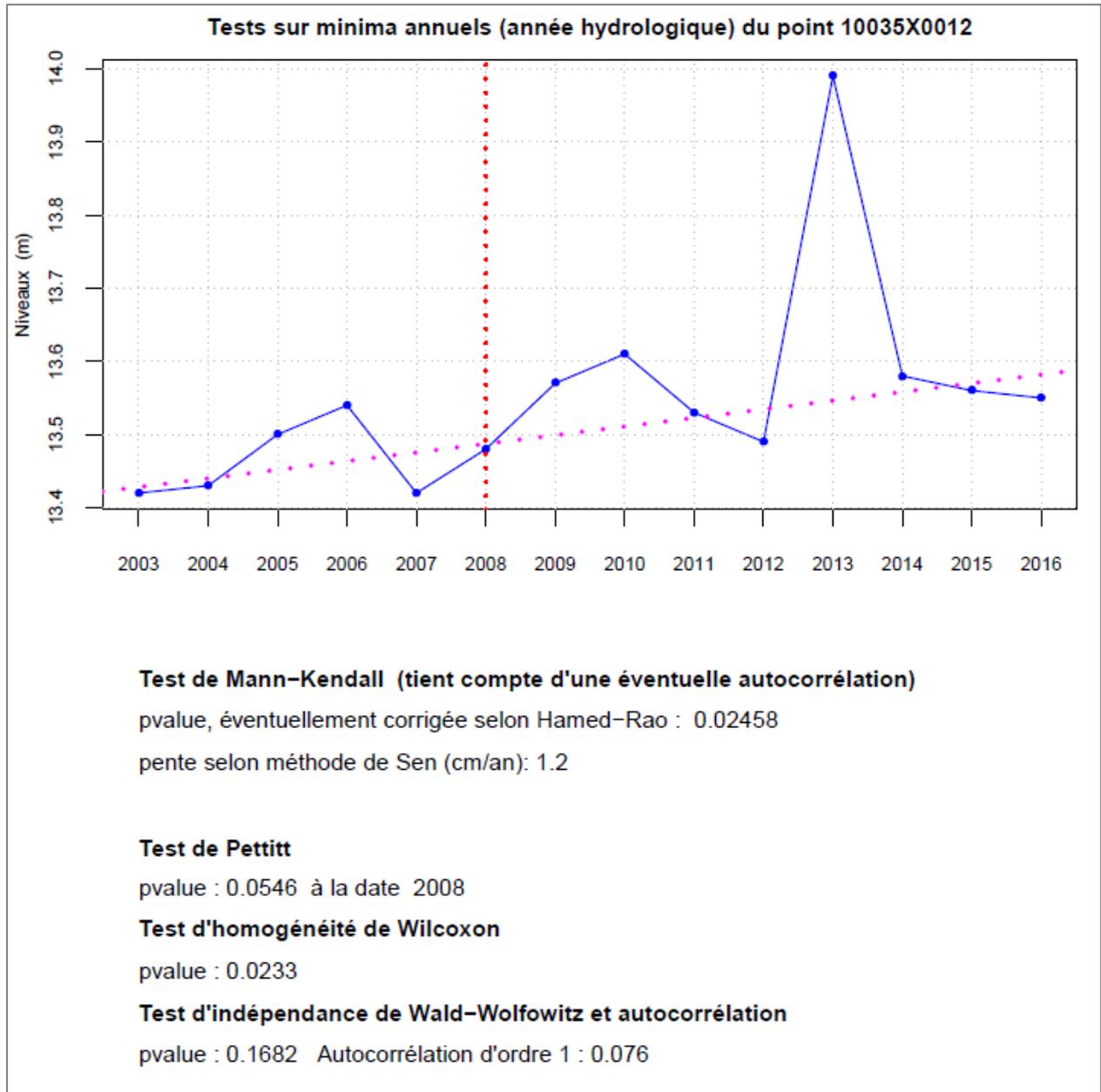


Figure 20 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux minimum du piézomètre 10035X0012 (faible taux de suivi)

### 3.2.4. Tests sur les valeurs maximales annuelles

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les piézomètres y sont classés en 2 groupes : ceux qui sont régulièrement suivis, au nombre de 6, situés en tête du tableau et ceux pour lesquels il y a peu de mesures. Dans chaque groupe, les piézomètres sont classés par p-value croissante.

Les piézomètres régulièrement suivis sont indiqués en caractères gras lorsque la pente de la droite de Sen est considérée comme significative aux seuils de risque de 5% et 10%.

Pour les autres piézomètres, les calculs de significativité ont été faits aussi malgré le faible nombre de mesures effectuées chaque année. Les résultats (pente et significativité) doivent donc être considérés avec prudence et ne peuvent être qu'indicatifs.

n° BSS	Moyenne (m)	Ecart maxi-mini (m)	Autocorrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (cm/an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
<b>10305X0234</b>	<b>186.70</b>	<b>3.11</b>	<b>0.171</b>	<b>7.7</b>	<b>0.0055</b>	<b>0.2913</b>	<b>2011</b>
10305X0083	203.73	1.49	0.47	2.7	0.1118	0.1224	2011
10295X0032	200.79	3.02	0.402	11.9	0.1167	0.4240	2012
10035X0009	21.84	1.83	-0.13	2.4	0.3601	0.4642	2007
10293X0154	125.63	2.01	0.011	-0.8	0.6709	0.9990	2012
10522X0030	276.79	1.32	-0.435	-0.6	0.7400	0.9990	2012
10046X0136	108.97	1.12	0.633	7.6	0.0037	0.0266	2008
10305X0232	213.45	1.28	-0.015	4	0.0115	0.1224	2007
10305X0231	216.82	1.42	-0.177	1.8	0.0802	0.3187	2012
10522X0193	288.78	1.07	0.101	2.2	0.1005	0.2167	2007
10045X0183	84.67	1.13	0.117	3.7	0.1388	0.1420	2012
10306X0247	220.62	1.8	0.04	3.6	0.1889	0.3187	2012
10033X0067	26.14	2.24	0.532	4.8	0.2736	0.4518	2011
10293X0152	130.27	1.38	0.121	2.2	0.3244	0.5586	2011
10035X0012	15.04	1.81	0.061	4.7	0.3513	0.3595	2011
10305X0228	224.83	0.42	0.047	0.4	0.3630	0.9990	2012
10292X0110	110.80	2.42	0.246	4.4	0.3811	0.2474	2012
10306X0245	232.45	0.85	-0.286	0.5	0.4052	0.7448	2006
10305X0235	182.79	1.58	-0.018	-1.6	0.7011	0.9990	2005
10035X0010	19.58	1.71	-0.036	0.4	0.9514	0.8794	2011

Tableau 10 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales enregistrées aux 20 piézomètres étudiés

La pente de la droite de Sen est positive pour 17 piézomètres sur 20. D'après le test de Mann-Kendall, 1 piézomètre seulement du groupe des 6 est caractérisé par une tendance à la hausse significative au seuil de risque de 5%. Il s'agit du piézomètre 10305X0234 (figure 21).

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour les 2 premiers piézomètres du deuxième groupe (10046X0136, et 10305X0232, avec une pente significative au seuil de risque de 5%) sont présentés par les figures 22 et 23.

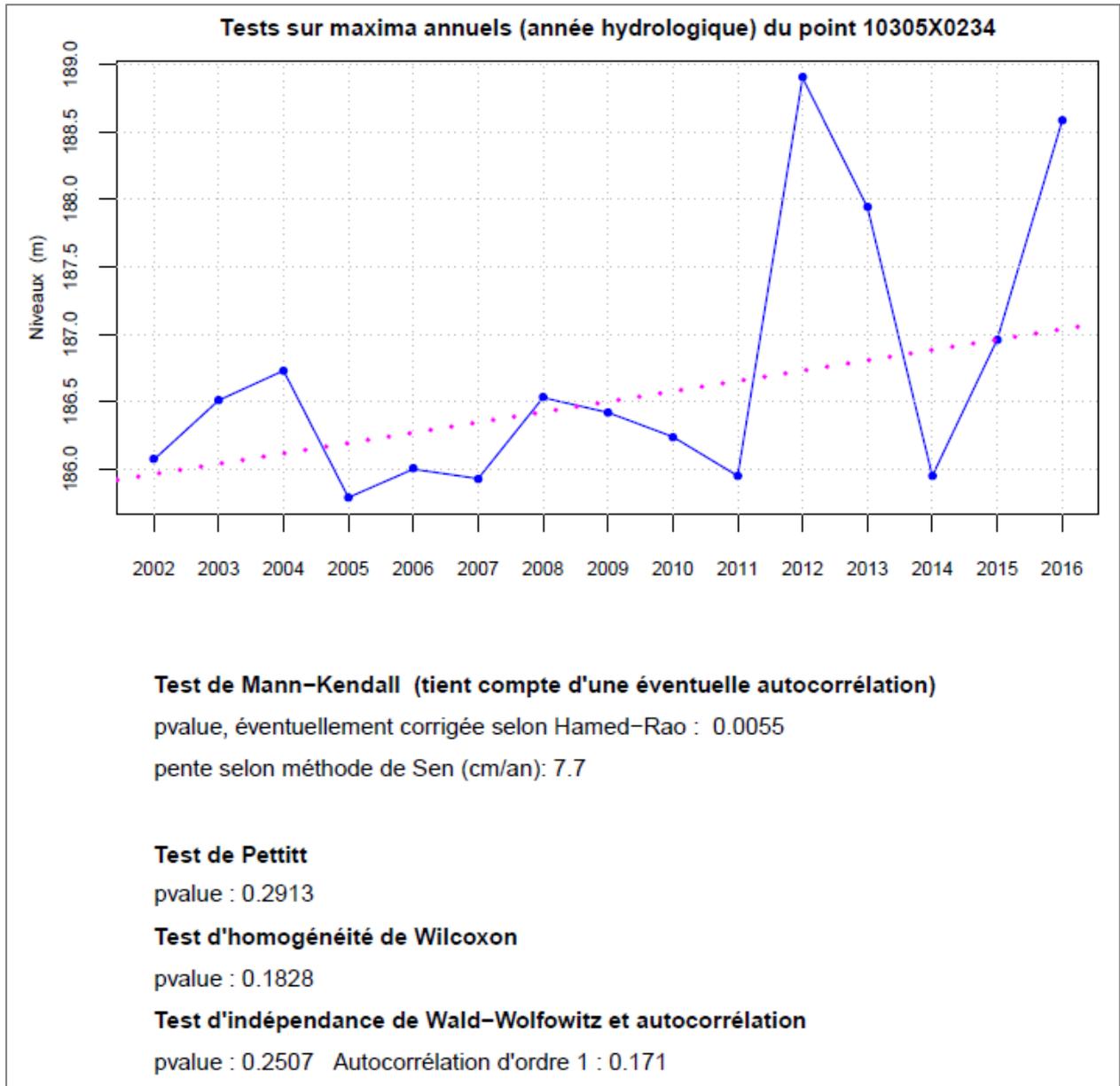


Figure 21 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10305X0234 (régulièrement suivi)

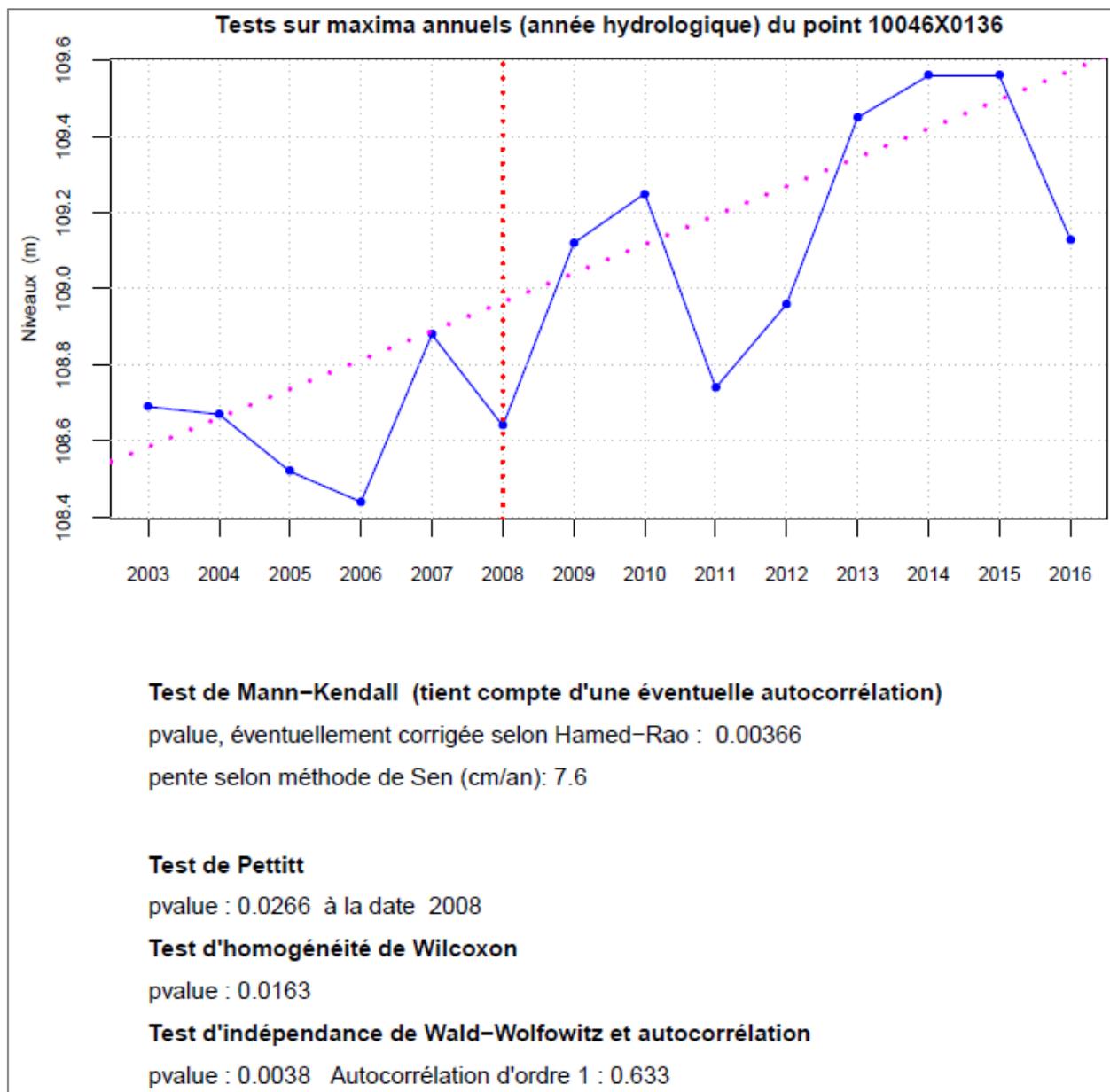


Figure 22 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10046X0136 (faible taux de suivi)

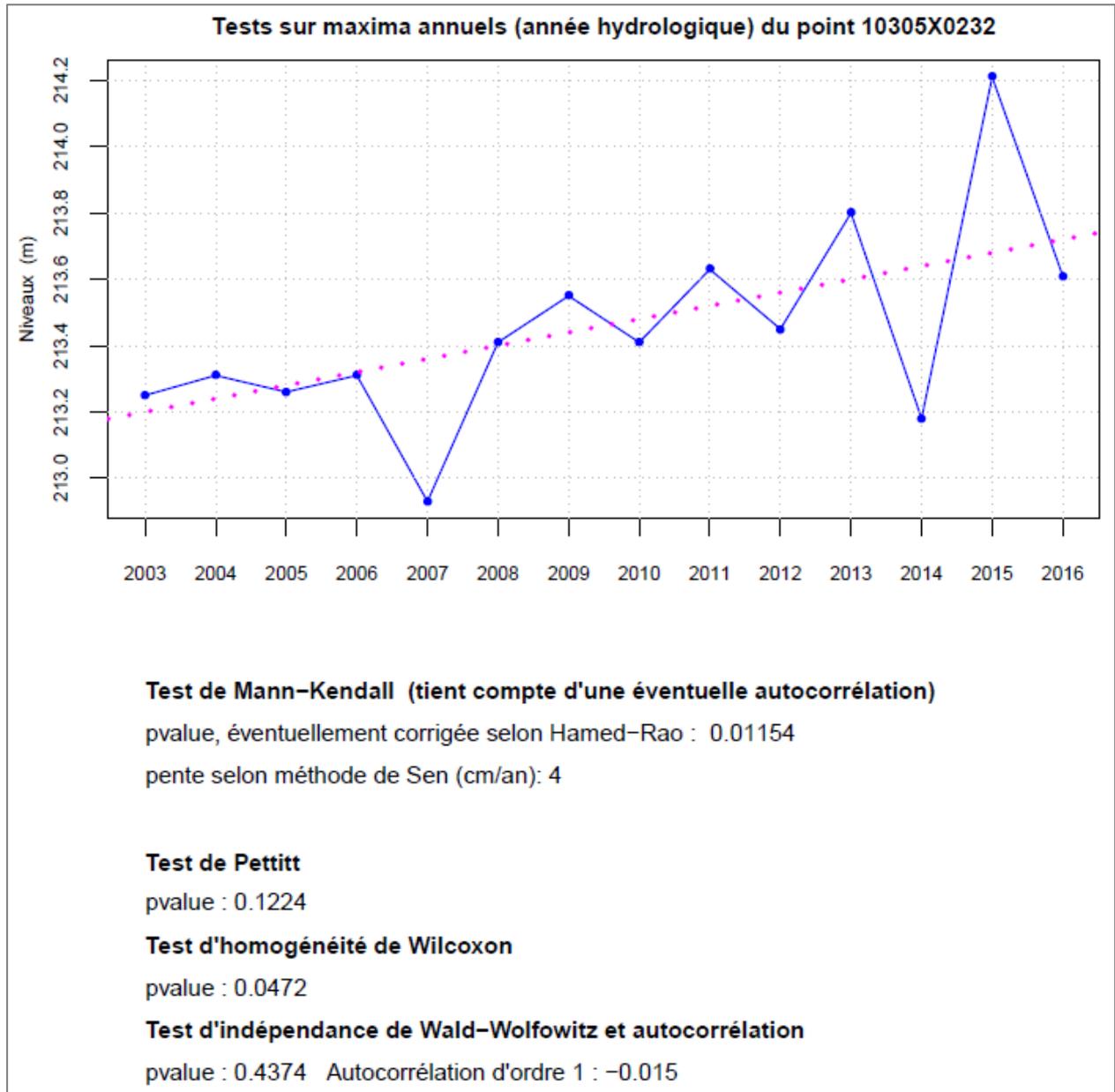


Figure 23 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux niveaux annuels maximum du piézomètre 10305X0232 (taux de suivi intermédiaire - 38%)

### 3.2.5. Synthèse sur les tendances détectées dans les chroniques piézométriques

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des tests appliqués aux 4 variables étudiées et pour les 6 piézomètres régulièrement suivis :

- moyennes annuelles (années hydrologiques) ;
- moyennes mensuelles minimum de l'année civile (HMNA) ;
- minima annuels ;
- maxima annuels.

Piézomètre	10522X0030	10305X0083	10305X0234	10293X0154	10035X0009	10295X0032
Variable						
Moyennes annuelles	HNS	<b>Hausse S5</b>	<b>Hausse S10</b>	<b>Hausse S10</b>	pente nulle	HNS
HMNA	BNS	HNS	<b>Hausse TS</b>	HNS	BNS	<b>Hausse S5</b>
Minima annuels	HNS	HNS	HNS	BNS	BNS	<b>Hausse S10</b>
Maxima annuels	BNS	HNS	<b>Hausse S5</b>	BNS	HNS	HNS

*Tableau 11 - Synthèse des résultats du test de Mann-Kendall pour les chroniques piézométriques régulièrement suivies*

HNS = hausse non significative

BNS = baisse non significative

TS = tendance très significative (p-value extrêmement faible)

S5 = tendance significative au seuil de risque de 5%

S10 = tendance significative au seuil de risque de 10%

Pour les moyennes annuelles, la tendance à la hausse (significative et non significative) concerne 5 piézomètres sur les 6. Pour les 3 autres variables, les résultats sont plus diversifiés et rien de vraiment probant ne se dégage pour pouvoir caractériser globalement le comportement des piézomètres relativement à ces variables. Néanmoins, globalement sur la période de mesures considérée (de 2002 (ou 2003, 2004, 2005 suivant les piézomètres), jusqu'en 2016), la tendance à la hausse l'emporte sur la tendance à la baisse.

#### Remarque :

La chronique de données sur laquelle est effectuée un test statistique de tendance doit être suffisamment longue pour éviter une interprétation erronée, comme le montre la figure 24, où, en appliquant le même test sur i) la période 1994-2008 et ii) sur la période 1997-2001, on obtient des résultats opposés.

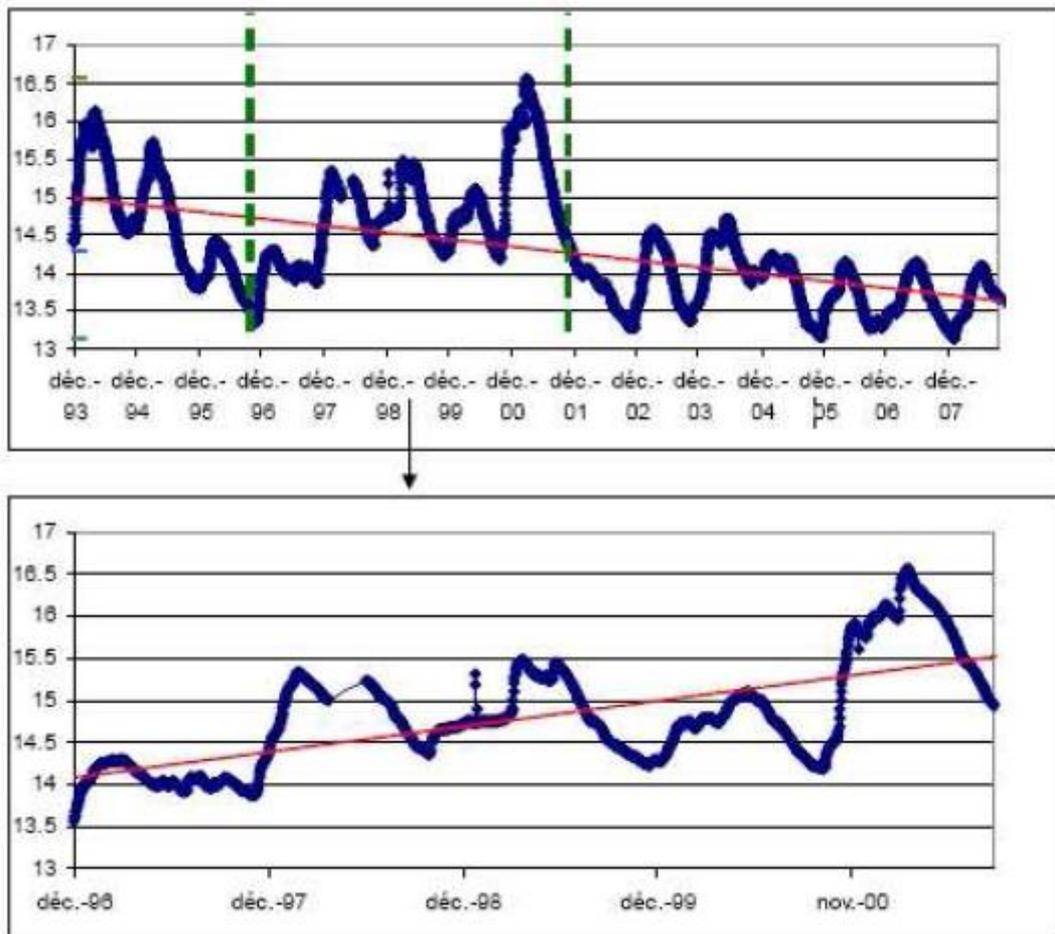


Figure 24 - Influence des durées d'acquisition des mesures sur la mise en évidence des tendances  
(source : Guide d'évaluation de l'état quantitatif des masses d'eau souterraine  
(Ministère de l'Ecologie, 2012))

### 3.2.6. Date des minima mensuels (HMNA) et des maxima mensuels (HMXA)

Par date on entend le mois où, chaque année civile, la valeur moyenne mensuelle minimale est atteinte (appelée HMNA par analogie avec le QMNA). De même pour la valeur moyenne mensuelle maximale (appelée HMXA).

Pour chaque piézomètre du groupe des 6 régulièrement suivis, les mois où le HMNA et le HMXA ont été atteints ont été recherchés et reportés graphiquement en fonction des années. Des histogrammes précisent la fréquence d'occurrence de ces mois sur toute la période de mesures (un exemple est fourni par la figure 25 pour le piézomètre 10293X0154).

Le tableau qui suit recense les mois dont la fréquence d'occurrence est la plus forte (jusqu'à l'ordre 3, par fréquence décroissante).

Piézomètre	HMNA			HMXA		
	Mois ordre 1	Mois ordre 2	Mois ordre 3	Mois ordre 1	Mois ordre 2	Mois ordre 3
10522X0030	9 (40.0 %)	10 (33.3 %)	8 (13.3 %)	5 (46.7 %)	6 (26.7 %)	4 (20.0 %)
10305X0083	10 (33.3 %)	9 (26.7 %)	1 (13.3 %)	5 (46.7 %)	6 (20.0 %)	4 (13.3 %)
10305X0234	10 (42.9 %)	9 (21.4 %)	8 (14.3 %)	6 (28.6 %)	5 (21.4 %)	4 (21.4 %)
10293X0154	10 (40.0 %)	9 (33.3 %)	8 (13.3 %)	3 (26.7 %)	2 (26.7 %)	12 (20.0 %)
10035X0009	9 (35.7 %)	8 (28.6 %)	10 (21.4 %)	5 (42.9 %)	2 (21.4 %)	4 (14.3 %)
10295X0032	10 (53.8 %)	11 (23.1 %)	12 (7.7 %)	2 (30.8 %)	3 (23.1 %)	12 (15.4 %)

Tableau 12 - Fréquence d'occurrence des mois où le HMNA et le HMXA sont atteints

Le HMNA est atteint le plus fréquemment aux mois d'octobre et de septembre, suivis par le mois d'août. Pour les débits mesurés aux stations hydrologiques, le QMNA est atteint le plus fréquemment au mois d'août, puis viennent ensuite les mois de septembre et d'octobre, soit une inversion de l'ordre des occurrences par rapport aux niveaux (cf. § 3.3.9).

Pour le HMXA, la variabilité est plus grande, mais les mois où il est atteint le plus fréquemment sont les mois de mai et juin (ordres 1 et 2). A l'ordre 3, on trouve souvent le mois d'avril. Pour les débits (cf. § 3.3.9), les mois du QMXA sont les mois de juin et mai (ordres 1 et 2) et avril (ordre 2).

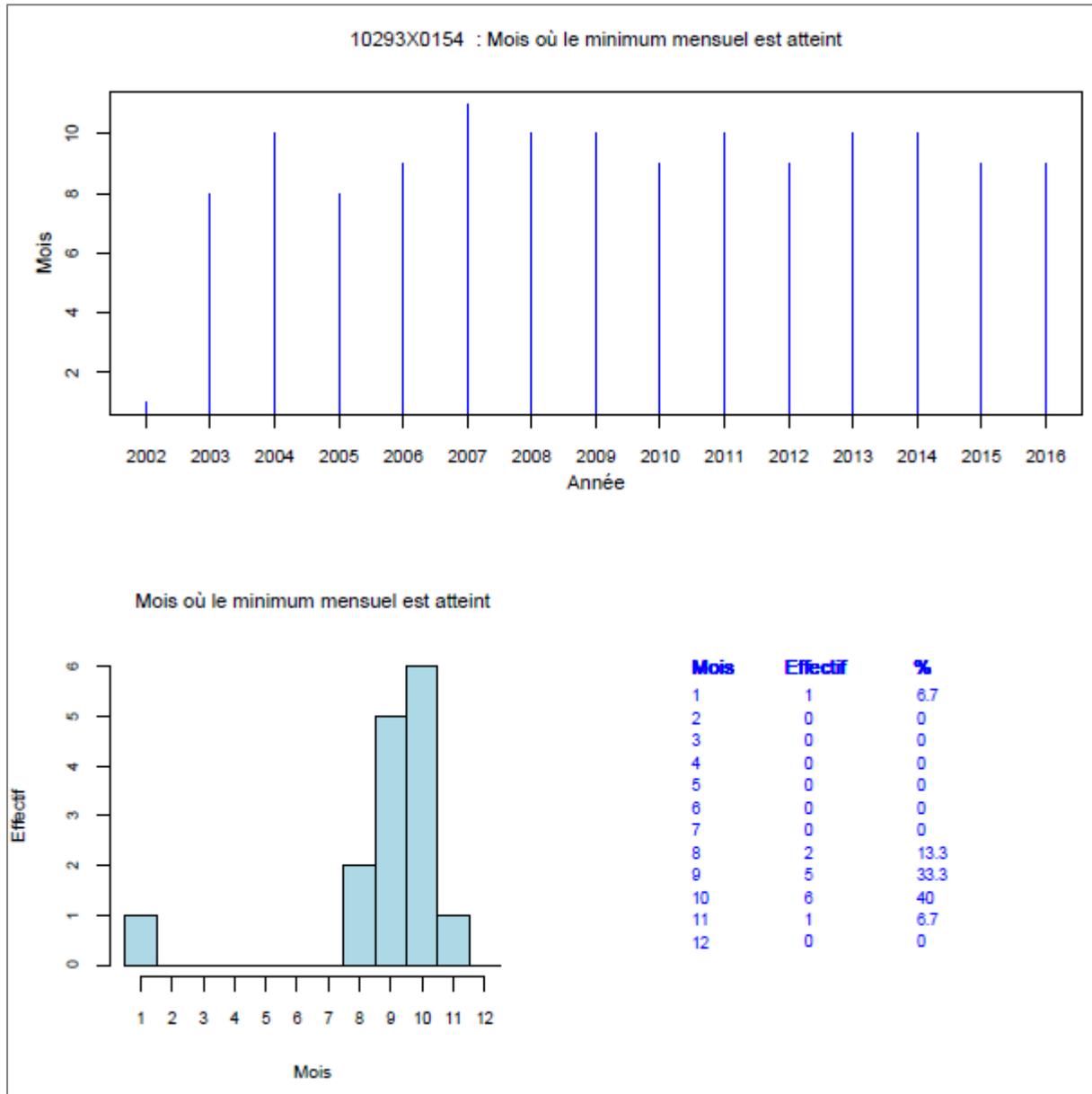


Figure 25 - Mois (de 1 à 12) où le HMNA est atteint (piézomètre 10293X0154)

### 3.3. TESTS SUR LES DÉBITS

#### 3.3.1. Tests sur les valeurs moyennes annuelles (années hydrologiques)

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les stations hydrométriques y sont classées par p-value croissante. On gardera en mémoire que les périodes concernées par le test diffèrent d'une station à une autre et qu'elles ne se recouvrent pas du tout le cas échéant. L'observation de tendances le cas échéant contradictoires pourrait donc être expliquée par l'existence de ces périodes distinctes.

Station	Moyenne (m3/s)	Ecart maxi-mini (m3/s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m3/s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
O0105110	0.257	0.28	0.556	-0.002	1.00E-04	1.00E-04	1983
Q7322510	23.985	25.99	0.503	-0.319	1.00E-04	0.00014	1988
<i>Q6404010</i>	<i>2.666</i>	<i>3.23</i>	<i>0.38</i>	<i>-0.018</i>	<i>0.01921</i>	<i>0.00187</i>	<i>1941</i>
Q4801010	46.189	44.68	0.377	-0.136	0.16709	0.00967	1988
Q6142910	19.569	24.31	0.363	-0.026	0.20115	0.09137	1941
<i>Q4654310</i>	<i>1.969</i>	<i>2.08</i>	<i>0.324</i>	<i>-0.012</i>	<i>0.23806</i>	<i>0.14895</i>	<i>1942</i>
Q6332510	23.435	21.88	0.168	-0.033	0.23862	0.07348	1988
<i>Q4844010</i>	<i>6.572</i>	<i>5.92</i>	<i>0.194</i>	<i>-0.045</i>	<i>0.48061</i>	<i>0.68736</i>	<i>1941</i>
Q7002910	51.831	52.92	0.363	-0.007	0.80794	0.47012	1965
Q4124010	3.55	3.1	0.098	0.001	0.88701	0.31522	1959
Q5501010	82.047	106.84	0.41	-0.01	0.92997	0.18858	1988
Q7412910	102.465	109.58	0.232	0.002	0.999	0.61806	1988

*Tableau 13 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes annuelles calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées  
 En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1).*

La pente de la droite de Sen est négative pour 10 stations sur 12. D'après le test de Mann-Kendall, 3 stations sont caractérisées par une tendance (à la baisse) significative au seuil de risque de 5%. Il s'agit des stations : O0105110 (très significatif), Q7322510 (très significatif) et Q6404010.

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour ces 3 stations sont présentés par les figures 26, 27, 28.

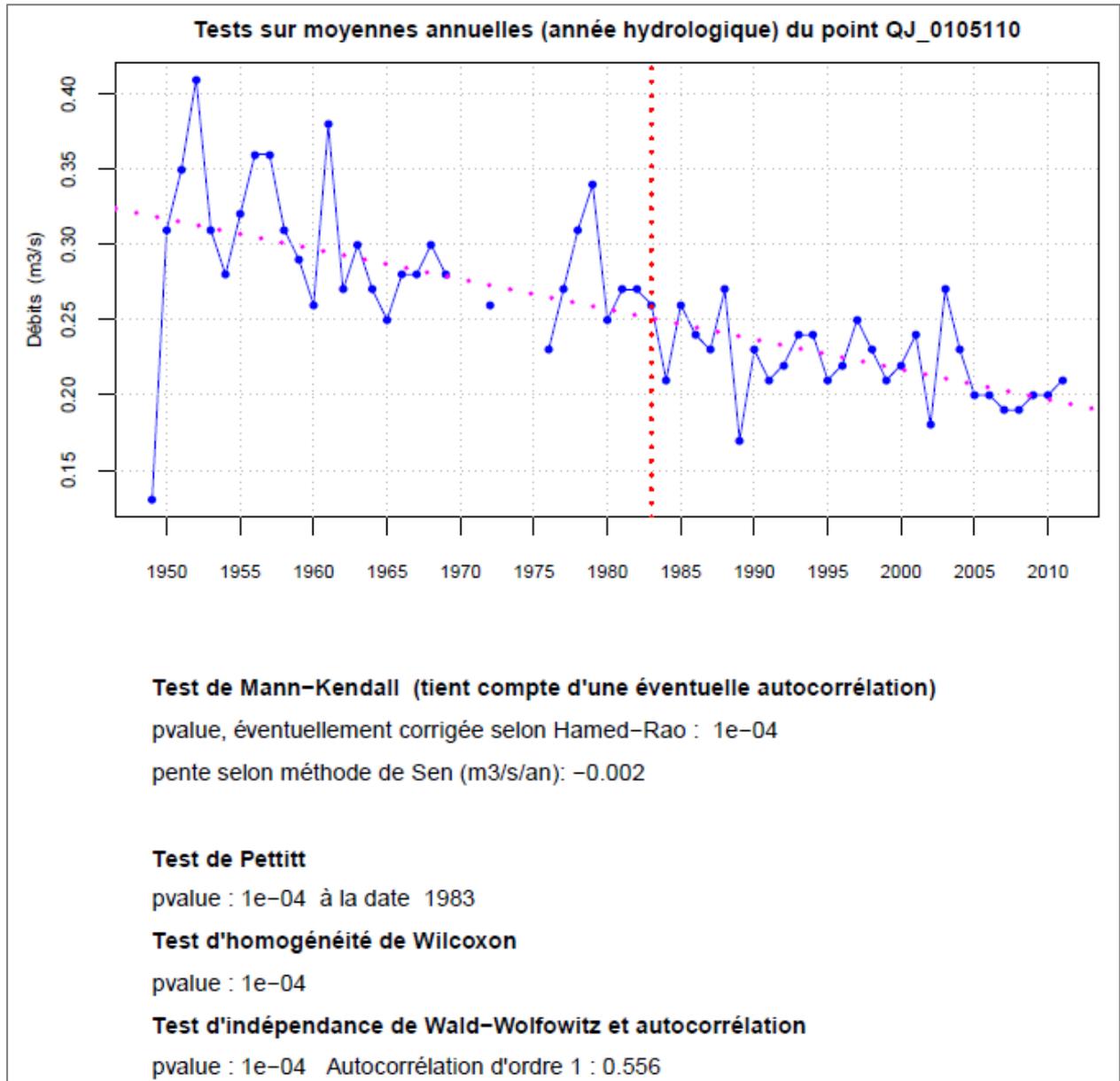


Figure 26 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique O0105110

Remarque : la première valeur (année hydrologique 1948-1949) est très basse.

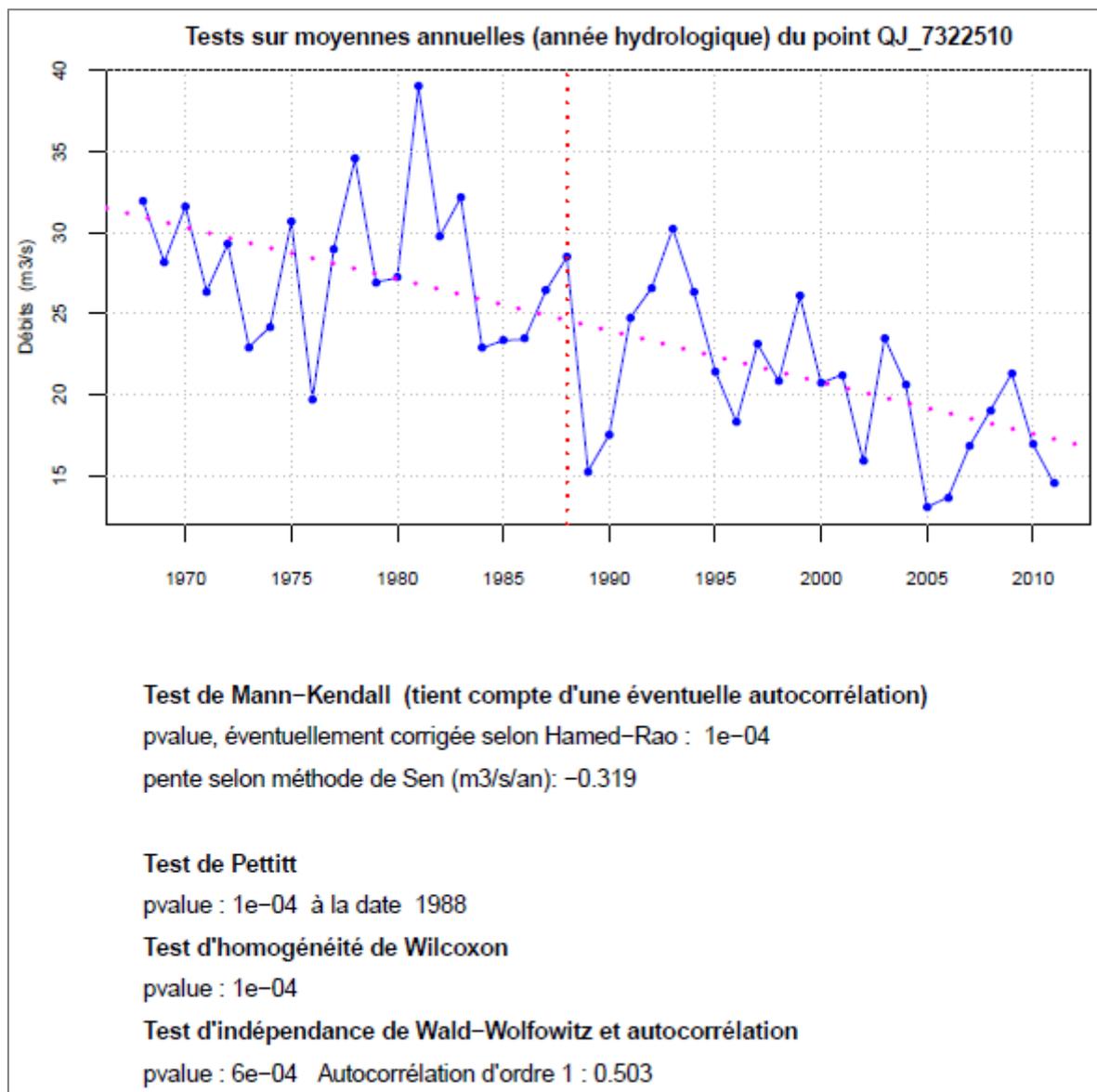


Figure 27 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique Q7322510

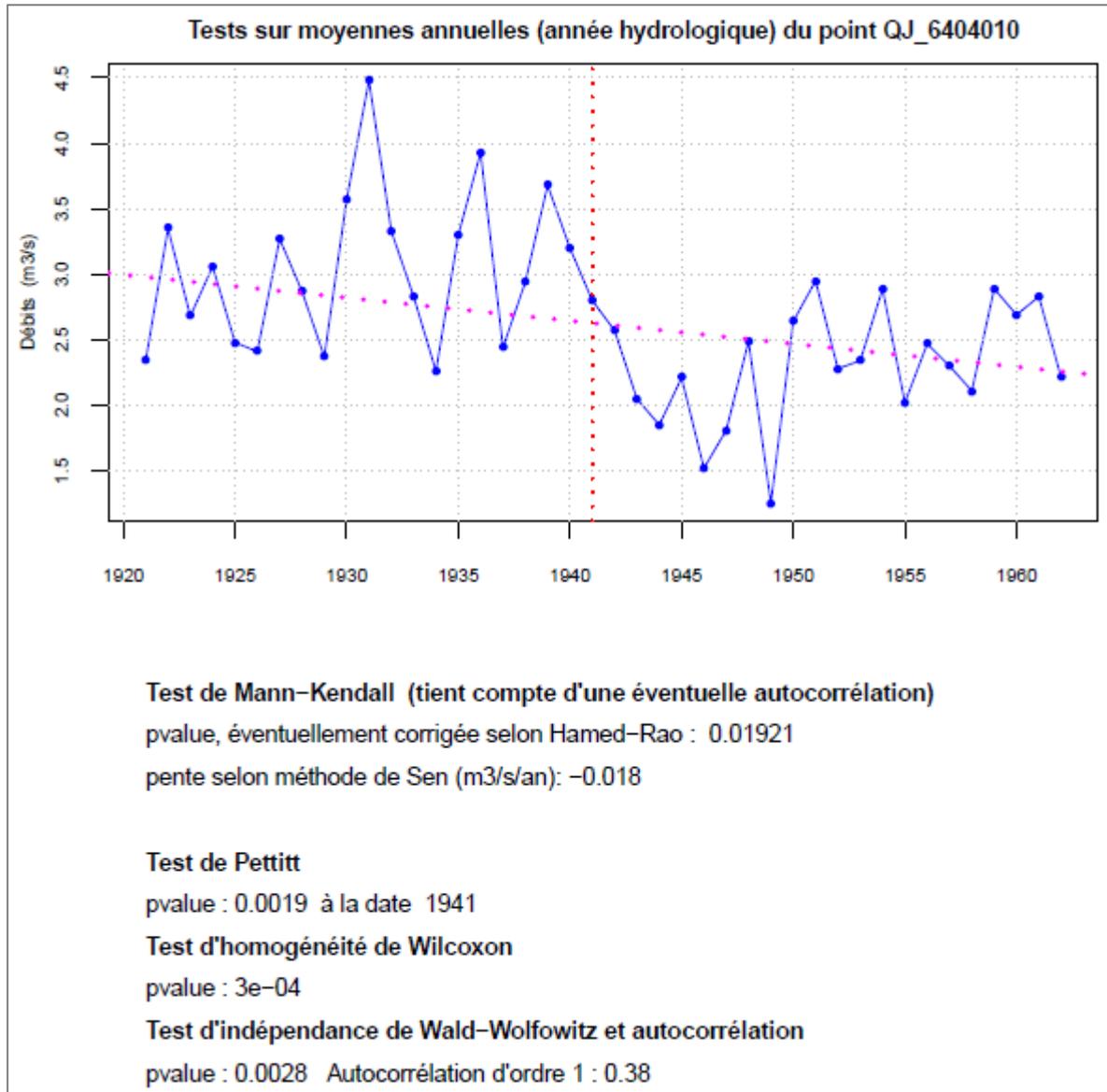


Figure 28 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux débits moyens annuels de la station hydrométrique Q6404010

Comparaison avec les valeurs moyennes annuelles en années civiles

Valeurs moyennes annuelles années civiles							
Station	Moyenne (m3/s)	Ecart maxi-mini (m3/s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m3/s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
O0105110	0.261	0.27	0.509	-0.002	1.00E-04	1.00E-04	1982
Q7322510	23.859	25.21	0.452	-0.3	1.00E-04	0.00024	1988
Q6404010	2.652	2.71	0.308	-0.015	0.01799	0.00854	1940
Q4801010	46.094	45.75	0.468	-0.1362	0.10879	0.00349	1988
Q4654310	1.971	1.76	0.334	-0.015	0.17282	0.04474	1942
Q6142910	19.517	21.56	0.409	-0.0252	0.18146	0.09898	1984
Q6332510	23.455	17.54	0.084	-0.0367	0.2442	0.12063	1984
Q4844010	6.639	5.31	0.251	-0.0513	0.29725	0.33447	1940
Q7412910	101.7	98.19	0.136	0.0525	0.67846	0.65689	1964
Q4124010	3.544	2.78	0.246	0.0013	0.7973	0.14271	1957
Q7002910	51.659	45.2	0.325	-0.0085	0.79926	0.50884	1984
Q5501010	80.812	93.93	0.425	0.0042	0.96932	0.22705	1958
Valeurs moyennes annuelles années hydrologiques (tableau 13 ci-avant)							
O0105110	0.257	0.28	0.556	-0.002	1.00E-04	1.00E-04	1983
Q7322510	23.985	25.99	0.503	-0.319	1.00E-04	0.00014	1988
Q6404010	2.666	3.23	0.38	-0.018	0.01921	0.00187	1941
Q4801010	46.189	44.68	0.377	-0.136	0.16709	0.00967	1988
Q6142910	19.569	24.31	0.363	-0.026	0.20115	0.09137	1941
Q4654310	1.969	2.08	0.324	-0.012	0.23806	0.14895	1942
Q6332510	23.435	21.88	0.168	-0.033	0.23862	0.07348	1988
Q4844010	6.572	5.92	0.194	-0.045	0.48061	0.68736	1941
Q7002910	51.831	52.92	0.363	-0.007	0.80794	0.47012	1965
Q4124010	3.55	3.1	0.098	0.001	0.88701	0.31522	1959
Q5501010	82.047	106.84	0.41	-0.01	0.92997	0.18858	1988
Q7412910	102.465	109.58	0.232	0.002	0.999	0.61806	1988

Tableau 14 - Comparaison entre les résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs moyennes annuelles années civiles et ceux des tests appliqués aux valeurs moyennes annuelles années hydrologiques

Les p-values sont légèrement modifiées mais les tendances qui étaient significatives (à 5%) en années hydrologiques le restent en années civiles.

### 3.3.2. Tests sur les débits moyens mensuels minimum (QMNA)

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les stations hydrométriques y sont classées par p-value croissante.

Station	Moyenne (m <sup>3</sup> /s)	Ecart maxi-mini (m <sup>3</sup> /s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m <sup>3</sup> /s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
<i>Q4844010</i>	2.289	2.3	0.23	-0.0458	0.00115	0.01881	1941
Q7322510	5.351	8.79	0.023	-0.0568	0.00462	0.04321	1984
Q6332510	6.626	8.47	-0.015	-0.0311	0.01252	0.00765	1982
Q4801010	20.789	21.89	0.432	-0.1188	0.03934	0.00014	1984
<i>Q4654310</i>	0.665	1.01	0.352	-0.0059	0.08565	0.05397	1943
Q7002910	16.311	20.46	0.07	-0.0207	0.09328	0.26417	1984
O0105110	0.017	0.05	0.14	1.00E-04	0.26219	0.20484	1989
Q6142910	5.535	9.49	0.09	-0.011	0.27591	0.04549	1984
Q4124010	1.035	1.49	0.212	-0.0023	0.44655	0.63899	1962
Q5501010	31.21	60.77	0.248	-0.0235	0.58384	0.14828	1982
<i>Q6404010</i>	0.741	0.97	0.098	2.00E-04	0.91665	0.6202	1941
Q7412910	27.416	47.21	-0.213	9.00E-04	0.98924	0.70705	1984

Tableau 15 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs de QMNA calculées aux 12 stations hydrométriques étudiées

*En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1).*

La pente de la droite de Sen est négative ou quasi nulle ( $<10^{-3}$  m<sup>3</sup>/s/an) pour les 12 stations. D'après le test de Mann-Kendall, 4 stations sont caractérisées par une tendance à la baisse significative au seuil de risque de 5%. Il s'agit des stations : Q4844010 (très significatif), Q7322510 (très significatif), Q6332510 et Q4801010. Viennent ensuite les stations Q4654310 et Q7002910 (significativité à 10 %).

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour les 4 premières stations du tableau sont présentés par les figures 29 à 32.

