

COMMUNAUTE FRANCAISE DE BELGIQUE
ACADEMIE UNIVERSITAIRE WALLONIE-EUROPE
UNIVERSITE DE LIEGE – GEMBLOUX AGRO-BIO TECH

**ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE POUR DES SITES
NON JAUGÉS. APPLICATION EN RÉGION WALLONNE**

Sébastien GAILLIEZ

Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de docteur en sciences
agronomiques et ingénierie biologique

Promoteurs : Prof A. DEGRE & D. XANTHOULIS
2013

Sébastien Gailliez, 2013. Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en Région wallonne (Thèse de doctorat). Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, 190 p, 118 fig., 39 tabl.

Résumé :

La mise en œuvre de la Directive sur l'Eau, l'attribution des permis d'environnement et le contexte de l'hydro-électricité, demandent régulièrement la connaissance des débits caractérisant l'étiage d'un cours d'eau.

L'objectif de cette thèse est de développer un modèle permettant de définir ce débit en n'importe quel point d'un linéaire de cours d'eau non jaugé, et ce, pour n'importe quelle période de retour, ainsi que l'incertitude sur la valeur calculée. Les variables hydrologiques choisies sont le percentile95 (débit atteint ou dépassé 95 pourcents de l'année, Q95) et le MAM7 (plus faible valeur de la moyenne mobile des débits atteints pendant 7 jours consécutifs de l'année).

Après avoir sélectionné les stations de mesures situées sur le territoire wallon sur base d'un certain nombre de critères (taille de l'historique, extrapolation de la courbe de tarage, présence d'algues durant la période estivale, homogénéité des données, ...), une analyse fréquentielle est réalisée sur les débits caractéristiques d'étiage (Q95 et MAM7).

L'extraction de paramètres physiques et climatiques des bassins versants (pente, occupation du sol, superficie du bassin versant, pédologie, hydrogéologie, précipitations, ...), permet de régionaliser la zone étudiée par classification numérique. Les bassins versants des 59 stations de mesures retenues sont regroupés en quatre zones homogènes qui sont ensuite différencierées à l'aide d'une analyse en composantes principales.

Suite à une analyse de la variance et considérant le nombre peu élevé de stations de mesures retenues dans certains groupes homogènes, un modèle de régression linéaire est défini pour l'ensemble de la Wallonie à partir de 24 paramètres physiques et de la méthode 'Stepwise', pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20 et 50 ans. Les modèles obtenus permettent la détermination d'une valeur de débit d'étiage en n'importe quel point d'un petit bassin versant non jaugé et l'estimation de l'incertitude sur base des intervalles de confiance. Les deux paramètres retenus dans les modèles de régression sont le coefficient de tarissement et la percolation.

En imposant la forme du modèle pour chaque période de retour et en analysant la relation entre les coefficients des paramètres explicatifs et les périodes de retour, on met en évidence la possibilité d'interpoler entre les périodes de retour. Ainsi, un modèle global permettant le calcul d'un débit caractérisant l'étiage pour n'importe quelle période de retour (entre 2 et 50 ans) est déduit.

Les modèles de régression sont ensuite validés et une mise en œuvre simple de ces derniers est proposée.

L'identification des régions homogènes devra conduire à la construction de modèles dédiés à chaque région selon la même méthodologie, lorsque le nombre de stations disposant d'une chronique suffisante et répondant aux critères de qualité, sera suffisant dans chacune d'elles.

Sébastien Gailliez, 2013. Low flow discharge estimation at ungauged sites. Application in Walloon Region (PHD Thesis in French). Gembloux, Belgium. University of Liege – Gembloux Agro-Bio Tech, 190 p, 118 fig., 39 tabl.

Summary :

The implementation of European Water framework Directive, environmental permits and the hydroelectric power context require regularly the knowledge of low flow discharge of a river. The aim of this thesis is to develop a model that enables the low flow discharge estimation at any point of an ungauged river, and for any return period and the estimation of the precision of calculated value. The low flow index chosen are Q95 flow quantile (the discharge that is exceeded on 95% of all days) and the MAM7 (Mean Annual 7-day Minimum flow).

After the selection of the monitoring sites in Walloon Region based on some criteria's (recording duration, the proportion of extrapolation of the discharge rating curve, no aquatic vegetation in summer, homogeneous data's, ...), frequency analysis is made on the low flow discharge (Q95 and MAM7).

The determination of physical and climatic characteristics (slope, landcover, catchment area, pedology, hydrogeology, precipitation, ...) enables the regionalization of the study area by cluster analysis. The catchments of the 59 selected monitoring sites are grouped in four homogeneous regions. The four obtained groups are differentiated by a principal component analysis.

After an analysis of variance and considering the small number of selected monitoring sites in some homogeneous groups, a global regression model is defined for the whole Walloon Region from 24 characteristics of catchment and by stepwise method and for return periods of 2, 5, 10, 20 and 50 years. The obtained models enable to calculate the low flow discharge at any point of a ungauged river and the estimation of uncertainty based on the confidence intervals. The two retained characteristics in regression models are recession coefficient and percolation.

By imposing the model form for each return period and by analysing the relation between the coefficient of underlying parameters and the return periods, we highlight the possibility of interpolation between the return periods. So, we define a global model that enables to calculate low flow discharge for any return period (between 2 and 50 years).

The regression models are afterwards validated and we define an easy setting method.

The homogeneous regions identification must lead to construction models for each region following the same methodology, when the number of monitoring sites, with sufficient recording duration and meeting the quality criteria's, are enough for each of them.

COPYRIGHT. Aux termes de la loi belge du 30 juin 1995, sur le droit d'auteur et les droits voisins, seul l'auteur a le droit de reproduire partiellement ou complètement cet ouvrage de quelque manière et forme que ce soit ou d'en autoriser la reproduction partielle ou complète de quelque manière et sous quelque forme que ce soit. Toute photocopie ou reproduction sous autre forme est donc faite en violation de la dite loi et des modifications ultérieures.

REMERCIEMENTS

Au moment de mettre la touche finale de cette thèse, il m'est essentiel de remercier les différentes personnes qui m'ont aidé de près ou de loin dans la concrétisation de ce projet personnel initié voici cinq ans.

Dans un premier temps, je souhaite remercier Madame le Professeur A. Degré et Monsieur le Professeur D. Xanthoulis, promoteurs de cette thèse, pour leurs précieux conseils et leur support tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse ma profonde gratitude aux membres de mon comité de thèse, Mesdames les Professeurs C. Charles et A. Degré, Messieurs les Professeurs C. Debouche, V. Hallet et D. Xanthoulis. Je tiens à adresser une mention spéciale à C. Charles et V. Hallet qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs.

Mes remerciements les plus chaleureux vont à mon épouse, Valérie, et à mon fils, Baptiste, qui m'ont soutenu et laissé le temps de finaliser cette thèse.

Je remercie également tout le personnel du service 'Soil – Water Systems' de l'Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech, et plus particulièrement, Catherine, Maud, Patricia, Daniel et Arnaud.

J'adresse mes remerciements à l'ensemble de mes collègues de la Direction des Cours d'Eau non navigables du Service public de Wallonie, et en particulier mon Directeur, Monsieur F. Lambot pour m'avoir permis de dégager de temps en temps quelques heures pour la réalisation de cette thèse. Je remercie également Didier de Thysebaert de m'avoir mis le pied à l'étrier de l'hydrométrie, voici treize ans.

Enfin, mes remerciements vont également à mes parents qui m'ont toujours soutenu.

TABLE DES MATIERES

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE	1
1.2	IDENTIFICATION DES BESOINS	2
1.3	MÉTHODOLOGIE.....	3
2	CARACTÉRISATION DE L'ÉTIAGE	5
2.1	DÉFINITION DES PARAMÈTRES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉTIAGE.....	5
2.2	SÉLECTION DES STATIONS DE MESURES.....	7
2.2.1	<i>Introduction.....</i>	7
2.2.2	<i>Superficie des bassins versants des stations de mesures.....</i>	9
2.2.3	<i>Validation des données horaires de hauteur.....</i>	11
2.2.4	<i>Augmentation du nombre de stations de mesures potentielles.....</i>	12
2.2.5	<i>Analyse des données manquantes.....</i>	17
2.2.6	<i>Stations de mesures obtenues par calcul.....</i>	19
2.2.7	<i>Stations de mesures ayant un faible débit.....</i>	22
2.2.8	<i>Relation hauteur - débit : Présence d'algues durant la période estivale.....</i>	22
2.2.9	<i>Relation hauteur – débit : Extrapolation de la courbe de tarage</i>	24
2.2.10	<i>Durée minimum de l'historique.....</i>	25
2.2.11	<i>Homogénéité des données</i>	32
2.2.12	<i>Autres stations de mesures supprimées.....</i>	36
2.2.13	<i>Liste finale des stations de mesures sélectionnées</i>	36
3	ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES DÉBITS D'ÉTIAGE.....	37
3.1	INTRODUCTION.....	37
3.2	ESTIMATION DES PARAMÈTRES DE LA LOI.....	38
3.2.1	<i>Introduction.....</i>	38
3.2.2	<i>Méthode des Moments</i>	38
3.2.3	<i>Méthode du Maximum de Vraisemblance</i>	39
3.2.4	<i>Méthode des L-Moments et des Moments de Probabilités pondérés</i>	40
3.3	LOIS UTILISÉES EN HYDROLOGIE	43
3.3.1	<i>Distribution NORMALE.....</i>	43
3.3.2	<i>Distribution LOGNORMALE.....</i>	44
3.3.3	<i>Distribution des VALEURS EXTREMES GENERALISEES.....</i>	45
3.3.4	<i>Distribution GAMMA.....</i>	48
3.3.5	<i>Distribution PEARSON</i>	48
3.4	CHOIX DU TYPE DE LOI DÉDIÉE À L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES ÉTIAGES.....	49
3.4.1	<i>Introduction.....</i>	49
3.4.2	<i>Test d'adéquation</i>	49
3.4.3	<i>Contrôle visuel de l'ajustement</i>	51
3.5	MÉTHODE UTILISÉE POUR LE CHOIX DE LA MEILLEURE LOI.....	53
3.5.1	<i>Outil informatique</i>	53
3.5.2	<i>Application de la loi de FRECHET</i>	53
3.5.3	<i>Méthodologie d'ajustement</i>	54
3.5.4	<i>Sélection des meilleurs ajustements</i>	55
3.5.5	<i>Choix visuel du meilleur ajustement</i>	56
3.6	ANALYSE DES RÉSULTATS.....	58
3.6.1	<i>Introduction</i>	58
3.6.2	<i>Débits caractérisant l'étiage en fonction de la période de retour</i>	58
3.6.3	<i>Lois retenues</i>	58
3.6.4	<i>Lien entre les ajustements et la taille de l'historique</i>	60
3.6.5	<i>Lien entre les ajustements et la superficie du bassin versant</i>	61
3.6.6	<i>Distribution spatiale des lois d'ajustement utilisées</i>	62
4	RÉGIONALISATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE EN RÉGION WALLONNE	64
4.1	INTRODUCTION.....	64
4.2	DETÉRMINATION DES PARAMÈTRES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS.....	65
4.2.1	<i>Introduction</i>	65
4.2.2	<i>Altitude des stations de mesures</i>	66

4.2.3	<i>Coordonnées Lambert</i>	68
4.2.4	<i>Superficie du bassin versant</i>	69
4.2.5	<i>Densité de drainage</i>	71
4.2.6	<i>Pente du bassin versant</i>	74
4.2.7	<i>Occupation du sol</i>	75
4.2.8	<i>Pédologie</i>	80
4.2.9	<i>Données climatiques : Précipitations et températures</i>	85
4.2.10	<i>L'évapotranspiration</i>	88
4.2.11	<i>Recharge des nappes</i>	89
4.2.12	<i>Hydrogéologie</i>	91
4.3	DÉFINITION DES ZONES HOMOGÈNES	105
4.3.1	<i>Introduction</i>	105
4.3.2	<i>La classification numérique</i>	105
4.3.3	<i>L'analyse en composantes principales</i>	110
4.4	RÉSULTATS DU REGROUPEMENT EN ZONES HOMOGÈNES	112
4.5	AFFINAGE DES ZONES HOMOGÈNES.....	113
4.6	CARACTÉRISATION DES ZONES HOMOGÈNES	116
4.7	ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES	127
4.7.1	<i>Introduction</i>	127
4.7.2	<i>Cercles de corrélation</i>	128
4.7.3	<i>Graphiques des individus</i>	130
4.8	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	133
5	ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE EN RÉGION WALLONNE POUR LES BASSINS VERSANTS NON JAUGÉS	135
5.1	INTRODUCTION.....	135
5.2	MODÈLE RÉGIONAL OU MODÈLE GLOBAL	136
5.3	MODÈLE LINÉAIRE OU NON LINÉAIRE	138
5.4	LA RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE	139
5.4.1	<i>Introduction</i>	139
5.4.2	<i>Les conditions d'application d'un modèle de régression</i>	139
5.4.3	<i>Formulation mathématique</i>	142
5.4.4	<i>Analyse de la variance</i>	143
5.4.5	<i>Coefficient de détermination</i>	144
5.4.6	<i>Modèles de régression linéaire</i>	145
5.4.7	<i>Problème des colinéarités</i>	146
5.4.8	<i>Recherche de valeurs influentes</i>	147
5.4.9	<i>Validation du modèle de régression</i>	147
5.4.10	<i>Intervalle de confiance d'un modèle de régression</i>	149
5.5	ETAPE INTERMÉDIAIRE DE LA RECHERCHE DU MODÈLE DE RÉGRESSION POUR LES COURS D'EAU DE WALLONIE	150
5.5.1	<i>Superficie des bassins versants</i>	150
5.5.2	<i>Application d'une transformation de variable</i>	150
5.5.3	<i>Recherche d'une relation linéaire entre le débit caractérisant l'étiage et les caractéristiques des bassins versant</i>	152
5.5.4	<i>Choix du modèle de régression</i>	154
5.6	MODÈLES DE RÉGRESSION POUR LES COURS D'EAU DE WALLONIE	155
5.6.1	<i>Introduction</i>	155
5.6.2	<i>Vérification des conditions d'application : Normalité des résidus</i>	155
5.6.3	<i>Vérification des conditions d'application : Egalité des variances des résidus</i>	157
5.6.4	<i>Vérification des conditions d'application : Recherche de valeurs influentes</i>	158
5.6.5	<i>Vérification des conditions d'application : Colinéarité</i>	161
5.6.6	<i>Modèle de régression</i>	162
5.6.7	<i>Intervalle de confiance des modèles de régression obtenu</i>	164
5.6.8	<i>Validation des modèles de régression</i>	165
5.6.9	<i>Comparaison des variables utilisées par d'autres auteurs</i>	173
5.6.10	<i>Abstraction de la période de retour dans les modèles de régression</i>	174
5.6.11	<i>Modèles de régression obtenus pour le MAM7</i>	176
5.6.12	<i>Comparaison des modèles de régression obtenus pour le Q95 et le MAM7</i>	177
5.7	UTILISATION ET APPLICATION DES MODÈLES DE RÉGRESSION	179

5.7.1	<i>Introduction</i>	179
5.7.2	<i>Coefficient de tarissement</i>	179
5.7.3	<i>Recharge des nappes : Percolation</i>	180
5.7.4	<i>Application du modèle global à différentes stations de mesures</i>	183
6	CONCLUSIONS	187
7	BIBLIOGRAPHIE	191
8	ANNEXES	199

INDEX DES FIGURES

Figure 1 : Position du percentile95 sur la courbe de tarage : Cas de la Mehaigne à Wanze	6
Figure 2 : Perturbation du débit par les centrales hydro-électriques fonctionnant par éclusée	7
Figure 3 : Réseau de mesure en Wallonie	8
Figure 4 : Nombre de stations de mesures limnimétriques par bassin versant	8
Figure 5 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant	9
Figure 6 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant : Province de Québec (Canada)	10
Figure 7 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant : Bassin de la Moselle (France)	11
Figure 10 : Analyse des hydrogrammes annuels de la station de Baisieux sur la Grande Honnelle (A et B : années non récupérées, C et D : années récupérées)	18
Figure 11 : Bassin versant de la Mehaigne	20
Figure 12 : Rivières dont les percentiles95 sont inférieurs à 5 l/S	22
Figure 13 : Influence de la présence d'algues durant la période estivale sur la relation hauteur - débit d'une station de mesures	23
Figure 14 : La Semois à Etalle durant l'été 2010	24
Figure 15 : Importance de l'extrapolation de la relation hauteur – débit d'une station de mesures	24
Figure 16 : Comparaison entre le minimum jaugé et les Q95 minimum et maximum d'une station de mesures	25
Figure 17 : Nombre de stations de mesures limnimétrique en fonction du nombre d'années de fonctionnement de celles-ci par classe d'années	26
Figure 19 : Méthodologie de détermination de l'historique minimum à prendre en considération	28
Figure 20 : Ecart relatif entre la moyenne (variance) des Q95 de l'échantillon et la moyenne (variance) des Q95 obtenu pour l'historique complet - La Semois à Tintigny	29
Figure 21 : Ecart relatif entre la moyenne (variance) des MAM7 de l'échantillon et la moyenne (variance) des MAM7 obtenu pour l'historique complet - La Semois à Tintigny	29
Figure 22 : Taille de l'historique minimum requis dans les cas du percentile95 et du MAM7	30
Figure 23 : Nombre d'années minimum tel que les écarts relatifs des moyennes et variances entre les Q95 soient inférieurs à 10%	31
Figure 24 : Nombre d'années minimum requis en fonction du nombre de station de mesures (Percentile 95)	31
Figure 25 : Percentiles95 annuels de la station de mesures de Walcourt (Seuil) sur l'Eau d'Heure	35
Figure 26 : Percentiles95 annuels des stations de mesures de Walcourt (Gare) et de Jamioulx sur l'Eau d'Heure	35
Figure 27: Comparaison graphique de trois ajustements théoriques aux données d'étiage de l'Eau d'Heure à Cerfontaine (Q95)	52
Figure 28 : Application de la loi de Fréchet aux données (Q95) de la station de Baisieux sur la Grande Honnelle	53
Figure 29 : Schéma de la méthodologie utilisée dans le choix du meilleur ajustement pour chaque station	54
Figure 30 : Lesse à Resteigne - visualisation des ajustements pour les 3 lois les mieux adaptées (Q95) à l'aide du logiciel HYFRAN et de la loi de Fréchet	56
Figure 31 : Lesse à Resteigne - ajustement de la loi Lognormale : probabilité de non-dépassement avec intervalles de confiance à 95 % (Q95)	57
Figure 32 : Fréquences des lois retenues pour l'ensemble des stations de mesures (Q95)	59
Figure 33 : Représentation du pourcentage de stations de mesures par type de loi en fonction de la taille de l'historique (Q95)	61
Figure 34 : Représentation du pourcentage de stations de mesures par type de loi en fonction de la superficie du bassin versant (Q95)	62
Figure 35 : Loi sélectionnée par station de mesures pour l'analyse fréquentielle liée à l'étiage (Q95) ..	63
Figure 36 : Extrait de carte IGN au 1/10000 au niveau de la station d'Amougies sur la Rhosnes	66
Figure 37 : La Rhosnes à Amougies	67
Figure 38 : Altitude des stations de mesures (m)	68
Figure 39 : Modèle numérique de terrain : Projet ERRUISSOL	70
Figure 40 : Détermination de la densité de drainage	72
Figure 41 : Densité de drainage des bassins versants des stations de mesures sélectionnées	73
Figure 42 : Fonction Slope	74

Figure 43 : Pente des bassins versants	75
Figure 44 : Carte d'occupation du sol de la Région wallonne	77
Figure 45 : Occupation du sol : Moyenne par bassin versant.....	80
Figure 46 : Plages de taux d'infiltration limite sur sol de culture (les lignes en trait discontinu correspondent l'intervalle de variation autour de la moyenne (Dautrebande <i>et al.</i> , 2008) (Maidment, 1993).....	81
Figure 47 : Groupes hydrologiques des sols : Projet ERRUISSOL	82
Figure 48 : Détermination de la proportion de différents types de groupes hydrologiques de sol pour les bassins versants des stations de mesures	84
Figure 49 : Groupes hydrologiques des sols : Moyenne par bassin versant	84
Figure 50 : Précipitations : Moyennes par bassin versant (1971 – 2005)	86
Figure 51 : Cartes des précipitations (moyennes annuelles, estivales et hivernales)	87
Figure 52 : Température : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005).....	88
Figure 53 : Evapotranspiration potentielle : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005).....	89
Figure 54 : Percolation moyenne annuelle : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005).....	90
Figure 56 : Exemple de sélection des séquences de récession sur base du module et sur base du Q75 pour le Viroin à Treignes : période du 1/01/2000 au 31/12/2009	94
Figure 57 : Exemple d'accroissement des débits en fin de séquence pour le Viroin à Treignes au mois de juin 2000	95
Figure 58 : Temps de ressuyage obtenu pour l'ensemble des stations de mesures.....	96
Figure 59 : Méthodologie de détermination du début des séquences de tarissement	97
Figure 60 : Graphique de corrélation entre Q_0 et Q_1 pour la station de Trois-Ponts sur la Salm.....	99
Figure 61 : Durées minimum, maximum, médiane et percentile90 des séquences tarissement.....	100
Figure 62 : Application de la loi de Maillet pour la station de mesures de Trois-Ponts sur la Salm ...	101
Figure 63 : Aquifères et coefficients de tarissement en Région wallonne	102
Figure 64 : Coefficients de tarissement minimum, moyen et maximum par type de composition d'aquifère	104
Figure 65 : Représentation schématique de deux groupes d'objets.....	106
Figure 66 : Dendrogramme relatif à la classification en utilisant la méthode du lien moyen	108
Figure 67 : Dendrogramme relatif à la classification en utilisant la méthode du lien complet	109
Figure 68 : Dendrogramme relatif à la classification	112
Figure 69 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne	113
Figure 70 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne (Représentation par bassin versant).....	114
Figure 71 : Dendrogramme relatif à la classification après affinage	115
Figure 72 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne après affinage (Représentation par bassin versant).....	116
Figure 74 : Boxplot et carte des pentes médianes par groupe	118
Figure 75 : Boxplot de la proportion des territoires artificialisés par groupe	119
Figure 76 : Boxplot de la proportion des terres arables par groupe.....	119
Figure 77 : Boxplot de la proportion des forêts par groupe.....	120
Figure 78 : Boxplot de la proportion des surfaces enherbées par groupe	120
Figure 79 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique A par groupe	121
Figure 80 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique B par groupe	122
Figure 81 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique C par groupe	122
Figure 82 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique D par groupe	123
Figure 83 : Boxplot de des précipitations par groupe.....	124
Figure 84 : Boxplot de la température par groupe	124
Figure 85 : Boxplot de l'évapotranspiration potentielle par groupe	125
Figure 86 : Boxplot de la percolation par groupe	126
Figure 87 : Boxplot du coefficient de tarissement par groupe.....	127
Figure 88 : Graphiques des valeurs propres et de la proportion de la variance expliquée en fonction de la composante principale	128
Figure 89 : Cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales	128
Figure 90 : Cercle des corrélations dans le plan des première et troisième composantes principales	129
Figure 91 : Cercle des corrélations dans le plan des première et quatrième composantes principales	130
Figure 92 : Graphique des groupes dans le plan des deux premières composantes	131

Figure 93 : Graphique des groupes dans le plan des première et troisième composantes.....	132
Figure 94 : Graphique des groupes dans le plan des première et quatrième composantes	132
Figure 95 : Boxplot illustrant l'égalité des moyennes des percentiles95 spécifiques entre les groupes homogènes	138
Figure 96 : Exemple de vérification de la normalité des résidus.....	140
Figure 97 : Exemple de graphique réalisé pour la vérification de l'homoscédasticité des résidus (cas d'homoscédasticité)	141
Figure 98 : Exemple de graphique réalisé pour la vérification de l'homoscédasticité des résidus (cas d'hétéroscléasticité)	141
Figure 99 : Répartition des stations de mesures utilisées pour la validation des modèles de régression	149
Figure 100: Normalité des résidus pour le modèle obtenu pour la période de retour 5 ans avant la transformation de variables	151
Figure 101 : Normalité des résidus pour le modèle obtenu pour la période de retour 5 ans après la transformation de variables	151
Figure 102 : Observation de l'augmentation du nombre de valeurs prédictes de débit qui sont éloignées des valeurs observées correspondantes avec le débit spécifique observé	152
Figure 103 : Relation entre les caractéristiques des bassins versants et le logarithme du percentile95 spécifique de période de retour 5 ans	153
Figure 104 : Normalité des résidus pour les modèles obtenus pour les cinq périodes de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans)	157
Figure 105 : Vérification de l'égalité des variances des résidus	158
Figure 106 : Recherche de valeurs influentes à partir de la distance de Cook.....	159
Figure 107 : Recherche de valeurs anormales éventuelles à partir des résidus studentisés	160
Figure 108 : Carte des stations utilisées pour la validation du modèle de régression	166
Figure 109 : Graphiques des valeurs prédictes et observées des percentiles95	169
Figure 110 : Graphique des résidus en fonction des percentiles95 spécifiques observés	170
Figure 111 : Comparaison des percentiles95 observés et prédicts et leur intervalle de confiance.....	172
Figure 112 : Graphique mettant en relation les coefficients de régression et les constantes en fonction de la période de retour (Q95)	174
Figure 113 : Graphique mettant en relation les coefficients de régression et les constantes en fonction de la période de retour (MAM7)	177
Figure 114 : Coefficients de tarissement des bassins versants étudiés et les principaux aquifères wallons	180
Figure 115 : Percolation (mm) pour les bassins versants ORI et les principaux aquifères de Wallonie	181
Figure 116 : Comparaison des percolations obtenues pour les bassins versants des stations de mesures par modélisation EPIC et par la moyenne des bassins ORI.....	182
Figure 117 : Valeurs de percolation (mm) par masse d'eau de surface	183
Figure 118 : Comparaison des Q95 obtenus à partir des paramètres estimés (percolation et coefficient de tarissement) et des Q95 obtenus à partir de ces paramètres calculés lors de l'étape de régionalisation pour les différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans)	186

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1 : Gain potentiel pour l'historique de certaines stations de mesures.....	14
Tableau 2 : Résultat du test d'égalité des moyennes.	16
Tableau 3 : Années récupérées pour chaque station comportant des années aux données manquantes	18
Tableau 4 : Résultat du test d'homogénéité réalisé sur les percentiles95 de la station de Huccorgne	21
Tableau 5 : Résultat du test d'homogénéité réalisé sur les débits moyens annuels de la station de Huccorgne.....	21
Tableau 6 : Stations de mesures écartées dont les débits sont obtenus par calcul	21
Tableau 7 : Stations de mesures écartées dont les débits sont obtenus par calcul	22
Tableau 8 : Stations de mesures pour lesquelles un développement de végétation aquatique est observé	23
Tableau 9 : Stations aux données non homogènes (les stations grisées ont été récupérées). RH0 : rejet de l'hypothèse nulle, AH0 : acceptation de l'hypothèse nulle.....	34
Tableau 10 : Résultat du test d'homogénéité pour la station de Walcourt (seuil).....	34
Tableau 11 : Définitions des rapports sans dimension des moments et L-moments (Maidment, 1993)	42
Tableau 12 : Valeurs des L-Moments pour plusieurs distributions (Maidment, 1993)	43
Tableau 13 : Motivations et principales formules utilisées pour calculer les probabilités de non-dépassement empiriques (Maidment, 1993)	51
Tableau 14 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les lois testées à l'aide du logiciel HYFRAN -	56
Tableau 15 : Proportion de la superficie du bassin versant (km ²) en Région wallonne pour les cours d'eau frontaliers	71
Tableau 16 : Regroupement des classes d'occupation du sol.....	79
Tableau 17 : Séquences de tarissement obtenues pour la station de Trois-Ponts sur la Salm	98
Tableau 18 : Calcul du rapport a_t pour chaque durée t	100
Tableau 19 : Coefficients de tarissement obtenus par aquifère.....	103
Tableau 20 : Résultats issus de l'étude des coefficients de tarissement obtenus en France (Lang et Gille, 2006).....	104
Tableau 21 : Stations de mesures utilisées pour l'affinage.....	115
Tableau 22 : Résumé des différences entre groupes	134
Tableau 23 : Tableau d'analyse de la variance.....	137
Tableau 24 : Comparaison de trois méthodes de détermination d'un modèle de régression.....	154
Tableau 25 : Valeurs de différentes variables dans le cadre de la recherche de valeurs influentes ..	160
Tableau 26 : Valeurs de différentes variables pour la station de Graide dans le cadre de la recherche de valeurs influentes	161
Tableau 27 : Recherche de problème de colinéarité à partir du facteur d'inflation de la variance	162
Tableau 28 : Recherche de problème de colinéarité à partir de l'indice de conditionnement	162
Tableau 29 : Etape du choix des variables pour la détermination du modèle de régression	163
Tableau 30 : Valeurs du RMSE pour les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour ..	165
Tableau 31 : Stations de mesures utilisées pour la validation des modèles de régression.....	166
Tableau 32 : Résultats de la validation	167
Tableau 33 : Performances des modèles de régression.....	168
Tableau 34 : Ecarts moyens (%) entre les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour et le modèle global.....	175
Tableau 35 : Comparaison des intervalles de confiance obtenus par calcul et à partir des abaques	175
Tableau 36 : Performances des modèles de régression utilisant le MAM7 comme descripteur de l'étiage.....	176
Tableau 37 : Résumé des performances des modèles de régression utilisant le Q95 ou le MAM7 comme descripteurs de l'étiage	177
Tableau 38 : Valeurs caractéristiques obtenues à partir des valeurs absolues des écarts (%) des percolations obtenues par modélisation EPIC et moyenne des bassins ORI	182
Tableau 39 : Ecart moyen (%) entre les percentiles95 obtenus sur base des paramètres (percolation et coefficient de tarissement) calculés et estimés	185

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'étiage est défini soit comme la période de l'année durant laquelle le débit d'un cours d'eau est faible, soit comme un phénomène saisonnier et une composante à part entière du régime hydrologique d'un cours d'eau.

Il faut différencier l'étiage de la sécheresse. Cette dernière résulte d'un déficit important en précipitations sur une période plus ou moins longue. Lors d'une sécheresse, nous aurons donc un étiage plus sévère. Plusieurs types de sécheresses peuvent être définis en fonction de leurs conséquences. On peut avoir des sécheresses météorologique, hydrologique ou agricole. (Smakhtin, 2001)

La sécheresse hydrologique entraînera une diminution des débits des cours d'eau ainsi que du niveau des nappes d'eau souterraines. Dans certains cas, l'influence de l'activité humaine peut accentuer les conséquences de ce phénomène lors de prélèvements importants soit en eaux de surface, soit en eaux souterraines.

Au sein de la Communauté européenne, les politiques des pays et/ou régions sont régies par des Directives établies par le Parlement européen et le Conseil de l'Union européenne. Ces Directives doivent être traduites en droit national ou régional.

Une Directive européenne sur l'Eau a été adoptée le 23 octobre 2000 (Directive 2000/60/CE) qui établit un cadre pour une politique communautaire pour la protection des eaux intérieures de surface, des eaux de transition, des eaux côtières et des eaux souterraines. « Les objectifs de cette Directive sont :

- prévenir toute dégradation supplémentaire, préserver et améliorer l'état des écosystèmes aquatiques ainsi que, en ce qui concerne leurs besoins en eau, des écosystèmes terrestres et des zones humides qui en dépendent directement ;
- promouvoir une utilisation durable de l'eau, fondée sur la protection à long terme des ressources en eau disponibles ;
- viser à renforcer la protection de l'environnement aquatique ainsi qu'à l'améliorer, notamment par des mesures spécifiques conçues pour réduire progressivement les rejets, émissions et pertes de substances prioritaires, et l'arrêt ou la suppression progressive des rejets, émissions et pertes de substances dangereuses prioritaires ;
- assurer la réduction progressive de la pollution des eaux souterraines et prévenir l'aggravation de leur pollution, et ;
- contribuer à atténuer les effets des inondations et des sécheresses. » (Directive 2000/60/CE, 2000)

Pour le 22 décembre 2015, les Etats membres doivent, entre autre parvenir à un bon état des eaux de surface. Afin d'atteindre cet objectif, diverses mesures peuvent être prises comme par exemple lutter contre la pollution diffuse en diminuant les quantités de pesticides utilisées ou en créant des zones de rétention le long des cours d'eau.

Cette mesure adoptée concerne directement les rejets directs de polluants par la collecte et le traitement des eaux usées urbaines, la suppression des rejets de certains polluants (hydrocarbures, métaux lourds, pesticides, ...) ainsi que la révision des permis d'environnement des industries.

1.2 Identification des besoins

C'est dans le contexte de mise en œuvre de la Directive sur l'Eau et la révision des permis d'environnement qu'il sera utile de connaître les débits caractérisant l'étiage afin de déterminer la charge de polluant qu'une entreprise pourra rejeter afin de ne pas altérer l'état écologique du cours d'eau.

De la même manière, à l'heure où l'énergie verte est au centre des débats, de plus en plus de demandes d'autorisation sur l'installation de centrales hydro-électriques arrivent au sein des administrations. Généralement, des portions de cours d'eau sont détournées afin d'alimenter les turbines en eau. Il faut alors définir un débit réservé. Il s'agit du débit à laisser dans le cours d'eau afin de maintenir la vie aquatique.

Cette notion de débit réservé peut également s'appliquer dans le cadre de prélèvements en eaux souterraines ou de surface afin de maintenir un débit suffisant pour les autres usages de l'eau (agriculture, vie aquatique, ...).

Pour définir l'ensemble de ces débits et/ou mesures, il est important de connaître le débit qui caractérise l'étiage. Cependant, la connaissance des débits se fait généralement sur base de stations hydrométriques. A l'heure actuelle, dans bon nombre de cas, en l'absence d'un tel point de contrôle, il est impossible de définir un débit sans l'aide de modèles hydrologiques qui peuvent être, selon les cas, difficilement mis en œuvre.

A cette notion de débit caractérisant l'étiage, il sera également utile d'associer la notion de récurrence car selon les besoins, les périodes de retour pourront être faibles (2 ans) ou élevées (50 ans).

Or, différentes méthodologies de définition des débits d'étiage pour des cours d'eau non jaugés ne prennent pas en compte cette notion de période de retour. Selon Laaha, le débit d'étiage en Autriche, est représenté par le percentile95¹ sans association de période de retour. (Laaha et Blöschl, 2006)

Vezza reprend les bases de la méthodologie de Laaha et Blöschl pour caractériser l'étiage dans le Nord-Ouest de l'Italie. Il utilise également le percentile95 sans la notion de récurrence. (Vezza et al., 2010)

En Grande-Bretagne, le percentile95 et le MAM7² sont également utilisés sans la notion de période de retour. (Gustard et al., 1992).

Schreiber utilise la MAM7 dans son étude sur les étiages dans le Sud-ouest de l'Allemagne. Ce débit caractéristique n'est pas associé à une période de retour. (Schreiber et Demuth, 1997)

Pour la Province du Québec, Hamza a utilisé le $Q_{7,10}$ qui est le débit minimum annuel de sept jours consécutifs et de période de retour de 10 ans. Dans son étude, seule cette période de retour est considérée.

L'objectif ultime de cette thèse est donc de proposer un modèle permettant de définir un débit caractéristique de l'étiage et ce, pour n'importe quelle période de retour, ainsi que l'incertitude sur la valeur calculée.

¹ Percentile95 : débit atteint ou dépassé 95 pourcents du temps.

² MAM7 : la plus faible valeur de la moyenne mobile des débits atteints pendant 7 jours consécutifs de l'année.

La zone d'étude choisie pour la définition d'une méthodologie permettant de connaître le débit caractérisant l'étiage associé à une période de retour en n'importe quel point sur le linéaire d'un cours d'eau quelconque est la Région wallonne située dans la partie sud de la Belgique.

Bon nombre de méthodologies passent dans un premier temps par un travail de régionalisation qui consiste à regrouper un ensemble de bassins versants contigus ou non en zones homogènes. Plusieurs méthodes existent (classification numérique, arbres de régression, ...) et sont appliquées dans différents pays. L'objectif de cette étape est de vérifier la possibilité d'obtenir un modèle régional plutôt qu'un modèle global qui pourrait s'avérer meilleur.

Un des objectifs de ce travail sera de vérifier la possibilité de définir des zones homogènes sur base des données disponibles pour la zone d'étude. En effet, chaque pays ou régions disposent de ses propres caractéristiques tant d'un point de vue climatique (précipitations et température) que physique (pédologie, géologie, altitude, pentes, ...).

A titre d'exemple, Laaha (Autriche, Schreiber (Allemagne) et Vezza (Italie) ont travaillé sur des bassins versants dont certains étaient situés en région montagneuse. (Gustard *et al.*, 1992) (Schreiber et Demuth, 1997) (Vezza *et al.*, 2010) Les altitudes y sont beaucoup plus variables tout comme les précipitations et les températures. De même, le contexte géologique sera différent par rapport à notre zone d'étude qui ne dispose pas de contexte montagneux.

1.3 Méthodologie

La première étape du travail consiste à sélectionner selon un certain nombre de critères, un ensemble de stations de mesures situées principalement sur le territoire wallon. Les critères utilisés pour le choix des stations de mesures sont par exemple, la durée de l'historique, la présence ou non de végétations aquatiques durant la période estivale, l'extrapolation de la courbe de tarage, ...

Différents tests statistiques sont réalisés afin de valider soit la durée de l'historique minimale que doit comporter une station pour être prise en considération, soit pour vérifier l'homogénéité des données.

Sachant qu'un étiage est défini par son débit et sa durée, une valeur caractéristique est déterminée. Il peut s'agir par exemple du débit caractéristique d'étiage (débit atteint ou dépassé 355 jours par an), du MAM7 (plus faible valeur de la moyenne mobile des débits atteints pendant 7 jours consécutifs de l'année) du débit journalier minimum annuel, du percentile95, ...

A partir de la variable choisie ci-dessus, une analyse fréquentielle est réalisée. Une statistique des valeurs extrêmes est réalisée avec pour objectif l'adaptation d'une même loi pour les différents sites afin de pouvoir la transposer à l'ensemble de la Région wallonne. Une période de retour représentative du risque de 'sécheresse' est également définie.

Lorsque les groupes homogènes sont définis, et à partir de paramètres physiques (pente, occupation du sol, superficie du bassin versant, ...), des équations de régression sont recherchées afin de permettre la détermination d'une valeur de débit d'étiage en n'importe quel point d'un petit bassin versant non jaugé, et ce pour n'importe quelle période de retour.

Les modèles de régression sont donc validés et une mise en œuvre simple de ces derniers sera envisagée.

Comme nous le verrons tout au long de ce travail, les données utilisées pour la détermination des paramètres intervenant dans les étapes de régionalisation et de détermination des modèles de régression proviennent de stations disposant d'une taille d'historique relativement faible. On dispose au maximum de quarante-deux années pour les données de débit et de trente-quatre ans pour les données météorologiques. De ce fait, on considérera que les modèles obtenus sont 'stationnaires' et qu'ils n'incluront pas des tendances éventuelles liées au changement climatique.

2 CARACTÉRISATION DE L'ÉTIAGE

2.1 Définition des paramètres caractéristiques de l'étiage

Dans le glossaire d'hydrologie (WMO, 1974), l'étiage est défini comme étant le 'débit d'une rivière après une période sèche prolongée'.

Dans notre cas, nous considérerons l'étiage comme étant la période annuelle où l'on observe les débits les plus faibles.

Pour caractériser l'étiage, différents indicateurs peuvent être utilisés. En général, l'indicateur d'étiage est défini par un couple (débit, durée). Dans la littérature, plusieurs indicateurs sont rencontrés en fonction du ou des paramètres pris en considération :

- débit journalier minimum annuel,
- minimum annuel de la moyenne mobile sur n jours des débits journaliers,
- VCNd : débit moyen caractéristique sur une durée continue d , minimum dans la saison (ou dans notre cas, l'année),
- QMNA : débit (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année (A),
- QMNA X ans : il s'agit de la valeur du QMNA de période de retour de X ans,
- débit caractéristique d'étiage qui peut être défini comme étant le débit atteint ou dépassé 355 jours par an.

Un des premiers pas est de définir le type de débit qui sera utilisé et la durée caractéristique de l'étiage.

Selon Abdelaziz Hamza (Hamza, 1999), le $Q_{7,10}$ est utilisé couramment en Amérique du Nord et correspond au débit d'étiage de sept jours consécutifs et de période de retour de dix ans. Cette valeur a également été reprise au Canada.

Par contre, en France et suite aux études réalisées par l'IRSTEA⁴ (Galéa *et al.*, 1999), le débit d'étiage est le VCNd qui correspond au débit moyen caractéristique sur une durée d connue, minimal dans la saison. Dans leur étude, l'IRSTEA utilise le débit journalier minimum annuel de période de retour de deux ans.

Le percentile95 correspond au débit atteint ou dépassé 95 % du temps (Smakhtin, 2001). Il est obtenu à partir de la courbe des débits classés. Cette courbe se construit à partir des débits moyens journaliers classés par ordre décroissant auxquels on attribue une valeur qui correspond au nombre d'occurrences de celui-ci. Laaha et Blöschl (Laaha et Blöschl, 2007) utilisent également cette notion de percentile95 afin de réaliser une comparaison de méthodes permettant l'estimation d'une valeur caractérisant l'étiage à partir d'un historique court de données mesurées.

Surech se base sur le percentile95 afin d'estimer l'étiage pour le management des ressources en eau pour le bassin de l'Himalaya du Népal (Surech, 2006).

Dans le cadre de ce travail, le choix s'est porté sur le percentile95. En effet, cette valeur caractérisant l'étiage permet de s'affranchir des problèmes liés à l'extrapolation de la courbe de tarage. A titre d'illustration, on peut observer à la Figure 1, que le percentile95 est supérieur au minimum jaugé, contrairement au MAM7 ainsi que le débit minimum annuel. Le

⁴ IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologie de l'Environnement (anciennement CEMAGREF)

cas présenté est la Mehaigne à Wanze. Ce point servira de critère de sélection des stations de mesures qui seront utilisées dans le cadre de cette étude.