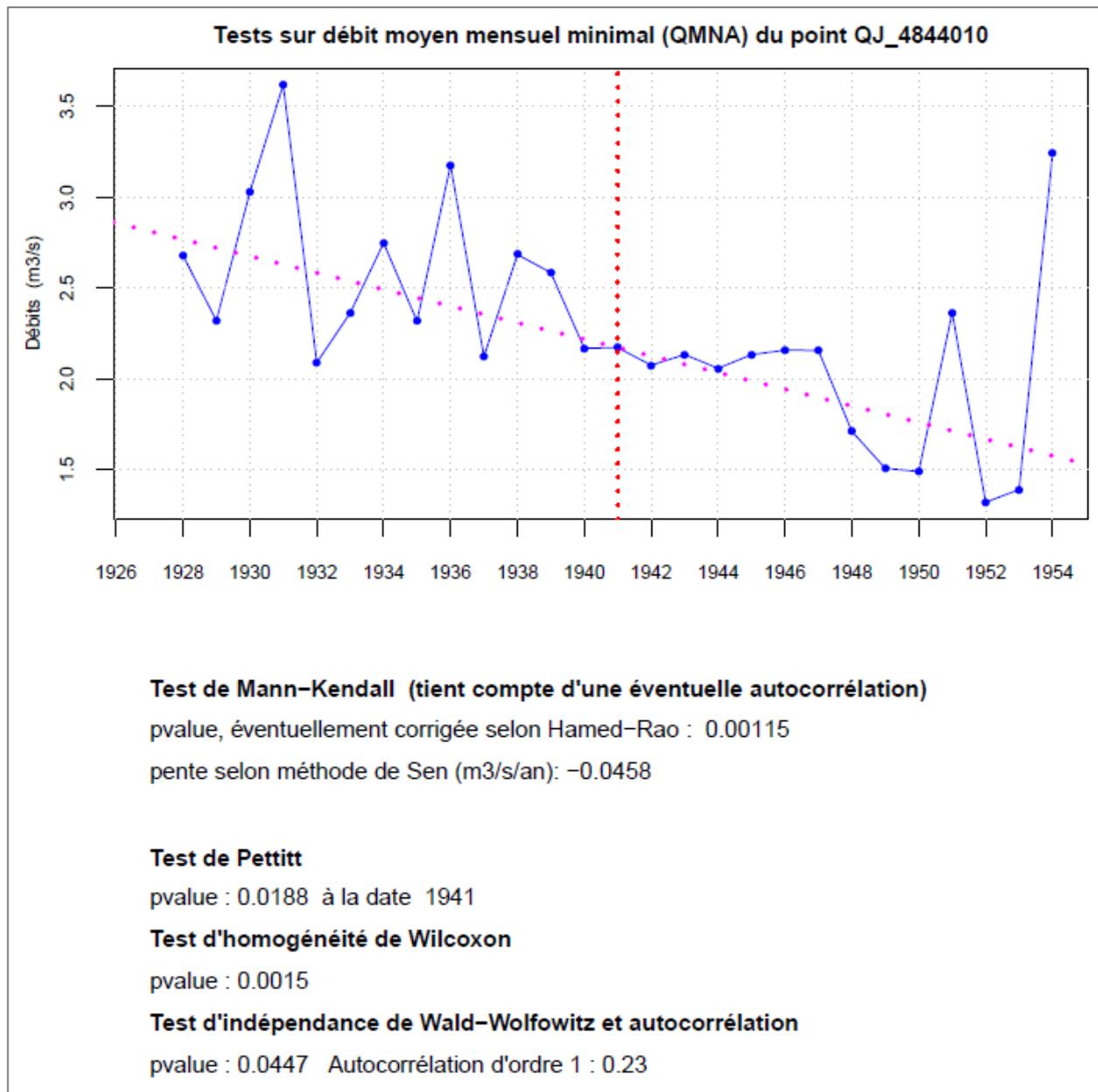


Figure 29 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q4844010

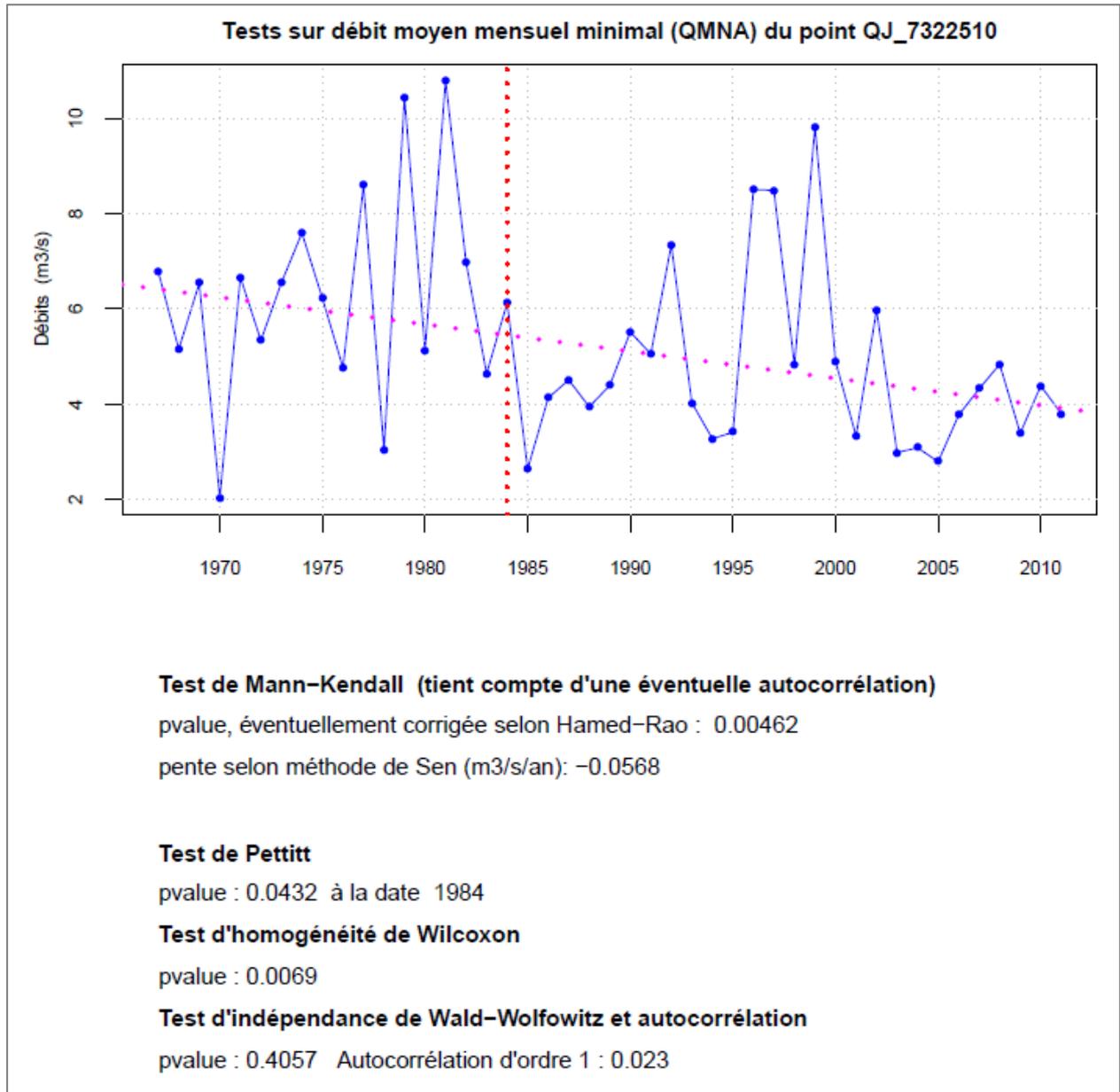


Figure 30 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q7322510

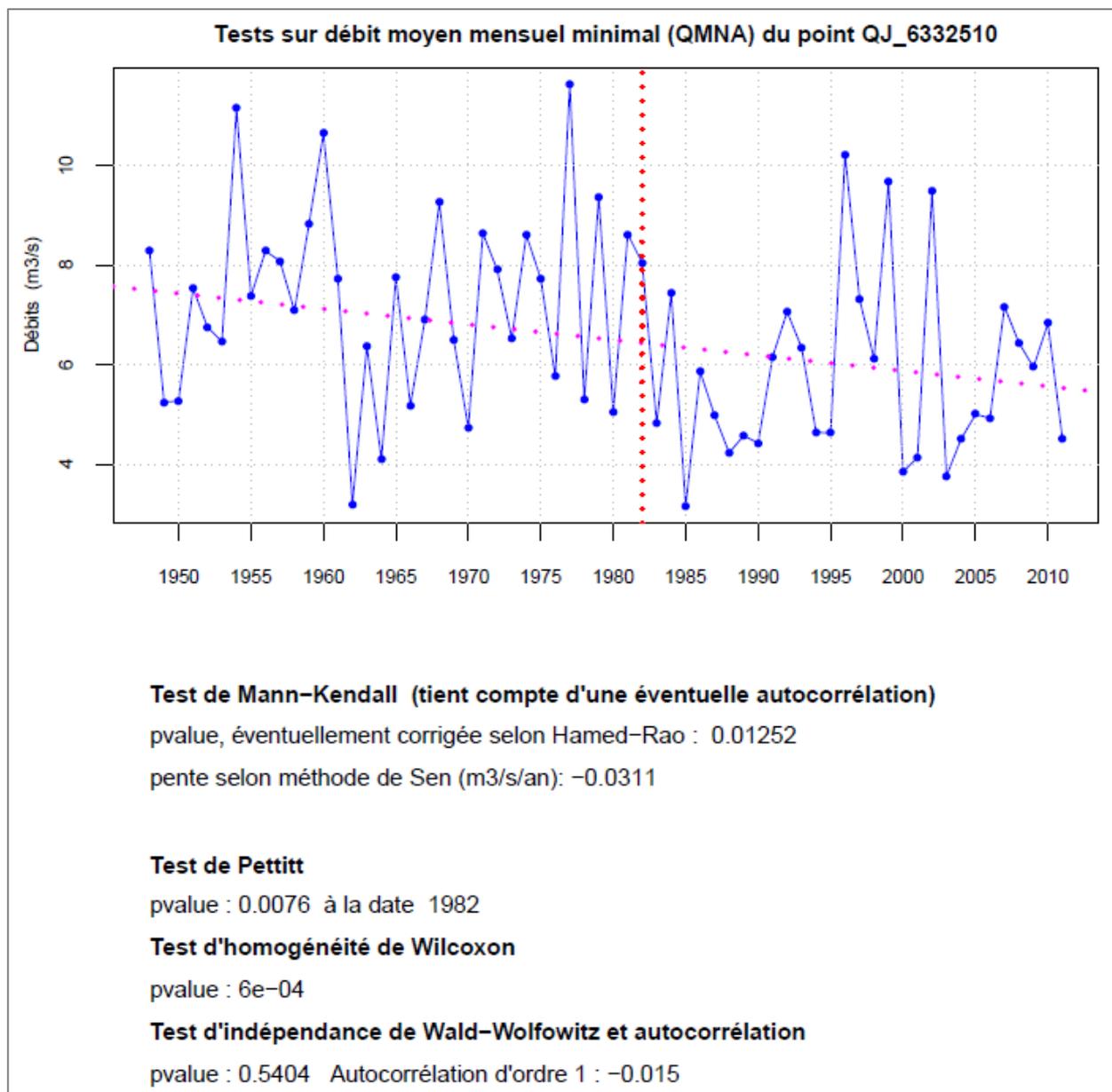


Figure 31 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q6332510

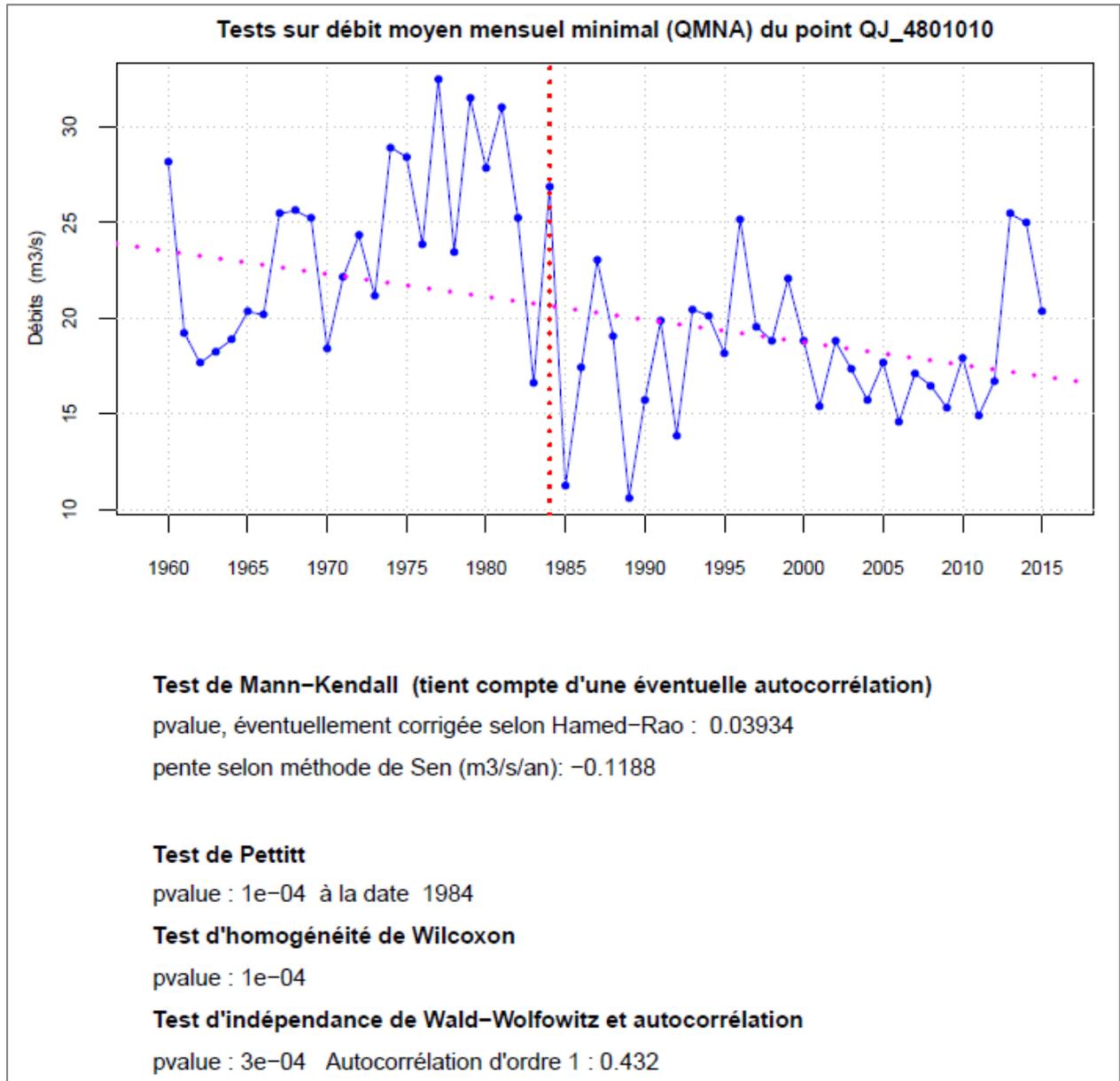


Figure 32 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux QMNA de la station hydrométrique Q4801010

### 3.3.3. Tests sur les valeurs minimales journalières de chaque année

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt exprimés par les p-values. Les stations hydrométriques y sont classées par p-value croissante.

Station	Moyenne (m3/s)	Ecart maxi-mini (m3/s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m3/s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
Q6332510	4.241	5.9	0.477	-0.0269	1.00E-04	0.00166	1978
<i>Q4844010</i>	<i>1.842</i>	<i>1.65</i>	<i>0.69</i>	<i>-0.0326</i>	<i>1.00E-04</i>	<i>0.00026</i>	<i>1939</i>
Q4124010	0.631	1.4	0.215	-0.0067	0.0117	0.00503	1959
<i>Q4654310</i>	<i>0.57</i>	<i>0.96</i>	<i>0.456</i>	<i>-0.0056</i>	<i>0.03389</i>	<i>0.0032</i>	<i>1942</i>
Q4801010	14.084	15.56	0.654	-0.0697	0.08327	1.00E-04	1983
<i>Q6404010</i>	<i>0.492</i>	<i>0.66</i>	<i>0.099</i>	<i>0.0017</i>	<i>0.09512</i>	<i>0.51463</i>	<i>1929</i>
O0105110	0.013	0.05	0.221	0	0.20598	0.16296	1993
Q7322510	3.073	3.98	0.412	0.0138	0.23968	0.22013	1972
Q6142910	3.435	5.97	0.472	-0.0059	0.32653	0.01404	1985
Q5501010	21.763	33.85	0.459	-0.019	0.48186	0.21419	1978
Q7002910	11.404	13.8	0.422	-0.0056	0.49307	0.41929	1983
Q7412910	17.103	18.78	0.242	0.0135	0.6988	0.3383	2007

*Tableau 16 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs minimales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées  
 En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1).*

La pente de la droite de Sen est négative ou nulle pour 9 stations sur 12. D'après le test de Mann-Kendall, 4 stations sont caractérisées par une tendance (à la baisse) significative au seuil de risque de 5%. Il s'agit des stations : Q6332510 (très significatif), Q4844010 (très significatif), Q4124010 et Q4654310. Viennent ensuite les stations Q4801010 et Q6404010 (significativité à 10 %).

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour ces 4 stations sont présentés par les figures 33 à 36.

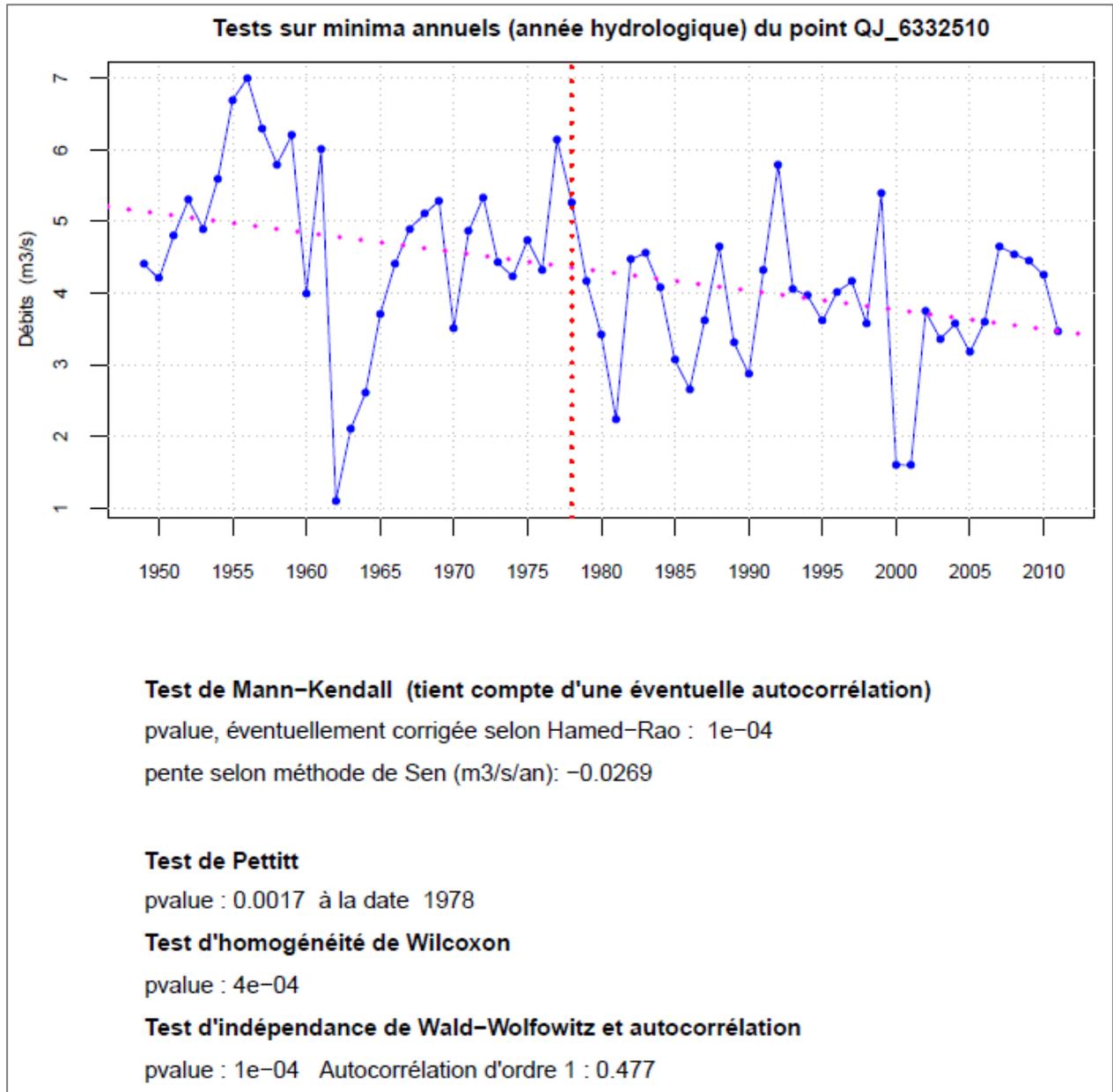


Figure 33 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q6332510

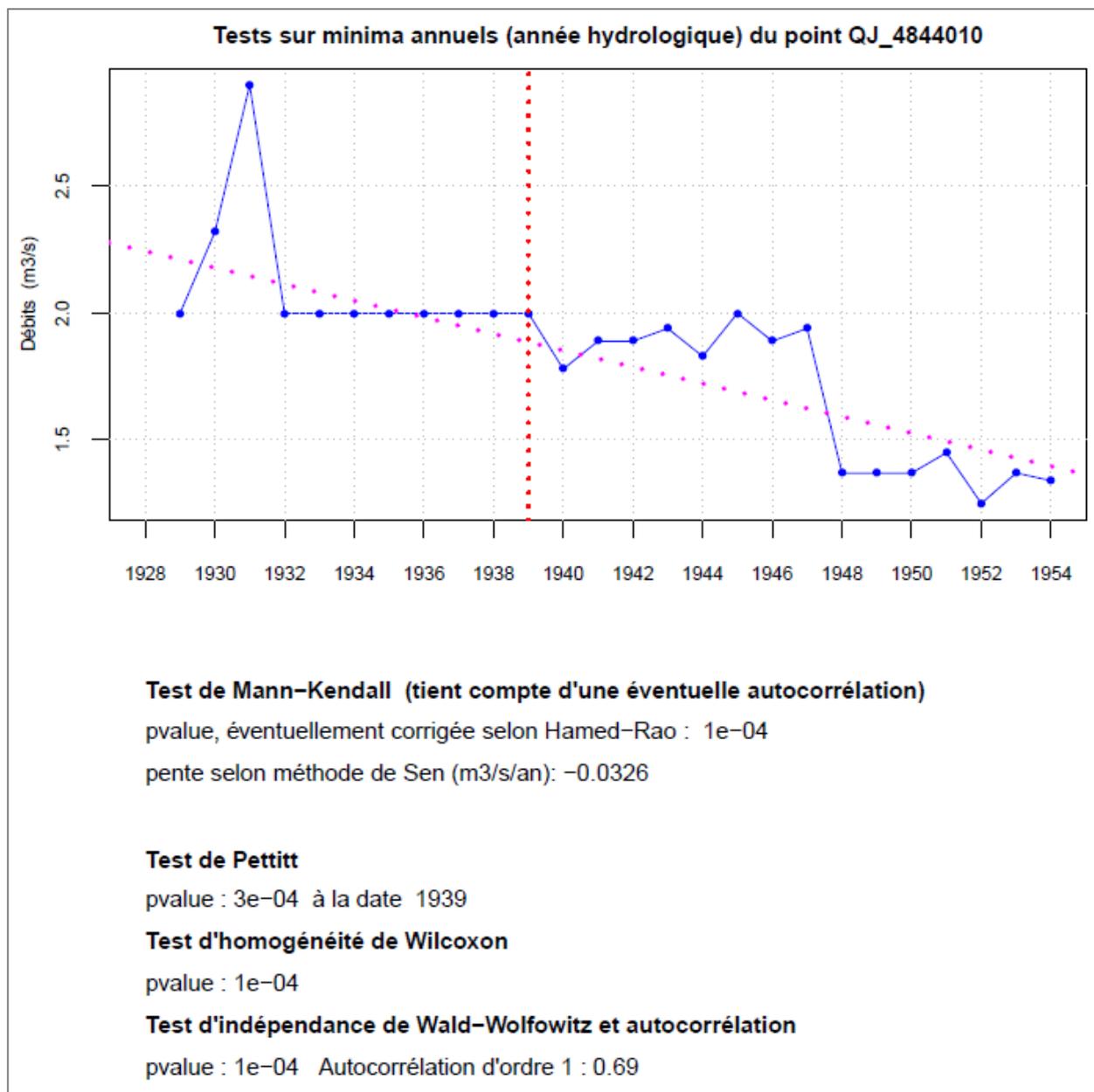


Figure 34 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4844010

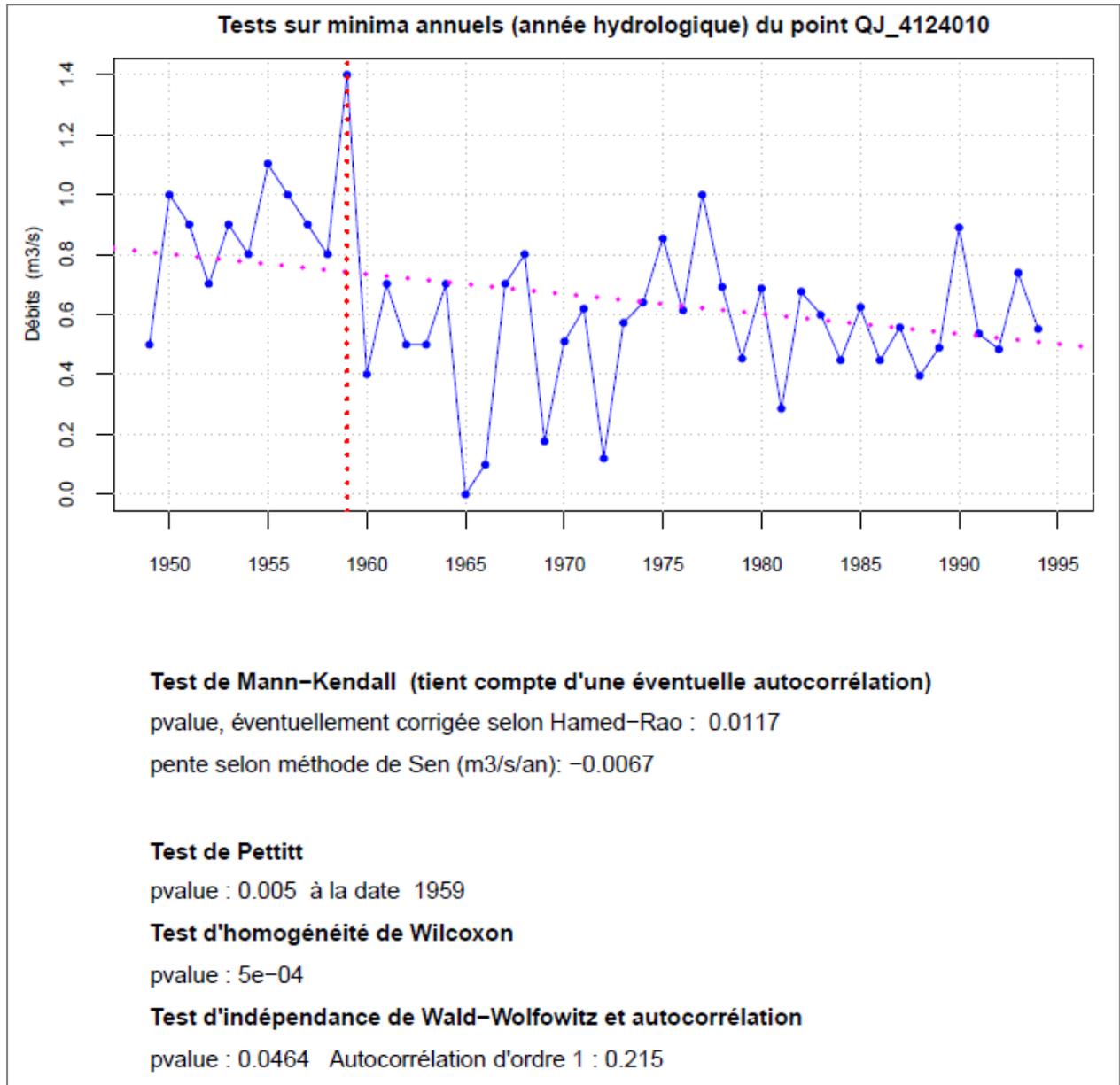


Figure 35 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4124010

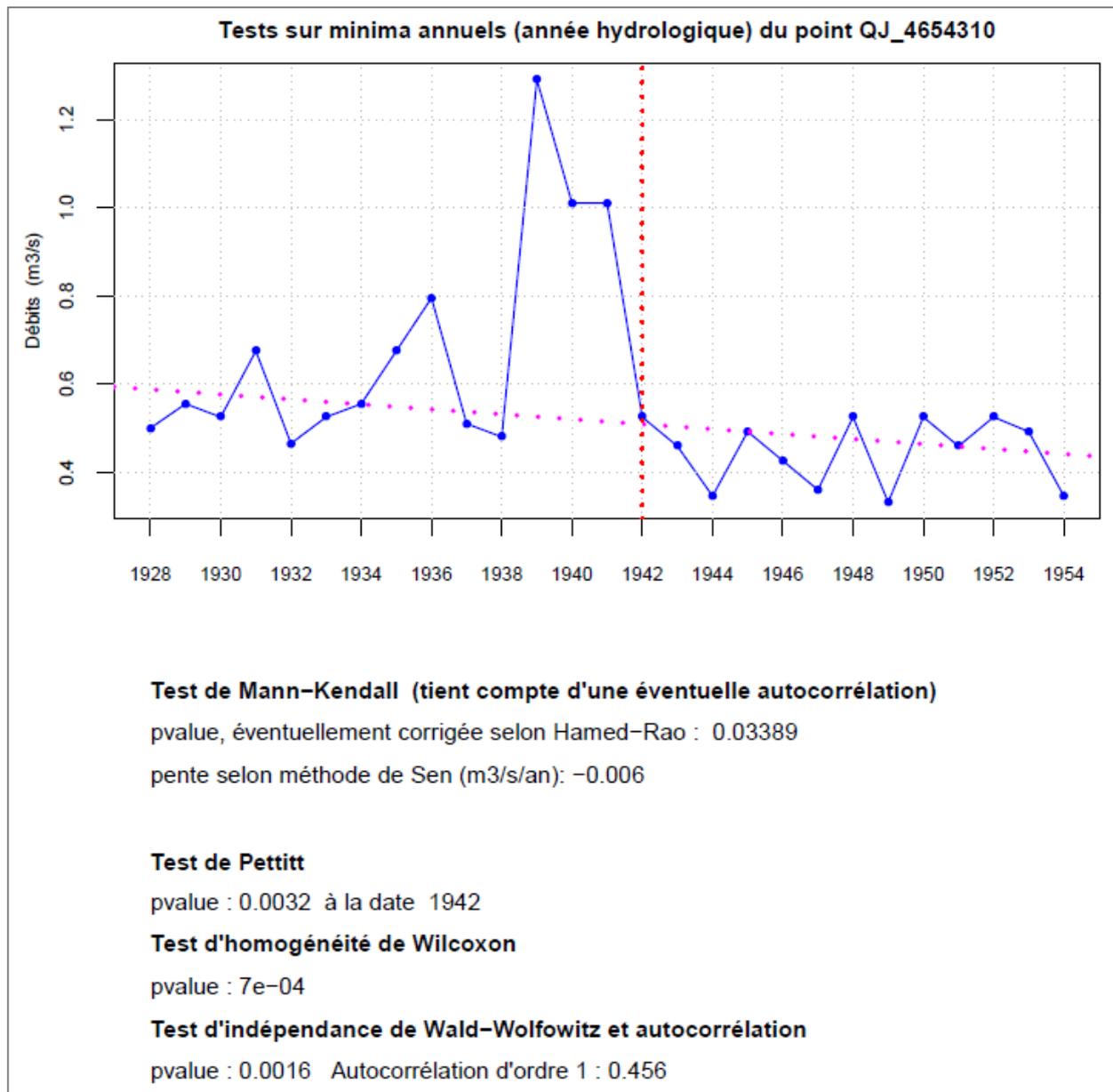


Figure 36 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4654310

### 3.3.4. Tests sur les valeurs maximales journalières de chaque année

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettit exprimés par les p-values. Les stations hydrométriques y sont classées par p-value croissante.

Station	Moyenne (m3/s)	Ecart maxi-mini (m3/s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m3/s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
O0105110	2.016	4.06	0.367	-0.0156	1.00E-04	0.00154	1994
Q7322510	235.864	421	0.316	-2.4416	0.00044	0.00541	1982
Q7412910	870.742	1227	-0.072	4.2593	0.00637	0.14773	1989
Q7002910	312.107	636	0.163	0.8462	0.00838	0.02909	1965
<i>Q4654310</i>	<i>8.952</i>	<i>13.02</i>	<i>0.736</i>	<i>-0.24</i>	<i>0.036</i>	<i>0.00741</i>	<i>1936</i>
Q6332510	141.733	305.2	-0.073	0.303	0.32187	0.47889	1965
Q6142910	105.403	231.4	0.225	-0.095	0.5173	0.06875	1948
Q5501010	515.69	1155	0.149	-0.3725	0.52829	0.32798	1982
<i>Q4844010</i>	<i>61.027</i>	<i>42</i>	<i>-0.009</i>	<i>0</i>	<i>0.91856</i>	<i>0.33055</i>	<i>1938</i>
Q4124010	20.85	31.9	0.266	-0.0024	0.95469	0.73285	1957
<i>Q6404010</i>	<i>33.86</i>	<i>54.4</i>	<i>-0.001</i>	<i>0</i>	<i>0.98264</i>	<i>0.76799</i>	<i>1926</i>
Q4801010	181.296	334.7	0.045	0	0.999	0.31725	1986

*Tableau 17 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées  
 En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1).*

La pente de la droite de Sen est négative ou nulle pour 9 stations sur 12. D'après le test de Mann-Kendall, 3 stations sont caractérisées par une tendance à la baisse significative au seuil de risque de 5% et 2 stations par une tendance à la hausse significative au seuil de risque de 5%. Il s'agit des stations :

- en baisse : O0105110 (très significatif), Q7322510 (très significatif) et Q4654310,
- en hausse : Q7412910 (très significatif) et Q7002910 (très significatif).

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour ces 5 stations sont présentés par les figures 37 à 41.

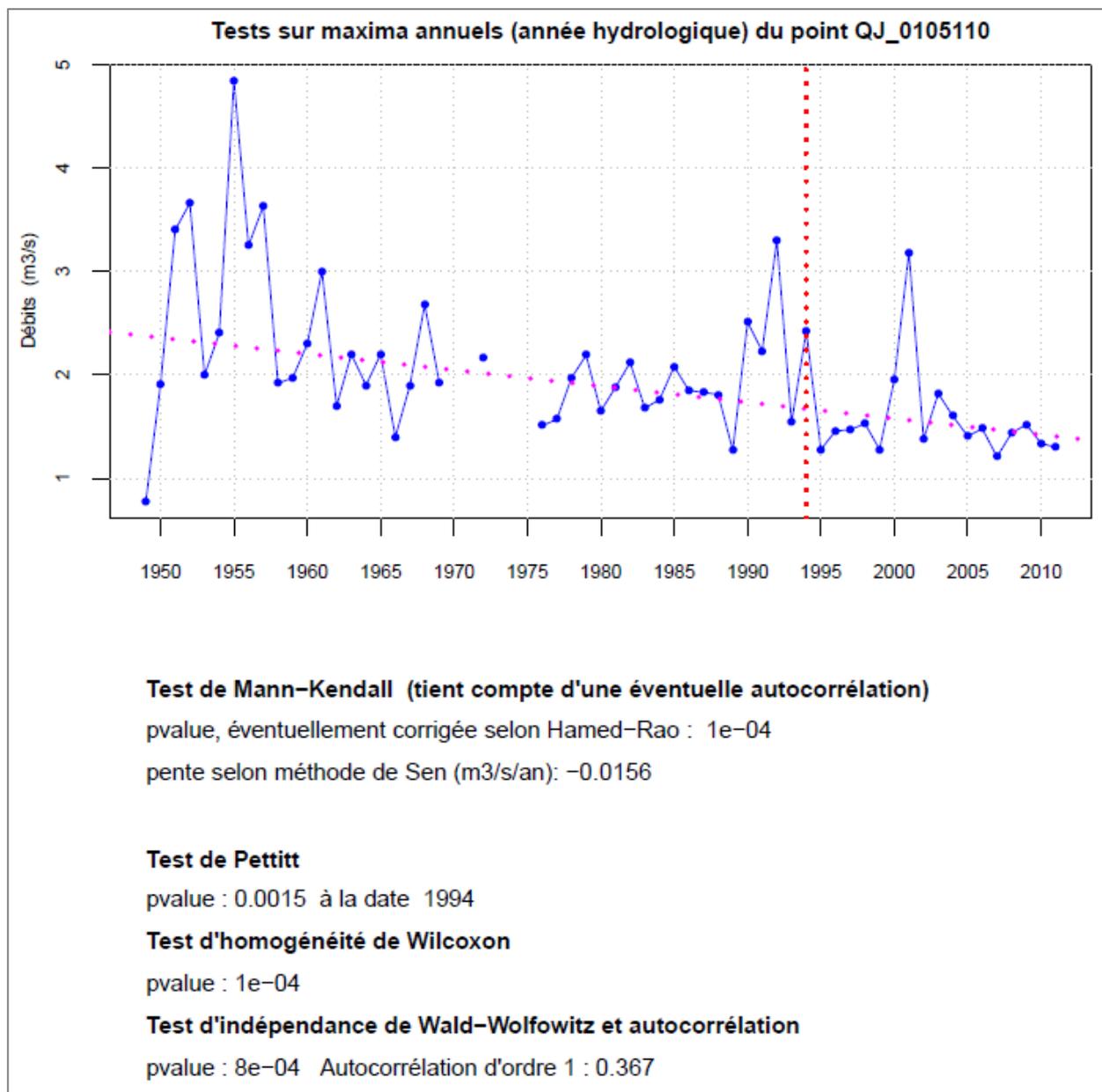


Figure 37 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique O0105110

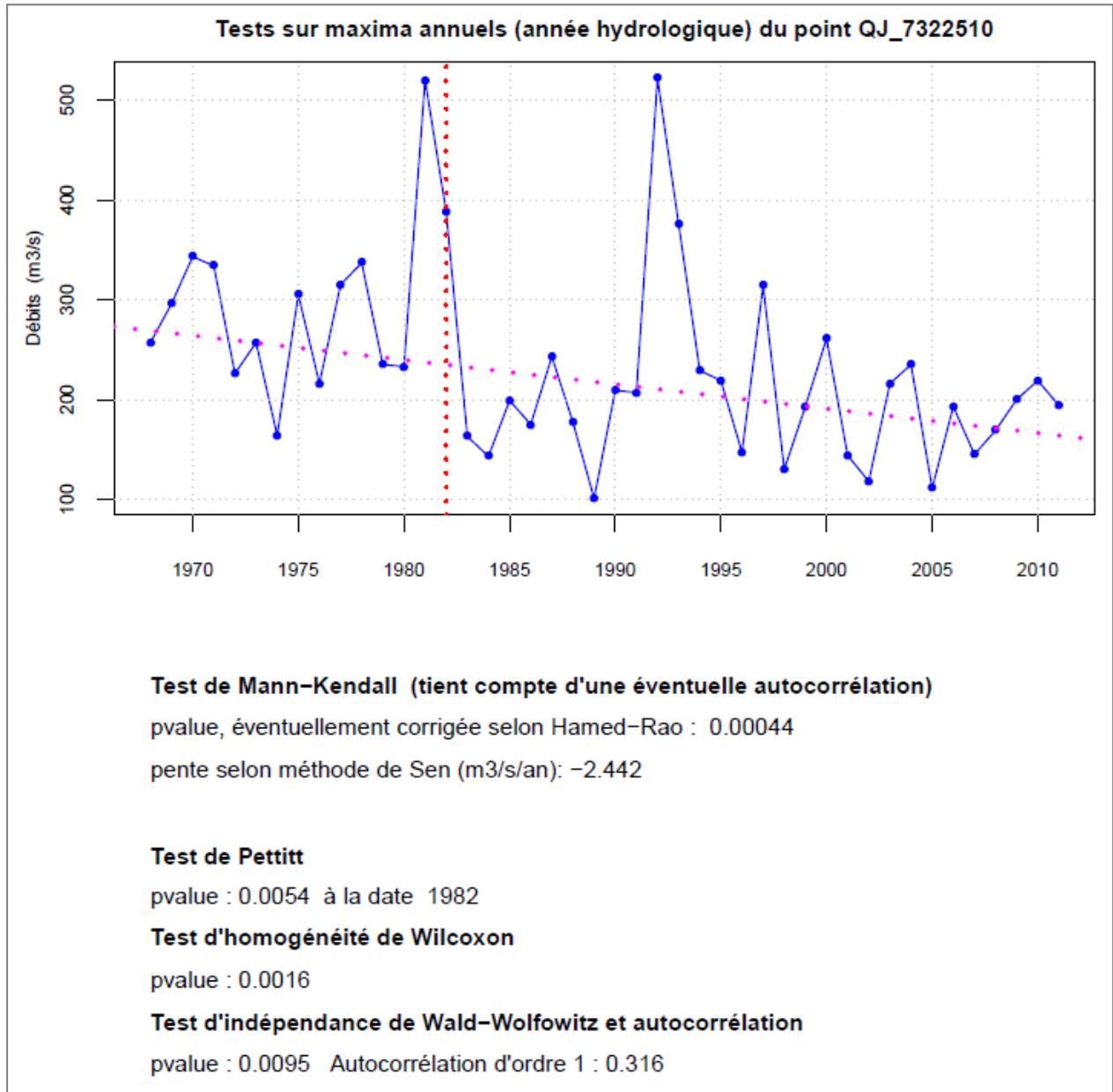


Figure 38 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7322510

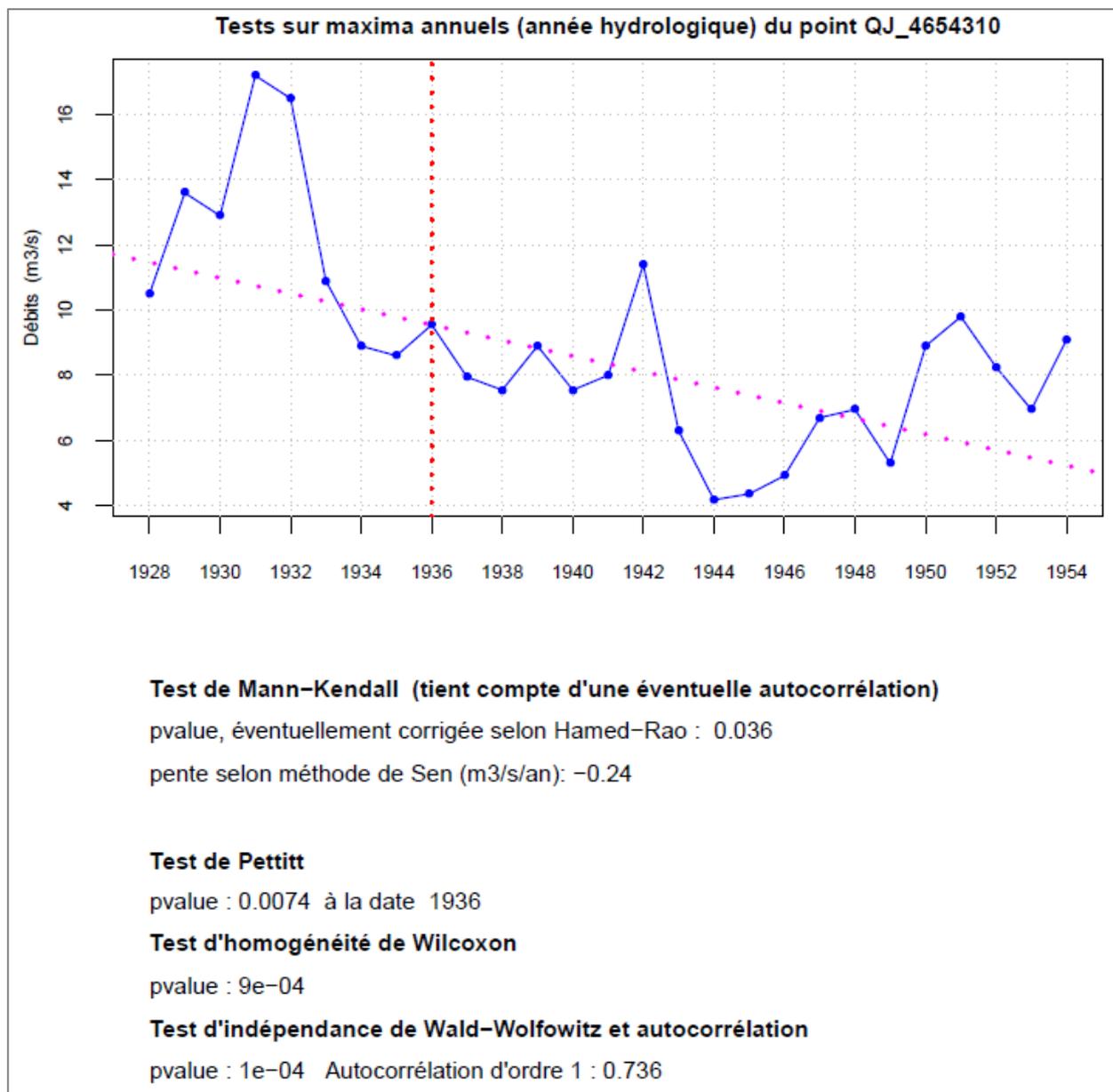


Figure 39 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q4654310

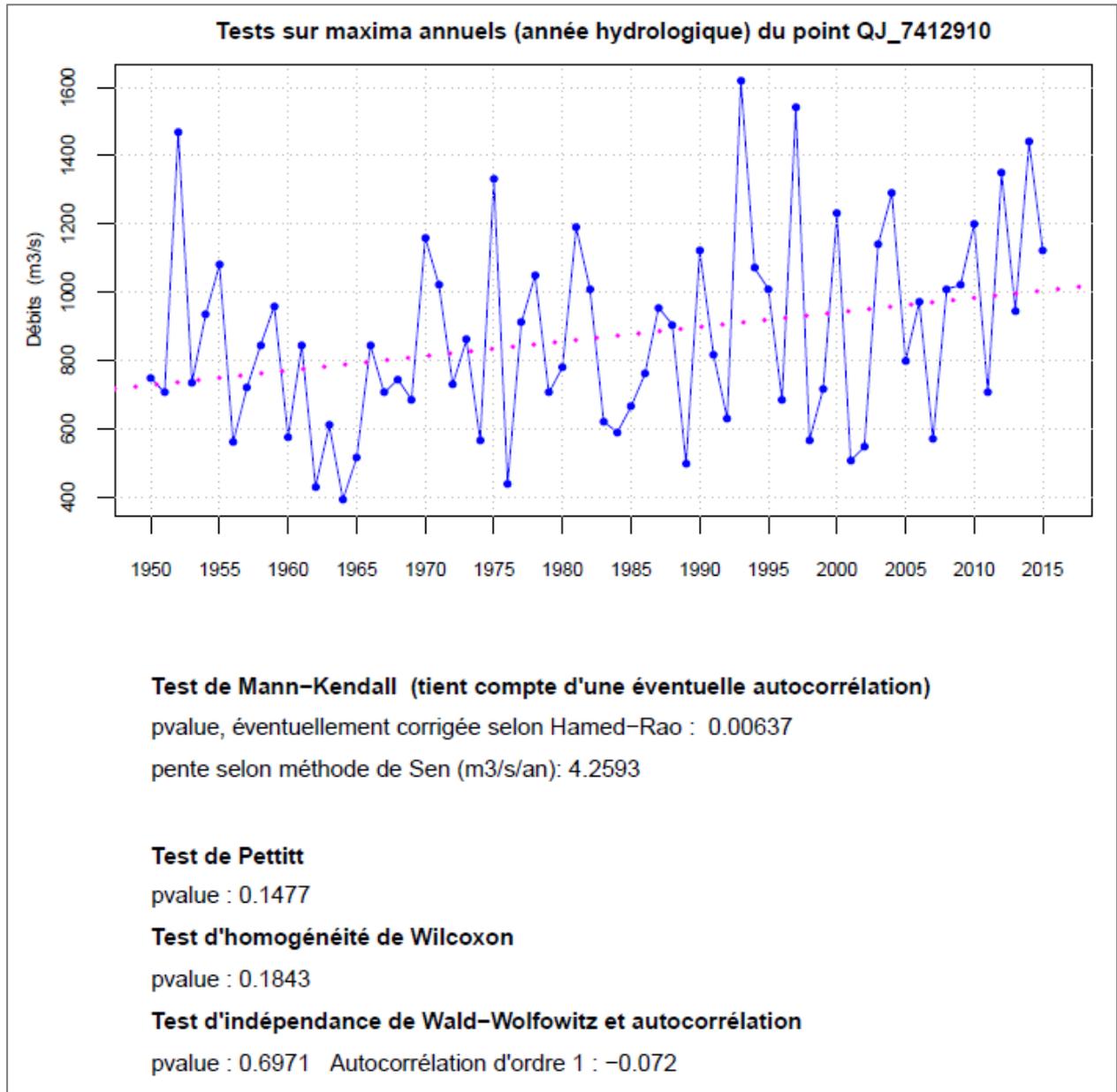


Figure 40 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7412910

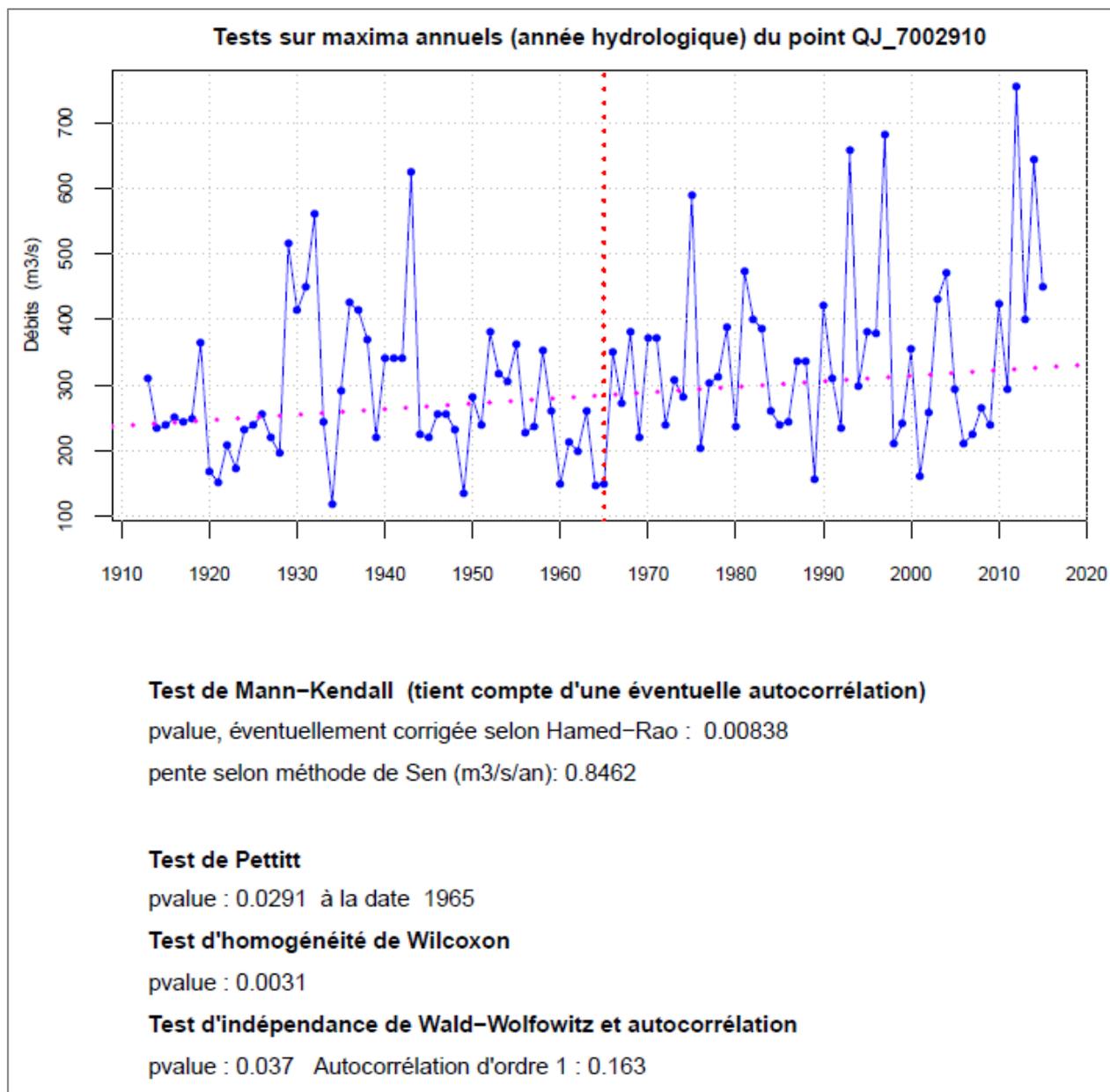


Figure 41 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux minima annuels de la station hydrométrique Q7002910

### 3.3.5. Tests sur les valeurs médianes

Le tableau ci-dessous contient les résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt exprimés par les p-values. Les stations hydrométriques y sont classées par p-value croissante.

Station	Moyenne (m3/s)	Ecart maxi-mini (m3/s)	Auto-corrélation d'ordre 1	Pente de la droite de Sen (m3/s par an)	p-value du test de Mann-Kendall	p-value du test de Pettitt	Date probable de rupture
Q7322510	16.234	22.34	0.387	-0.289	1.00E-04	1.00E-04	1988
<i>Q4844010</i>	<i>4.071</i>	<i>5.57</i>	<i>0.105</i>	<i>-0.04</i>	<i>0.01447</i>	<i>0.03006</i>	<i>1941</i>
Q4801010	39.076	40.5	0.313	-0.136	0.12155	0.02743	1988
<i>Q6404010</i>	<i>1.496</i>	<i>2.04</i>	<i>0.347</i>	<i>-0.005</i>	<i>0.4063</i>	<i>0.02181</i>	<i>1941</i>
Q6332510	18.193	22.53	0.164	-0.025	0.52873	0.36664	1983
Q4124010	2.217	2.4	0.046	0.001	0.64848	0.55274	1958
O0105110	0.09	0.11	0.058	0	0.75105	0.20331	1969
Q6142910	15.175	19.2	0.204	-0.003	0.78482	0.36294	1987
Q5501010	65.505	102.5	0.356	0.009	0.90018	0.21419	1988
<i>Q4654310</i>	<i>1.287</i>	<i>1.58</i>	<i>0.182</i>	<i>0</i>	<i>0.91572</i>	<i>0.999</i>	<i>1942</i>
Q7412910	74.695	106.2	0.213	-0.01	0.92136	0.59404	1988
Q7002910	40.213	49.9	0.25	0.001	0.93019	0.34175	1958

*Tableau 18 - Résultats des tests de tendance et rupture appliqués aux valeurs maximales de débits enregistrées aux 12 stations hydrométriques étudiées  
 En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1).*

La pente de la droite de Sen est négative ou nulle pour 7 stations sur 12. D'après le test de Mann-Kendall, 2 stations seulement sont caractérisées par une tendance à la baisse significative au seuil de risque de 5%. Les stations en baisse sont : Q7322510 (très significatif, p-value de  $10^{-4}$ ) et Q4844010 (p-value de 0.014).

Les graphiques correspondant aux résultats obtenus pour 2 stations sont présentés par les figures 42 et 43.

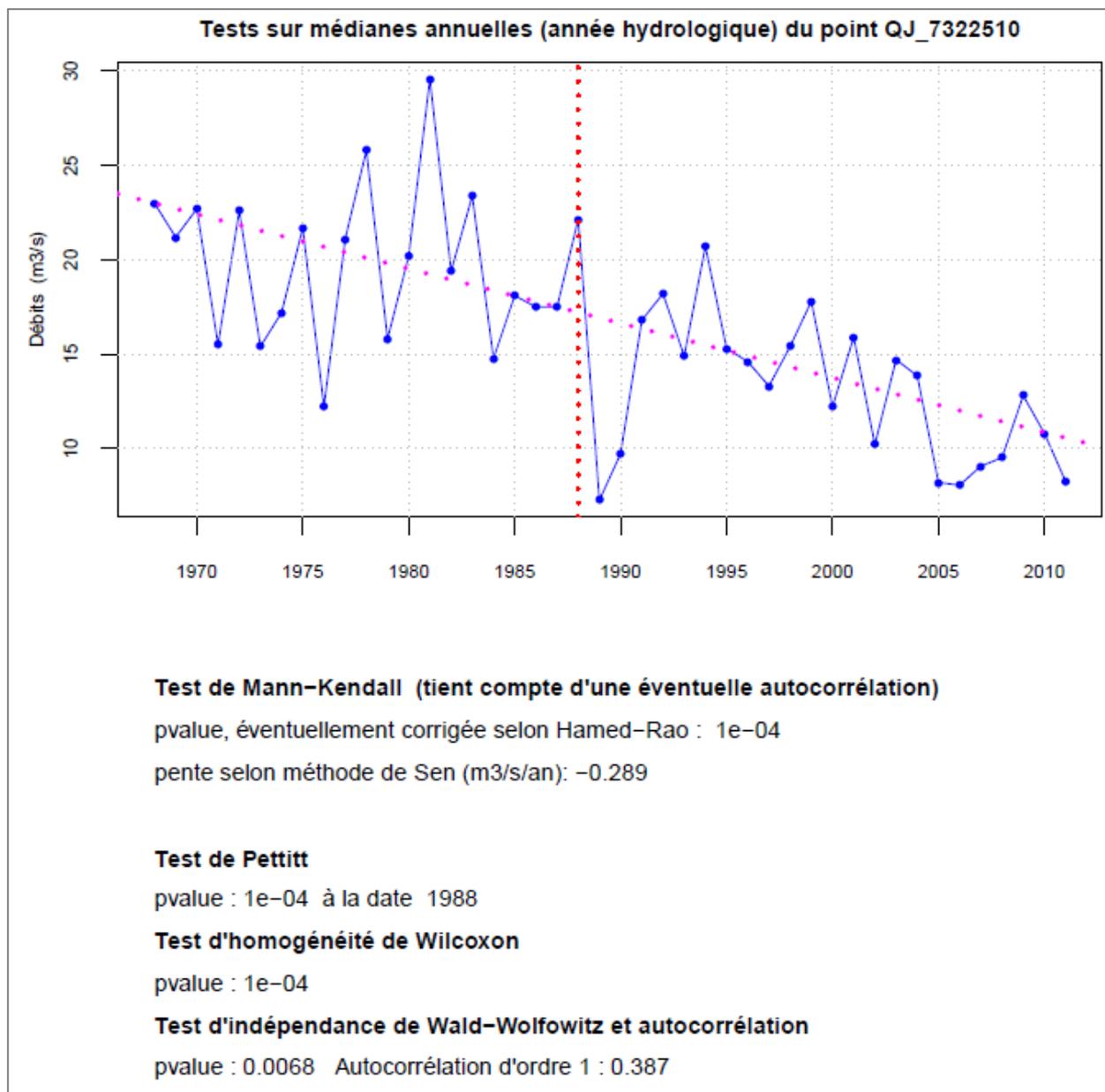


Figure 42 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux valeurs médianes annuelles de la station hydrométrique Q7322510

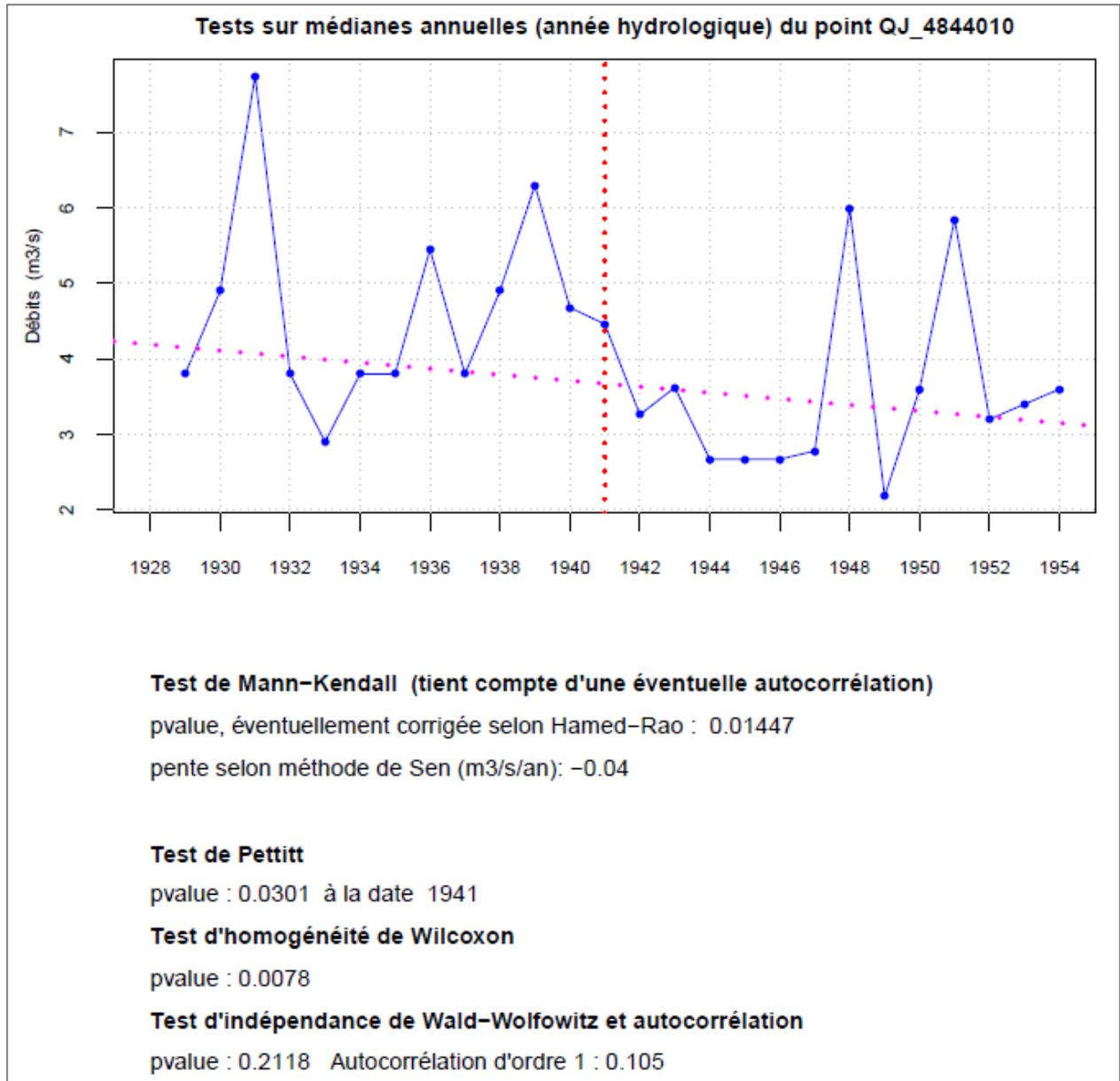


Figure 43 - Résultats des tests de Mann-Kendall et de Pettitt appliqués aux valeurs médianes annuelles de la station hydrométrique Q4844010

### 3.3.6. Synthèse sur les tendances détectées dans les chroniques de débits

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des tests appliqués aux 5 variables étudiées et pour les 12 stations hydrométriques. Les variables sont :

- les moyennes et médianes annuelles (années hydrologiques),
- les moyennes mensuelles minimum de l'année civile (HMNA),
- les minima annuels,
- les maxima annuels.

Station	Début	Fin	Valeurs moyennes		QMNA		Minimum annuel		Maximum annuel		Médianes annuelles	
			Baisse	TS	HNS		Baisse	S5	Baisse	TS	Baisse	TS
O0105110	01/01/1948	31/12/2011	Baisse	TS	HNS		pen	nulle	Baisse	TS	pen	nulle
Q4124010	01/01/1948	14/05/1995	pen		BNS		Baisse	S5	BNS		HNS	
Q4801010	01/09/1959	21/02/2016	BNS		Baisse	S5	Baisse	S10	pen		BNS	
Q5501010	01/09/1923	21/02/2016	BNS		BNS		BNS		BNS		HNS	
Q6142910	01/01/1912	05/10/2013	BNS		BNS		BNS		BNS		BNS	
Q6332510	01/01/1948	31/12/2011	BNS		Baisse	S5	Baisse	TS	HNS		BNS	
Q7002910	01/01/1912	21/02/2016	BNS		BNS		BNS		Hausse	TS	pen	
Q7322510	01/01/1967	11/12/2011	Baisse	TS	Baisse	TS	HNS		Baisse	TS	Baisse	TS
Q7412910	01/01/1949	21/02/2016	pen		pen		HNS		Hausse	TS	BNS	
<i>Q4654310</i>	<i>01/01/1927</i>	<i>31/12/1954</i>	<i>BNS</i>		<i>Baisse</i>	<i>S10</i>	<i>Baisse</i>	<i>S5</i>	<i>Baisse</i>	<i>S5</i>	<i>pen</i>	
<i>Q4844010</i>	<i>01/09/1927</i>	<i>31/12/1954</i>	<i>BNS</i>		<i>Baisse</i>	<i>TS</i>	<i>Baisse</i>	<i>TS</i>	<i>pen</i>		<i>Baisse</i>	<i>S5</i>
<i>Q6404010</i>	<i>01/01/1920</i>	<i>31/12/1962</i>	<i>Baisse</i>	<i>S5</i>	<i>pen</i>		<i>Hausse</i>	<i>S10</i>	<i>pen</i>		<i>BNS</i>	

Tableau 19 - Synthèse des résultats du test de Mann-Kendall. En italique et en rouge, les 3 stations dont les chroniques ne se poursuivent pas au-delà de 1954 (2) et 1962 (1)

HNS = hausse non significative

BNS = baisse non significative

TS = très significatif (seuil de risque <1%)

S5 = tendance significative au seuil de risque de 5%

S10 = tendance significative au seuil de risque de 10%

Au total, 8 stations sur 12 sont caractérisées par une baisse significative à très significative des débits pour l'une ou l'autre des variables considérées, dont 7 sont concernées par le QMNA et/ou la valeur moyenne du débit.

Le nombre de stations affichant une baisse est plus faible pour les valeurs minimales (5) et le QMNA (5).

#### Remarque :

Pour 2 stations, Q7412910 et Q7002910, il y a une tendance très significative à la hausse pour les valeurs maximales. Cette tendance à la hausse n'est pas retrouvée sur les valeurs moyennes annuelles : il y a une baisse, mais non significative, pour Q7002910 et une hausse, mais non significative, pour Q7412910 (tableau 12 ci-avant).

A l'exception des deux stations où il y a une hausse très significative sur les valeurs maximales, globalement, sur les longues périodes de mesures considérées, la tendance à la baisse l'emporte nettement sur la tendance à la hausse.

En se basant sur la pente de la droite de Sen appliquée à la période retenue pour le test statistique, il est possible de quantifier la proportion correspondant à la baisse identifiée sur la lame d'eau ou sur le QMNA5. Ces évaluations sont présentées au Tableau 20.

Station	Début	Fin	Longueur chroniques (années)	Valeurs moyennes	Module (m3/s)	Pente Sen (m3/s par an)	Proportion baisse	QMNA	Pente Sen (m3/s par an)	QMNA5	Proportion baisse
O0105110	01/01/1948	31/12/2011	63	Baisse TS	0.26	-0.002	-49%	Pente nulle	0	0.01	0%
Q4124010	01/01/1948	14/05/1995	47	HNS	3.54	0.001	1.3%	BNS	-0.0023	0.81	-13%
Q4801010	01/09/1959	21/02/2016	57	BNS	46.03	-0.136	-17%	Baisse S5	-0.1188	16	-42%
Q5501010	01/09/1923	21/02/2016	93	BNS	81.10	-0.01	-1.1%	BNS	-0.0235	23	-9.5%
Q6142910	01/01/1912	05/10/2013	101	BNS	19.49	-0.026	-13%	BNS	-0.011	3.8	-29%
Q6332510	01/01/1948	31/12/2011	63	BNS	23.45	-0.033	-9%	Baisse S5	-0.0311	4.9	-40%
Q7002910	01/01/1912	21/02/2016	104	BNS	51.68	-0.007	-1.4%	BNS	-0.0207	12	-18%
Q7322510	01/01/1967	11/12/2011	44	Baisse TS	23.88	-0.319	-59%	Baisse TS	-0.0568	3.6	-69%
Q7412910	01/01/1949	21/02/2016	67	HNS	101.78	0.002	0.1%	HNS	0.0009	18	0.3%
Q4654310	01/01/1927	31/12/1954	27	BNS	1.97	-0.012	-16%	Baisse S10	-0.0059	0.48	-33%
Q4844010	01/09/1927	31/12/1954	27	BNS	6.65	-0.045	-18%	Baisse TS	-0.0458	1.9	-65%
Q6404010	01/01/1920	31/12/1962	42	Baisse S5	2.65	-0.018	-29%	HNS	0.0002	0.54	1.6%

*Tableau 20 - Quantification de la baisse déduite de la tendance (pente de Sen) identifiée en proportion du module ou du QMNA5  
(en orange : test statistique significatif ; en jaune : test statistique non significatif mais baisse induite comprise entre 10 et 20% de la valeur de référence).*

Concernant la lame d'eau, des baisses respectives de l'ordre de 50% et 60% sont évaluées pour le débit de la Neste de Cap de Long (O0105110) entre 1948 et 2011 et pour le Saison à Mauléon-Licharre (Q7322510) entre 1967 et 2011. De façon non significative (au sens statistique du terme), une baisse moindre est identifiée sur les stations du Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre (Q4801010, entre 1959 et 2016), du Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie (Q6142910, entre 19122 et 2013), du Gave d'Estaing à Estaing (Q4654310, 1927 à 1954), de l'Ouzom à Arthez-d'Asson (Q4944010, période 1927 à 1954) et, de façon significative, du Lourdios-Ichère à Lourdios-Ichère (Q6404010, 1920 à 1962).

Pour le QMNA, 5 stations sont concernées par une baisse significative à très significative, tandis qu'une baisse non significative est identifiée pour 3 voire 4 autres stations (si l'on inclut Le Gave de Pau à Bérenx pour lequel la baisse de QMNA entre 1923 et 2016 atteint 9.5% du QMNA5).

De cette analyse, il ressort qu'une seule station (Le Gave d'Oloron à Escos, Q7412910) n'est pas concernée par une baisse du QMNA ou du débit moyen qui soit significative (au sens statistique) ou non significative mais d'une ampleur de l'ordre de ou supérieure à 10% de la valeur de référence. Une vue spatialisée de ces résultats est présentée en figure 44.

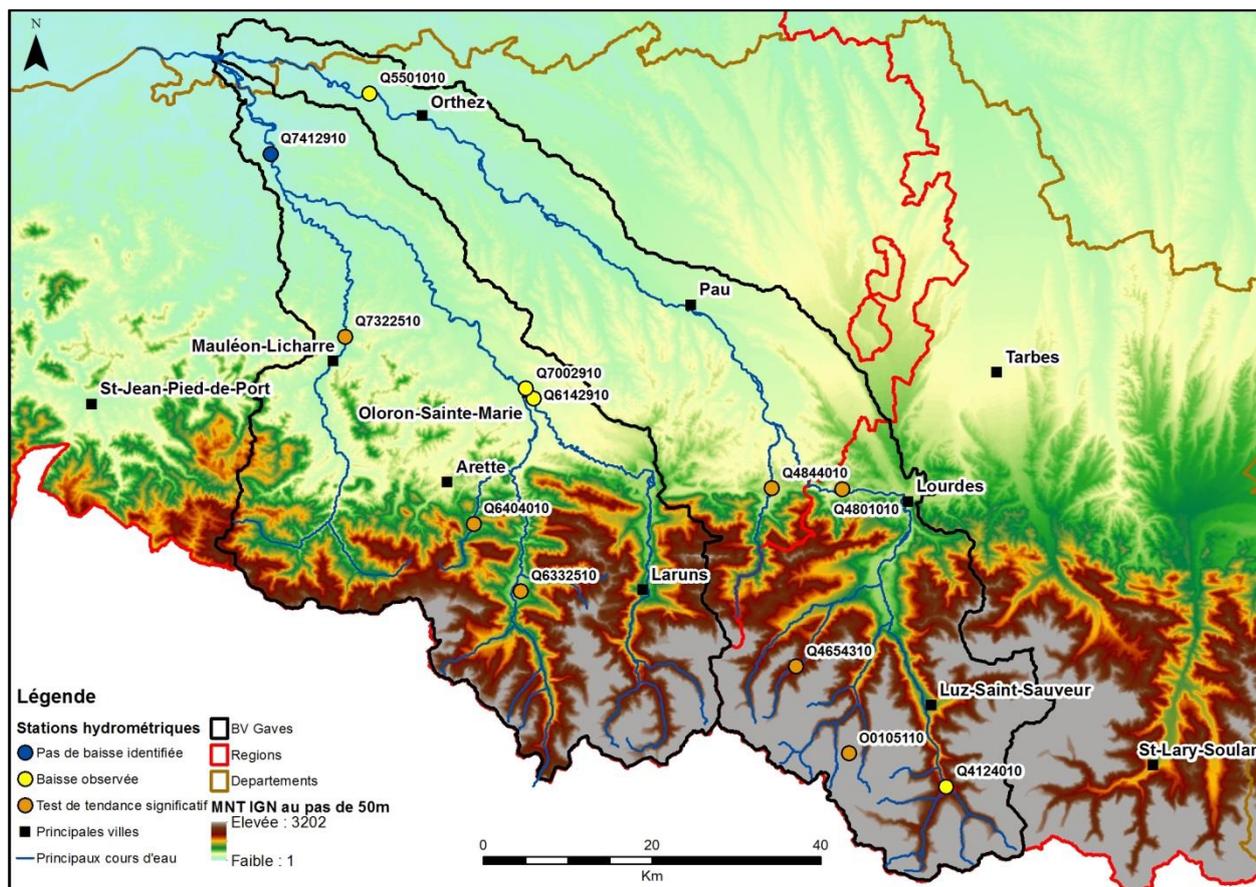


Figure 44 - Stations concernées par une baisse du QMNA ou du débit moyen qui soit significative (en orange) ou non, mais d'une ampleur de l'ordre de ou supérieure à 10% de la valeur de référence (en jaune)

Enfin, afin d'homogénéiser les résultats obtenus sur une période commune, le test de Mann-Kendall a été conduit sur 8 stations hydrométriques disposant d'une chronique quasi-complète de 45 années (1967-2011) et pour les variables « valeur moyenne » et « QMNA ». Les résultats sont présentés dans le Tableau 21.

Station	Début	Fin	Nb années retenues	Valeurs moyennes	Module (m3/s)	Pente Sen (m3/s par an)	Proportion baisse	QMNA	Pente Sen (m3/s par an)	QMNA moyen	Proportion baisse	
O0105110	01/01/1967	31/12/2011	43	Baisse	TS	0.26	-0.003	-44%	Baisse	TS	0.017	0%
Q4801010	01/01/1967	31/12/2011	45		TS	46.03	-0.270	-26%		TS	20.6	-51%
Q5501010	01/01/1967	31/12/2011	45		TS	81.10	-0.802	-45%		TS	31.8	-48%
Q6142910	01/01/1967	31/12/2011	44		TS	19.49	-0.216	-50%		TS	5.59	-59%
Q6332510	01/01/1967	31/12/2011	45		S5	23.45	-0.111	-21%		S5	6.64	-32%
Q7002910	01/01/1967	31/12/2011	45		TS	51.68	-0.375	-33%		S5	16.4	-36%
Q7322510	01/01/1967	31/12/2011	45		TS	23.88	-0.300	-57%		S5	5.39	-47%
Q7412910	01/01/1967	31/12/2011	45		S10	101.78	-0.369	-16%		BNS	26.5	-20%

Tableau 21 - Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux valeurs moyennes annuelles et aux QMNA des stations hydrométriques disposant d'une chronique sur la période 1967-2011

Toutes les stations hydrométriques étudiées présentent une tendance à la baisse pour la valeur moyenne annuelle du débit et 75% présentent une tendance à la baisse pour le QMNA. L'application de la pente de Sen sur les 45 années permet d'estimer une baisse du débit annuel moyen sur la période : elle représente jusqu'à plus de la moitié du module des stations

concernées. Il est important de noter que des stations ne présentant pas de tendance à la baisse (au sens statistique) sur une période plus étendue (Q7412910, Q5501010), en présentent systématiquement une sur la période 1967-2011. Ceci s'explique très vraisemblablement par l'existence d'une stabilité du débit moyen écoulé au cours de la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.

En terme de QMNA, seule la station de la Neste de Cap de Long ne présente pas de baisse de son QMNA sur la période 1967-2011.

Ce constat particulièrement sévère de l'évolution de l'hydrologie des gaves de Pau et d'Oloron pour la période 1967-2011 doit cependant être nuancé au regard i) des recherches de tendance effectuées sur des périodes plus étendues et corrélativement, ii) de l'observation des chroniques de débit sur ces périodes étendues, montrant l'existence de débits particulièrement faibles durant la période 1945-1955 (figure 45).

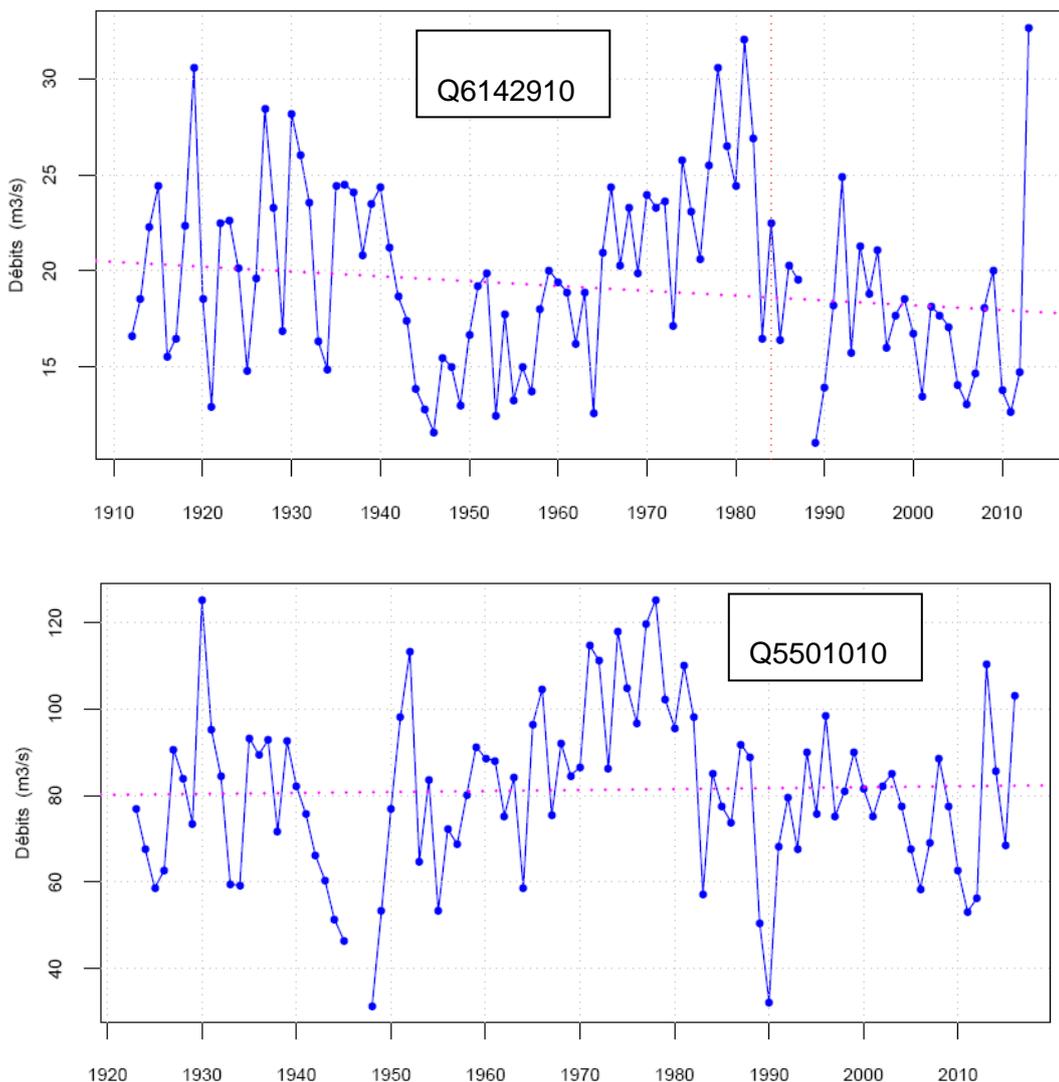


Figure 45 - Débit moyen annuel du gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie (en haut) et du gave de Pau à Bérenx (en bas)

**Remarque :**

A priori, il peut paraître étonnant que les débits des cours d'eau manifestent en général une tendance à la baisse et que les nappes alluviales très liées à ces cours d'eau ont des niveaux qui présentent plutôt une tendance à la hausse. Cela est en fait lié aux périodes de mesures, très longues pour les débits (plusieurs décennies) et courtes pour les niveaux (une quinzaine d'années). On verra au chapitre 3.4 que cette contradiction apparente disparaît, débits et niveaux étant très bien corrélés sur la dernière décennie. Cela montre l'importance de la longueur d'une chronique de mesures pour mettre en évidence une tendance sur le long terme (selon la définition d'une tendance donnée au § 3.1.1).

### **3.4. RELATIONS NIVEAUX-DÉBITS**

Compte tenu du faible nombre de piézomètres régulièrement suivis, seuls deux piézomètres situés à peu de distance d'une station hydrologique ont été retenus pour rechercher des relations entre niveau et débits. Ces deux piézomètres captent la nappe alluviale du gave d'Oloron. Les deux couples piézomètre-station hydrologique sont :

10035X0009 - Q7412910 d'une part et 10295X0032 - Q7002910 d'autre part.

Les figures 46 à 51 qui suivent montrent les relations entre ces deux piézomètres et les deux stations correspondantes.

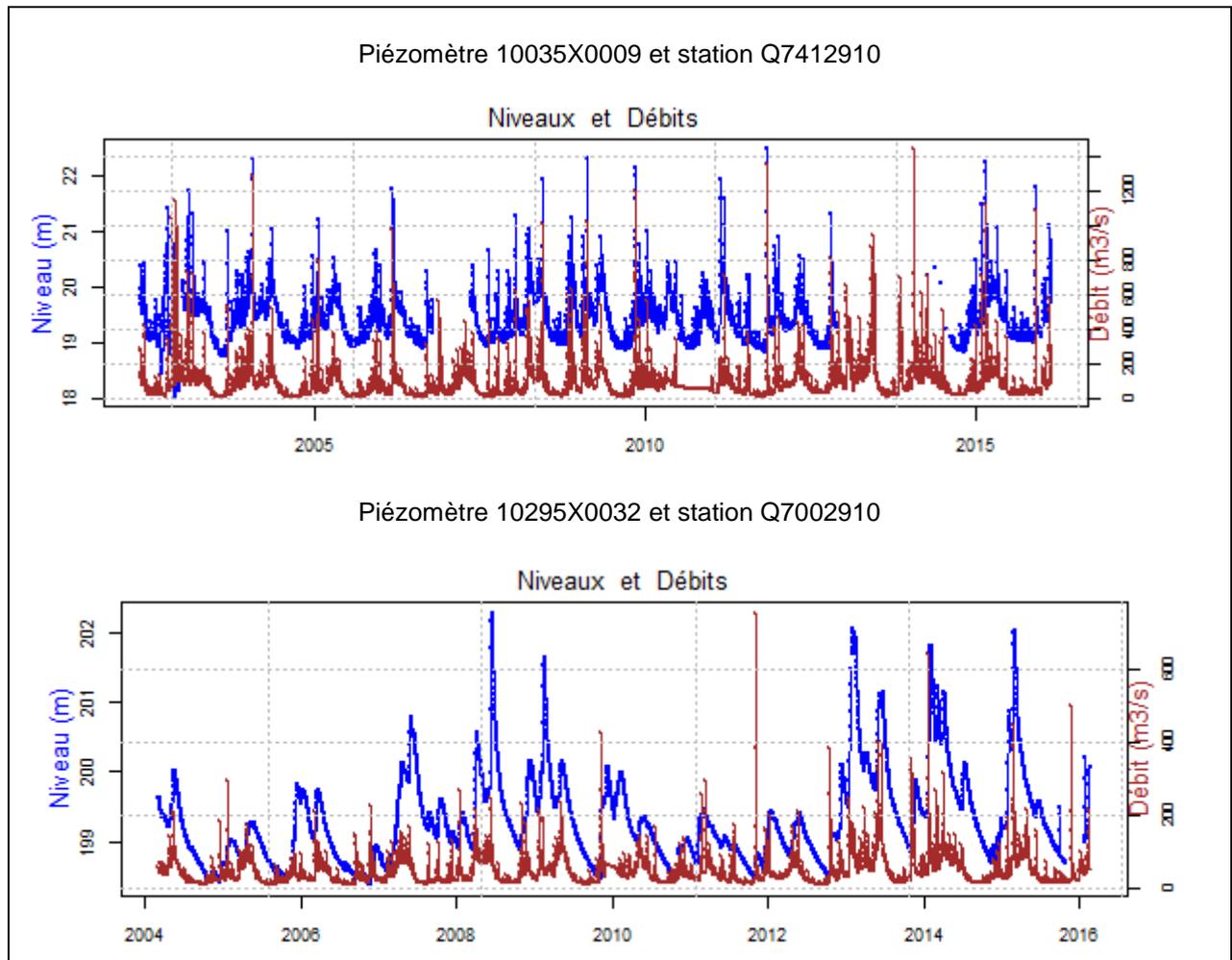


Figure 46 - Superpositions niveaux-débits pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part

Les corrélogrammes croisés de la figure 47 montrent une très bonne corrélation dans le temps entre piézomètres et stations, avec de bons coefficients de corrélation (0.81 et 0.63). Le décalage temporel est inférieur au mois (les graphiques établis au pas de temps mensuel indiquent un décalage de 0).

Pour des éléments complémentaires, on pourra se reporter par ailleurs aux corrélogrammes croisés établis dans le cadre du rapport BRGM RP-57811-FR.

Les figures 48, 49 et 50 montrent globalement, à l'aide de diagrammes binaires niveaux-débits, les relations existant entre ces deux variables. Ces relations sont précisées année par année, sur les dix dernières années, par les figures 49 et 50 : la corrélation est assez bonne pour le couple constitué par le piézomètre 10355X009 et la station Q7412910 (figure 49).

La figure 51 montre quant à elle la relation entre QMNA et HMNA sur la période 2003-2015, avec une très bonne corrélation pour le couple 10295X0032 et Q7002910.

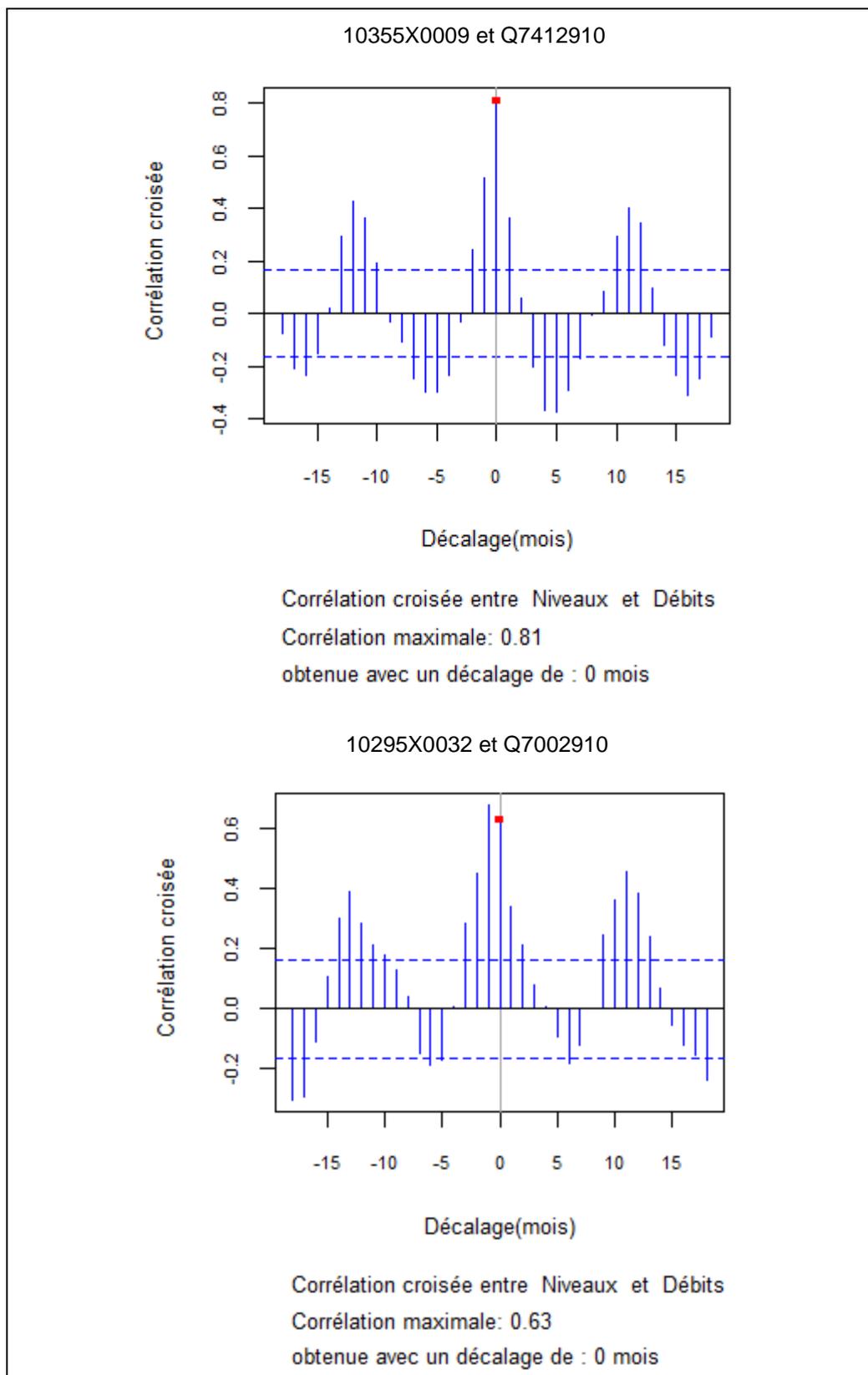


Figure 47 - Corrélogrammes croisés niveaux-débits au pas de temps mensuel pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part

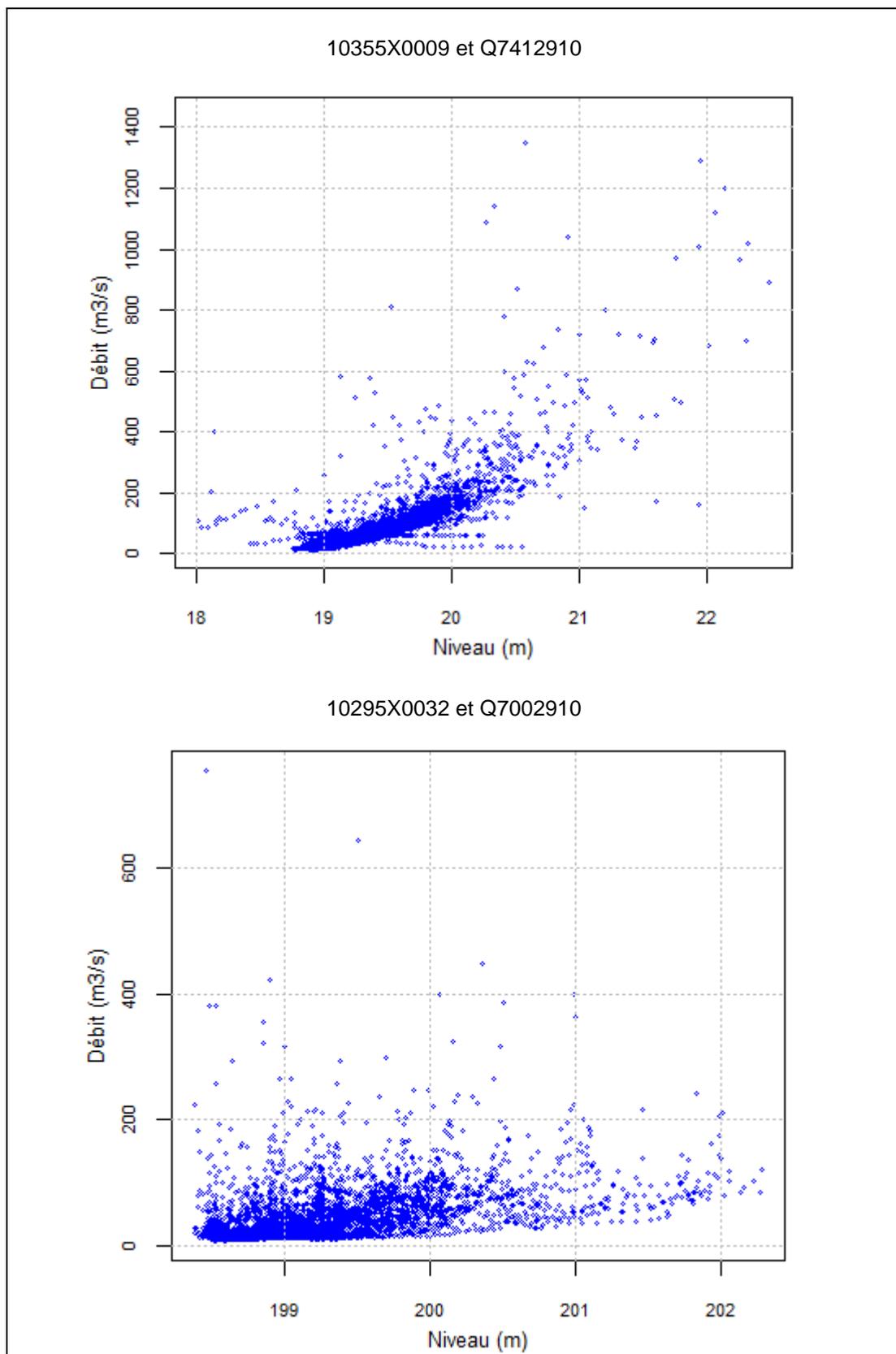


Figure 48 - Diagramme niveaux-débits pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part

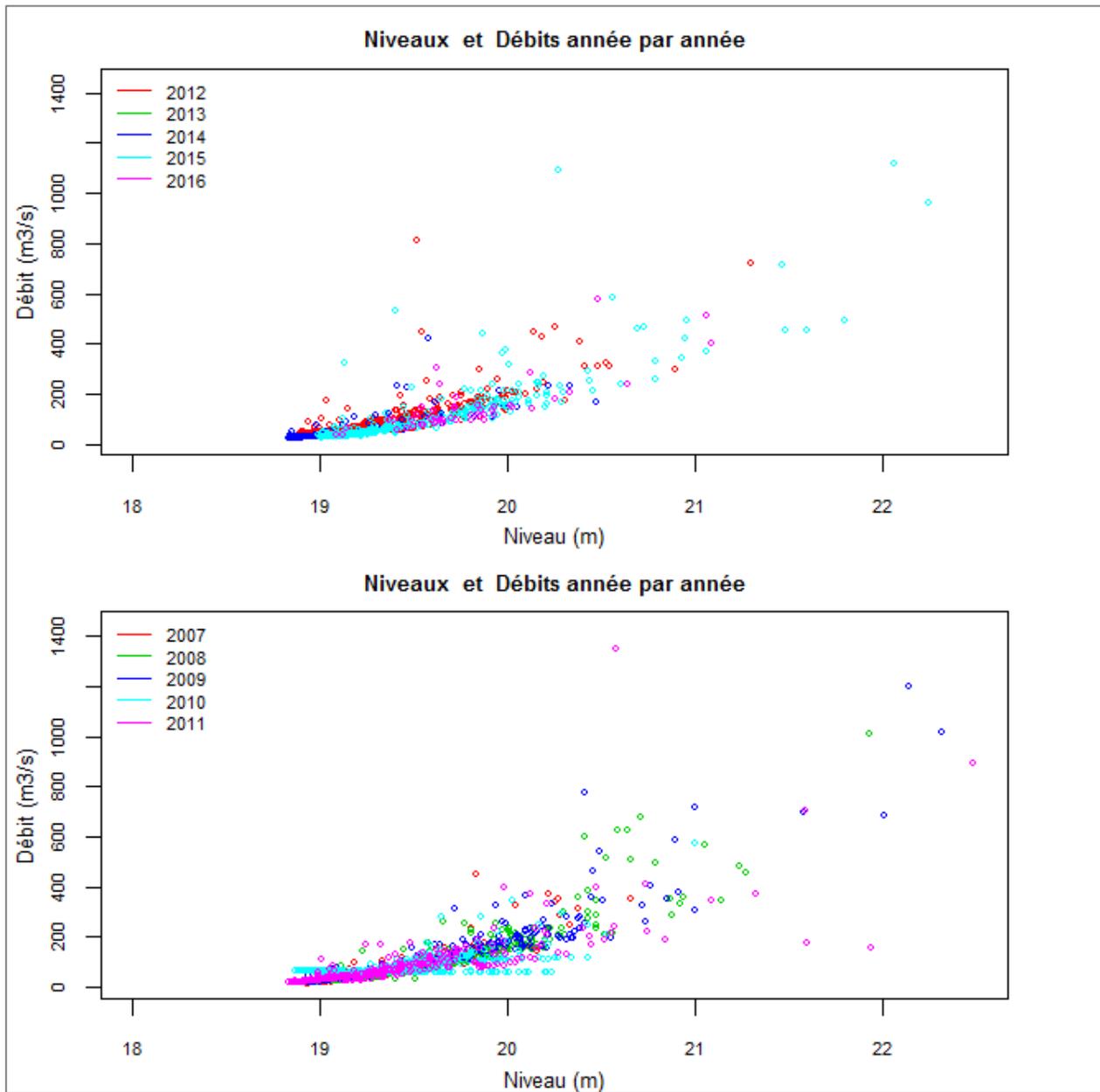


Figure 49 - Relations niveaux et débits année par année pour le couple piézomètre 10355X009 et station hydrométrique Q7412910  
Deux graphiques sont présentés afin d'améliorer la lisibilité des figures.

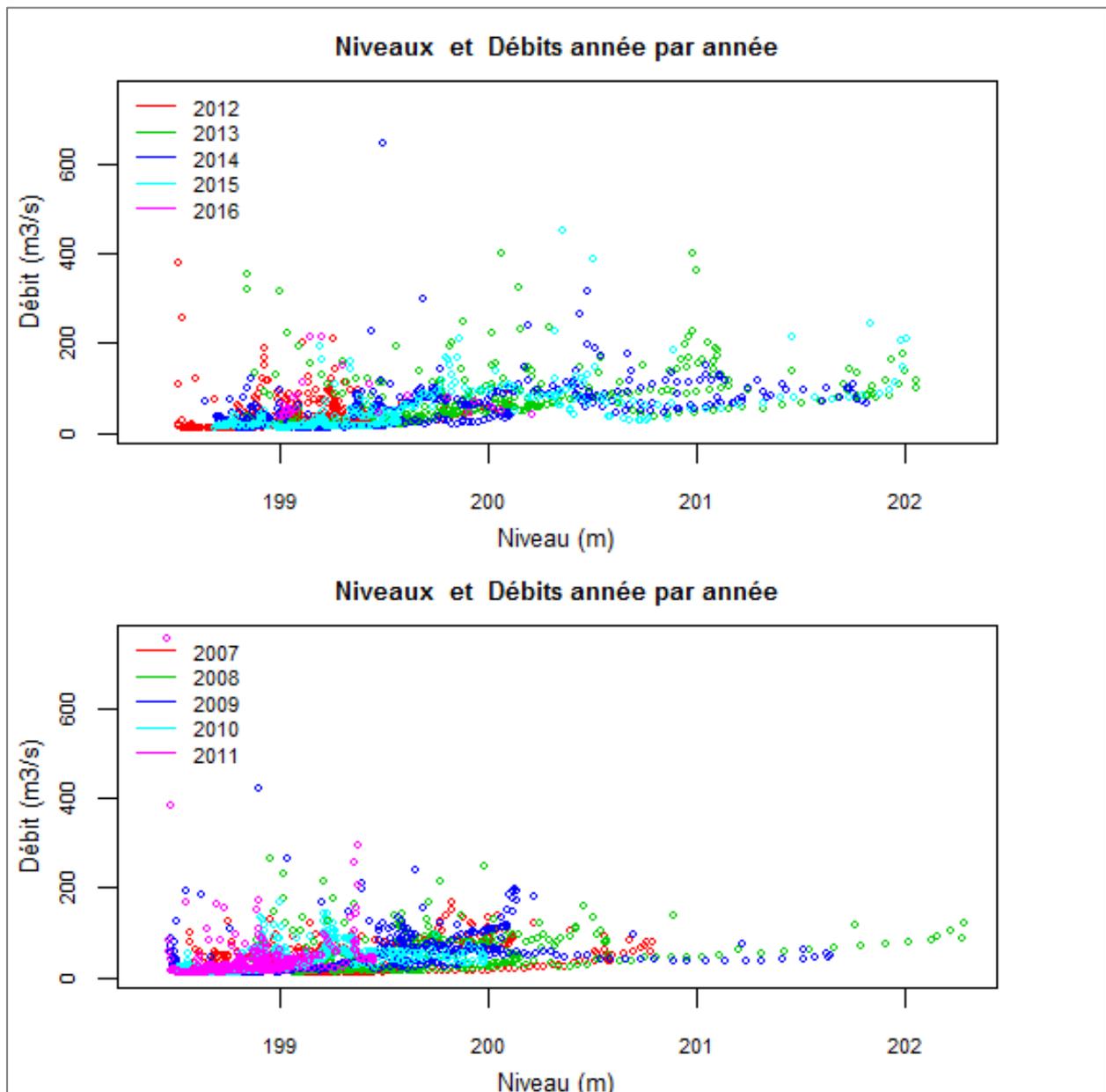


Figure 50 - Relations niveaux et débits année par année pour le couple piézomètre 10295X0032 et station hydrométrique Q7002910  
Deux graphiques sont présentés afin d'améliorer la lisibilité des figures.

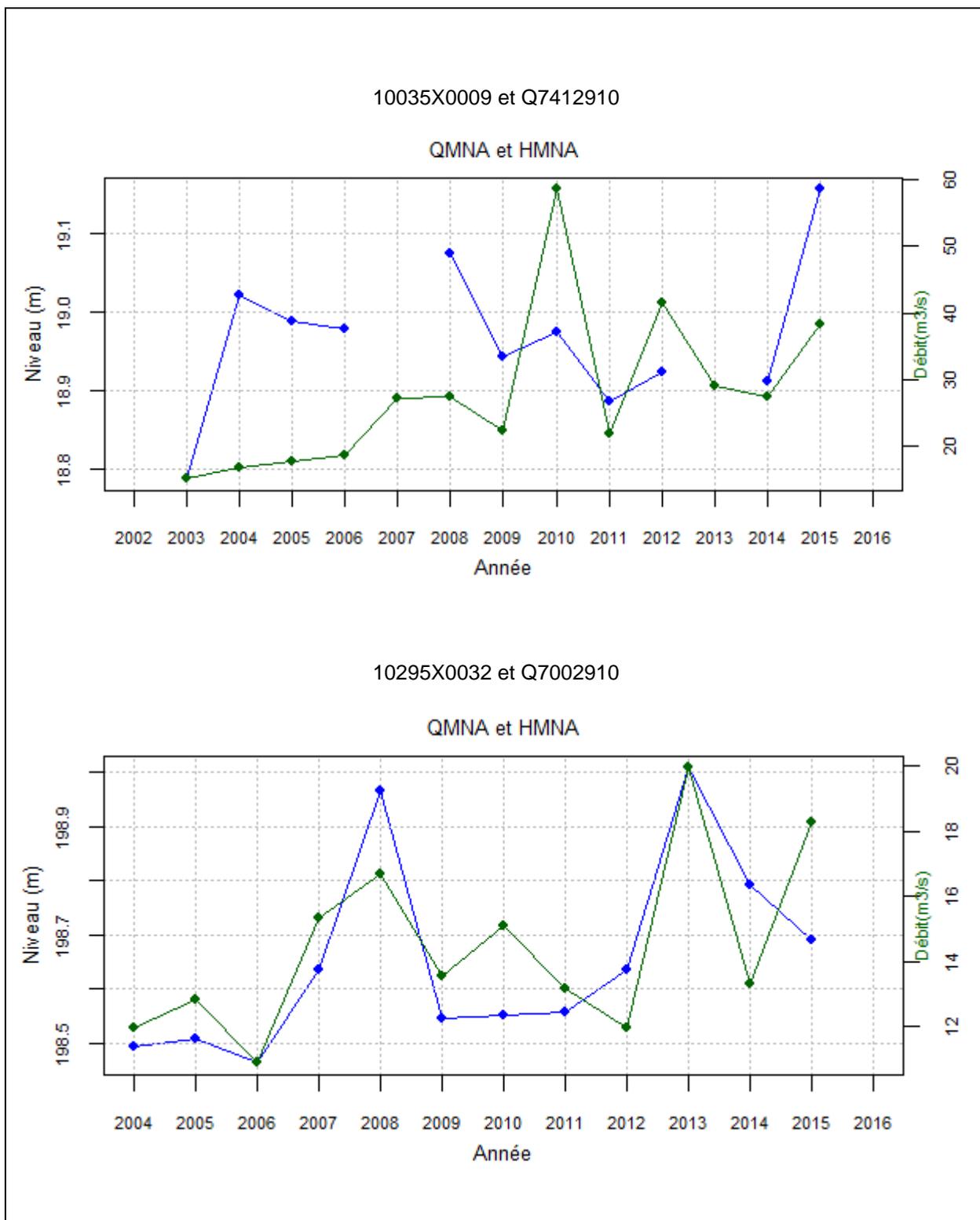


Figure 51 - Comparaison entre QMNA et HMNA (période 2003-2015) pour les couples de piézomètre/station hydrométrique 10035X0009 / Q7412910 d'une part et 10295X0032 / Q7002910 d'autre part

## 4. Autres variables du régime des cours d'eau analysées

### 4.1. ÉCOULEMENT DE BASE ET BASE FLOW INDEX

Le Base Flow Index (BFI) est le rapport entre l'écoulement de base  $E_b$  (supposé provenir uniquement de la nappe ou en tout état de cause d'un hydrosystème produisant un écoulement différé dans le temps) et le débit total  $Q$  du cours d'eau. La méthode de calcul utilisée est la méthode mise au point à l'institut hydrologique de Wallingford (Gustard et al., 1992). Son principe (c'est une décomposition d'hydrogramme) est exposé en annexe 5.

Compte tenu des longues chroniques de débits disponibles, il a semblé intéressant de chercher à savoir si le BFI avait varié au cours des décennies. Pour cela les chroniques ont été subdivisées en 2 ou 3 périodes (pas forcément les mêmes car fonction de la longueur de la chronique disponible) d'une trentaine d'années (tableau 22).

	Valeurs du BFI		
	Période 1	Période 2	Période 3
La Neste de Cap de Long à Aragnouet (O0105110) (5 km <sup>2</sup> )		1948-1980 <b>0.618</b>	1981-2011 <b>0.623</b>
Le Gave d'Héas à Gèdre (Q4124010) (84 km <sup>2</sup> )		1948-1980 <b>0.700</b>	1981-2011 <b>0.672</b>
Le Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre (Q4801010) (1120 km <sup>2</sup> )		1959-1980 <b>0.764</b>	1981-2016 <b>0.757</b>
Le Gave de Pau à Bérenx (Q5501010) (2575 km <sup>2</sup> )	1923-1945 <b>0.656</b>	1948-1980 <b>0.691</b>	1981-2016 <b>0.666</b>
Le Gave d'Ossau à Oléron-Sainte-Marie (Q6142910) (488 km <sup>2</sup> )	1912-1947 <b>0.647</b>	1948-1980 <b>0.668</b>	1981-2016 <b>0.630</b>
Le Gave d'Aspe à Bedous (Q6332510) (425 km <sup>2</sup> )		1948-1980 <b>0.657</b>	1981-2011 <b>0.651</b>
Le Gave d'Oléron à Oléron-Sainte-Marie (Q7002910) (1085 km <sup>2</sup> )	1912-1947 <b>0.679</b>	1948-1980 <b>0.664</b>	1981-2016 <b>0.654</b>
Le Saison à Mauléon-Licharre (Q7322510) (480 km <sup>2</sup> )		1967-1980 <b>0.513</b>	1981-2011 <b>0.501</b>
Le Gave d'Oléron à Escos (Q7412910) (2456 km <sup>2</sup> )		1949-1980 <b>0.579</b>	1981-2016 <b>0.591</b>

Tableau 22 - Valeurs du Base Flow Index à différentes périodes

Les graphiques et les résultats (écoulement de base et écoulement total) sont reportés en annexe 7.

A l'exception du Gave d'Oloron à Escos et de la Neste, de la période 2 (de la fin des années 1940 à 1980) à la période 3 (de 1981 à 2016), le BFI a diminué, traduisant une baisse de la part de l'écoulement de base sur ces périodes. Ceci implique une participation relative plus importante des écoulements rapides, non différés dans le temps, sans pour autant que ceux-ci augmentent nécessairement en valeur absolue (les baisses constatées sur les pluies efficaces laissent d'ailleurs envisager le contraire).

Pour illustrer cet aspect, on peut prendre l'exemple du gave de Pau à Bérenx. Le module moyen est de 81.6 m<sup>3</sup>/s sur l'ensemble de la période (1923-2016), de 76.5 m<sup>3</sup>/s entre 1923 et 1945, de 87.8 m<sup>3</sup>/s de 1948 à 1980 et de 76.9 m<sup>3</sup>/s sur la période finale de la chronique. En appliquant les BFI calculés pour chacune des trois périodes, on peut calculer les parts respectives des écoulements rapides et de base dans le débit (cf. tableau 23). On observe la très faible variabilité des écoulements rapides, tandis que la part de l'écoulement de base croît de façon très significative (+20%) durant la période 1948-1980.

Période	Module (m3/s)	BFI	Q de base (m3/s)	Q rapide (m3/s)
1924-1945	76.5	0.656	50.2	26.3
1948-1980	87.8	0.691	60.7	27.1
1981-2016	76.9	0.666	51.2	25.7

Tableau 23 - Gave de Pau à Bérenx - Parts des écoulements de base et rapides déduites des valeurs de BFI calculées

Dans le contexte du fonctionnement pluvio-nival des cours d'eau des bassins versants des gaves, la baisse de l'écoulement de base observée entre les périodes 1948-80 et 1981-2016 pourrait être interprétée, non pas uniquement comme une baisse de l'apport des nappes aux cours d'eau, mais potentiellement aussi comme une baisse de l'apport de la fonte des neiges à leur débit, celle-ci contribuant de façon significative aux écoulements différés dans le temps, essentiellement estivaux. La question est en pratique complexe car l'augmentation de la fonte des neiges génère une augmentation temporaire des écoulements à l'aval (jusqu'à diminution significative du stock d'eau solide susceptible de fondre). On pourrait ainsi s'interroger si l'augmentation constatée sur le BFI entre les périodes 1 et 2 pour le gave de Pau à Bérenx et le gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie ne traduisent pas cette augmentation temporaire – la diminution des surfaces englacées étant très largement amorcée durant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle (cf. Association Moraine, 2011 ; une courte synthèse est par ailleurs présentée à ce sujet dans le rapport Wuilleumier et al., 2017 portant sur les autres composantes de la présente étude). Mais ce constat n'est pas valide pour le gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie. Les barrages, dont le volume cumulé global est faible au regard des débits totaux écoulés dans les bassins versants (Wuilleumier et al., 2017), jouent aussi un rôle dans l'étalement dans le temps des écoulements. Boe et Habets (2014) montrent par ailleurs l'influence des oscillations climatiques nord-atlantiques dans les écoulements de surface. En tout état de cause, cette question demeure à analyser, même si la baisse de la superficie des surfaces englacées dans les Pyrénées rend plausible l'hypothèse d'une diminution de la contribution d'eau de fonte à l'écoulement.

## 4.2. MINIMA MENSUELS (QMNA) ET MAXIMA MENSUELS DES DEBITS

### 4.2.1. Dates des minima et maxima mensuels

Par date on entend le mois où, chaque année civile, la valeur moyenne mensuelle minimale du débit est atteinte (donc le QMNA). De même pour la valeur moyenne mensuelle maximale (appelée QMXA par analogie).

Pour chaque station hydrologique, les mois où le QMNA et le QMXA ont été atteints ont été recherchés et reportés graphiquement en fonction des années (figures 52 et 53 pour la station Q4801010). Des histogrammes précisent la fréquence d'occurrence de ces mois sur toute la période de mesures (figures 52 et 53).

Le tableau qui suit recense les mois dont la fréquence d'occurrence est la plus forte (jusqu'à l'ordre 3, par fréquence décroissante).

Station	QMNA			QMXA		
	Mois ordre 1	Mois ordre 2	Mois ordre 3	Mois ordre 1	Mois ordre 2	Mois ordre 3
O0105110	3 (54.1 %)	2 (21.3 %)	4 (11.5%)	6 (57.4 %)	7 (42.6 %)	/
Q4124010	2 (40.4 %)	1 (23.4 %)	12 (14.9 %)	6 (66.0%)	5 (31.9 %)	10 (2.1 %)
Q4801010	9 (39.3 %)	8 (23.2 %)	10 (16.1 %)	6 (48.2 %)	5 (35.7 %)	11 (5.4 %)
Q5501010	9 (39.3 %)	8 (27.0 %)	10 (19.1 %)	6 (21.3 %)	5 (19.1 %)	12(16.9 %)
Q6142910	8 (52.5 %)	9 (25.7 %)	10 (9.9 %)	5 (59.4 %)	6 (15.8 %)	4 (7.9 %)
Q6332510	8 (39.1 %)	9 (35.9 %)	10 (12.5 %)	5 (40.6 %)	4 (18.8 %)	12 (9.4 %)
Q7002910	8 (48.1 %)	9 (29.8 %)	10 (11.5 %)	5 (47.1 %)	4 (12.5 %)	6 (9.6 %)
Q7322510	8 (37.8 %)	9 (20.0 %)	10 (15.6 %)	4 (26.7 %)	5 (22.2 %)	12 (13.3 %)
Q7412910	8 (38.8 %)	9 (34.3 %)	10 (11.9 %)	5 (20.9 %)	4 (17.9 %)	1 (13.4 %)
Q4654310*	2 (42.9 %)	12 (17.9 %)	9 (14.3 %)	6 (67.9 %)	5 (25.0 %)	4 (3.6 %)
Q4844010*	8 (33.3 %)	9 (22.2 %)	7 (18.5 %)	12 (25.9 %)	5 (14.8 %)	11 (14.8 %)
Q6404010**	8 (51.2 %)	7 (18.6 %)	9 (14.0 %)	12 (20.9 %)	5 (16.3 %)	11 (11.6 %)

*Tableau 24 - Fréquence d'occurrence des mois où le QMNA et le QMXA sont atteints*

\* Stations qui ne sont plus suivies depuis 1954

\*\* Station qui n'est plus suivie depuis 1962

A l'exception des stations O0105110, Q4124010 et Q4654310, le QMNA est atteint le plus fréquemment au mois d'août, puis viennent ensuite les mois de septembre et d'octobre.