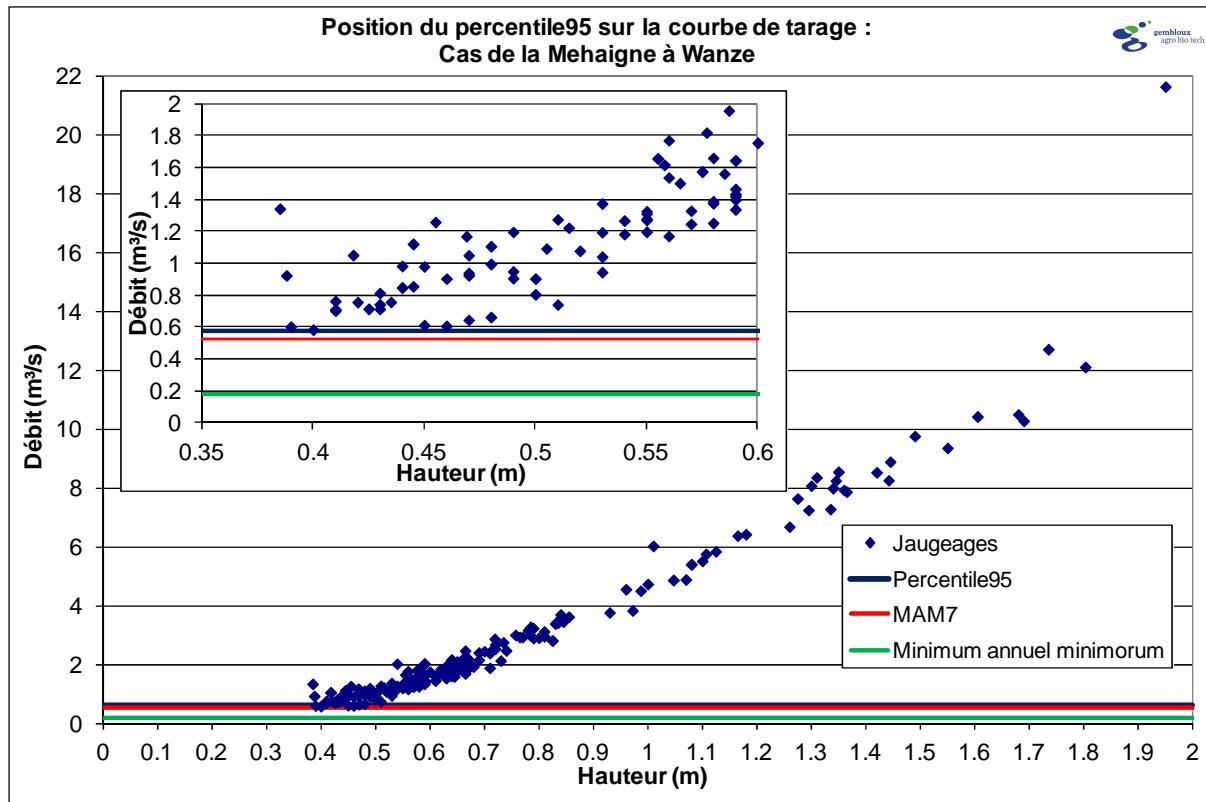


Figure 1 : Position du percentile95 sur la courbe de tarage : Cas de la Mehaigne à Wanze

De plus, étant donné que le percentile95 est calculé à partir des données journalières, les phénomènes intrinsèques à une journée donnée sont éliminés. La Figure 2 présente l'influence d'une station hydro-électrique qui fonctionne sur le principe de l'éclusée sur le débit horaire d'un cours d'eau. Le cas présenté est la Lhomme à Grupont.

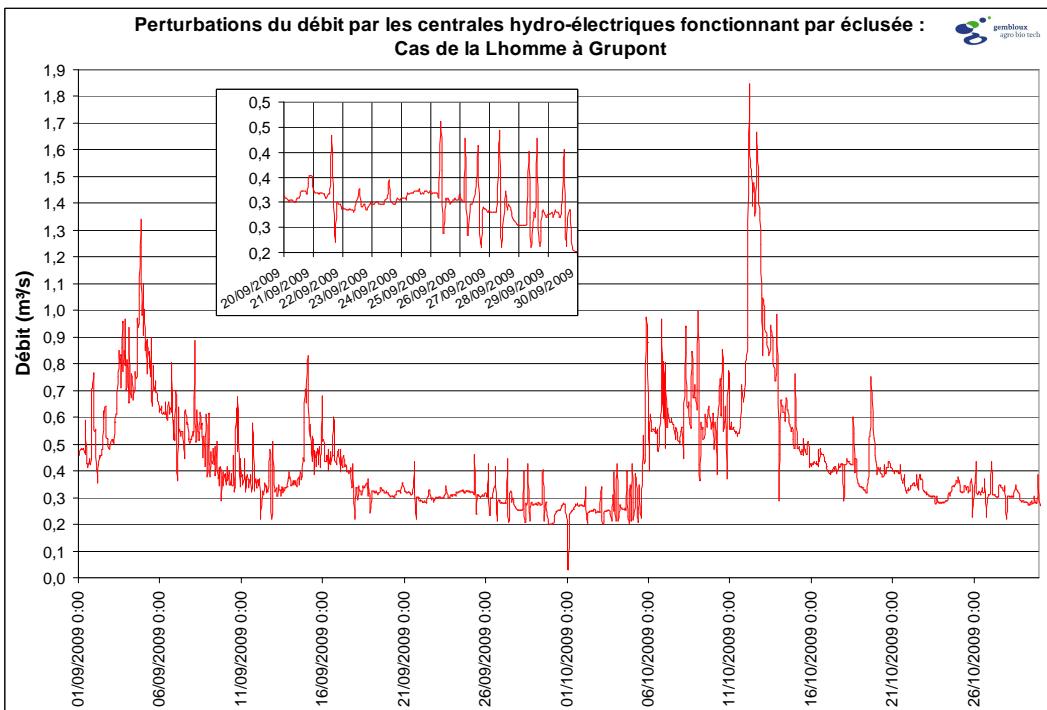


Figure 2 : Perturbation du débit par les centrales hydro-électriques fonctionnant par éclusée

Une autre notion de débit d'étiage est le débit moyen sur un nombre n de jours, ce qui permet de s'affranchir de certaines perturbations anthropiques du régime hydrologique d'un cours d'eau (centrales hydro-électriques qui fonctionnent sur le principe de l'éclusée, prise d'eau pour l'alimentation des étangs, ...). A titre d'exemple, dans le cadre du projet AMICE (Interreg IVB), le MAM7 est utilisé et correspond à la plus faible valeur de la moyenne mobile des débits atteints pendant 7 jours consécutifs de l'année. Ce paramètre sera également utilisé au cours de ce travail et une comparaison sera réalisée lors de la création des modèles de régression.

2.2 Sélection des stations de mesures

2.2.1 Introduction

En Région wallonne, deux réseaux de mesure coexistent au sein du Service public de Wallonie :

- le premier réseau de mesure appartient à la Direction générale Agriculture, Ressources naturelles et Environnement et plus particulièrement à la Direction des Cours d'Eau non navigables (<http://aqualim.environnement.wallonie.be>) ;
- le deuxième réseau de mesure appartient à la Direction générale de la Mobilité et des Voies hydrauliques et plus particulièrement au Service d'Etudes hydrologiques (<http://voies-hydrauliques.wallonie.be>).

Les stations de ces réseaux enregistrent de façon continue les variations de niveaux des cours d'eau (une donnée par heure). A partir des jaugeages (mesures directes de vitesses de l'eau à différentes hauteurs dans le cours d'eau permettant d'estimer le débit) effectués par les équipes d'hydrométrie, ces variations de niveaux sont transformées en variations de débits par l'intermédiaire d'une courbe de tarage de la station.

La Figure 3 présente une carte de la zone d'étude avec les stations de mesures des deux réseaux du Service public de Wallonie. A partir de cette carte, on peut observer que l'ensemble des cours d'eau principaux de la Wallonie sont couverts par un minimum d'une station de mesures.

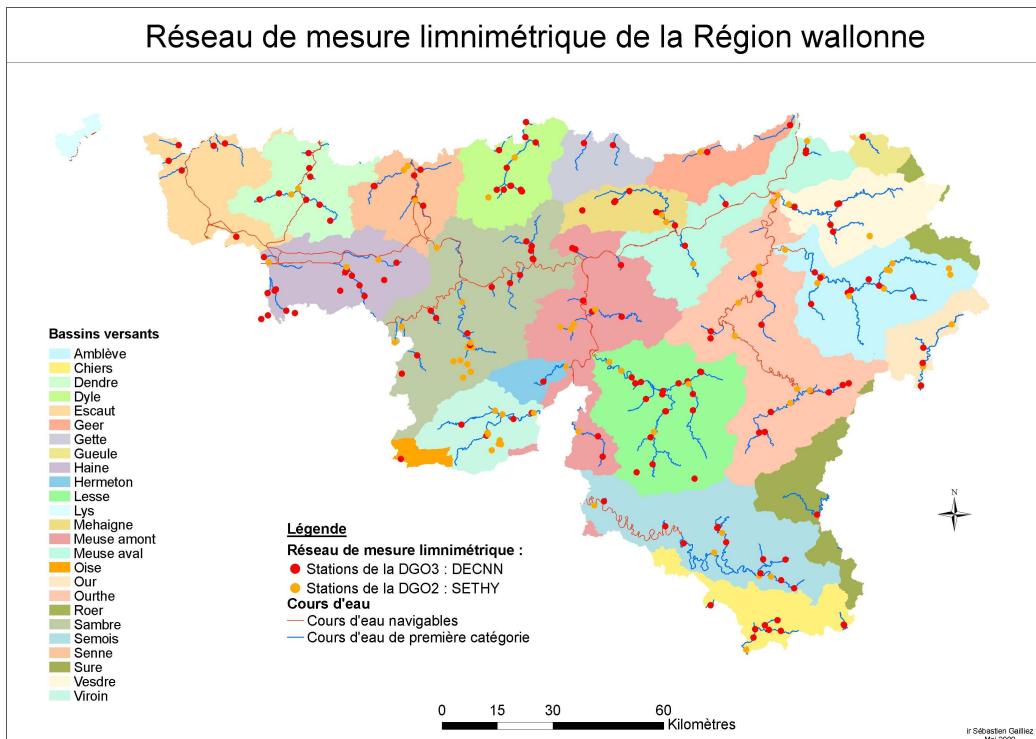


Figure 3 : Réseau de mesure en Wallonie

La Figure 4 présente le nombre de stations en fonctionnement ou non au sein de la Région wallonne par bassin versant.

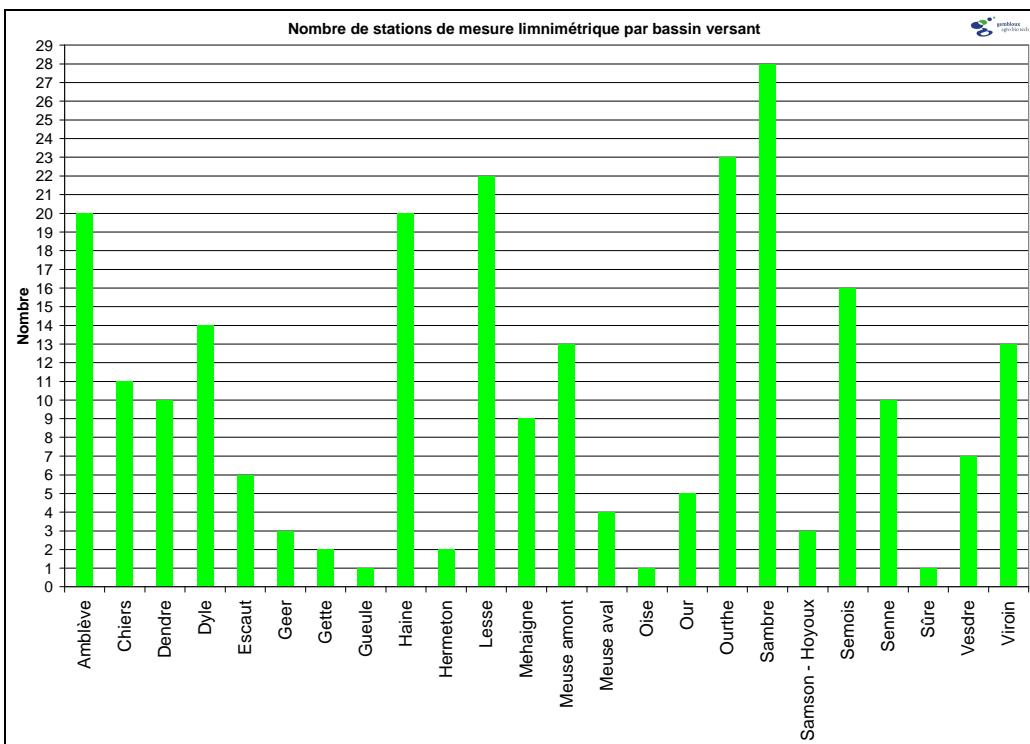


Figure 4 : Nombre de stations de mesures limnimétriques par bassin versant

Le nombre total de stations de mesures disponibles est de 244 avant toute analyse des données. Les tests effectués en vue de la sélection des stations sont les suivants : homogénéité des données, taille minimum de l'historique, présence de végétation aquatique durant la période estivale, extrapolation de la courbe de tarage. L'ensemble de ces points de mesures est présenté en Annexe 1.

Les stations de mesures doivent être sélectionnées sur base de différents critères tels que (Galéa *et al.*, 1999) (Hamza, 1999) (Laaha et Blöschl, 2005) :

- l'homogénéité des données,
- une faible amplitude de l'extrapolation de la courbe de tarage pour les faibles débits,
- aucune perturbation du débit du cours d'eau par la présence de barrage permettant un soutien du débit d'étiage,
- l'absence de végétation aquatique durant la période estivale,
- la durée de l'historique.

2.2.2 Superficie des bassins versants des stations de mesures

Une des caractéristiques de la Wallonie, au niveau hydrologique, est le nombre de bassins versants de petite taille. En effet, la superficie du bassin versant au niveau des stations de mesures présélectionnées est de moins de 200 km² pour 70 % d'entre elles. La moyenne des superficies des bassins versants des stations de mesures est de 234 km² et la médiane est de 104 km².

La Figure 5 présente le nombre de stations de mesures par classe de superficie de bassin versant exprimée en km².

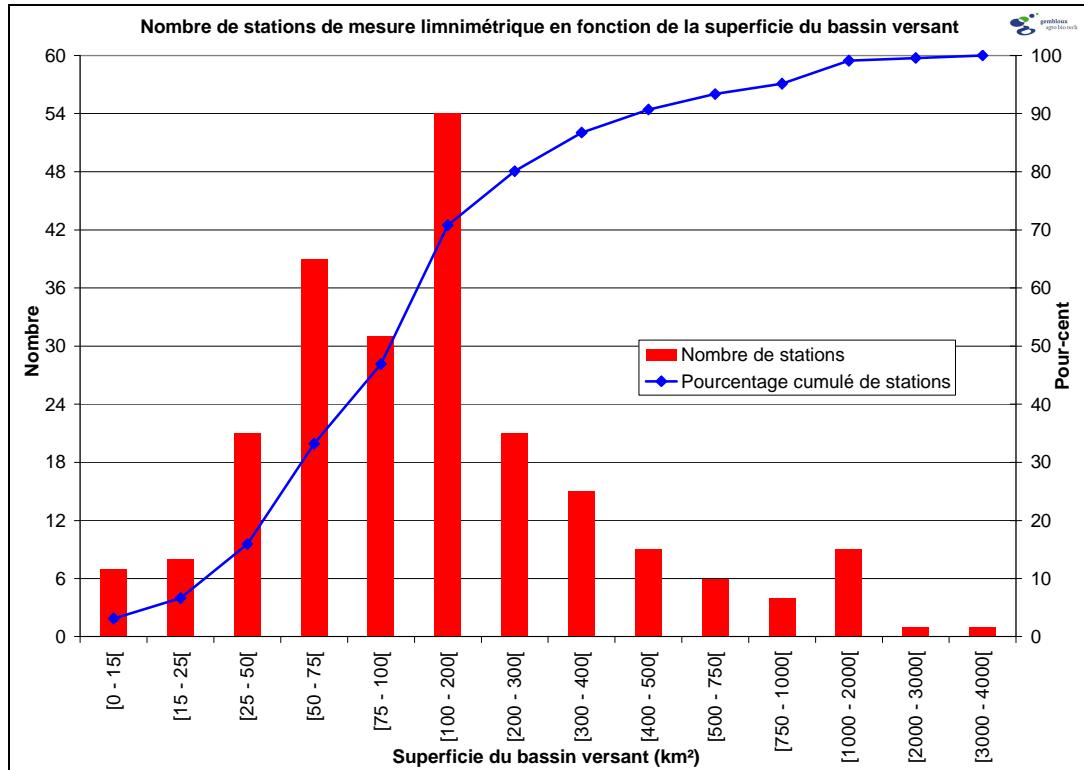


Figure 5 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant

A titre de comparaison, la Figure 6 présente le nombre de stations de mesures en fonction de la superficie du bassin versant pour la Province de Québec au Canada. La valeur moyenne des superficies de bassin versant (km^2) pour l'ensemble des stations de mesures est 10337, la médiane de 2950 (Hamza, 1999).

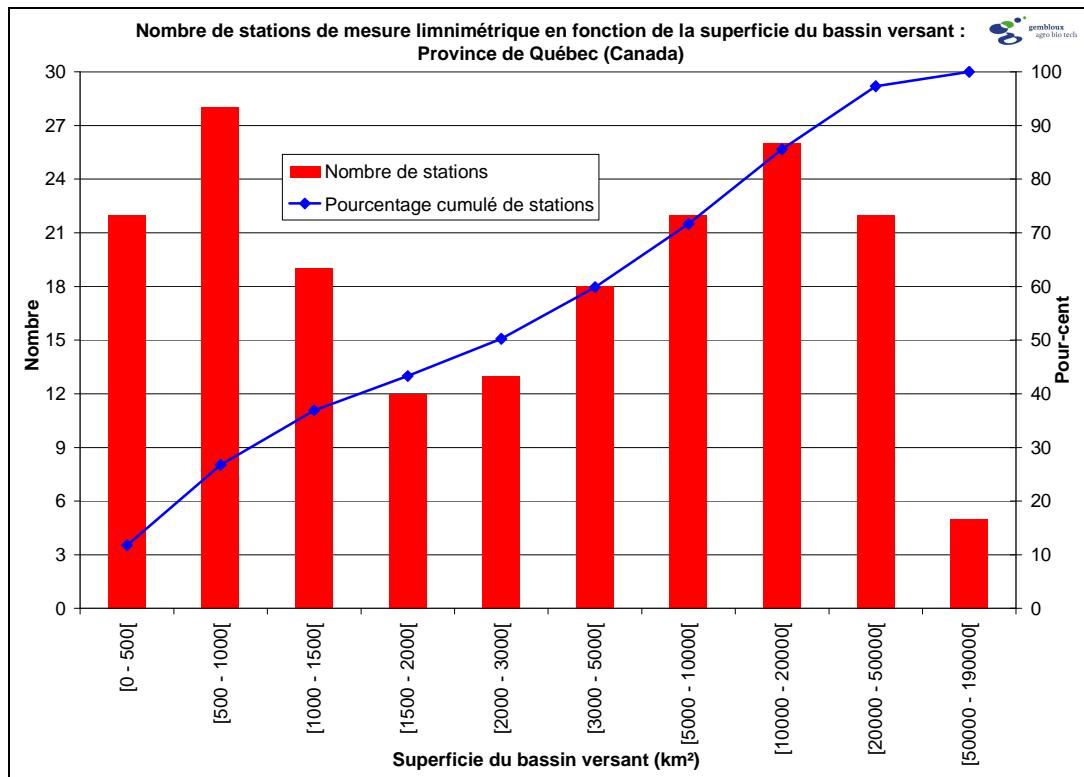


Figure 6 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant : Province de Québec (Canada)

Une autre étude réalisée pour le bassin de la Moselle en France avait utilisé les données de 48 stations de mesures limnimétriques (Galéa, 2005). La répartition des superficies des bassins versants des stations de mesures dont les données ont été utilisées est reprise à la Figure 7.

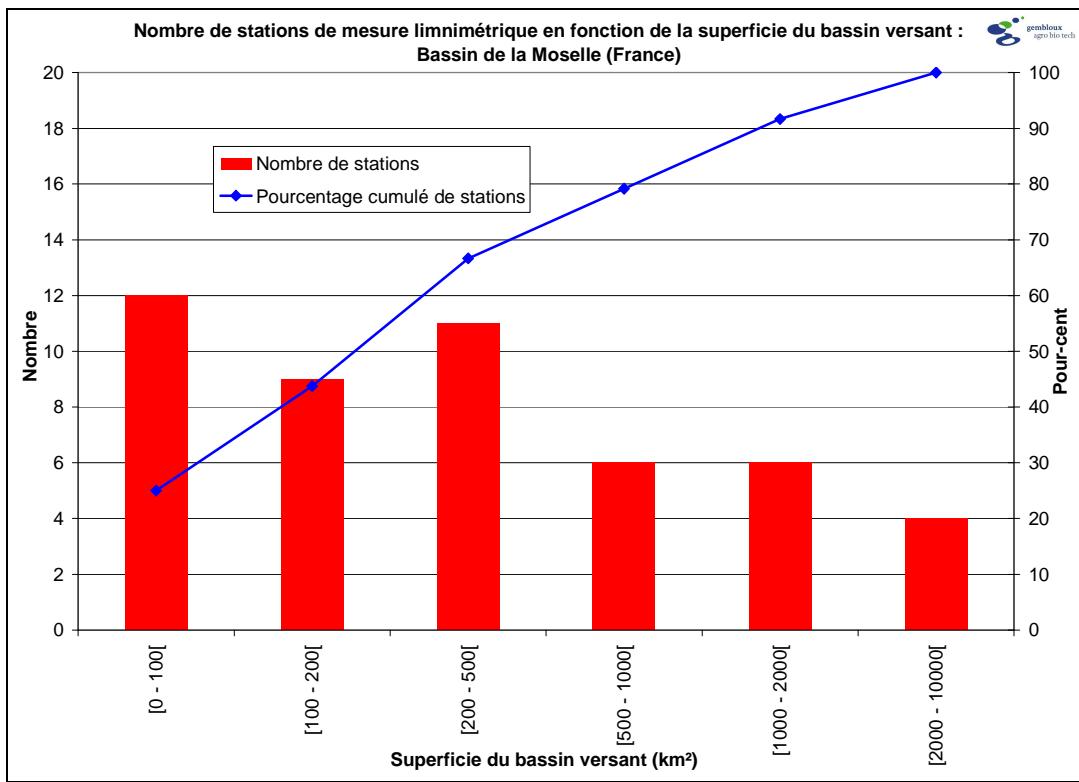


Figure 7 : Nombre de stations de mesures limnimétriques en fonction de la superficie du bassin versant : Bassin de la Moselle (France)

A titre indicatif, la moyenne des superficies des stations de mesures dans le cas du bassin de la Moselle est 778 km², et la médiane est 360 km².

L'étude réalisée par Chalise sur le bassin de l'Himalaya du Népal utilise les données de 37 bassins versants dont la superficie varie entre 6 et 2896 km² (Chalise *et al.*, 2003).

2.2.3 Validation des données horaires de hauteur

Historiquement, les données issues du réseau de mesure appartenant à l'actuelle Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement ont été validées par l'Institut royal météorologique du milieu des années 1960 à la fin de l'année 1987.

Ces données n'avaient pas encore subi de validation à l'aide des logiciels développés ces dernières années. En effet, pour un grand nombre des 65 stations de mesures concernées, quelques données horaires étaient manquantes, ce qui avait pour conséquence l'impossibilité de calculer les données agrégées pour l'année considérée, et donc le percentile95 vu l'absence de données.

Les données horaires de ces stations de mesures ont donc été validées. Les opérations les plus régulièrement effectuées sont :

- la suppression de pics anormaux, soit vers le bas, soit vers le haut,
- l'ajout de données à l'aide de l'interpolation linéaire entre deux données, ou la copie des données issues d'une deuxième station de mesures située soit sur le même cours d'eau, soit située au sein du même bassin versant.

Il est à remarquer que les données manquantes ont été comblées lorsque leur nombre n'excédait pas quinze jours et ce, en dehors de toute période de crue.

Les données de débit ont ensuite été calculées à partir des courbes de tarage qui ont également été validées à l'aide d'un contrôle visuel qui a permis de vérifier le bon ajustement de la courbe sur l'ensemble des jaugeages disponibles. Une vérification accentuée sur les bas débits entre les jaugeages et les courbes de tarage a été réalisée pour l'ensemble des stations de mesures. En effet, pour certaines stations, les courbes de tarage ont été recalculées de manière à ce que celles-ci soient plus en adéquation avec les jaugeages réalisés en période de basses eaux.

Cette validation a permis la récupération d'un nombre d'années non négligeable pour l'ensemble des stations de mesures. Cette opération a également eu comme bénéfice l'élimination des données aberrantes, des erreurs de digitalisation et des pics anormaux vers le bas qui pouvaient entacher d'erreurs le calcul du percentile95 et du MAM7.

Ces pics proviennent essentiellement d'erreurs liées à la digitalisation des feuilles présentes dans les limnigraphes.

2.2.4 Augmentation du nombre de stations de mesures potentielles

Pour le réseau de mesure AQUALIM, de l'année 1966 à l'année 1987, soit sur une durée d'environ vingt ans, le réseau de mesure a compté jusqu'à 208 échelles qui étaient relevées chaque jour à une heure fixe (08h00 du matin) par un lecteur rémunéré par l'administration.

Des jaugeages étaient effectués sur ces sections de mesure, ce qui permet d'obtenir des débits après le calcul des courbes de tarage.

Certaines de ces sections de mesure ont ensuite été équipées d'un système permettant de disposer de données horaires (limnigraphie et ensuite capteur de pression). Il est à noter que ces dernières sont toujours opérationnelles.

Les données issues de la lecture des échelles s'apparentent à des données ponctuelles, et ne peuvent pas être considérées comme des mesures en continu. C'est pourquoi, en période de crue, les données lues une fois par jour ne pourraient pas être utilisées. Par contre, dans le cas de notre recherche, les débits obtenus peuvent être étudiés car leur variabilité au cours d'une journée en période de basses eaux est faible.

Le but de ce chapitre est donc de vérifier la possibilité d'utiliser des données issues des échelles afin de permettre, soit l'augmentation du nombre de stations pouvant être utilisées, soit l'élargissement de l'historique de certaines stations de mesures.

La Figure 8 et le Tableau 1 présentent le gain potentiel pour l'historique des stations de mesures dont il est question dans ce chapitre. Les stations sont classées de gauche à droite selon la taille de leur historique. A titre indicatif, la première station située sur la gauche a 40 ans d'historique tandis que la station située à l'extrême droite en a 17.

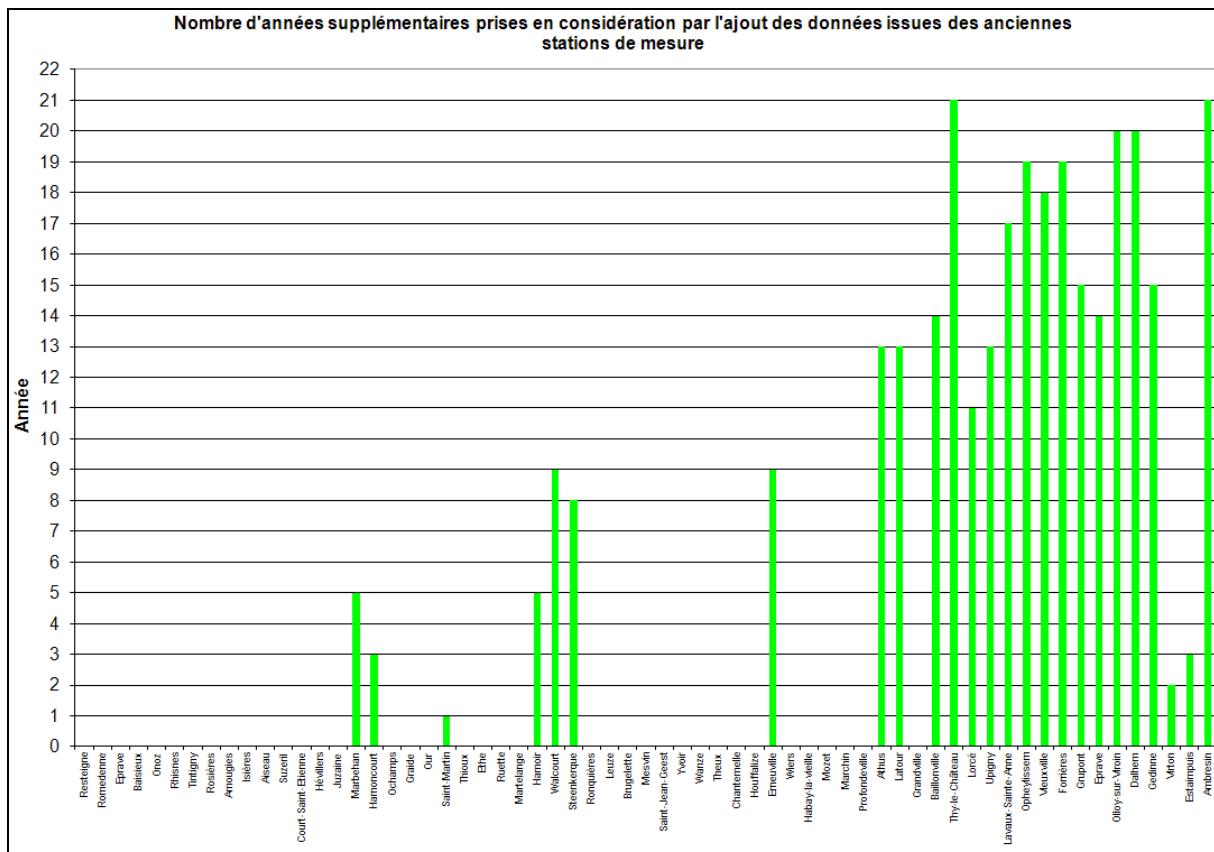


Figure 8 : Nombre d'années supplémentaires prises en considération par l'ajout des données issues des anciennes stations de mesures

Tableau 1 : Gain potentiel pour l'historique de certaines stations de mesures.

Code	Localité	Cours d'eau	Années à récupérer (nombre)
L5500	Marbehan	Mellier	1968 à 1972 (5)
L5520	Harnoncourt	Ton	1969, 1970 & 1972 (3)
L5570	Saint-Martin	Ligne	1970 (1)
L5630	Hamoir	Néblon	1970, 1972 à 1975 (5)
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	1967 à 1975 (9)
L5660	Steenkerque	Senne	1967 à 1970, 1972 à 1974, 1976 (8)
L5950	Erneuville	Ourthe Occidentale	1969 à 1971 & 1973 à 1978 (9)
L6020	Athus	Messancy	1969 à 1977 & 1979 à 1982 (13)
L6030	Latour	Vire	1969 à 1974 & 1976 à 1982 (13)
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	1970 à 1983 (14)
L6060	Thy-le-Château	Thyria	1967 à 1987 (21)
L6240	Lorcé	Lienne	1977 à 1987 (11)
L6260	Upigny	Mehaigne	1970 à 1982 (13)
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	1970 à 1984, 1986 & 1987 (17)
L6280	Opheylissem	Petite Gette	1969 à 1987 (19)
L6300	Vieuxville	Ry de Logne	1969 à 1975 & 1977 à 1987 (18)
L6310	Forrières	Lhomme	1969 à 1987 (19)
L6320	Grupont	Lhomme	1969, 1970 à 1973, 1976 à 1984, 1986 & 1987 (15)
L6360	Eprave	Lhomme	1971, 1972, 1974 à 1983, 1985 & 1986 (14)
L6380	Olloy-sur-Viroin	Viroin	1968 à 1987 (20)
L6390	Dalhem	Berwinne	1967 à 1972 & 1974 à 1987 (20)
L6400	Gedinne	Houille	1967 à 1981 (15)
L6440	Virton	Ton	1986 & 1987 (2)
L6450	Estaimpuis	Espierres	1985 à 1987 (3)
L6470	Ambresin	Mehaigne	1967 à 1987 (21)

Il est à remarquer que le nombre d'années supplémentaires est plus faible pour les stations de mesures qui ont été rapidement modernisées. On peut également observer que le gain en années peut atteindre 25 ans dans le meilleur des cas.

La validation de l'utilisation des données issues des réseaux de mesure a été effectuée à partir des stations de mesures ayant un historique de plus de 25 ans et situées dans différents bassins versants de la Wallonie. Une comparaison entre les moyennes des percentiles95 obtenues à partir des données journalières et des données horaires à 8 heures du matin a été effectuée. Cette démarche est également réalisée pour le MAM7.

En prenant la donnée horaire à 8 heures du matin, on considère que l'on joue le rôle du lecteur et que cette donnée est donc égale à la hauteur d'eau lue par cette personne.

La Figure 9 présente les courbes des débits classés obtenues pour la station d'Ochamps sur la Lesse. Cette station dispose d'un historique de 28 ans et a une superficie de bassin versant de 10 km².

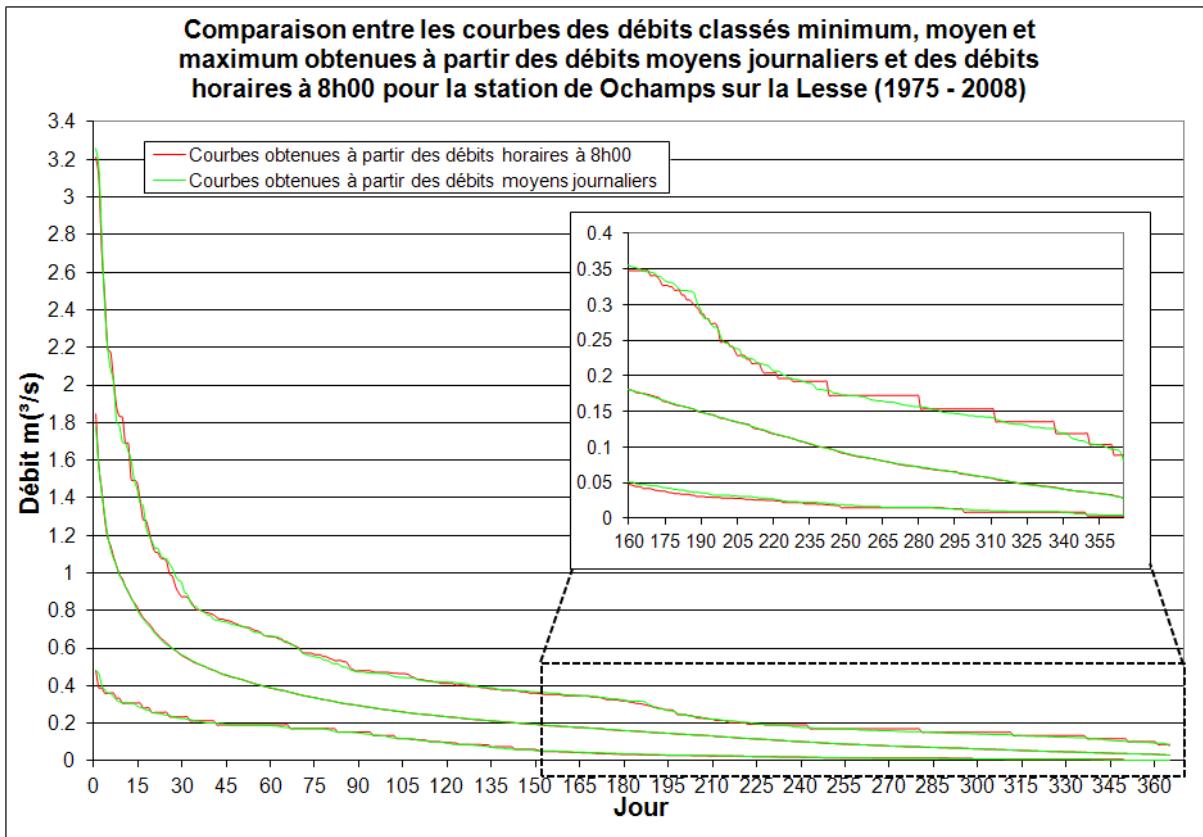


Figure 9 : Comparaison entre les courbes des débits classés minimum, moyen et maximum obtenues à partir des débits moyens journaliers et des débits horaires à 8h00

A partir de la Figure 9, on observe que les courbes des débits classés obtenues sont similaires.

Un test d'égalité des moyennes a été effectué pour les stations de mesures retenues dans le cadre de ce chapitre. Elle consiste à vérifier si la moyenne des percentiles95 m_1 obtenus à partir des débits moyens journaliers est égale à la moyenne des percentiles95 m_2 obtenus à partir des données horaires à 8h00.

Dans ce cas, l'hypothèse nulle est :

$$H_0 : m_1 = m_2.$$

Le nombre d'effectifs des deux échantillons est identique et les populations sont de variances inégales. Le test d'hypothèse d'égalité des moyennes est réalisé en considérant que les variances sont inégales car les données utilisées pour le calcul des moyennes sont issues de deux méthodes de calcul différentes.

Un test d'égalité des variances n'est pas indispensable étant donné que les effectifs des deux échantillons sont identiques (Dagnelie, 1975).

Le test d'égalité des deux moyennes s'effectue en calculant la valeur :

$$U_{OBS} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{SCE_1}{n_1(n_1-1)} + \frac{SCE_2}{n_2(n_2-1)}}}$$

et en la comparant à la valeur de $u_{1-\alpha/2}$ de la distribution normale réduite. Le rejet de l'hypothèse nulle correspond à la condition :

$$u_{obs} \geq u_{1-\alpha/2}.$$

La valeur de signification α a été fixée à 0,05 (Dagnelie, 1975).

Le Tableau 2 présente les résultats d'égalité des moyennes dans le cadre de la vérification de l'utilisation des données issues de la lecture des échelles limnimétriques à 08 heures du matin durant les années 1960 à 1980. On observe que pour chaque point de mesures, l'égalité des moyennes est vérifiée.

Tableau 2 : Résultat du test d'égalité des moyennes.

Station	n =n ₁ =n ₂	Données journalières		Données horaires à 8 heures		u _{obs}	u _{0,975}	Test Q95
		SCE ₁	m ₁	SCE ₂	m ₂			
Romedenne	32	0,576	0,201	0,579	0,198	0,085	1,96	OK
Eprave	32	9,139	1,080	9,112	1,064	0,120	1,96	OK
Baisieux	24	0,089	0,280	0,080	0,280	0,032	1,96	OK
Tintigny	29	1,764	0,434	1,653	0,425	0,139	1,96	OK
Amougies	22	0,231	0,211	0,199	0,167	1,128	1,96	OK
Isières	28	0,015	0,046	0,015	0,045	0,182	1,96	OK
Suzeryl	28	0,234	0,312	0,246	0,313	0,034	1,96	OK
Harnoncourt	29	35,479	2,724	35,105	2,710	0,046	1,96	OK
Ochamps	28	0,013	0,039	0,014	0,038	0,084	1,96	OK
Saint-Martin	27	0,110	0,125	0,106	0,121	0,212	1,96	OK
Ruette	23	0,298	0,290	0,298	0,290	0,000	1,96	OK
Martelange	23	5,051	0,473	5,051	0,473	0,000	1,96	OK
Walcourt	25	0,395	0,253	0,395	0,253	0,000	1,96	OK
Steenkerque	20	0,056	0,322	0,054	0,324	0,133	1,96	OK
Brugelette	21	0,252	0,254	0,268	0,249	0,144	1,96	OK
Yvoir	24	2,997	1,041	2,983	1,029	0,113	1,96	OK
Wanze	24	2,691	1,042	2,644	1,044	0,019	1,96	OK
Houffalize	21	2,286	0,525	2,286	0,525	0,005	1,96	OK
Erneuville	25	4,144	0,755	4,248	0,748	0,058	1,96	OK

Les résultats obtenus permettent de considérer que les percentiles95 calculés à partir des données issues des échelles limnimétriques lues une fois par jour sont identiques aux percentiles95 obtenus à partir des données horaires mesurées à l'aide d'un capteur ou d'un limnigraph. Les conclusions identiques peuvent être émises dans le cas du MAM7.

Cette méthodologie permet donc de compléter l'historique de 12 stations de mesures et d'ajouter 17 stations à la liste des stations de mesures. L'historique de ces stations était initialement inférieur à 15 ans.

2.2.5 Analyse des données manquantes

La grande majorité des stations comporte des années de mesures incluant des données manquantes (en moyenne huit années par station). Or, si les dysfonctionnements du réseau de mesure ont lieu en dehors des périodes d'étiage, il est intéressant d'étudier la possibilité de récupérer ces années de mesure partielle. Dans ce but, une analyse des hydrogrammes a été effectuée.

Les données manquantes ne correspondant qu'à quelques jours ou situées en dehors de la période d'étiage (mai à novembre la plupart du temps) ont ainsi été comblées. Dans certains cas moins évidents, l'hydrogramme de l'année aux données manquantes a été comparé à l'hydrogramme d'une station voisine située sur le même cours d'eau ou au sein du même bassin versant. En effet, dans ce cas, on peut poser l'hypothèse que ces deux stations de mesures ont un comportement hydrologique similaire.

A partir de cette analyse, plusieurs années par station ont ainsi pu être récupérées ce qui a permis d'augmenter le nombre d'années utilisables pour le calcul des débits caractérisant l'étiage. Les trous ont été comblés, non pas par une valeur de débit estimée par une ou l'autre méthode (calcul, modélisation hydrologique, ...) mais par la valeur de '9999' qui n'influence pas le calcul de l'indicateur d'étiage. Cet indicateur permet de repérer rapidement les années récupérées lorsque les données sont triées par ordre décroissant afin d'établir la courbe des débits classés. Dans le cas contraire, les trous restent à '0' = 'NO DATA' et ces années ne seront dès lors pas prises en considération.

Au sein de la Figure 10, les graphiques A et B présentent deux années pour lesquelles les données n'ont pas été récupérées. En effet, les périodes manquantes sont importantes et situées dans la période durant laquelle l'étiage aurait pu se produire.

Par contre, les graphiques C et D présentent des années pour lesquelles les données ont été prises en considération car les données manquantes se situent durant la période hivernale ou lors d'une période de hautes eaux.

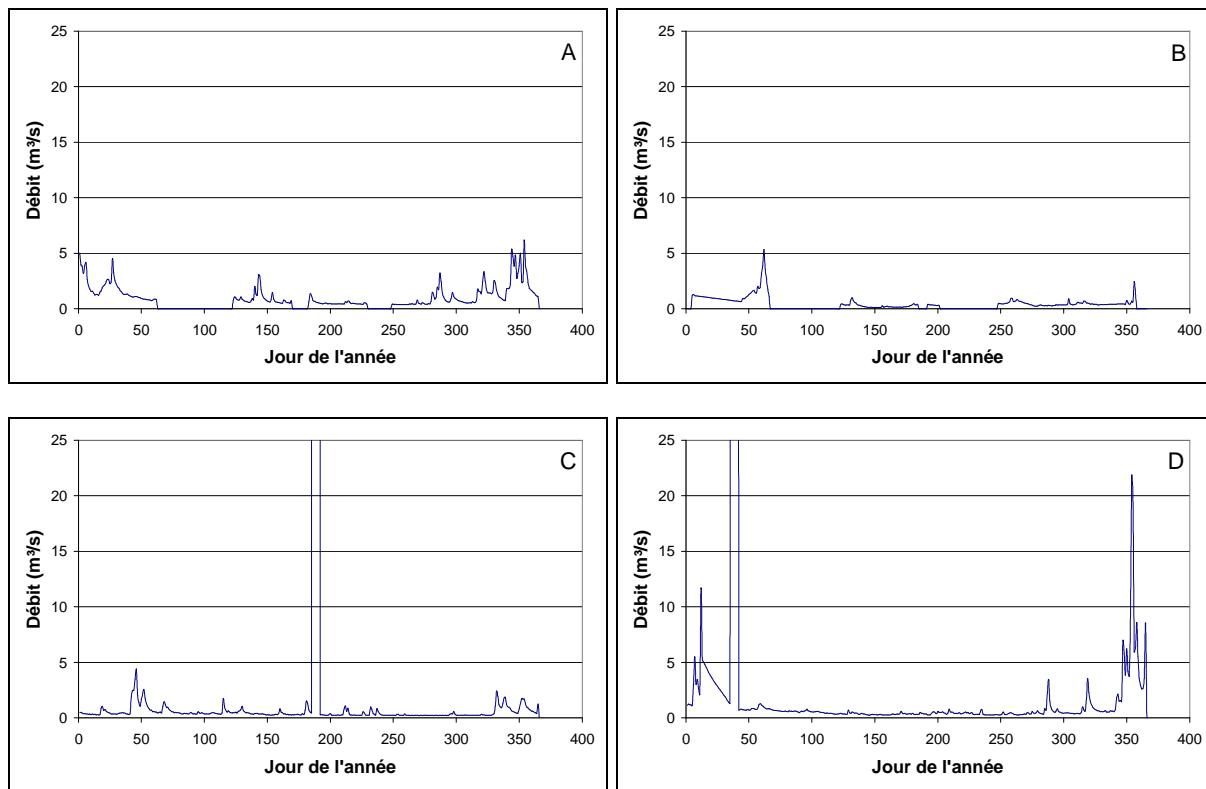


Figure 10 : Analyse des hydrogrammes annuels de la station de Baisieux sur la Grande Honnelle (A et B : années non récupérées, C et D : années récupérées)

Ce traitement permet d'augmenter l'historique des 51 stations reprises dans le Tableau 3. En moyenne, plus de la moitié des années analysées a ainsi pu être récupérée. Certaines stations ont même pu augmenter leur historique d'une dizaine d'années.

Tableau 3 : Années récupérées pour chaque station comportant des années aux données manquantes

Code	Localité	Cours d'eau	Nombre d'années		Années Récupérées
			Analysées	Récupérées	
5021	Resteigne	Lesse	8	3	1993, 1996, 2003
5060	Romedenne	Hermeton	9	8	1969, 1984, 1988, 1989, 1992, 1994, 1995, 1996
5080	Eprave	Lesse	8	4	1991, 1995, 1996, 2002
5170	Baisieux	Grande Honnelle	15	6	1983, 1984, 1993, 1996, 2002, 2005
5201	Rhisnes	Houyoux	10	9	1978, 1980, 1988, 1989, 1991, 1996, 1997, 2002, 2003
5220	Tintigny	Rulles	7	4	1971, 1987, 1993, 1996
5412	Amougies	Rhosnes	13	7	1972, 1976, 1984, 1985, 1996, 1997, 2001
5420	Isières	Sille	10	8	1972, 1974, 1988 à 1992, 2007
5442	Aiseau	Biesme	14	5	1978, 1983, 1984, 2000, 2001
5460	Suzeril	Thyle	9	7	1973, 1988 à 1990, 2002, 2003, 2007
5500	Marbehan	Mellier	7	4	1974, 1982, 1983, 1993
5520	Harnoncourt	Ton	8	4	1974, 1992, 2000, 2005
5530	Ochamps	Lesse	7	4	1983, 1996, 2002, 2005
5540	Graide	Ruisseau de Graide	9	5	1976, 1982, 1991, 1993, 1996
5550	Our	Eau d'Our	10	4	1982, 1989 à 1991
5570	Saint-Martin	Ligne	9	6	1991, 1992, 1996, 1997, 2002, 2003
5600	Ruette	Vire	10	5	1986, 1987, 1990, 1992, 1993
5610	Martelange	Sûre	11	6	1975, 1982, 1984, 1988, 1992, 1993
5630	Hamoir	Néblon	12	9	1970, 1976, 1978, 1982, 1983, 1991, 1993, 1994, 1996

5640	Walcourt	Ry d'Yves	10	7	1974, 1976, 1985, 1989, 1994, 1995, 2000
5660	Steenkerque	Senne	15	12	1977, 1983, 1985, 1987 à 1993, 1997, 2004
5690	Brugelette	Dendre Orientale	9	5	1982, 1986, 1988, 1992, 1995
5820	Wanze	Mehaigne	8	5	1988 à 1990, 1992, 1996
5930	Houffalize	Ourthe Orientale	9	7	1979, 1983, 1985, 1988, 1989, 1993, 1994
5950	Erneuville	Ourthe Occidentale	7	4	1979, 1985, 1988, 1994
5961	Wiers	Verne Blanche	4	3	1992, 1994, 2002
5970	Habay-La-Vieille	Rulles	9	6	1991, 1993, 1994, 1998, 1999, 2001
6020	Athus	Messancy	15	11	1984 à 1986, 1988 à 1990, 1994, 1998, 1999, 2001, 2002
6030	Latour	Vire	8	7	1984, 1988, 1989, 1991 à 1994
6050	Baillonville	Ruisseau Heure	9	6	1988, 1990 à 1992, 2003, 2004
6060	Thy-le-Château	Thyria	5	3	1980, 1989, 1992
6240	Lorcé	Lienne	7	4	1985, 1996, 1997, 2003
6260	Upigny	Mehaigne	7	3	1971, 1993, 2002
6270	Lavaux-Ste-Anne	Wimbe	6	3	1993, 1994, 2003
6280	Opheylisem	Petite Gette	5	2	1994, 1997
6300	Vieuxville	Ry de Logne	7	3	1994, 1995, 1999
6310	Forrières	Lhomme	6	5	1979, 1996, 1997, 2002, 2003
6320	Grupont	Lhomme	5	1	2002
6360	Eprave	Lhomme	9	4	1971, 1994, 2002, 2003
6380	Olloy-sur-Viroin	Viroin	3	2	1993, 1994
6390	Dalhem	Berwinne	4	2	1993, 1995
6400	Gedinne	Houille	8	3	1973, 1994, 1995
6440	Virton	Ton	5	1	1994
6450	Estaimpuis	Espierres	8	4	1987, 1995, 2002, 2005
6470	Ambresin	Mehaigne	4	2	1992, 2002
55721002	Bergilers amont	Geer	6	6	1985, 1987, 1994, 1996, 1997
35611002	Bousoit	Haine	3	2	1976, 2001
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	1	1	1980
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	4	1	1987
90711002	Couvin	Eau noire	5	1	1984

En conclusion, l'étape d'optimisation des données s'avère utile et importante dans le processus de caractérisation de l'étiage en Région wallonne. Les stations wallonnes relativement récentes ne fournissent pas de grandes quantités de données valides, toute année de données supplémentaire permettra donc une meilleure précision pour l'analyse fréquentielle.

2.2.6 Stations de mesures obtenues par calcul

Les stations de mesures fictives dont les données de débit sont obtenues par calcul à partir d'une station de mesures située en amont ou en aval sont écartées de l'étude. En effet, les calculs peuvent engendrer la présence d'erreurs, particulièrement dans les débits extrêmes.

Le cas de la station de Huccorgne (305 km²) située sur la Mehaigne a été étudié à titre d'exemple. Les données fournies pour cette station de mesures couvrent la période allant de l'année 1974 à l'année 2009.

Après analyse, il apparaît que les données fournies pour ces stations ont deux origines distinctes : le calcul et la mesure.

En effet, la station de mesures de Huccorgne n'est opérationnelle que depuis le début de l'année 1993. La période mesurée est donc de 1993 à 2009.

Les données fournies pour la période allant de 1974 à 1992, proviennent de la station de mesures de Moha (343 km²) située en aval de la station de Huccorgne sur la Mehaigne (Figure 11). Une période commune existe pour ces deux stations et débute en 1993 pour se terminer en 2000.

Une régression linéaire a été effectuée par le Service d'Etudes hydrologiques entre les débits des deux stations de mesures pour cette période de recouvrement. Le résultat obtenu est présenté par la formule suivante :

$$Q_{Huccorgne} = 0,915 \quad Q_{Moha}$$

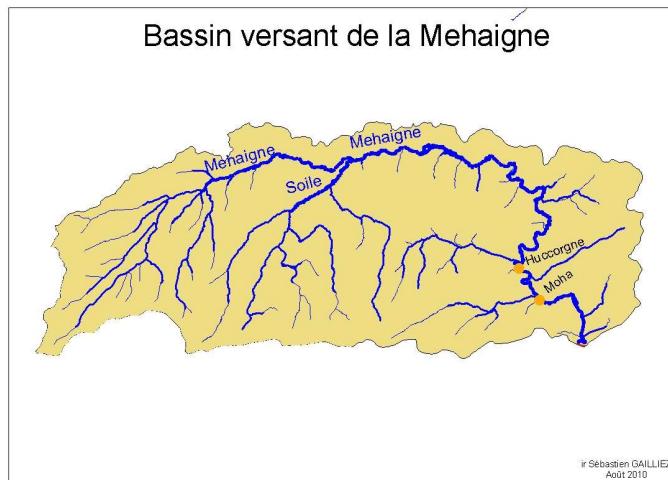


Figure 11 : Bassin versant de la Mehaigne

Afin de vérifier si les données utilisées pour la station de Huccorgne sont homogènes pour toute la période fournie, la scission de la population a été effectuée au niveau de l'année charnière entre les valeurs de débits calculés à partir de la station de Moha et les données mesurées à Huccorgne, soit l'année 1993.

Ce test d'homogénéité permet de valider le fait qu'une station dont les données ont été obtenues par calcul à partir d'une autre station de mesures peut être considérée comme 'fiable' pour le reste de cette étude.

L'hypothèse nulle émise pour le test d'homogénéité est alors :

$$H_0 : m_1 = m_2.$$

La valeur obtenue pour t_{obs} suivante :

$$t_{obs} = \frac{\overline{x_1} - \overline{x_2}}{\sqrt{\frac{SCE_1 + SCE_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

est alors comparée à la valeur de $t_{1-\alpha/2}$ dont le nombre de degré de liberté est de $2(n-1)$.

L'hypothèse nulle est rejetée lorsque : (Dagnelie, 1975) :

$$t_{obs} \geq t_{1-\alpha/2}.$$

Les résultats du test sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Résultat du test d'homogénéité réalisé sur les percentiles95 de la station de Huccorgne

n_1	19
n_2	16
SCE_1	2.162
SCE_2	0.756
m_1	0.909
m_2	0.716
t_{obs}	2.221
$t_{1-\alpha/2}=u_{0,975}$ avec 68 degrés de liberté	1.996

A partir de ce tableau, on remarque que t_{obs} est supérieur à $t_{1-\alpha/2}$, ce qui engendre un rejet de l'hypothèse nulle, et donc l'inégalité des moyennes au sens statistique du terme.

Le coefficient de 0,915 est appliqué quel que soit le débit, or on ne peut pas considérer le rapport constant pour toute la gamme de débits enregistrés au niveau de ces stations de mesures. Un test d'égalité des moyennes effectué sur les débits moyens dont les résultats sont présentés dans le

Tableau 5 montre que ces débits font bien partie d'une population homogène (t_{obs} est inférieur à $t_{1-\alpha/2}$).

Tableau 5 : Résultat du test d'homogénéité réalisé sur les débits moyens annuels de la station de Huccorgne

n_1	19
n_2	16
SCE_1	9.662
SCE_2	7.059
m_1	2.440
m_2	2.209
t_{obs}	0.956
$t_{1-\alpha/2}=u_{0,975}$ avec 68 degrés de liberté	1.996

Il apparaît donc que le coefficient de 0,915 appliqué convient pour les débits moyens annuels mais pas pour les débits caractérisant l'étiage, et plus particulièrement les percentiles95.

Les résultats de cette démarche sont également transposés à l'utilisation du MAM7.

Le Tableau 6 contient les stations de mesures dont les données de débit ne seront pas utilisées dans le cadre de cette étude.

Tableau 6 : Stations de mesures écartées dont les débits sont obtenus par calcul

Code	Station	Cours d'eau	Bassin versant
6122SVC2	Ortho	Ourthe occidentale	Ourthe
1951SVC2	Tubize	Senne	Senne
5808SCC2	Angleur (2 Bis)	Ourthe	Ourthe
6228SVC2	Chaudfontaine	Vesdre	Vesdre

2.2.7 Stations de mesures ayant un faible débit

Les stations de mesures dont les percentiles95 sont inférieurs à un seuil fixé à 5 l/s n'ont pas été prises en considération. Il s'agit des stations de mesures dont la sensibilité dans les variations de débit n'est pas suffisante lors des étiages.

Le Tableau 7 reprend les stations de mesures pour lesquelles le percentile95 ou le MAM7 sont inférieurs au seuil de 5 l/s.

Tableau 7 : Stations de mesures écartées dont les débits sont obtenus par calcul

Code	Station	Cours d'eau	Bassin versant
92231002	Pétigny	Ry Ermitage	Viroin
92241002	Pétigny	Ry Font aux serpents	Viroin
78631002	Silenrieux	Ry Jaune	Sambre

A titre d'exemple, la Figure 12 présente les percentiles95 des trois stations de mesures écartées.

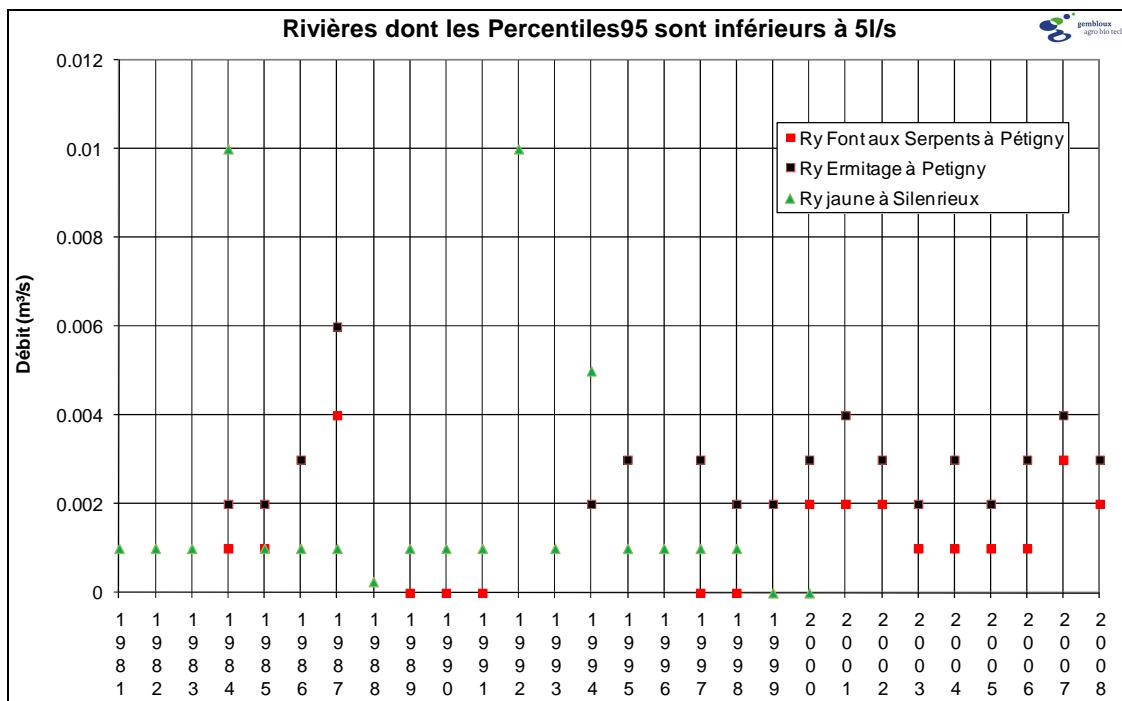


Figure 12 : Rivières dont les percentiles95 sont inférieurs à 5 l/S

2.2.8 Relation hauteur - débit : Présence d'algues durant la période estivale

Afin de prévenir de tout problème de surestimation des débits caractérisant l'étiage, les stations pour lesquelles un développement de végétation aquatique est observé durant la période estivale ont été écartées de l'étude.

Le développement de la végétation aquatique provoque un ralentissement de l'écoulement et de ce fait, une augmentation du niveau de l'eau. La conséquence est qu'un jaugeage réalisé durant la période estivale aura une hauteur d'eau équivalente à un jaugeage réalisé durant la période hivernale mais avec un débit plus faible.

Ce développement est observé de manière générale à partir du milieu du mois de mai jusqu'à la fin du mois de septembre. La variabilité des dates de début et de fin de présence d'algue est liée aux conditions météorologiques (ensoleillement) et aux conditions de débits. En effet, en cas de débit important, un grand nombre d'algues est arraché.

La Figure 13 illustre l'influence de la présence de végétation aquatique durant la période estivale.

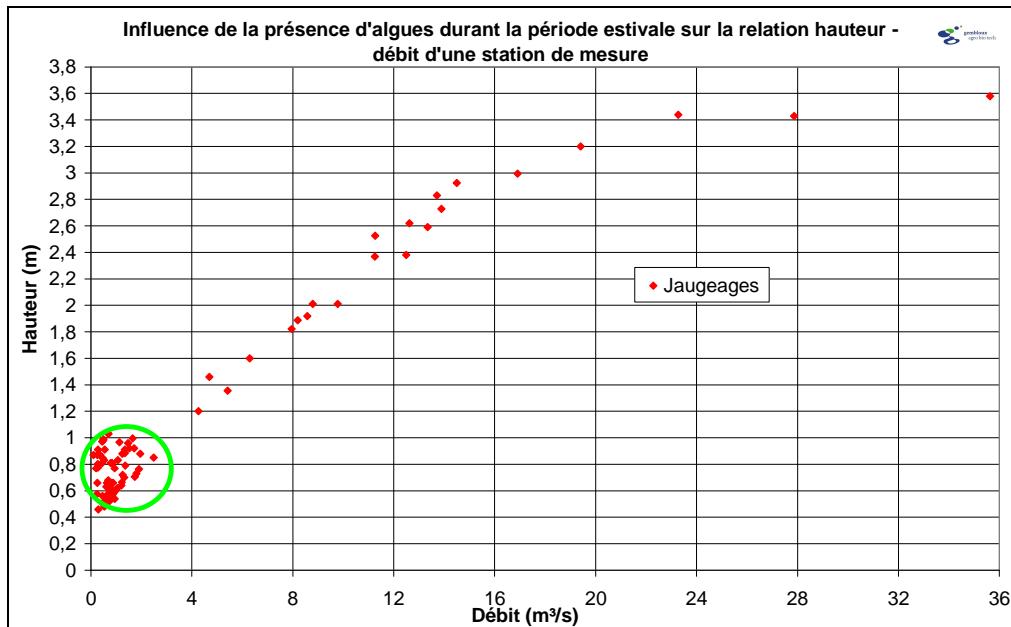


Figure 13 : Influence de la présence d'algues durant la période estivale sur la relation hauteur - débit d'une station de mesures

Les stations de mesures reprises dans le Tableau 8 ont été écartées de la présente étude car un développement de végétation aquatique est observé durant la période estivale, ceci ayant un impact sur le niveau de l'eau et donc sur le débit d'étiage.

Tableau 8 : Stations de mesures pour lesquelles un développement de végétation aquatique est observé

Code	Station	Cours d'eau	Bassin versant
L7060	Dampicourt	Chavratte	Chiers
L6180	Etalle	Semois	Semois
L6430	Harmignies	Trouille	Haine
L6590	Lens	Dendre orientale	Dendre
L6140	Limelette	Dyle	Dyle
L7130	Martilly	Vierre	Semois
L5370	Rosières	Lasne	Dyle
L5720	Saint-Jean-Geest	Grande Gette	Gette

A titre d'exemple, la Figure 14 présente une photo de la Semois à Etalle prise le 15 juillet 2010 et les hauteurs d'eau correspondantes durant cette période estivale.

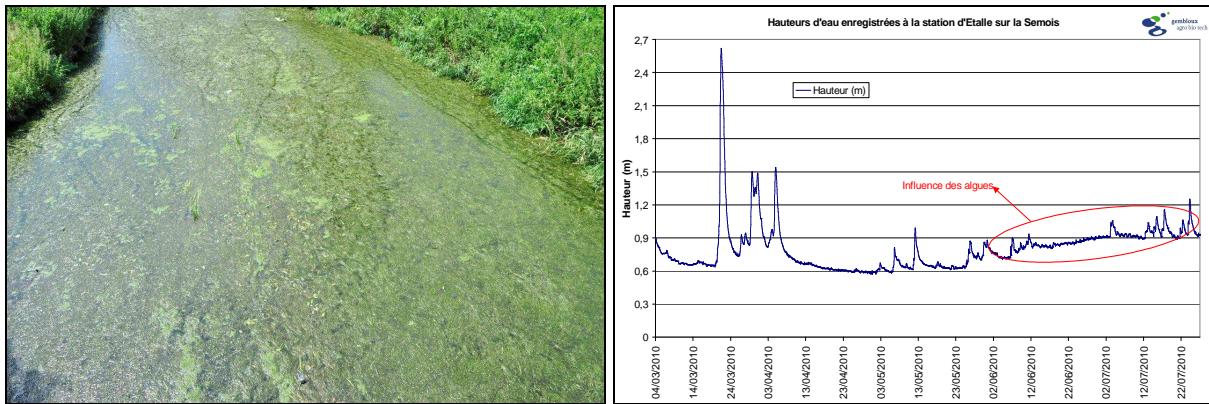


Figure 14 : La Semois à Etalle durant l'été 2010

2.2.9 Relation hauteur – débit : Extrapolation de la courbe de tarage

Les stations de mesures retenues doivent avoir une faible amplitude de l'extrapolation de la courbe de tarage pour les faibles débits.

Le fait d'utiliser le percentile95 comme valeur caractérisant l'étiage permet de s'affranchir, dans la majorité des cas, du problème lié à l'extrapolation de la courbe de tarage pour les faibles débits.

La Figure 15 présente une station de mesures pour laquelle l'extrapolation de la courbe de tarage est importante.

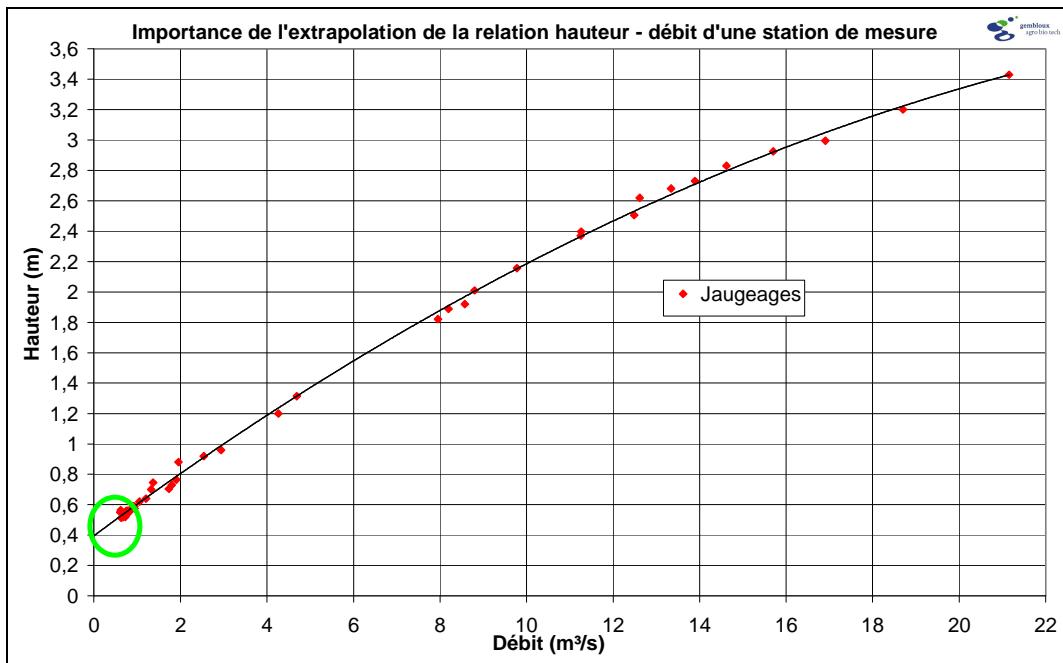


Figure 15 : Importance de l'extrapolation de la relation hauteur – débit d'une station de mesures

Une comparaison entre le minimum jaugé historique d'une station de mesures et les percentiles95 minimum et maximum obtenus pour quelques stations de mesures représentatives est illustrée à la Figure 16. Les stations de mesures sélectionnées pour la réalisation du graphique ont été choisies de telle manière que les différentes gammes de taille de bassin versant soient présentes.

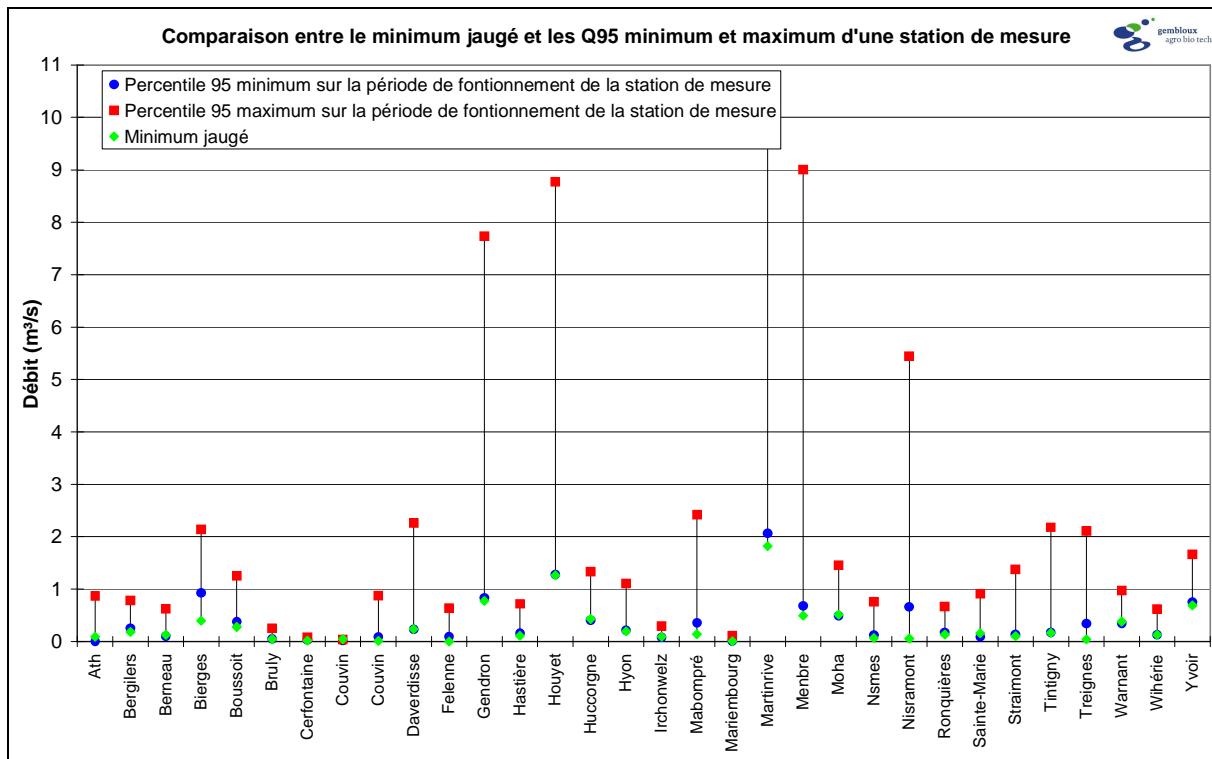


Figure 16 : Comparaison entre le minimum jaugé et les Q95 minimum et maximum d'une station de mesures

A partir de la Figure 16, on remarque que le Percentile95 jaugé est, soit proche du minimum jaugé, soit supérieur à celui-ci. Cette analyse renforce le choix du percentile95 comme paramètre caractérisant l'étiage en plus des résultats obtenus pour l'homogénéité des données et le fait que le percentile95 ne soit pas influencé par les perturbations liées à des éclusées sur le cours d'eau.

Au final, 41 % des stations de mesures envisagées ont un percentile95 minimum pour toute la période de fonctionnement, inférieur au débit minimum jaugé. Parmi ces points de mesure, 75 % ont leur percentile95 minimum observé pour l'année 1976 qui est caractérisée comme année 'exceptionnelle' d'un point de vue étiage. Au final, seul 14 % des stations de mesures étudiées ont un percentile95 minimum inférieur au débit minimum jaugé lorsque l'on exclut l'année 1976.

Pour rappel, le MAM7 est le minimum annuel de la moyenne mobile sur 7 jours consécutifs des débits journaliers (MAM7).

Lorsque l'on établit la même comparaison que ci-dessus en utilisant le MAM7 minimum au lieu du percentile95 minimum obtenu pour toute la période de fonctionnement des différentes stations de mesures, on observe qu'un peu plus de 60% des stations de mesures se trouvent avec un MAM7 minimum supérieur au débit minimum jaugé. Au final, après avoir exclu l'année 1976, 35 % des stations de mesures ont un MAM7 inférieur au débit minimum jaugé.

2.2.10 Durée minimum de l'historique

La durée minimum de l'historique que doit comporter une station de mesures pour pouvoir être utilisée dans le cadre de cette étude est validée à l'aide de tests statistiques. En

effet, il n'est pas rare de trouver dans la littérature une durée d'historique de 20 ans minimum à prendre en compte pour la caractérisation de l'étiage. (Tallaksen et Van Lanen, 2004) (Laaha et Blöschl, 2005)

Or, en Région wallonne, près de 60 % des stations de mesures ont un historique de données inférieur à 20 ans. C'est la raison pour laquelle, une méthodologie permettant de prendre éventuellement en compte les stations de mesures avec un faible historique doit être définie.

La Figure 17 présente le nombre de stations par classe de nombre d'années de fonctionnement de celles-ci.

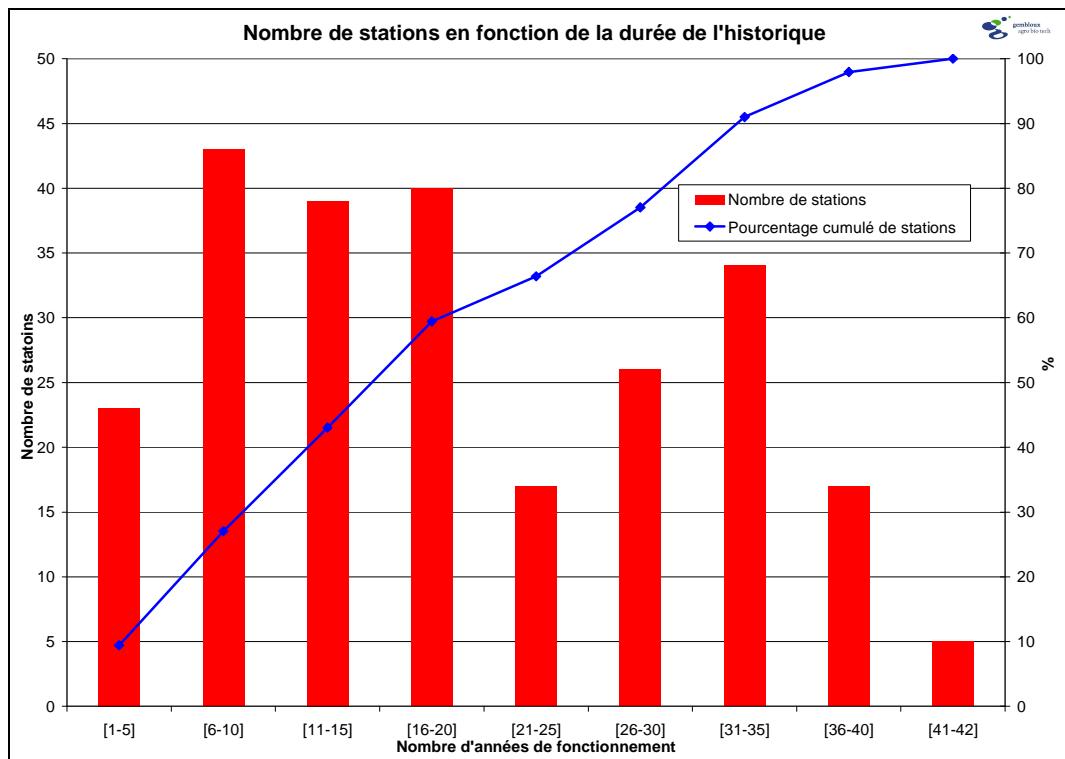


Figure 17 : Nombre de stations de mesures limnimétrique en fonction du nombre d'années de fonctionnement de celles-ci par classe d'années

La Figure 18 montre le nombre cumulé de stations de mesures en fonction du nombre d'années de fonctionnement de celles-ci.

Il est à remarquer que l'évolution du nombre de stations de mesures en fonction de la période de fonctionnement montre deux sauts de paliers bien distincts.

Le premier correspond à la première modernisation du réseau de mesure de la Direction des Cours d'Eau non navigables (DCENN) au début des années 1990 lors du remplacement des limnigraphes par des stations équipées de capteur de pression avec télétransmission.

La deuxième augmentation, également au sein du réseau de la DCENN, a été réalisée à partir de 2003 à la suite des inondations importantes et répétitives qui sont survenues dans le courant de l'année 2002.

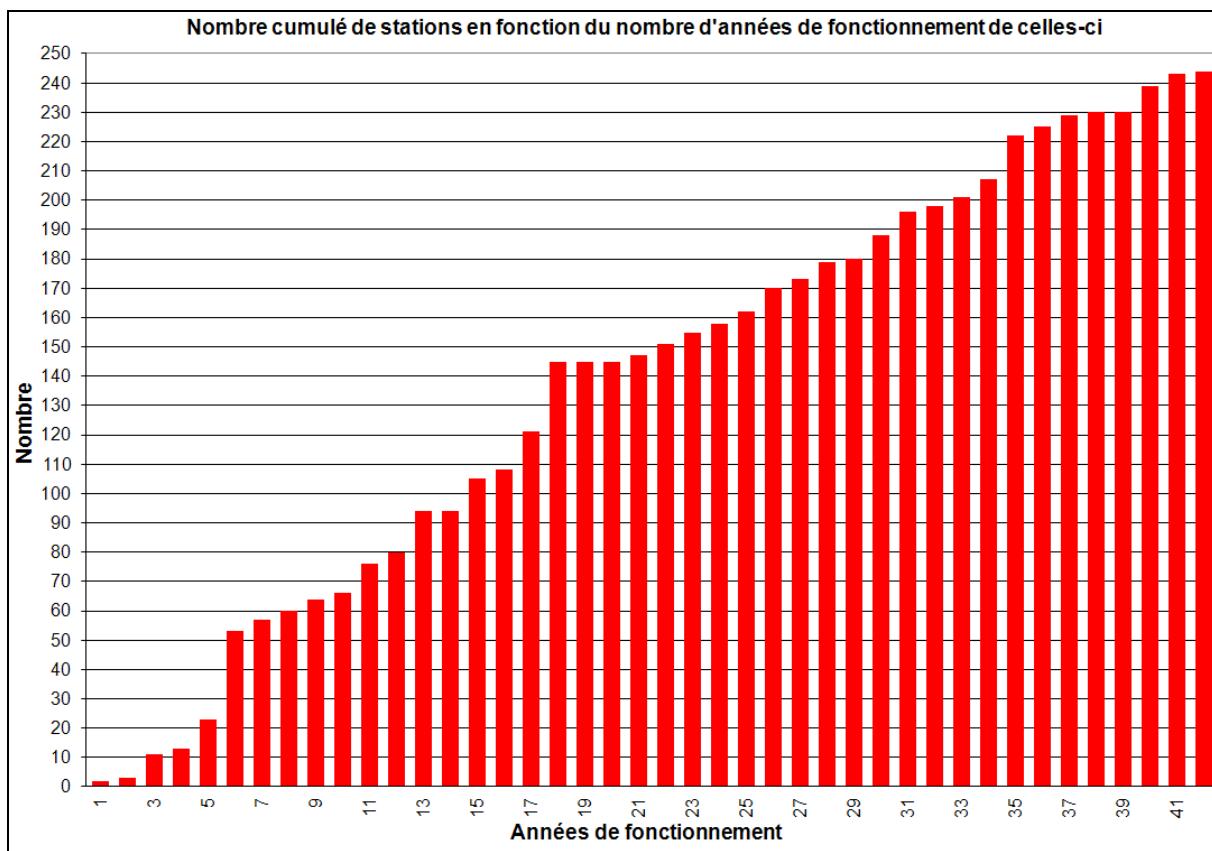


Figure 18 : Nombre cumulé de stations de mesures limnimétrique en fonction du nombre d'années de fonctionnement de celles-ci

Une durée minimum de l'historique est dès lors estimée dans le contexte wallon et validée à l'aide de tests statistiques et ce, dans le but de maximiser le nombre de stations limnimétriques pouvant être prises en considération.

Pour ce faire, on recherche le nombre d'années de mesures tel que l'écart relatif entre la moyenne de l'échantillon et la moyenne totale ainsi que l'écart relatif entre la variance de l'échantillon et la variance totale sont tous les deux inférieurs (en valeur absolue) à une tolérance fixée à 10 %. Une tolérance nulle entraînera la considération de chacune des années.

La méthode est appliquée pour les stations de mesures qui comportent un historique important (plus de 25 ans) et situées dans différents bassins versants de la Wallonie. Dans le cadre de cette recherche, elle consiste à comparer la moyenne des percentiles95 (ou MAM7) obtenus à partir des débits moyens journaliers pour des périodes allant de 1 à 15 ans à la moyenne obtenue pour l'historique complet de la station de mesures. Le nombre d'années à partir duquel on peut considérer que les moyennes sont statistiquement identiques correspond à l'historique minimum qu'une station de mesures doit comporter pour être retenue dans cette étude.

La Figure 19 transcrit la méthodologie explicitée ci-dessus en un logigramme.

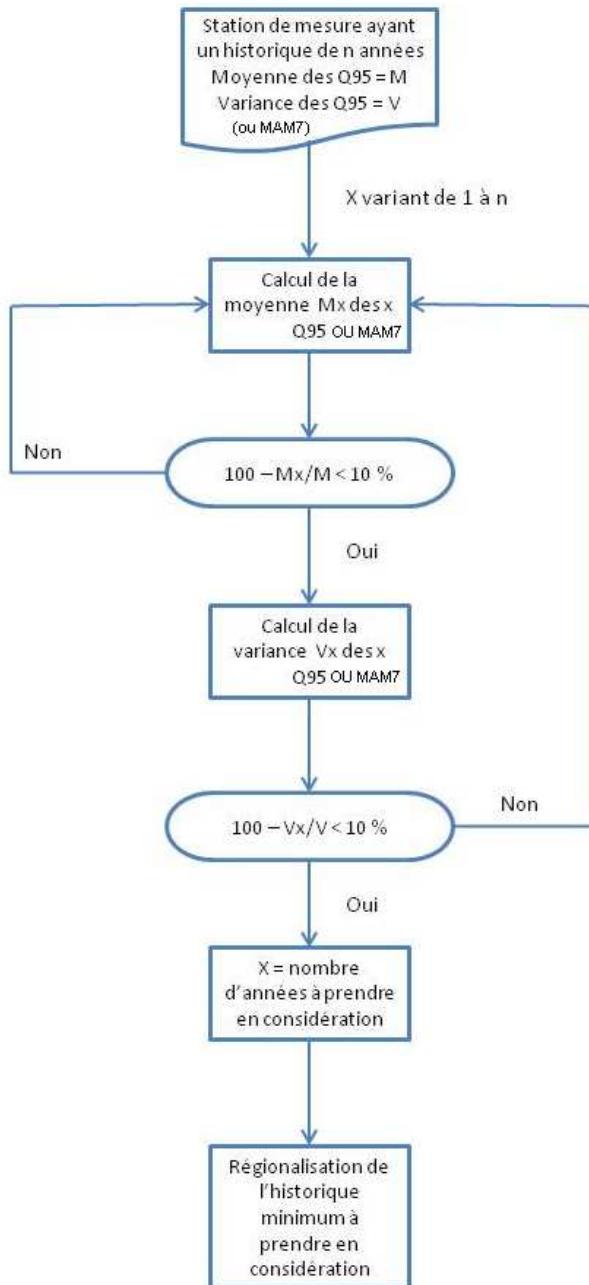


Figure 19 : Méthodologie de détermination de l'historique minimum à prendre en considération

Ce logigramme est traduit en graphiques qui sont présentés à la Figure 20 (Q95) et à la Figure 21 (MAM7) dans le cas de la Semois à Tintigny. Pour cette station de mesures, on observe que l'année à partir de laquelle les écarts relatifs entre les moyennes et les variances des Q95 sont inférieurs à 10 pourcents, est 1987, soit un historique de 21 années dans le cas du percentile95 et 22 dans le cas du MAM7.

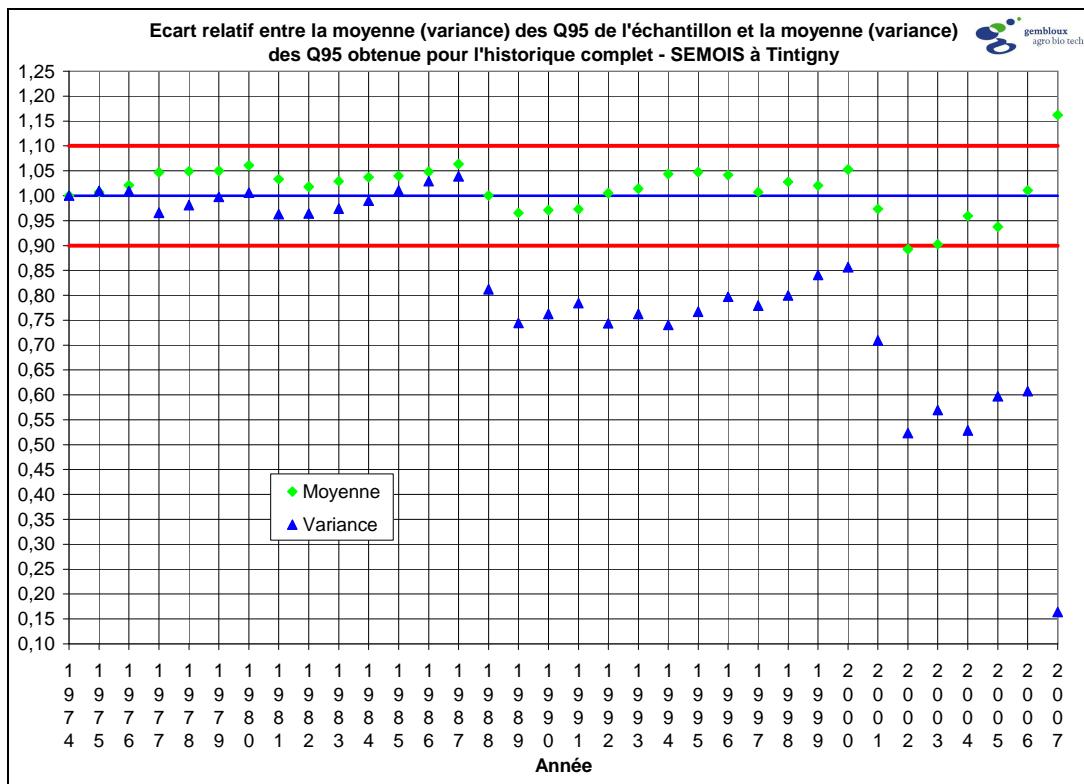


Figure 20 : Ecart relatif entre la moyenne (variance) des Q95 de l'échantillon et la moyenne (variance) des Q95 obtenu pour l'historique complet - La Semois à Tintigny

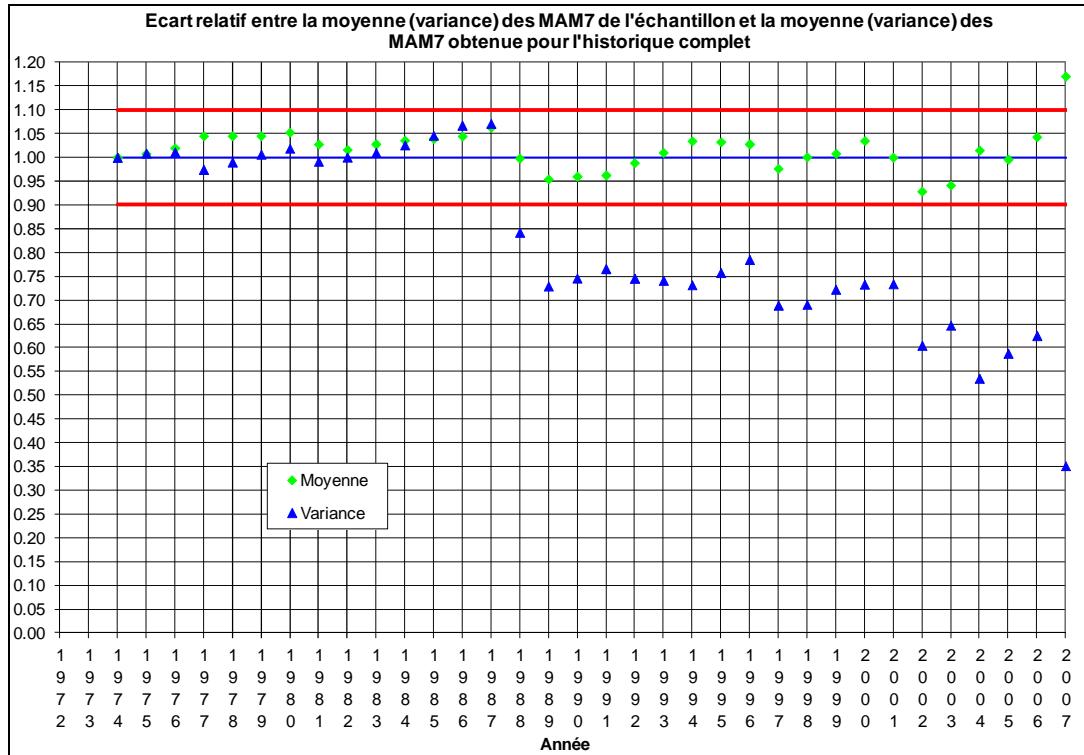


Figure 21 : Ecart relatif entre la moyenne (variance) des MAM7 de l'échantillon et la moyenne (variance) des MAM7 obtenu pour l'historique complet - La Semois à Tintigny

Cette méthodologie a été appliquée aux 64 stations de mesures ayant un historique de plus de 25 ans et situées au sein de la Région wallonne.