Pour le QMXA, la variabilité est plus grande, mais les mois où il est atteint le plus fréquemment sont les mois de juin (à l'exception des stations Q4844010 et Q6404010) et secondairement mai, puis avril. A l'ordre 3, la dispersion est plus grande, mais on trouve souvent novembre et décembre.

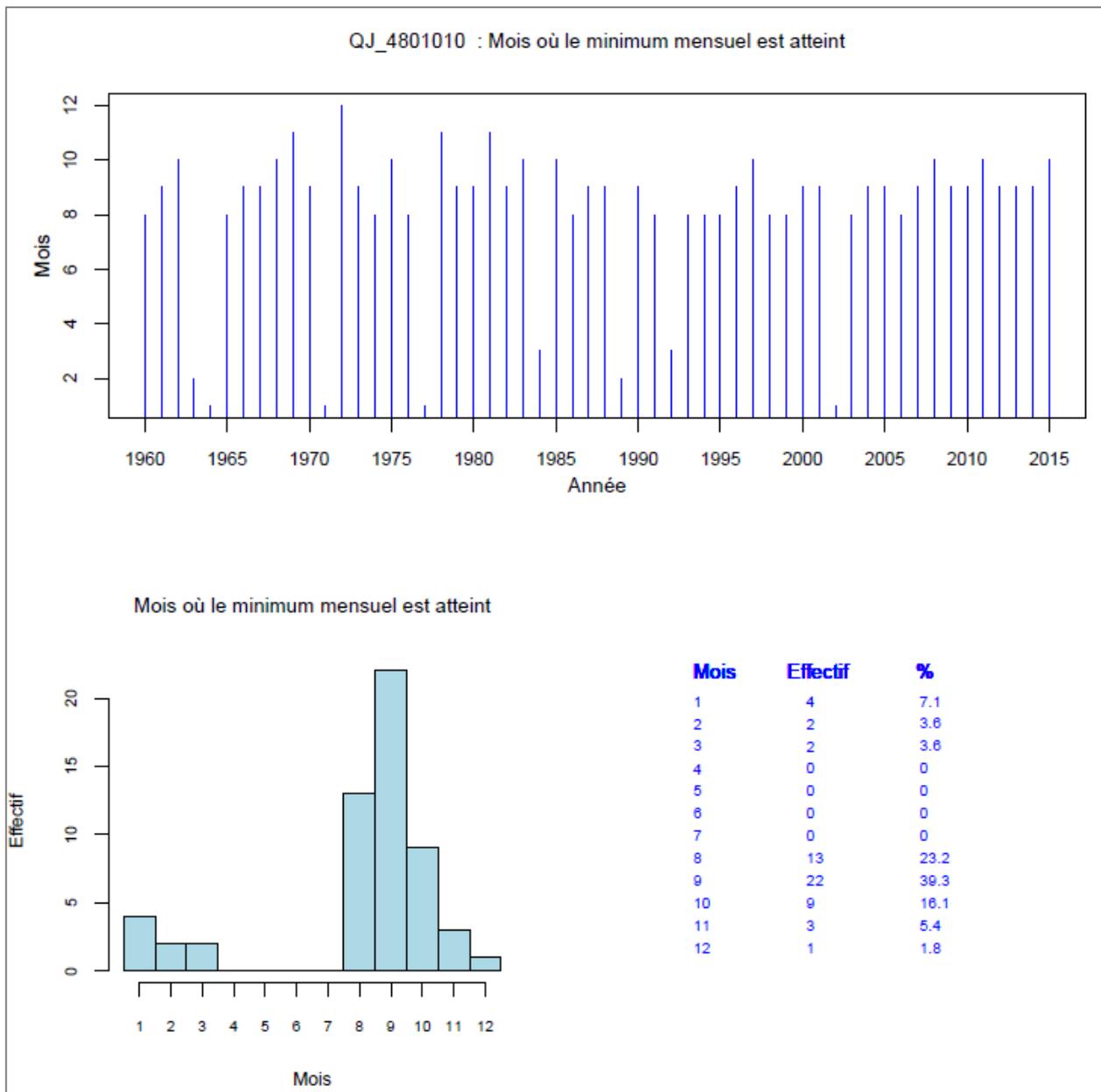


Figure 52 - Mois (de 1 à 12) où le QMNA est atteint pour la station Q4801010

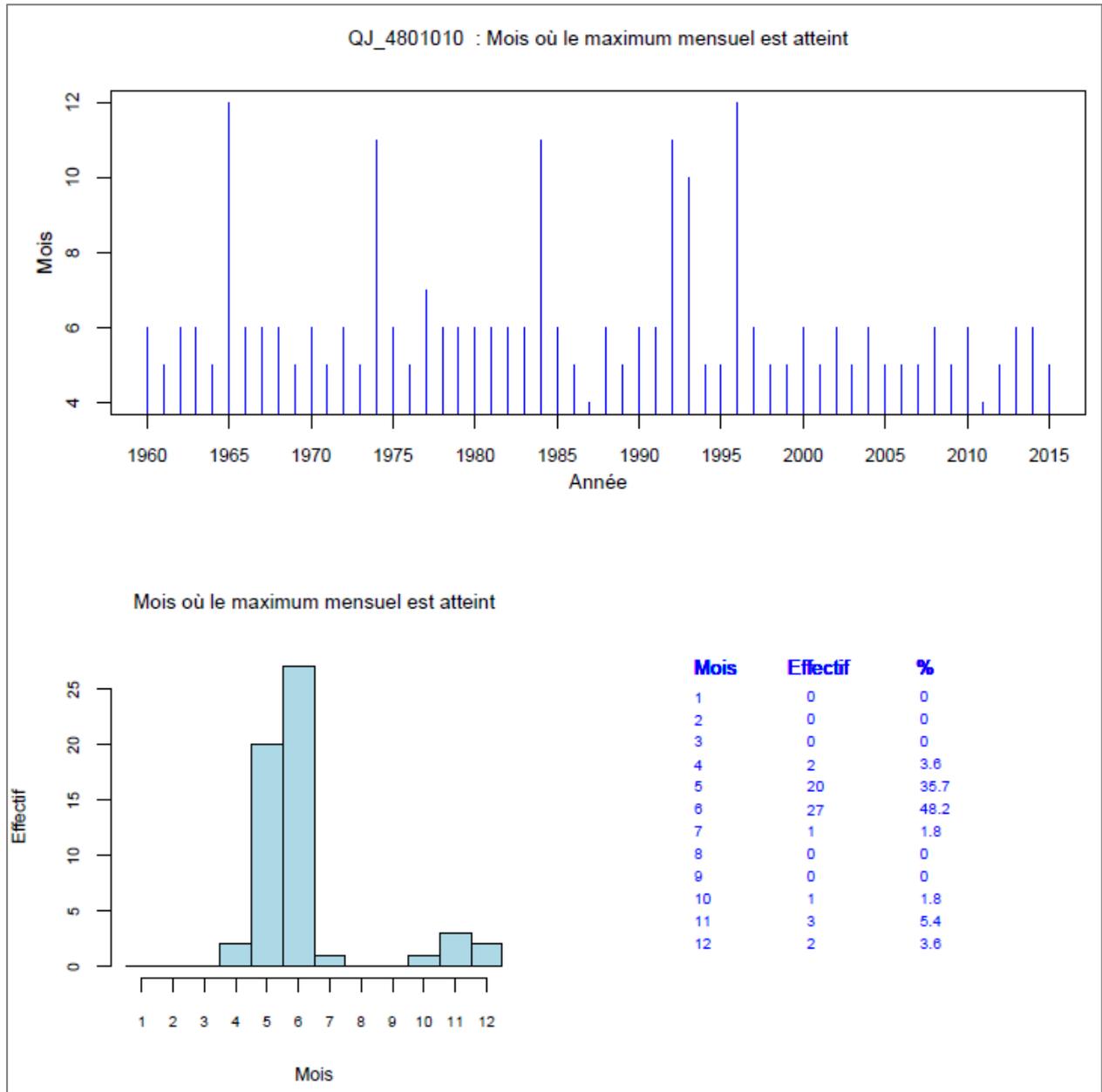


Figure 53 - Mois (de 1 à 12) où le QMXA est atteint pour la station Q4801010

Compte tenu de la variabilité de dates d'occurrence des minima et maxima mensuels, il est difficile de se prononcer sur un éventuel glissement dans le temps (plus tôt ou plus tard) de ces minima et maxima.

#### 4.2.2. Etude des pics de débits

Une analyse a été faite sur les pics de débits pour les 9 stations dont les chroniques se terminent en 2016. Les pics principaux des chroniques ont été identifiés automatiquement en recherchant les points de basculement et en sélectionnant les pics pour lesquels montée et descente étaient les plus "raides". Une étude statistique a été faite sur les intervalles de temps séparant deux pics principaux successifs (tests de Mann-Kendall et de Pettitt).

Le tableau 24 rassemble les résultats obtenus. Par hausse on entend une augmentation de l'intervalle de temps entre pics successifs (un "espacement" plus grand).

Station	Tendance	p-value du test de Mann-Kendall	Significativité
O0105110	Hausse	0.020	oui (à 5%)
Q4124010	Hausse	0.188	non
Q4801010	Non	0.929	
Q5501010	Hausse	0.268	non
Q6142910	Hausse	0.272	non
Q6332510	Hausse	0.486	non
Q7002910	Non	0.712	
Q7322510	Hausse	0.063	oui (à 10%)
Q7412910	Baisse	0.54	non

*Tableau 25 - Tests de Mann-Kendall appliqué aux intervalles séparant les pics*

Deux stations seulement, O0105110 et Q7322510, sont caractérisées par une augmentation de l'intervalle de temps entre pics successifs, significative au seuil de risque de 5 % pour la première, au seuil de risque de 10% pour la seconde.

Les graphiques sont reportés en annexe 5. Un exemple est fourni par la figure 54 ci-après.

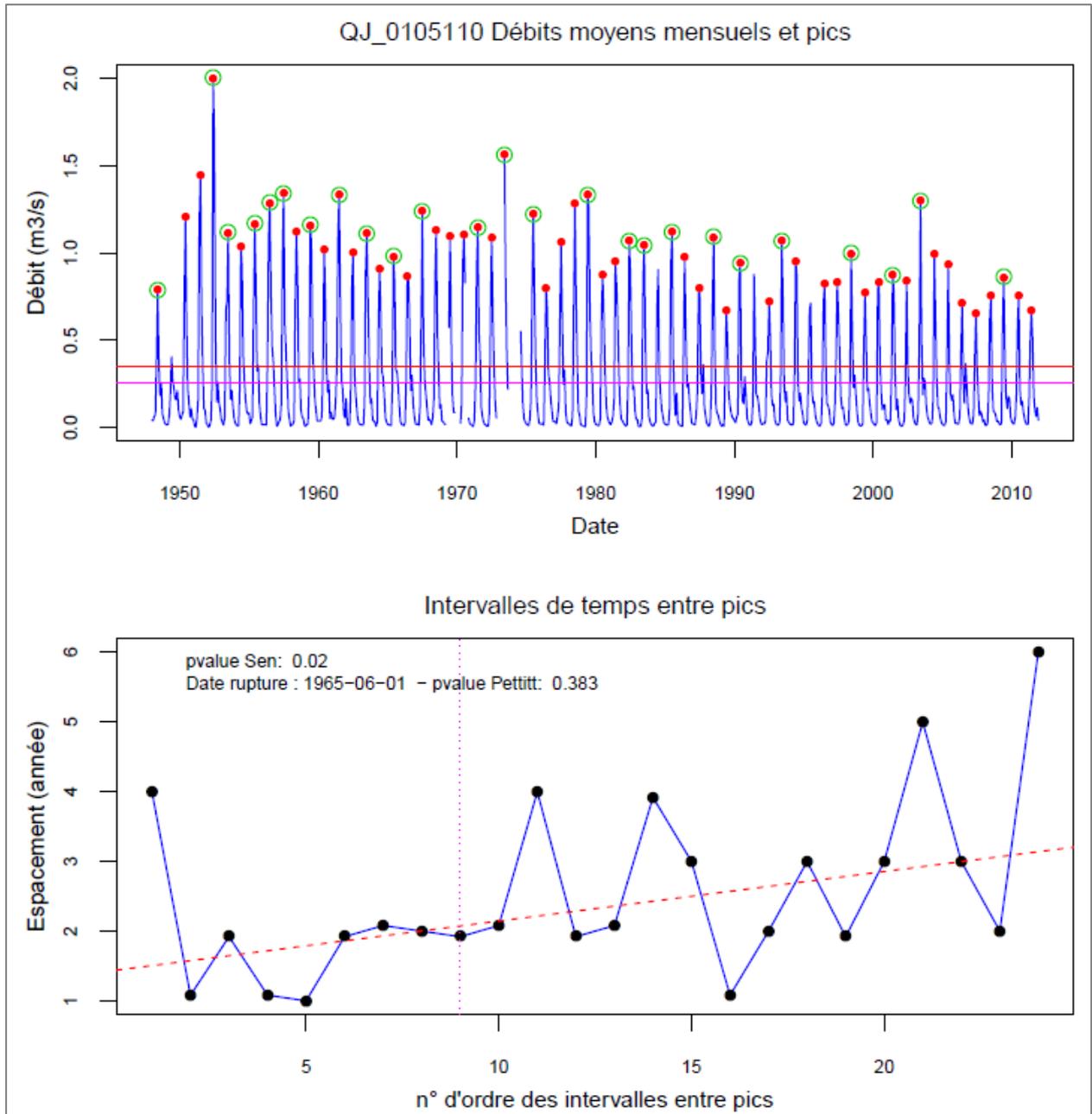


Figure 54 - Evolution de l'intervalle de temps séparant deux pics successifs de débits (station O105110)  
 Sur le graphique du haut la ligne mauve représente la moyenne et la ligne rouge le 3<sup>ème</sup> quartile. Les points rouges indiquent tous les pics identifiés par l'algorithme de recherche. Ceux cerclés de vert indiquent les pics considérés comme principaux.

### 4.3. DATE DES MAXIMA JOURNALIERS

La figure 55 montre l'évolution temporelle de la durée séparant le début de l'année hydrologique et l'occurrence du pic de débit au droit de la station de la Neste du Cap de Long. L'observation de l'ensemble de la chronique ne laisse pas apparaître de tendance particulière. Par contre, le test de Mann-Kendall appliqué sur deux périodes distinctes fait apparaître :

- sur la période 1958-1973 : une tendance à l'occurrence plus tardive du pic de débit, avec un seuil de significativité de 5% ;
- sur la période 1975-2011 : une tendance à une occurrence plus précoce du pic de débit, avec un seuil de significativité de 10%.

Cette observation faite sur la station située le plus en altitude parmi les 12 stations étudiées pourrait être mise en cohérence avec les observations effectuées sur l'évolution du BFI de ce cours d'eau, en augmentation entre les périodes 1948-1980 et 1981-2011 (cf. chapitre 4.1).

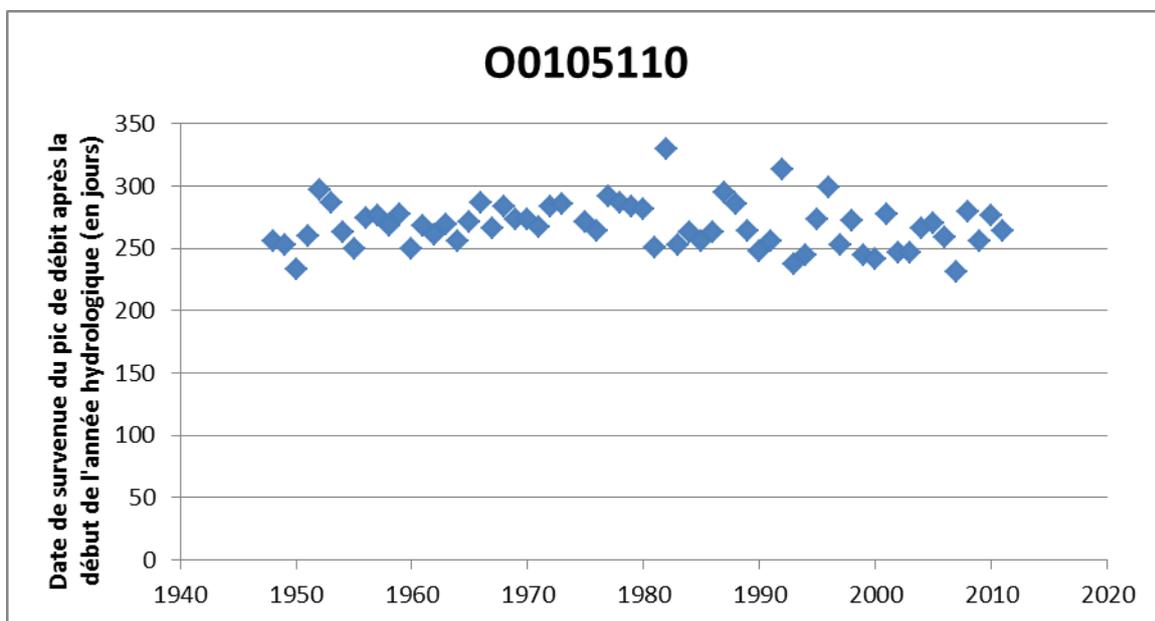


Figure 55 - Durée (jours) entre le début de l'année hydrologique et l'occurrence du pic de débit (station O105110)

## 5. Relations pluies-débits

### 5.1. DONNEES DISPONIBLES ET CARACTERISATION

Les mailles Safran sélectionnées pour disposer de données sur les précipitations et l'ETP sur la zone d'étude, au nombre de 14, sont localisées sur la figure 56.

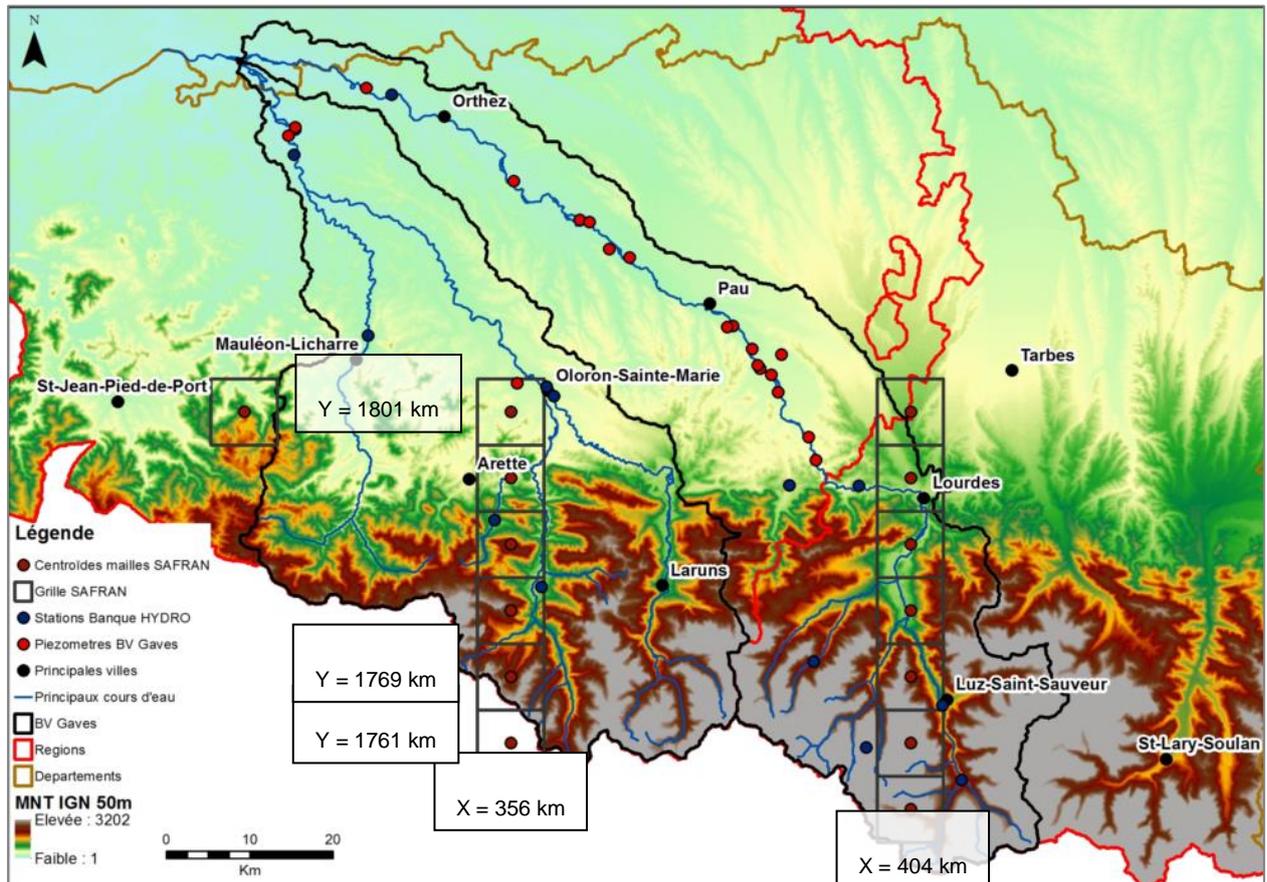


Figure 56 - Localisation des mailles SAFRAN desquelles les données de pluies et l'ETP ont été extraites

Dans la suite, les deux transects Nord-Sud sont identifiés par leur bassin versant d'appartenance (gave d'Oloron ou gave de Pau) et par la position géographique du centroïde des mailles qu'ils comportent (dans le système de coordonnées Lambert 93, exprimées en km).

#### 5.1.1. Mailles Safran situées le long du Gave d'Oloron

Il s'agit de 6 mailles situées au sud d'Oloron, le long du Gave (figure 56).

Pour ces 6 mailles, la figure 57 montre l'évolution de l'ETP et de la pluie efficace en moyennes interannuelles de 1959 à 2014. La pluie efficace a été calculée avec la méthode de Thornthwaite et pour une capacité maximale de stockage en eau du sol de 100 mm. On peut observer :

- qu'il existe deux types d'évolution, l'un caractérisant les mailles amont 1761, 1769, 1777, 1785, l'autre caractérisant les mailles aval 1793 et 1801, tant pour l'ETP que pour la pluie efficace ;
- qu'il semble exister une « tendance » (analyse visuelle sur la figure 57) à la hausse pour l'ETP et corrélativement une « tendance » à la baisse pour la pluie efficace.

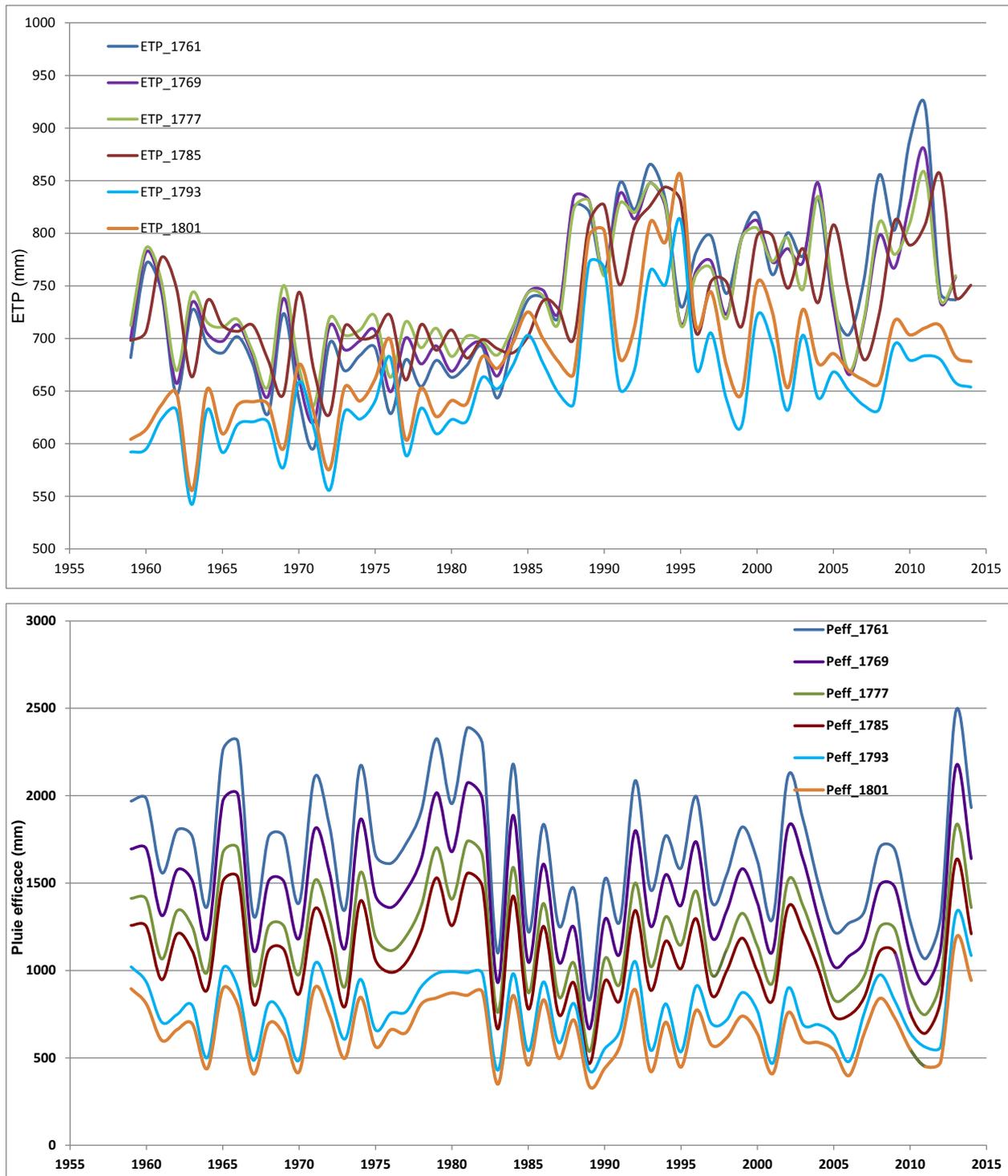


Figure 57 - Evolution de l'ETP et des pluies efficaces (moyennes interannuelles) de 1959 à 2014  
(6 mailles Safran le long du Gave d'Oloron)

- que la pluie efficace a fortement augmenté de 2012 à 2014 (figure 57 et tableau ci-dessous pour la maille 1761), ce qui explique la hausse des niveaux, corrélée à celle des débits sur cette période récente, mise en évidence au chapitre 3.

	Pluie (mm)	ETP (mm)	Peff (mm)
2011	1925.2	888.4	1066.9
2012	2135.9	921.8	1306.5
2013	3225.9	743.5	2485.1
2014	2668.1	736.7	1931.8

Les paramètres statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace, pour les 6 mailles considérées, sont rassemblés dans le tableau 25 :

Pluie (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	1603.7	1442.1	1274.6	1177.9	1008.0	939.3
Médiane	2381.3	2140.6	1894.2	1749.9	1364.5	1266.9
Moyenne	2393.6	2151.9	1902.1	1757.5	1388.2	1291.7
Maximum	3225.9	2900.4	2564.1	2368.6	1920.6	1786.9
Ecart-type	358.7	321.6	283.6	261.4	198.3	184.1
ETP (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	596.1	621.1	636.7	627.7	542.3	555.5
Médiane	730.6	727.8	729.1	725.7	645.9	673.2
Moyenne	737.8	738.3	742.1	736.6	654.3	678.3
Maximum	921.8	878.2	857.0	856.0	812.5	855.3
Ecart-type	72.8	60.7	54.4	53.8	52.7	58.8
Pluie efficace (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	829.4	665.6	535.9	466.5	426.6	337.8
Médiane	1696.4	1466.8	1216.1	1081.2	760.4	652.8
Moyenne	1689.4	1452.4	1209.7	1075.9	768.6	661.1
Maximum	2485.1	2168.7	1829.7	1631.0	1327.1	1185.1
Ecart-type	379.5	336.5	291.1	267.0	200.9	184.6

Tableau 26 - Statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace (en moyennes interannuelles), sur la période 1959 à 2014

On note, sans surprise, une décroissance de la pluie et de la pluie efficace (en moyennes interannuelles) du sud vers le nord du Gave d'Oléron, soit en l'occurrence de l'amont vers l'aval.

### 5.1.2. Mailles Safran situées le long du Gave de Pau

Pour les 6 mailles, la figure 58 montre l'évolution de l'ETP et de la pluie efficace en moyennes interannuelles de 1959 à 2014. La pluie efficace a été calculée avec une capacité maximale de stockage en eau du sol de 100 mm.

Les paramètres statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace, pour les 6 mailles considérées, sont rassemblés dans le tableau 26 :

Pluie (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	1207.6	851.0	731.7	970.1	900.0	785.1
Médiane	1625.3	1207.1	1032.3	1333.4	1236.2	1045.7
Moyenne	1662.6	1238.5	1060.3	1349.4	1250.9	1080.9
Maximum	2296.4	1844.7	1580.0	1936.5	1795.5	1701.8
Ecart-type	243.5	197.1	168.0	205.3	189.5	189.5
ETP (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	551.8	570.9	544.0	547.0	548.4	517.5
Médiane	707.8	688.3	664.1	667.5	682.1	635.1
Moyenne	711.2	699.7	670.8	670.0	680.2	643.1
Maximum	848.1	823.5	781.1	771.0	794.4	748.3
Ecart-type	71.1	59.3	55.8	53.7	58.6	55.0
Pluie efficace (mm)						
Maille	1761	1769	1777	1785	1793	1801
Minimum	521.1	232.9	142.5	353.9	285.0	171.1
Médiane	937.4	559.4	429.8	714.1	627.6	466.8
Moyenne	983.3	607.9	465.5	723.8	625.9	499.2
Maximum	1574.7	1205.5	949.3	1295.0	1153.8	1116.6
Ecart-type	251.2	190.4	158.6	203.9	185.6	171.5

Tableau 27 - Statistiques de base sur la pluie, l'ETP et la pluie efficace (en moyennes interannuelles) sur la période 1959 à 2014

Globalement l'ETP décroît du sud vers le nord, avec un écart de 68 mm entre les mailles extrêmes. Par contre, contrairement aux mailles du Gave d'Oloron, il n'y a pas de régularité Sud-Nord, ni dans la pluie, ni dans la pluie efficace : un minimum de 1060 mm pour la pluie et un minimum de 465 mm pour la pluie efficace s'intercalant entre l'amont et l'aval (maille XL93 = 404 km / YL93 = 1777). Ceci peut être mis en lien avec la position en fond de vallée de cette maille : située à une altitude relativement faible (492 m NGF pour son centroïde) et abritée en partie par les imposants reliefs situés à l'ouest, elle bénéficie d'une pluviométrie plus faible que les reliefs alentours. La grille AURELHY de Météo France qui est présentée dans le rapport Wuilleumier et al (2017) met en évidence l'existence de zones de « faible pluviométrie » en fond de vallée.

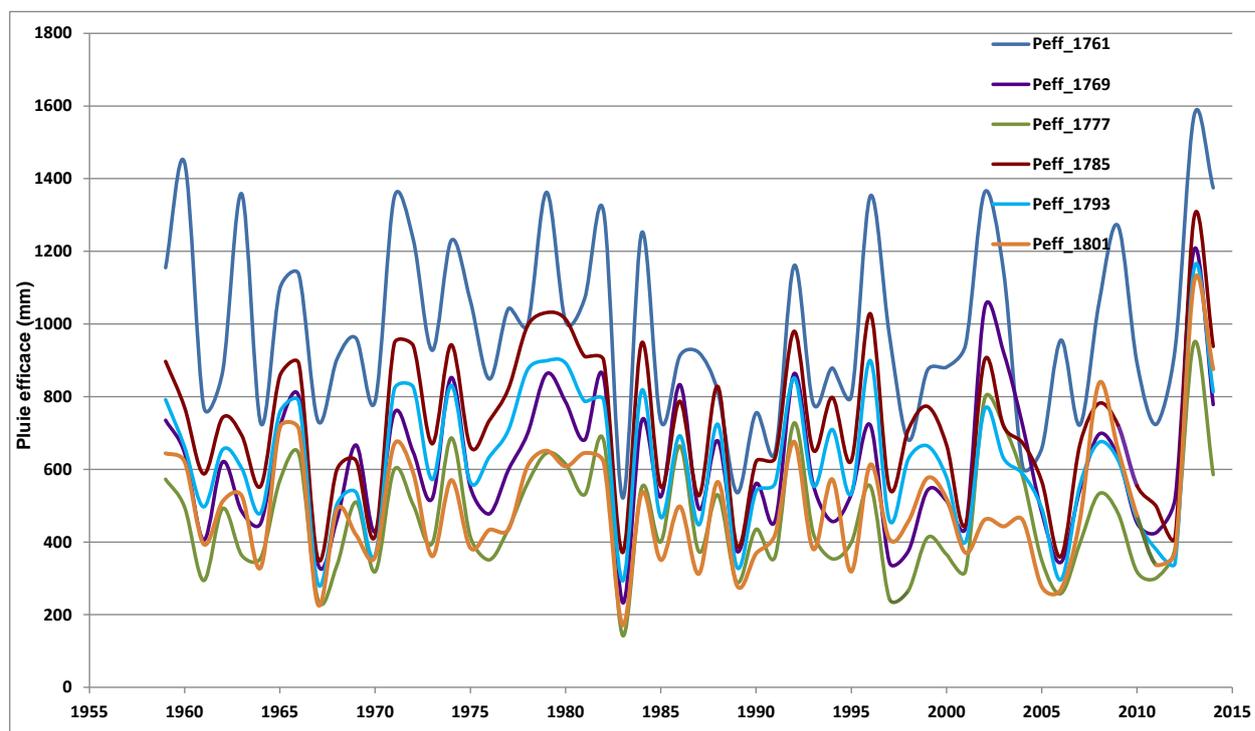
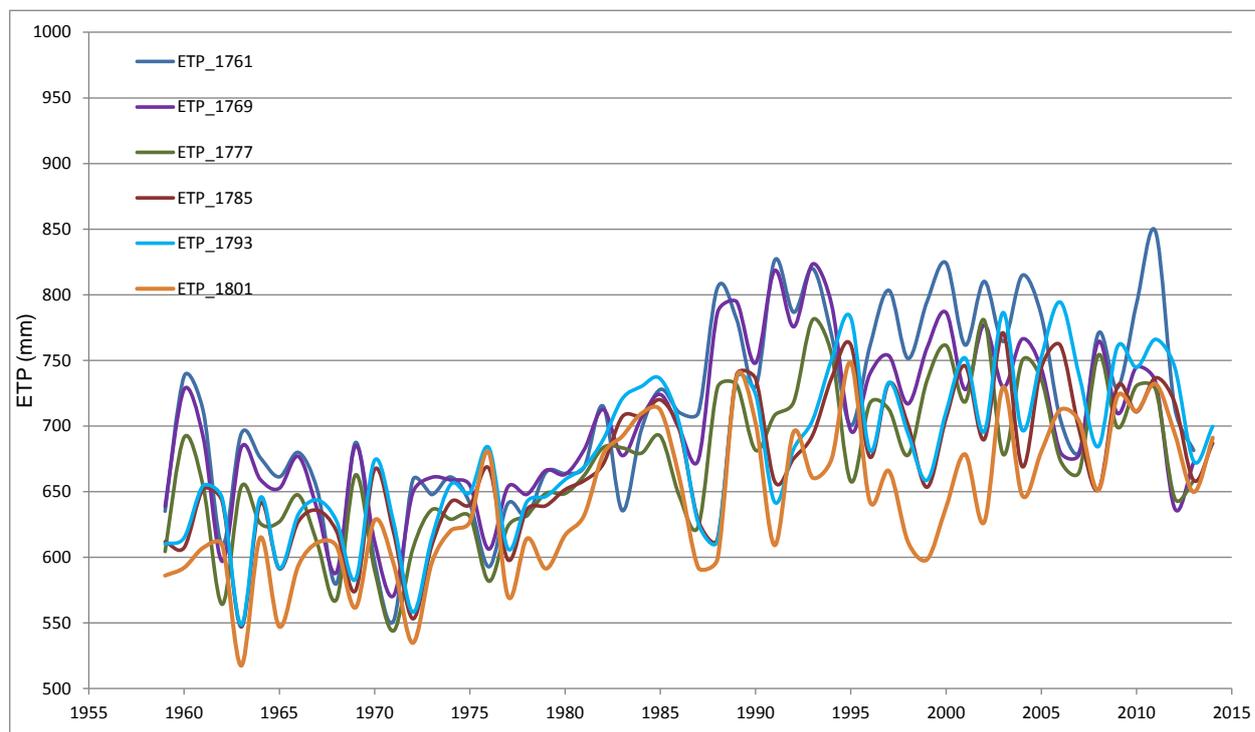


Figure 58 - Evolution de l'ETP et des pluies efficaces (moyennes interannuelles) de 1959 à 2014  
(6 mailles Safran le long du Gave de Pau)

## 5.2. MAILLES SAFRAN SITUÉES DANS LE BASSIN DU GAVE D'OLORON : TENDANCES ET RUPTURES SUR LES PLUIES EFFICACES

### 5.2.1. Un exemple de relations entre pluies efficaces et débits

Les figures 59 à 61 montrent la relation existante entre pluies efficaces et débits pour la maille Safran 1761 et la station hydrométrique Q7002910 (Le Gave d'Oloron à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-SNCF]).

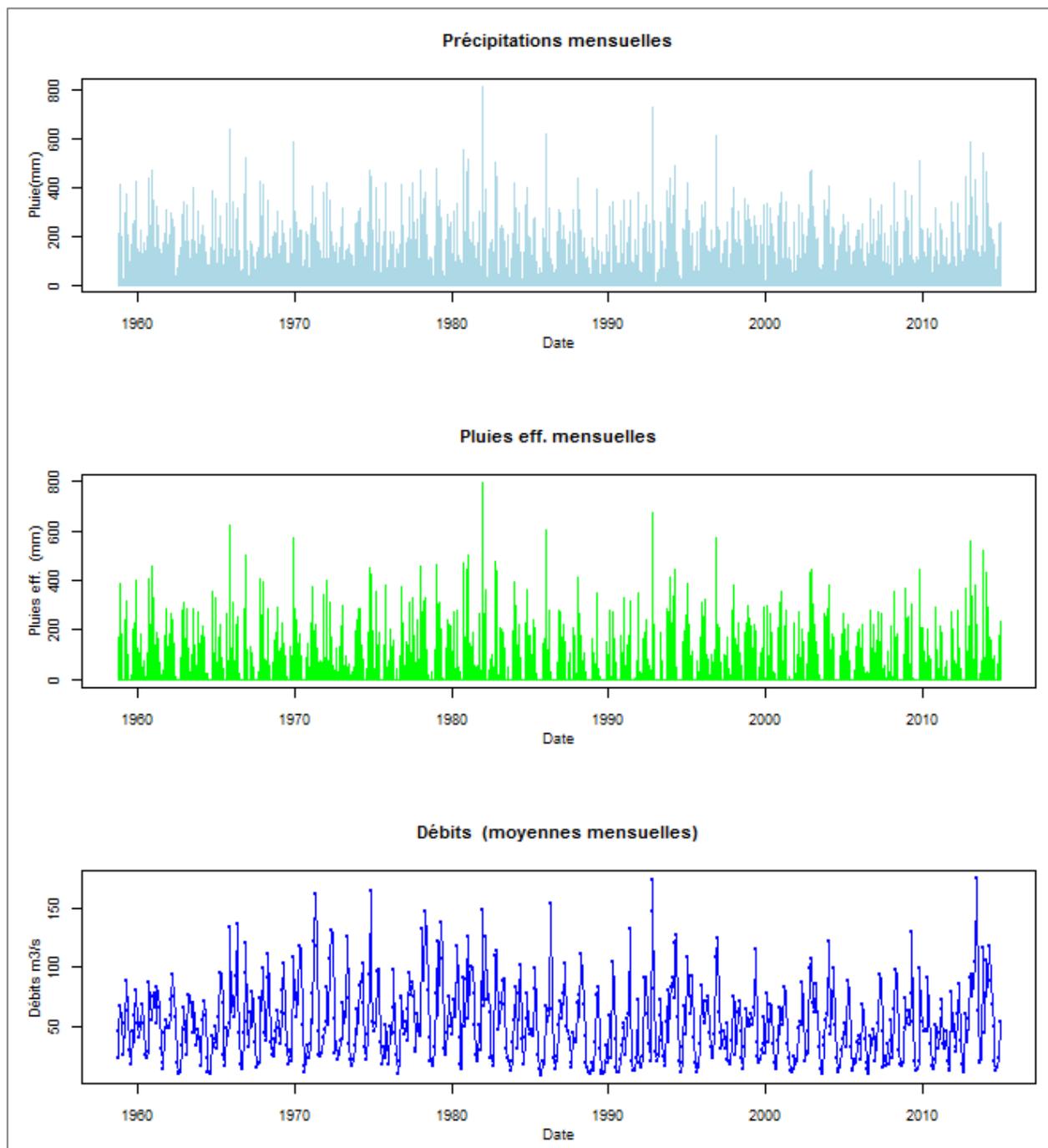


Figure 59 - Précipitations, pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) en moyennes mensuelles

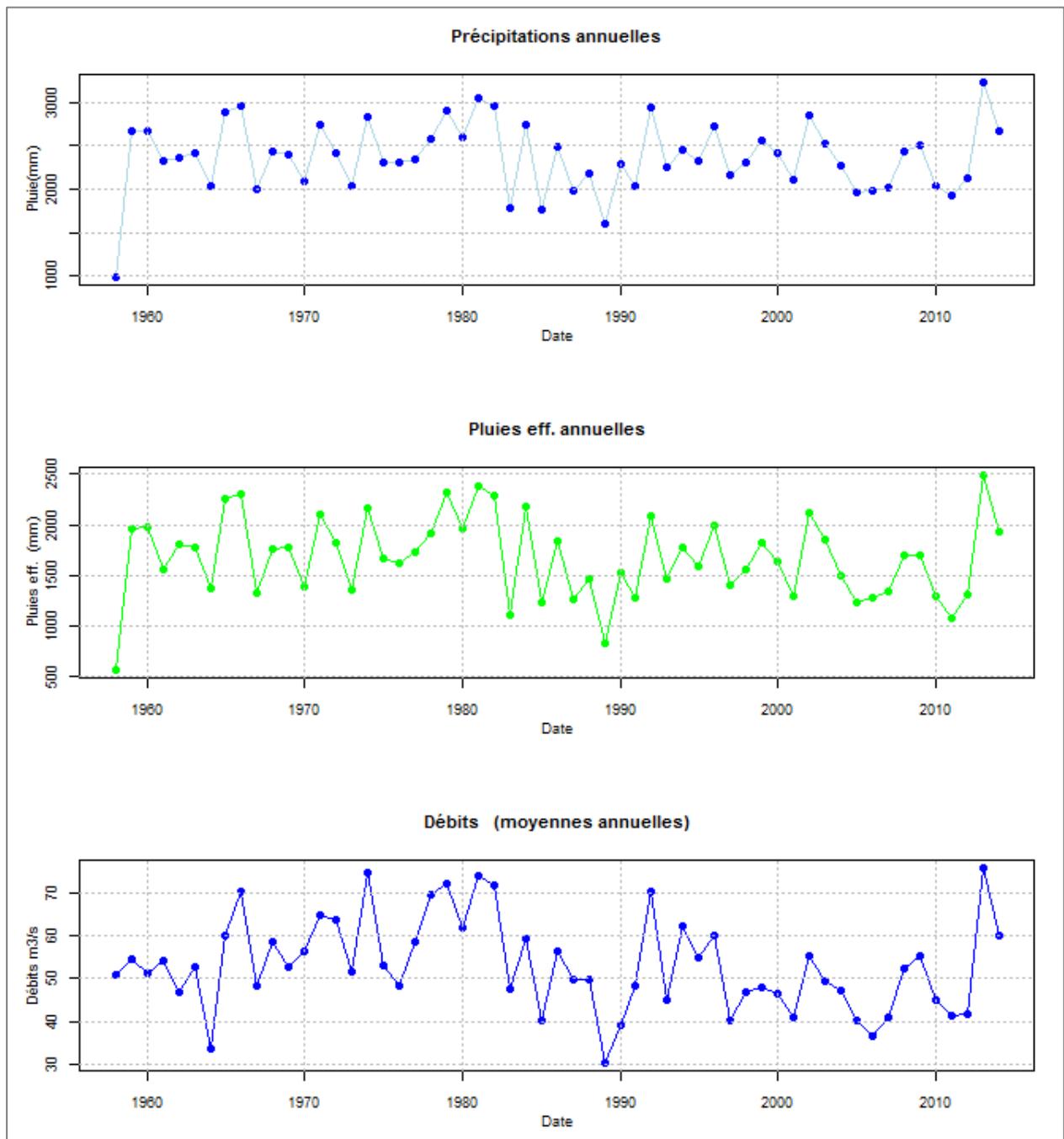


Figure 60 - Précipitations, pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) en moyennes annuelles

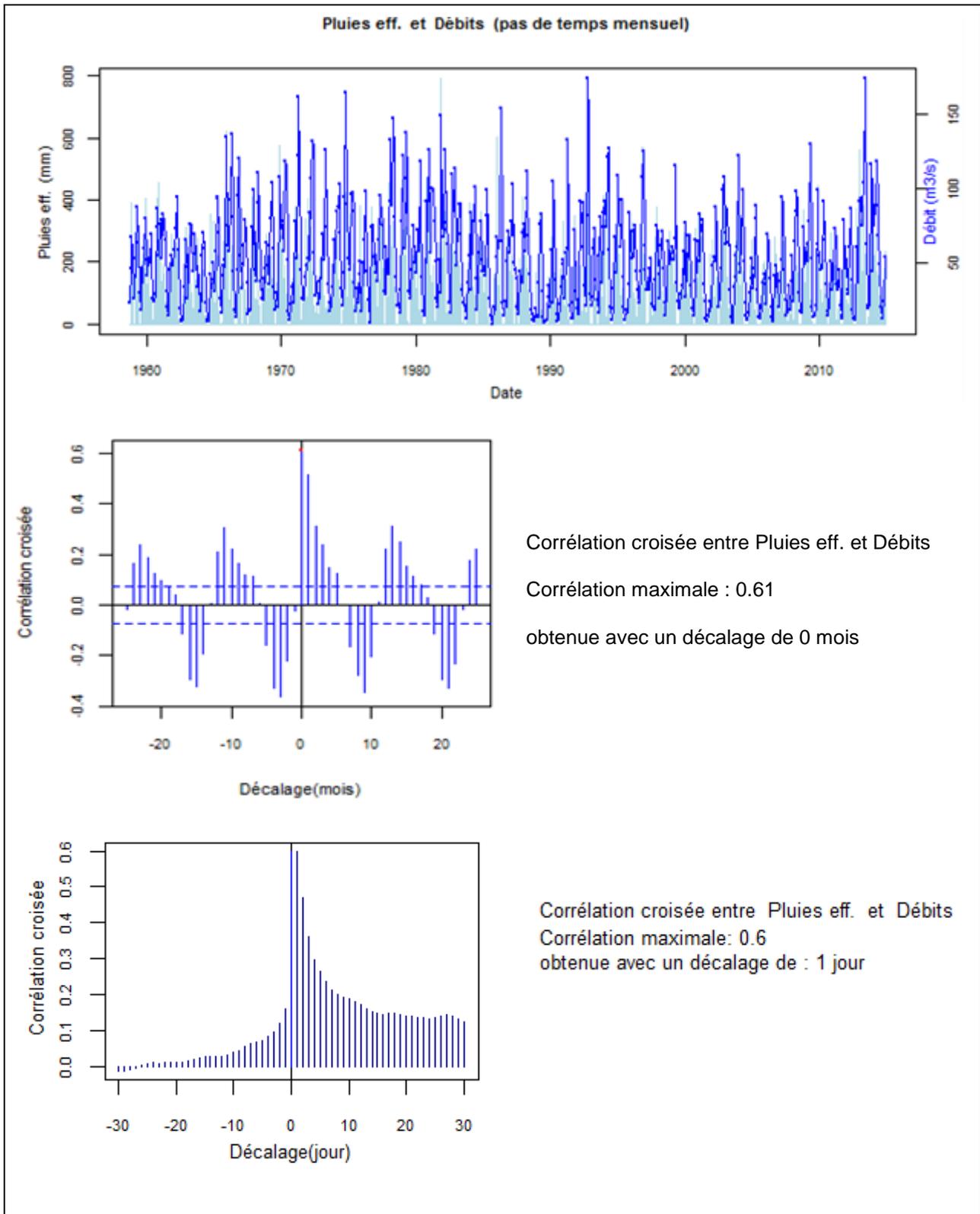


Figure 61 - Corrélation croisée entre pluies efficaces (maille 1761) et débits (station Q7002910) au pas de temps mensuel (haut) et journalier (bas)

### 5.2.2. Tendence et rupture : maille Safran 1761 et débits moyens annuels de la station hydrométrique Q7002910

La figure 62 montre l'existence d'une tendance à la baisse sur le long terme pour les pluies efficaces et les débits, en valeurs moyennes annuelles (les deux droites de tendance sont parallèles).

Les résultats du test de Mann-Kendall (tableau 27) montrent que la tendance est significative au seuil de risque de 5% pour les débits (p-value de 0.021) et pour les pluies efficaces (p-value de 0.026).

Le test de Pettitt indique une rupture significative à la date 1982 pour les pluies efficaces (p-value de 0.031) et à la date 1984 pour les débits ((p-value de 0.009).

Le test de Wilcoxon confirme très significativement la non-homogénéité des deux séries.

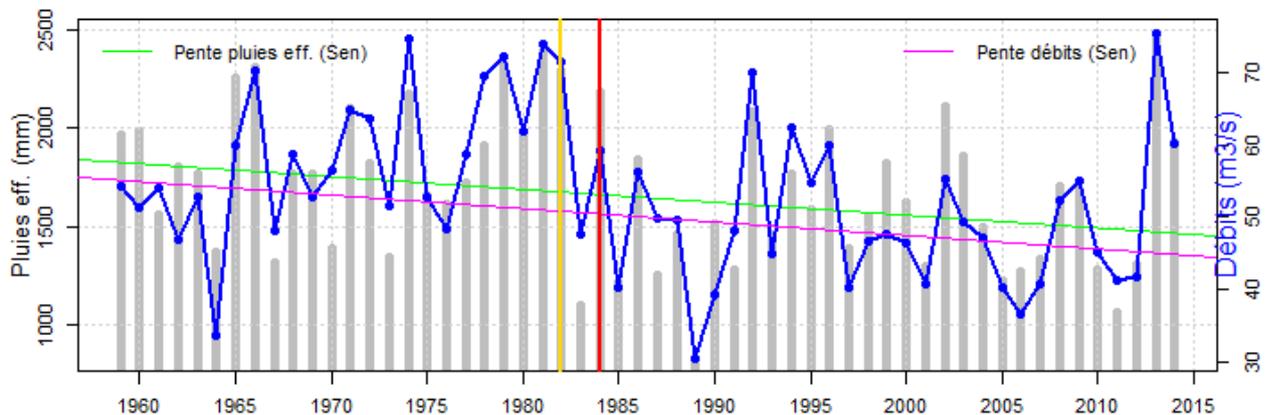


Figure 62 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles de la maille Safran 1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910

Le trait vertical jaune matérialise la date de rupture probable pour les pluies efficaces et le trait vertical rouge la date de rupture probable pour les débits.

Variable	Autocorrelation	Test	Valeur	Unité	pvalue
Pluies eff.	0.044	Mann_Kendall	-6.5054	mm/an	0.026
		Pettitt	1982		0.031
		Wilcoxon			0.01
Débits	0.274	Mann_Kendall	-0.1872	m3/s/an	0.021
		Pettitt	1984		0.009
		Wilcoxon			0.002

Tableau 28 - p-values des tests de Mann-Kendall et de Pettitt calculées sur les pluies efficaces annuelles de la maille Safran 1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910

Pour la pluie efficace annuelle, un test de comparaison de moyennes a été réalisé en subdivisant la série en deux périodes : 1959 à 1986 (28 valeurs, moyenne de 1818 mm) et

1987 à 2014 (28 valeurs, moyenne de 1561 mm). La différence de moyennes, 257 mm a été considérée comme significative au seuil de risque de 1% par le test de Student.

Si l'on ajoute à cette démarche les niveaux mesurés au piézomètre 10295X0032, suivi depuis le 06/03/2004, on obtient les graphiques de la figure 63, qui montrent sur la période 2005-2014 (les années incomplètes étant éliminées et les variables étant synchronisées en dates) :

- d'une part la similitude de comportement des pluies efficaces (calculées par la méthode de Thornthwaite), des débits et des niveaux ;
- d'autre part, comme déjà constaté, la tendance à la hausse sur les dernières années<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Les pluies efficaces sont en baisse sur l'ensemble de la période considérée initialement (1959-2014) mais en hausse, comme les débits et les niveaux piézométriques, si on ne s'intéresse qu'aux dernières années comme c'est le cas ici (2005-2014).



Figure 63 - Tendence à la hausse sur les années récentes pour les pluies efficaces (maille 1761), les débits (station Q7002910) et les niveaux (piézomètre 10295X0032)

### 5.2.3. Tendances et ruptures : autres mailles Safran le long du Gave d'Oloron

Les résultats obtenus pour les pluies efficaces annuelles sont résumés par le tableau 28 et présentés graphiquement par les figures 64 et 65.