Les résultats sont repris dans le tableau présenté en Annexe 2. Pour chacune des 64 stations de mesures, le nombre d'années de fonctionnement et le nombre d'années sans données manquantes sont indiqués.

L'année pivot correspond à l'année à partir de laquelle les écarts relatifs entre la moyenne/variance des Q95 (ou MAM7) de l'échantillon et la moyenne/variance des Q95 (ou MAM7) obtenue pour l'historique complet sont inférieurs à 10 %.

La taille de l'historique minimum requise est donc la différence entre l'année 2009 et l'année pivot.

La taille de l'historique minimum requis est similaire pour les deux indicateurs d'étiage (Q95 et MAM7). La Figure 22 présente les résultats issus de la méthodologie pour chaque station de mesures pour les cas du percentile95 et du MAM7.

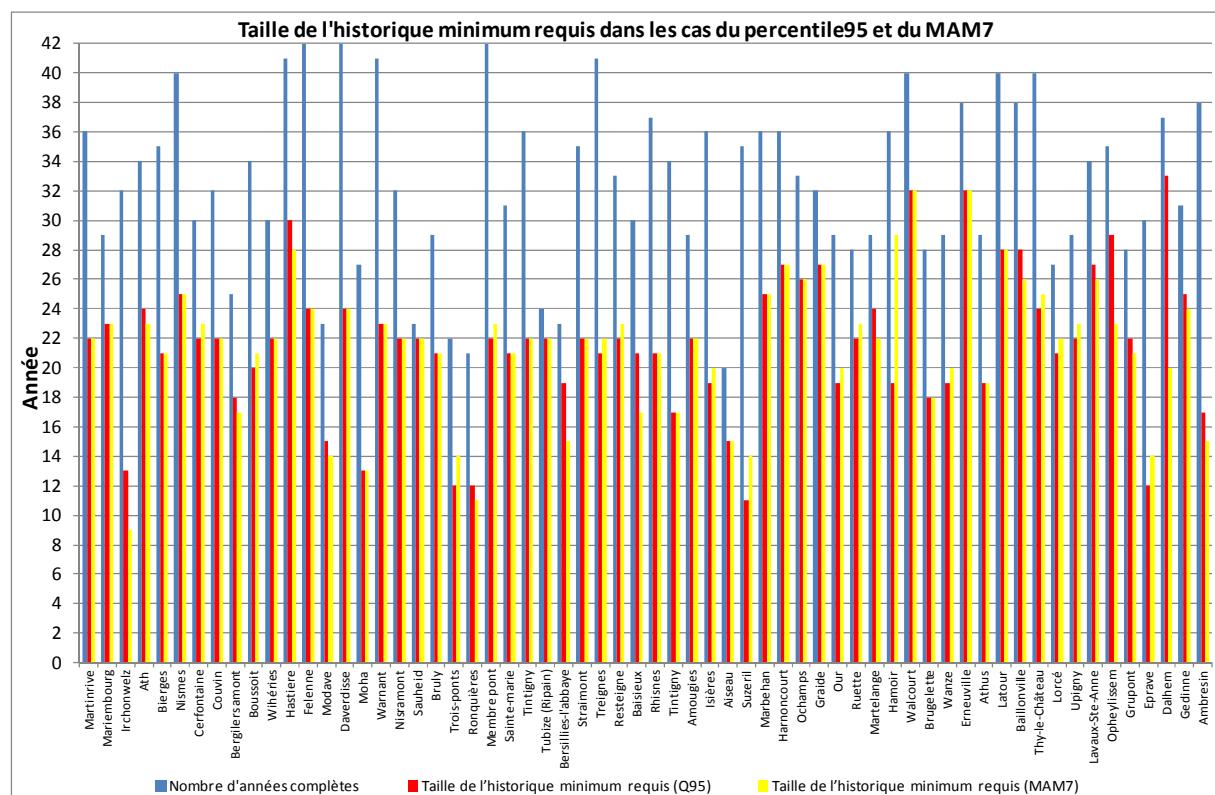


Figure 22 : Taille de l'historique minimum requis dans les cas du percentile95 et du MAM7

Les résultats sont présentés sous forme de carte à la Figure 23 avec le nombre d'années minimum requis exprimé sous forme de classes dans le cas du percentile95. Les résultats sont identiques pour le MAM7.

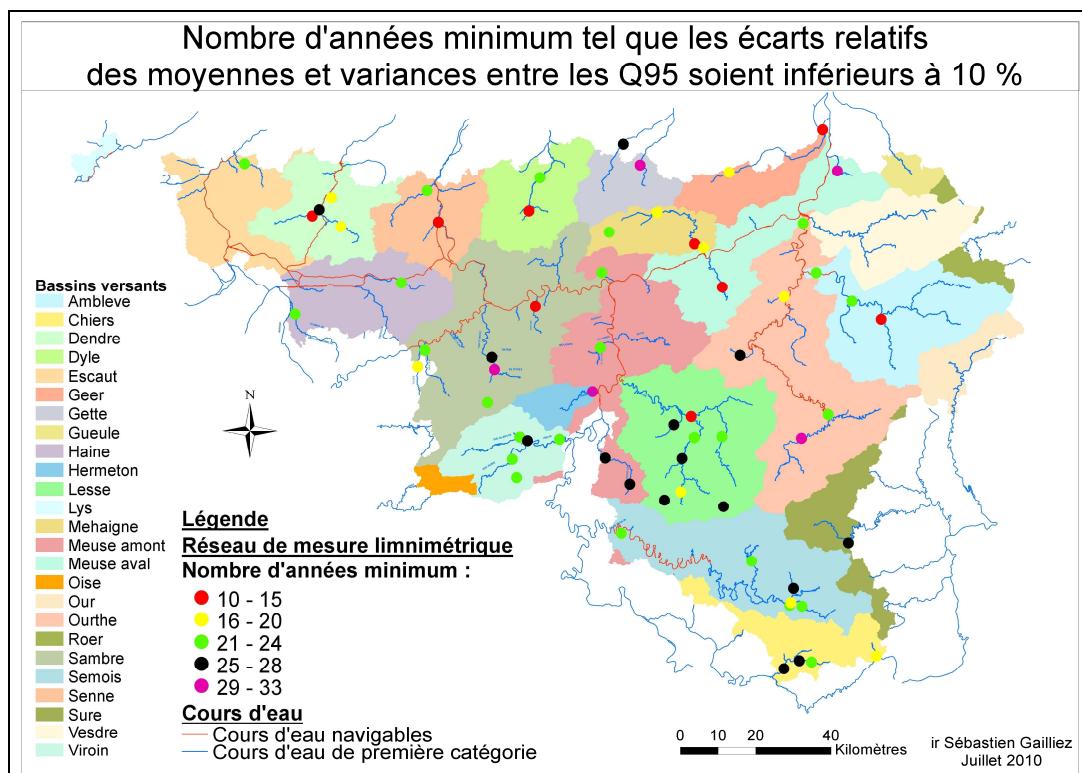


Figure 23 : Nombre d'années minimum tel que les écarts relatifs des moyennes et variances entre les Q95 soient inférieurs à 10%

La Figure 24 présente les résultats présentés en Annexe 2 sous forme d'un graphique mettant en relation le nombre d'années minimum requis en fonction du nombre cumulé de stations de mesures pour le percentile95.

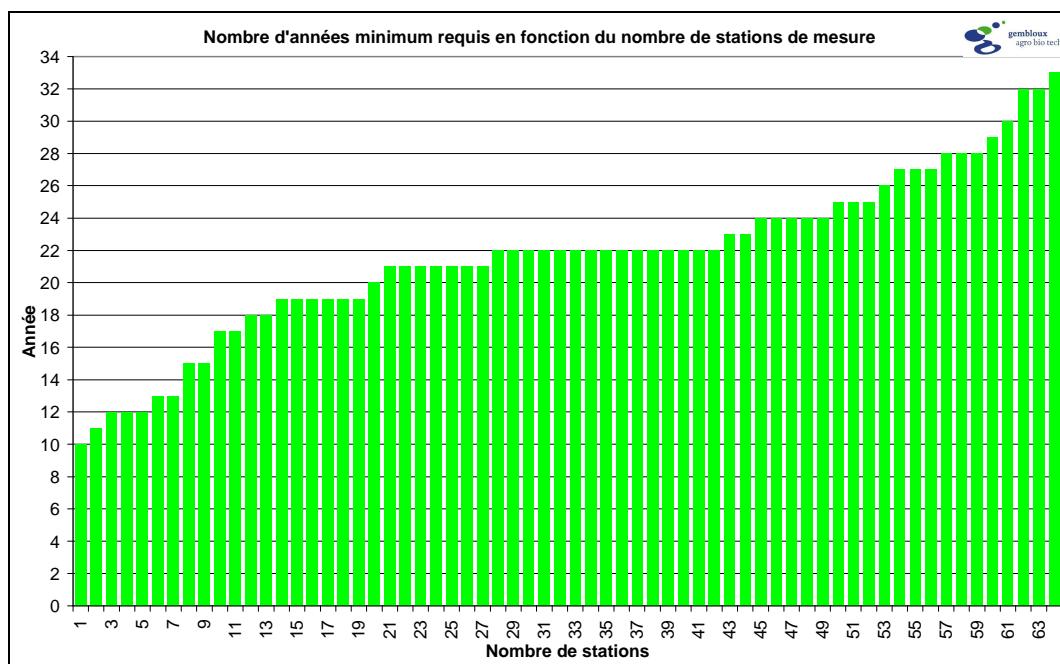


Figure 24 : Nombre d'années minimum requis en fonction du nombre de station de mesures (Percentile 95)

Pour rappel, l'objectif de cette analyse était de voir la possibilité d'utiliser des stations de mesures disposant de moins de vingt ans d'historique. En effet, un grand nombre de stations de mesures ont été installées après l'année 1991. Cependant l'ensemble des

stations de mesures installées à cette date provient de la Direction des Cours d'Eau non navigables pour lesquelles la qualité, des données n'est suffisante qu'à partir de l'année 1996 (pourcentage de données manquantes élevé, peu de jaugeages disponibles).

Au vu des résultats obtenus pour cette analyse, on peut remarquer que près de 70 % des stations de mesures nécessitent un historique minimum de 20 ans pour les deux paramètres caractérisant l'étiage, ce qui rejoint la littérature.

De ce fait, toutes les stations de mesures ayant un historique inférieur à 20 ans sont écartées temporairement de cette étude. Ces stations de mesures seront utilisées pour la validation du modèle de régression permettant d'obtenir un débit caractérisant l'étiage en n'importe quel point d'un linéaire de cours d'eau non jaugé en fonction de différents paramètres.

2.2.11 Homogénéité des données

Le test d'homogénéité des données consiste à vérifier que toutes les observations proviennent de la même population statistique (Hamza, 1999).

La cause principale qui peut rendre un échantillon hétérogène au sens statistique du terme, est le déplacement d'une station de mesures. Un test d'homogénéité est donc appliqué à l'ensemble des stations qui ont été déplacées.

De même, lors de la modernisation d'un réseau de mesure, le niveau de référence de l'échelle limnimétrique peut avoir été modifié. Cela implique une nouvelle courbe de tarage avec un décalage plus ou moins important selon les cas par rapport à la courbe précédente. Un test d'homogénéité doit également être appliqué.

Pour rappel, le test d'homogénéité est réalisé à partir d'un test d'égalité de moyennes, en considérant que les deux échantillons sont de même variance. En effet, les données étant issues d'une même population, on peut considérer que les variances des deux échantillons sont égales.

La population totale est représentée par l'ensemble des n percentiles95 calculés pour toutes les années de mesure complètes. La population a été scindée en deux échantillons de même effectif $n/2$. Dans le cas où le nombre d'années de mesure serait impair, les deux échantillons sont d'effectifs n_1 et n_2 valant respectivement $(n+1)/2$ et $(n-1)/2$.

Dans le cas d'un déplacement de la station de mesures, la population est également scindée en deux échantillons qui correspondent chacun à la période de fonctionnement des deux positions de la station de mesures.

Pour les stations de mesures issues du réseau AQUALIM de la Direction générale opérationnelle Agriculture, Ressources naturelles et Environnement, la population a également été scindée au niveau de l'année 1992 car les stations ont généralement subi un changement de courbe de tarage important. Ce changement de zéro est lié principalement à une modification du zéro de l'échelle lors de la modernisation du réseau de mesure (remplacement des limnigraphes par des stations modernes équipées d'un capteur de pression). Ce test d'hypothèse sera appelé 'Test 1992'.

Finalement, les stations pour lesquelles les données issues des échelles limnimétriques lues une fois par jour ont été récupérées, la scission de la population a également été réalisée au niveau de l'année charnière 'échelles limnimétriques –

limnigraphes'. Ce test d'hypothèse sera dénommé 'Test échelle' dans la suite de ce paragraphe.

L'hypothèse nulle émise pour le test d'homogénéité est alors :

$$H_0 : m_1 = m_2$$

La valeur obtenue pour t_{obs} suivante :

$$t_{obs} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{SCE_1 + SCE_2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}}$$

est alors comparée à la valeur de $t_{1-\alpha/2}$ dont le nombre de degré de liberté est de $2(n-1)$.

L'hypothèse nulle (Dagnelie, 1975) est rejetée lorsque :

$$t_{obs} \geq t_{1-\alpha/2}.$$

Le calcul est réalisé pour l'ensemble des stations de mesures sélectionnées après avoir analysé les différents critères de sélection, à savoir :

- la présence d'algues durant la période estivale,
- le fait que le percentile95 doit être supérieur à 5 l/s,
- l'écartement des stations de mesures dont les débits sont obtenus par calcul à partir d'une autre station,
- le débit minimum jaugé,
- la taille de l'historique,

Le tableau de l'Annexe 3 reprend les stations de mesures pour lesquelles un test d'homogénéité est effectué.

Seules les stations considérées comme non homogènes suite aux tests d'homogénéité réalisés sont présentées dans le Tableau 9. Après recherche, les causes d'hétérogénéité sont également présentées.

Tableau 9 : Stations aux données non homogènes (les stations grisées ont été récupérées). RH0 : rejet de l'hypothèse nulle, AH0 : acceptation de l'hypothèse nulle

Code	Localité	Cours d'eau	Test n/2	Test 1992	Test échelle	Causes d'hétérogénéité
77841002	Walcourt (Seuil)	Eau d'heure	RH ₀	-	-	Construction des barrages de l'Eau d'Heure
81341002	Yvoir	Bocq	RH ₀	-	-	Captages en eaux souterraines influençant le débit de base
5060	Romedenne	Hermeton	AH ₀	RH ₀	-	Hauteurs d'eau mesurées incertaines pour les faibles débits
5080	Eprave	Lesse	RH ₀	AH ₀	-	Possibilité de l'influence du Karst (grottes de Han)
5201	Rhisnes	Houyoux	AH ₀	RH ₀	-	Données erronées : hauteurs d'eau à la place de débits
5420	Isières	Sille	RH ₀	RH ₀	-	Nouvelle courbe de tarage (1973-1991)
5570	Saint-Martin	Ligne	RH ₀	RH ₀	-	Suppression des années 1970 et 1989 mais le test reste hétérogène
5660	Steenkerque	Senne	RH ₀	RH ₀	RH ₀	Déplacement de la station de l'amont à l'aval de la Brainette
5820	Wanze	Mehaigne	AH ₀	RH ₀	-	Nouvelle courbe de tarage
5930	Houffalize	Ourthe orientale	RH ₀	RH ₀	-	Gros travaux sur la section du cours d'eau + atterrissage au niveau de l'échelle
5950	Erneuville	Ourthe occidentale	AH ₀	AH ₀	RH ₀	Les années "échelle" correspondent aux étiages sévères
5961	Wiers	Verne blanche	RH ₀	RH ₀	-	Changement éventuel de gestion par rapport au canal Nimy - Péronne
5970	Habay-La-Vieille	Rulles	RH ₀	RH ₀	-	Suppression années 1991 et 1993 mais le test reste hétérogène
6020	Athus	Messancy	AH ₀	AH ₀	RH ₀	Suppression des années 1969 et 1970 anormalement élevées
6300	Vieuxville	Ry de Logne	RH ₀	AH ₀	AH ₀	Influence du Karst
6310	Forrières	Lhomme	AH ₀	RH ₀	RH ₀	-
6380	Olloy-sur-Viroin	Viroin	RH ₀	AH ₀	AH ₀	-

Exemple d'hétérogénéité

Le premier cas d'hétérogénéité apparaît pour les stations de mesures situées sur l'Eau d'Heure. Les résultats du test d'égalité des moyennes sont présentés dans le tableau 10 pour la station de Walcourt (Seuil). La période de mesure de cette station est de l'année 1978 à l'année 2009. La superficie du bassin versant est de 99,9 km². Cette station est située en amont de la confluence avec le Ry d'Yves.

Tableau 10 : Résultat du test d'homogénéité pour la station de Walcourt (seuil)

n ₁	16
n ₂	15
SCE ₁	0.161
SCE ₂	0.077
m ₁	0.396
m ₂	0.464
t _{obs}	2.093
t _{1-α/2} =u _{0,975} avec 60 degrés de liberté	2

A partir de ce tableau, on observe que t_{obs} est supérieur à $t_{1-α/2}$, ce qui engendre un rejet de l'hypothèse nulle, et donc l'inégalité des moyennes au sens statistique du terme.

La recherche de la cause de l'hétérogénéité pour la station de mesures de Walcourt (Seuil) sur l'Eau d'Heure passe par la présentation des percentiles95 sous forme de graphique (Figure 25).

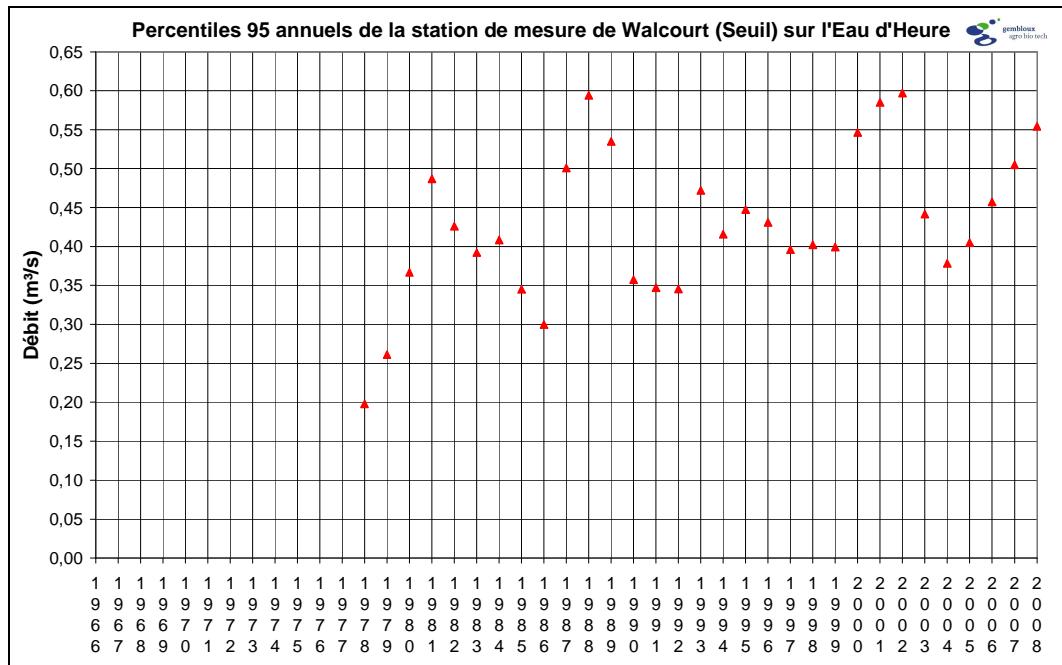


Figure 25 : Percentiles95 annuels de la station de mesures de Walcourt (Seuil) sur l'Eau d'Heure

A partir de cette figure, on remarque que les percentiles95 des années 1978 et 1979 sont particulièrement faibles par rapport au reste de la période de fonctionnement de la station de mesures.

Afin de vérifier s'il s'agit d'une influence du sévère étage qu'a connu la Région wallonne durant l'été 1976, les percentiles95 annuels des autres points de mesure situés sur l'Eau d'Heure sont présentés à la Figure 26 (Walcourt Gare, 191.6 km² et Jamioulx, 322.4 km²) en aval de la confluence avec le Ry d'Yves.

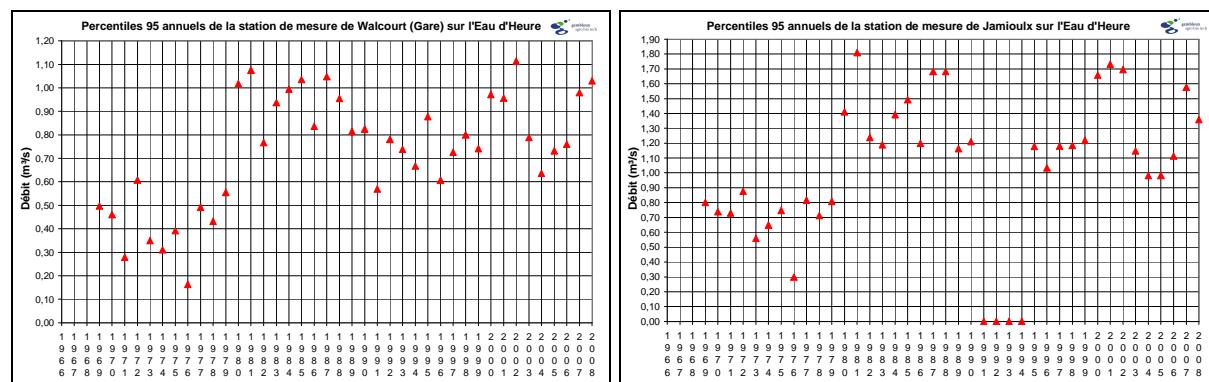


Figure 26 : Percentiles95 annuels des stations de mesures de Walcourt (Gare) et de Jamioulx sur l'Eau d'Heure

A partir des données issues des stations de mesures de Walcourt (Gare) et de Jamioulx, on observe un décrochage des données à partir de l'année 1980. Il s'avère que cette année correspond à la mise en fonction du barrage de l'Eau d'Heure. L'objectif premier de ce barrage est le soutien à l'étage de la Sambre pour la circulation batelière. Cette

augmentation artificielle du débit de la Sambre passe également par une élévation du débit d'étiage de l'Eau d'Heure.

Ce chapitre a mis en évidence les conséquences que peuvent avoir un déplacement d'une station de mesures, un calcul des débits d'une station de mesures à partir d'une autre, une modification du régime naturel d'un cours d'eau sur l'homogénéité des données hydrologiques.

2.2.12 Autres stations de mesures supprimées

Après analyse et recherche, il est apparu que le débit de certaines stations de mesures était influencé par la présence d'un ou plusieurs barrages qui ont pour objectif de réguler le débit soit en période d'inondations, soit en période de basses eaux.

Le premier bassin versant concerné est celui de l'Ourthe, sur lequel on observe à la confluence de l'Ourthe occidentale et de l'Ourthe orientale, le barrage de Nisramont dont l'objectif est multiple : production d'électricité, réserve d'eau potabilisable pour la Province de Luxembourg et le tourisme. Les stations de mesures concernées dans ce cas sont Nisramont et Sauheid.

La présence des barrages de Robertville sur la Warche, influence le débit de celle-ci ainsi que celui de l'Amblève à Martinrive. Ces trois stations de mesures ont donc également été écartées du présent travail.

2.2.13 Liste finale des stations de mesures sélectionnées

La liste finale des stations de mesures retenues est présentée en Annexe 4.

3 ANALYSE FRÉQUENTIELLE DES DÉBITS D'ÉTIAGE

3.1 Introduction

Une série de données hydrologiques peut être résumée simplement par sa valeur centrale (moyenne arithmétique en général) et un paramètre de dispersion (écart-type). Pour compléter sa caractérisation, un phénomène hydrologique est décrit couramment par une variable aléatoire dont les valeurs de l'échantillon possèdent une distribution de fréquence, analogue à la densité de probabilité de la population $p(x)$. Cette densité de probabilité (en anglais, probability density function, pdf) est obtenue graphiquement avec en abscisses les valeurs des observations et en ordonnées les fréquences de ces observations groupées par classes de valeurs croissantes.

Un autre moyen de représenter graphiquement les données est d'utiliser les fréquences cumulées au lieu des fréquences d'observations dans chaque intervalle. Ceci correspond à la fonction de répartition (en anglais, cumulative distribution function, cdf) qui n'est autre que la courbe intégrale de la courbe de densité de probabilité:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x p(x)dx.$$

La fonction de répartition $F(x)$ donne, pour toute valeur x de la variable, sa probabilité de non-dépassement. Cette fonction associe donc une probabilité d'occurrence à un phénomène hydrologique et inversement.

L'analyse fréquentielle consiste à ajuster une loi statistique à un échantillon d'observations hydrologiques, afin d'évaluer la relation entre l'estimation du débit de période de retour T et la probabilité de non-dépassement qui lui est associée. Le but est de calculer les débits d'étiage critiques X_T qui correspondent à une certaine période de retour T , définie comme étant le temps moyen entre deux occurrences d'étiages. (Ven Te Chow *et al.*, 1988) (Maidment, 1993) (Meylan *et al.*, 2008)

Pour ce faire, on a recours à des modèles probabilistes. Ces modèles sont des formulations mathématiques qui visent à simuler des phénomènes hydrologiques naturels en tant que processus probabilistes, basés sur l'analyse probabiliste de la distribution des variables aléatoires considérées (Q95 ou MAM7).

Dans ce chapitre, plusieurs distributions statistiques des valeurs extrêmes utilisées fréquemment en hydrologie seront abordées : la distribution Lognormale, la distribution Gamma, la distribution de Weibull, la distribution de Pearson, la distribution de Gumbel, la loi généralisée des valeurs extrêmes et la loi Normale.

Par ailleurs, les prévisions de débits d'étiage ne peuvent être établies pour des périodes de retour dont la durée est nettement supérieure à la durée d'observations. L'application de ces modèles requiert donc des durées d'observation assez longues pour obtenir des prévisions futures avec une grande précision.

3.2 Estimation des paramètres de la loi

3.2.1 Introduction

Deux méthodes d'estimation des paramètres couramment utilisées en hydrologie seront envisagées dans le cadre de cette étude, à savoir la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance.

En vue de l'estimation de k paramètres, la méthode des moments a pour principe d'égaler les k premiers moments estimés de la population, exprimés en fonction des k paramètres, aux k premiers moments de l'échantillon. Pour rappel, les moments sont soit des paramètres de dispersion, soit des indices de dissymétrie.

La méthode du maximum de vraisemblance a pour principe de choisir comme estimation de tout paramètre la valeur la plus vraisemblable, c'est-à-dire qui a la plus forte probabilité de provoquer l'apparition des valeurs réellement observées dans l'échantillon (Dagnelie, 1992).

3.2.2 Méthode des Moments

La méthode des moments a été développée en premier lieu par Karl Pearson en 1902. Il pensait que la meilleure estimation des paramètres d'une distribution de probabilité est celle pour laquelle les moments de la fonction de densité de probabilité d'une population de départ est égale aux moments correspondants pour un échantillon (Ven Te Chow *et al.*, 1988).

Les paramètres de la loi de distribution sont fonction des moments de la population qui sont estimés à partir de l'échantillon (moyenne, variance, coefficient de variation, coefficient d'asymétrie, coefficient d'aplatissement) :

- la moyenne arithmétique (moment d'ordre 1) :

$$\mu_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i .$$

- la variance (moment d'ordre 2) :

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2 .$$

- la formule généralisée des moments centrés (par rapport à la moyenne) d'ordre k s'écrit :

$$m_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^k .$$

Le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement (coefficients de PEARSON) peuvent être obtenus grâce aux formules suivantes :

$$\gamma_x = b_1 = \frac{m_3}{\sigma_x^3} \quad \text{et} \quad b_2 = \frac{m_4}{\sigma_x^4} .$$

Tasker (1987) compare différentes distributions de probabilité à trois dimensions et méthodes d'ajustement par la méthode du bootstrap (rééchantillonnage dans les distributions empiriques observées) et recommande, entre autre, l'usage de la loi LogPearson type III avec la méthode des moments (MM) pour estimer ses paramètres.

Matalas (1963) recommande l'usage de la distribution Weibull à 3 paramètres (W3) ajustée via la méthode des moments ou la loi Pearson type III en utilisant la méthode du maximum de vraisemblance (MV). Toutefois, il n'a pas considéré la procédure W3 – MV.

Leppajarvi (1989) a estimé les paramètres inconnus des distributions suivantes : Gumbel, Lognormale à 2 paramètres et Gamma sur des données de crue et d'étiage via la méthode des moments et la méthode du maximum de vraisemblance. Malgré la méthode utilisée, il n'y voit aucune influence sur l'ajustement des distributions.

En général, les lois de distribution estimées via la méthode des moments sont limitées à deux paramètres car les estimations de la moyenne et de l'écart-type à partir de l'échantillon sont beaucoup plus fiables que les estimations des autres moments. En effet, les moments centrés d'ordre supérieur à 2 ne sont guère utilisés car le poids des valeurs extrêmes devient prépondérant surtout dans le cas de petits échantillons. Etant donné que pour leurs études, Matalas (1963) et Condie et Nix (1975) utilisent la méthode des moments, ils rejettent la loi Lognormale à 3 paramètres (LN3).

Même si la méthode du maximum de vraisemblance est utilisée pour estimer les paramètres d'une distribution, la méthode des moments peut s'utiliser comme point de départ pour maximiser la (log) vraisemblance. En effet, on doit utiliser dans ce cas des algorithmes numériques, comme la méthode de Newton, qui nécessitent des points de départ.

3.2.3 Méthode du Maximum de Vraisemblance

La méthode du maximum de vraisemblance a été développée par R. A. Fisher (1922). Selon Fisher, la meilleure estimation d'un paramètre d'une distribution de probabilité est telle que la valeur maximise la vraisemblance de la probabilité d'occurrence d'une valeur observée d'un échantillon.

Cette méthode a été utilisée par de nombreux auteurs: Joseph (1970), Condie et Nix (1975), Landwher (1979), Galéa *et al.* (1999), CEMAGREF (1998). Shao *et al.* (Shao *et al.*, 2008) ont comparé les trois méthodes fréquemment utilisées pour estimer les paramètres de la distribution Burr III adaptée pour l'analyse des débits d'étiage. Il recommande dans son étude l'usage de la méthode du maximum de vraisemblance.

La fonction de vraisemblance correspond à la probabilité ou la densité de probabilité relative aux valeurs observées x_1, \dots, x_n exprimée en fonction du ou des paramètres de la population. Pour un échantillon aléatoire et pour une population définie par un seul paramètre u , la fonction de vraisemblance est :

$$L(u) = P(x_1, \dots, x_n; u) = P(x_1; u) \dots P(x_n; u)$$

ou

$$L(u) = f(x_1, \dots, x_n; u) = f(x_1; u) \dots f(x_n; u).$$

Les estimateurs du maximum de vraisemblance correspondent par définition au maximum de cette fonction. La recherche de ce maximum peut être réalisée en annulant la dérivée du logarithme de la fonction par rapport à u :

$$\frac{\partial \text{Log}[L(u)]}{\partial u} = 0.$$

Cette méthode fournit généralement de meilleurs résultats par rapport aux autres méthodes d'estimation (Landwher, 1979) vu que les estimateurs de ces dernières méthodes ne fournissent pas nécessairement les qualités générales d'efficacité ou d'efficacité asymptotique des estimateurs du maximum de vraisemblance. Toutefois, les calculs sont plus complexes.

3.2.4 Méthode des L-Moments et des Moments de Probabilités pondérés

Parmi les méthodes utilisées pour ajuster des distributions statistiques aux données hydrologiques, la méthode du maximum de vraisemblance est depuis longtemps fréquemment utilisée vu son efficacité asymptotique. D'un autre côté, la méthode des moments est très populaire car son application est simple.

Une troisième méthode qui constitue une bonne alternative aux deux autres méthodes, est la méthode des moments de probabilités pondérés. (Greenwood *et al.*, 1979) (Hosking, 1985) (Hosking, 1986) (Ashkar et Mahdi, 2006)

La méthode des L-moments est une méthode pour résumer les propriétés statistiques d'une série de données hydrologiques.

Le premier L-moment (Maidment, 1993) est de nouveau la moyenne :

$$\lambda_1 = E[X]$$

où $E[X]$ correspond à l'espérance mathématique et vaut :

$$E[X] = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f(x) dx.$$

Pour n'importe quelle distribution, le second L-moment (Maidment, 1993) est un facteur d'échelle basé sur la différence attendue entre deux observations sélectionnées au hasard :

$$\lambda_2 = \frac{1}{2} E[X_{(1|2)} - X_{(2|2)}]$$

avec $X_{(i|n)}$, la $i^{\text{ème}}$ plus grande observation dans un échantillon de taille n ($i = 1$ correspond à la plus grande donnée).

Les L-moments d'ordres 3 et 4 (Maidment, 1993) sont respectivement :

$$\lambda_3 = \frac{1}{3} E[X_{(1|3)} - 2X_{(2|3)} + X_{(3|3)}],$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{4} E[X_{(1|4)} - 3X_{(2|4)} + 3X_{(3|4)} - X_{(4|4)}]$$

avec $X_{(i|n)}$, la $i^{\text{ème}}$ plus grande observation dans un échantillon de taille n ($i = 1$ correspond à la plus grande donnée).

Les L-moments ont le principal avantage, par rapport aux moments traditionnels, d'être des combinaisons linéaires des observations triées. Ils souffrent moins des effets de variabilité de l'échantillonnage, ils sont plus robustes que les moments conventionnels par rapport aux données singulières des données et permettent de tirer des conclusions plus stables à propos de la distribution de probabilité initiale pour des échantillons de petite taille. Les L-moments conduisent même parfois à des estimations de paramètres plus efficaces que celles du maximum de vraisemblance. (Hosking, 1990)

Les estimateurs L-moments des coefficients sans dimensions de variation et d'asymétrie ne sont quasiment jamais biaisés et ont une distribution très proche de la normale. Dans une large gamme d'applications hydrologiques, les L-moments fournissent des estimateurs simples et relativement efficaces des caractéristiques d'une série de données hydrologiques et des paramètres d'une distribution.

Comme la variance ou le coefficient d'asymétrie d'une variable aléatoire sont fonction des moments $E[X]$, $E[X^2]$ et $E[X^3]$, les L-moments peuvent être écrits comme des fonctions de moment de probabilités pondérés (PWMS) qui sont définis comme:

$$\beta_r = E\left\{ X[F(X)]^r \right\} \text{ (Maidment, 1993)}$$

où $F(X)$ est la fonction de répartition de X . Les moments de probabilités pondérés sont l'espérance de X fois une puissance de $F(X)$. Pour $r = 0$, β_0 est la moyenne de la population μ_X .

Les estimateurs des L-moments sont la plupart du temps écrits simplement sous forme de fonctions linéaires des estimateurs PWMS. Le premier estimateur PWM b_0 de β_0 est la moyenne de l'échantillon μ_X . Pour estimer les autres PWMS, on emploie les données ordonnées, ou les statistiques d'ordre $X_{(n)} \leq \dots \leq X_{(1)}$ correspondant aux observations triées de l'échantillon $(X_i | i=1, \dots, n)$. Un simple estimateur de β_r , pour $r \geq 1$ est :

$$b_r^* = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n X_{(j)} \left[1 - \frac{(j-0.35)}{n} \right]^r \text{ (Maidment, 1993)}$$

où $1-(j-0.35)/n$ sont les estimateurs de $F(X_{(j)})$. Quand le biais est peu important, on peut utiliser les estimateurs PWM non biaisés suivants (Maidment, 1993) :

$$\begin{aligned} b_0 &= \mu_x, \\ b_1 &= \sum_{j=1}^{n-1} \frac{(n-j)X_{(j)}}{n(n-1)}, \\ b_2 &= \sum_{j=1}^{n-2} \frac{(n-j)(n-j-1)X_{(j)}}{n(n-1)(n-2)}, \\ b_3 &= \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(n-j)(n-j-1)(n-j-2)X_{(j)}}{n(n-1)(n-2)(n-3)}. \end{aligned}$$

La formule générale étant :

$$\hat{\beta}_r = b_r = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r} X_{(j)}}{\binom{n-1}{r}} = \frac{1}{(r+1)} \sum_{j=1}^{n-r} \frac{\binom{n-j}{r} X_{(j)}}{\binom{n}{r+1}} \quad (\text{Maidment, 1993}).$$

Pour $r = 1, \dots, n-1$; Cette formule peut être dérivée en supposant que $(r+1)\beta_r$ est la valeur attendue pour la plus grande observation dans un échantillon de taille $(r+1)$. Les estimateurs non biaisés sont recommandés pour le calcul des diagrammes des L-moments et pour les procédures de régionalisation quand le biais est peu important.

Pour n'importe quelle distribution, les L-moments sont facilement calculables en termes de PWMs :

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \beta_0, \\ \lambda_2 &= 2\beta_1 - \beta_0, \\ \lambda_3 &= 6\beta_2 - 6\beta_1 + \beta_0, \\ \lambda_4 &= 20\beta_3 - 30\beta_2 + 12\beta_1 - \beta_0.\end{aligned}$$

Les estimations de λ_i sont obtenues en remplaçant la valeur inconnue β_r par l'estimateur b_r .

Le Tableau 11 contient les définitions des coefficients L-moment sans dimensions de variation, d'asymétrie et d'aplatissement.

Tableau 11 : Définitions des rapports sans dimension des moments et L-moments (Maidment, 1993)

Nom	Abréviation	Définition
Rapport des moments		
Coefficient de variation	CV _x	σ_x/μ_x
Coefficient d'asymétrie	γ_x	$\frac{E(X - \mu_x)^3}{\sigma_x^3}$
Coefficient d'aplatissement		$\frac{E(X - \mu_x)^4}{\sigma_x^4}$
Rapport des L-moments		
L-coefficient de variation	τ_2	λ_2 / λ_1
L-coefficient d'asymétrie	τ_3	λ_3 / λ_2
L-coefficient d'aplatissement	τ_4	λ_4 / λ_2

Le Tableau 12 donne les expressions pour λ_1 , λ_2 , τ_3 et τ_4 pour différentes distributions.

Tableau 12 : Valeurs des L-Moments pour plusieurs distributions (Maidment, 1993)

Distribution	L moments			
Normale : $x = \mu + \sigma \Phi^{-1}[F]$	$\lambda_1 = \mu$	$\lambda_2 = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}}$	$\tau_3 = 0$	$\tau_4 = 0.1226$
Gumbel : $x = \xi - \alpha \ln[-\ln F]$	$\lambda_1 = \xi + 0.5772\alpha$	$\lambda_2 = \alpha \ln 2$	$\tau_3 = 0.1699$	$\tau_4 = 0.1504$
GEV : $x = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - [-\ln F]^\kappa\}$	$\lambda_1 = \xi + \frac{\alpha}{\kappa} \{1 - \Gamma[1 + \kappa]\}$	$\lambda_2 = \frac{\alpha}{\kappa} (1 - 2^{-\kappa}) \Gamma(1 + \kappa)$	$\tau_3 = \frac{2(1 - 3^{-\kappa})}{(1 - 2^{-\kappa})} - 3$	$\tau_4 = \frac{1 - 5(4^{-\kappa}) + 10(3^{-\kappa}) - 6(2^{-\kappa})}{1 - 2^{-\kappa}}$
Lognormale : $x = \xi + \exp(\mu_Y + \sigma_Y \Phi^{-1}F)$	$\lambda_1 = \xi + \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right)$	$\lambda_2 = 2 \exp\left(\mu_Y + \frac{\sigma_Y^2}{2}\right) \left[\Phi\left(\frac{\sigma_Y}{\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{2} \right]$	$\tau_4 = 0.12282 + 0.77518\tau_3^2 + 0.12279\tau_3^4 - 0.13638\tau_3^6 + 0.11368\tau_3^8$	
Gamma : $f(x) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} \exp(-\beta x)}{\Gamma(\alpha)}$	$\lambda_1 = \frac{\alpha}{\beta}$	$\lambda_2 = \frac{\Gamma(\alpha+0.5)}{\sqrt{\pi} \beta \Gamma(\alpha)}$	$\tau_4 = 0.1224 + 0.30115\tau_3^2 + 0.95812\tau_3^4 - 0.57488\tau_3^6 + 0.19383\tau_3^8$	

Nathan et Mc Mahon (Nathan et McMahon, 1990) ont comparé les trois méthodes (moments, maximum de vraisemblance, moments de probabilités pondérés) pour estimer les paramètres de la loi de Weibull appliquée au débit minimum annuel ainsi qu'aux débits de m jours consécutifs. Leur recommandation à l'issue de l'étude était d'utiliser plus d'une méthode surtout pour les petits échantillons. Il s'avère que la méthode des moments de probabilités pondérés donnait des estimateurs peu satisfaisants pour les sécheresses de courte durée alors que la méthode du maximum de vraisemblance fournit des estimateurs qui sont souvent plus grand que ceux obtenus avec les deux autres méthodes.

En conclusion, la méthode du maximum de vraisemblance sera utilisée dans le cadre de cette étude car elle s'adapte aux différentes lois proposées dans la littérature pour l'analyse fréquentielle en hydrologie, et plus particulièrement pour l'étiage.

3.3 Lois utilisées en hydrologie

3.3.1 Distribution NORMALE

Le théorème central limite établit la convergence en loi d'une suite de variables aléatoires vers la loi Normale. En effet, si une variable aléatoire est la somme de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, alors lorsque le nombre de variables croît, la distribution tend vers la loi Normale quelle que soit la distribution d'origine des variables aléatoires. La densité de probabilité pour une variable aléatoire x est :

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x}\right)^2\right] \text{ (Maidment, 1993).}$$

Le domaine de définition de cette fonction de moyenne μ_x et de variance σ_x^2 n'est ni bornée inférieurement ni supérieurement. Les deux moments de la distribution Normale sont ses paramètres naturels. Ils sont généralement estimés par la moyenne et la variance de l'échantillon. Les estimateurs du maximum de vraisemblance sont obtenus en remplaçant n dans le dénominateur de la variance par $n-1$. (Maidment, 1993)

3.3.2 Distribution LOGNORMALE

Dans beaucoup de cas, pour des variables aléatoires X strictement positives ($x>0$), leur logarithme est correctement décrit par une distribution Normale.

Si on pose $y = \log x$, la densité de probabilité (Maidment, 1993) est fournie par la relation :

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left(-\frac{(\log x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad \text{pour } 0 < x < \infty.$$

Les paramètres naturels de la distribution Lognormale sont la moyenne et la variance (Maidment, 1993) :

$$\mu_x = \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right) \quad \sigma_x^2 = \mu_y^2 \left(\exp \sigma_y^2 - 1\right).$$

Dans beaucoup de cas, les logarithmes d'une variable aléatoire x ne sont pas distribués normalement mais le fait de soustraire une limite inférieure avant de prendre les logarithmes peut résoudre le problème. Les équations de cette distribution Lognormale à 3 paramètres sont les suivantes :

$$y = \log(x - \zeta)$$

avec

$$\mu_x = \zeta + \exp\left(\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right),$$

$$\sigma_x^2 = \exp(2\mu_y + \sigma_y^2) \left(\exp \sigma_y^2 - 1\right)$$

et le coefficient d'asymétrie :

$$\gamma_x = 3\phi + \phi^3, \phi = \sqrt{\exp(\sigma_y^2) - 1}.$$

Pour la distribution Lognormale à 3 paramètres, la méthode des moments est inefficace. Un estimateur simple et efficace du troisième paramètre ζ est donné par la formule suivante :

$$\zeta = \frac{x_{(1)} \cdot x_{(n)} - x_{\text{médiane}}^2}{x_{(1)} + x_{(n)} - 2x_{\text{médiane}}}.$$

Quand $\xi = x_{(1)} + x_{(n)} - 2x_{\text{médiane}} > 0$, où $x_{(1)}$ et $x_{(n)}$ sont respectivement la plus grande et la plus petite valeurs observées ; $x_{\text{médiane}}$ est la médiane de l'échantillon. (Maidment, 1993)

La loi Lognormale à deux paramètres déterminés par la méthode du maximum de vraisemblance a été utilisée en France (Cemagref, 1998) (Galéa *et al.*, 1999) pour caractériser les débits d'étiage des stations hydrométriques ainsi qu'en Allemagne. Elle est choisie pour sa simplicité, deux paramètres (moyenne et écart-type) et sa relativement bonne adéquation pour les chroniques d'observation d'une vingtaine d'années.

3.3.3 Distribution des VALEURS EXTREMES GENERALISEES

La loi correspond à une formule mathématique générale utilisée pour décrire les distributions de valeurs extrêmes. Elle est définie par la fonction de répartition suivante :

$$F(x) = \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{(x-u)}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right].$$

Trois types de distribution des valeurs extrêmes peuvent ainsi être distingués en fonction de la valeur du paramètre de forme ξ . Lorsque $\xi \rightarrow 0$, on retrouve la distribution de Gumbel ou distribution des valeurs extrêmes de type I. Quand $\xi > 0$, il s'agit de la distribution de Fréchet ou distribution des valeurs extrêmes de type II, elle est utilisée pour modéliser des séries qui tendent très lentement vers une asymptote et est bornée inférieurement. Pour $\xi < 0$, la distribution possède une borne supérieure et correspond à la distribution de Weibull ou distribution des valeurs extrêmes de type III. (Bernier, 1957)

Puisque nous nous intéressons à la distribution des minimas, les fonctions de répartitions seront adaptées. De ce fait, la distribution de Fréchet ($\xi < 0$) possède une borne supérieure et la distribution de Weibull ($\xi > 0$), une borne inférieure. (Salvadori *et al.*, 2007)

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(1 + \xi \frac{(x-u)}{\alpha} \right)^{-\frac{1}{\xi}} \right].$$

A. Distribution GUMBEL

Cette loi est également appelée distribution des fréquences de valeurs extrêmes du fait qu'elle résulte de l'étude des valeurs extrêmes prises par une variable aléatoire au cours de n tirages indépendants. C'est une distribution à queue légère. (Bernier, 1957) La fonction de répartition est la suivante :

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \exp \left(\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$$

avec $-\infty < x < \infty$; $\alpha > 0$; $u > 0$.

et la densité de probabilité :

$$F(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-u}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-u}{\alpha} \right) \right]$$

avec α le paramètre d'échelle et u le paramètre de position.

Les moments sont :

$$\mu_x = u + 0.5772\alpha,$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\pi^2 \alpha^2}{6}.$$

Les estimateurs L-moments pour une distribution de Gumbel sont généralement aussi bons voire meilleurs que les estimateurs de la méthode des moments quand les observations sont réellement issues d'une distribution de Gumbel, bien que les estimateurs de la méthode du maximum de vraisemblance soient les meilleurs. (Landwehr *et al.*, 1979)

La densité de probabilité de la distribution de Gumbel est très similaire à celle de la distribution Lognormale avec $\gamma = 1.13$. Un changement au niveau des coefficients ξ et α bouge le centre de la pdf et joue sur sa largeur mais ne cause aucune modification sur la forme de la distribution. La distribution de Gumbel a un coefficient d'asymétrie fixe (1.1396).

B. Distribution de FRECHET

La loi de distribution de Fréchet est également appelée loi Log-Gumbel (El-Adlouni *et al.*, 2007). Moins connue que les deux autres distributions des valeurs extrêmes, elle présente une décroissance moins rapide que la loi de Gumbel. Il s'agit, en effet, d'une distribution à queue lourde. (Bernier, 1957)

La fonction de répartition est la suivante :

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(-\frac{x-u}{\alpha} \right)^{-k} \right]$$

avec $\xi = k^{-1} > 0$; $x \leq u > 0$; $\alpha > 0$.

et la densité de probabilité :

$$f(x) = -\frac{k}{\alpha} \left(\frac{x-u}{\alpha} \right)^{-k-1} \exp \left[-\left(\frac{x-u}{\alpha} \right)^{-k} \right]$$

avec α le paramètre d'échelle, k le paramètre de forme et u le paramètre de position.

Les moments sont :

$$\mu_x = u + \alpha \Gamma \left(1 - \frac{1}{k} \right),$$

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left[\Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 - \frac{1}{k}\right) \right].$$

C. Distribution WEIBULL

La distribution de Weibull est une des distributions les plus utilisées dans la littérature pour l'étude de l'étiage. Elle correspond à une distribution de type III pour les minima. Lors de la comparaison avec d'autres distributions (Pearson type 3 et type 5, Lognormale à 3 paramètres) elle apparaît être la plus adéquate dans différentes études (Matalas, 1963) (Condie, 1975). Matalas a utilisé la méthode des moments pour estimer les paramètres. Deux critères de comparaison ont été appliqués : la limite inférieure ne doit pas être inférieure à la limite observée et la relation entre le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement de la distribution théorique doit ressembler à celle présente dans les données observées. Pour Condie et Nix, la loi de Weibull estimée par la méthode du maximum de vraisemblance est la plus adéquate, vient ensuite la loi de Weibull estimée par la méthode du plus faible débit observé. La loi est rejetée si la limite inférieure estimée est supérieure au plus faible débit minimum observé. Gumbel fut le premier à appliquer la théorie des valeurs extrêmes aux événements d'étiage et en particulier la loi de Weibull à trois paramètres (Gumbel, 1954). La fonction de répartition est donnée par la relation :

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^k\right]$$

avec $\xi = -k^{-1} < 0$; $x \geq u > 0$; $\alpha > 0$.

et la densité de probabilité :

$$f(x) = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^k\right]$$

avec α le paramètre d'échelle, k le paramètre de forme et u le paramètre de position.

Les moments sont :

$$\mu_x = \alpha \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right),$$

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left\{ \Gamma\left(1 - \frac{2}{k}\right) - \left[\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \right\}.$$

Comme pour la loi Lognormale, la loi de Weibull peut être à deux ou trois paramètres selon que l'on tient compte du paramètre de position, qui dans le cas de la loi à 3 paramètres, doit être inférieure au plus faible débit minimum observé. La loi de Weibull a l'avantage de pouvoir représenter des données dont le coefficient d'asymétrie est négatif.

3.3.4 Distribution GAMMA

La densité de probabilité de la loi Gamma est la suivante :

$$f(x) = \frac{\alpha^\beta \cdot x^{\beta-1} \exp(-\alpha x)}{\Gamma(\beta)} \quad \text{pour } 0 < x < +\infty \text{ et } \alpha, \beta > 0.$$

$\Gamma(\beta)$ représente la fonction Gamma définie par la relation :

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} \exp^{-x} \cdot x^{\beta-1} \cdot dx :$$

- pour β entier : $\Gamma(\beta) = (\beta-1)!$,
- pour β non entier, la fonction Gamma est calculée par développement en série et intégration numérique.

La méthode des moments conduira aux égalités suivantes :

$$\mu_x = \frac{\beta}{\alpha},$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta}{\alpha^2}.$$

Joseph (1970) a comparé, pour 37 stations de mesures, 4 distributions théoriques (Gamma, Lognormale à 2 paramètres, Normale, Weibull) ajustées aux débits minimum annuels de la moyenne mobile sur 14 jours des débits journaliers. L'estimation des paramètres a été réalisée via la méthode du maximum de vraisemblance. La loi Gamma s'avère être la plus adéquate suivie de la loi de Weibull et la loi Lognormale. La comparaison est réalisée à partir des critères suivants : Le test d'ajustement khi-carré et la comparaison des relations des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement.

3.3.5 Distribution PEARSON

La loi Pearson type 3 a pour fonction de densité de probabilités :

$$f(x) = \frac{\alpha}{\Gamma(\beta)} [\alpha(x - \xi)^{\beta-1}] \cdot \exp(-\alpha(x - \xi)).$$

La méthode des moments donne les équations suivantes pour évaluer les paramètres de la distribution :

$$\beta = \frac{4}{\gamma_x^2},$$

$$\alpha = \frac{2}{\sigma_x \gamma_x},$$

$$\zeta = \mu_x - \frac{\beta}{\alpha}.$$

Lorsque les logarithmes d'une variable aléatoire sont distribués suivant une loi de Pearson Type 3, on parle de LogPearson Type 3. Cette distribution est recommandée pour la description des crues aux Etats-Unis par le "U.S. Water Resources Council in Bulletin 17 (Interagency Advisory Committee on Water Data, 1982) et en Australie par leur institut d'ingénieurs (Pilgrim, 1987). Hoang (1978) a trouvé que pour les stations de mesures de la province du Québec la loi LogPearson type 3 s'applique mieux aux minima annuels des débits journaliers.

3.4 Choix du type de loi dédiée à l'analyse fréquentielle des étiages

3.4.1 Introduction

La littérature concernant l'analyse fréquentielle des étiages est relativement clairsemée. La distribution de Weibull est une distribution théoriquement plausible dans le cas des étiages. Des études réalisées au Canada et dans l'est des Etats-Unis ont recommandé la loi de Weibull à 3 paramètres, la loi LogPearson de type 3 et la loi Lognormale à 2 ou 3 paramètres. (Condie et Nix, 1975) (Tasker, 1987) (Vogel et Kroll, 1989)

Il existe cependant des tests d'adéquation qui ont pour ambition de permettre de choisir le modèle fréquentiel le plus approprié pour la série de données envisagée.

Cependant, vu la faiblesse de certains tests d'adéquation pourtant couramment utilisés et le fait que les tests ne permettent pas de comparer entre elles plusieurs hypothèses nulles (plusieurs modèles fréquentiels) et donc de choisir la meilleure, la méthode dite 'graphique' reste indispensable. (Meylan et al., 2008)

3.4.2 Test d'adéquation

L'ajustement d'une loi à une série de données est un procédé qui permet de vérifier le bon accord entre les observations et les lois de probabilité correspondantes. Pour ce faire, différents tests statistiques sont possibles :

- L'**examen des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement** dont les valeurs et les champs de variation sont caractéristiques d'un type de loi. Toutefois, les erreurs d'échantillonnage sur ces paramètres sont peu fiables et il serait illusoire d'en tirer des conclusions.
- Le **test χ^2** pour vérifier l'ajustement d'un échantillon à une loi théorique. Ce test est couramment utilisé malgré ses inconvénients. En effet, le test χ^2 permet un ajustement à une loi théorique mais ne permet pas la comparaison de deux ajustements. Il est peu puissant, il donne souvent des valeurs de probabilités voisines pour deux types de lois très différentes appliquées à un même échantillon. Enfin, il est très sensible à la répartition des classes. Or, le choix des classes et de l'origine de la première classe est arbitraire pour une distribution continue.

Dans son étude, Joseph (Joseph, 1970) utilise ces deux techniques pour tester l'adéquation des distributions. Les résultats du test χ^2 révèlent l'adéquation des distributions Gamma et de Weibull avec une préférence pour la loi Gamma car l'hypothèse nulle n'est rejetée que 2 fois sur 37 cas.

De plus, les valeurs de χ^2 sont moins élevées pour la distribution Gamma que pour la distribution de Weibull. La meilleure loi des cinq lois testées est donc la distribution Gamma suivie de la Weibull et de la Lognormale. Ce classement est conforté par les résultats issus de la comparaison entre les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement théoriques et empiriques.

- Le test de Kolmogorov-Smirnov pour déterminer si un échantillon suit bien une loi donnée connue par sa fonction de répartition empirique. Le principe est de calculer la distance maximale entre la loi théorique et la loi empirique. Ce test est donc beaucoup plus sensible à l'existence de points aberrants dans un échantillon. Son avantage par rapport au test χ^2 est qu'il est adapté aux fonctions continues. Prakash (Prakash, 1981) utilise ce test pour estimer la qualité de l'ajustement des distributions LogPearson type III et Lognormale.
- Le test de Cramér-Smirnov-Von-Mises, similaire au test de Kolmogorov. La différence réside dans le fait que l'indicateur d'écart du test de Cramér-Von Mises prend mieux en compte l'ensemble des données. En effet, la somme des écarts entre la distribution empirique et la distribution d'ajustement est prise en considération ce qui n'est pas le cas pour le test de Kolmogorov. On peut donc penser que ce test est plus puissant mais cela n'a pas été démontré théoriquement. Contrairement au test χ^2 , ce test ne demande pas de grouper les données et donne par conséquent des résultats non ambigus.

Ces tests prouvent l'adéquation entre l'ajustement et les données mais ne permettent nullement de tirer une conclusion sur le choix de la meilleure loi.

- Les critères d'information d'Akaike (Akaike Information Criterion) **AIC** et d'informations bayésiennes (Bayesian Information Criterion) **BIC** sont couramment utilisés dans le choix du meilleur modèle parmi un ensemble de modèles plausibles. Le critère AIC est obtenu à partir de la formule suivante :

$$AIC = -2 \ln(L) + 2k$$

dans laquelle L est la vraisemblance et k le nombre de paramètres du modèle.

- Le critère d'information bayésien BIC a pour objectif de sélectionner le modèle M qui maximise la probabilité a posteriori. La formule permettant le calcul du critère BIC est :

$$BIC = -2 \ln(L) + 2k \ln(N)$$

dans laquelle L est la vraisemblance, k le nombre de paramètres et N la taille de l'échantillon.

Au vu des formules permettant le calcul des critères AIC et BIC, le critère bayésien permet de sélectionner des modèles de dimensions plus petites qu'à partir du critère AIC (Meylan *et al.*, 2008).

Le logiciel HYFRAN propose la méthode de Schwarz selon laquelle le critère BIC permet de générer des facteurs de Bayes approximatifs. Ceux-ci peuvent être combinés à une distribution de probabilité a priori d'un ensemble de loi pour obtenir des probabilités a posteriori pour ces mêmes modèles. Les probabilités a posteriori servent à construire un

classement des modèles statistiques. Les meilleurs ajustements correspondent aux plus grandes valeurs.

Les probabilités a posteriori permettent également de calculer une valeur pondérée du quantile de période de retour T.

3.4.3 Contrôle visuel de l'ajustement

La méthode graphique est la façon la plus efficace pour visualiser la série de données et vérifier si les distributions ajustées apparaissent en accord avec les données (Meylan *et al.*, 2008).

En effet, plusieurs distributions peuvent fournir des ajustements statistiquement acceptables. Dans ce cas, les tests de validité de l'ajustement ne permettent pas d'identifier la meilleure distribution à utiliser.

Le contrôle visuel de l'ajustement n'est pas un test au sens statistique du terme. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision.

Les graphiques de quantiles sont une autre solution visuelle pour comparer deux ou plusieurs distributions entre elles mais aussi pour comparer les données à une distribution théorique. Pour construire un graphique de quantiles empiriques, les données $X(i)$ sont triées de la plus petite $X(1)$ à la plus grande $X(n)$.

Pour chaque donnée, une valeur de la probabilité de non-dépassement $p(i)$ est calculée. Plusieurs formules (Tableau 13) ont été proposées mais elles découlent toutes de la forme générale suivante:

$$p(i) = \frac{i - a}{n + 1 - 2a}$$

où a est une constante qui peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 0.5.

Tableau 13 : Motivations et principales formules utilisées pour calculer les probabilités de non-dépassement empiriques (Maidment, 1993)

Nom	Formule	Motivation
Weibull	$\frac{i}{n+1}$	Probabilité de non-dépassement non biaisée
Médiane	$\frac{i-0.3175}{n+0.365}$	Probabilité de non-dépassement médiane
Blom	$\frac{i-3/8}{n+1/4}$	Quantiles normaux non-biaisés
Cunnane	$\frac{i-0.4}{n+0.2}$	Quantiles approximativement non-biaisés
Gringorten	$\frac{i-0.44}{n+0.12}$	Optimisé pour la loi de Gumbel
Hazen	$\frac{i-0.5}{n}$	Un choix traditionnel

Le quantile théorique, quant à lui, peut se définir comme la fonction inverse de la fonction de répartition du modèle testé. Sur un graphique ‘quantiles théoriques – quantiles empiriques’ (ou probabilités théoriques – probabilités empiriques), la linéarité entre les deux variables renseigne sur la qualité du modèle.

Si l'on porte en graphique l'ensemble des probabilités empiriques en fonction des données de l'échantillon, on obtient lorsqu'on relie la série de points, la fonction de répartition empirique. Cette fonction est un deuxième outil très intéressant pour déterminer a priori la forme du modèle théorique décrivant une série de données. Elle constitue d'une part un bon estimateur de la forme de la fonction de répartition théorique et elle permet d'autre part de juger la qualité d'un modèle ajusté lorsqu'on représente sur le même graphique la fonction de répartition empirique et la fonction de répartition de la loi théorique.

A titre d'exemple, les données de l'Eau d'Heure à Cerfontaine (bassin hydrographique de la Sambre) ont été utilisées dans le cas du percentile95. Trois ajustements sont comparés graphiquement (Figure 27) :

- Lognormale à 2 paramètres (2LN),
- Gamma (G2),
- Pearson type III (P3).

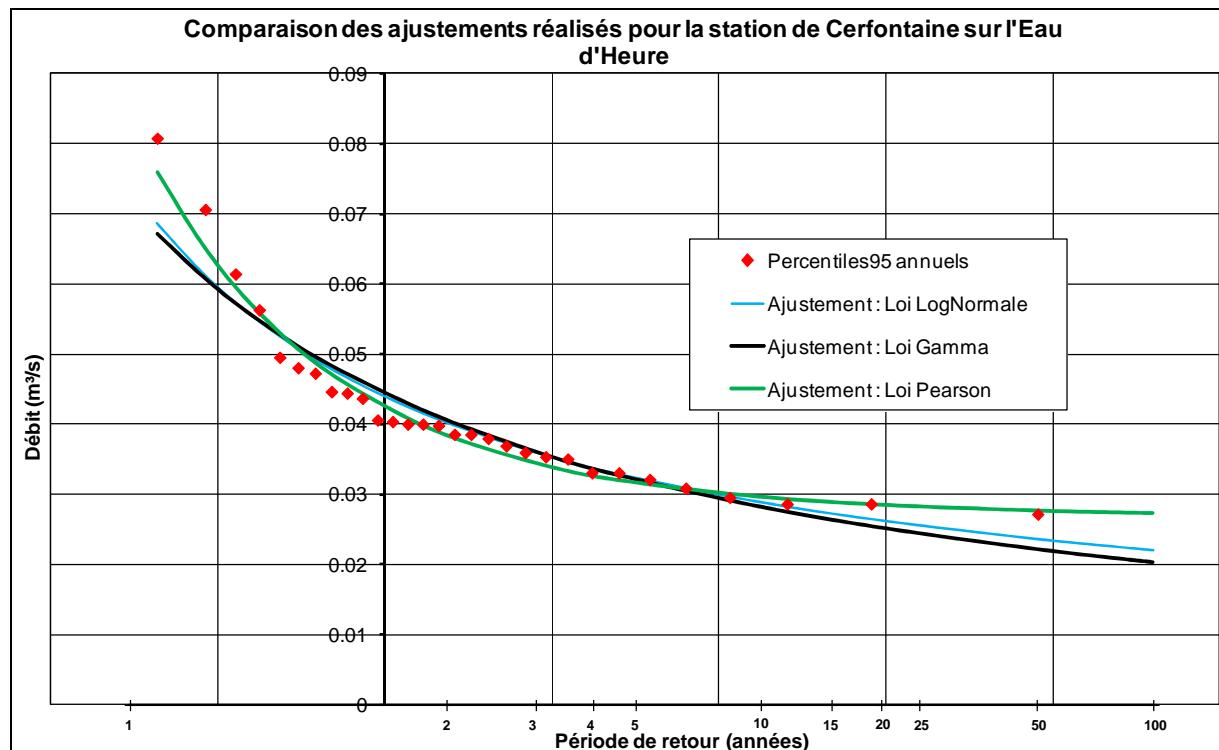


Figure 27: Comparaison graphique de trois ajustements théoriques aux données d'étiage de l'Eau d'Heure à Cerfontaine (Q95)

L'hypothèse nulle est acceptée pour l'ensemble des trois distributions retenues.

Dans ce cas, l'observateur déterminera la meilleure distribution en comparant les données correspondant aux percentiles95 et l'ajustement proposé. A partir de la Figure 27, on observe que la loi Pearson type III (courbe jaune) se superpose mieux aux données initiales que les deux autres lois.

3.5 Méthode utilisée pour le choix de la meilleure loi

3.5.1 Outil informatique

Le logiciel HYFRAN est un logiciel d'ajustement de lois statistiques. Il a été développé par l'équipe du Dr. B. Bobée, qui a plus de 30 années d'expérience en hydrologie statistique, à l'Institut National de la Recherche Scientifique – Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) de l'Université du Québec.

Ce logiciel propose les tests statistiques classiques préalables à l'ajustement d'une loi, en vue de vérifier les hypothèses d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité de l'échantillon. Il propose un panel de 16 lois statistiques différentes à 2 ou 3 paramètres pour la réalisation des ajustements. Le logiciel propose également des outils de comparaison graphiques et sur base de critères (El-Adlouni *et al.*, 2008) (Gomes *et al.*, 2008) (Hubert, 2005) (Parent et Bernier, 2003) (Runge et Nguimale, 2005).

3.5.2 Application de la loi de FRECHET

En plus des lois existantes dans le logiciel HYFRAN, la loi de FRECHET est testée, étant donné son utilisation dans de précédentes applications en Wallonie (Xanthoulis, 1985). La **Figure 29** Figure 28 présente les résultats obtenus pour la station de Baisieux située sur la Grande Honnelle (bassin hydrographique de la Haine).

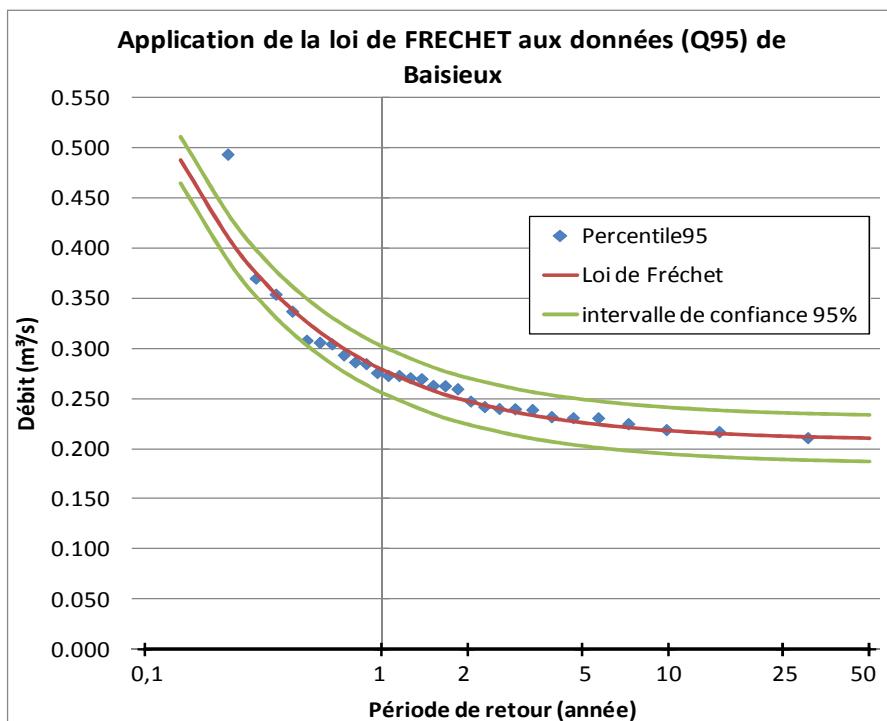


Figure 28 : Application de la loi de Fréchet aux données (Q95) de la station de Baisieux sur la Grande Honnelle

Cette loi n'étant pas disponible dans le logiciel HYFRAN, elle a été calculée à partir de feuilles Excel.

3.5.3 Méthodologie d'ajustement

La démarche effectuée dans le choix du meilleur ajustement pour chaque station de mesures, à partir du logiciel HYFRAN et de l'application de la loi de Fréchet, est présentée à la Figure 2928.

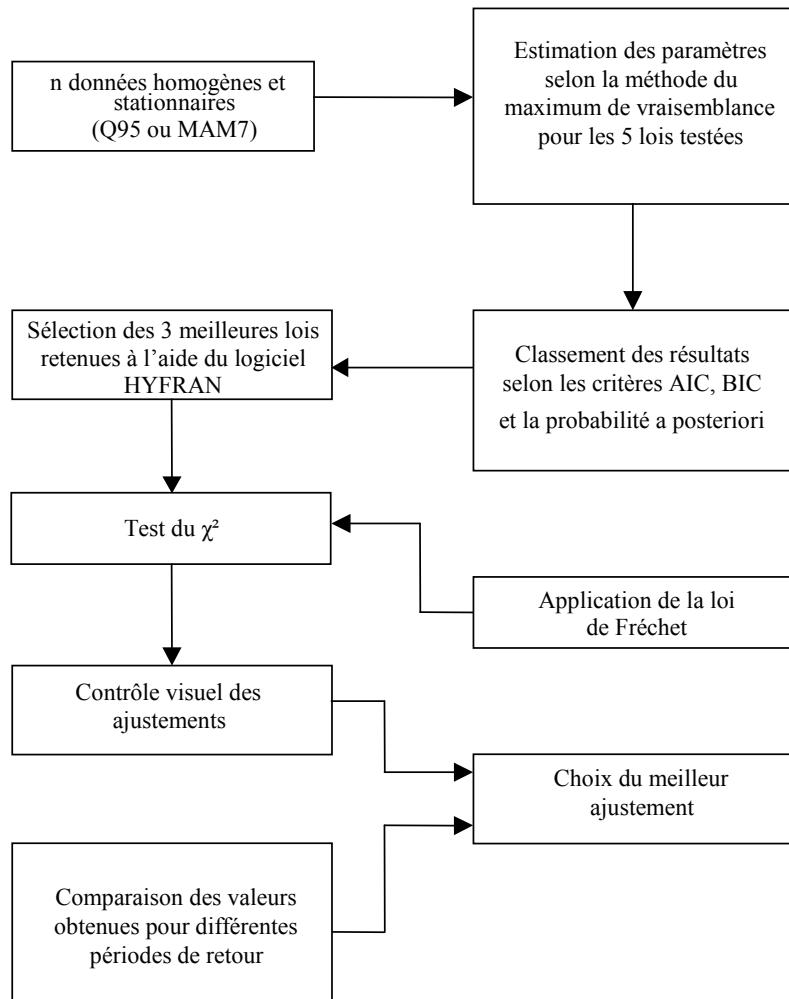


Figure 29 : Schéma de la méthodologie utilisée dans le choix du meilleur ajustement pour chaque station

Les données de départ sont bien entendu les données qui résultent du traitement du chapitre "Caractérisation de l'étiage en Région wallonne", c'est-à-dire les n valeurs des percentiles 95 (Q95) ou des MAM7 de chaque station limnimétrique. Les données sont issues de la même population statistique, il a été montré que ces données sont homogènes et stationnaires suite à la réalisation des tests d'égalité de moyennes.

Parmi les différentes lois proposées par le logiciel HYFRAN, seules les lois souvent présentes dans la littérature pour la caractérisation de l'étiage sont testées. Nous avons donc trois lois à 2 paramètres (Lognormale à 2 paramètres, Weibull à 2 paramètres et Gamma) et deux lois à 3 paramètres (Lognormale à 3 paramètres et Pearson type III).

Pour rappel, les paramètres des différentes distributions sont estimés via la méthode du maximum de vraisemblance.

En plus des lois proposées par le logiciel HYFRAN, la loi de Fréchet est également testée en parallèle.

3.5.4 Sélection des meilleurs ajustements

Pour comparer les modèles, le logiciel HYFRAN permet de classer les lois testées sur base de trois critères :

- le **critère d'information bayésien** (BIC) qui tient compte de la fonction de vraisemblance, du nombre de paramètres et de la taille de l'échantillon ;
- le **critère d'information d'Akaike** (AIC) qui tient compte de la fonction de vraisemblance et du nombre de paramètres ;
- la **probabilité a posteriori** qui est la mise à jour de la probabilité a priori à la lumière d'information supplémentaire en utilisant le théorème de Bayes.

Les probabilités a priori sont attribuées à chaque modèle par l'usager. Cette probabilité reflète l'information a priori que l'expert a sur la pertinence de la loi pour ajuster une variable d'intérêt.

Etant donné que l'on ne disposait d'aucune information sur ce point de vue, les probabilités a priori sont jugées égales pour les différentes lois. Cette distribution de probabilités a priori peut être combinée aux facteurs de Bayes approximatifs générés via la méthode de Schwarz pour obtenir des probabilités a posteriori pour ces mêmes modèles.

Ces trois critères cherchent à sélectionner le modèle le plus vraisemblable au vu des données. Ils permettent de construire un classement de modèles statistiques tenant compte du principe de parcimonie, privilégiant les lois à 2 paramètres.

Les meilleurs ajustements correspondent aux plus grandes valeurs pour le critère probabilité a posteriori et aux plus faibles valeurs pour les deux autres critères (BIC et AIC).

Les critères bayésiens ne sont pas utilisés dans le cas de la loi de Fréchet étant donné la complexité du calcul.

Avant de choisir les 3 meilleures lois, le test du χ^2 , commun à toutes les lois testées dans le logiciel HYFRAN, est appliqué afin de vérifier l'adéquation de ces lois à l'échantillon des valeurs observées. Pour rappel, les hypothèses testées sont les suivantes :

$$\begin{aligned} H_0 &: x_1, x_2, \dots, x_n \in F(x; q), \\ H_1 &: x_1, x_2, \dots, x_n \notin F(x; q). \end{aligned}$$

Les lois pour lesquelles la distribution envisagée n'est pas compatible avec les observations sont rejetées du classement.

Pour la suite de la comparaison, les trois lois les mieux classées et dont l'hypothèse du test χ^2 est acceptée sont retenues. De plus, si on a une adéquation de la loi de Fréchet aux valeurs observées (test χ^2), les résultats seront ajoutés pour la comparaison visuelle des lois retenues à l'aide du logiciel HYFRAN.

Le Tableau 14 reprend le classement des cinq modèles testés à partir du logiciel HYFRAN, dans le cas de la Lesse à Resteigne. On y retrouve les 3 critères de comparaison, le résultat du test χ^2 ainsi que le débit d'étiage de période de retour 20 ans. Dans ce cas, les lois Lognormale, Gamma et Pearson type III sont sélectionnées pour établir la comparaison qui permettra de définir le meilleur ajustement.

Tableau 14 : Récapitulatif des résultats des ajustements pour les lois testées à l'aide du logiciel HYFRAN - Exemple de la Lesse à Resteigne (Q95)

Loi testée	Nombre de paramètres	Q_{T20}	Probabilité a posteriori	BIC	AIC	Test
Lognormale	2	0.349	50.78	35.858	32.865	AH0
Gamma	2	0.322	26.43	37.163	34.17	AH0
Pearson type III	3	0.353	10.47	39.016	34.526	AH0
Lognormale (3param.)	3	0.355	8.96	39.328	34.838	AH0
Weibull	2	0.238	3.36	41.29	38.297	AH0

En ce qui concerne l'application de la loi de Fréchet, on réalise dans un premier temps un test χ^2 . En cas de « non adéquation » de l'ajustement à l'échantillon, la loi de Fréchet n'est pas retenue.

3.5.5 Choix visuel du meilleur ajustement

Après cette première sélection basée sur les résultats du test d'adéquation χ^2 et sur les critères d'informations d'Akaike AIC et bayésien BIC, le choix de la meilleure loi s'effectue de manière visuelle sur base d'une analyse visuelle du graphique représentant les trois ajustements les mieux classés (Figure 30).

Aux trois ajustements retenus par le logiciel HYFRAN, on ajoute les résultats obtenus pour la loi de FRECHET.

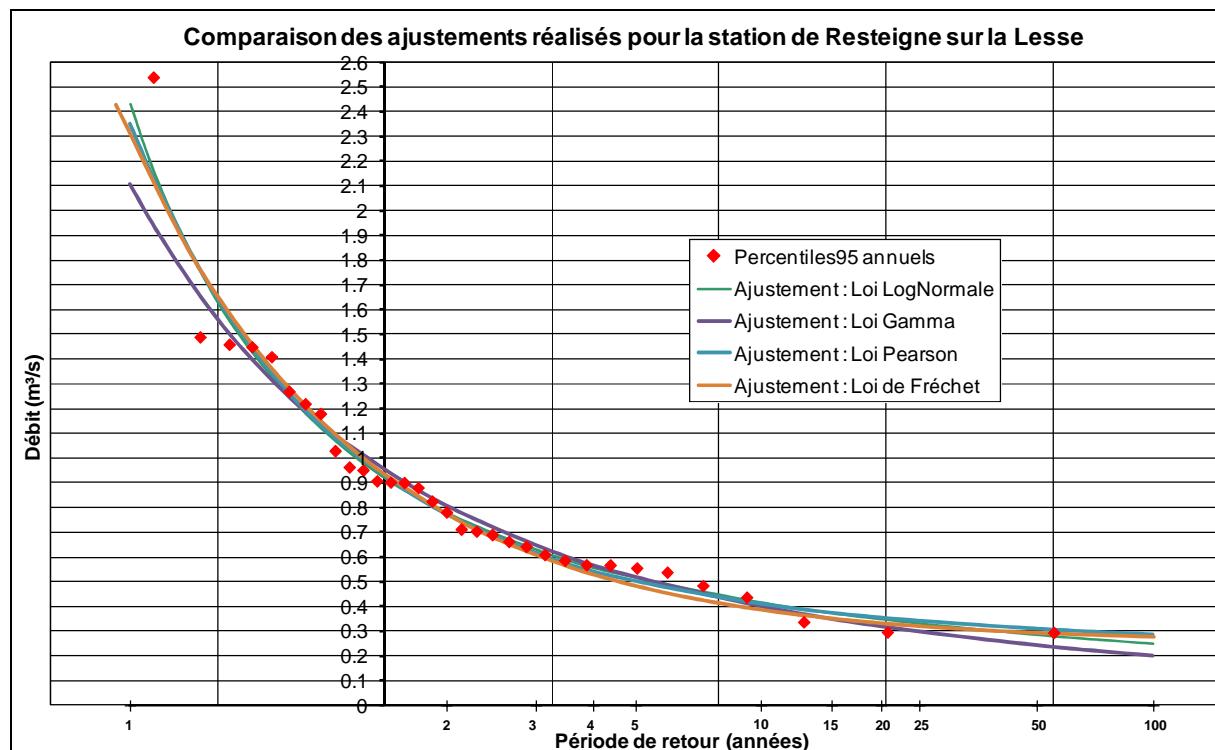


Figure 30 : Lesse à Resteigne - visualisation des ajustements pour les 3 lois les mieux adaptées (Q95) à l'aide du logiciel HYFRAN et de la loi de Fréchet

L'examen de la Figure 30 confirme le classement établi suivant la probabilité a posteriori. De plus, le contrôle visuel de l'application de la loi de Fréchet (Figure 30Figure 31) ne permet pas de sélectionner cette dernière comme meilleur ajustement. La loi Lognormale

est donc retenue pour modéliser la distribution des débits d'étiage de la Lesse à Resteigne (Figure 3132).

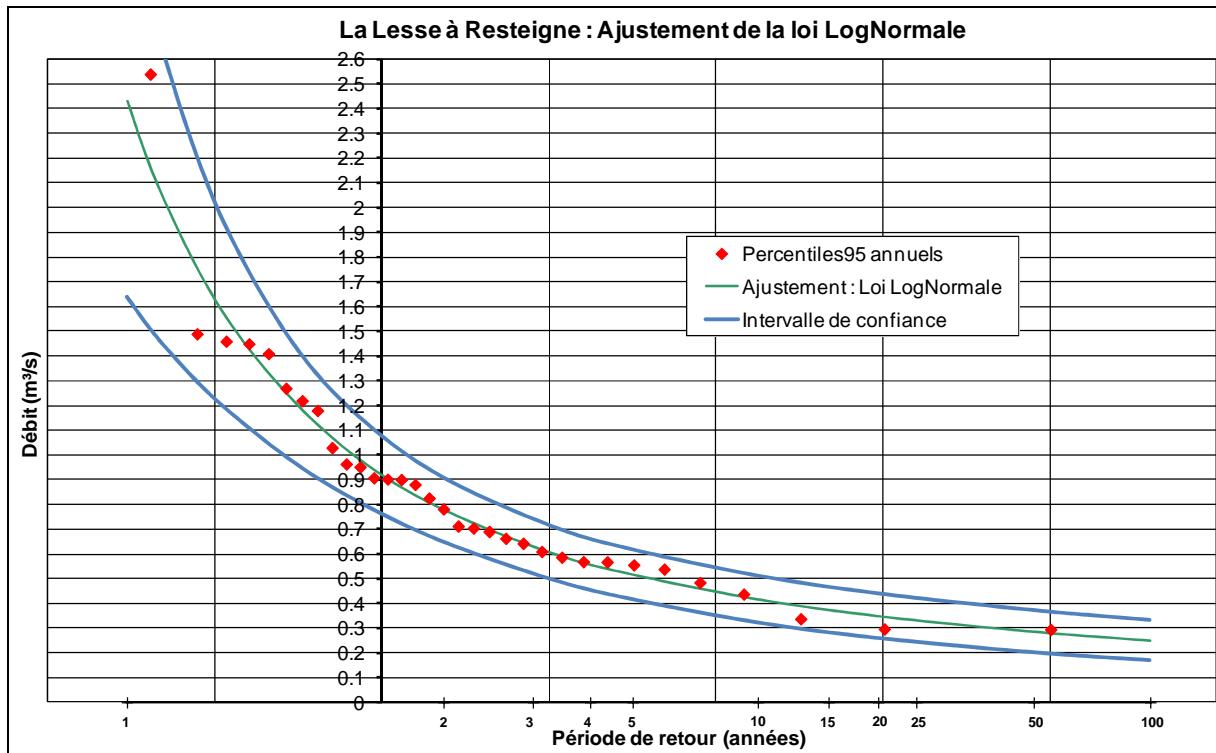


Figure 31 : Lesse à Resteigne - ajustement de la loi Lognormale : probabilité de non-dépassement avec intervalles de confiance à 95 % (Q95)

Le choix de la meilleure loi n'est pas toujours aussi aisé que dans le cas de la Lesse à Resteigne. Lorsque plusieurs lois sont plausibles, Miquel (1984) propose les critères de jugement suivants :

1. La loi ayant le moins de paramètres est privilégiée si les ajustements sont de qualité similaire.
2. A nombre de paramètres égal, l'estimation des deux lois est comparée :
 - si elles sont très voisines, la loi la plus simple pour les calculs futurs est retenue ;
 - si elles sont nettement différentes, une nouvelle loi doit être trouvée quitte à prendre un paramètre supplémentaire.
3. Une loi à 1 ou 2 paramètres sera toujours préférée sauf si la qualité d'ajustement d'une loi à 3 paramètres est nettement supérieure à celle des lois à 2 paramètres.

La comparaison des valeurs de débits d'étiage pour différentes périodes de retour peut également aider dans la prise de la décision finale. Les périodes de retour considérées sont 2, 5, 10, 20 et 50 ans.

La période de retour de 50 ans est la période maximale au vu du nombre d'années de fonctionnement des stations de mesures.

En général, les périodes de retour d'intérêt dans un contexte opérationnel sont plus courtes dans le cas des étiages. Comme nous l'avons déjà vu précédemment, les indicateurs d'étiage couramment rencontrés dans la littérature ne possédaient pas de période de retour supérieure à 10 ans. A titre d'exemples, on trouve :

- en Amérique, le **$Q_{7,10}$** et le **$Q_{7,2}$** qui correspondent au débit minimum annuel lissé sur 7 jours ayant respectivement une période de retour de 10 ans et 2 ans ; (Armentrout et Wilson, 1987) (Atkins et Pearman, 1995) (Giese et Mason, 1993) (Hamza, 1999)
- au Québec, le **$Q_{30,5}$** qui définit le débit minimum annuel de 30 jours consécutifs pour une période de retour de 5 ans ; (Hamza, 1999)
- en France, le **VCN(2,1)** utilisé par l'IRSTEA, qui correspond au débit journalier minimum annuel de période de retour de deux ans. (Galéa *et al.*, 1999)

Finalement, l'incertitude associée au choix de la loi doit aussi être considérée lors de l'estimation des quantiles de période de retour. En effet, les probabilités d'occurrence théoriques des événements étudiés sont inconnues et on cherche une loi de probabilité qui en donne une bonne approximation. C'est pourquoi, pour chaque ajustement, les quantiles de période de retour sont estimés avec un intervalle de confiance à 95%.

3.6 Analyse des résultats

3.6.1 Introduction

Les résultats des ajustements sont présentés sous la forme d'un tableau reprenant le choix de la meilleure loi ainsi que les débits obtenus pour les périodes de retour de 2, 5, 10, 20 et 50 ans.

Une analyse des résultats est ensuite réalisée selon différents axes comme par exemple la possibilité de régionalisation des lois utilisées, la relation entre la taille du bassin versant et la loi retenue.

3.6.2 Débits caractérisant l'étiage en fonction de la période de retour

Le tableau repris en Annexe 5 reprend pour chacune des stations de mesures, la loi retenue et les débits correspondants à différentes périodes de retour ainsi que les intervalles de confiance. Le degré de confiance défini est de 95 %, ce qui signifie la probabilité d'une erreur de première espèce est de 5%.

3.6.3 Lois retenues

La Figure 3233 présente le nombre de fois que chacune des lois est retenue pour l'ensemble des stations de mesures dans le cas du percentile95.