Maille Safran	1801	1793	1785	1777	1769	1761 (rappel)
Autocorrélation ordre 1	-0.079	-0.086	0.034	0.032	0.036	0.044
Pente de la droite de Sen (mm/an)	-1.6	-1.5	-4.2	-4.3	-5.4	-6.5
p-value du test de Mann-Kendall	0.392	0.499	<b>0.067</b>	<b>0.074</b>	<b>0.03</b>	<b>0.026</b>
p-value du test de Pettitt	0.271	0.36	<b>0.056</b>	<b>0.059</b>	<b>0.043</b>	<b>0.031</b>
Date de rupture détectée	1982	1982	<b>1982</b>	<b>1982</b>	<b>1982</b>	<b>1982</b>
p-value du test de Wilcoxon	0.067	0.107	0.019	0.02	0.015	0.01

*Tableau 29 - Résultats des tests appliqués aux pluies efficaces des mailles Safran situées le long du Gave d'Oloron.*

Tendances et ruptures sur les pluies efficaces sont significatives (soit au seuil de risque de 5%, soit au seuil de 10 %) pour les 4 mailles situées le plus à l'amont du Gave d'Oloron : 1761, 1769, 1777 et 1785. La rupture, qu'elle soit significative ou non, est toujours détectée en 1982.

Les deux autres mailles, 1793 et 1801, situées le plus à l'aval, sont celles dont les données de pluies efficaces et d'ETP se distinguent de celles des mailles amont (cf. figure 57 au § 5.1.1).

Remarque : la corrélation croisée entre les pluies efficaces des 6 mailles et les débits de la station Q7002910 est toujours comprise entre 0.5 et 0.6 avec un décalage de 1 jour.

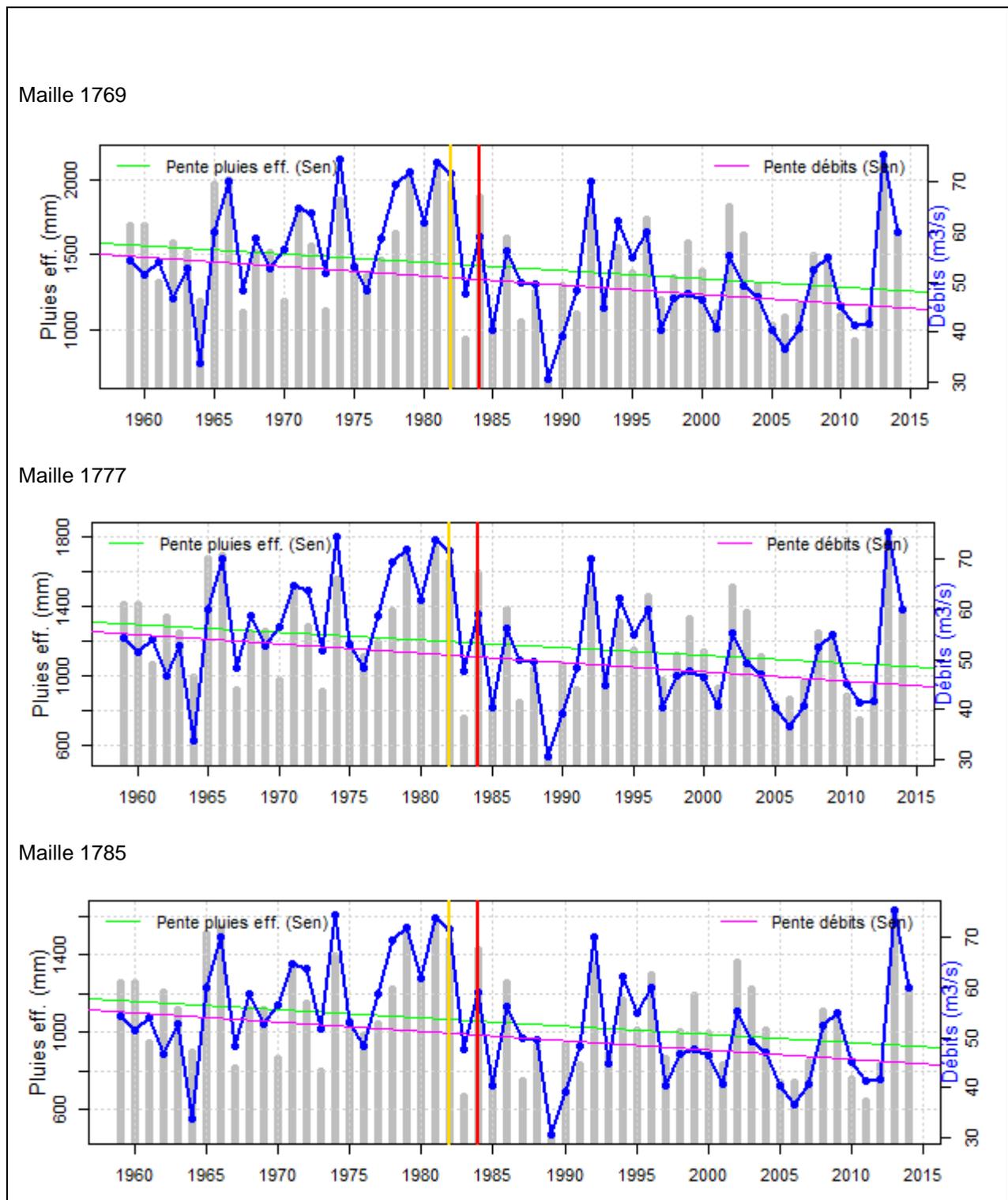


Figure 64 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 1769,1777,1785 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910  
Le trait vertical jaune matérialise la date de rupture probable pour les pluies efficaces et le trait vertical rouge la date de rupture probable pour les débits.

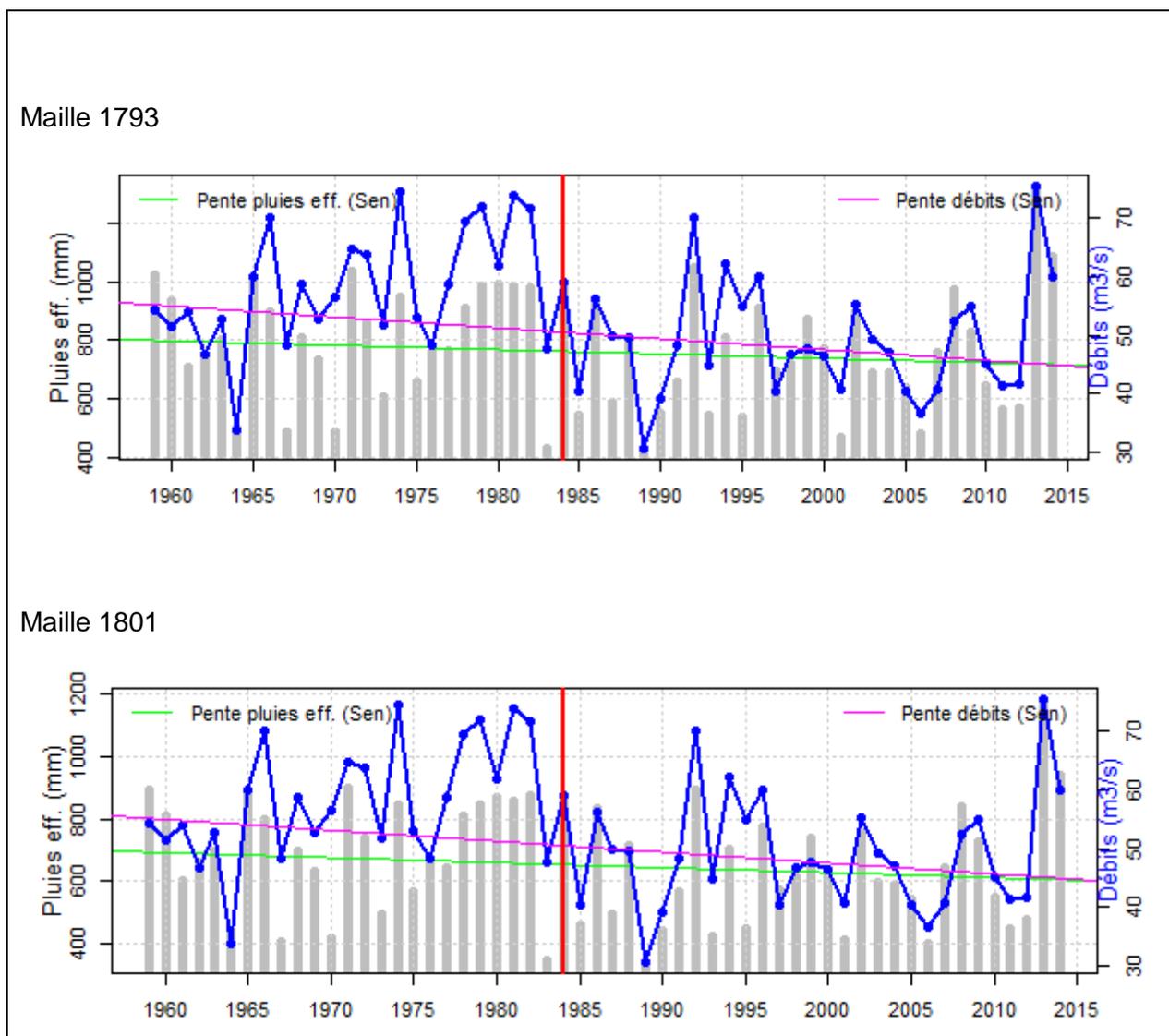


Figure 65 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 1793, 1801 et sur les débits moyens annuels de la station Q7002910  
Le trait vertical rouge matérialise la date de rupture probable pour les débits. Ici, le trait vertical jaune pour les pluies efficaces n'est pas reporté, la rupture détectée en 1982 n'étant pas considérée comme significative. Par contre, la droite de Sen est reportée pour les pluies efficaces même si elle n'est pas significative.

### 5.3. MAILLES SAFRAN SITUÉES DANS LE BASSIN DU GAVE DE PAU : TENDANCES ET RUPTURES SUR LES PLUIES EFFICACES

La station hydrométrique Q4801010 (Le Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre [Pont de Rieulhes]) a été choisie car c'est la seule parmi les stations retenues dont les données peuvent être mises en relation avec les pluies efficaces sur toute la période 1958-2014 (elle est située dans la maille de coordonnées kilométriques XL93 = 404, YL93 = 1793). La chronique de données de la station Q4124010, située à l'amont, est interrompue en 1995.

Les résultats obtenus sont résumés par le tableau 29 et présentés graphiquement par les figures 66 et 67.

Maille Safran	404-1801	404-1793	404-1785	404-1777	404-1769	404-1761
Autocorrélation ordre 1	0.087	0.003	-0.001	0.025	0.038	0.003
Pente de la droite de Sen (mm/an)	-0.36	-1.4	-1.2	-0.17	+0.16	-1.4
p-value du test de Mann-Kendall	0.914	0.523	0.586	0.919	0.896	0.632
p-value du test de Pettitt	0.826	0.471	0.513	0.999	0.999	0.297
Date de rupture détectée	1982	1982	1982	1986	1970	1982
p-value du test de Wilcoxon	0.720	0.272	0.272	0.408	0.488	0.166

*Tableau 30 - Résultats des tests appliqués aux pluies efficaces des mailles Safran situées le long du Gave de Pau*

Contrairement aux mailles situées le long du Gave d'Oléron, pour toutes les mailles le long du Gave de Pau, le test de Mann-Kendall ne permet pas de conclure à l'existence d'une tendance significative pour les pluies efficaces calculées (p-values comprises entre 0.523 et 0.919).

Il en est de même avec le test de Pettitt : les ruptures détectées (en 1982, à l'exception de la maille 1769) ne sont pas considérées comme significatives (p-values comprises entre 0.471 et 0.999).

**Remarque :** Pour les débits de la station Q4801010, la tendance à la baisse est significative au seuil de risque de 10 % (p-value de 0.054).

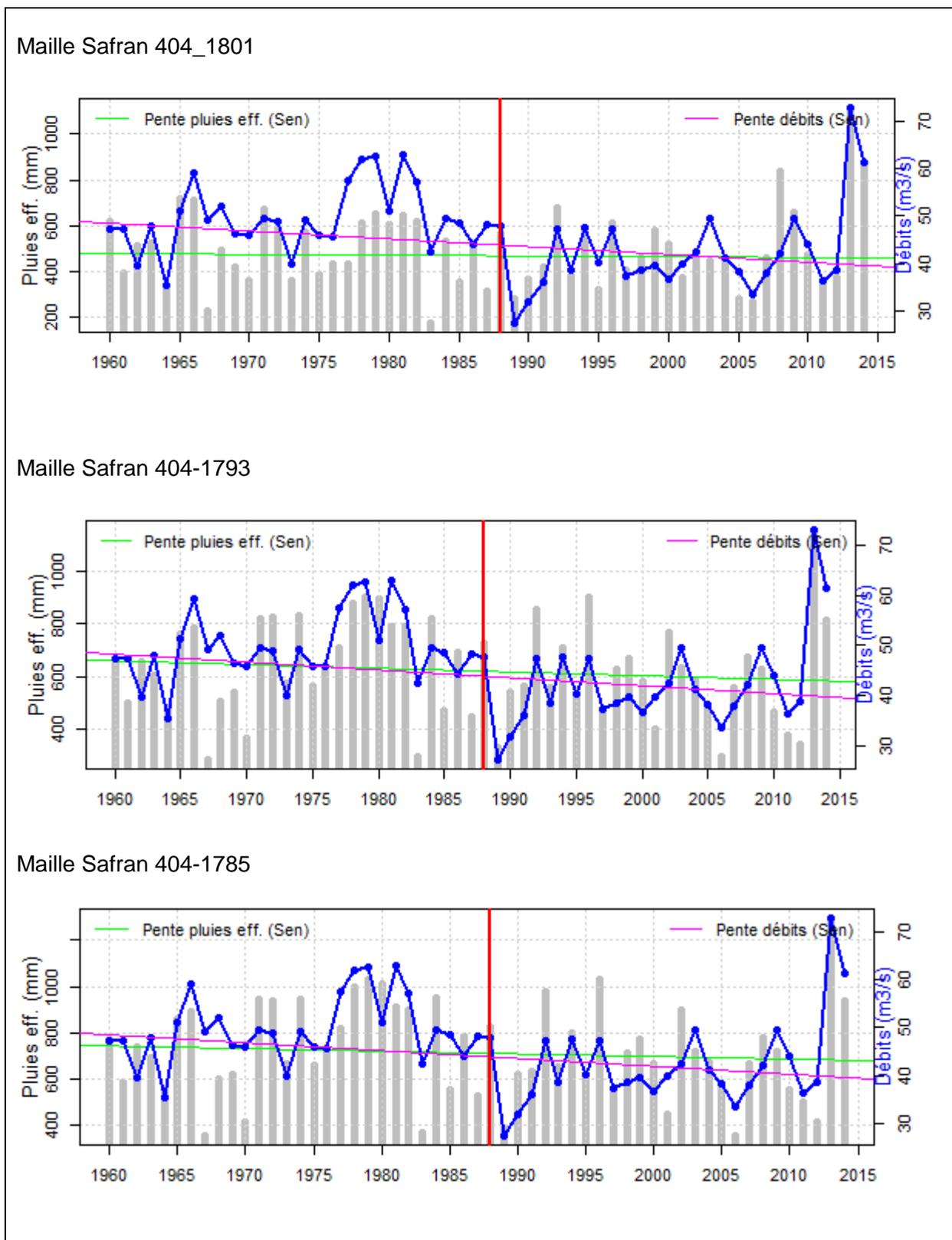
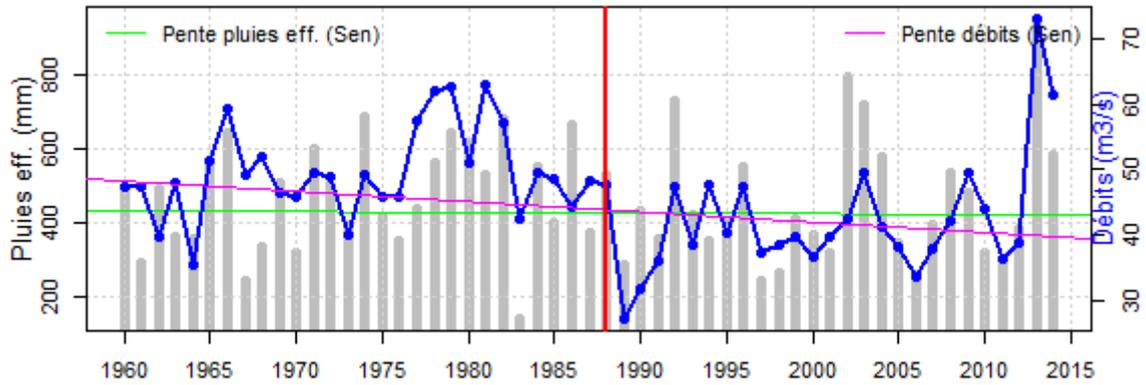
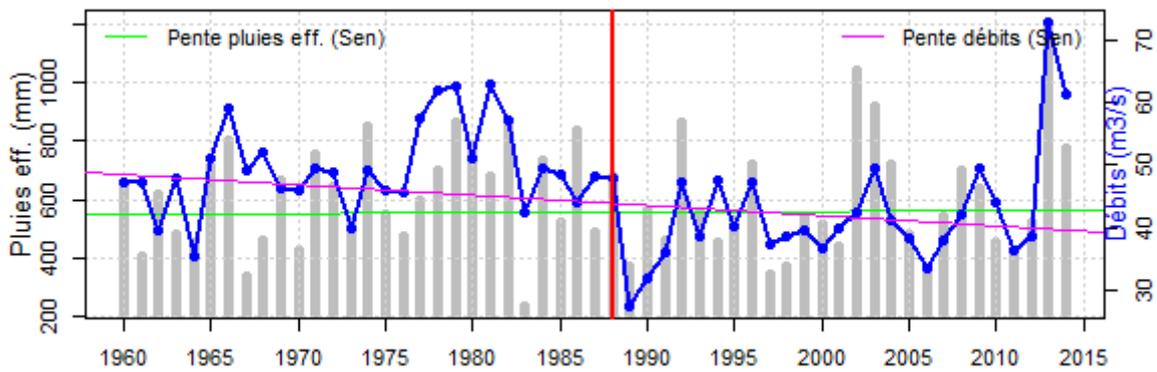


Figure 66 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 404-1801, 404-1793,404-1785 et sur les débits moyens annuels de la station Q4801010

Maille 404-1777



Maille 404-1769



Maille 404-1761

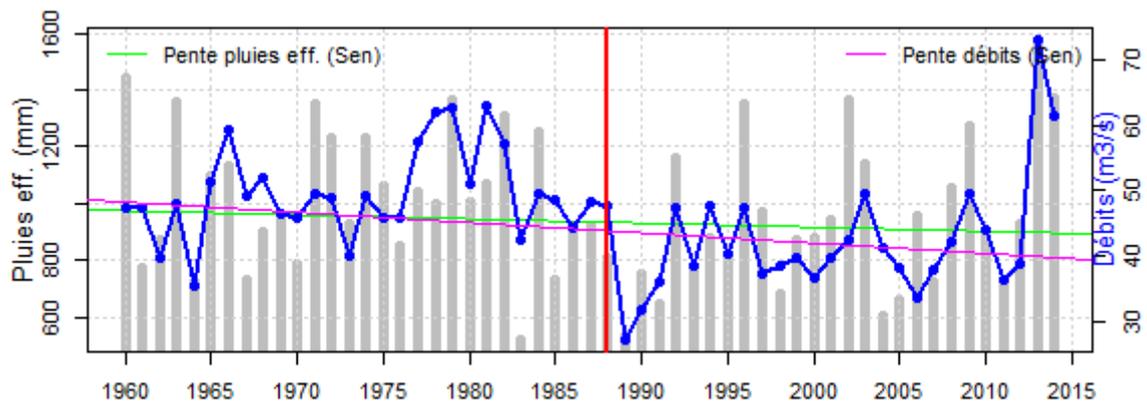


Figure 67 - Droite de Sen calculée sur les pluies efficaces annuelles des mailles Safran 404-1777, 404-1769, 404-1761 et sur les débits moyens annuels de la station Q4801010



## 6. Conclusion

Une recherche d'évolutions des séries temporelles du cycle de l'eau dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron a été conduite à l'aide de l'outil ESTH'R. Celle-ci a porté sur des chroniques de pluie, d'ETP, de pluie efficace, de débit et de niveau piézométrique, ces dernières portant cependant sur des durées bien inférieures aux autres (2000-2015). Les données utilisées sont issues ou générées à partir de SAFRAN (MétéoFrance pour la pluie, l'ETP, les pluies efficaces), de la banque HYDRO (débit) et de la banque de données ADES (piézométrie).

**Sur le long terme**, il existe une tendance à la baisse pour les pluies efficaces : elle est significative sur la partie amont du Gave d'Oloron mais non significative sur celle du Gave de Pau. Cette tendance à la baisse observée sur les pluies efficaces est due essentiellement à une tendance à la hausse de l'ETP, à partir du milieu des années 1980.

Concernant les débits, l'analyse effectuée montre l'existence d'une tendance à la baisse systématique du débit moyen annuel des 8 stations hydrométriques des gaves présentant une chronique complète ou quasi-complète sur la période 1967-2011, tandis que 75% des mêmes stations présentent une tendance à la baisse pour le QMNA. L'application de la pente de Sen sur les 45 années permet d'estimer une baisse du débit annuel moyen sur la période, qui peut représenter jusqu'à plus de la moitié du module de certaines des stations concernées. Il est important de noter que des stations ne présentant pas de tendance à la baisse (au sens statistique) sur une période plus étendue (Q7412910, Q5501010) en présentent systématiquement une sur la période 1967-2011. Ceci est à mettre en lien avec la variabilité des débits observée durant la première moitié du 20<sup>ème</sup> siècle (Boe et Habets, 2014).

Si l'on considère la totalité de la période de mesure (certaines chroniques débutent au début du 20<sup>ème</sup> siècle), 8 stations sur 12 sont caractérisées par une baisse significative à très significative des débits pour l'une ou l'autre des variables considérées (moyennes annuelles, médianes annuelles QMNA, valeurs journalières minimales et maximales), dont 7 pour le QMNA et/ou la valeur moyenne du débit. Le nombre de stations affichant une baisse est plus faible pour les valeurs minimales (5) et le QMNA (5).

Quant aux niveaux, le faible nombre d'années de mesures ne permet pas de dégager des tendances sur le long terme corrélables à celles observées sur les pluies efficaces et les débits.

**Sur les dernières années** (2000-2015) on note une remontée des niveaux et une augmentation des débits, en raison de pluies efficaces plus importantes. Il est intéressant de noter que les tendances à la hausse observées sur la piézométrie sont cohérentes avec des observations similaires qui peuvent être faites sur les débits au cours de la même période. Par contre, comme mentionné plus haut, les débits présentent en règle générale une tendance à la baisse sur une période de temps plus étendue.

Par ailleurs, l'analyse du décalage temporel annuel du pic de débit par rapport au début de l'année hydrologique sur la station de la Neste de Cap de Long montre l'existence d'une survenue du pic devenant plus tardive au cours de la période 1958-1973. Cette tendance s'inverse sur la deuxième partie de la chronique (1975-2011), le pic de débit survenant plus tôt dans la saison. On observe que cette légère modification du comportement hydrologique s'accompagne sur l'ensemble de la période d'une baisse importante du débit maximal annuel.



## 7. Bibliographie

### Articles

**Boe J. et Habets F.** (2014) - Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 691–708.

**Gustard A., Bullock A., Dixon J. M.** (1992) - Low flow estimation in the United Kingdom. Wallingford, Institute of Hydrology, 88pp. (IH Report No.108).

**Gustard A. & Demuth S.** (Eds), (2009) - Manual on Low-flow Estimation and Prediction. Operational Hydrology. Report No. 50, WMO-No. 1029.

**Hamed K.H.** (2009) - Enhancing the effectiveness of prewhitening in trend analysis of hydrologic data. *J. Hydrol.*, 368 (1), 143-155.

**Hamed K.H.** (2008) - Trend detection in hydrologic data. The Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis. *J. Hydrol.*. 349 (3), 350-363.

**Hamed K.H., Rao A.R.** (1998) - A modified Mann–Kendall trend test for autocorrelated data. *J. Hydrol.*, 204, 219–246.

**Kundzewicz Z. W. & Robson A.** (eds), (2000) - Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. World Climate Programme - Water, World Climate Programme Data and Monitoring, WCDMP-45, WMO/TD no. 1013. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.

**IPCC 2013, Climate Change** (2013) - The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

**Pettitt N.** (1979) – A non parametric approach to the change point problem.

*App. Statist.*,28,n°2.

**Sen P.K.** (1968) - Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau.

*J. Am. Stat. Assoc.* 63, 1379–1389.

**World Meteorological Organization** (2008) - Manual on low flow estimation and prediction. Operational Hydrology Report n° 50.

## Rapports

**Association Moraine** (2011) – Les glaciers des Pyrénées françaises – Rapport d'étude 2010-11.

**Corbier P., Wulleumier A.** (2010) - Gestion des eaux souterraines en région Aquitaine. Gestion intégrée des nappes alluviales. Etude des nappes alluviales de la Garonne, de la Dordogne, du Gave de Pau et du Dropt. Module 5 - Année1. Rapport BRGM/RP-57811-FR.

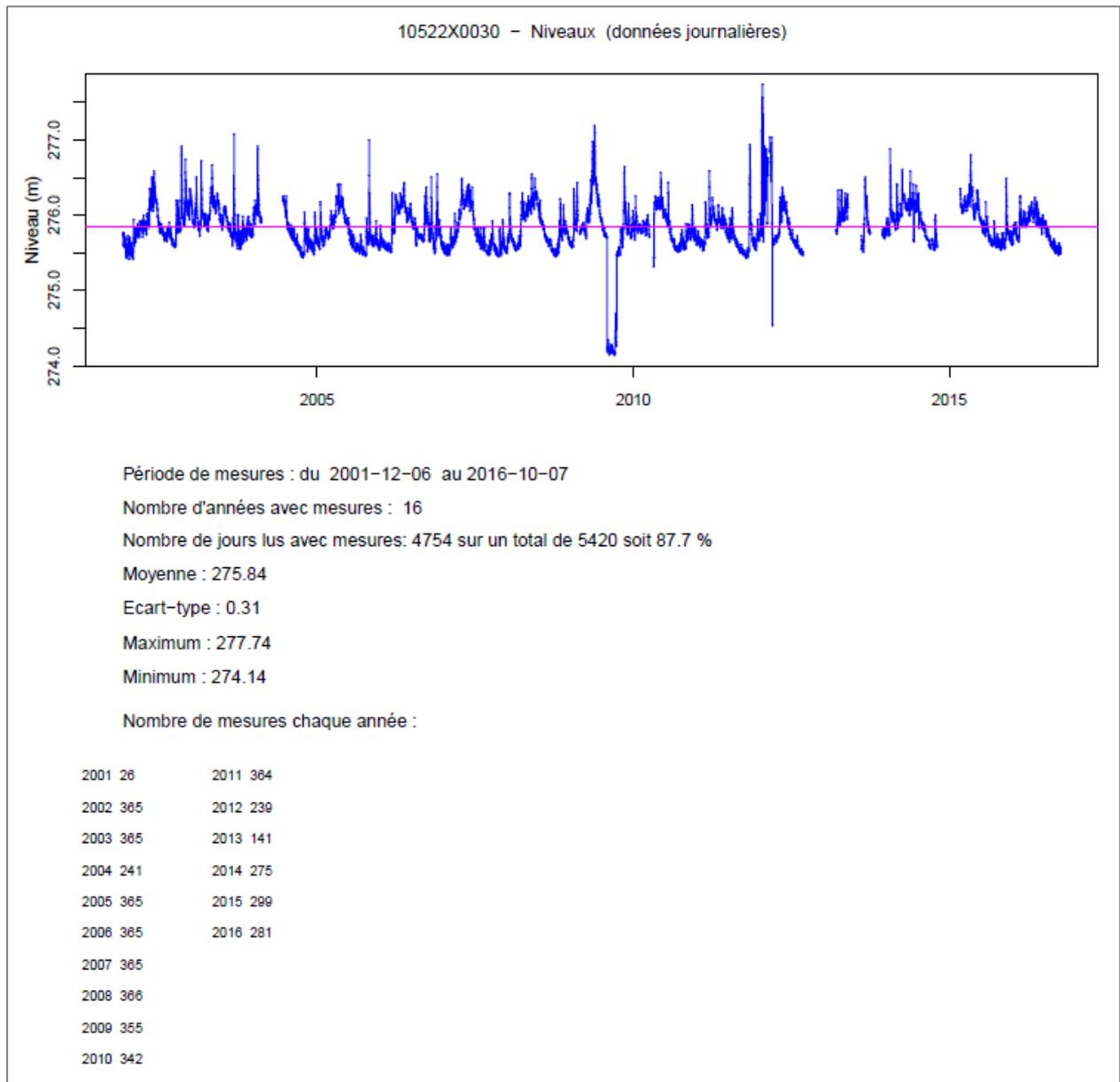
**Giuntoli I., Renard B.** (2010) - Identification des impacts hydrologiques du changement climatique. Constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étiages. Rapport IRSTEA.

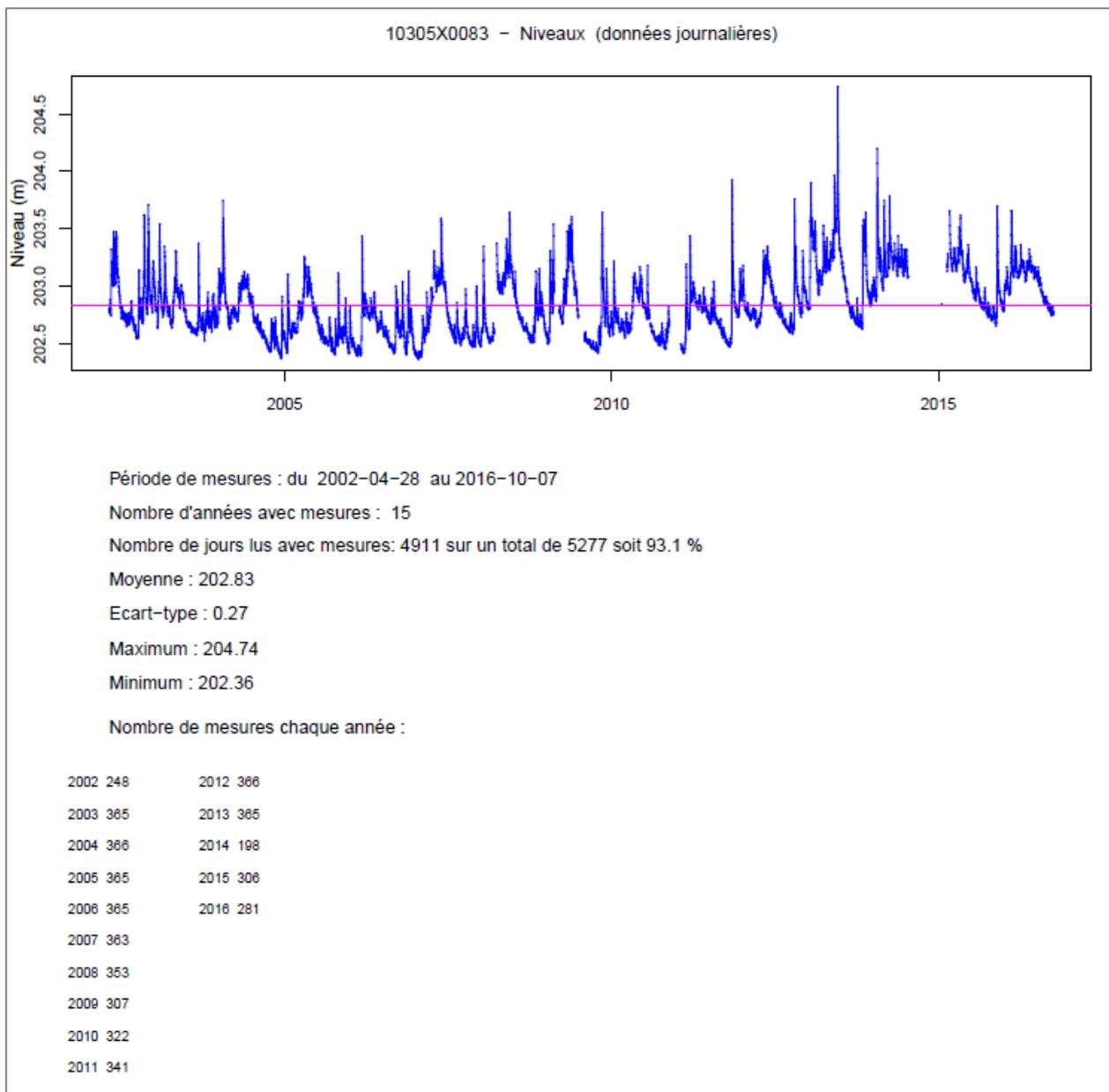
**Wulleumier A., Graveline N., Rinaudo J-D., avec la collaboration de Caperan F., Hoareau A., Thicoipe P.** (2017) – Hydrogéologie, usage de l'eau et changement climatique dans les bassins versants des gaves de Pau et d'Oloron. Rapport final. BRGM/RP-66803-FR.

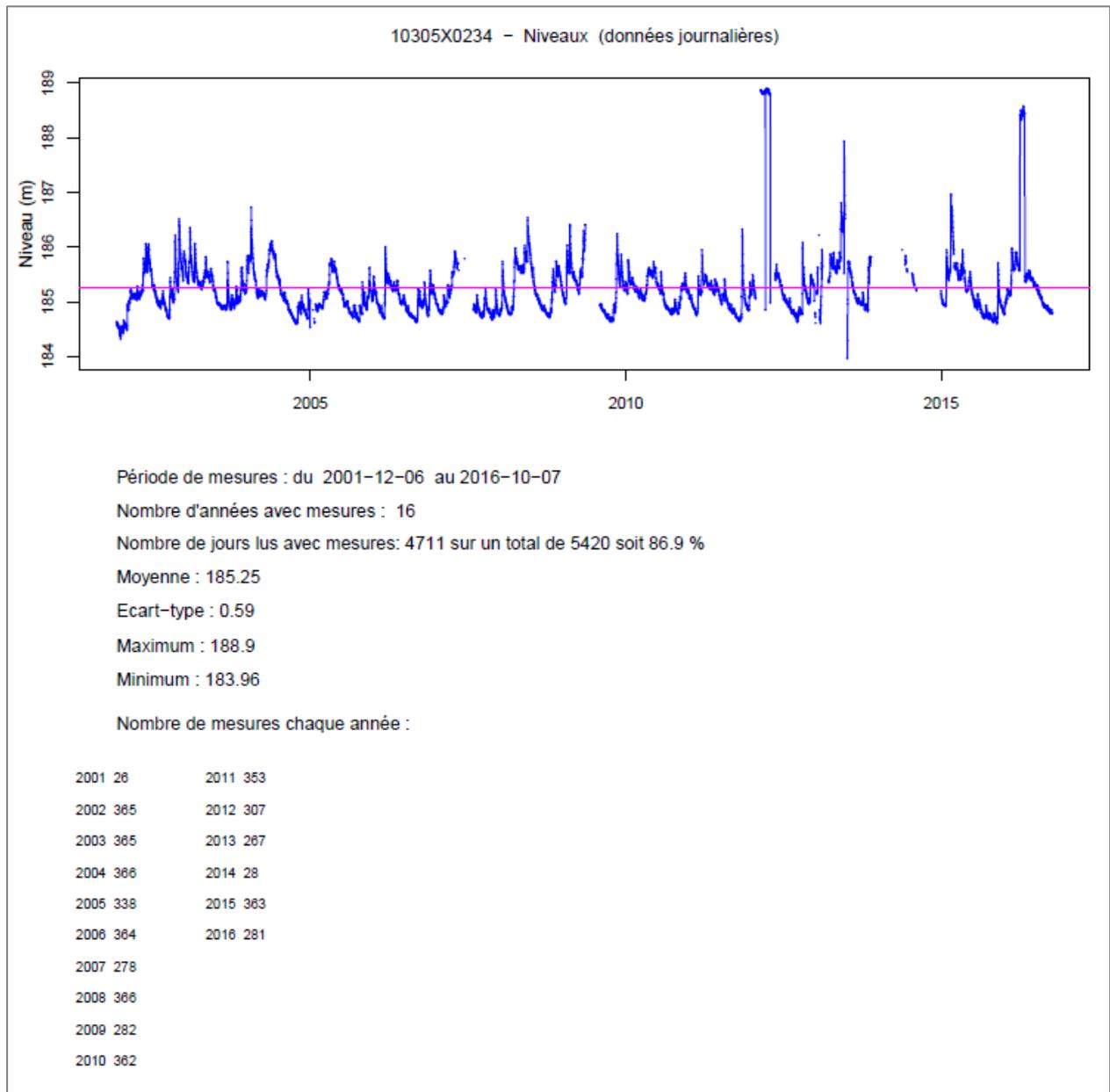
## **Annexe 1**

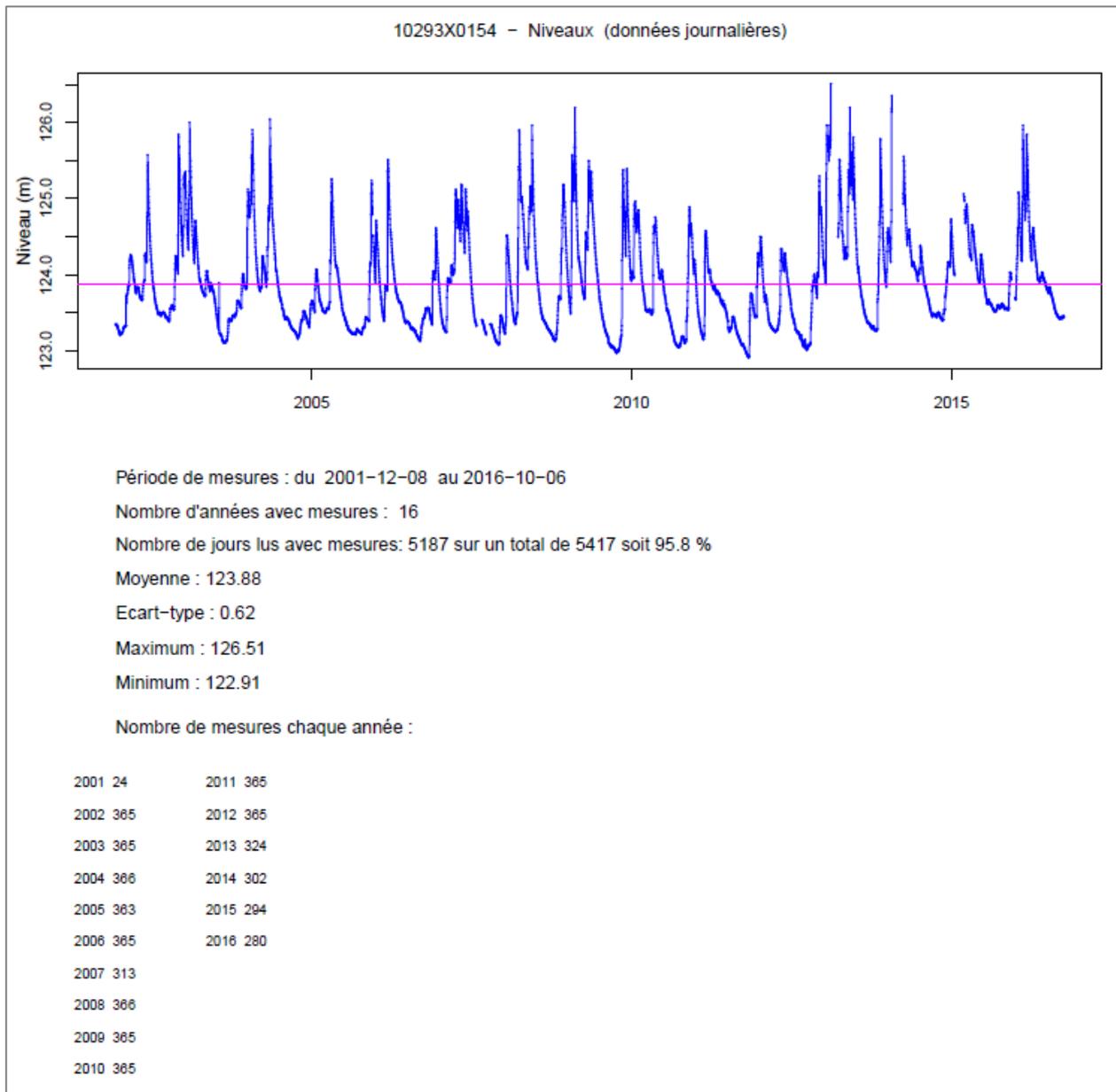
### **Evolution des niveaux journaliers mesurés sur les 6 piézomètres régulièrement suivis**

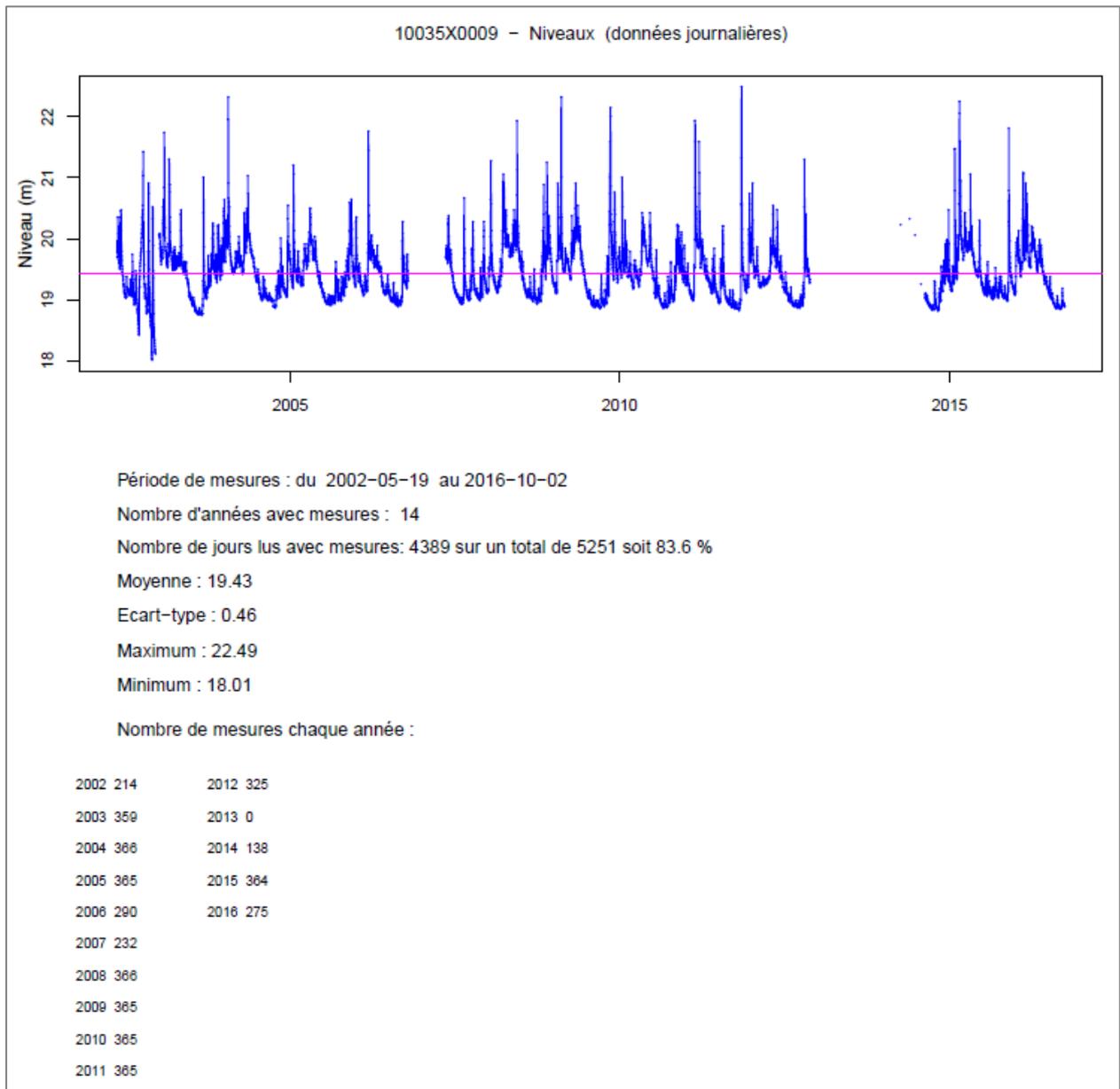


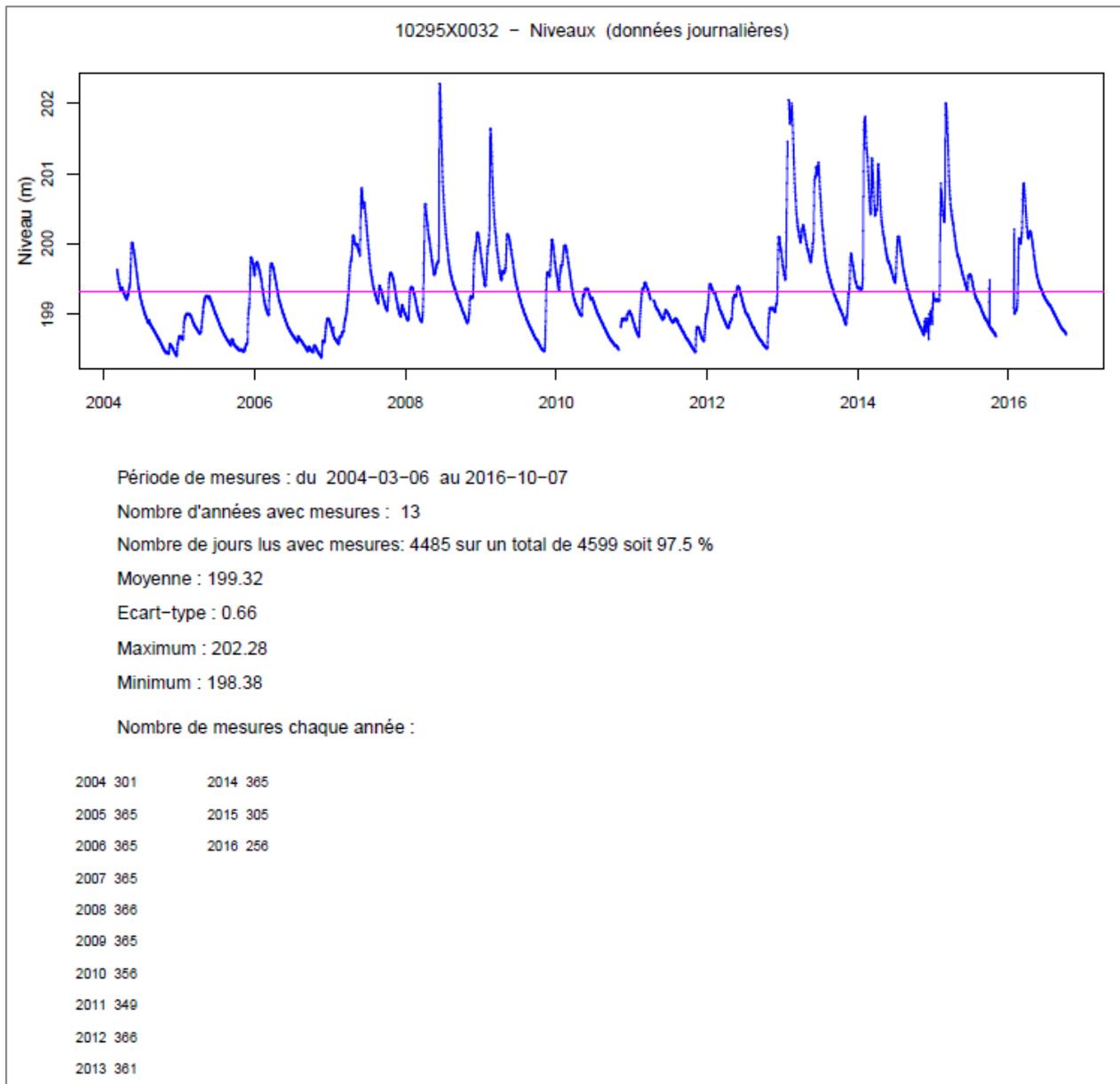








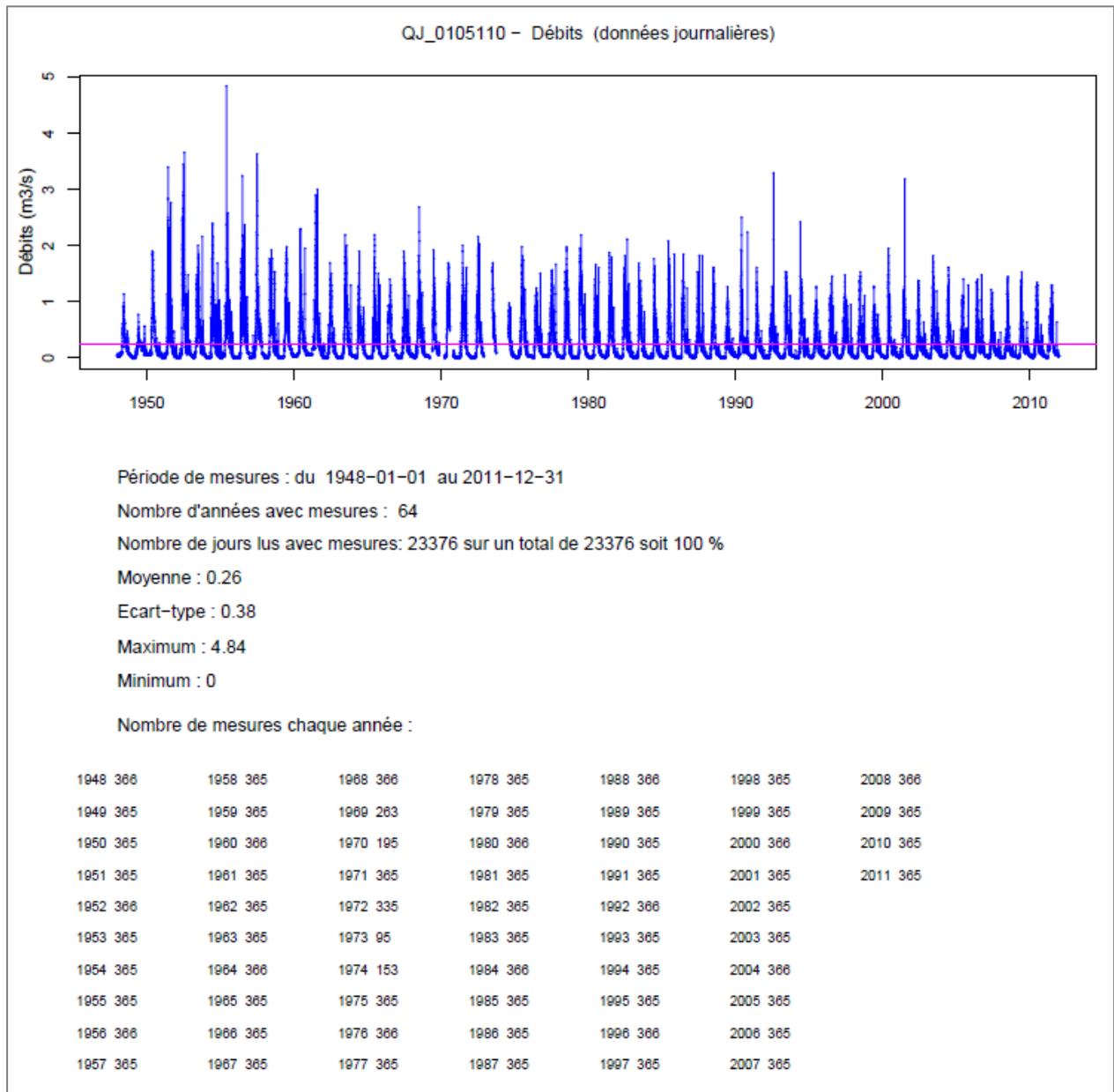




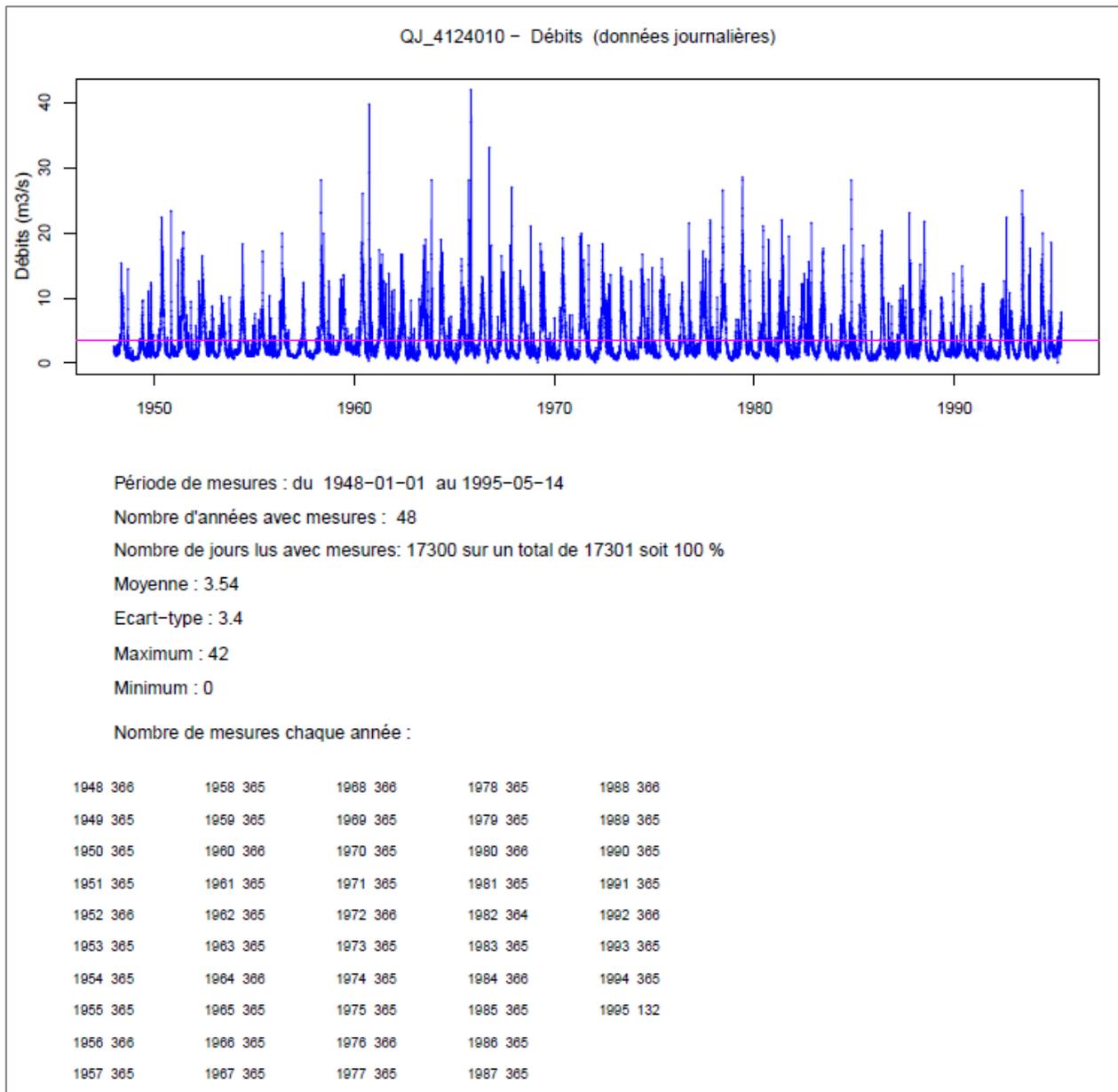
## **Annexe 2**

# **Evolution des débits journaliers mesurés aux 12 stations hydrométriques retenues**

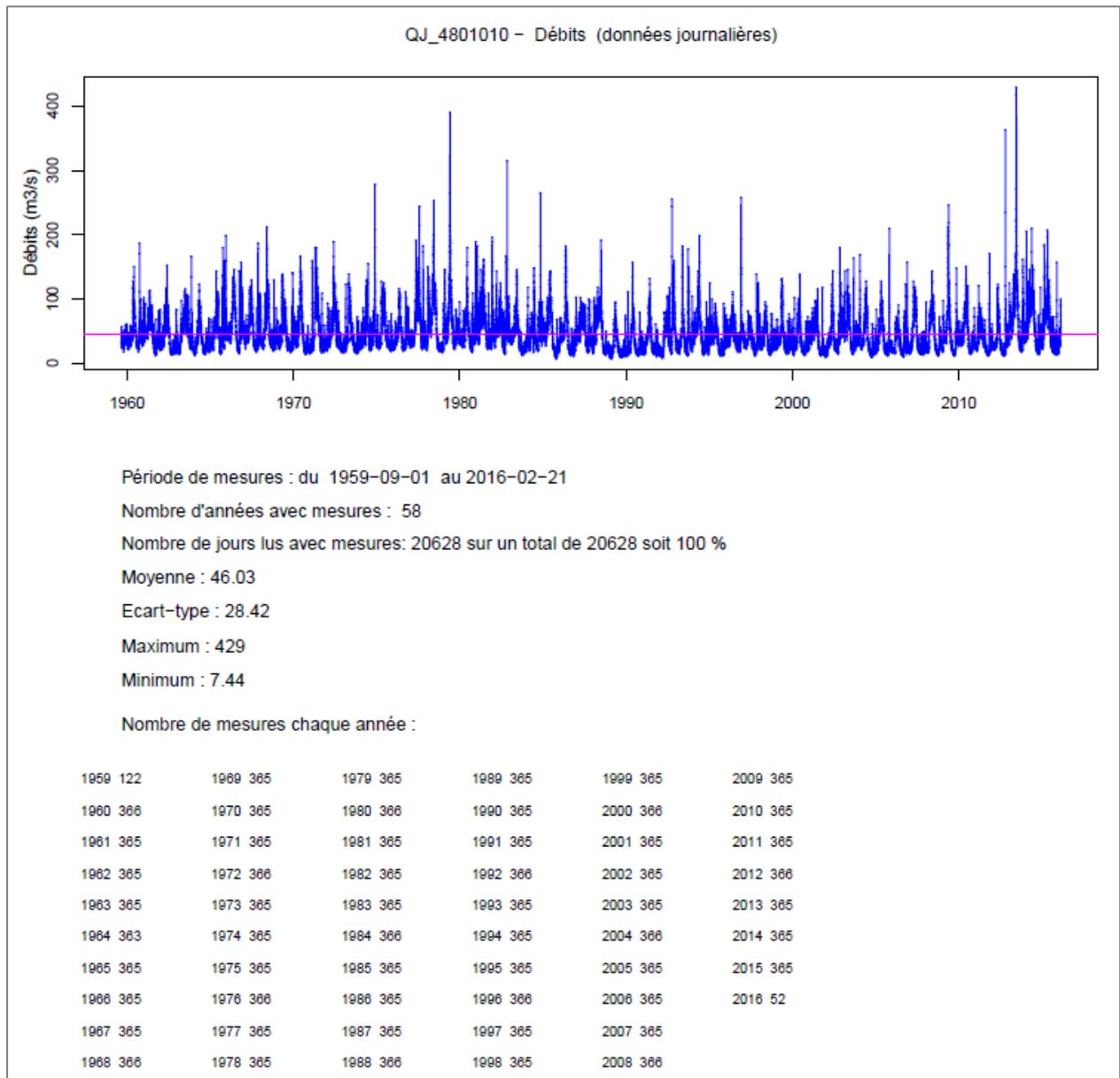




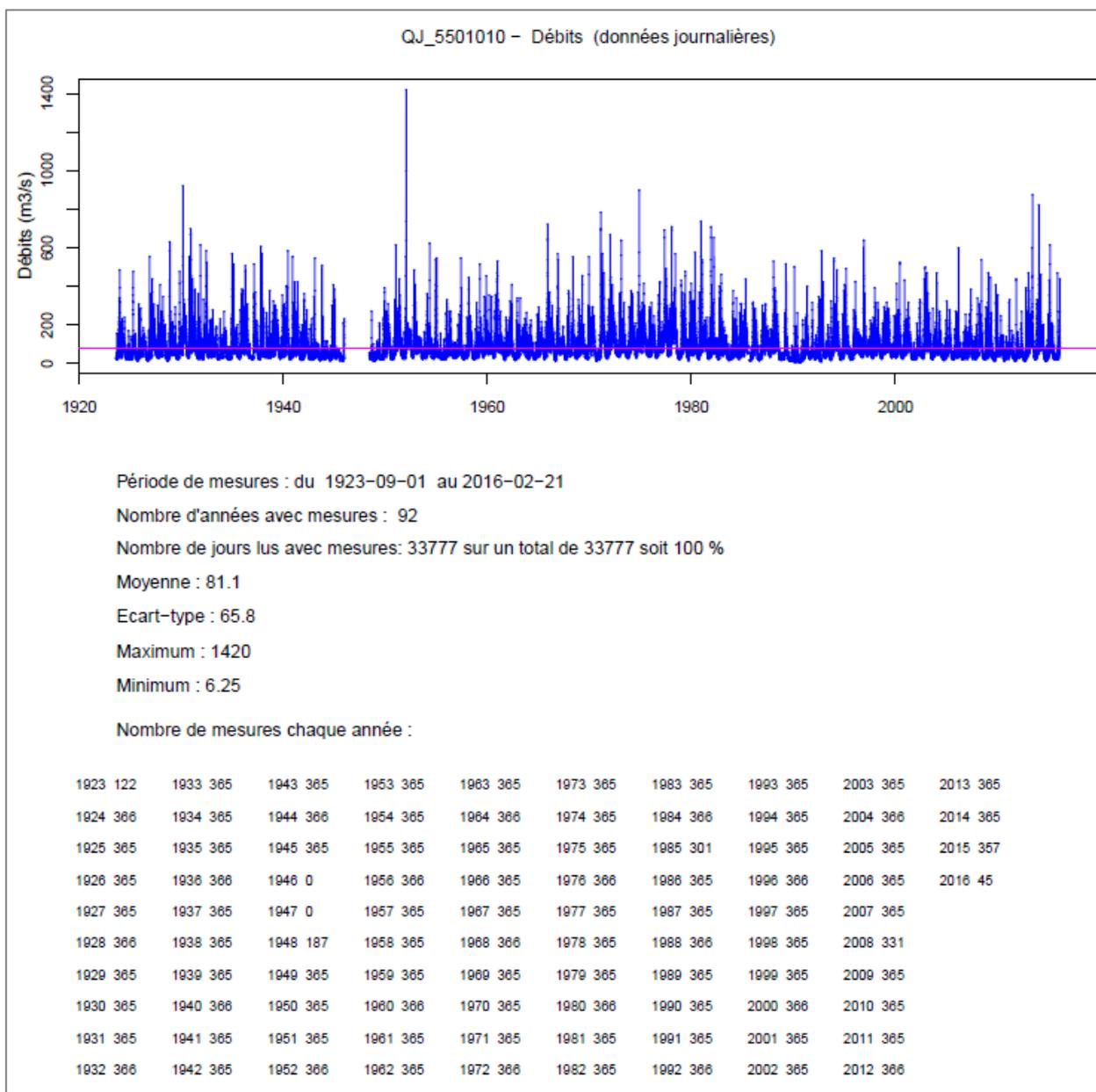
La Neste de Cap de Long à Aragnouet [Les Edelweiss]



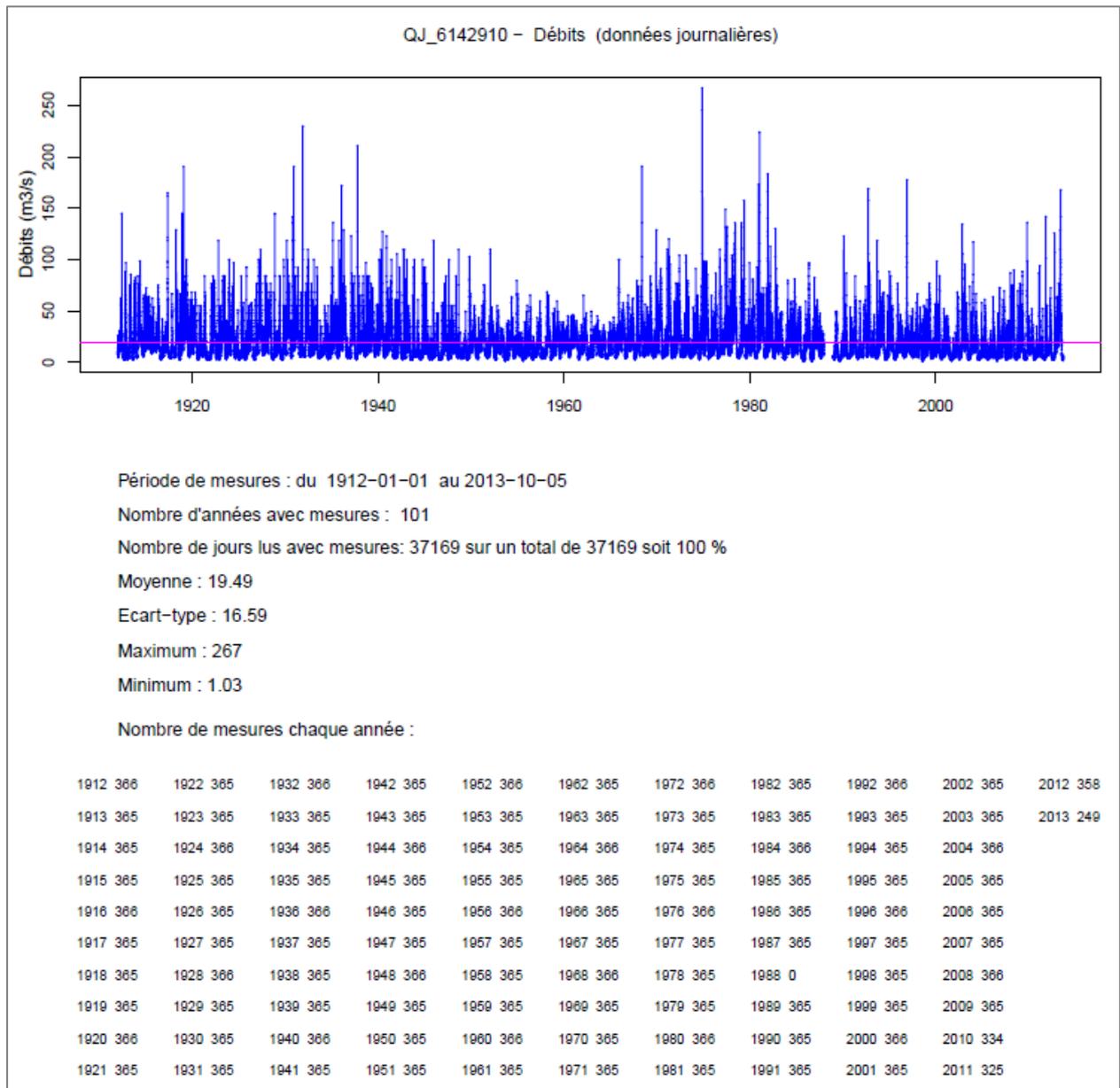
Le Gave d'Héas à Gèdre



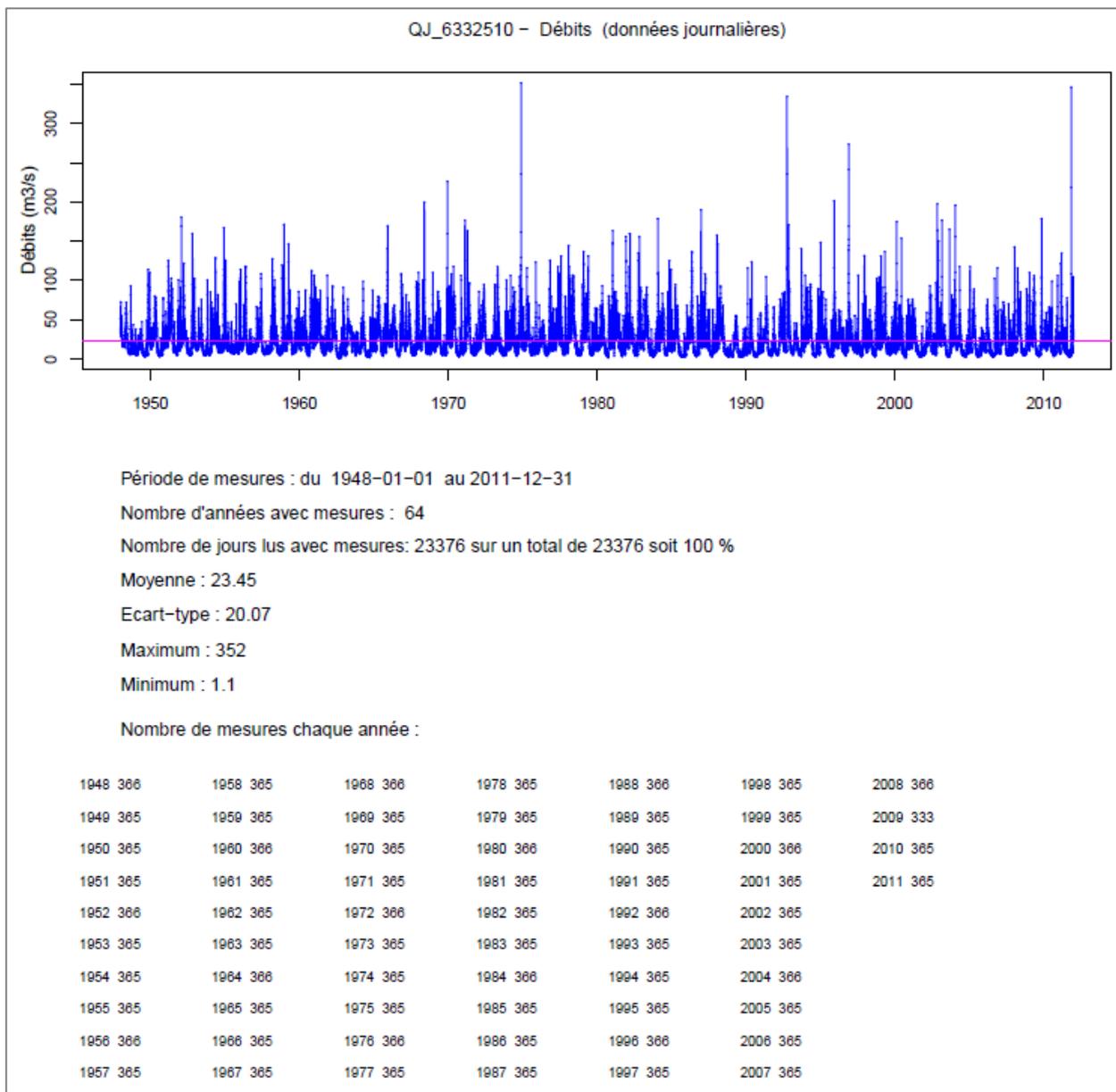
Le Gave de Pau à Saint-Pé-de-Bigorre (Pont de Rieulhes)



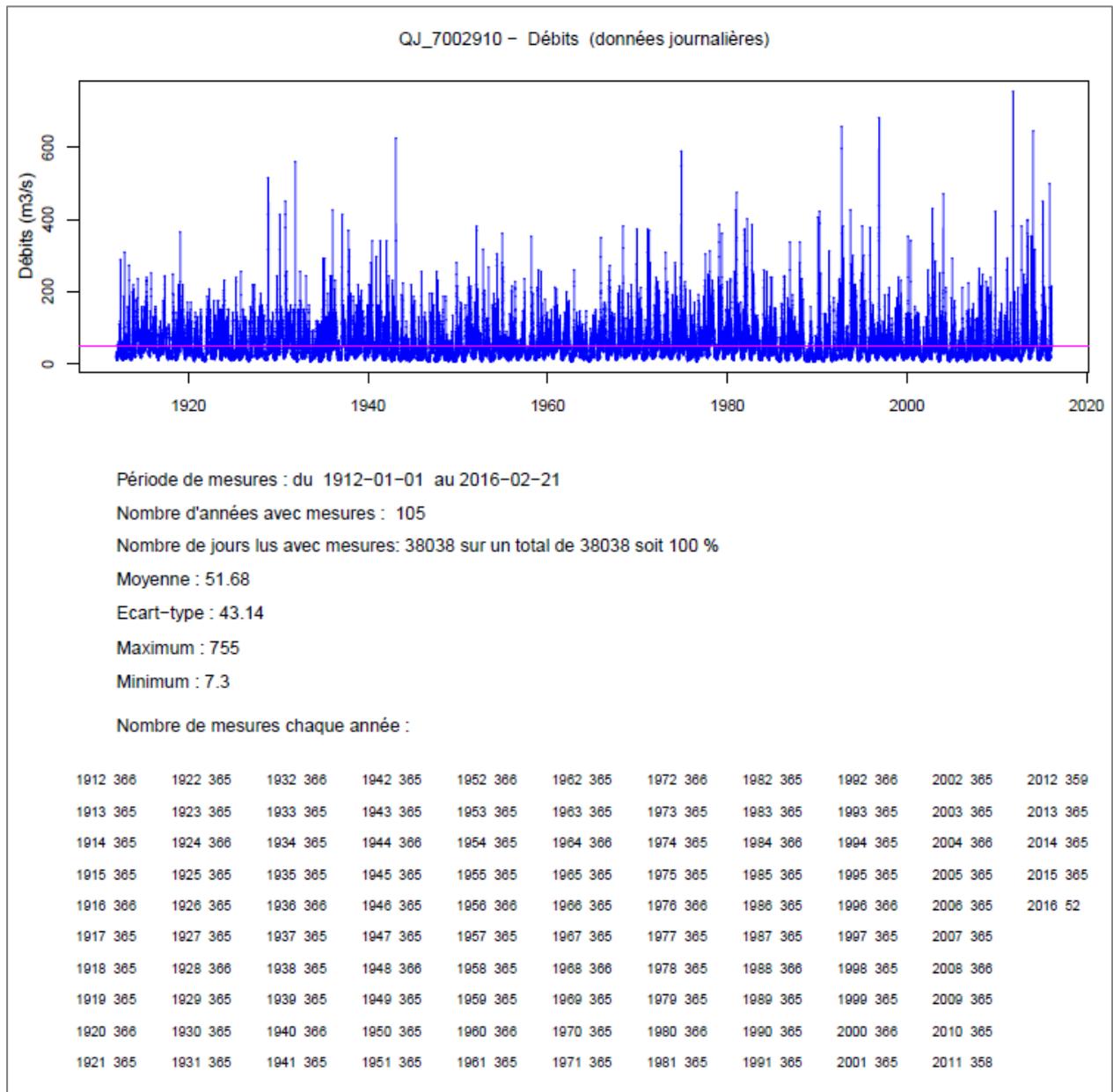
Le Gave de Pau à Bérenx [Pont de Bérenx]



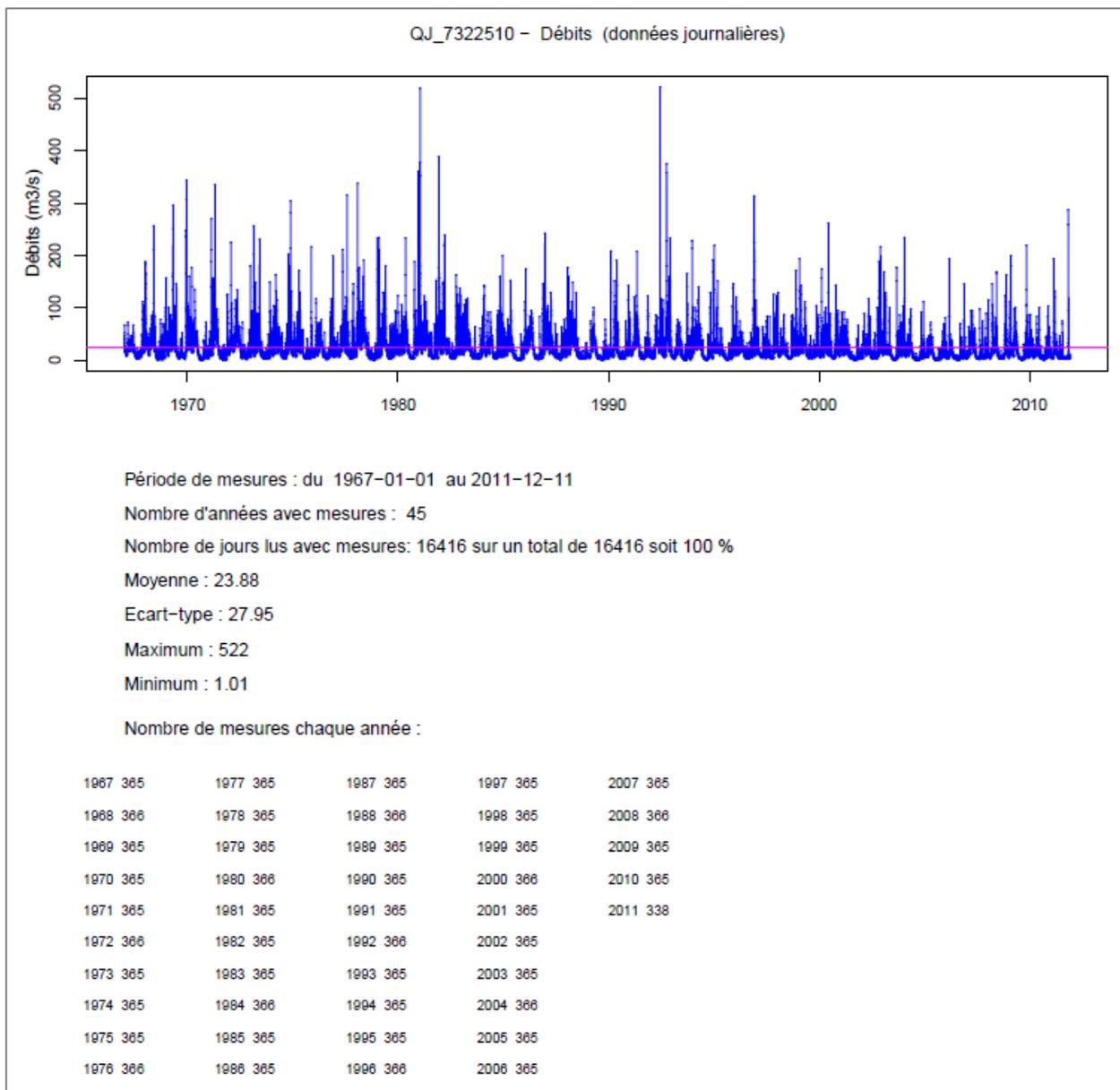
Le Gave d'Ossau à Oloron-Sainte-Marie [Oloron-Sainte-Croix]



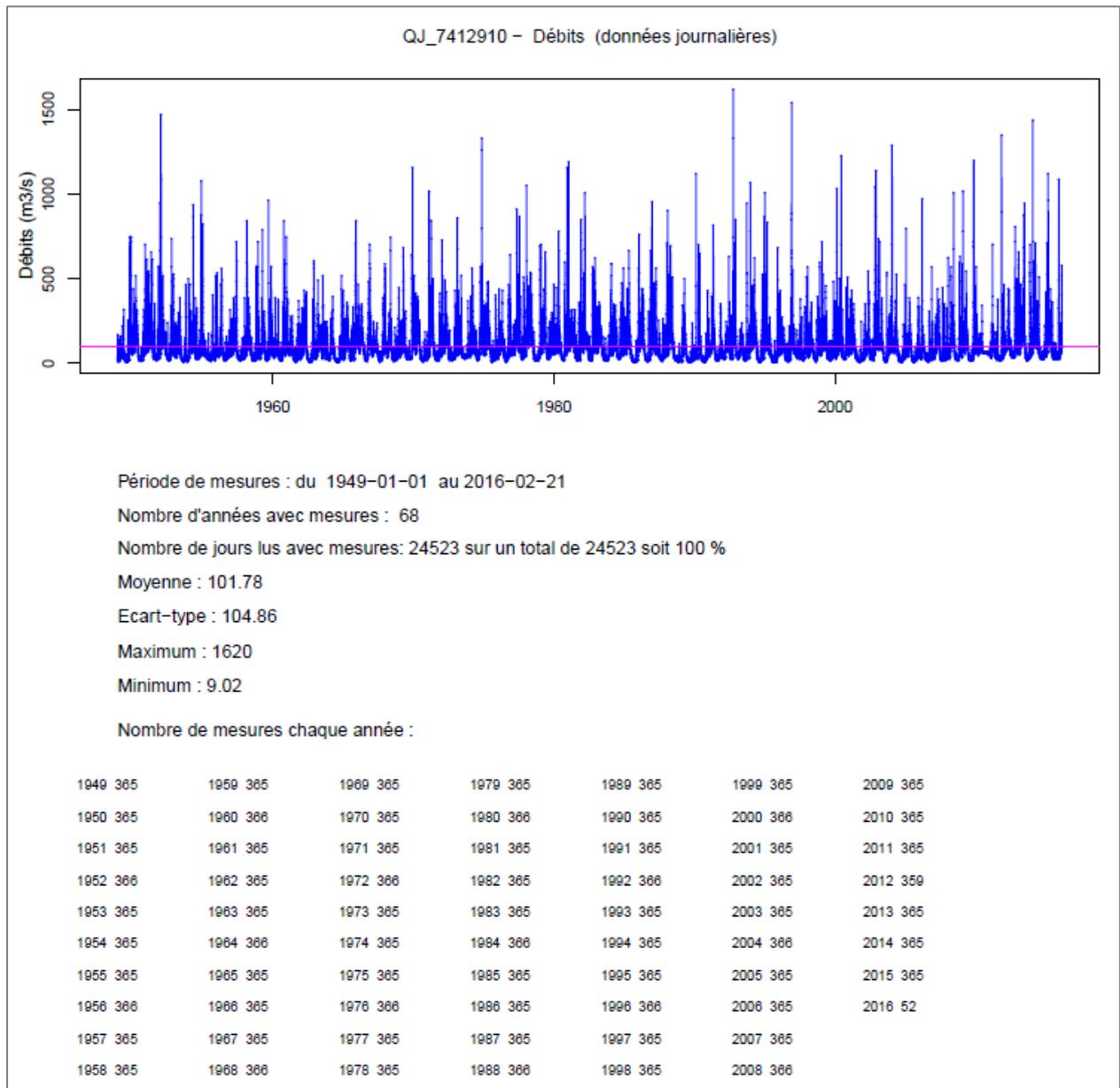
Le Gave d'Aspe à Bedous [Pont d'Escot]



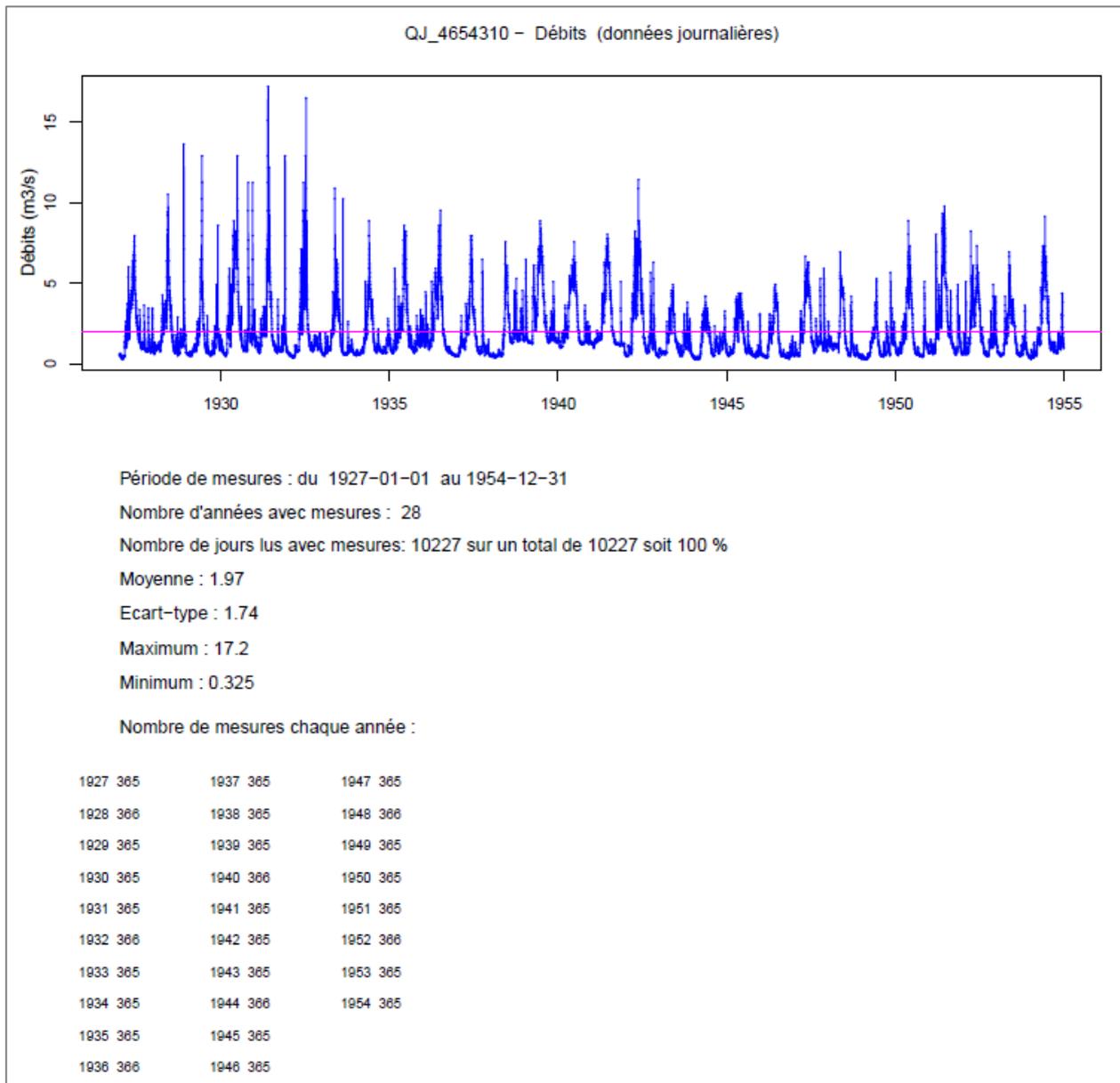
Le Gave d'Oléron à Oléron-Sainte-Marie [Oléron-SNCF]



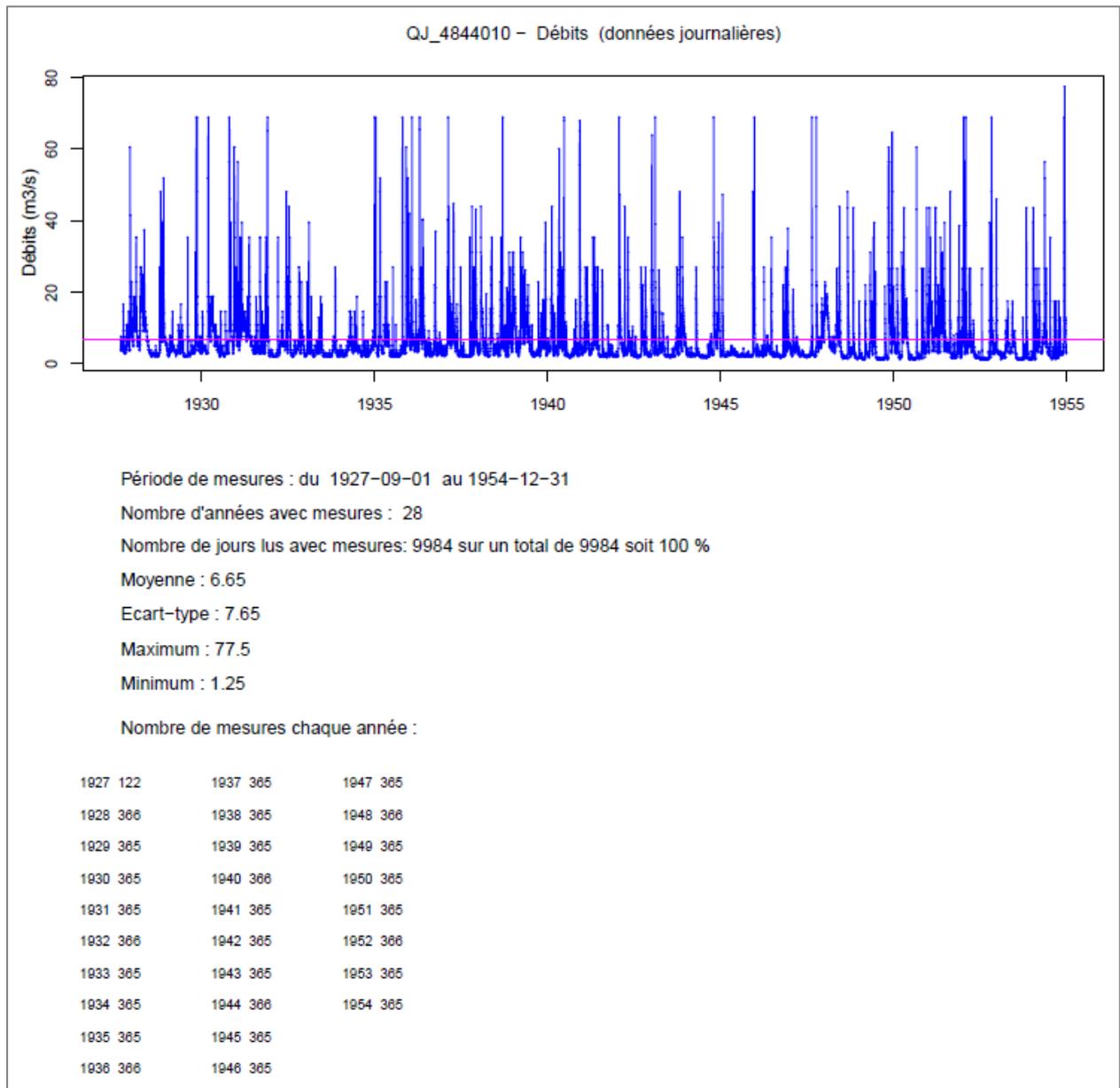
Le Saison à Mauléon-Licharre [Berrogain Laruns - Cibi]



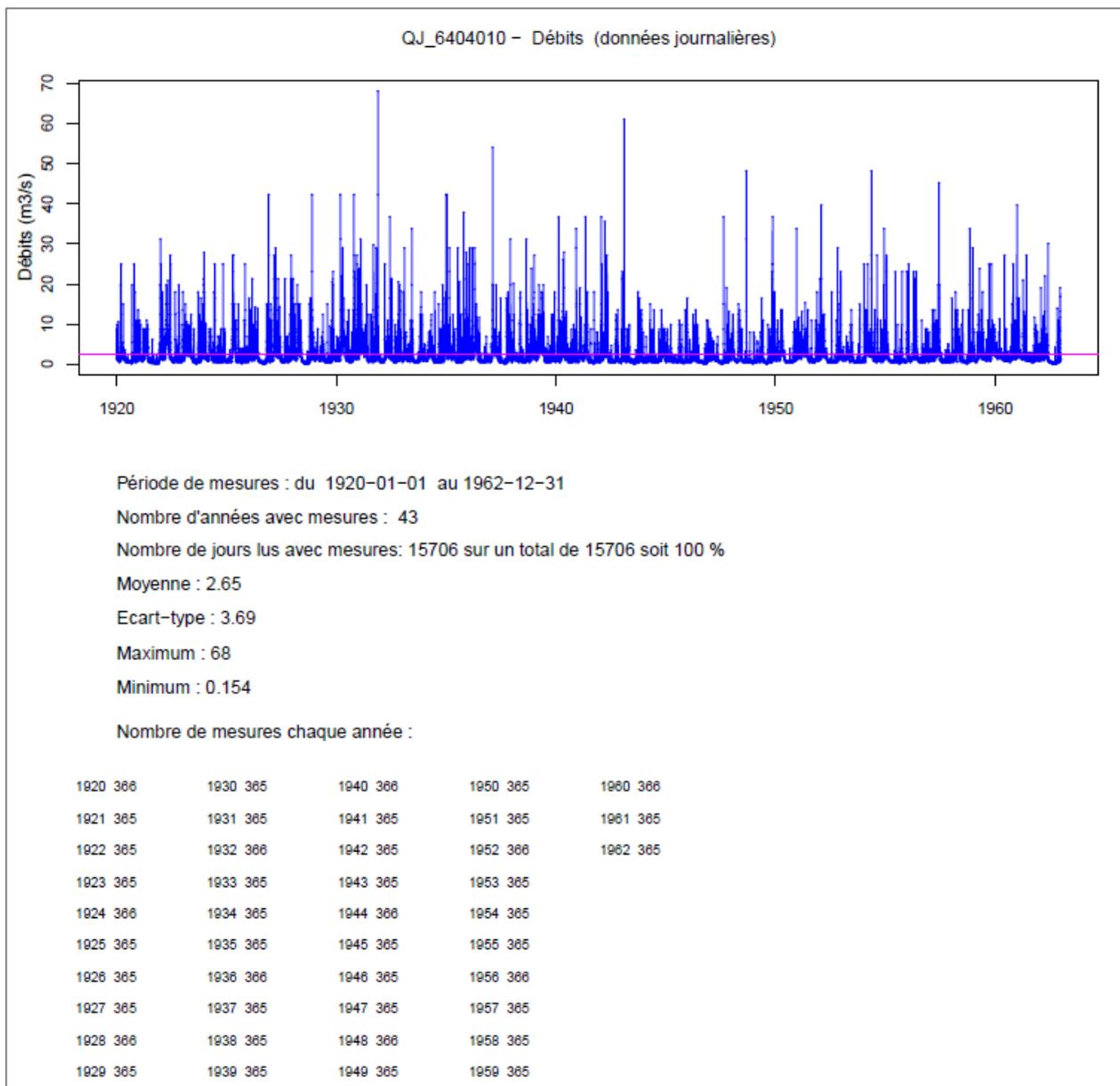
Le Gave d'Oloron à Escos



Le Gave d'Estaing à Estaing [Las Counces]



L'Ouzom à Arthez-d'Asson



Le Lourdios-Ichère à Lourdios-Ichère

## **Annexe 3**

### **Principe des tests de tendance et rupture**



## 1. Rappel : mise en œuvre d'un test et p-value

La mise en œuvre d'un test nécessite la construction d'une *statistique de test*  $S$ . Connaissant la loi de probabilité  $S$  suivie par cette "statistique", pour accepter ou rejeter l'hypothèse testée (désignée classiquement par  $H_0$ ), il y a 2 stratégies possibles :

1) On compare la valeur calculée  $s_c$  de  $S$  à la valeur théorique  $s_{th}$  fournie par la loi de probabilité au seuil de risque  $\alpha$  choisi, en général  $\alpha = 5\%$  (mais parfois 1%, 10% voire plus selon les problèmes étudiés et les enjeux).

Si la valeur calculée  $s_c$  (pour  $\alpha$  donné) est inférieure à la valeur théorique, l'hypothèse  $H_0$  pourra être acceptée :

$$si\ s_c < s_{th} \rightarrow H_0\ acceptée\ au\ seuil\ \alpha$$

La valeur calculée de la statistique de test est compatible avec la loi de probabilité du test.

2) La comparaison est faite entre le seuil de risque  $\alpha$  que l'on se donne et la probabilité correspondant à la valeur calculée  $s_c$  de la statistique de test, valeur appelée "*p-value*".

L'hypothèse  $H_0$  sera rejetée au seuil de risque  $\alpha$  si la *p-value* est inférieure à  $\alpha$  (incluse dans la région de rejet). Plus la *p-value* sera faible, moins l'hypothèse nulle sera crédible. Inversement :

$$si\ p\text{-value} > \text{seuil de risque } \alpha \rightarrow H_0\ acceptée\ au\ seuil\ \alpha$$

L'acceptation de l'hypothèse  $H_0$  ne signifie pas que cette hypothèse soit vraiment la bonne, elle peut seulement résulter du fait que les données sont insuffisantes pour la déclarer non acceptable.

Les différentes situations que l'on peut rencontrer dans la mise en œuvre d'un test sont résumées dans le tableau ci-dessous.

	$H_0$ vraie	$H_0$ fausse
Rejet de $H_0$	On a pris le risque de rejeter $H_0$ avec une <b>probabilité <math>\alpha</math></b> de se tromper alors que $H_0$ est en réalité vraie.  <b>Erreur (ou risque) de 1<sup>ère</sup> espèce.</b>	La probabilité de ne pas s'être trompé en faisant ce choix est <b><math>1-\beta</math>, fonction de <math>\alpha</math>.</b>
Acceptation de $H_0$	En ayant fixé $\alpha$ , la probabilité de ne pas s'être trompé est donc <b><math>1-\alpha</math></b> (niveau de confiance)	L'hypothèse $H_0$ a été acceptée alors qu'en réalité elle est fausse.  <b>Erreur de 2<sup>ième</sup> espèce, commise avec une probabilité <math>\beta</math>, fonction de <math>\alpha</math></b>

*Les 4 possibilités de décision dans la mise en œuvre d'un test statistique*

A la différence de l'erreur de 1<sup>ère</sup> espèce, l'erreur de 2<sup>ième</sup> espèce est une variable, dépendant toujours de l'hypothèse  $H$  qui est vraie et du choix fait de la rejeter (peut-être à tort, avec une probabilité  $\alpha$ ) ou pas.

En augmentant le risque  $\alpha$  que l'on prend en rejetant l'hypothèse  $H_0$  alors qu'elle est vraie, on diminue donc le risque  $\beta$  de se tromper en l'acceptant alors qu'elle est fausse.

## 2. Test de détection d'une tendance : le test de Mann-Kendall et ses variantes

Ces tests sont utilisés pour savoir si une droite de tendance mise en évidence dans une série temporelle est significative ou non

### 2.1. Les valeurs de la série ne sont pas corrélées entre elles : test de Mann-Kendall classique

- *Conditions d'application*

S'applique à un échantillon de  $n$  **valeurs indépendantes** (non corrélées entre elles) pour détecter des tendances "**monotones**".

- *Hypothèse testée (=Hypothèse nulle  $H_0$ )*

C'est la stationnarité de la série.

- *Mise en œuvre du test*

Le test repose sur le calcul de la somme suivante :

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k)$$

où  $x_j$  et  $x_k$  sont deux valeurs successives de la série ( $j > k$ ) et où :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

On dénombre donc pour tous les couples ( $x_j, x_k$ ) le nombre de cas où la 2<sup>ième</sup> valeur est supérieure à la 1<sup>ère</sup> et le nombre de cas où c'est l'inverse et on fait la différence entre ces deux nombres. Si la série est stationnaire,  $S$  doit être proche de 0.

Le test ne nécessite pas d'hypothèse sur la distribution de probabilité des valeurs (test non paramétrique). Si la série est stationnaire (hypothèse  $H_0$ ), alors :

- la moyenne de  $S$  est :  $E(S) = 0$
- et sa variance est :  $\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18$

S'il y a des valeurs égales dans la série, la variance  $\text{Var}(S)$  doit être calculée comme suit :

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q E_p(E_p-1)(2E_p+5) \right]$$

où  $E_p$  désigne le nombre d'égalités identifiées dans la série impliquant  $p$  valeurs.

Si le nombre  $n$  de valeurs de la série est supérieur à 10, la mise en œuvre du test fait intervenir la variable aléatoire  $Z$  définie par :

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S > 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \text{ si } S < 0$$

$$Z = 0 \text{ si } S = 0$$

Une valeur positive de Z indique une tendance croissante.

Cette variable suit (approximativement) une loi normale centrée réduite. La probabilité d'observer une tendance pour laquelle la valeur de Z est au moins égale en valeur absolue à  $Z_{\text{obs}}$  est alors :

$$P(|Z| \geq |z_{\text{obs}}|) = 2(1 - \Phi(|z_{\text{obs}}|))$$

où  $\Phi$  est la fonction de répartition de la loi normale.

**L'hypothèse de stationnarité sera rejetée au niveau de signification  $\alpha$  si cette probabilité calculée (p-value) est inférieure à  $\alpha$  (elle est peu probable).**

Le résultat du test, au niveau de signification  $\alpha$ , s'obtient aussi en comparant la valeur  $Z_{\text{obs}}$  obtenue pour Z à la valeur théorique  $z_{\text{th}}$  de la distribution cumulée de la loi normale centrée réduite (fonction de répartition). Pour un test bilatéral (*two-tailed test*) visant la détection d'une tendance à un niveau de confiance  $\alpha$ ,  $H_0$  est rejetée si la valeur absolue de Z est supérieure à  $Z_{1-\alpha/2}$ .

$$\text{si } |z_{\text{obs}}| > z_{\text{th}(1-\alpha/2)}, \text{ rejet de } H_0 \text{ au seuil de confiance } \alpha$$

### Calcul de la pente : méthode de Sen

Une méthode souvent utilisée est la méthode de Sen (1968), la pente étant calculée comme suit :

$$a_{\text{Sen}} = \text{Médiane} \left[ \frac{(x_j - x_i)}{(j - i)} \right] \quad \forall j < i$$

$x_j$  et  $x_i$  sont respectivement la  $j^{\text{ième}}$  et la  $i^{\text{ième}}$  observation de la série.

La pente ainsi calculée est une estimation plus robuste de la pente de la tendance que celle issue de la régression où l'existence de valeurs très fortes ou très faibles peut biaiser le calcul de la pente. Au contraire, avec la méthode de Sen, la pente n'est pas très affectée par la présence de valeurs extrêmes.

## **2.2. Les valeurs de la série sont corrélées entre elles**

Il existe plusieurs méthodes.

◆ *Calcul d'un nombre équivalent d'observations indépendantes (Hamed et Rao)*

Pour s'affranchir de l'autocorrélation, une méthode consiste à calculer un nombre  $n^*$  d'observations supposées indépendantes, ce qui revient à substituer à la série initiale de  $n$  valeurs autocorrélées une série de  $n^*$  valeurs indépendantes,  $n^* < n$  (nombre équivalent d'observations indépendantes).

Dans le cas de la régression linéaire, Bayley et Hammersley (1946) montrent que le nombre  $n^*$  peut être calculé comme suit :

$$\frac{1}{n^*} = \frac{1}{n} + \frac{2}{n} \sum_{k=1}^{n-1} \left(1 - \frac{k}{n}\right) \rho_k$$

$\rho_k$  étant le coefficient d'autocorrélation d'ordre  $k$  des valeurs de la série.

La variance de la somme  $S$  du test est alors :

$$\text{Var}(S) = \frac{n}{n^*} \text{Var}_{\rho=0}(S)$$

Hamed et Rao (1998) retiennent cette méthode mais proposent un calcul de  $n^*$  différent :

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2) \rho_k$$

expression dans laquelle  $\rho_k$  est l'autocorrélation d'ordre  $k$  calculée sur le rang des valeurs de la série (les valeurs sont ordonnées), et non plus sur les valeurs elles mêmes.

D'autres méthodes existent.

1) Yue *et al.* proposent la procédure suivante, baptisée trend-free pre-whitening (TFPW, ce que l'on peut traduire par "série affranchie de tendance et pré-blanchie") :

- estimer le coefficient directeur  $\beta$  de la tendance sur les données brutes  $Y_i$ , avec la méthode de Sen. Si la pente n'est pas proche de 0, on poursuit avec les étapes suivantes :
- créer une série sans tendance (transformation TF) :  $X_i = Y_i - \beta \cdot t_i$
- estimer l'autocorrélation  $\rho$  d'ordre 1 sur la série des  $X_i$
- ôter la partie autocorrélée (transformation PW) de la série des  $X_i$  :  $Z_i = X_i - \rho \cdot X_{i-1}$
- la série à traiter sera en définitive (on rajoute la tendance) :  $W_i = Z_i + \beta \cdot t_i$

De la sorte, l'estimation de l'autocorrélation ne sera pas biaisée puisqu'elle est effectuée sur une série sans tendance, et la série des  $W_i$  à tester est bien constituée d'une tendance plus une variable non autocorrélée. Mais certains auteurs ont émis quelques critiques quant à l'approche proposée par Yue et al. Pour une discussion détaillée, voir la thèse de B. Renard (2006).

2) Zhang (2000) propose quant à lui la méthode suivante (variante de la précédente) :

La série de données brutes  $Y$  est modélisée par une composante tendance plus un processus autorégressif d'ordre 1:

$$Y_t = \mu + \beta \cdot t + \Phi \cdot Y_{t-1} + \varepsilon_t$$

$\mu$  est un terme constant

$\beta$  est la pente de la tendance

$\Phi$  est le coefficient du processus autorégressif

$\varepsilon$  est la variable résiduelle

Les paramètres inconnus  $\beta$  et  $\Phi$  sont calculés par un processus itératif qui se termine lorsque, entre deux itérations successives, les valeurs de  $\beta$  et  $\Phi$  ne diffèrent quasiment plus. La significativité de la pente  $\beta$  est ensuite calculée.

### 3. Test de détection d'une rupture : le test de Pettitt

Ce test peut être utilisé pour savoir si la série étudiée présente une rupture significative. Il s'agit, comme le test de Mann-Kendall, d'un test non paramétrique.

L'hypothèse nulle est  $H_0 =$  "absence de rupture" dans la série.

La mise en œuvre du test repose sur la variable aléatoire suivante :

$$U(k) = \sum_{i=1}^k \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i)$$

Comme dans le cas du test de Mann-Kendall :

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{si } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{si } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

La variable  $U$  s'apparente à la variable  $S$  du test de Mann-Kendall, mais dans ce cas les couples de valeur  $(x_j, x_i)$  sont formés par sélection d'une valeur de part et d'autre d'un point de rupture supposé de rang  $k$  dans la série. En faisant varier  $k$  de 1 à  $n-1$ , on obtient donc une variable  $U$  fonction de  $k$ .

La statistique de test est alors la variable :

$$Z = \max |U(k)|, \quad k=1, \dots, n-1$$

La rupture possible se situerait alors au rang  $k_R$  correspondant au maximum de  $U(k)$ .

La probabilité de dépassement de la valeur prise par la statistique  $Z$  du test sur la série observée est donnée par (Pettitt, 1979) :

$$\text{Prob}( Z > z_{k_R} ) = 2 * \exp\left( \frac{-6z_{k_R}^2}{n^3 + n^2} \right)$$

Pour un niveau de confiance  $\alpha$ , l'hypothèse testée, homogénéité de la série (absence de rupture), sera rejetée si cette valeur de probabilité est inférieure à  $\alpha$ .

#### Remarque

En privilégiant une direction, la statistique de test aurait pu être (Pettitt, 1979) :

$$Z^+ = \max ( U(k) )$$

ou :  $Z^- = -\min( U(k) )$

Dans ce cas :

$$\text{Prob}( Z > z_{k_R} ) = \exp\left( \frac{-6z_{k_R}^2}{n^3 + n^2} \right)$$

## **Annexe 4**

### **Corrélogramme et périodogramme**



## 1. Autocorrélation et corrélogramme

Soit une série temporelle de N observations,  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , séparées d'un pas de temps  $\Delta t$ .

La moyenne des N valeurs est :  $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$

et la variance :  $\text{Var}(X) = \sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$

On définit le coefficient d'autocorrélation entre deux observations séparées d'un intervalle  $k\Delta t$  par :

$$\rho(k) = \frac{\text{Cov}(X_i, X_{i+k})}{\sqrt{\text{Var}(X_i)} \sqrt{\text{Var}(X_{i+k})}}$$

$$\text{Cov}(X_i, X_{i+k}) = \frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_{N-k}^{(1)}) (x_{i+k} - \bar{x}_{N-k}^{(2)}) \quad k=0 \text{ à } k_{\max}$$

avec

$$\bar{x}_{N-k}^{(1)} = \frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} x_i \quad \text{moyenne des } N-k \text{ premières valeurs de la série}$$

$$\bar{x}_{N-k}^{(2)} = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^{N-k} x_{i+k} \quad \text{moyenne des } N-k \text{ valeurs de la série décalées de } k \text{ par rapport aux}$$

précédentes (donc les dernières  $N-k$  valeurs de la série)

De même pour les variances :

$$\text{Var}(X_i) = \frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x}_{N-k}^{(1)})^2$$

$$\text{Var}(X_{i+k}) = \frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (x_{i+k} - \bar{x}_{N-k}^{(2)})^2$$

### Simplifications

Si  $k_{\max}$  est très inférieur à N, on considère que les moyennes et les variances sont très proches de la moyenne  $\bar{x}$  et de la variance  $\sigma^2$  des N valeurs de la série (ce qui serait le cas dans une série stationnaire) :

$$\text{Cov}(X_i, X_{i+k}) = \frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x}), \quad k=0 \text{ à } k_{\max}$$

$$\text{Var}(X_i) \approx \text{Var}(X_{i+k}) \Rightarrow \sqrt{\text{Var}(X_i)} \sqrt{\text{Var}(X_{i+k})} = \text{Var}(X) = \sigma_X^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Le coefficient d'autocorrélation est alors :

$$\rho(k) = \frac{\frac{1}{(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

En pratique, k étant en principe très inférieur à N, on ne tient pas compte du facteur N/(N-k) et donc :

$$\rho(k) = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \frac{c_k}{c_0}$$

C'est cette expression qui est en général utilisée dans les calculs.

Le corrélogramme est le tracé du coefficient d'autocorrélation en fonction de l'incrément de temps k, de k=0 à k= k<sub>max</sub>

## 2. Spectrogramme et Périodogramme

L'analyse spectrale permet de représenter une série chronologique x(t) comme une superposition de fonctions cycliques élémentaires (une somme de sinus et de cosinus). On peut alors détecter quelles sont les fréquences qui contribuent le plus à la dynamique de la série x(t).