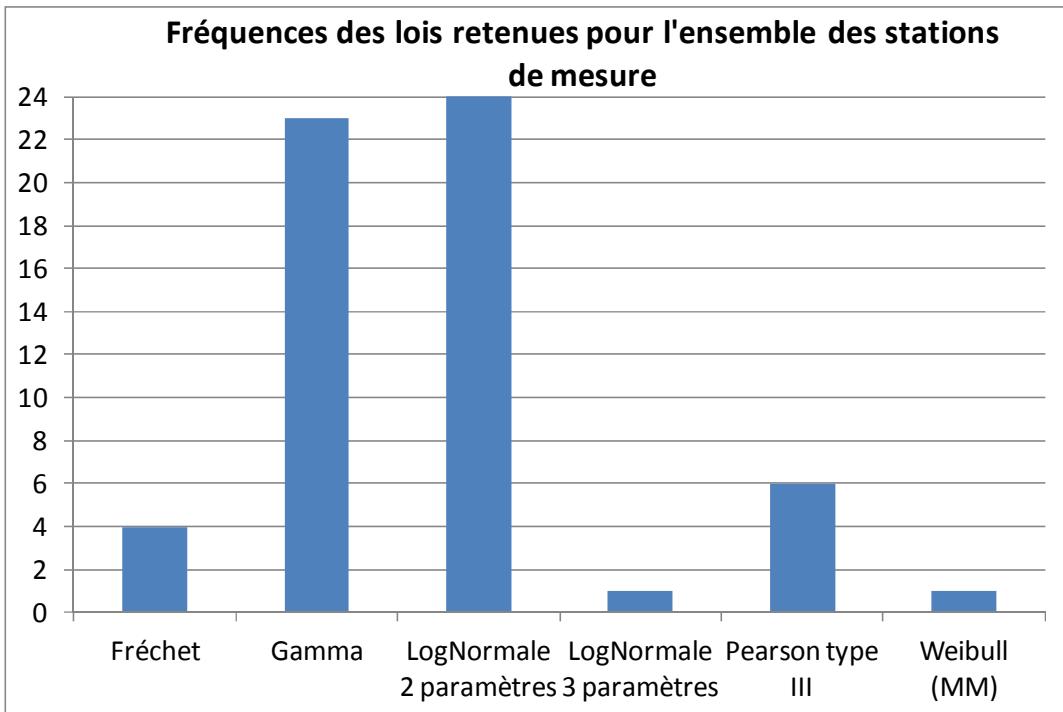


Figure 32 : Fréquences des lois retenues pour l'ensemble des stations de mesures (Q95)

Le graphique obtenu met en évidence que dans le cadre de la Wallonie, les lois Lognormale à deux paramètres et Gamma sont respectivement retenues dans 41 et 39 % des cas en ce qui concerne les percentiles95.

La loi de Fréchet est sélectionnée dans un peu moins de 7 % des cas. De ce fait, malgré l'absence d'automatisation par un logiciel, il semble évident qu'elle ne doit pas être omise lors d'un ajustement des valeurs extrêmes pour les étiages.

A contrario, la loi de Weibull ne semble pas adaptée aux débits d'étiage pour la Wallonie. Elle fait cependant régulièrement partie des trois meilleures lois mais en général lorsqu'on examine visuellement l'ajustement aux données, elle est très vite rejetée. Elle n'a été choisie que pour une station de mesures, à savoir la Senne à Tubize.

Il est à remarquer que Gottschalka préconise l'utilisation des lois de Weibull et de Fréchet dans son étude qui a pour objectif de combiner l'analyse fréquentielle des débits d'étiage et l'analyse de la récession. (Gottschalka *et al.*, 1997)

Burn quant à lui utilise la distribution Pareto généralisée avec la méthode des L-moments pour le calcul des paramètres de cette loi dans un contexte de régionalisation au Canada avec des bassins versants de taille allant de 45 à 71000 km² de superficie. (Burn, 1997).

La loi Weibull est à nouveau utilisée dans l'analyse fréquentielle sur le bassin de la Moselle opérée par Galéa (Galéa et Canali, 2005) alors que la loi Lognormale avait été choisie pour le bassin de la Loire et du Crisu-Alb. (Galéa *et al.*, 1999)

Matalas a réalisé une étude de comparaison de plusieurs lois ayant une borne inférieure sur les débits minimums annuels de 34 cours d'eau des Etats-Unis. Ses résultats ont montré que les lois de Weibull et de Pearson Type III donnent les meilleurs résultats. (Matalas, 1963).

Joseph a établi un classement des lois après un test réalisé sur les minimums annuels de la moyenne mobile sur 14 jours des débits journaliers pour 37 cours d'eau des Etats-Unis. Les résultats classent la Gamma en premier, suivie de la Weibull et de la Lognormale à deux paramètres. (Joseph, 1970)

Condie et Nix ont classé la loi de Weibull (maximum de vraisemblance) comme étant la meilleure sur une étude réalisée sur les débits journaliers minimums annuels. (Condie et Nix, 1975)

La loi LogPearson type III s'applique le mieux sur les minimums annuels des débits journaliers selon Hoang. La zone d'étude était la province de Québec composée de 103 points de mesures. (Hoang, 1978)

Comme le montre cette analyse bibliographique, il est difficile de définir une loi pour l'analyse fréquentielle des débits d'étiage. Les différences entre les résultats proviennent du choix du descripteur, de la méthode d'estimation des paramètres et également de la partie de la méthodologie qui permet la sélection de la meilleure loi sur base visuelle. Ce dernier point fait appel à la sensibilité de l'opérateur.

A titre d'exemple, la loi Pearson type III est utilisée pour six stations de mesures dans le cas du percentile95 et seulement trois fois avec la MAM7.

3.6.4 Lien entre les ajustements et la taille de l'historique

Afin de déterminer si le choix d'une distribution est lié à la taille de l'historique de la station de mesures, une représentation graphique mettant le pourcentage de stations de mesures par type de loi en fonction de la taille de l'historique est réalisé (Figure 3334).

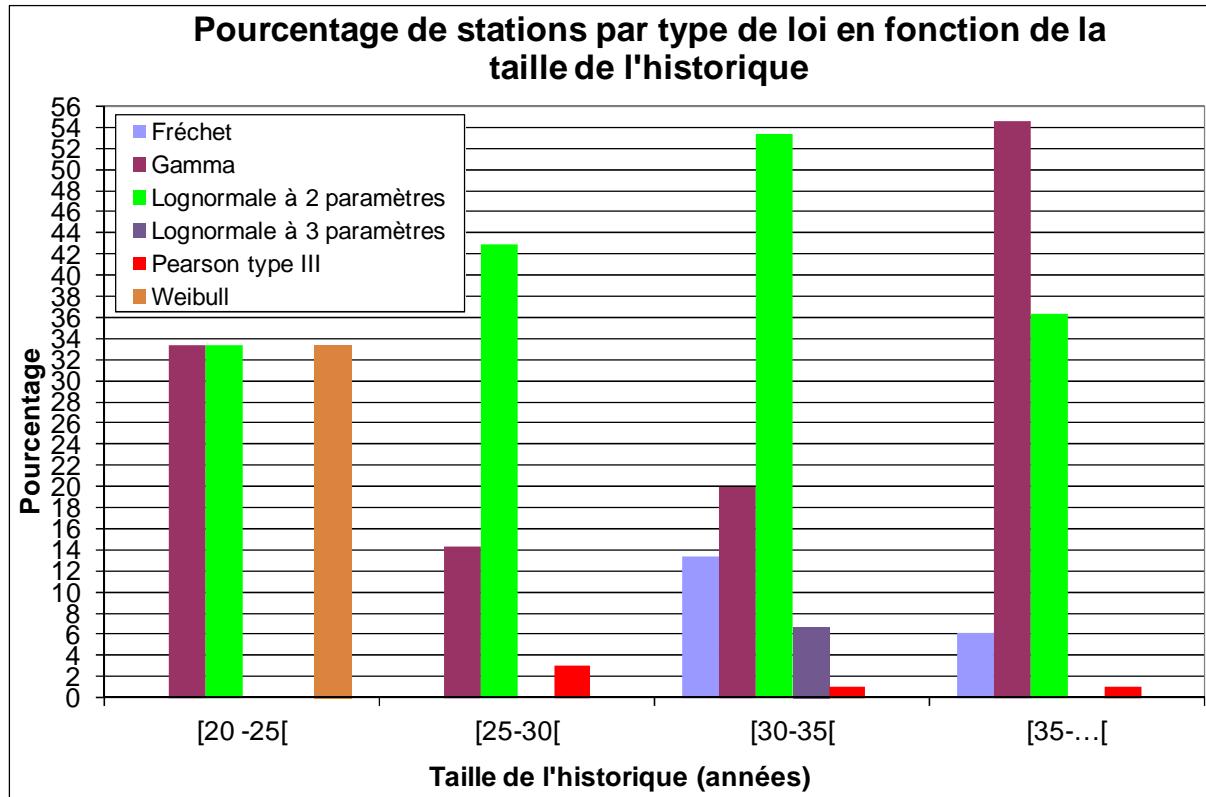


Figure 33 : Représentation du pourcentage de stations de mesures par type de loi en fonction de la taille de l'historique (Q95)

Aucune interaction n'est mise en évidence, les distributions s'ajustent aux données de stations de mesures quelle que soit leur taille d'historique dans le cas des percentiles95. Seules les lois Gamma et Lognormale à 2 paramètres sont plus utilisées dans le cas des stations de mesures ayant un historique supérieur ou égal à 35 ans.

De la même manière, il est à remarquer que la loi Lognormale à 2 paramètres est dans chaque classe de taille d'historique plus souvent retenue lors des ajustements statistiques, excepté pour la classe dont l'historique des données est supérieur à 35 ans..

Les mêmes conclusions s'appliquent au MAM7 pour lequel on n'observe aucun lien entre la taille de l'historique et le choix de la meilleure loi d'ajustement.

3.6.5 Lien entre les ajustements et la superficie du bassin versant

Une deuxième interaction possible pourrait se produire entre les ajustements et la superficie du bassin versant (Figure 3435).

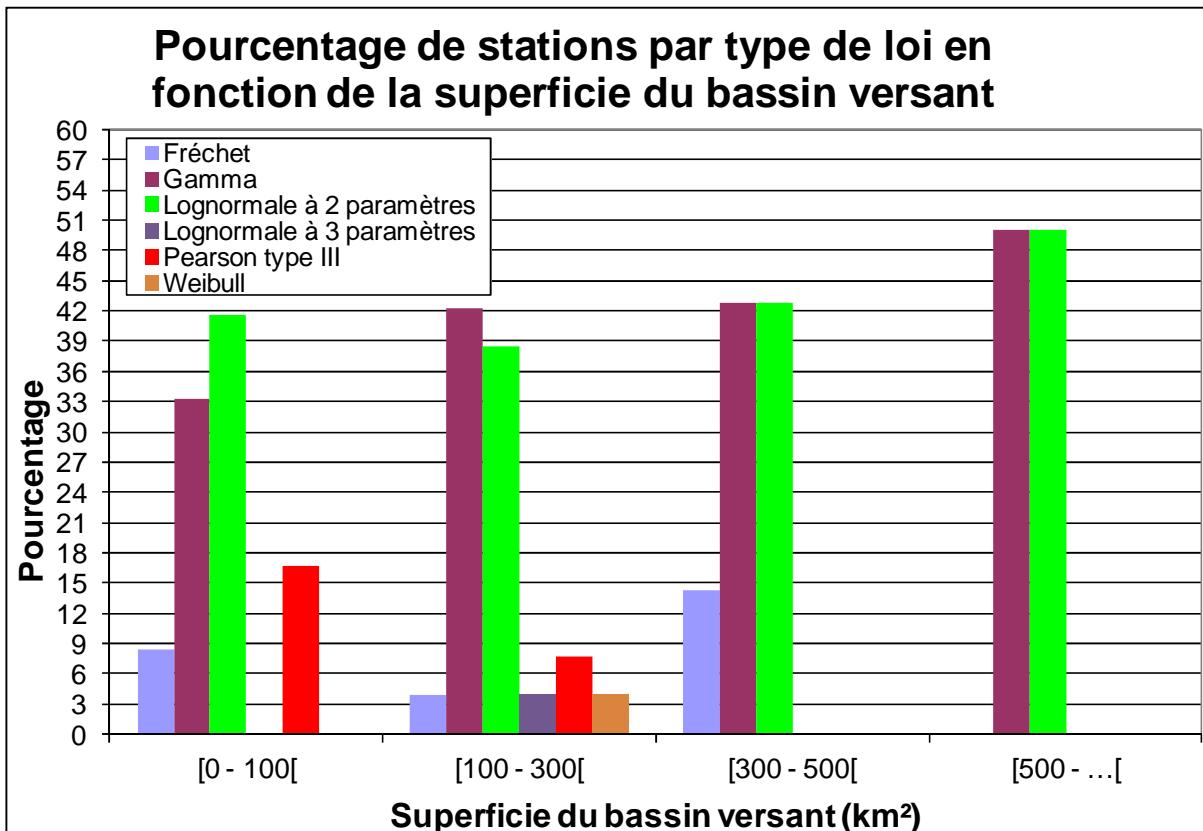


Figure 34 : Représentation du pourcentage de stations de mesures par type de loi en fonction de la superficie du bassin versant (Q95)

On observe que les lois Gamma et Lognormale à deux paramètres sont plus utilisées avec un pourcentage allant de 33 à 50 pourcents par classe de superficie de bassin versant en ce qui concerne les percentiles95.

Les autres lois ne sont utilisées que pour les classes de superficie inférieure à 300 km^2 .

Ces conclusions peuvent être étendues au cas du MAM7.

3.6.6 Distribution spatiale des lois d'ajustement utilisées

L'objectif de ce chapitre est d'étudier la distribution spatiale des types de lois utilisées pour l'analyse fréquentielle.

La Figure 3536 représente une carte de la Région wallonne reprenant l'ensemble des stations de mesures pour lesquelles l'analyse fréquentielle est réalisée (Q95). Chaque station est représentée par un point dont le code de couleur est fonction de la loi choisie pour l'ajustement.

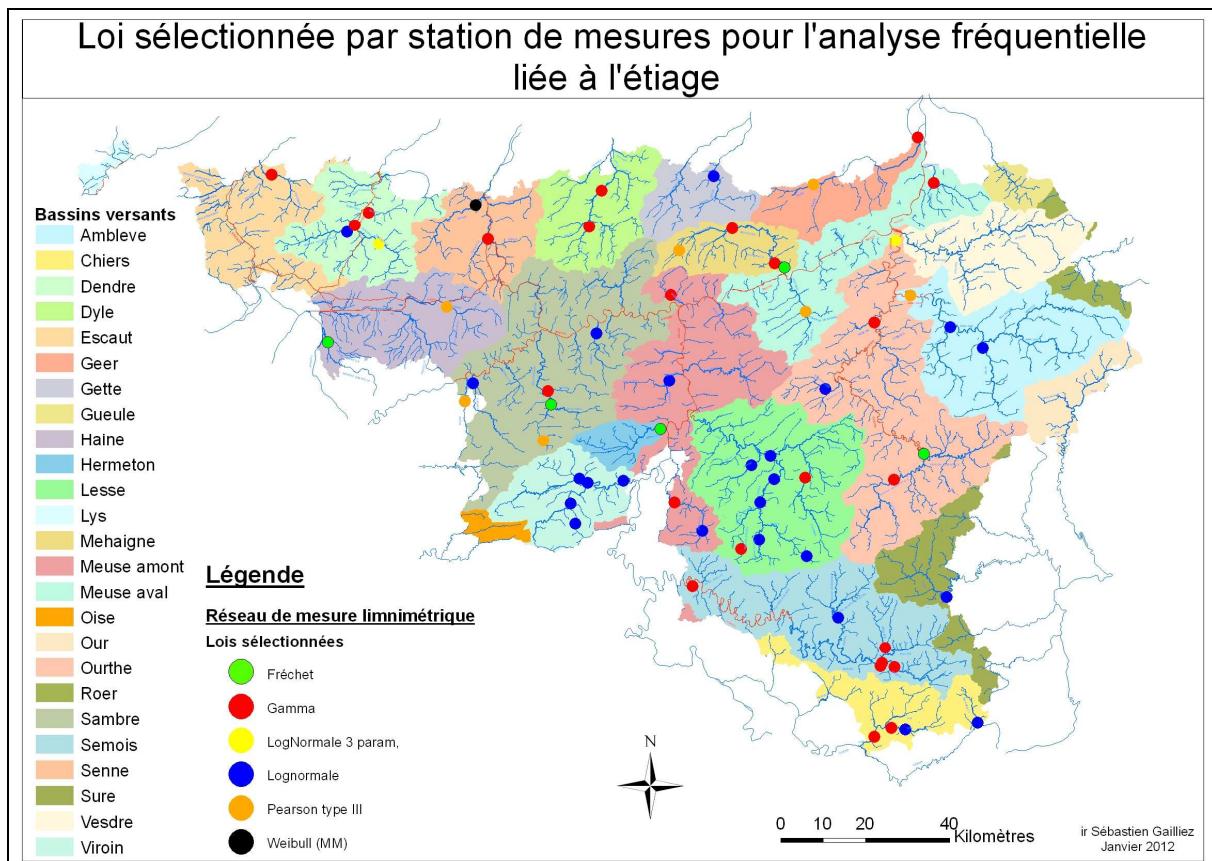


Figure 35 : Loi sélectionnée par station de mesures pour l'analyse fréquentielle liée à l'étiage (Q95)

La Figure 3536 montre qu'il ne semble pas possible d'identifier une distribution spatiale des lois utilisées. En effet, nous pouvons observer que les lois Gamma et Lognormale à deux paramètres (les plus fréquemment utilisées dans le cadre de cette étude) sont retenues pour des stations de mesures situées dans différents bassins versants de la Wallonie.

Aucune distribution spatiale des lois n'est à observer en ce qui concerne l'utilisation du MAM7.

4 RÉGIONALISATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE EN RÉGION WALLONNE

4.1 Introduction

La régionalisation des débits peut être définie comme étant l'identification de groupes de bassins versants contigus ou non (que l'on appellera 'Région'), qui ont un comportement hydrologique similaire. La délimitation des régions est réalisée sur base de considérations physiographiques (pente, superficie du bassin versant, précipitations, ...) et sur base de la réponse hydrologique du bassin versant (débit caractéristique, valeurs statistiques, ...). (Donald, 1997)

Pour la définition de ces classes homogènes en termes de débit caractérisant l'étiage, les paramètres physiques des bassins versants autres que la superficie de celui-ci pourront être utilisés. Il s'agit de la pluviométrie moyenne annuelle, de la pente moyenne du bassin versant, densité de drainage, ... (Gloor et Walter, 1986) (Galéa *et al.*, 1999) (Galéa *et al.*, 2000) (Galéa et Canali, 2005) (Laaha et Blöschl, 2005) (Laaha et Blöschl, 2006) (Rachamandra Rao et Srinivas, 2006) (Smakthi, 2001)

Une des méthodes consiste à rassembler des bassins versants qui ont des similarités au niveau du climat, de la géologie, de la topographie, de l'occupation du sol et de la pédologie.

Généralement, les bassins versants ayant les mêmes caractéristiques et de taille identique ont une réponse hydrologique semblable, que ce soit dans la distribution des débits au cours de l'année, ou la fréquence ou l'intensité de certains événements extrêmes (crue et/ou étiage).

A partir de valeurs caractéristiques de débit d'étiage, il est également possible de regrouper des bassins versants entre eux. Pour ce faire, il faut rapporter la valeur caractérisant l'étiage à la superficie du bassin versant. Ensuite, on compare les bassins versants sur base de la valeur obtenue.

D'autres méthodes de régionalisation utilisent, pour définir les zones homogènes, les limites de bassins versants, les limites administratives ou des considérations physiographiques.

Une zone homogène peut être définie comme étant un ensemble de bassins versants qui ont une réponse hydrologique similaire, et qui ne sont pas forcément contigus. (Smakthi, 2001) (Ramachandra Rao, 2008)

Cependant, étant donné que l'objectif de cette étude est de déterminer un débit caractérisant l'étiage en n'importe quel point d'un linéaire de cours d'eau, il convient de ne pas utiliser la variable caractérisant le débit d'étiage dans la définition des zones homogènes.

En effet, le bassin versant du cours d'eau dont on souhaite disposer du débit d'étiage sera dans un premier temps assigné à une zone homogène seulement sur base des paramètres physiques et climatiques. Les équations de régression obtenues pour la zone homogène pourront donc être utilisées afin de calculer cette valeur. (Smakthi, 2001)

La définition des zones homogènes sera réalisée à l'aide de la classification numérique qui a pour objectif de subdiviser un ensemble de n individus en un nombre k de groupes. Cette subdivision est réalisée à partir des observations relatives à p variables. (Gustard *et al.*, 1992) (Nathan et McMahon, 1992) (Laaha et Blöschl, 2006) (Laaha et

Blöschl, 2007) (Yadav *et al.*, 2007) (Hingray *et al.*, 2009) (Vezza *et al.*, 2010) (Tsakiris *et al.*, 2011) (Patil et Stieglitz, 2012).

Les variables utilisées pour cette analyse sont les paramètres physiques tels que la superficie, la densité de drainage et la pente du bassin versant ainsi que les paramètres météorologiques.

Dans la littérature, nous pouvons également trouver des variables renfermant plusieurs informations comme par exemple le *Curve number* (CN) issus de la méthode SCS⁵. Cette méthode a pour objectif de déterminer le débit ruisselé d'un bassin versant. Cette méthode fait appel à la variable CN qui reprend les caractéristiques pédologiques du sol (taux d'infiltration), l'occupation du sol et de la pente (Soil conservation service, 1972) (Maidment, 1993). Etant donné que lors de la régionalisation, l'objectif est de rechercher les stations ayant des bassins versants similaires, ce type de variables n'est pas retenu car condense déjà plusieurs paramètres.

4.2 Détermination des paramètres physiques des bassins versants

4.2.1 Introduction

Le débit d'étiage est influencé par la géologie et la pédologie d'un bassin versant, les pertes par évaporation ou évapotranspiration. D'autres caractéristiques peuvent jouer un rôle comme par exemple la superficie du bassin versant, les précipitations ou encore la position géographique du bassin versant. (Maidment, 1993)

Un bassin versant peut être caractérisé par plusieurs paramètres physiques, hydrologiques ou géographiques. Dans un objectif de régionalisation des bassins versants, les paramètres suivants seront pris en considération :

- l'altitude de la station de mesures,
- les coordonnées Lambert,
- la superficie du bassin versant,
- la pente moyenne du bassin versant,
- la densité de drainage,
- l'occupation du sol,
- la température estivale,
- les précipitations,
- la pédologie,
- l'hydrogéologie.

Au cours de ce chapitre, nous présenterons la méthode de détermination de ceux-ci. (Ramachandra Rao, 2006) (Seibert et Beven, 2009) (Ungtae *et al.*, 2008)

La pertinence de l'utilisation d'un ou plusieurs paramètres sera déterminée lors de la régionalisation effectuée sur l'ensemble des bassins versants des stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude.

Il est à remarquer qu'étant donné la taille d'historique relativement courte des données utilisées pour la détermination des paramètres climatiques et ceux caractérisant l'hydrogéologie, aucune interprétation liée aux changements climatiques ou aux modifications de gestion de l'eau au sein des bassins versants ne sera réalisée. En effet,

⁵ Méthode SCS (Soil Conservation Service) qui se nomme actuellement le « Natural Resources Conservation Service », USA.

nous disposons au maximum de, respectivement, quarante-deux et trente-quatre ans de données, pour les débits et pour les données météorologiques.

4.2.2 Altitude des stations de mesures

A. Introduction

L'altitude des stations de mesures peut être définie comme un paramètre géographique du bassin versant.

L'altitude d'un site influence la valeur du rayonnement solaire reçu au niveau de la surface terrestre. Etant donné que l'évaporation et l'évapotranspiration sont directement liées à cette valeur, on peut en déduire que l'altitude pourrait avoir un impact sur le débit d'étiage. (Hingray *et al.*, 2009)

B. Méthodologie

L'altitude des stations de mesures prise en considération est l'altitude de la référence, soit le 'zéro' de l'échelle limnimétrique.

Etant donné que ces valeurs sont déterminées à l'aide de mesures topographiques réalisées soit par GPS, soit par niveling, les altitudes obtenues ont une précision supérieure à celle que l'on aurait obtenue si on avait utilisé une carte IGN même à l'échelle 1/10000.

En effet, si nous prenons la Figure 3637 qui présente un extrait de carte IGN au 1/10000 au niveau de la station de mesures d'Amougies sur la Rhosnes (bassin versant de l'Escaut), il est aisément de remarquer que la détermination de l'altitude de la station de mesures ne sera pas précise. En effet, nous nous situons dans une région avec un relief peu accidenté qui se traduit par des courbes de niveau espacées.



Figure 36 : Extrait de carte IGN au 1/10000 au niveau de la station d'Amougies sur la Rhosnes

A partir de cette carte IGN, le zéro de l'échelle obtenu serait inférieur à 17,5 mètres. Cependant, le levé de terrain donne une valeur de 13,763 mètres. La différence provient du fait que dans le cas de ce cours d'eau, nous avons un lit mineur relativement encaissé (Figure 3738).



Figure 37 : La Rhosnes à Amougies

C. Résultats

La Figure 3839 présente les altitudes obtenues pour les différentes stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés sous forme de tableau en Annexe 6.

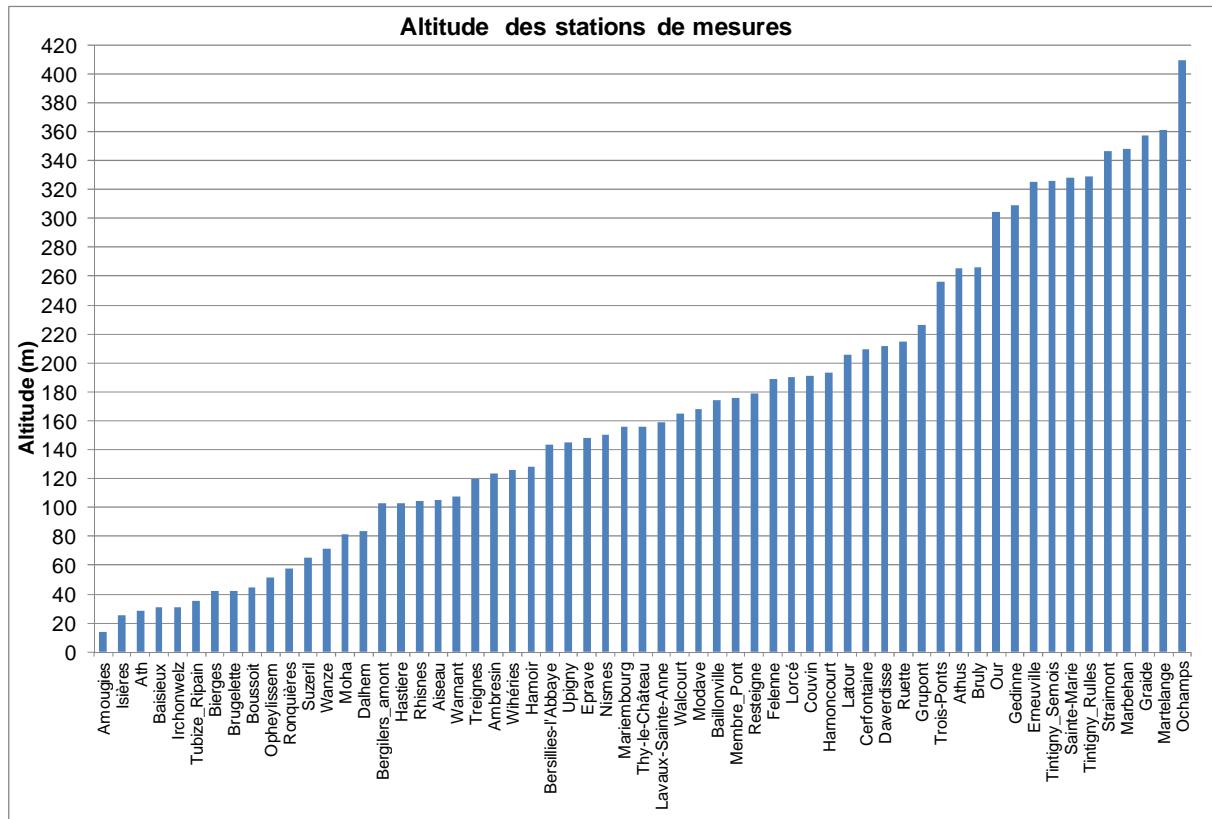


Figure 38 : Altitude des stations de mesures (m)

Les stations de mesures étant réparties sur l'ensemble de la Wallonie, on couvre la majeure partie des altitudes observées. La moyenne est de 169,6 m tandis que le minimum est de 13,76 m et le maximum de 409,5 m.

4.2.3 Coordonnées Lambert

Les coordonnées Lambert des stations de mesures permettent d'avoir une localisation géographique et positionner les stations les unes par rapport aux autres.

Les coordonnées fournies par le Service public de Wallonie ont été obtenues (DGO2, DGO3) à l'aide de mesures topographiques réalisées soit par GPS, soit par niveling.

L'Annexe 7 présente les coordonnées Lambert des différentes stations de mesures sélectionnées. Le système de coordonnées est le Lambert 72.

4.2.4 Superficie du bassin versant

A. Introduction

La superficie du bassin versant est un des paramètres géographiques les plus importants. En effet, il permet une comparaison directe entre les bassins versants à partir de l'étendue du territoire qui participe à l'apport en eau en un point donné.

B. Méthodologie

Pour chaque station de mesures limnimétriques, le bassin versant est généré à partir du modèle numérique de terrain produit par la convention ERRUISSOL.

Le modèle numérique de terrain est obtenu par traitement des données disponibles en Région wallonne, à savoir :

- Les points numériques de terrain du Projet Informatique de Cartographie Continue (PICC – DGO2, SPW), dont l'échelle est le 1/1.000 et dont la distance entre les points de mesure est en général de 50 mètres ;
- Les données numériques « point » du Digital terrain model (DTM) 1/10.000 de l'Institut Géographique National (IGN) dont la distance entre points est de 20 mètres ;
- Les altitudes au sol issues du dernier écho laser du MNT des cours d'eau de première catégorie non navigables et des cours d'eau navigables dont la densité est d'un point tous les mètres.

La dimension unitaire des pixels constitutants le modèle numérique de terrain est fixée à 10 m par 10 m. (Dautrebande *et al.*, 2008)

La Figure 3940 présente le modèle numérique de terrain issu du projet ERRUISSOL.

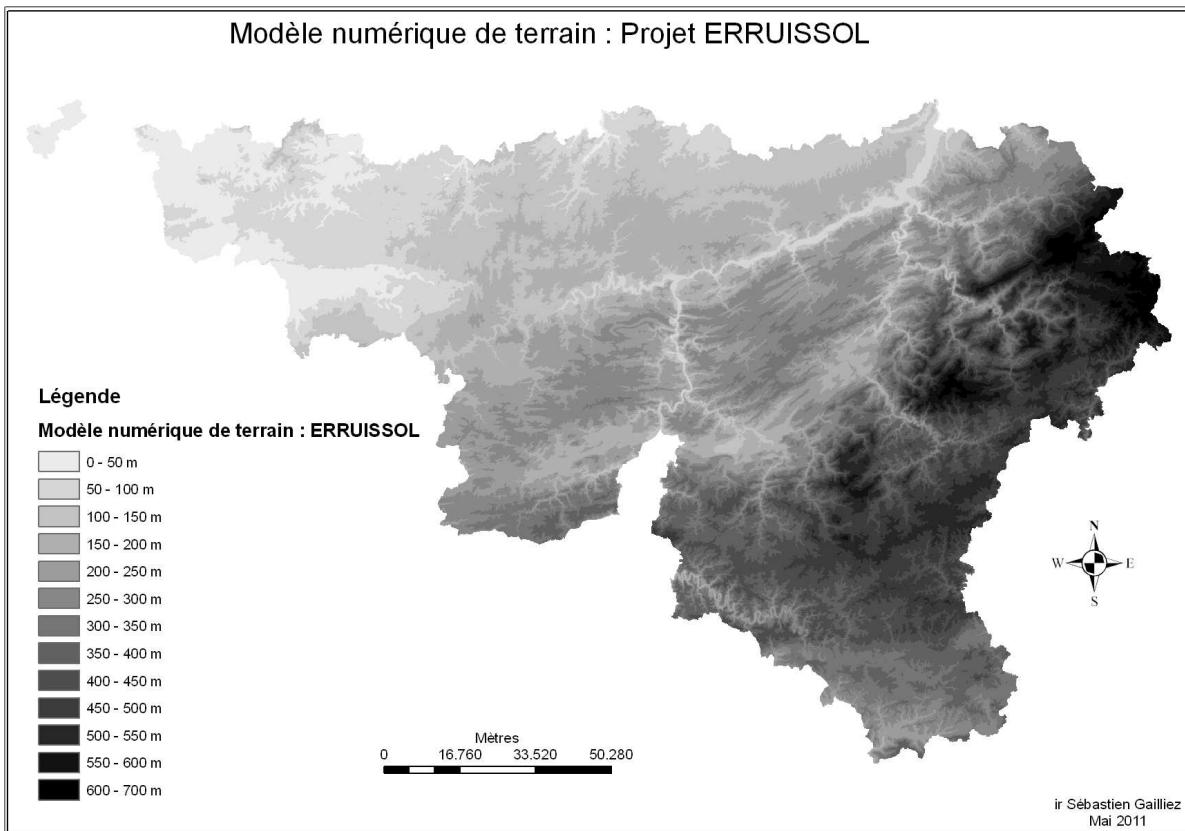


Figure 39 : Modèle numérique de terrain : Projet ERRUISSOL

Les limites des bassins versants utilisées proviennent du projet ALBA réalisé par l'Université de Liège – Gembloux AgroBioTech et plus particulièrement par l'Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole.

La méthode de simulation des écoulements à partir du modèle numérique de terrain obtenu dans le cadre du projet ERRUISSOL est utilisée pour la délimitation de ces limites.

Le modèle numérique de terrain est ensuite « fillé » (Fill) afin d'éliminer les anomalies hydrologiques (discontinuités entre les axes). Les directions de flux (Flow Direction), les accumulations de flux (Flow Accumulation) sont ensuite calculées afin d'obtenir un nouveau réseau hydrographique continu sur l'ensemble du modèle numérique de terrain. (Xanthoulis et Debauche, 2010)

Pour ce qui des bassins versants frontaliers, comme par exemple le Viroin, la Chiers et la Semois, le modèle numérique de terrain au 1/50000 de l'Institut national géographique existant est utilisé.

Le Tableau 15 reprend pour les cours d'eau frontaliers, la superficie totale du bassin versant et la proportion du territoire situé en Région wallonne.

Tableau 15 : Proportion de la superficie du bassin versant (km²) en Région wallonne pour les cours d'eau frontaliers

Code	Localité	Cours d'eau	Bassin versant	Superficie du bassin versant (km ²)	Superficie en Région wallonne (km ²)	Pourcentage en Région wallonne (%)
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	Haine	121,10	26,09	21,54
L5412	Amougies	Rhosnes	Escaut	166,02	131,35	79,12
L5420	Isières	Sille	Dendre	63,23	61,88	97,86
L5520	Harnoncourt	Ton	Chiers	290,06	257,77	88,87
L5600	Ruette	Vire	Chiers	105,90	75,55	71,34
L6020	Athus	Messancy	Chiers	61,61	59,85	97,15
L6030	Latour	Vire	Chiers	124,91	92,62	74,15
L6280	Opheylissem	Petite Gette	Gette	129,99	128,58	98,91
5572	Bergilers amont	Geer	Geer	123,12	119,48	97,04
7944	Wihéries	Hantes	Sambre	140,01	125,63	89,73
7978	Bersillies-l'abbaye	Thure	Sambre	60,07	31,62	52,64
9021	Treignes	Viroin	Viroin	553,44	508,25	91,84
9071	Couvin	Eau noire	Viroin	176,23	131,04	74,36
9232	Bruly	Ry de Pernelle	Viroin	38,37	22,22	57,90
9434	Membre pont	Semois	Semois	1230,10	1218,17	99,03

On peut observer que la majorité des stations de mesures situées au sein de bassins versants transfrontaliers ont plus de 90 % de la superficie de leur bassin versant situé en Région wallonne.

C. Résultats

A partir des limites de bassin versant obtenues pour chaque station de mesures limnimétrique, la superficie du bassin versant a été déterminée et les résultats sont présentés en Annexe 8.

4.2.5 Densité de drainage

A. Introduction

La densité de drainage peut être définie comme étant le rapport entre la longueur totale du linéaire des cours d'eau et la superficie du bassin versant.

$$D_d = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{S}$$

dans laquelle,

- D_d est la densité de drainage exprimée en km/km²,
- L_i est la longueur du tronçon de cours d'eau exprimée en km,
- S est la superficie du bassin versant exprimée en km².

B. Méthodologie

Les données de base pour la détermination des densités de drainage sont les bassins versants des stations de mesures délimités dans le chapitre précédent et la couche d'informations géographiques reprenant l'ensemble du linéaire des cours d'eau de la Région wallonne.

La Figure 4041 présente les différentes étapes de l'extraction des cours d'eau présents au sein d'un bassin versant. La fonction 'Clip' du logiciel ArcGis est utilisée.

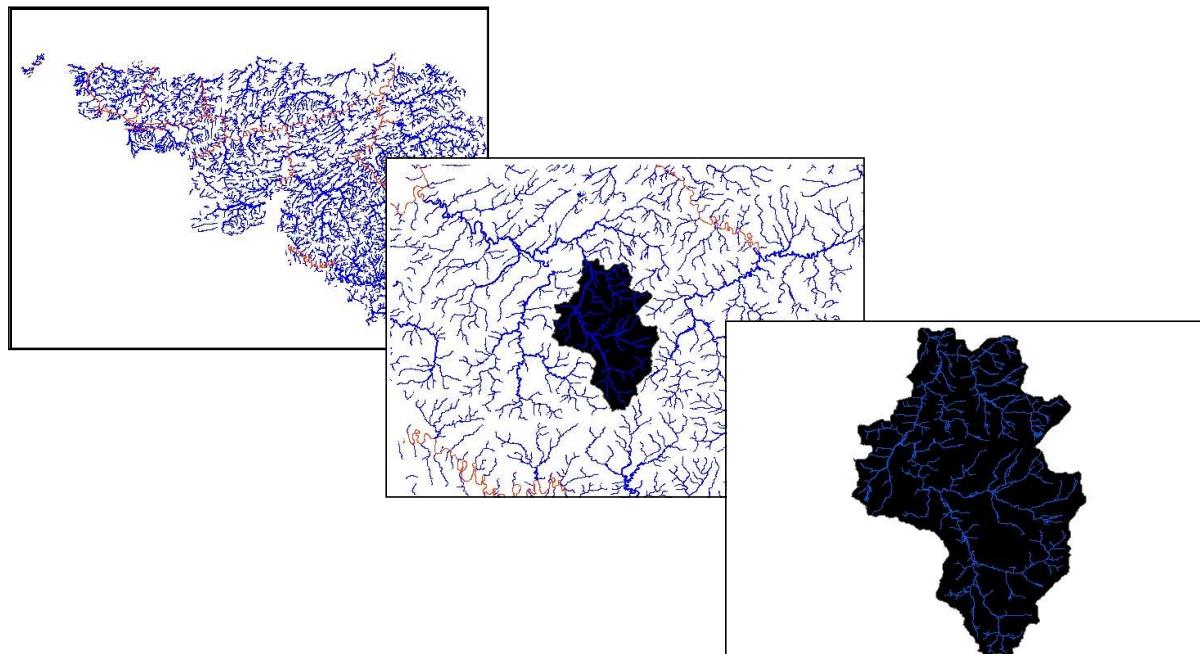


Figure 40 : Détermination de la densité de drainage

A partir de la longueur du linéaire des cours d'eau présents au sein d'un bassin versant d'une station de mesures et de la superficie de celui-ci, la densité de drainage est obtenue en faisant le rapport de ces deux valeurs. La qualité de la donnée originale dans les régions où les zones drainées (fagnes, tourbières, wateringues, ...) est moins bonne car on trouve dans la couche d'informations de base l'ensemble des drains et/ou fossés drainant.

C. Bassins versants frontaliers

Dans le cadre des bassins versants frontaliers, la méthodologie consiste à réaliser un FlowAccumulation du logiciel d'informations géographiques ArcGis. Pour la définition du réseau hydrographique à partir du modèle numérique de terrain, une valeur 'seuil' doit être définie. Cette dernière correspond à la surface contributive que l'on doit avoir pour que le linéaire obtenu soit un cours d'eau.

L'objectif est de définir pour la partie connue du réseau hydrographique en Wallonie, la valeur 'seuil' que l'on doit utiliser avec la fonction 'FlowAccumulation' pour obtenir le même linéaire de cours d'eau à partir du modèle numérique au 1/10000 du projet ERRUISSOL.

La fonction 'FlowAccumulation' et la valeur 'seuil' obtenue sont ensuite appliquées au modèle numérique de terrain au 1/50000 de l'Institut national géographique qui déborde de la Wallonie afin d'obtenir le linéaire de cours d'eau hors Région wallonne.

Pour appliquer la fonction FlowAccumulation, le modèle numérique de terrain doit dans un premier temps être « fillé » (Fill) de manière à éliminer les anomalies hydrologiques (discontinuités entre les axes). Dans un deuxième temps, les directions de flux (Flow Direction), les accumulations de flux (Flow Accumulation) sont ensuite calculées.

Le réseau hydrographique pris en considération pour la détermination de la densité de drainage des bassins versants frontaliers est le linéaire de cours d'eau de la Région wallonne (couche hydrographique continue) auquel on a ajouté le linéaire des cours d'eau obtenu à partir du modèle numérique de terrain au 1/50000 pour la partie située hors frontières.

D. Résultats

Les résultats obtenus pour la densité de drainage sont présentés en Annexe 9.

La Figure 4142 présente sous forme de graphique la densité de drainage des bassins versants des stations de mesures sélectionnées. On peut observer qu'environ 75 % des stations de mesures ont une densité de drainage comprise entre 1,2 et 2 km/km².

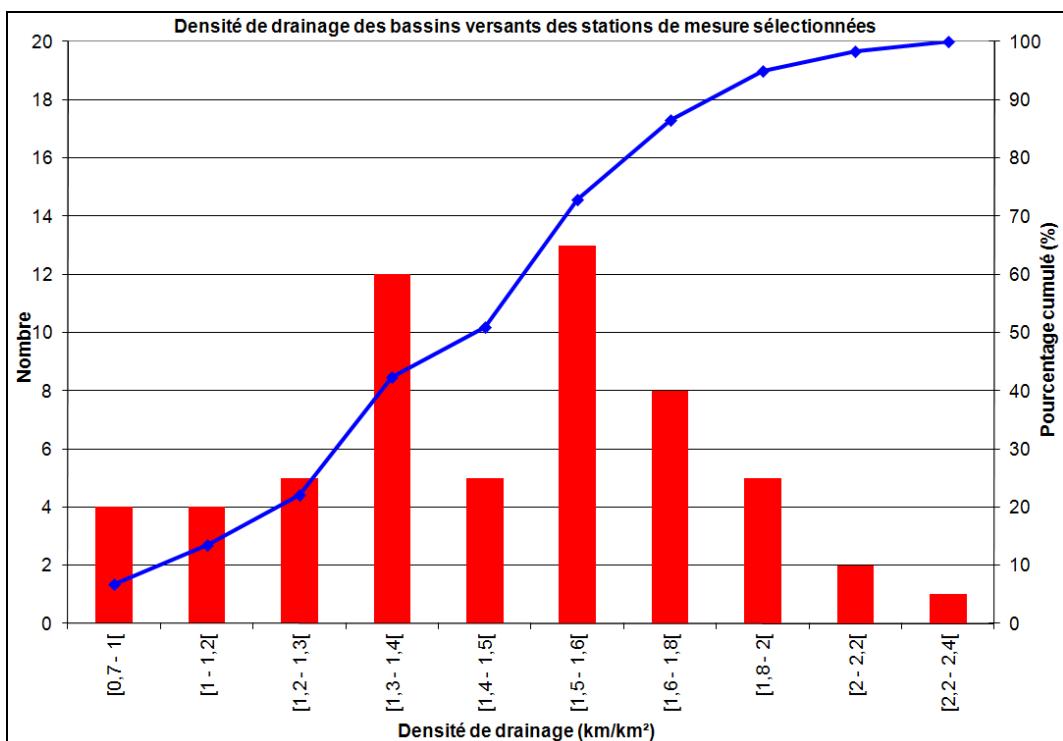


Figure 41 : Densité de drainage des bassins versants des stations de mesures sélectionnées

Les valeurs inférieures à 1 km/km² sont obtenues pour les stations de Bergilers (Geer), Rhisnes (Houyoux), Hamoir (Néblon) et Opheylissem (Petite Gette). Les valeurs les plus élevées (supérieures à 2 km/km²) sont observées sur la Brouffe (Mariembourg), l'Eau d'Heure (Cerfontaine) et la Rulles (Tintigny).

4.2.6 Pente du bassin versant

A. Introduction

Le modèle numérique de terrain utilisé précédemment pour la détermination des limites des bassins versants a également été utilisé (MNT 1/10000 du projet ERRUISSOL).

Pour les bassins frontaliers, le modèle numérique de terrain au 1/50000 de l'Institut national géographique n'est pas utilisé comme source d'informations. En effet, étant donné la différence dans la résolution des données par rapport au modèle numérique de terrain au 1/10000 sur la Région wallonne, des erreurs seraient introduites.

C'est pourquoi, il est décidé de prendre comme pentes caractéristiques pour les bassins frontaliers, les pentes obtenues pour la partie située en Région wallonne.

B. Méthodologie

La pente moyenne de chaque pixel du modèle numérique de terrain est obtenue à l'aide de la fonction Slope de Spatial Analyst 9.1 (ArcGIS 9.1). Cette fonction calcule la pente d'un pixel en fonction de l'altitude des 8 pixels contigus.

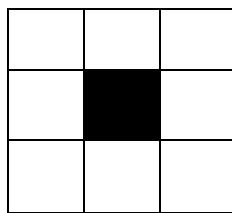


Figure 42 : Fonction Slope

La fonction 'Slope' calcule le taux de variation maximum entre chaque pixel et ses voisins (Figure 4243).

Après avoir appliqué cette fonction sur les modèles numériques de terrain du bassin versant d'une station de mesures, la médiane des valeurs obtenues est calculée. Cette valeur correspond donc à la pente médiane du bassin versant exprimée en pourcent.

Afin de tenir compte de l'hétérogénéité de la pente au sein d'un bassin versant et d'éliminer les valeurs aberrantes des pentes obtenues à partir du modèle numérique de terrain, les percentiles 10 et 90 des pentes sont pris en considération plutôt que les valeurs minimum et maximum.

Les résultats obtenus pour la caractérisation des bassins versants du point de vue des pentes sont présentés en Annexe 10.

C. Résultats

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de graphiques dans lesquels on a en abscisse les classes de pente et en ordonnées le nombre et le pourcentage de stations observées dans la classe considérée (Figure 4344).

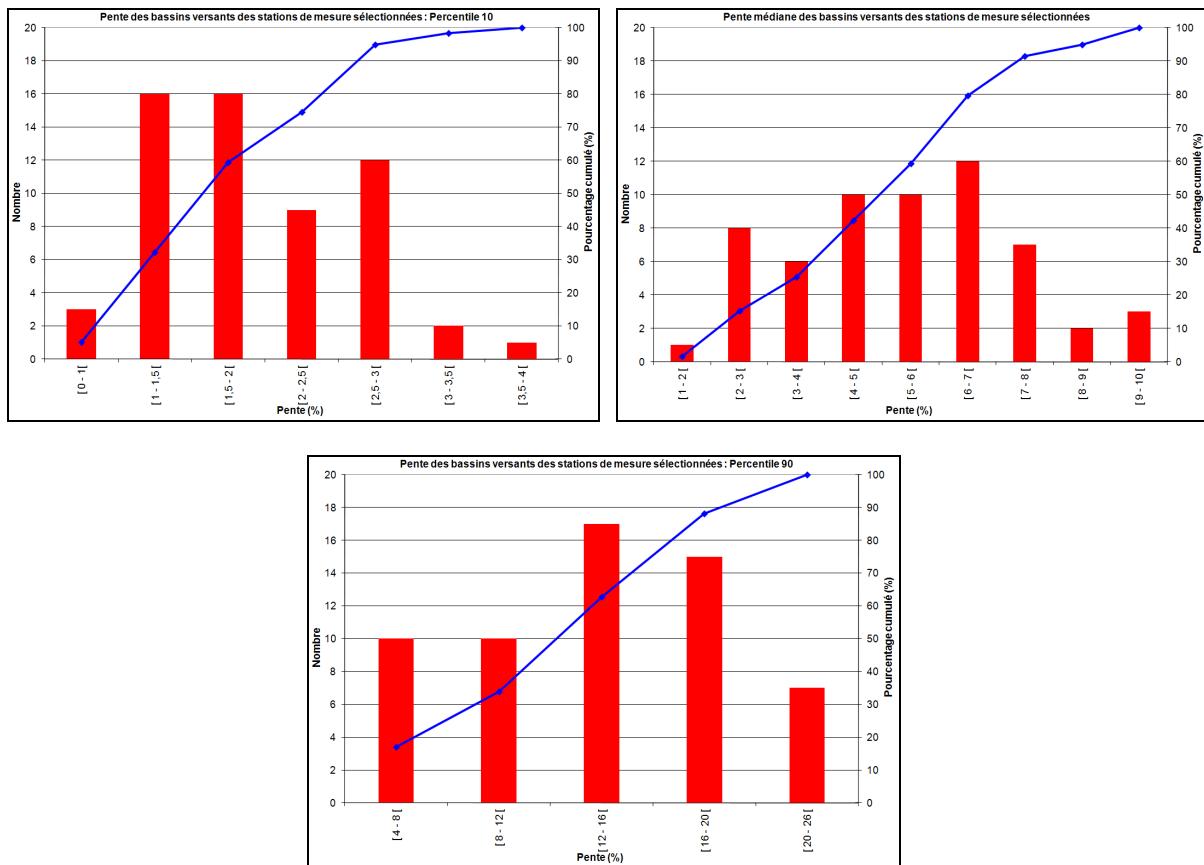


Figure 43 : Pente des bassins versants

En analysant les valeurs des percentiles des pentes calculés, on remarque que les pentes des bassins versants situés dans le district hydrographique de l'Escaut ainsi que les bassins du district de la Meuse situés au Nord de cette dernière (Geer, Mehaigne, Houyoux) sont les plus faibles.

Les valeurs obtenues les plus élevées sont observées pour le bassin du Viroin, de l'Hermeton, de la Haute Lesse et de la de la Lhomme, de la Semois, de la Chiers (Ton et Messancy), le Néblon et la Sûre. Le bassin de la Berwinne possède également une pente relativement importante ($P50 = 7,69$ et $P90 = 18,27$).

4.2.7 Occupation du sol

A. Introduction

L'occupation du sol est une information importante dans le cadre de la régionalisation des débits d'étiage dans le sens où elle conditionne les bilans hydrologiques.

En effet, selon le type d'occupation observée sur le terrain, on pourra obtenir une répartition différente des précipitations entre l'interception, l'évaporation, le ruissellement, l'infiltration et l'évapotranspiration soit les différents éléments du bilan hydrologique. (Hingray *et al.*, 2009) (Maidment, 1993)

B. Méthodologie

Une nouvelle carte numérique d'occupation du sol a été produite en 2007 pour l'ensemble de la Wallonie.

Cette couche d'informations a été obtenue à partir du Plan de Localisation Informatique (PLI) combiné avec la matrice cadastrale et croisée par géotraitement avec différentes couches thématiques de l'occupation du sol : le parcellaire agricole (y compris la couche concernant les mesures agri-environnementales), les plans d'eau, les zones d'extraction, les terrils, les décharges, les sites à réaménager, les zones portuaires, les aérodromes, les campings et les parcs résidentiels.

C. Thèmes repris dans la carte d'occupation du sol

Les différentes occupations du sol sont regroupées, en sept grandes classes, à savoir :

- Non cadastré,
- Territoires artificialisés,
 - Terrains résidentiels,
 - Espaces d'activité économique, de service, d'équipement et de communication,
 - Mines, décharges et espaces abandonnés,
 - Espaces verts artificialisés, non agricoles,
 - Autres.
- Territoires agricoles,
 - Terres arables,
 - Cultures permanentes,
 - Surfaces enherbées,
 - Friches agricoles.
- Forêts et milieux semi-naturels,
 - Forêts : type non spécifié, feuillus, conifères, mélangées,
 - Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée : pelouses naturelles, terrils, ...
- Zones humides,
- Surfaces en eau,
 - Cours d'eau,
 - Plans d'eau.
- Non classés.

La Figure 4445 présente la carte d'occupation du sol de la Région wallonne dans son premier niveau de légende.

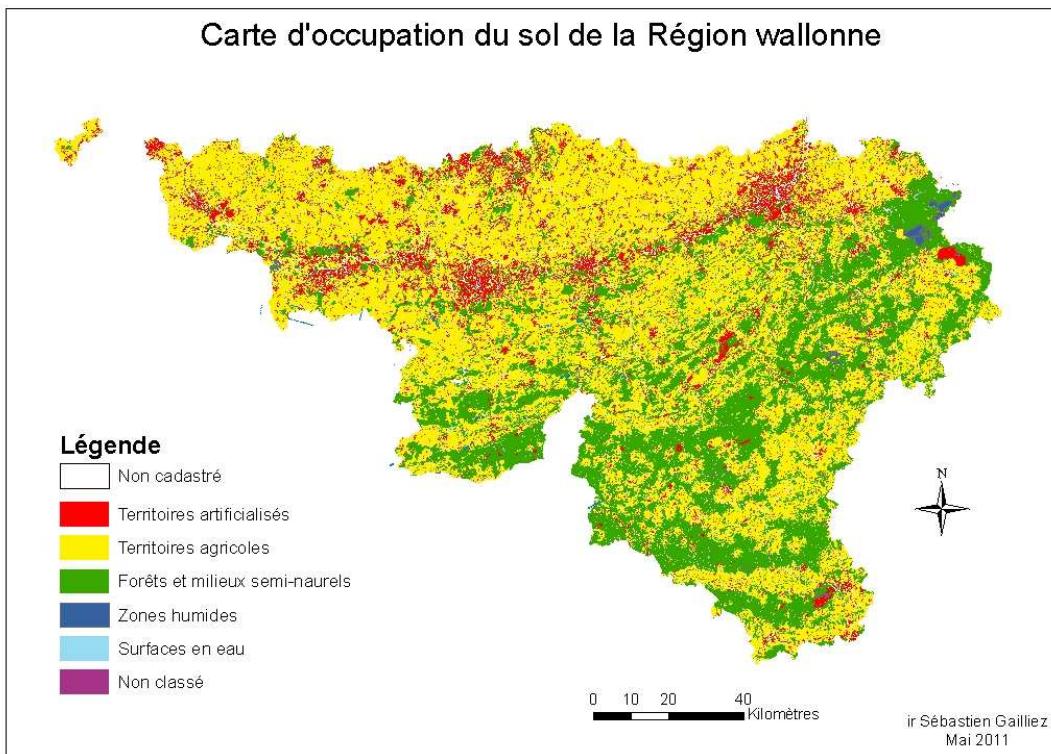


Figure 44 : Carte d'occupation du sol de la Région wallonne

D. Occupations du sol prises en considération

Laaha (Laaha et Blöschl, 2006) propose d'utiliser le pourcentage de zones urbaines, agricoles, de cultures permanentes, de prairies, de forêts, de zones humides, d'eaux de surface et de glaciers.

Vezza (Vezza *et al.*, 2010) utilise dans sa régionalisation les paramètres suivants en ce qui concerne l'occupation de sol : zones urbaines, forêts, cultures et prairies, jachères, zones humides.

En préambule, il est à noter que toutes les proportions calculées ci-dessous se feront sur base de la superficie totale du bassin versant.

L'urbanisation des bassins versants de certains cours d'eau engendre des modifications tant au niveau des rejets que des prises d'eau. C'est pourquoi, la somme des proportions des superficies des terrains résidentiels et des espaces d'activité économique, de service, d'équipement et de communication seront prises en considération.

La superficie totale occupée par les forêts sera prise en considération sans distinction du type d'arbres présents, à savoir les feuillus ou les résineux. La séparation entre les feuillus et les résineux n'est pas effectuée pour la quantification de la partie des précipitations qui s'infiltre ou ruisselle. (Hingray *et al.*, 2009)

A titre d'exemple, la méthode SCS utilise un paramètre appelé 'Curve number' qui permet de tenir compte de l'occupation du sol pour le calcul du débit de ruissellement. Les différents types de forêts sont repris dans une seule catégorie appelée 'Forêt'. (Maidment, 1993)

Les proportions des différents types de territoires agricoles seront prises en compte. Les trois classes retenues sont :

- les terres arables,
- les cultures permanentes,
- les surfaces enherbées et les friches agricoles.

La superficie de pelouses calcaires et pâturages naturels issue de la classe des forêts et des milieux naturels a été ajoutée à la superficie des surfaces enherbées issues des territoires agricoles.

Les plans d'eau pouvant avoir une influence en période d'étiage et de température élevée, la proportion de superficie de ceux-ci est calculée. En effet, l'influence des plans d'eau pourrait se voir au niveau de l'évaporation durant la période estivale et donc d'étiage car elle est directement liée à la température de l'air. De plus, les plans d'eau peuvent réguler les débits des cours d'eau. Vu la faible proportion de la superficie occupée par les plans d'eau, ceux-ci ne sont pas pris en considération. En effet, le pourcentage moyen de la superficie occupée par les plans d'eau pour l'ensemble des bassins versants des stations de mesures sélectionnées est de 0,30 % avec un écart-type de 0,002 %.

E. Bassins versants transfrontaliers

La carte d'occupation de la Région wallonne ne s'applique comme son nom l'indique qu'à la Wallonie. Or, quelques stations de mesures ont une partie plus ou moins importante de leur bassin versant située hors de la Région wallonne.

Pour la réalisation de cette carte, la carte d'occupation du sol européenne CORINE a été utilisée. La couche d'information CORINE se présente sous la forme d'un raster. Elle est réalisée par l'Agence européenne de l'Environnement et a été mise à jour en 2006 (version 13). La résolution des données est de 100 * 100 mètres. Cette dernière n'a été utilisée que pour la partie du bassin versant située en-dehors de la Wallonie.

Les différentes classes de la carte d'occupation du sol CORINE utilisées dans le cadre de ce travail sont les suivantes :

- Territoires artificialisés :
 - Ilots urbains continus,
 - Ilots urbains discontinus,
 - Zones commerciales et industrielles,
 - Routes et réseau ferroviaire,
 - Zones portuaires,
 - Aéroport.
- Territoires agricoles :
 - Terres arables non irriguées,
 - Terres arables avec irrigations permanentes,
 - Vergers,
 - Surfaces enherbées.
- Forêts et milieux semi-naturels :
 - Forêt de feuillus,
 - Forêts de résineux,
 - Forêts mixtes,
 - Pelouses naturelles.

Afin d'utiliser les mêmes classes d'occupation du sol de la partie du bassin versant située en Région wallonne, un regroupement est effectué entre les différentes classes issues de la couche d'informations CORINE. Ce regroupement est présenté dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Regroupement des classes d'occupation du sol

Classes d'occupation du sol en Région wallonne	Classes d'occupation du sol (CORINE)
Territoires artificialisés	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ilots urbains continus ▪ Ilots urbains discontinus ▪ Zones commerciales et industrielles ▪ Routes et réseau ferroviaire ▪ Zones portuaires ▪ Aéroport
Forêts	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Forêts de feuillus ▪ Forêts de résineux ▪ Forêts mixtes
Terres arables	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Terres arables non irriguées ▪ Terres arables avec irrigations permanentes ▪ Système de cultures complexe ▪ Terres arables dominantes avec régions avec végétation naturelle significative
Cultures permanentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vergers
Surfaces enherbées	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Surfaces enherbées ▪ Pelouses naturelles

F. Résultats

L'Annexe 11 présente les résultats obtenus pour l'occupation du sol des bassins versants des différentes stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude. Les résultats sont exprimés en pourcentage de la superficie totale du bassin versant.

La Figure 4546 présente les moyennes obtenues par bassin versant des différentes classes d'occupation du sol, et ce pour l'ensemble des stations de mesures sélectionnées.

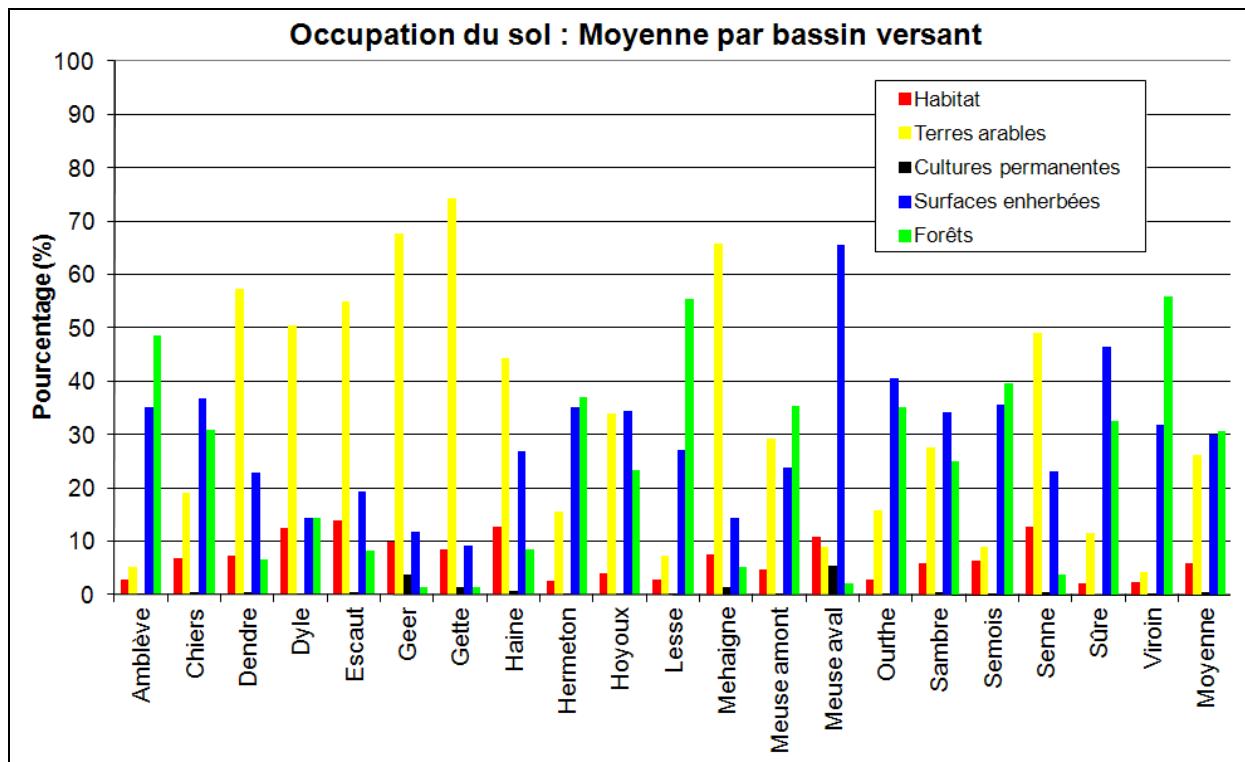


Figure 45 : Occupation du sol : Moyenne par bassin versant

Nous pouvons observer que ce sont soit les terres arables, soit les forêts qui occupent un pourcentage important de nos régions.

En effet, les bassins de la Dyle, de la Dendre, de l'Escaut, du Geer, de la Haine, de la Mehaigne et de la Senne sont principalement occupés par les cultures.

Par contre, les forêts sont prédominantes dans les bassins de l'Amblève, de la Lesse, de la Sûre et du Viroin.

Dans certains bassins, on observe une proportion équivalente de forêts et de surfaces enherbées. C'est le cas pour la Chiers, l'Hermeton, le Hoyoux, l'Ourthe, la Sambre et la Semois.

Pour le bassin de la Meuse aval, les surfaces enherbées sont majoritairement présentes avec un pourcentage proche des 70 %.

En ce qui concerne les cultures permanentes, elles sont principalement présentes dans les bassins de la Meuse aval et du Geer.

4.2.8 Pédologie

A. Introduction

Les types de sols présents au sein d'un bassin versant ont une influence aussi bien sur la quantité d'eau infiltrée que sur le débit de ruissellement.

Une meilleure infiltration favorisera une meilleure recharge en eau des nappes souterraines qui alimentent les cours d'eau en période d'étiage.

En Grande-Bretagne, pour caractériser les sols d'un point de vue hydrologique, la notion de 'HOST' (Hydrology of Soil Types) est utilisée. Il s'agit en fait d'une combinaison du Base Flow index (ratio entre le débit de base et le débit total), la profondeur de l'aquifère, la présence de sol tourbeux, la profondeur de la couche faiblement perméable, la capacité de drainage ainsi que la couche de sol qui est en moyenne trente jours par an sous eaux. (Gustar, 1992) (Young, 2006)

Aux Etats-Unis, Kroll utilise les informations contenues dans l'USDA's STATSGO. Il s'agit d'une carte avec des mailles d'un kilomètre de côté couvrant l'ensemble des Etats-Unis. STATSGO a été développée en 1994 afin d'être un support pour le management et le suivi des ressources en eau. Pour chaque bassin versant, les moyennes des valeurs faibles et élevées des paramètres du sol sont calculées : perméabilité, capacité d'eau disponible, pourcentage de matière organique, épaisseur totale de sol, ... (Kroll *et al.*, 2004)

Yadav utilise quant à lui dans son étude la perméabilité des sols en les classant en trois catégories (élevée, moyenne et faible). (Yadav *et al.*, 2007)

La méthodologie choisie pour classer les différents types de sols présents en Région wallonne est basée sur la méthode du Soil Conservation Service (méthode SCS).

Selon cette méthode, les sols sont répartis entre quatre groupes hydrologiques (A, B, C et D) en fonction de leur texture, épaisseur, stratification et drainage naturel. Ces quatre classes déterminent des plages de taux d'infiltration limite (ou capacité limite d'infiltration) des sols nus. Une représentation schématique de ces classes est proposée à la Figure 46. (Dautrebande *et al.*, 2008)

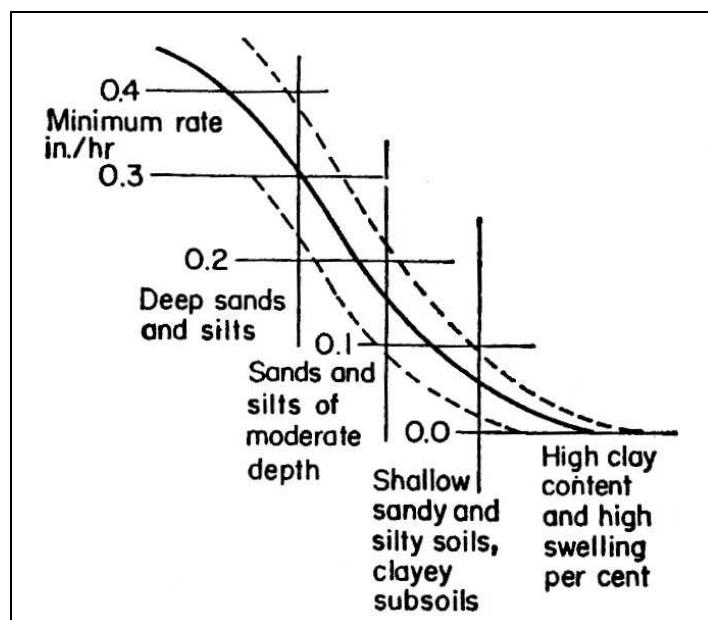


Figure 46 : Plages de taux d'infiltration limite sur sol de culture (les lignes en trait discontinu correspondent l'intervalle de variation autour de la moyenne (Dautrebande *et al.*, 2008) (Maidment, 1993)

Ces groupes hydrologiques sont un élément de base, permettant d'associer, dans la méthodologie SCS, les pentes des terres, l'occupation et utilisation du sol, l'humidité du sol, etc., pour aboutir in fine à définir un paramètre appelé 'Curve Number' (CN) en vue de déterminer par exemple le ruissellement direct en fonction d'averses de projet, l'évolution de l'infiltrabilité dans le cadre d'une modélisation hydrologique physiquement.

La classification des différents types de sols présents en Wallonie a été réalisée dans le cadre du projet ERRUISSOL présenté précédemment, dont l'objectif est d'établir une cartographie du risque de ruissellement diffus. Cette carte est présentée à la Figure 4747. (Demarcin *et al.*, 2011) (Dautrebande *et al.*, 2008)

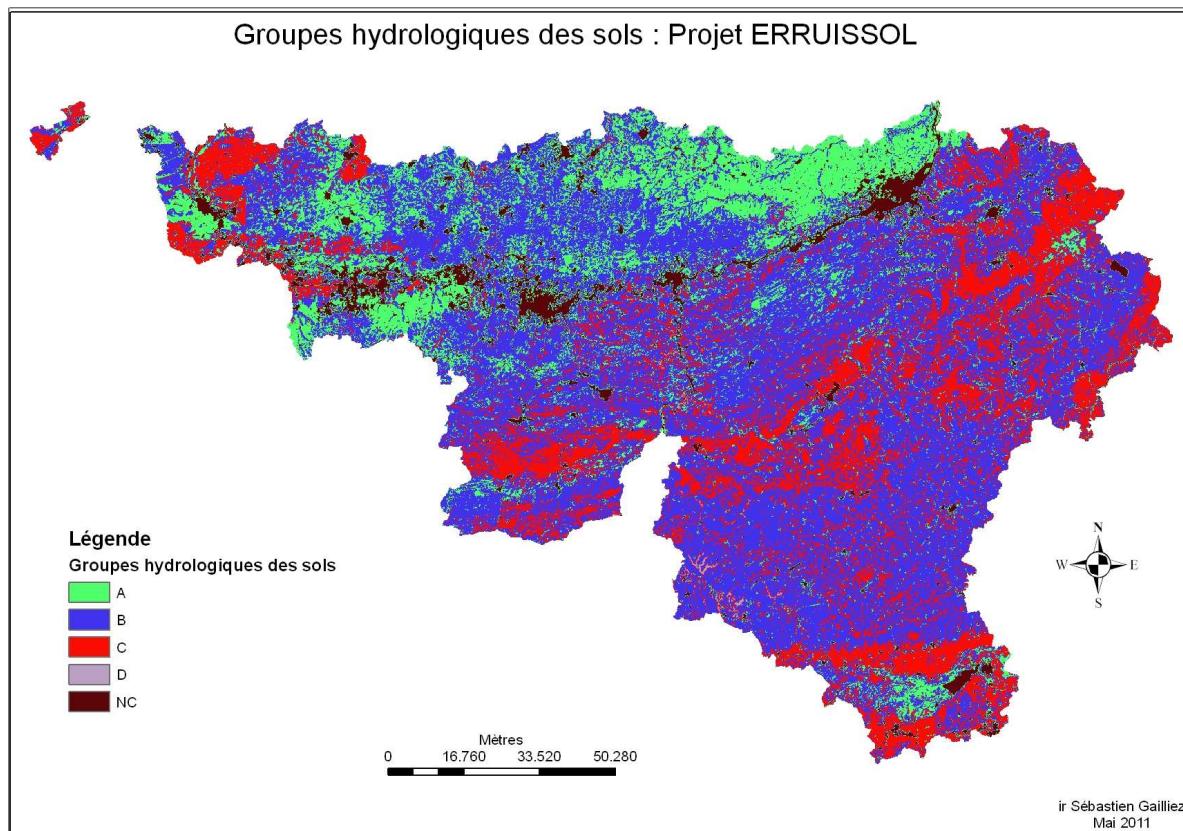


Figure 47 : Groupes hydrologiques des sols : Projet ERRUISSOL

La cartographie ERRUISSOL des Groupes SCS hydrologiques de sols utilise principalement la carte numérique des sols (1/20 000). (Veron et Bah, 2005)

B. Zones non cartographiées

Au niveau de la carte des sols de la Région wallonne, il existe des zones non cartographiées ou des sols de type artificialisé. Ces derniers ont été mis en 'non classés'.

Dans le cadre du projet ERRUISSOL, les séries spéciales suivantes ont également été mises dans le groupe 'non classés' :

- les zones de sources anthropisées ou non,
- les dolines,
- les mardelles,
- les zones décapées mécaniquement,
- les fosses d'extraction,
- les terrils,
- les marnières,
- les remblais,
- les terrains remaniés,
- les tourbières exploitées,

- les complexes non différenciés de carrières, terrils, remblais, terrains remaniés, zones bâties et industrialisées,
- les ravins ou fonds de vallons rocaillieux,
- les fonds de vallons limoneux.

Etant donné le caractère imperméable des zones urbanisées, ces dernières ont été classées dans le groupe hydrologique D.

Pour ce faire, un croisement entre la carte d'occupation du sol et la carte des groupes hydrologiques a été effectué à l'aide du logiciel ArcGis.

Les zones qualifiées 'non classés' de la carte des groupes hydrologiques des sols qui se situent en zones d'habitats du territoire artificialisé (occupation du sol) sont regroupés avec les zones de groupe hydrologique D.

C. Bassins versants transfrontaliers

Pour ce qui est des bassins versants transfrontaliers, une règle de trois a été appliquée entre les superficies obtenues pour la partie située en Région wallonne pour chaque groupe hydrologique et la superficie totale, les zones artificialisées n'ayant pas encore été intégrées au groupe hydrologique D.

En ce qui concerne la partie du territoire placée dans la catégorie 'non classés' des groupes hydrologiques des sols, les zones artificialisées obtenues à partir de la carte d'occupation du sol de la Région wallonne et à partir de la carte d'occupation du sol CORINE pour la partie hors Wallonie, ont également été regroupées dans le groupe hydrologique D.

D. Résultats

Les données de base sont donc la carte des groupes hydrologiques des sols produite dans le cadre du projet ERRUISSOL et les bassins versants des stations de mesures.

La Figure 4848 présente les différentes étapes de l'extraction des cours d'eau présents au sein d'un bassin versant. La fonction 'Clip' du logiciel ArcGIS a été utilisée.

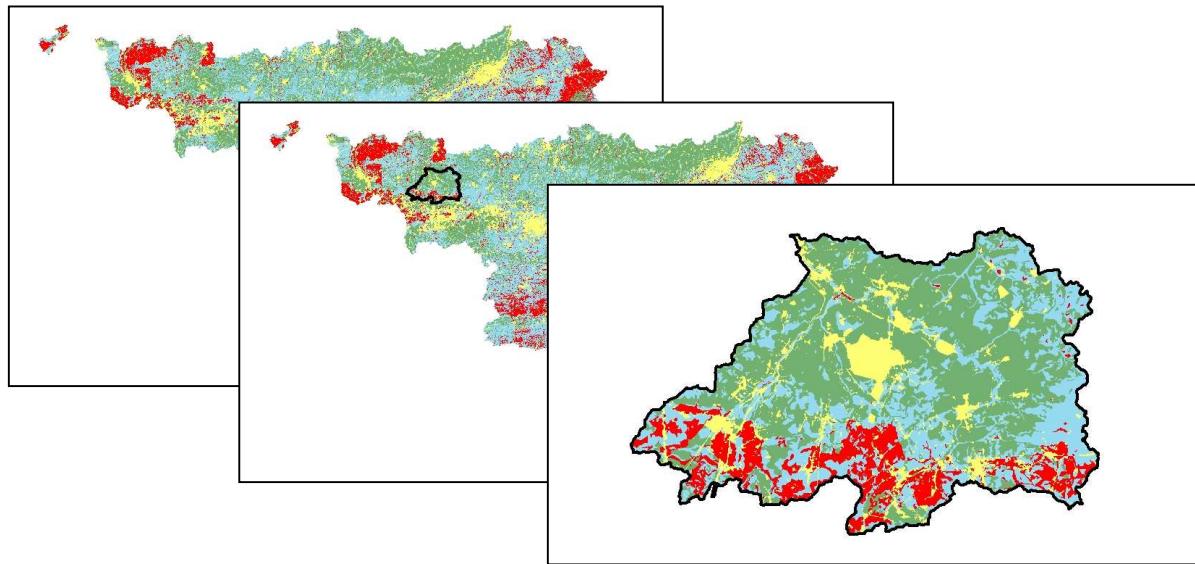


Figure 48 : Détermination de la proportion de différents types de groupes hydrologiques de sol pour les bassins versants des stations de mesures

Le pourcentage des différents groupes hydrologiques a ensuite été déterminé pour les bassins des stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude. Les résultats sont présentés en Annexe 12.

La Figure 49 présente les moyennes par groupe hydrologique de sol par bassin versant regroupant les différentes stations de mesures sélectionnées y appartenant.

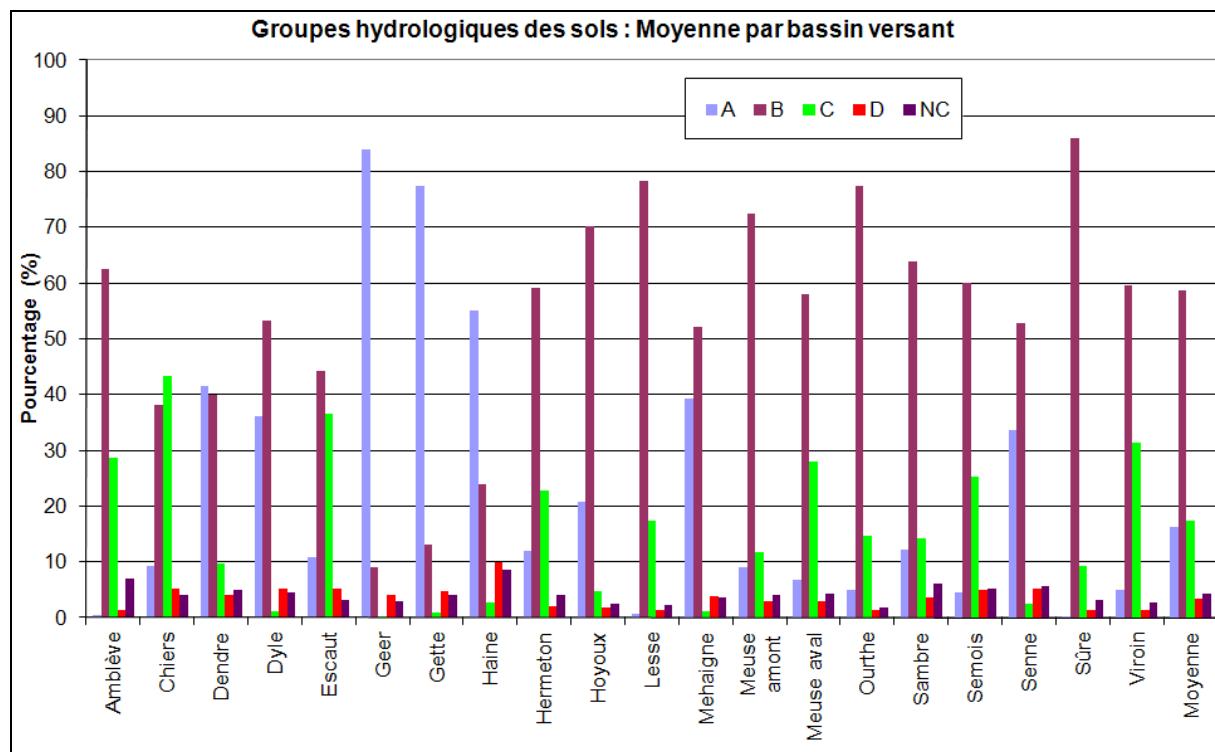


Figure 49 : Groupes hydrologiques des sols : Moyenne par bassin versant

Il ressort quelques particularités de ce graphique. En effet, les bassins versants du Geer, de la Gette, de la Haine et de la Mehaigne ont une proportion relativement importante du groupe hydrologique A, c'est-à-dire avec une bonne capacité d'infiltration.

Les bassins de l'Amblève, de la Chiers, de l'Escaut et du Viroin ont quant à eux une proportion de classe C assez élevée (supérieure à 30 %) par rapport aux autres bassins versants.

L'objet appelé 'moyenne' en abscisse représente la moyenne générale par groupe hydrologique pour l'ensemble des stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude.

4.2.9 Données climatiques : Précipitations et températures

A. Introduction

Les précipitations retenues dans le cadre de cette étude sont les moyennes annuelles et les moyennes saisonnières calculées du mois d'octobre à avril pour la période hivernale et de juillet à septembre pour la période estivale. (Laaha et Blöschl, 2006)

Les précipitations moyennes annuelles sont calculées pour l'année hydrologique qui s'étend du 1^{er} octobre au 30 septembre de l'année qui suit.

Les précipitations moyennes couvrant les mois d'octobre à avril permettent d'identifier l'apport en eau durant la période de recharge des nappes tandis que celles couvrant la période estivale (juillet à septembre) permettent de quantifier un déficit hydrique. Le mois de mai n'a pas été pris en considération car il joue généralement le rôle de charnière entre le printemps et la période estivale.

Les températures utilisées dans le contexte de l'étiage sont celles couvrant les mois de juillet à septembre. En effet, l'évaporation et l'évapotranspiration sont directement liées à la température.

B. Méthodologie

Pour obtenir les précipitations représentatives des différents bassins versants des stations de mesures sélectionnées, les résultats fournis par le module relatif à l'hydrologie du modèle EPIC sont utilisés.

Les données d'entrée du modèle sont les précipitations journalières fournies par le Service d'Etudes hydrologiques du Service public de Wallonie – Direction générale opérationnelle Mobilité et Voies hydrauliques pour la période couvrant les années allant de 1951 à 2005.

Les données de températures journalières sont issues du réseau de mesure climatologique de l'Institut royal météorologique. Ces données ont été acquises par le Service public de Wallonie pour la période allant de 1971 à 2005.

Les données subissent un pré-traitement ayant un double objectif. Le premier consiste à associer chaque maille élémentaire du bassin versant à une ou plusieurs stations de mesures pluviométriques. Le deuxième objectif a pour but de compléter les données manquantes. (Sohier, 2011)

La méthodologie utilisée par le modèle EPIC est celle des polygones de Thiessen qui permet d'estimer des valeurs pondérées en prenant en considération chaque station météorologique. Elle affecte à chaque station une zone d'influence dont l'aire, exprimée en

%, représente le facteur de pondération de la valeur locale. Les différentes zones d'influence sont déterminées par découpage géométrique du bassin sur une carte topographique. La valeur moyenne pondérée Moy pour le bassin, se calcule alors en effectuant la somme des valeurs X_i de chaque station, multipliées par leur facteur de pondération (aire A_i), le tout divisé par la surface totale A du bassin.

Par exemple, la précipitation moyenne sur le bassin s'écrit :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i P_i}{A}$$

avec :

- P_{moy} : précipitation moyenne sur le bassin,
- A : aire totale du bassin ($=\sum A_i$),
- P_i : précipitation enregistrée à la station i ,
- A_i : superficie du polygone associée à la station i .

C. Résultats

Les résultats de l'agrégation des données climatiques pour les différents bassins versants des stations de mesures, à savoir les précipitations moyennes annuelles (**P**), les précipitations moyennes pour la période allant d'octobre à avril (**PH**), les précipitations (**PE**) durant la période estivale (juillet à septembre) et la température moyenne de juillet à septembre (**TE**), sont présentés en Annexe 13.

La Figure 5050 présente les moyennes des différents paramètres liés aux précipitations par bassin versant pour les stations de mesures sélectionnées.

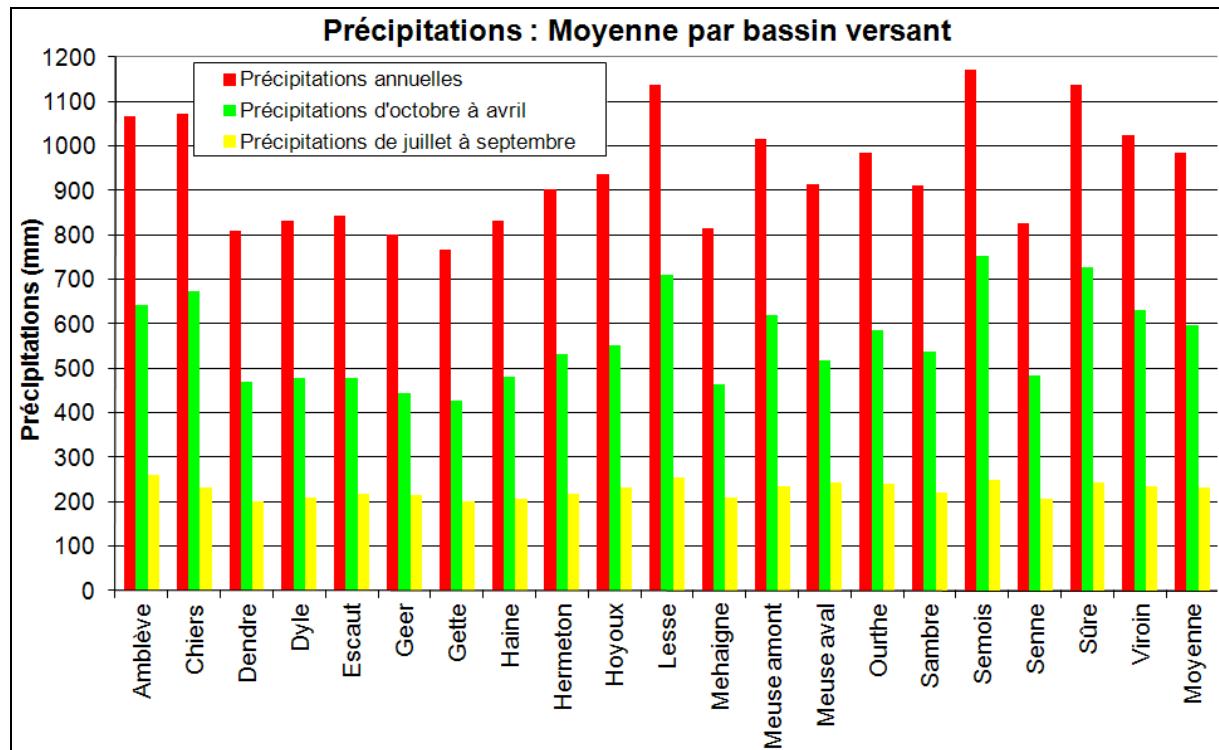


Figure 50 : Précipitations : Moyennes par bassin versant (1971 – 2005)

La Figure 5151 présente les précipitations moyennes annuelles, estivales (juillet – septembre) et hivernales (octobre – avril). A partir de celles-ci, on observe une augmentation des quantités d'eau tombées sur l'axe Nord-ouest Sud-est. Seule une diminution a lieu entre la Région des Ardennes et la Lorraine.