Classiquement x(t) sera représentée par une série de Fourier :

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} (a_k \cos \omega_k t + b_k \sin \omega_k t)$$

a et b sont les amplitudes,

$\omega$  est la fréquence angulaire,

$\omega = 2\pi f$ , f étant la fréquence en nombre de cycles par unité de temps

$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{1}{f}$  est la période

Il s'agit alors de calculer les coefficients  $a_k$  et  $b_k$  (c'est le but de l'analyse de Fourier).

### Densité spectrale de puissance (dsp)

La dsp est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation. Elle correspond à une décomposition du signal (de sa "puissance") en fonction de la fréquence.

### Périodogramme brut

Le périodogramme "brut" est la transformée de Fourier de l'autocovariance de la série.

C'est un estimateur de la dsp.

On définit l'amplitude de la  $k^{\text{ième}}$  harmonique par :

$$R_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

Le périodogramme est la fonction :

$$I_k = I(\omega_k) = \frac{N}{2} R_k^2 \quad \omega_k = \frac{2\pi}{N} k \quad (k = 1, \dots, \frac{N-1}{2})$$

Si  $k=N/2$ ,  $\omega_{\frac{N}{2}} = \pi$  et  $I(\pi) = N a_{\frac{N}{2}}^2$

Le périodogramme est le graphe de la fonction  $I(\omega_k)$ . On peut aussi tracer le périodogramme en fonction de la période  $T = \frac{2\pi}{\omega_k}$

### Relation avec la variance de la série (théorème de Parseval)

$$\text{Var}(X) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \sum_{i=1}^{\frac{N-1}{2}} \frac{R_k^2}{2} + a_{\frac{N}{2}}^2$$

Le périodogramme réalise donc une décomposition harmonique de la variance de la série.

### Périodogramme lissé

Le périodogramme brut est bruité. Différentes techniques existent pour le lisser (voir ouvrage spécialisé), par exemple une moyenne des densités spectrales calculées sur plusieurs fenêtres d'observations. C'est le périodogramme lissé qui est fourni par les logiciels.



## **Annexe 5**

### **Une méthode de calcul du Base Flow Index**



### Méthode de l'Institut Hydrologique de Wallingford

Cette méthode a été testée sur un grand nombre de bassins en Angleterre, ce qui a permis de fixer les valeurs des deux paramètres qui interviennent.

Le tableau ci-dessous illustre la démarche. Pour identifier les points de jonction de l'écoulement de base, la chronique de débits est divisée en intervalles de 5 jours (paramètre fixe de la méthode) de chacun desquels on extrait le minimum  $Q_{\min}$  du débit. Chaque valeur de la série des  $Q_{\min}$  est ensuite multipliée par 0,9 (deuxième paramètre empirique, fixé, de la méthode). Les points de jonction sont ceux pour lesquels la valeur  $Q_{\min} \times 0,9$  devient inférieure ou égale aux valeurs de l'intervalle considéré (en gras dans le tableau).

1. Date	2. Daily flow, $Q$ ( $m^3 s^{-1}$ )	3. $Q_{\min}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	4. $0.9 Q_{\min}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	5. Base flow, $Q_b$ ( $m^3 s^{-1}$ )
1-Jan-1995	0.109			
2-Jan-1995	0.063			
3-Jan-1995	0.043			
4-Jan-1995	0.039	0.039	0.0387	
5-Jan-1995	0.229			
6-Jan-1995	0.186			
7-Jan-1995	0.116			
8-Jan-1995	0.111			
9-Jan-1995	0.095	0.095	0.0855	
10-Jan-1995	0.123			
11-Jan-1995	0.178			
12-Jan-1995	0.091			
13-Jan-1995	0.076			
14-Jan-1995	0.073			
15-Jan-1995	0.062	0.062	0.0558	
16-Jan-1995	0.054	0.054	<b>0.0486</b>	0.054
17-Jan-1995	1.06			0.056
18-Jan-1995	0.856			0.058
19-Jan-1995	1.05			0.060
20-Jan-1995	1.34			0.062
21-Jan-1995	1.64			0.064
22-Jan-1995	1.35			0.067
23-Jan-1995	0.559			0.069
24-Jan-1995	0.255	0.255	0.2295	0.071
25-Jan-1995	0.644			0.073
26-Jan-1995	0.793			0.075
27-Jan-1995	0.896			0.077
28-Jan-1995	0.631			0.079
29-Jan-1995	1			0.081
30-Jan-1995	0.492	0.492	0.4428	0.083
31-Jan-1995	0.377			0.085
1-Feb-1995	1.67			0.087
2-Feb-1995	0.448			0.090
3-Feb-1995	0.237			0.092
4-Feb-1995	0.163	0.163	0.1467	0.094
5-Feb-1995	0.123			0.096
6-Feb-1995	0.102			0.098
7-Feb-1995	0.1	0.1	<b>0.09</b>	0.100
8-Feb-1995	0.151			0.107
9-Feb-1995	0.178			0.115

*Exemple de calcul d'un écoulement de base*

Source : Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. (Developments in Water Science, vol. 48, 2004. Elsevier)

Les points de jonction sont ensuite reliés les uns aux autres par des segments de droite pour former la ligne de séparation de l'écoulement de base (interpolation linéaire).

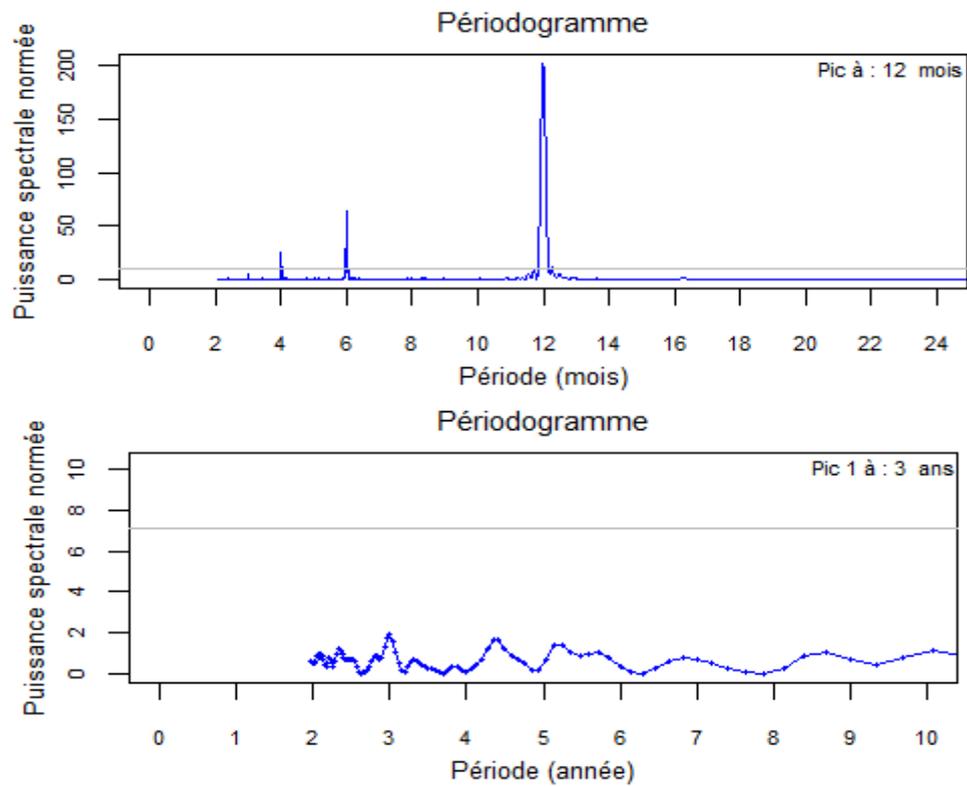


## **Annexe 6**

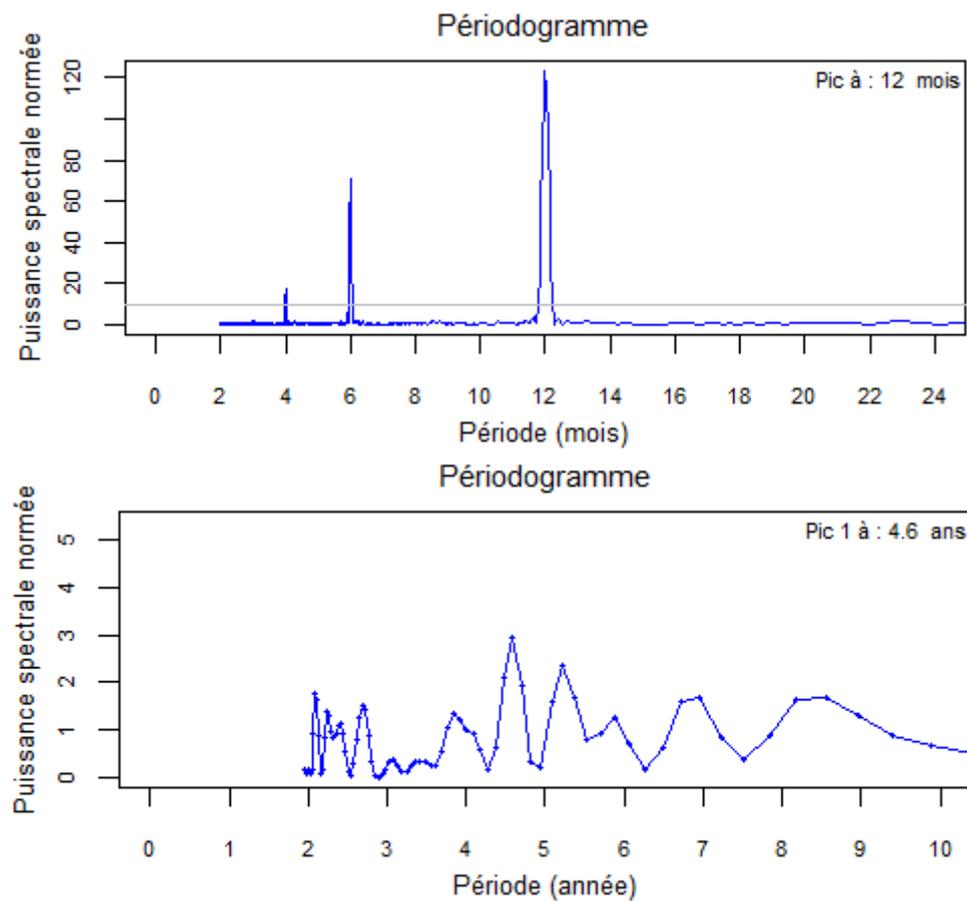
### **Analyse spectrale des chroniques de débits**



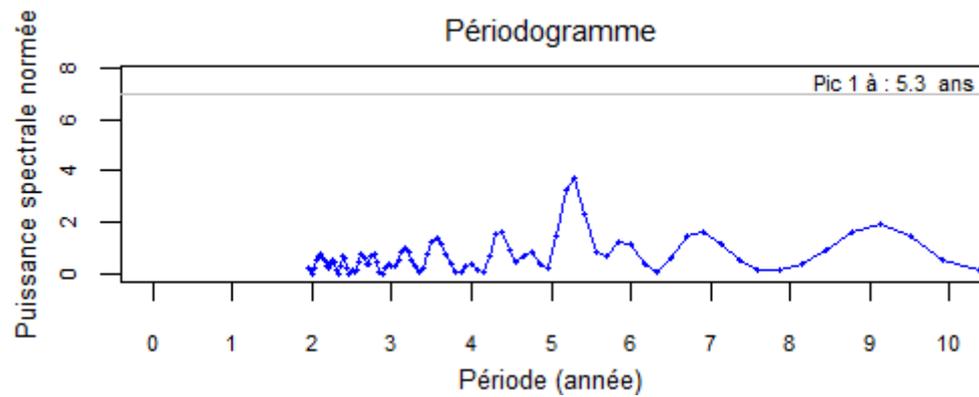
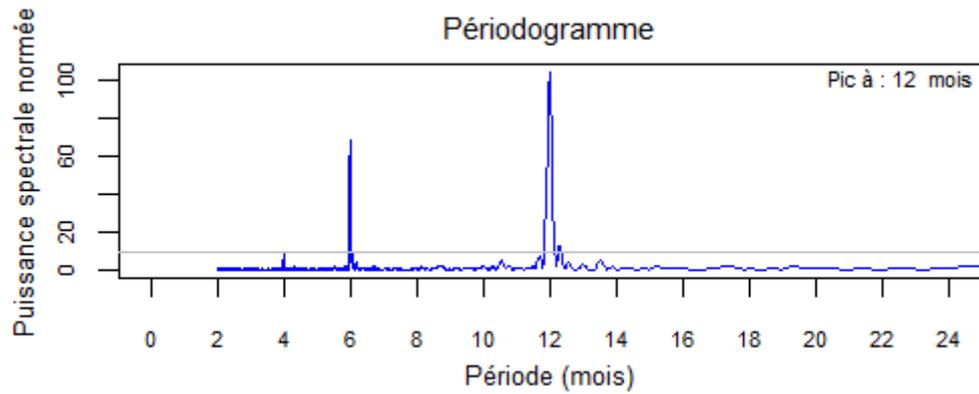
**O0105110**



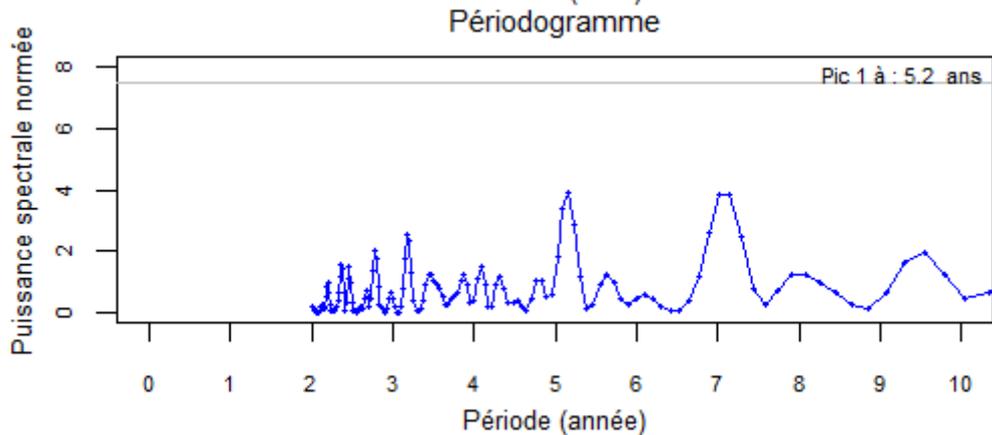
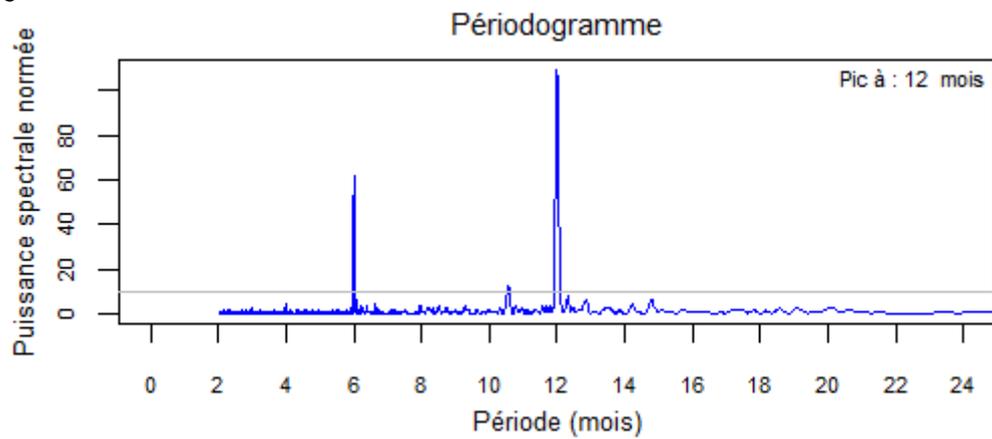
**Q4124010**



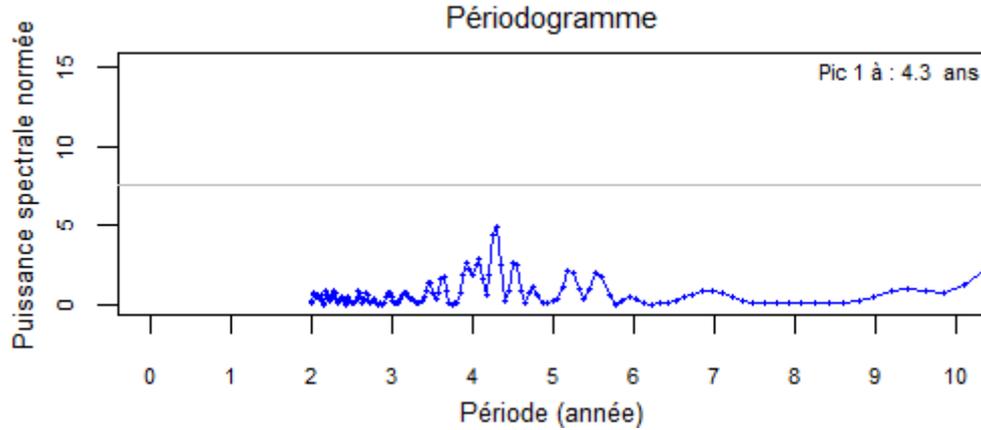
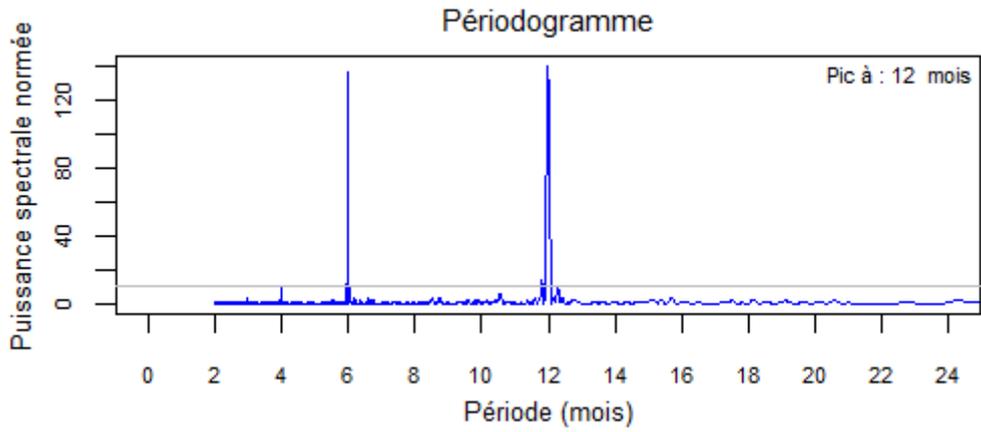
**Q4801010**



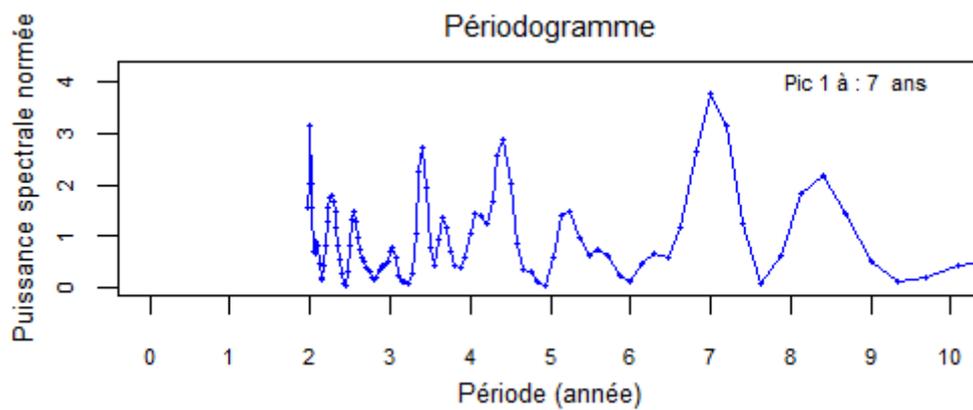
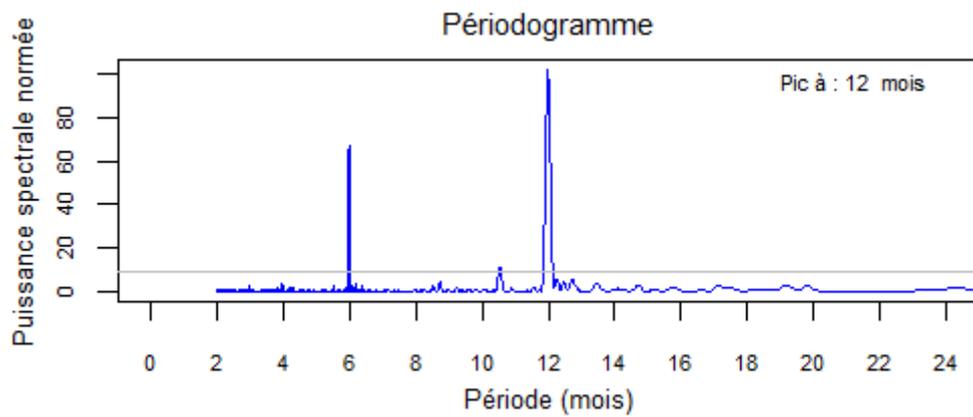
**Q5501010**



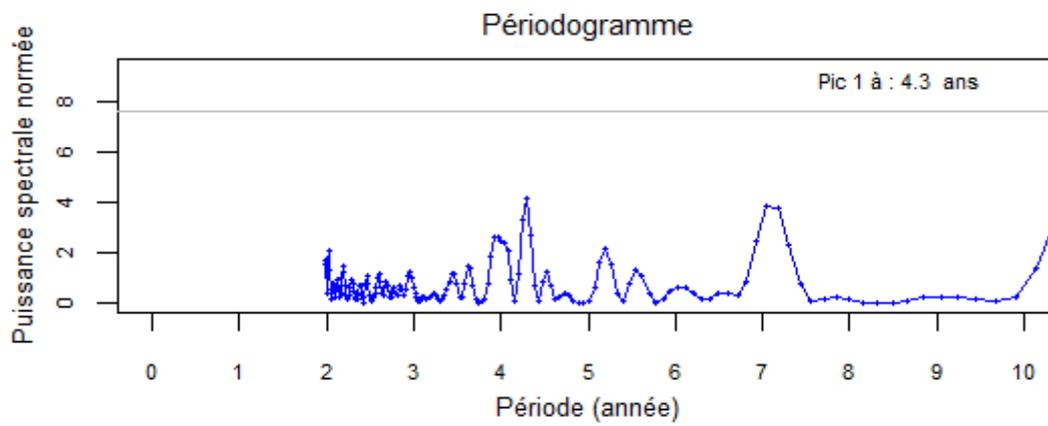
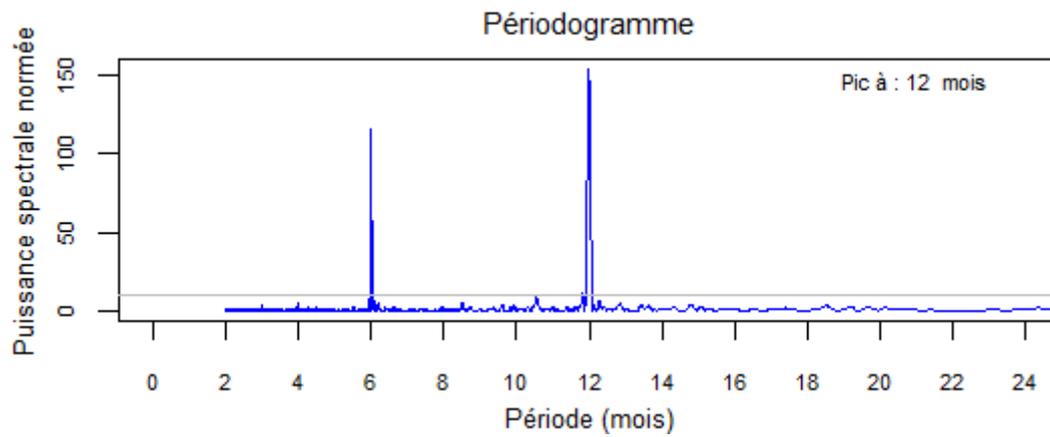
**Q6142910**



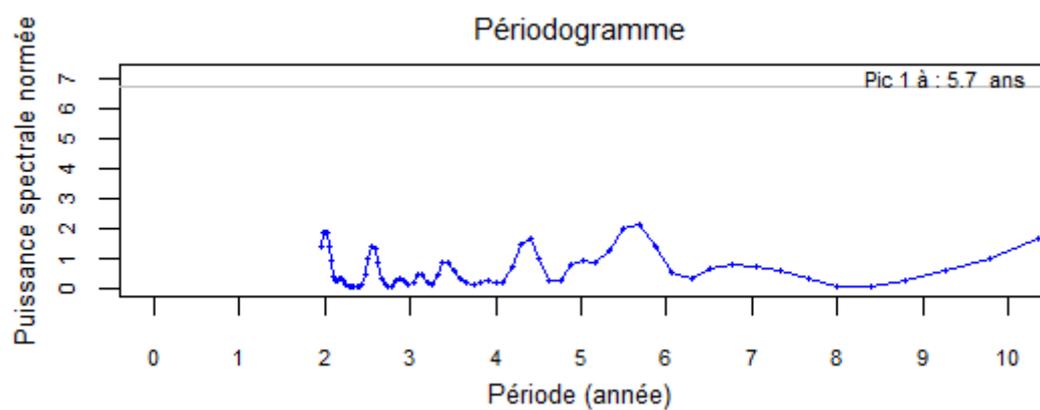
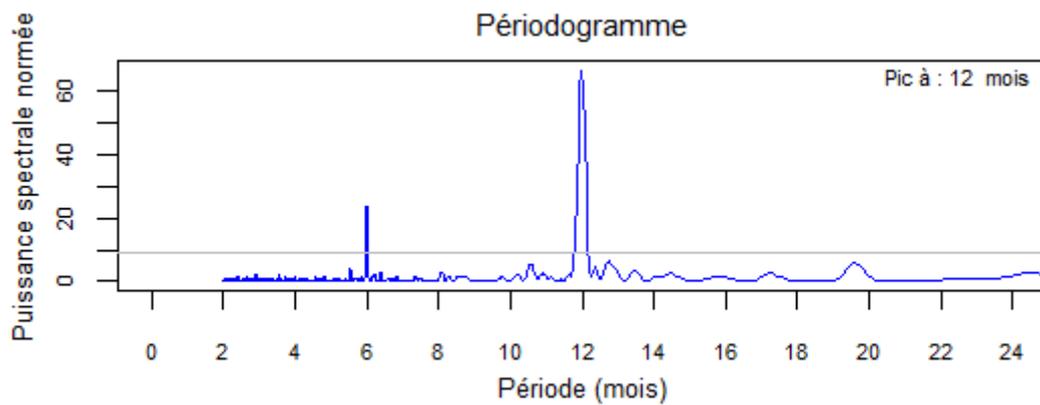
**Q6332510**



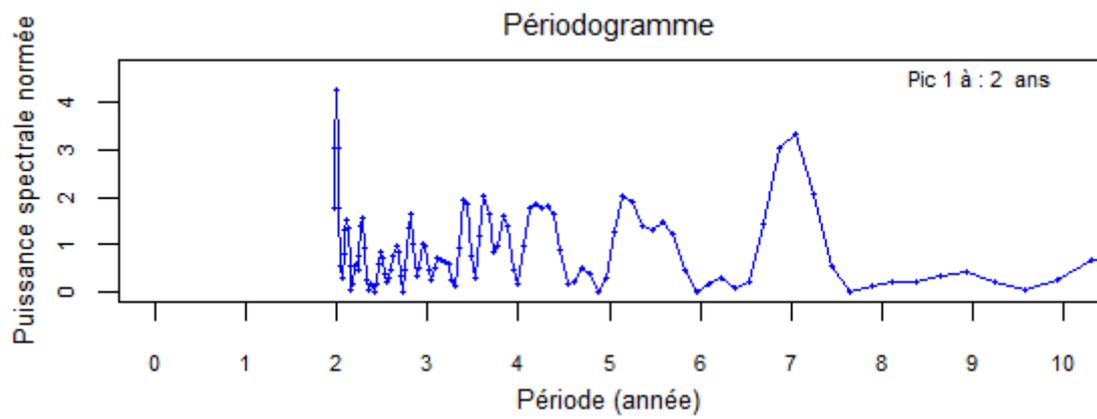
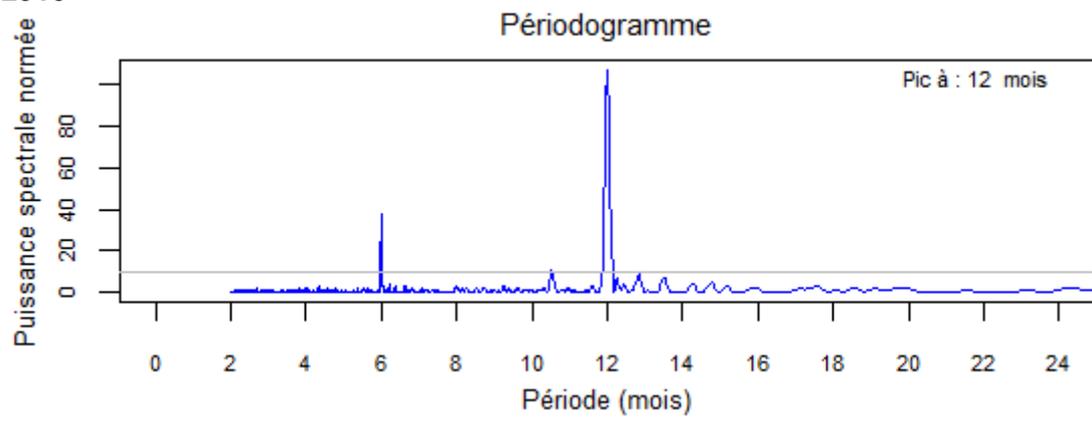
**Q7002910**



**Q7322510**



**Q7412910**

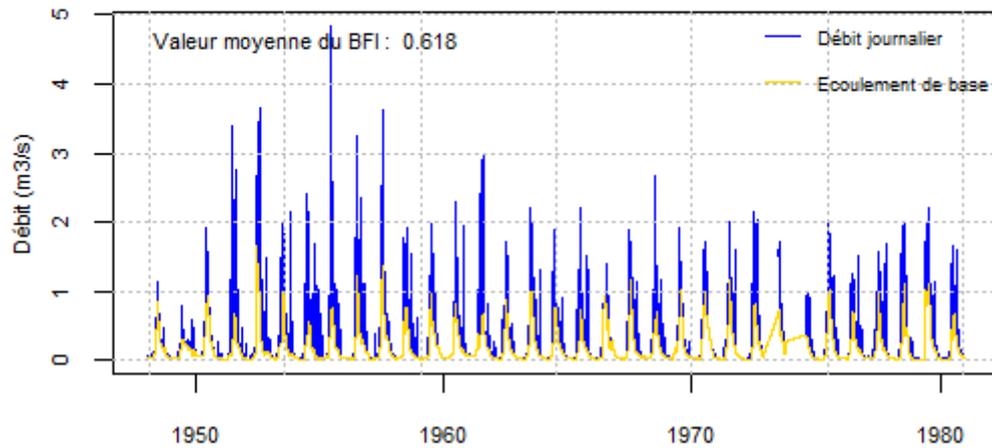




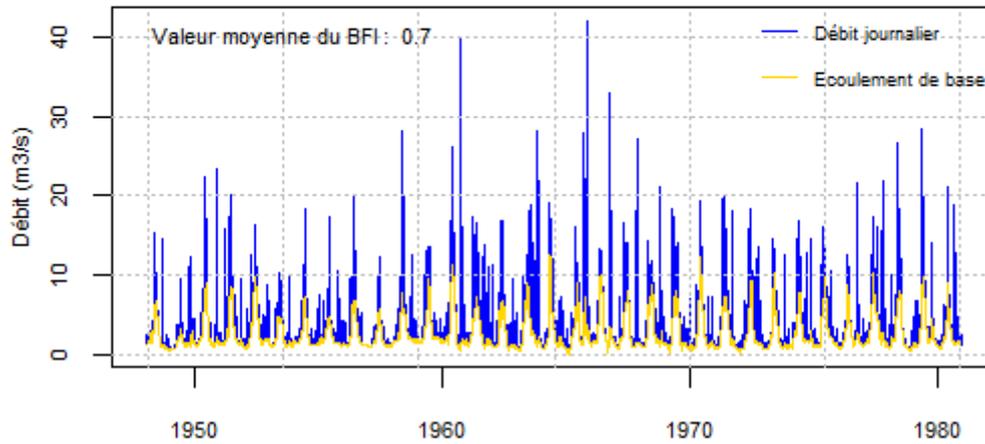
## **Annexe 7**

### **Base Flow Index**





Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980  
Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 0.297  
soit une lame d'eau de : 18.7 mm  
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 0  
Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 4.84  
BFI calculé sur la période : 0.618  
->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 0.19  
soit une lame d'eau de : 12 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 3.598

soit une lame d'eau de : 1351.7 mm

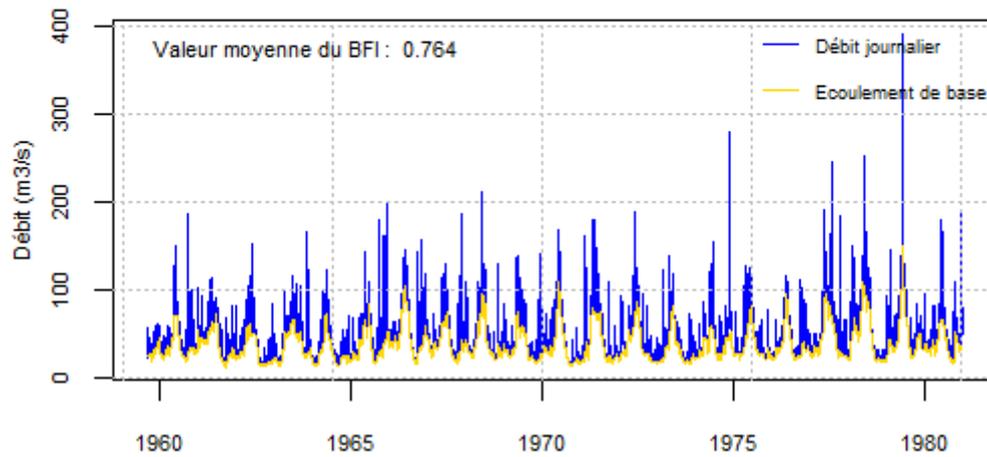
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 0

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 42

BFI calculé sur la période : 0.7

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 2.525

soit une lame d'eau de : 948.6 mm



Nombre d'années : 22 ,de 1959 à 1980

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 49.006

soit une lame d'eau de : 1380.8 mm

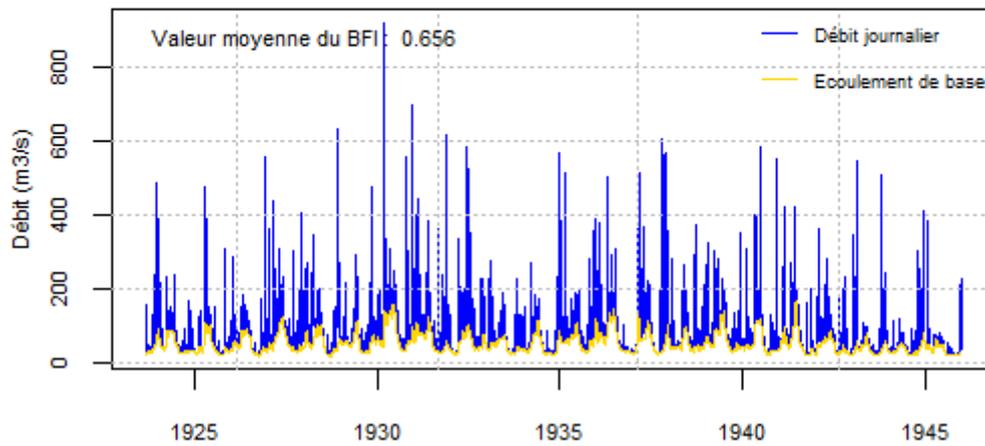
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 12.3

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 390

BFI calculé sur la période : 0.764

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 37.412

soit une lame d'eau de : 1054.1 mm



Nombre d'années : 23 ,de 1923 à 1945

Moyenne des débits (m3/s): 76.513

soit une lame d'eau de : 937.7 mm

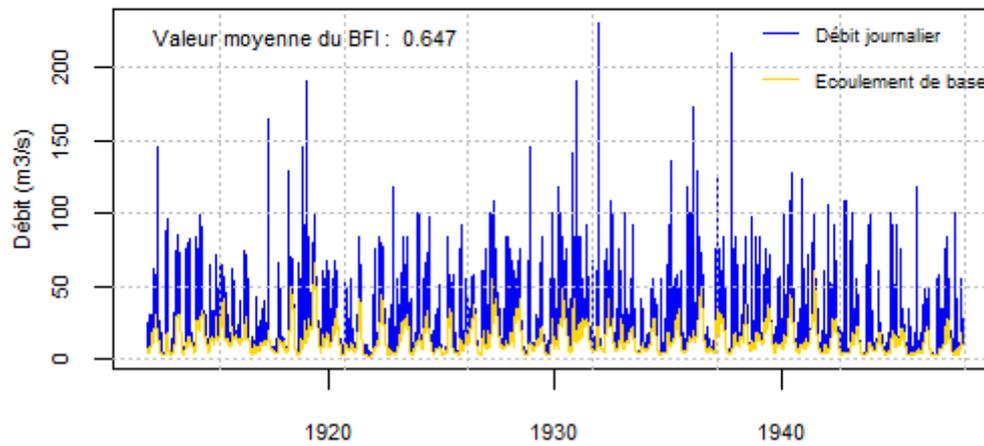
Minimum (m3/s): 17

Maximum (m3/s) : 920

BFI calculé sur la période : 0.656

->Moyenne de l'écoulement de base (m3/s): 50.188

soit une lame d'eau de : 615.1 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1912 à 1947

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 20.242

soit une lame d'eau de : 1309 mm

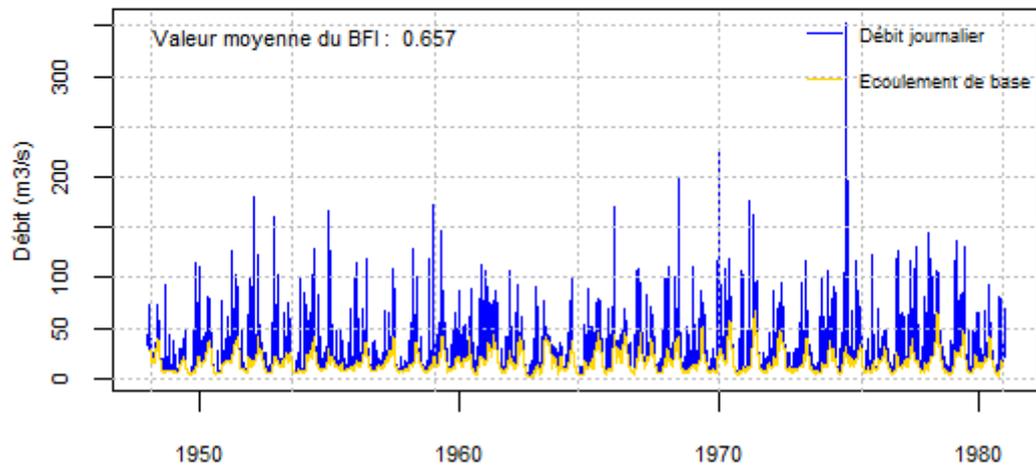
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 2.3

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 230

BFI calculé sur la période : 0.647

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 13.099

soit une lame d'eau de : 847.1 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980

Moyenne des débits (m3/s): 24.275

soit une lame d'eau de : 1802.5 mm

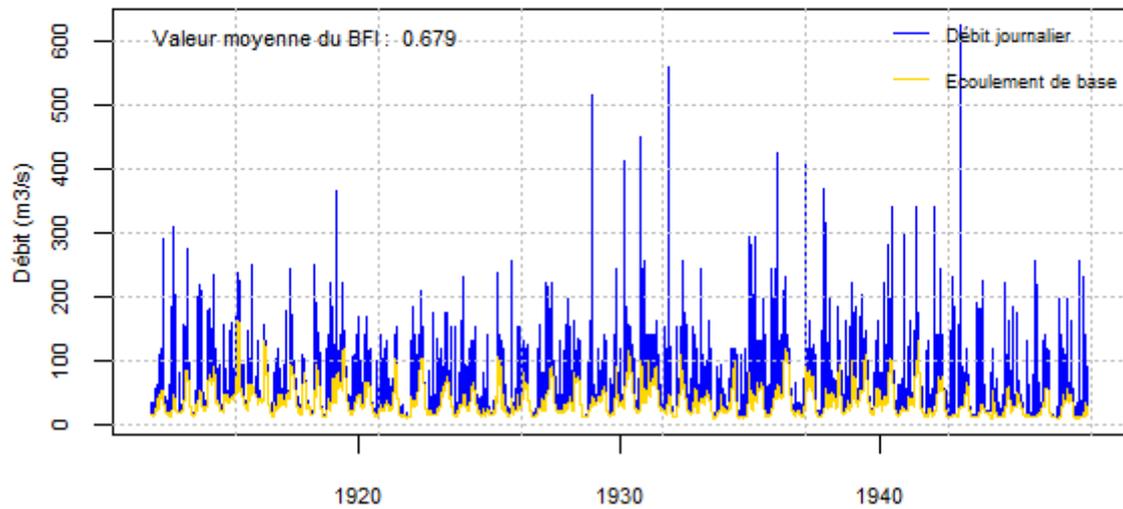
Minimum (m3/s): 1.1

Maximum (m3/s) : 352

BFI calculé sur la période : 0.657

->Moyenne de l'écoulement de base (m3/s): 15.917

soit une lame d'eau de : 1181.9 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1912 à 1947

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 51.342

soit une lame d'eau de : 1493.3 mm

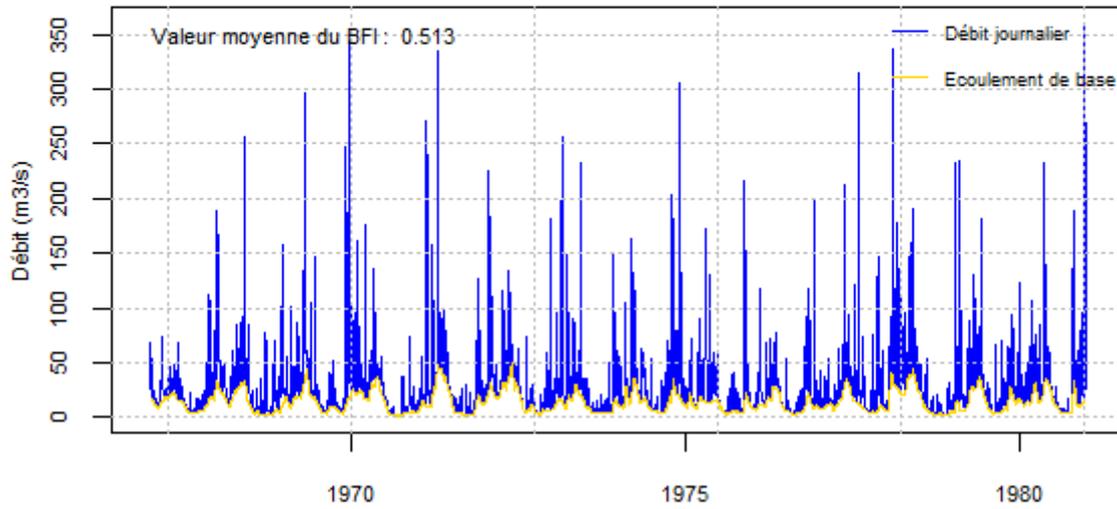
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 8.55

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 625

BFI calculé sur la période : 0.679

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 34.874

soit une lame d'eau de : 1014.3 mm



Nombre d'années : 14 ,de 1967 à 1980

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 27.716

soit une lame d'eau de : 1822.2 mm

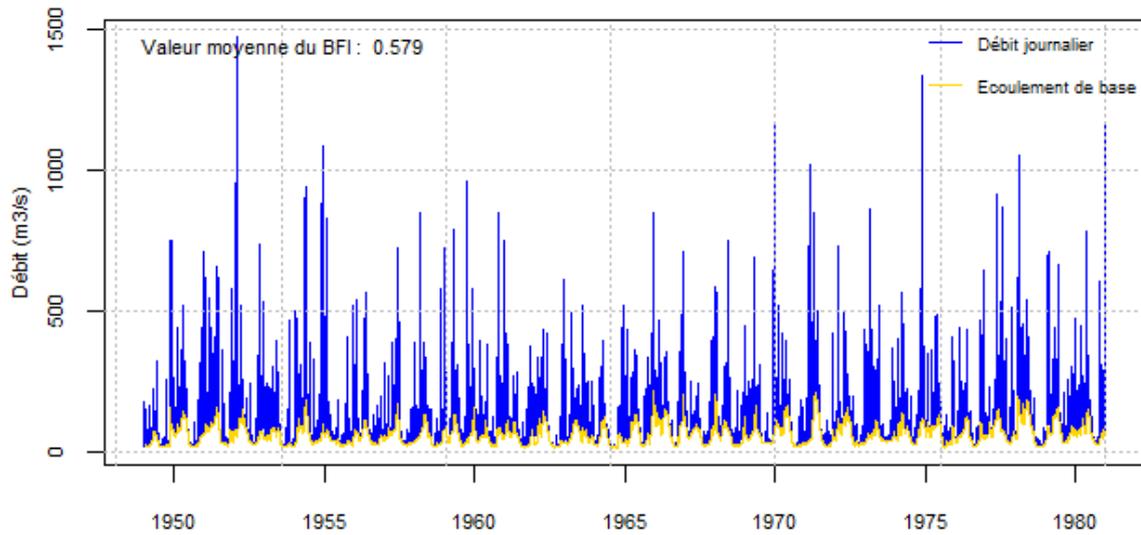
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 1.01

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 360

BFI calculé sur la période : 0.513

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 14.116

soit une lame d'eau de : 928.1 mm



Nombre d'années : 32 ,de 1949 à 1980

Moyenne des débits (m3/s): 101.25

soit une lame d'eau de : 1301 mm

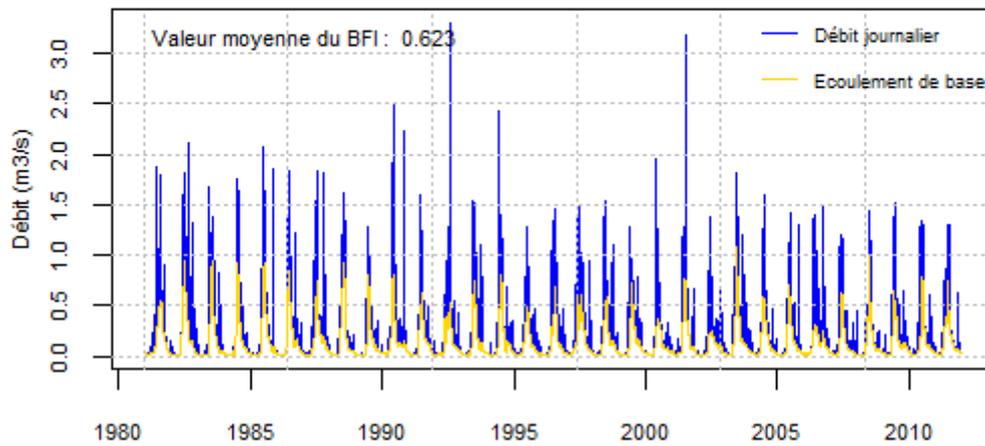
Minimum (m3/s): 11

Maximum (m3/s) : 1470

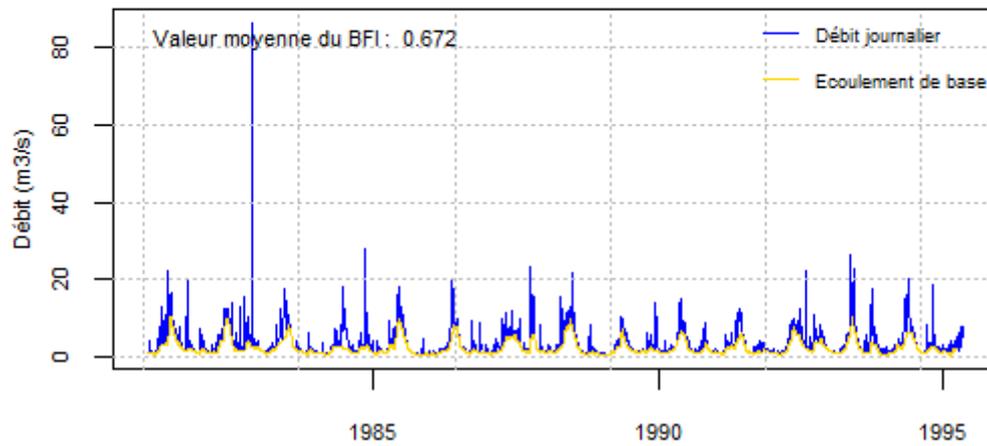
BFI calculé sur la période : 0.579

->Moyenne de l'écoulement de base (m3/s): 58.493

soit une lame d'eau de : 751.6 mm



Nombre d'années : 31 ,de 1981 à 2011  
Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 0.225  
soit une lame d'eau de : 1420.1 mm  
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 0  
Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 3.3  
BFI calculé sur la période : 0.623  
->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 0.14  
soit une lame d'eau de : 883.6 mm



Nombre d'années : 15 ,de 1981 à 1995

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 3.414

soit une lame d'eau de : 1282.6 mm

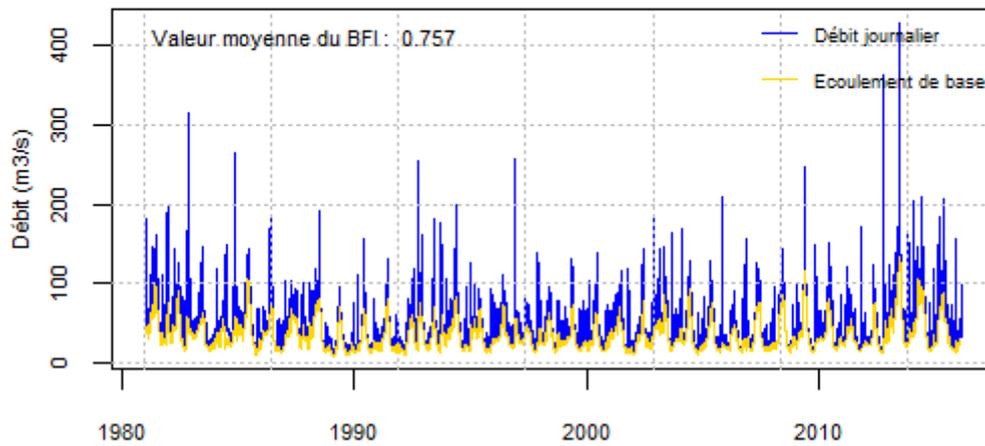
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 0.116

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 86.3

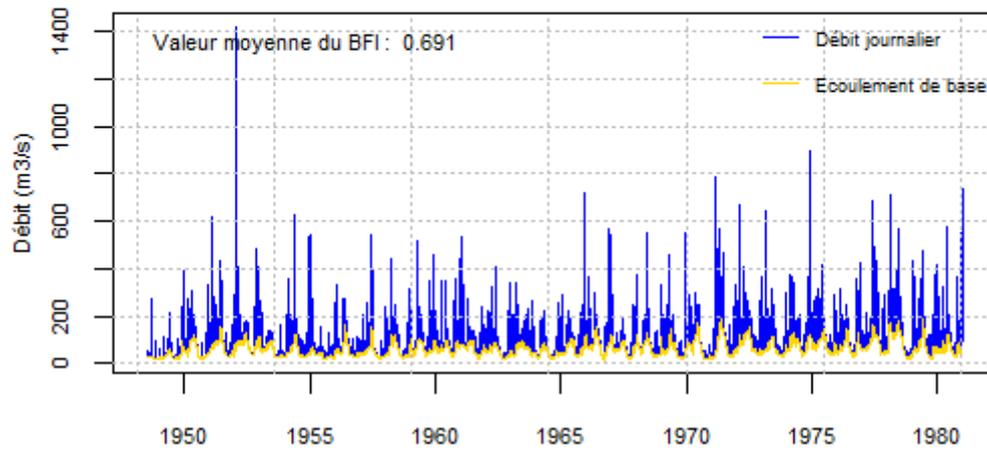
BFI calculé sur la période : 0.672

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 2.291

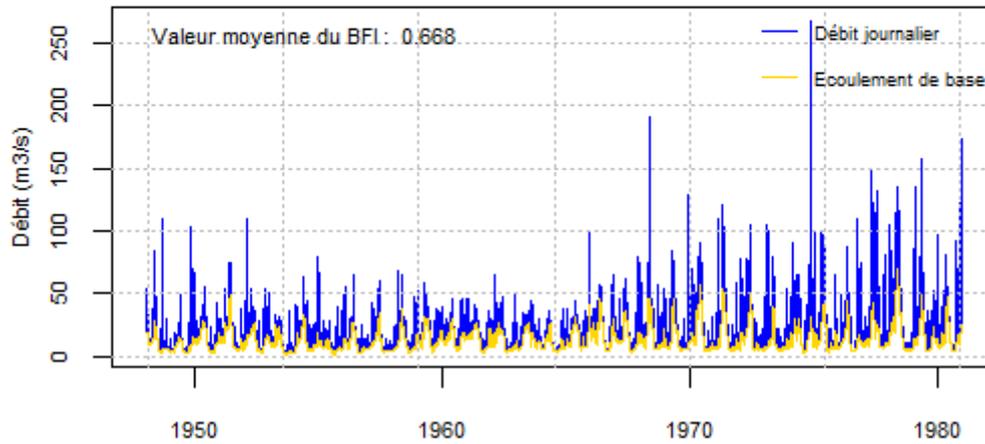
soit une lame d'eau de : 860.7 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1981 à 2016  
Moyenne des débits (m3/s): 44.226  
soit une lame d'eau de : 1246.1 mm  
Minimum (m3/s): 7.44  
Maximum (m3/s) : 429  
BFI calculé sur la période : 0.757  
->Moyenne de l'écoulement de base (m3/s): 33.476  
soit une lame d'eau de : 943.2 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980  
Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 88.661  
soit une lame d'eau de : 1086.6 mm  
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 14.2  
Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 1420  
BFI calculé sur la période : 0.691  
->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 61.168  
soit une lame d'eau de : 749.6 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 19.808

soit une lame d'eau de : 1280.9 mm

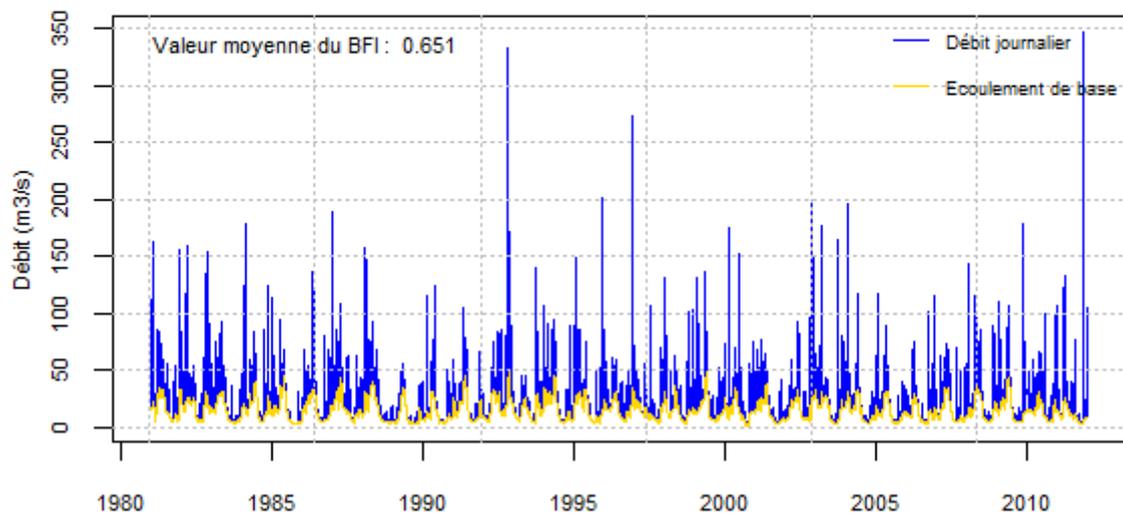
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 1.88

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 267

BFI calculé sur la période : 0.668

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 13.222

soit une lame d'eau de : 855 mm



Nombre d'années : 31 ,de 1981 à 2011

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 22.574

soit une lame d'eau de : 1676.2 mm

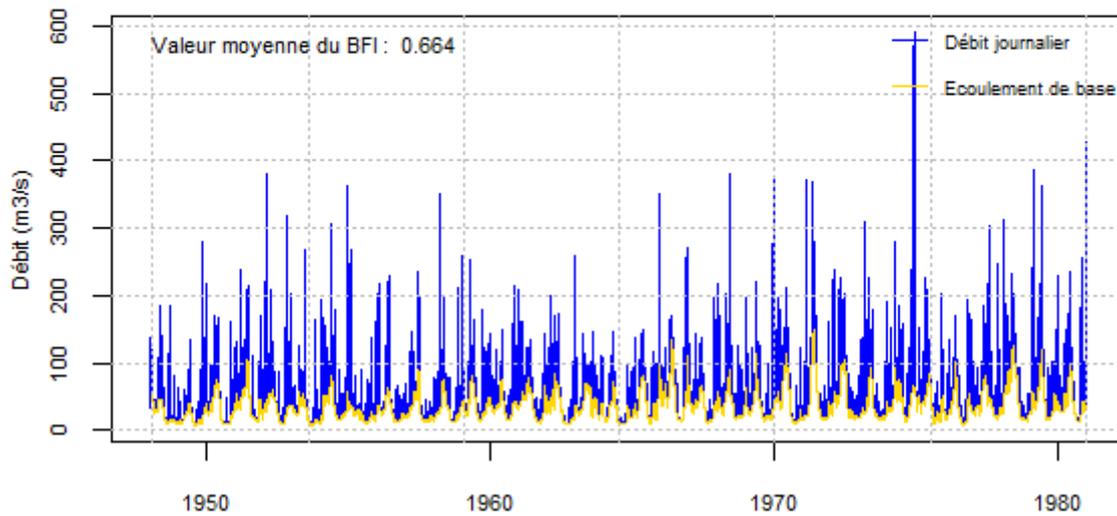
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 1.59

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 347

BFI calculé sur la période : 0.651

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 14.687

soit une lame d'eau de : 1090.6 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1948 à 1980

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 53.104

soit une lame d'eau de : 1544.5 mm

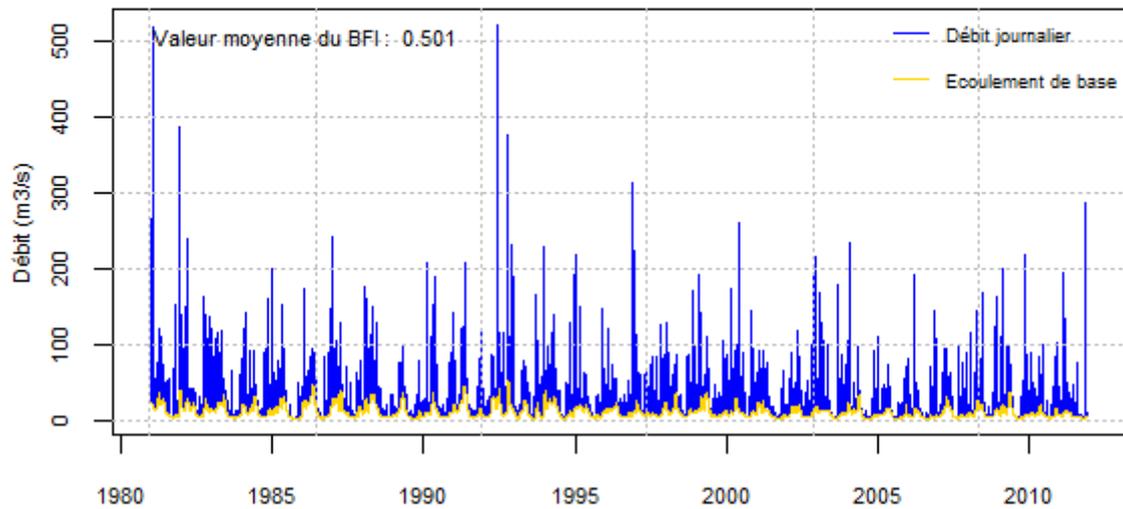
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 7.3

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 590

BFI calculé sur la période : 0.664

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 35.157

soit une lame d'eau de : 1022.6 mm



Nombre d'années : 31 ,de 1981 à 2011

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 22.138

soit une lame d'eau de : 1455.5 mm

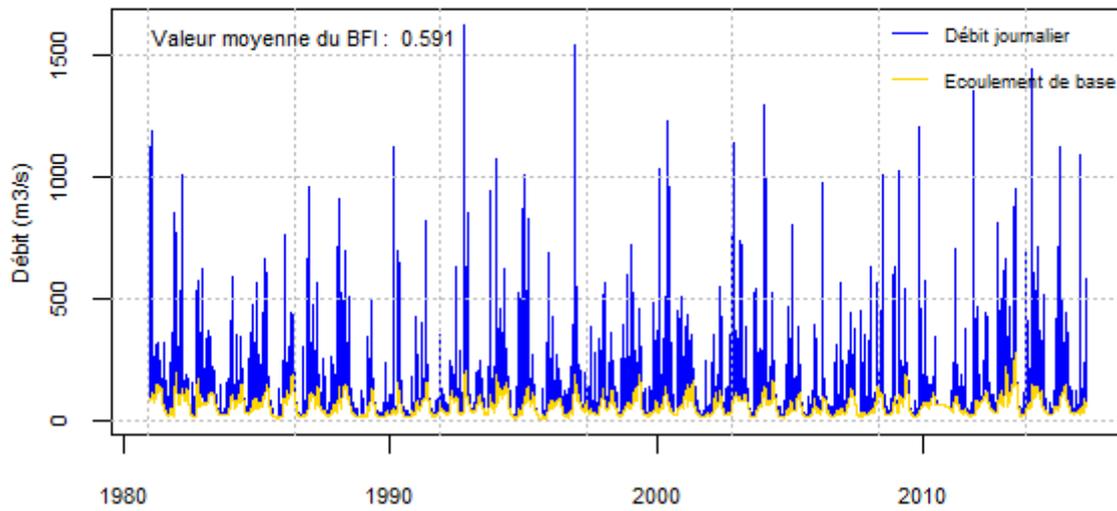
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 2.29

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 522

BFI calculé sur la période : 0.501

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 11.093

soit une lame d'eau de : 729.3 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1981 à 2016

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 102.271

soit une lame d'eau de : 1314.1 mm

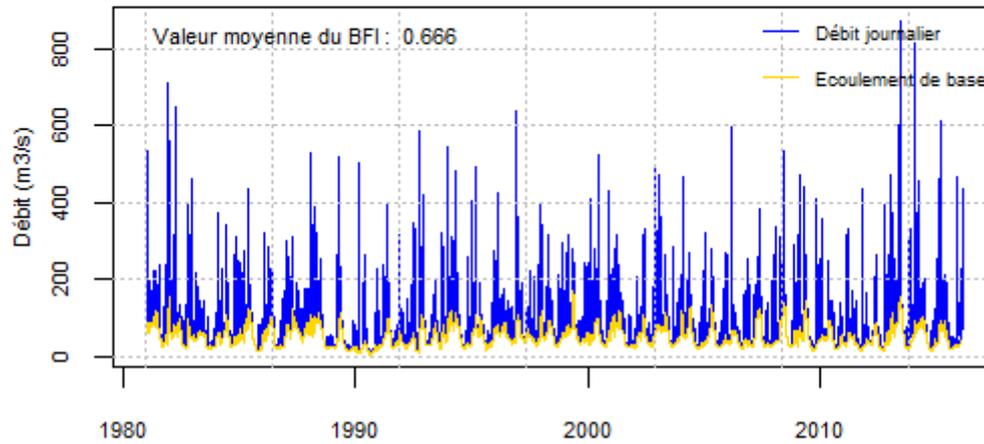
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 9.02

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 1620

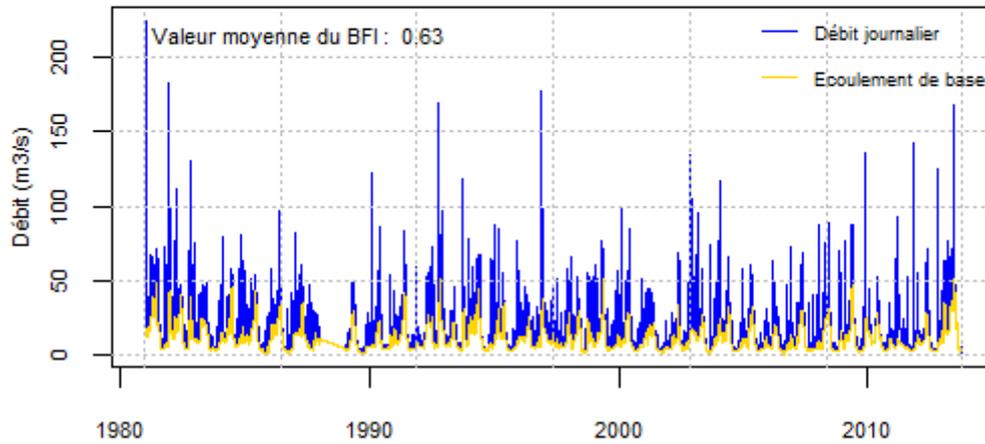
BFI calculé sur la période : 0.591

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 60.323

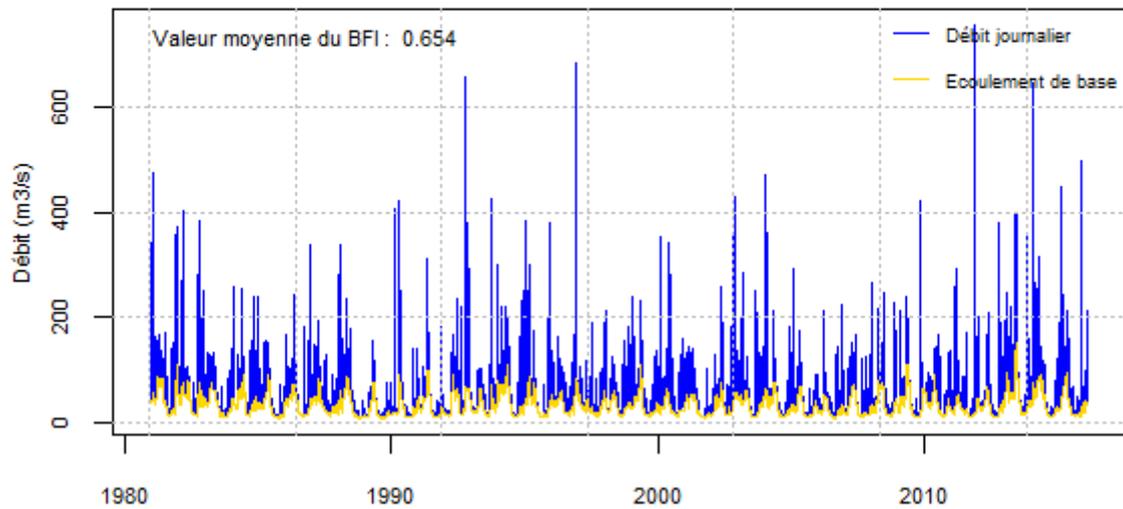
soit une lame d'eau de : 775.1 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1981 à 2016  
Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 76.987  
soit une lame d'eau de : 943.5 mm  
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 6.25  
Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 873  
BFI calculé sur la période : 0.666  
->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 51.069  
soit une lame d'eau de : 625.9 mm



Nombre d'années : 33 ,de 1981 à 2013  
Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 18.291  
soit une lame d'eau de : 1182.8 mm  
Minimum (m<sup>3</sup>/s): 1.03  
Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 224  
BFI calculé sur la période : 0.63  
->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 11.419  
soit une lame d'eau de : 738.4 mm



Nombre d'années : 36 ,de 1981 à 2016

Moyenne des débits (m<sup>3</sup>/s): 50.686

soit une lame d'eau de : 1474.2 mm

Minimum (m<sup>3</sup>/s): 7.92

Maximum (m<sup>3</sup>/s) : 755

BFI calculé sur la période : 0.654

->Moyenne de l'écoulement de base (m<sup>3</sup>/s): 33.098

soit une lame d'eau de : 962.7 mm

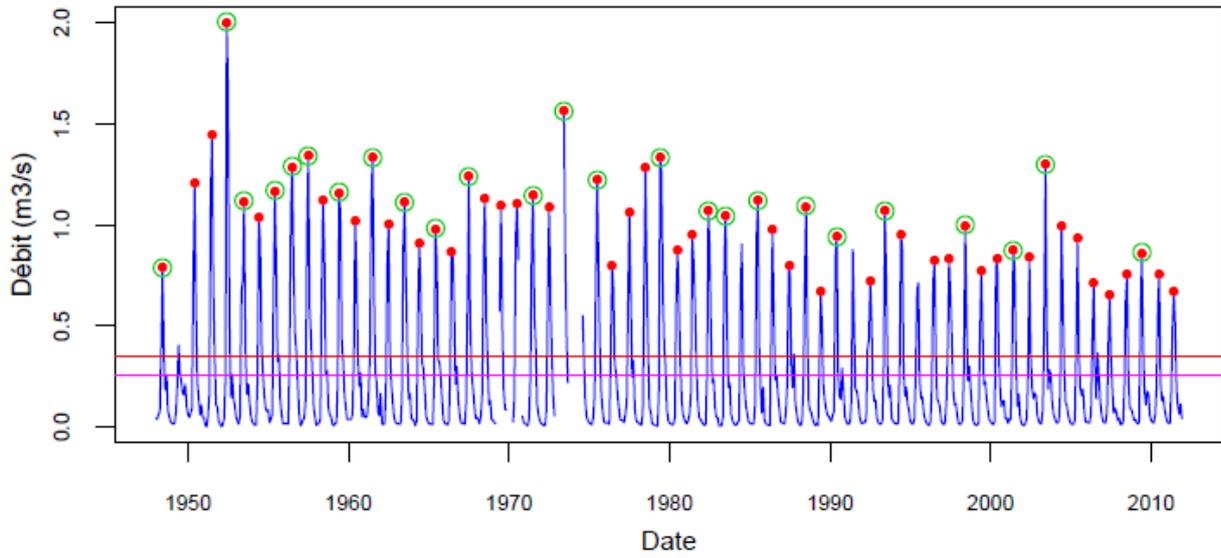


## **Annexe 8**

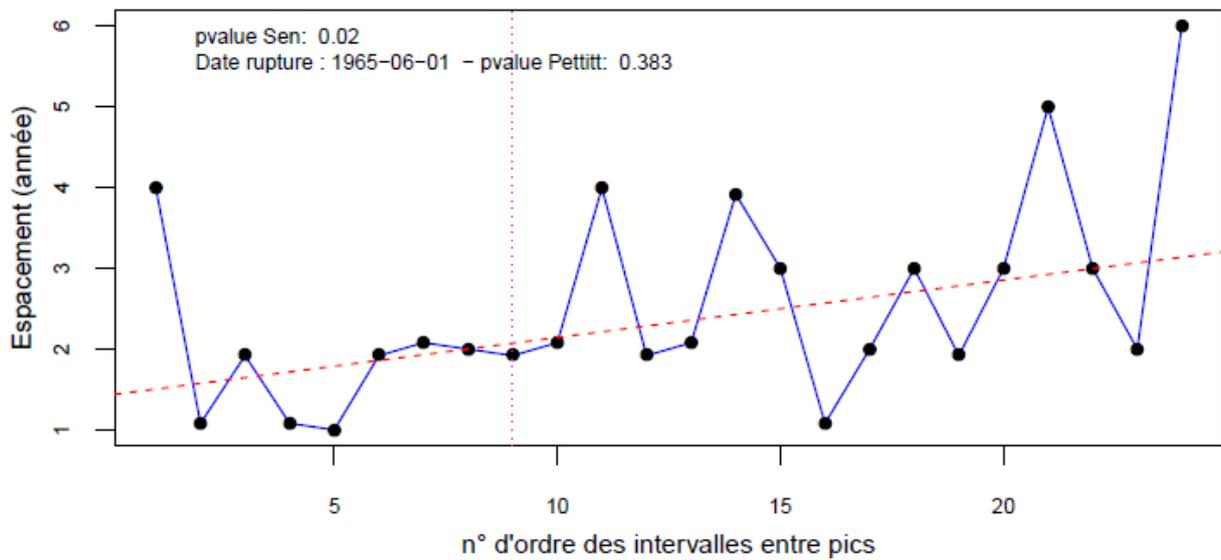
### **Analyse des pics de débits**



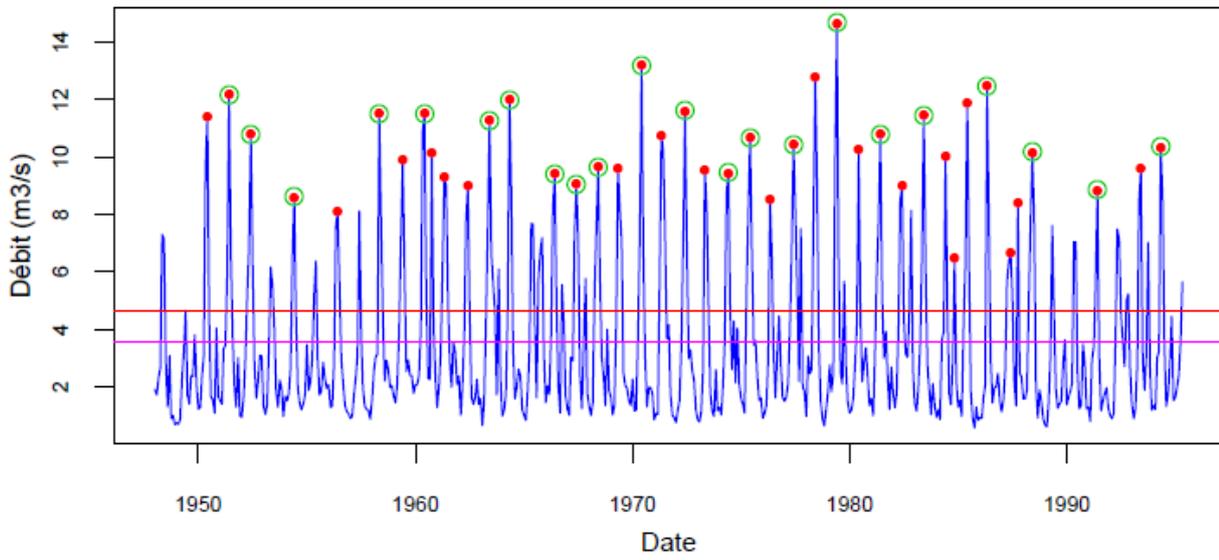
QJ\_0105110 Débits moyens mensuels et pics



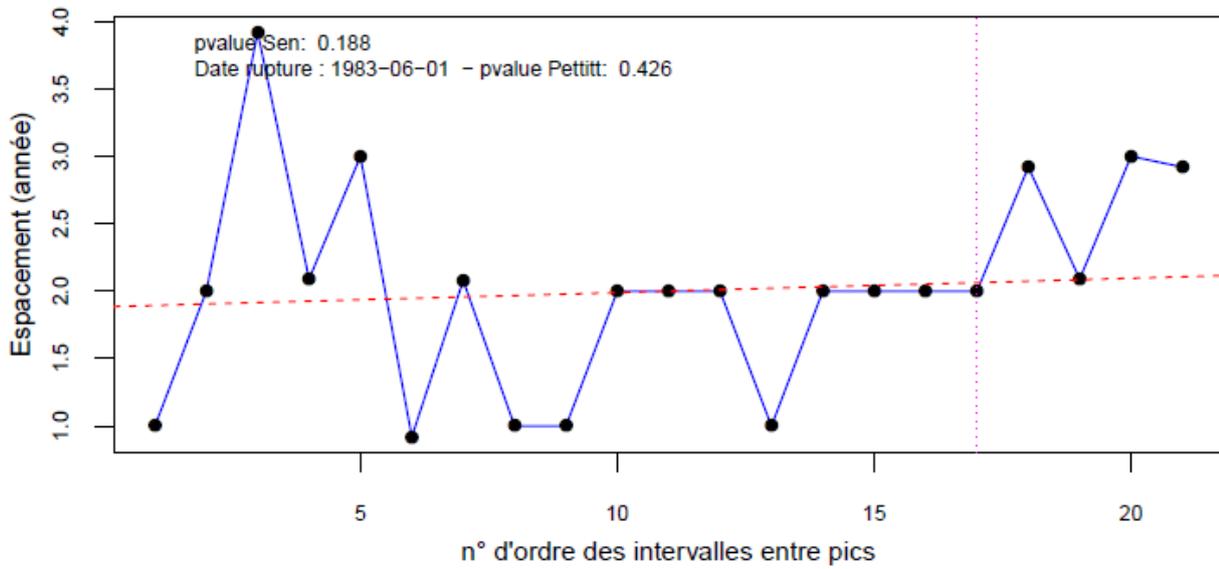
Intervalle de temps entre pics



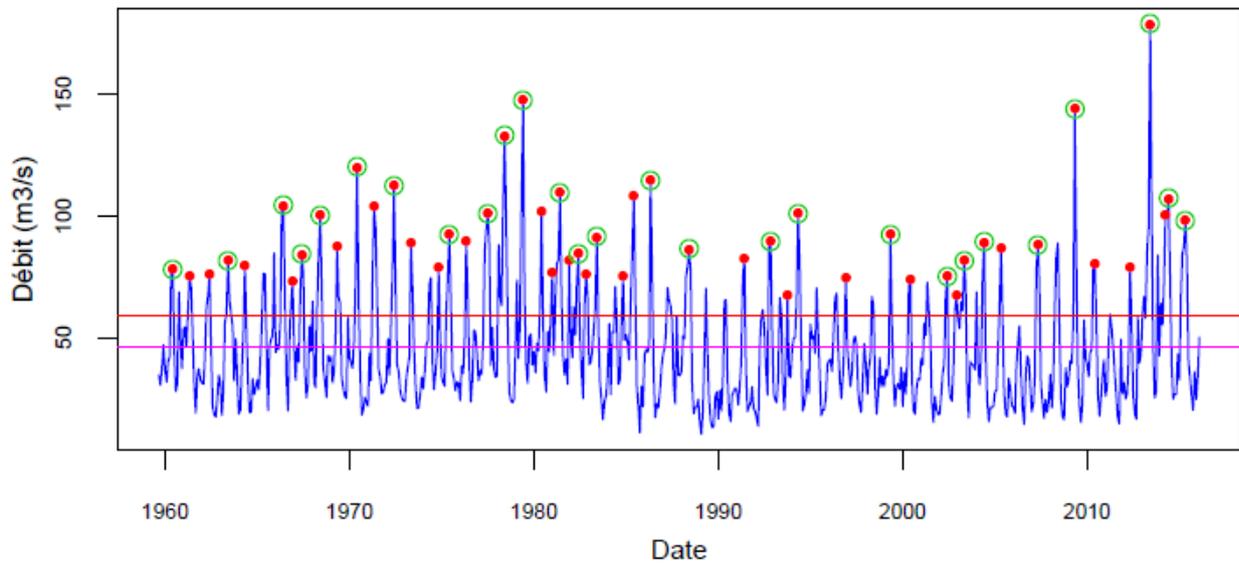
QJ\_4124010 Débits moyens mensuels et pics



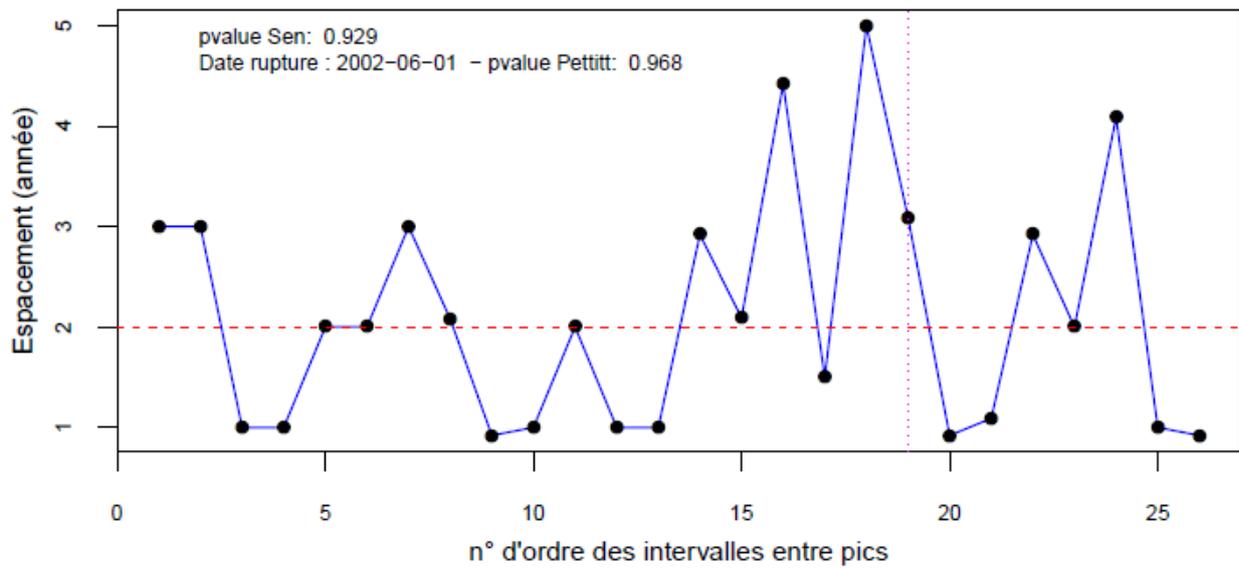
Intervalles de temps entre pics



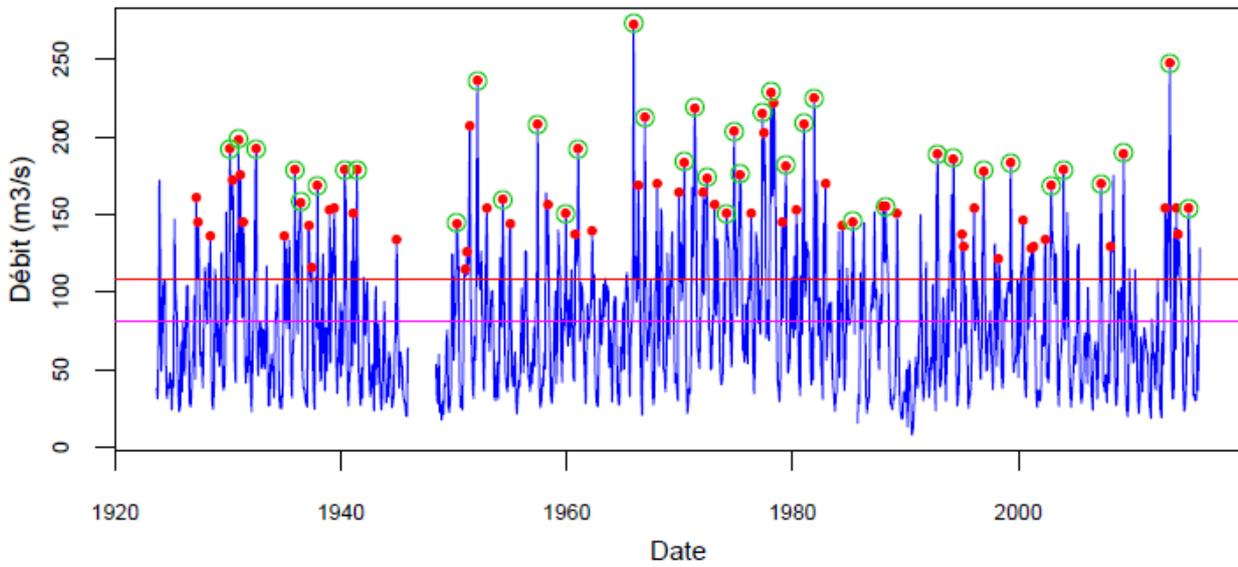
QJ\_4801010 Débits moyens mensuels et pics



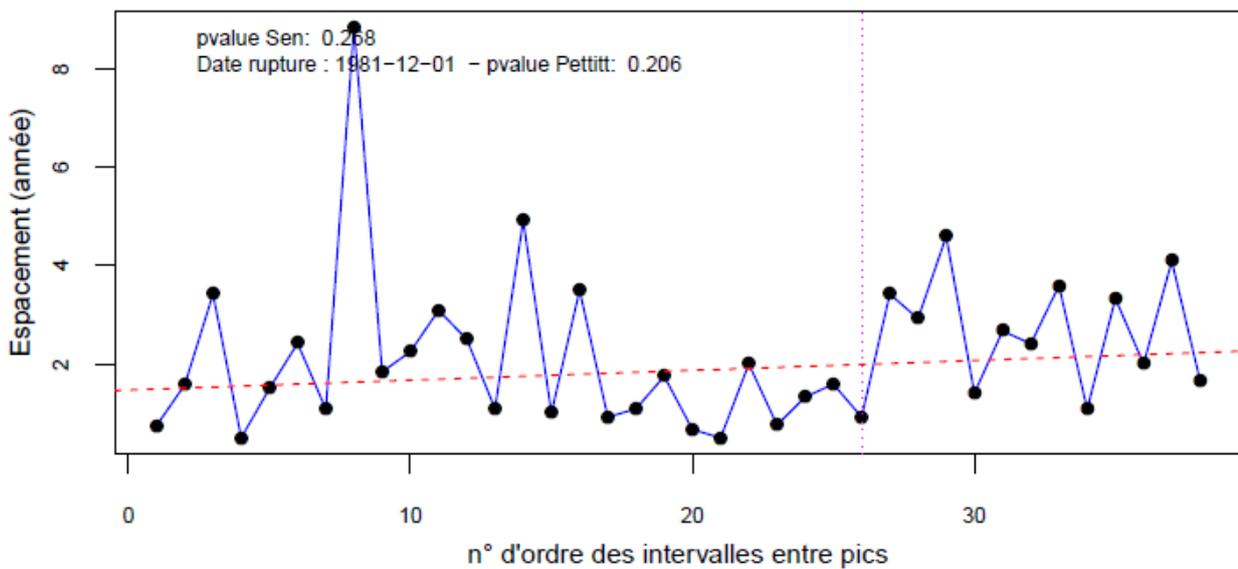
Intervalles de temps entre pics



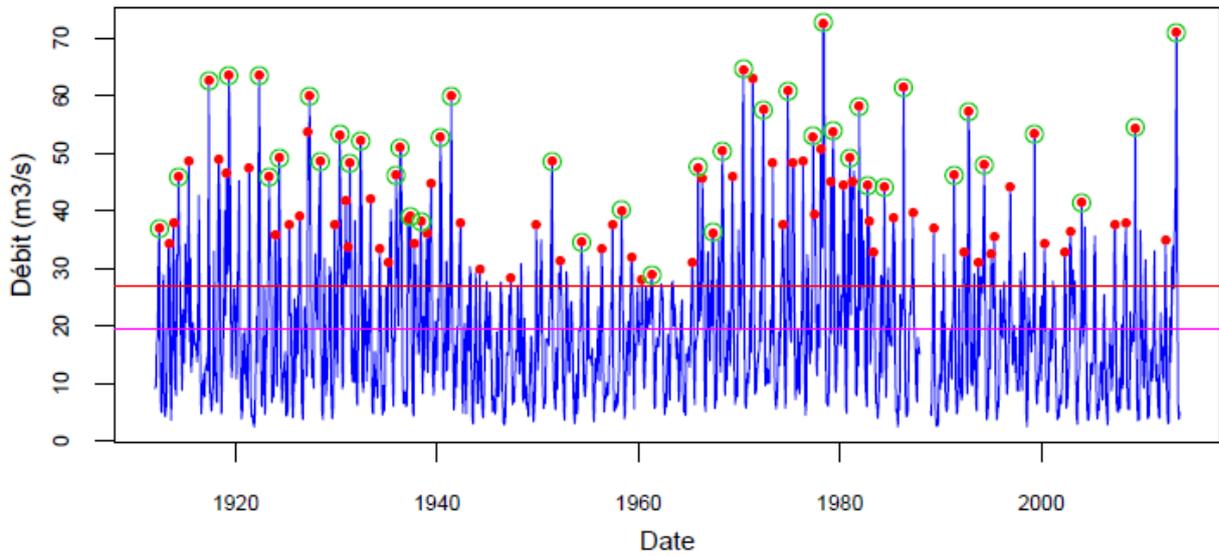
QJ\_5501010 Débits moyens mensuels et pics



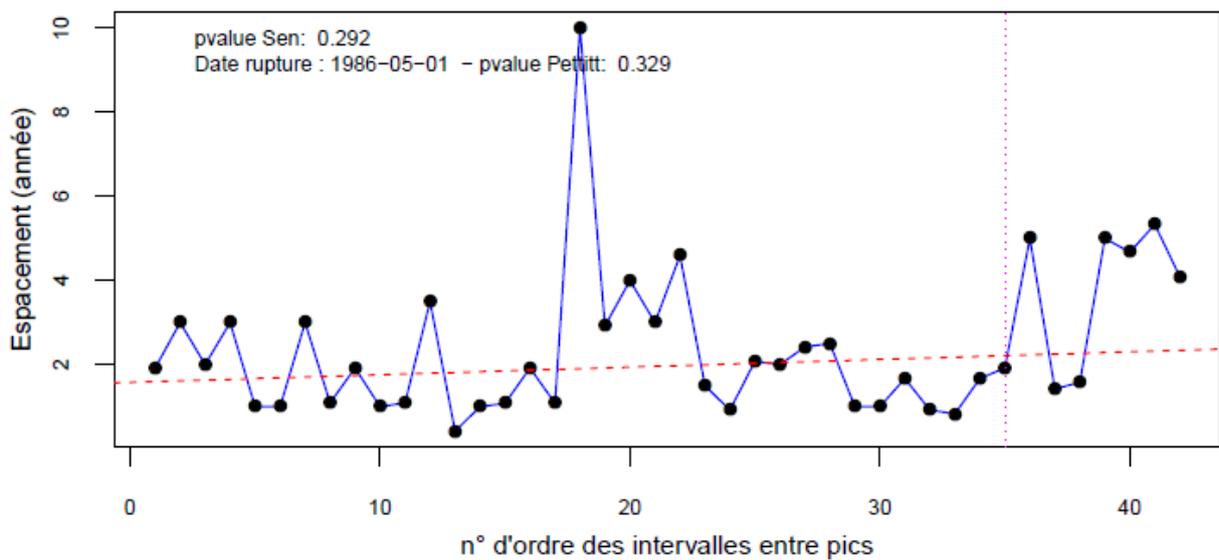
Intervalles de temps entre pics



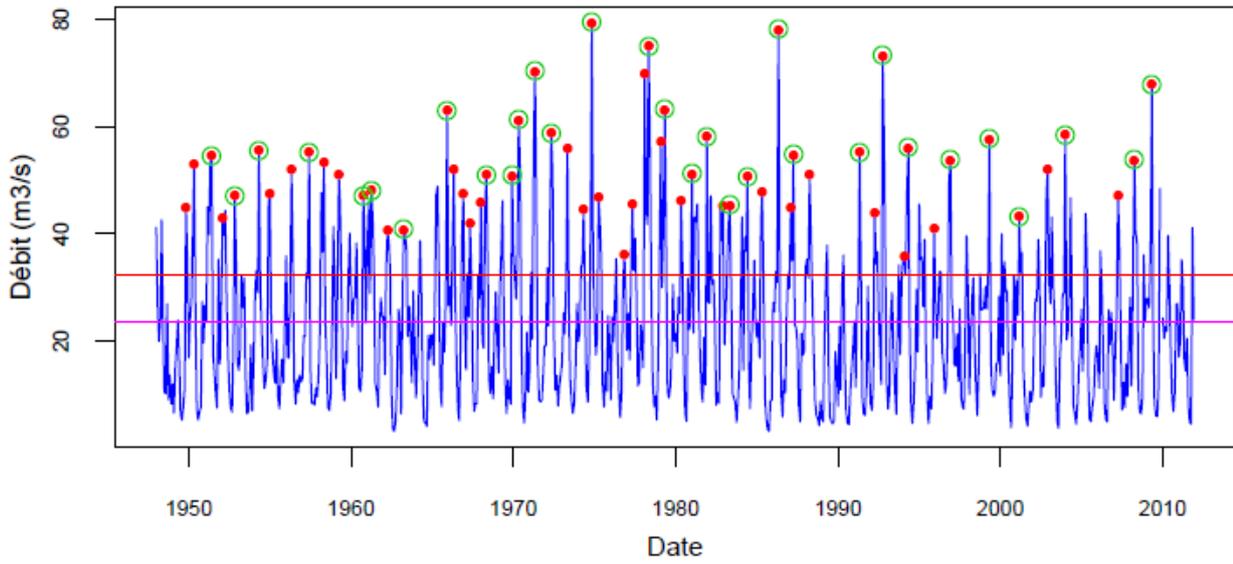
QJ\_6142910 Débits moyens mensuels et pics



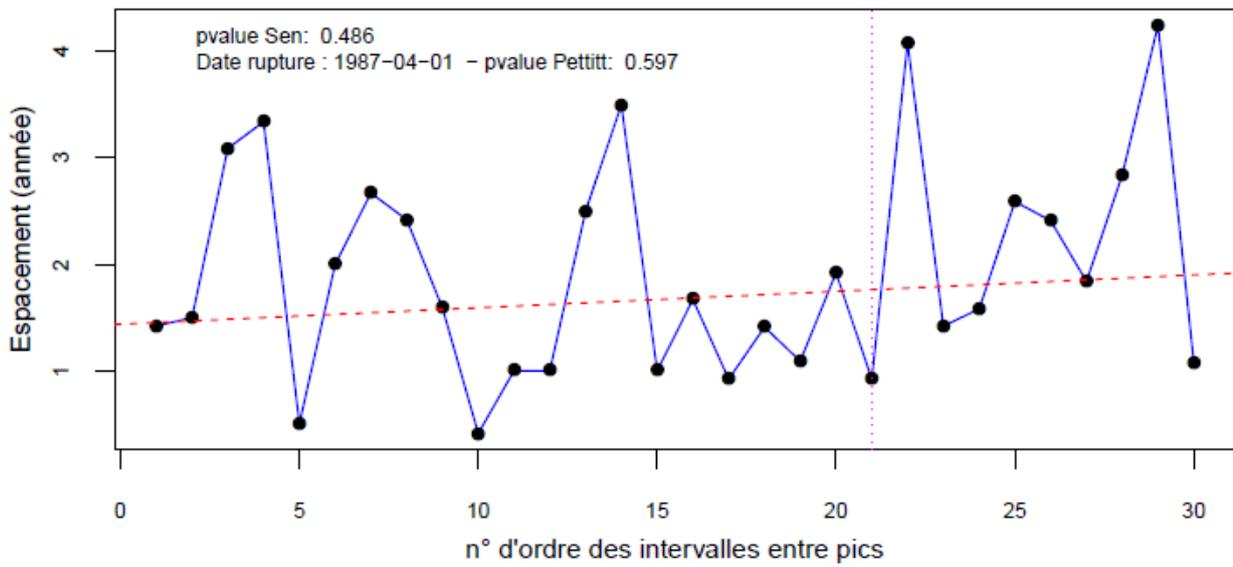
Intervalles de temps entre pics



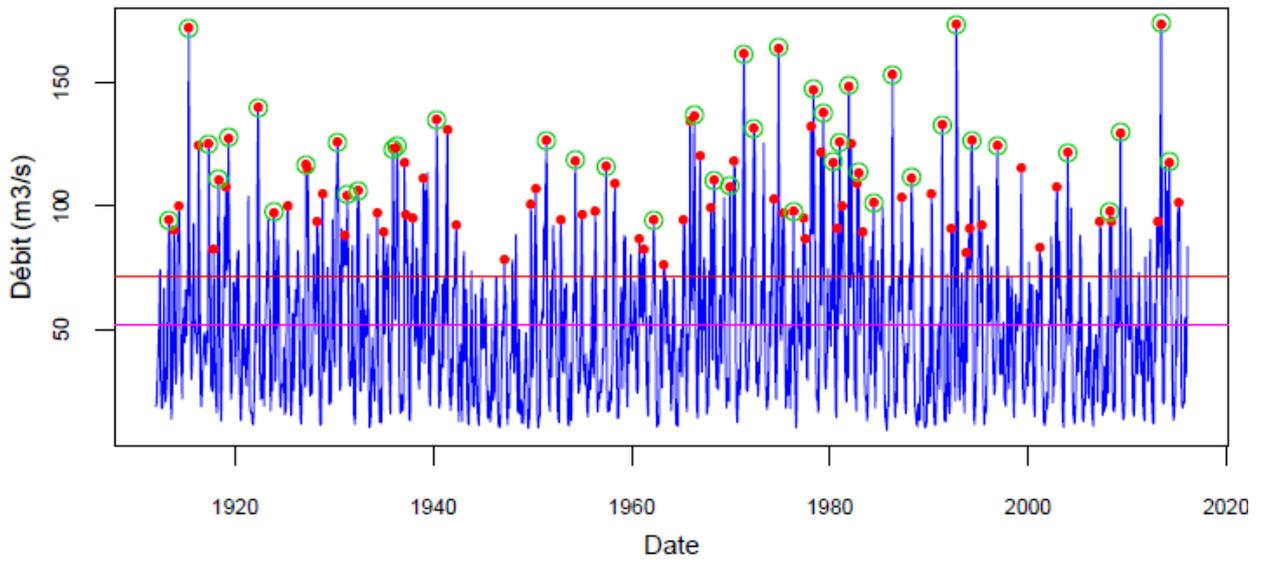
QJ\_6332510 Débits moyens mensuels et pics



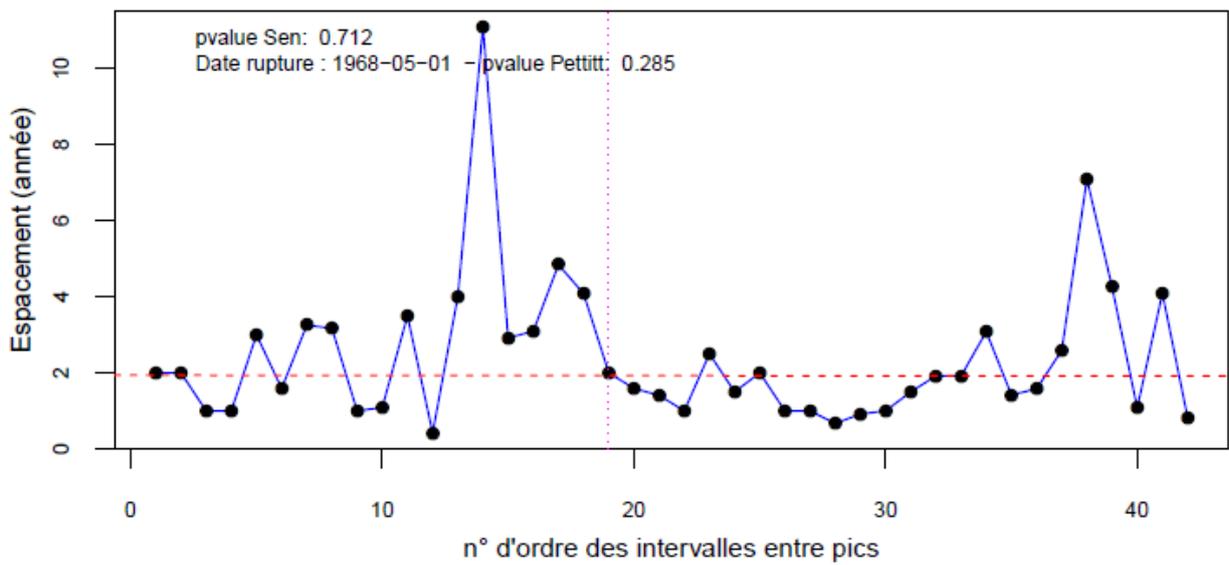
Intervalles de temps entre pics



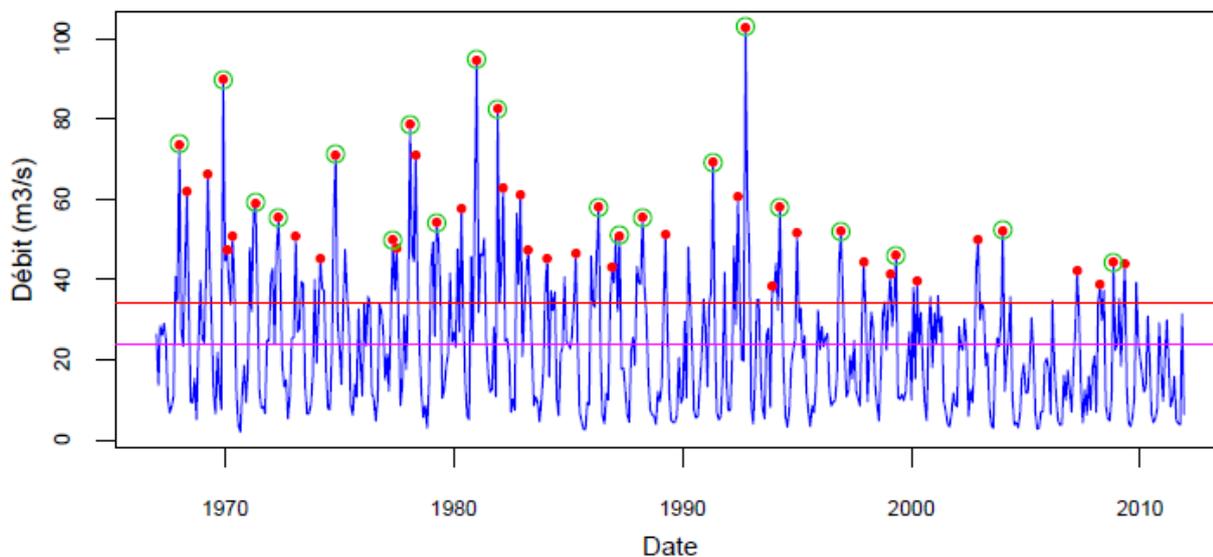
QJ\_7002910 Débits moyens mensuels et pics



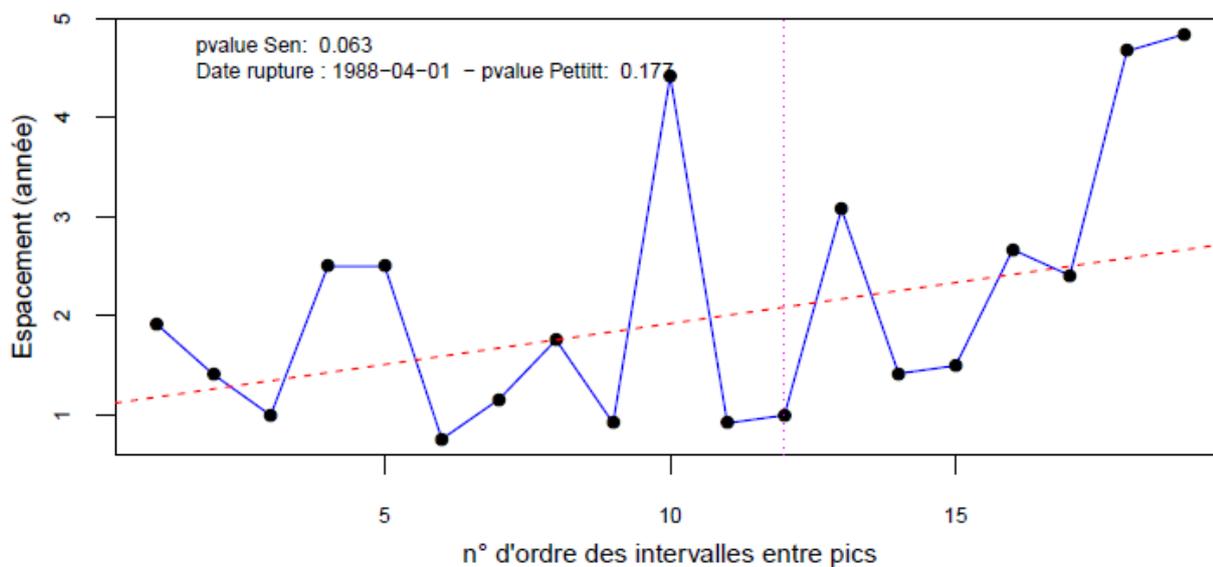
Intervalles de temps entre pics



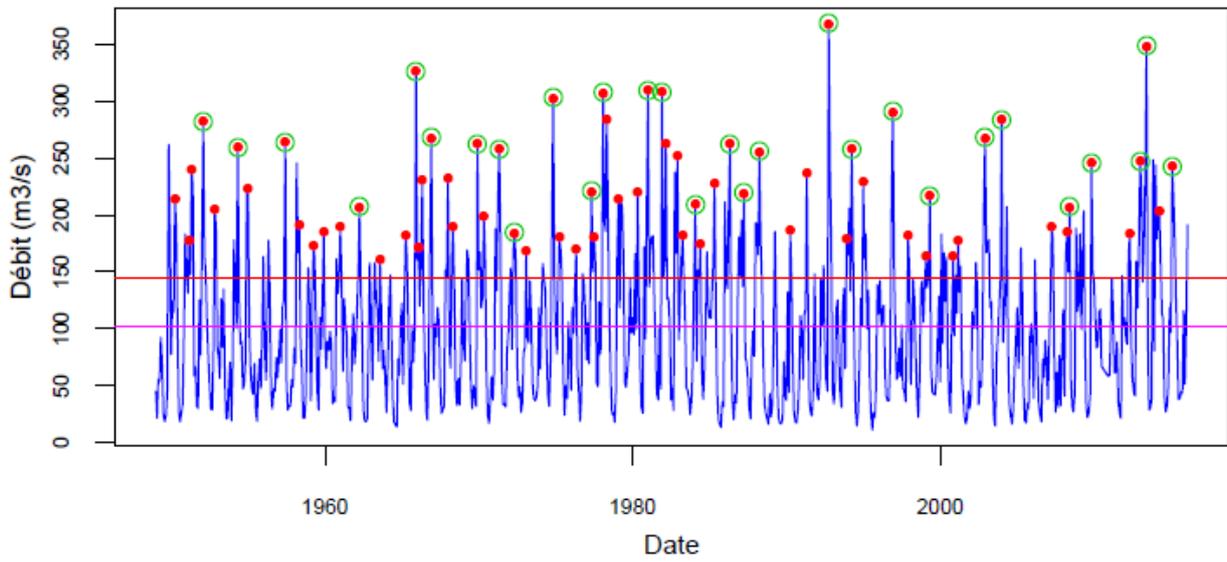
QJ\_7322510 Débits moyens mensuels et pics



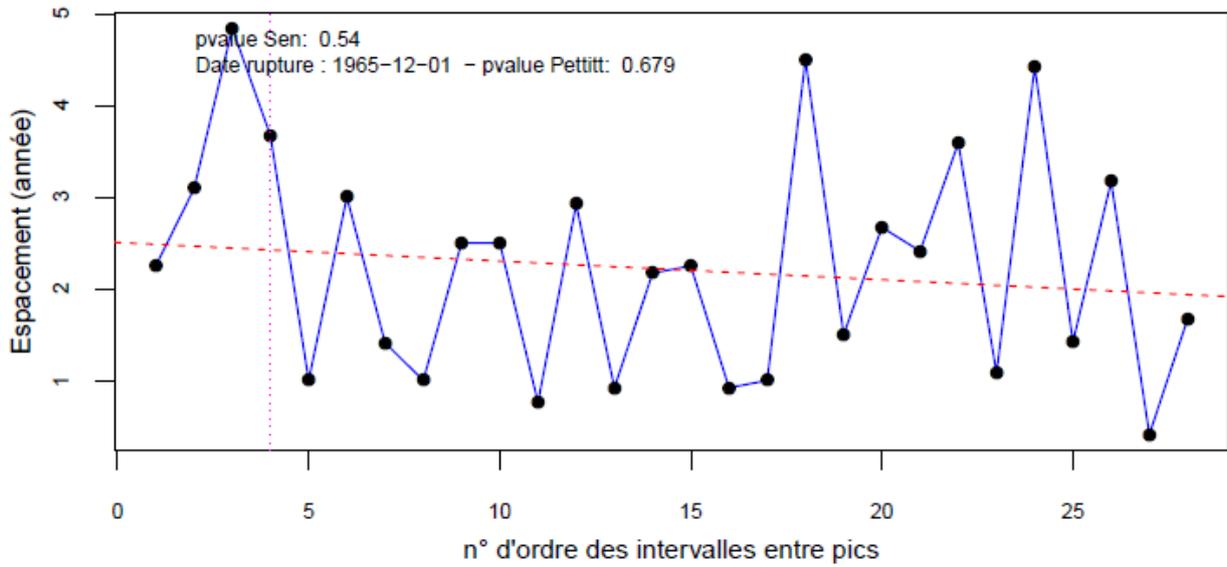
Intervalles de temps entre pics



QJ\_7412910 Débits moyens mensuels et pics



Intervalles de temps entre pics





Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - [www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)

**Direction régionale Nouvelle-Aquitaine**

Parc Technologique Europarc  
24, Avenue Léonard de Vinci

33600 – Pessac – France

Tél. : 05 57 26 52 70