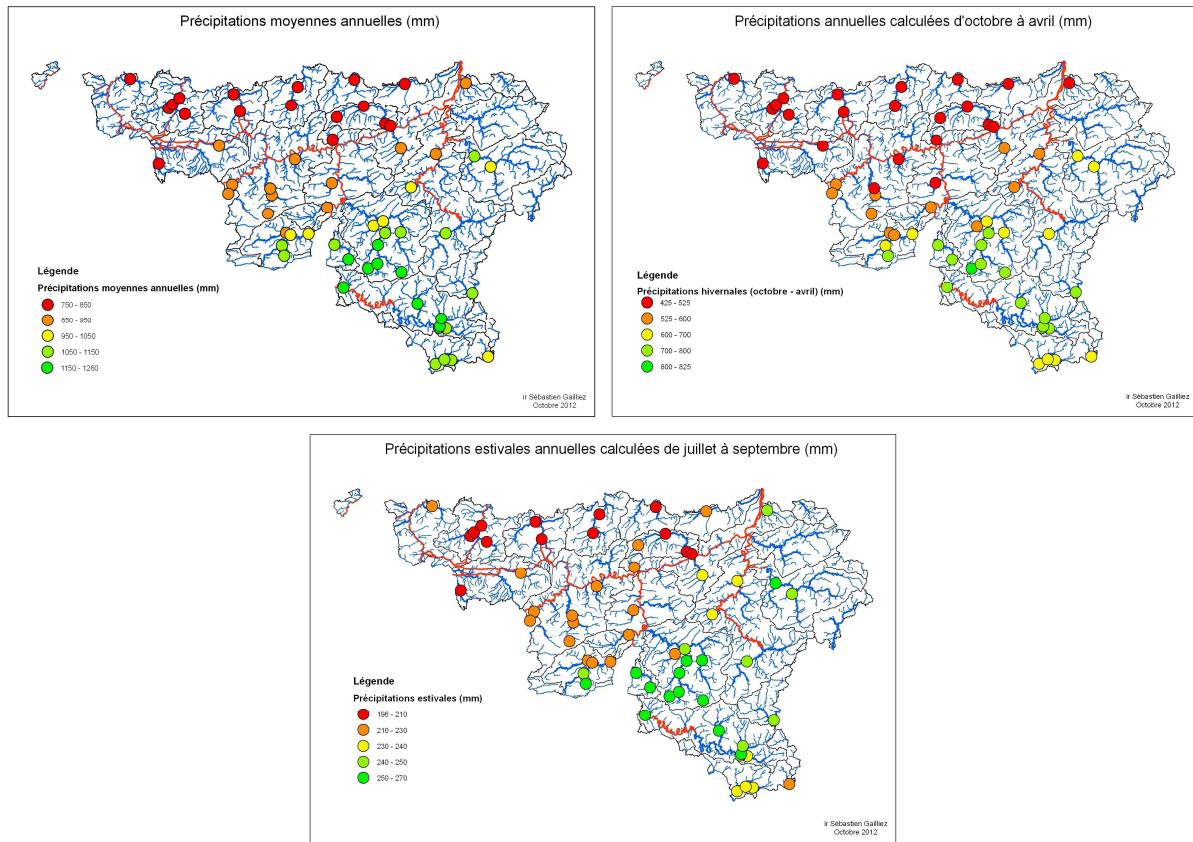


Figure 51 : Cartes des précipitations (moyennes annuelles, estivales et hivernales)

La Figure 5252 présente quant à elle, les températures moyennes calculées de juillet à septembre. On y observe une faible variation entre les bassins versants (environ entre 15 et 17 °C).

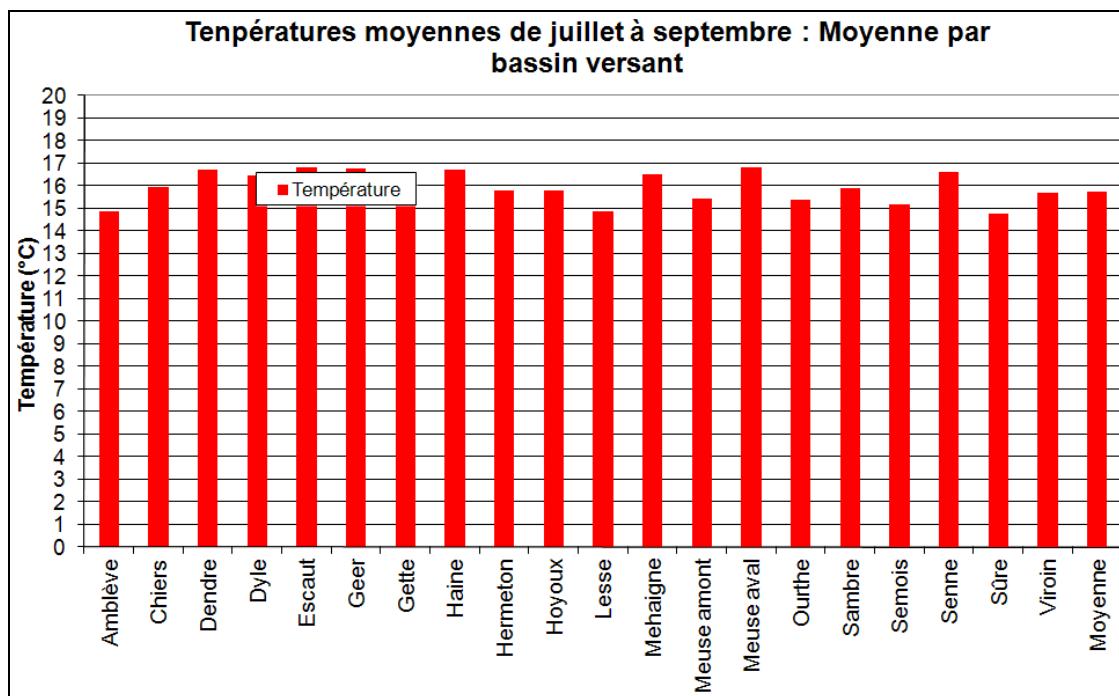


Figure 52 : Température : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005)

4.2.10 L'évapotranspiration

L'évaporation se produit lors de la transformation de l'eau en vapeur. L'évaporation se produit aussi bien au niveau des plans d'eau que du sol. Lorsque l'eau transite par les plantes, on parle alors de transpiration. Le terme évapotranspiration regroupe l'évaporation et la transpiration.

La quantification du phénomène d'évapotranspiration passe par l'estimation de la disponibilité en eau dans le sol et une demande évaporatoire de l'atmosphère. Le stade de développement de la végétation influence également l'évapotranspiration.

En effet, par rapport à un sol nu, la résistance aérodynamique du couvert végétal limite la demande évaporatoire de l'atmosphère.

L'évapotranspiration potentielle est l'évapotranspiration d'une végétation courte couvrant parfaitement le sol, d'extension infinie, en phase de croissance active, le sol étant bien alimenté en eau. Elle est fonction de la demande climatique évaporatoire et des caractéristiques de la surface évaporante (albédo, hauteur de rugosité). Cette évapotranspiration potentielle est donc comparée à une évapotranspiration de référence qui est généralement calculée pour le gazon court. Dans le cas de l'évaporation potentielle, la référence est un bac d'eau normalisé. (Sohier, 2011)

L'estimation de l'évapotranspiration potentielle est réalisée à l'aide du modèle hydrologique EPICgrid. La méthode retenue est basée sur le bilan énergétique, et plus particulièrement les formules de Penman.

Ces formules font intervenir des données climatiques comme par exemple la température, le rayonnement solaire journalier, la vitesse du vent moyenne journalière, l'humidité relative de l'air, ...

Afin de déterminer l'évapotranspiration d'un bassin versant ces données climatiques doivent être, au préalable, complétées et spatialisées, ce qui est réalisé dans le modèle EPIC à l'aide du module hydrologique et selon la méthode des polygones de Thiessen, (Hingray *et al.*, 2009) (Maidment, 1993)

L'Annexe 14 présente les résultats obtenus à partir des simulations réalisées à l'aide du modèle EPICgrid pour l'évapotranspiration potentielle calculée de juillet à septembre. Les moyennes et les écarts-type associés sont calculés de l'année 1967 à 2005.

La Figure 5353 présente les moyennes par bassin versant de l'évapotranspiration potentielle obtenues pour la période allant du mois de juillet au mois de septembre pour l'ensemble des stations de mesures retenues.

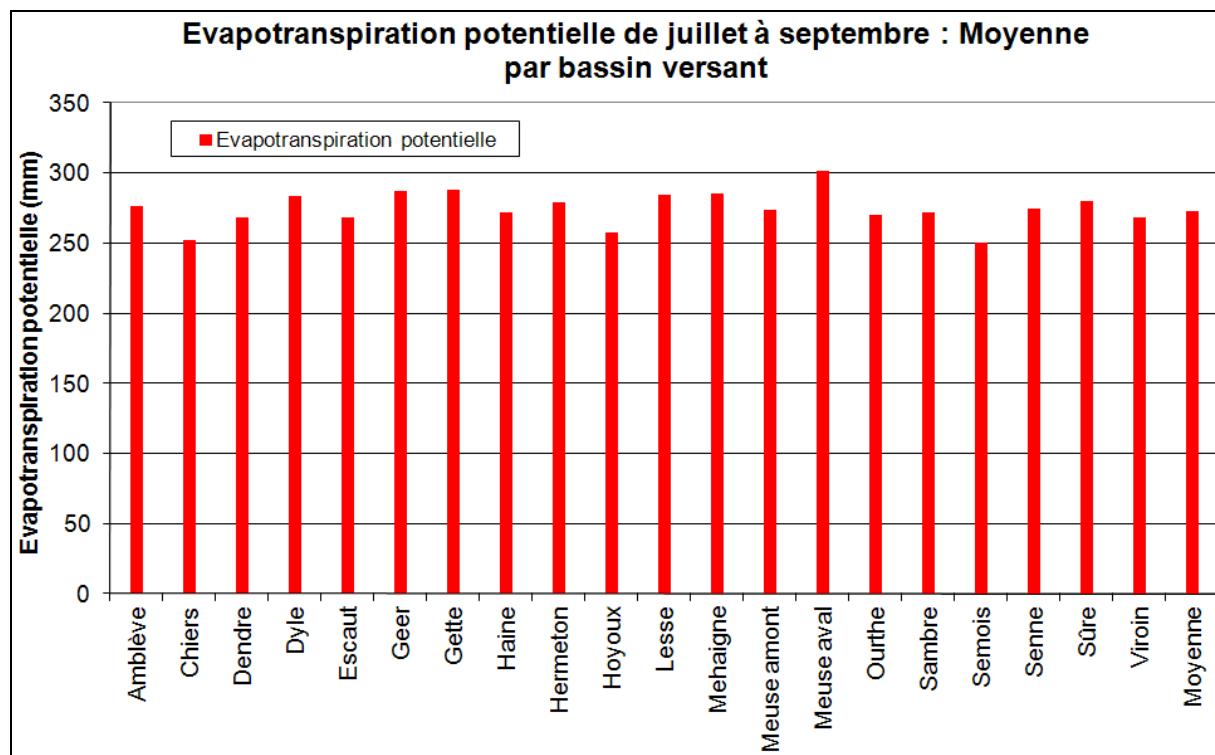


Figure 53 : Evapotranspiration potentielle : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005)

4.2.11 Recharge des nappes

La percolation est le phénomène par lequel l'eau qui s'infiltre à la surface du sol se déplace ensuite de couche en couche de sol jusqu'à arriver au niveau des nappes.

Les résultats sont obtenus à l'aide du module hydrologique du modèle EPICgrid et les simulations ont été réalisées pour la période allant de 1967 à 2005.

Ce paramètre permet d'estimer la recharge des nappes. Il s'agit d'un paramètre relativement important. En effet, durant la période estivale, le débit d'un cours d'eau est généralement équivalent au débit de base qui peut être défini comme étant le débit restitué par l'eau souterraine. (Hingray *et al.*, 2009) (Maidment, 1993) (Sohier, 2011)

« La composante de percolation du modèle EPIC utilise une technique de 'routage' où chaque couche de sol est considérée comme un réservoir. La percolation apparaît à chaque fois que la capacité au champ est dépassée pour une couche donnée. L'eau est

donc drainée hors de cette couche jusqu'à ce l'on atteigne de nouveau la capacité au champ. » (Sohier, 2011)

La détermination de la percolation fait appel à différents paramètres comme par exemple la teneur en eau à la capacité au champ de la couche considérée, la porosité de la couche, la conductivité hydraulique à saturation, pourcentage en argile, ...

La moyenne inter-annuelle de la percolation et l'écart-type associé exprimé en mm pour le bassin versant de chacune des stations de mesures sélectionnées sont présentés en Annexe 15 .

La Figure 5454 présente les résultats par bassin versant. La moyenne a été réalisée entre les stations de mesures retenues d'un même bassin versant pour la moyenne inter-annuelle de la percolation.

Une grande disparité peut être observée entre les bassins versants. En effet, des valeurs faibles en recharges (inférieures à 100 mm) sont obtenues pour les bassins de la Dendre, de l'Amblève, de l'Escaut, de la Sambre, du Viroin et de l'Hermeton. A contrario, des valeurs élevées (supérieures à 180 mm) sont calculées pour les bassins de la Chiers, de la Dyle, du Geer, de la Gette, de la Haine et de la Meuse aval.

La variation des valeurs obtenues pour la percolation entre les bassins versants s'explique d'une part par la nature différente des formations géologiques qui caractérisent le sous-sol et d'autre part, par la variabilité des précipitations au sein de la Wallonie. (Sohier, 2011) A titre d'exemple, nous pouvons observer que la recharge des nappes est plus faible dans les grés et schistes du bassin du massif ardennais (Amblève) alors qu'elle est plus importante pour les sables du bassin de la Dyle.

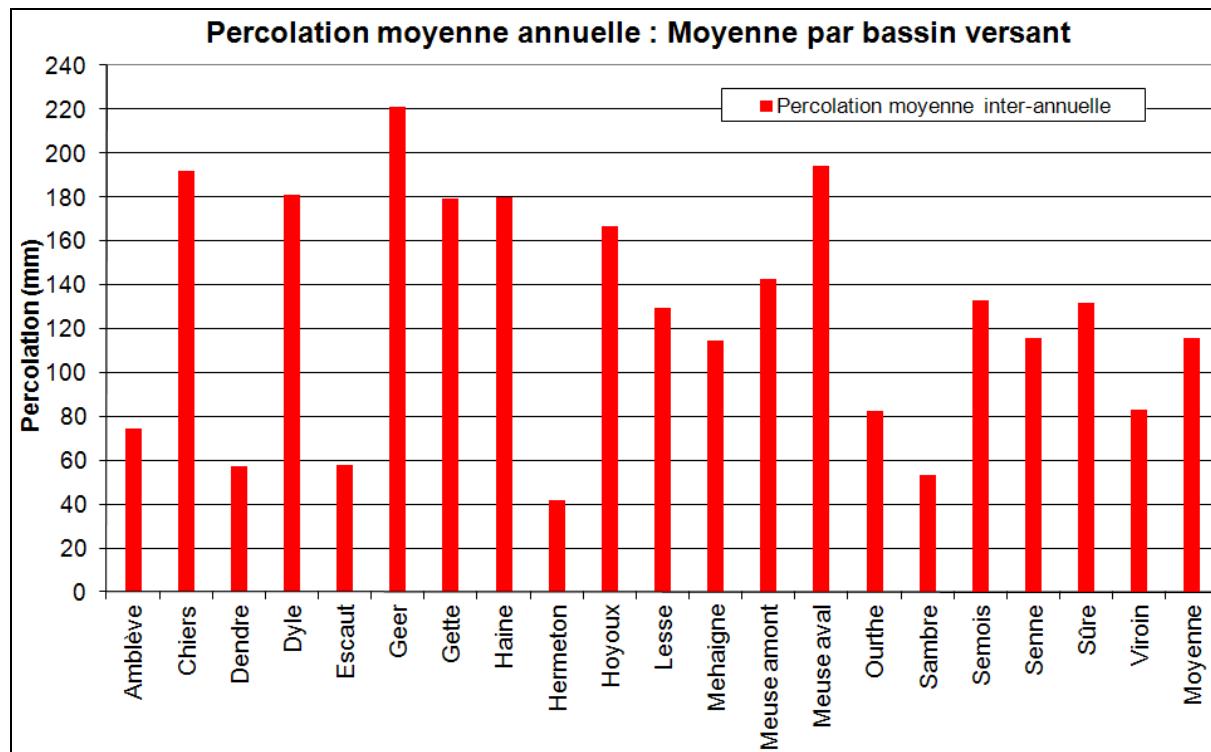


Figure 54 : Percolation moyenne annuelle : Moyenne par bassin versant (1971 – 2005)

4.2.12 Hydrogéologie

A. Introduction

Dans l'étude de Kroll (Kroll *et al.*, 2004) réalisée pour les Etats-Unis, l'hydrogéologie est représentée par le 'Base Flow Index' et par une constante de récession du débit de base. La géologie est quant à elle représentée par la perméabilité, la proportion de matière organique, la quantité d'eau disponible et l'épaisseur totale du sol. L'ensemble de ces données sont disponibles sous forme cartographique.

En Autriche, la géologie est présentée sous forme de pourcentage de différentes couches (Quaternaire, Tertiaire, Calcaire, ...). (Laaha et Blöschl, 2006)

Par contre dans l'étude de régionalisation réalisée dans le nord-ouest de l'Italie par Vezza (Vezza *et al.*, 2010), aucune caractéristique géologique n'a été retenue.

Par définition, le tarissement représente la phase d'écoulement d'un cours d'eau ou d'une source correspondant à la décroissance régulière du débit en l'absence de tout apport météorique et d'intervention humaine. (Dacharry, 1997)

Les données géologiques utilisées dans un contexte de régionalisation des débits d'étiage dans le sud-ouest de l'Allemagne proviennent d'une base de données disponible auprès de la Commission européenne. Il s'agit des proportions de formations géologiques (Jurassique noir, Jurassique brun, Tertiaire, Mésozoïque alpin, ...) et de la capacité en eaux souterraines (abondant à faible) également exprimée en pourcentage de territoire. (Schreiber et Demuth, 1997)

Afin de caractériser l'apport d'eau provenant des nappes en période estivale, le coefficient de tarissement est déterminé à partir du rythme de décroissance du débit du cours d'eau observé au niveau des stations de mesures sélectionnées.

L'expression analytique de base pour étudier le phénomène de récession est la fonction d'écoulement :

$$Q = Q(t)$$

dans laquelle, Q est une proportion de débit et t , le temps. (Tallaksen, 1995)

Il existe différentes techniques en fonction des auteurs pour déterminer cette relation soit théorique, soit empirique.

Selon Boussinesq (1877), l'équation de récession peut s'exprimer comme étant :

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\frac{t}{C}}$$

dans laquelle, Q_t est le débit au temps t , Q_0 est le débit au début du tarissement et t , le temps écoulé depuis l'origine du tarissement. C est une constante obtenue à partir de l'équation et de $t_{0,5}$ qui est le temps nécessaire pour diminuer de moitié le débit (Tallaksen, 1995) (Martin, 1973) (Boussinesq, 1877) :

$$C = -\frac{t_{0,5}}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}.$$

Horton propose la relation suivante, dans laquelle a_2 et m sont des constantes (Tallaksen, 1995) :

$$Q_t = Q_0 e^{-a_2 t^m}.$$

Une des formules les plus couramment utilisées est celle qui admet la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps. La formule utilisée dans le cadre de ce travail est celle de MAILLET :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

dans laquelle, Q_t est le débit au temps t , Q_0 est le débit au début du tarissement et t , le temps écoulé depuis l'origine du tarissement. Le paramètre α représente le coefficient de tarissement (ou de récession). (Lang et Gille, 2006)

Au final, l'ensemble des formules permettent de calculer le débit Q_t à l'instant t en fonction du débit Q_0 au début du tarissement.

L'extraction des épisodes de tarissement consiste à sélectionner les périodes de décroissance de débit en l'absence de l'influence des précipitations.

Plusieurs auteurs proposent des solutions globales, c'est-à-dire qui déterminent une relation pour la fonction de récession sur l'ensemble des données de débit d'un cours d'eau d'une année considérée. Elle consiste à relier les faibles débits d'un hydrogramme s'alignant sur une droite en échelle semi-logarithmique. Cette méthode a comme inconvénient d'intégrer des périodes de remontée du débit liée à des événements pluvieux (faibles ou importants).

Or, dans nos régions, les périodes de récession sont régulièrement interrompues par des épisodes pluvieux.

C'est pourquoi plusieurs méthodes proposent de calculer une courbe de récession par événement de récession. L'objectif est d'établir une courbe de récession moyenne.

Plusieurs méthodes de construction de ces courbes moyennes ont été proposées par différents auteurs : la méthode des tabulations, la méthode des corrélations et la méthode 'matching strip'. (Tallaksen, 1995) (Lang et Gille, 2006)

La méthode des tabulations, rarement utilisée à l'heure actuelle, consiste à tabuler/lister et à déplacer les périodes de récession jusqu'à ce que les débits correspondent approximativement, et les débits moyens sont calculés pour chaque pas de temps de la période de récession. (Tallaksen, 1995)

Dans la méthode 'matching strip', les périodes de récession sont mises en graphique et ajustées horizontalement jusqu'à leur recouvrement dans leur partie principale. (Tallaksen, 1995)

En ce qui concerne la méthode des corrélations, elle consiste à corrélérer des valeurs de débit à pas de temps différents entre eux. Cette méthode est appliquée soit pour déterminer une pente moyenne d'un épisode de tarissement, soit pour calculer le rapport $a_t = Q_t/Q_0$ en corrélant les débits Q_0 et Q à t jours (Q_t), à partir des phases de récession observées. (Lang et Gille, 2006)

B. Extraction des périodes de tarissement

B.1. Introduction

La détermination du coefficient de tarissement est basée sur une méthode mise au point en France par le Centre d'Etudes géographiques de l'Université de Metz dans le cadre d'un financement par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse. La zone d'étude étant proche de la Wallonie, le climat est comparable et les bassins versants ont des caractéristiques similaires. (Lang et Gille, 2006)

Cependant, différentes valeurs seuils ont dû être adaptées à la situation des bassins versants situés en Région wallonne.

B.2. Extraction des séquences de récession

La première étape de la méthodologie permet d'extraire les séquences de récession, qui correspondent, pour rappel, à des périodes durant lesquelles les débits sont décroissants et ne sont pas influencés par les précipitations.

Comme le mentionne Tallaksen (1995), les données de débits et de précipitation sont donc utilisées dans un premier temps pour définir les périodes de tarissement.

La méthode consiste à définir un débit seuil au-dessus duquel, les débits ne sont pas pris en compte car ils ne sont pas représentatifs d'un tarissement. Selon la méthode, ce débit est fixé au module. Le module étant pour rappel la moyenne des débits moyens annuels. (Lang et Gille, 2006)

Après avoir testé cette valeur sur les données de débits journaliers de quelques stations de mesures retenues dans cette étude, il s'est avéré qu'en prenant le module comme seuil, des séquences de récession se situaient durant la période hivernale.

Etant donné l'objectif de ce travail qui est de caractériser l'étiage, la valeur seuil a été abaissée au percentile75 moyen interannuel (Q75) obtenu à partir de la courbe des débits classés pour la station de mesures considérée. Les années pour lesquelles les données de débit étaient incomplètes n'ont pas été prises en compte dans le calcul de cette valeur.

La Figure 5555 présente l'exemple de la station de Treignes sur le Viroin pour laquelle la sélection des séquences de récession a été réalisée avec le module et ensuite le percentile75 moyen interannuel comme seuil.

On peut observer que les séquences situées au mois de janvier, avril et juin 2006 ne sont plus retenues comme telle avec un seuil équivalent au percentile75 moyen.

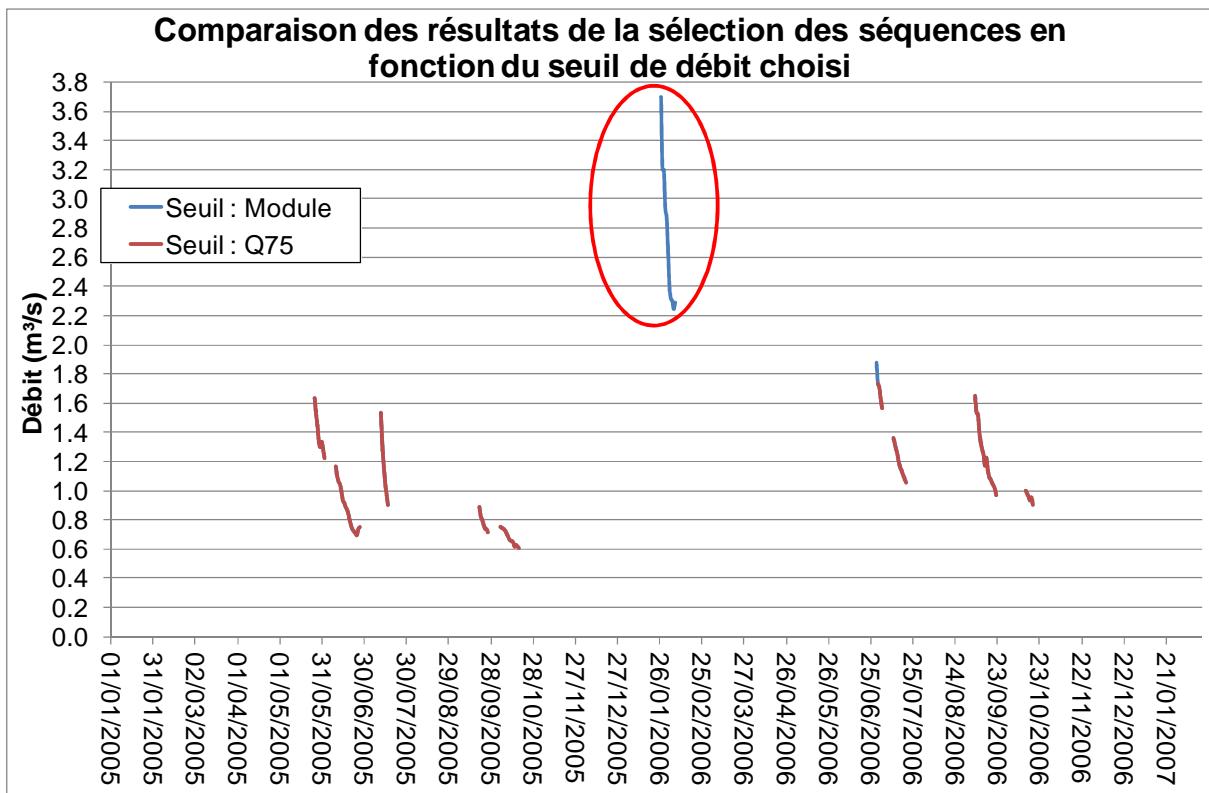


Figure 55 : Comparaison des résultats de la sélection des séquences en fonction du seuil de débit choisi

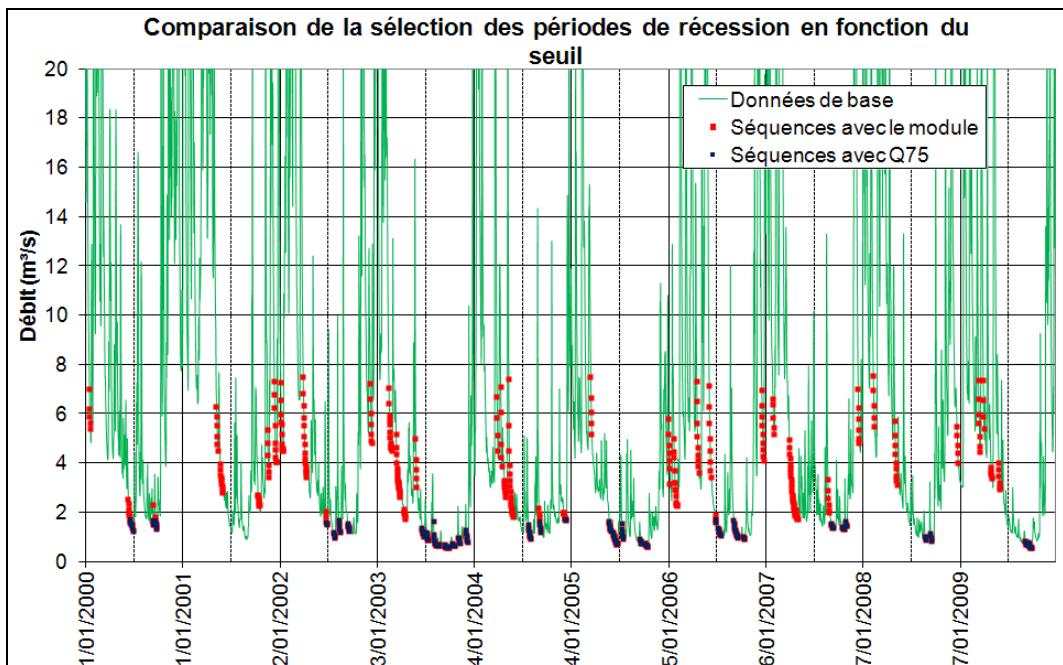


Figure 56 : Exemple de sélection des séquences de récession sur base du module et sur base du Q75 pour le Viroin à Treignes : période du 1/01/2000 au 31/12/2009

B.3. Définition du seuil des précipitations influençant le débit

Un seuil de précipitation, en-deçà duquel les précipitations n'influencent pas l'écoulement, est défini. Les débits inférieurs au Q75 mais pour lesquels les précipitations dépassent ce seuil sont donc supprimés des séquences. (Lang et Gille, 2006)

Les données de précipitations utilisées sont les données observées dans les stations pluviométriques de l'Institut Royal Météorologique et du Service d'études hydrologiques de la Région wallonne (SETHY), spatialisées au moyen de polygones de Thiessens. Il s'agit des données utilisées pour la détermination des paramètres climatiques dans le cadre de ce travail.

Deux seuils ont été testés, à savoir 1 et 2 mm/jour. La hausse du seuil des précipitations significatives permet d'allonger les séquences (augmentation du nombre de données journalières de débit par séquence) mais cette hausse induit fréquemment un accroissement des débits en fin de séquence, ce qui est contraire à la définition du tarissement.

De plus, l'utilisation d'un seuil de 2 mm/jour augmente le nombre de séquences hivernales.

Donc, afin d'éviter une augmentation du débit dans les séquences retenues et afin de ne pas retenir des périodes de tarissement durant la période hivernale, le seuil retenu est de 1 mm/jour.

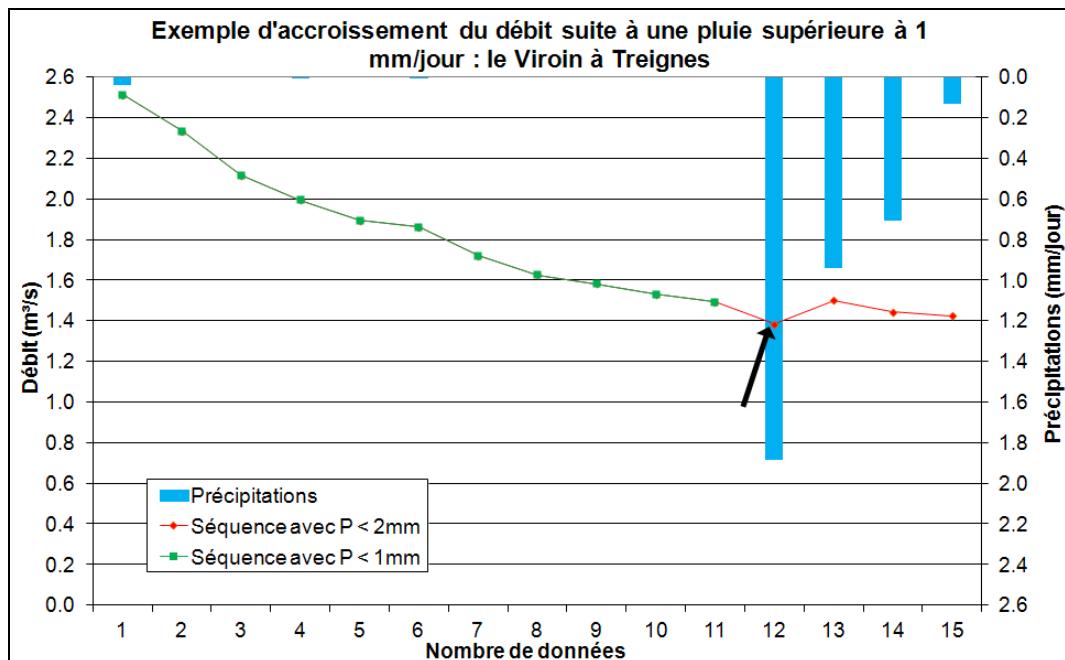


Figure 57 : Exemple d'accroissement des débits en fin de séquence pour le Viroin à Treignes au mois de juin 2000

B.4. Définition de la durée minimum d'une séquence de tarissement

De plus, afin de ne pas tenir compte des périodes de récession trop courtes, une durée minimum est fixée à 5 jours. Selon Tallaksen, la durée minimum choisie doit dépendre de la durée moyenne des sécheresses dans la région et varie le plus souvent entre 4 et 10 jours. (Lang et Gille, 2006) (Tallaksen, 1995)

B.5. Définition du début de la séquence de tarissement

Toujours selon Tallaksen, le début des séquences de tarissement est habituellement supprimé dans le but d'éviter l'influence des flux de surface après précipitation. Le nombre de valeurs de débit à supprimer dépend du temps de réponse typique du bassin versant. (Tallaksen, 1995)

Deux procédures sont utilisées pour définir ce début de séquence.

Dans un premier temps, afin que les débits sélectionnés ne soient plus influencés par les précipitations, un temps de ressuyage minimum est déterminé pour chaque station de mesures entre la fin de l'épisode pluvieux et le début de la séquence. Le temps de ressuyage est déterminé à partir de la superficie du bassin versant à l'aide de la formule communément utilisée (Rutledge, 1998) (Sloto et Crouse, 1996) :

$$TR = A^{0,2}$$

dans laquelle TR est le temps de ressuyage exprimé en jours et A la superficie du bassin versant exprimée en km^2 . Le temps de ressuyage obtenu est arrondi à la valeur entière supérieure (pas de temps journalier).

La Figure 58 présente les temps de ressuyage obtenus pour chaque station de mesures sélectionnée.

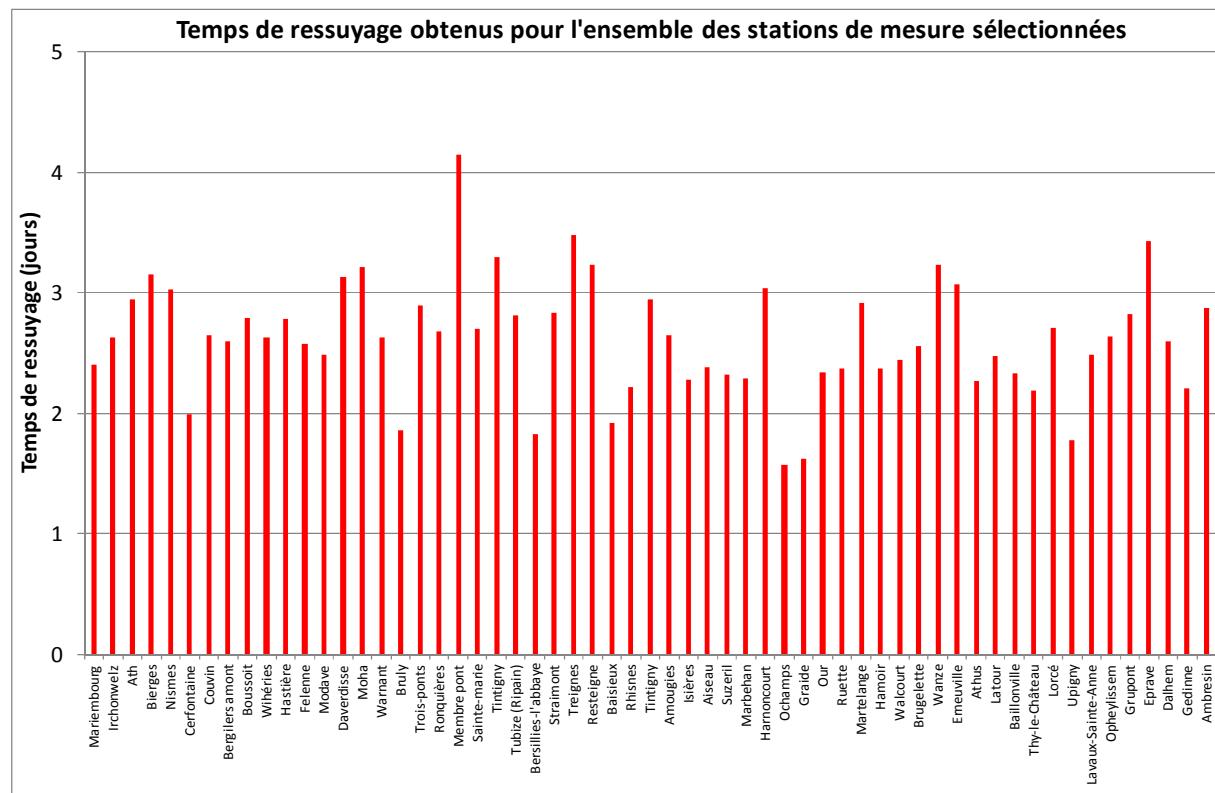


Figure 58 : Temps de ressuyage obtenu pour l'ensemble des stations de mesures

On peut observer que le temps de ressuyage est compris entre 1 jour et 3,5 jours sauf pour la station de Membre sur la Semois (4,15 jours pour une superficie de bassin versant d'environ 1220 km^2). (Lang et Gille, 2006)

Il est à remarquer que seules les séquences qui contenaient au minimum quatre données ont été retenues car cela permettait ainsi le calcul de la pente à partir des trois dernières données.

Dans un second temps, la méthode qui permet de déterminer le débit de départ Q_0 de la période de récession repose sur les derniers débits de l'épisode. La pente de la séquence est calculée sur les trois dernières valeurs de débit de celle-ci, et ensuite extrapolée vers les jours antérieurs (Figure 5959). Lorsque l'écart entre les débits extrapolés et les débits observés est supérieur à 1,5 pourcent, ils sont supprimés de la séquence de tarissement. (Lang et Gille, 2006)

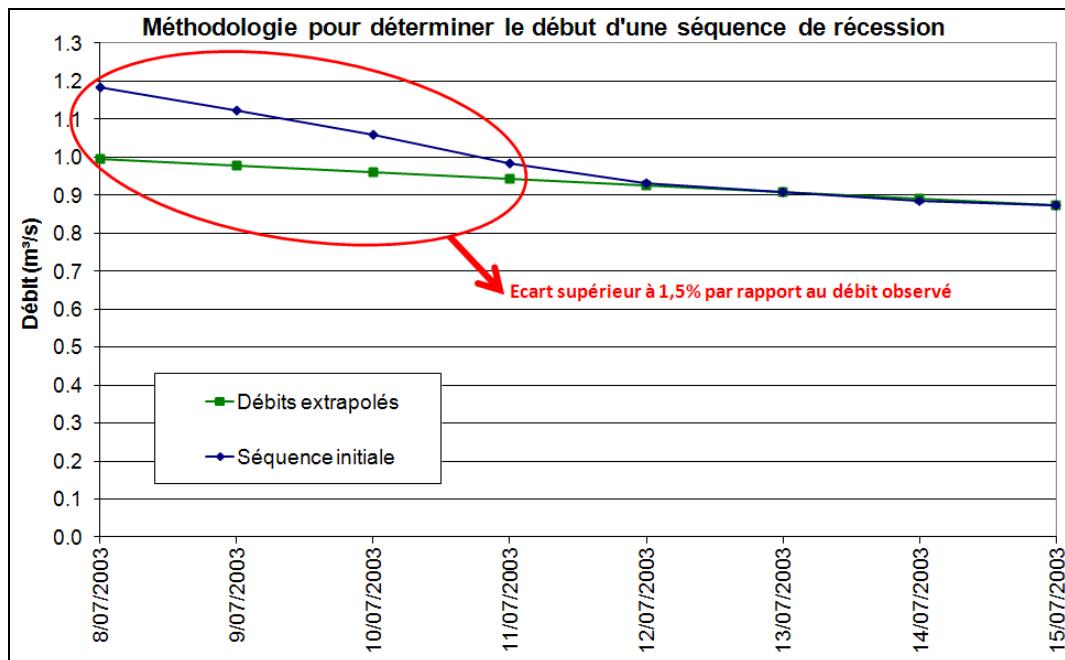


Figure 59 : Méthodologie de détermination du début des séquences de tarissement

Afin de vérifier si les séquences retenues sont plus longues avec une modification du seuil, une variation du seuil de (1, 2 et 3%) est réalisée pour quelques stations de mesures retenues dans cette étude. Les différences au niveau du débit de départ étaient minimes. La valeur de 1,5% recommandée par Lang et Gille (Lang et Gille, 2006) a donc été appliquée.

Malgré les différents tris opérés, des séquences comprenant des valeurs successives croissantes peuvent être observées. Lorsque celles-ci apparaissent en fin de séquence, la pente calculée est négative. Dès lors, les dernières valeurs de la séquence sont supprimées, jusqu'à ce que la pente recalculée soit positive.

Enfin, parmi ces séquences, seules celles comportant au minimum 3 valeurs de débit ont été prises en considération.

L'ensemble de la procédure de détermination des périodes de récession a été automatisée à l'aide d'un algorithme écrit au moyen d'une macro en langage VBA (Visual Basic for Applications) dans Excel.

C. Construction de la courbe maîtresse de tarissement

Pour rappel, trois méthodes existent pour construire la courbe maîtresse, à savoir la méthode des tabulations, la méthode 'matching strip' et la méthode des corrélations.

C'est sur base de cette dernière qu'est basée la méthodologie mise en place au sein de l'Université de Metz (Lang et Gille, 2006). De plus, c'est souvent cette méthode des corrélations qui est préférée car elle élimine la variable de temps t de l'analyse. (Tallaksen, 1995)

La méthode des corrélations consiste à corréler des valeurs de débits à pas de temps différents entre eux. Elle permet de calculer la pente moyenne de la période de tarissement.

L'application de cette méthode par Lang C. (Lang et Gille, 2006) a conduit à proposer les démarches suivantes pour la construction de la courbe maîtresse. Elle consiste à corréler, pour l'ensemble des séquences de chaque station, tous les débits Q_0 avec les débits Q_t pour chaque valeur de t allant de 1 à t_{max} (durée maximum des séquences).

Après avoir extrait les N séquences de tarissement pour la Salm à Trois-Ponts, le Tableau 17 montre l'évolution du débit en fonction de la durée pour chaque séquence.

Tableau 17 : Séquences de tarissement obtenues pour la station de Trois-Ponts sur la Salm

Jour	Séquences												
	1	2	3	4	5	6	7	...	N - 4	N - 3	N - 2	N - 1	N
0	1.193	1.169	1.081	0.95	0.582	0.735	1.172		1.002	0.717	0.616	0.871	1.192
1	1.184	1.137	1.038	0.88	0.572	0.719	1.15		0.964	0.690	0.584	0.855	1.130
2	1.200	1.109	1.014	0.835	0.564	0.700	1.119		0.927	0.681	0.579	0.840	1.082
3	1.179	1.11	0.975	0.814	0.558	0.690	1.065		0.879	0.664	0.579	0.826	1.037
4	1.139	1.099	0.954	0.783			1.031		0.858	0.667	0.569		1.007
5		1.074		0.778			1.026				0.552		1.000
6		1.066		0.785			1.009						0.976
7				0.768			1.001						0.975
8				0.734			0.994						0.944
9				0.719			0.967						0.926
10							0.963						0.886
11							0.952						0.870
12							0.892						0.830
13							0.909						0.808
14							0.912						

Pour chaque graphique de corrélation $Q_t - Q_0$, une droite de régression est ajustée au nuage de points. La Figure 6060 présente le calcul pour un débit à un jour. Le débit au temps t_0 correspond à la première ligne du Tableau 17 et le débit à un jour (Q_1) à la deuxième ligne.

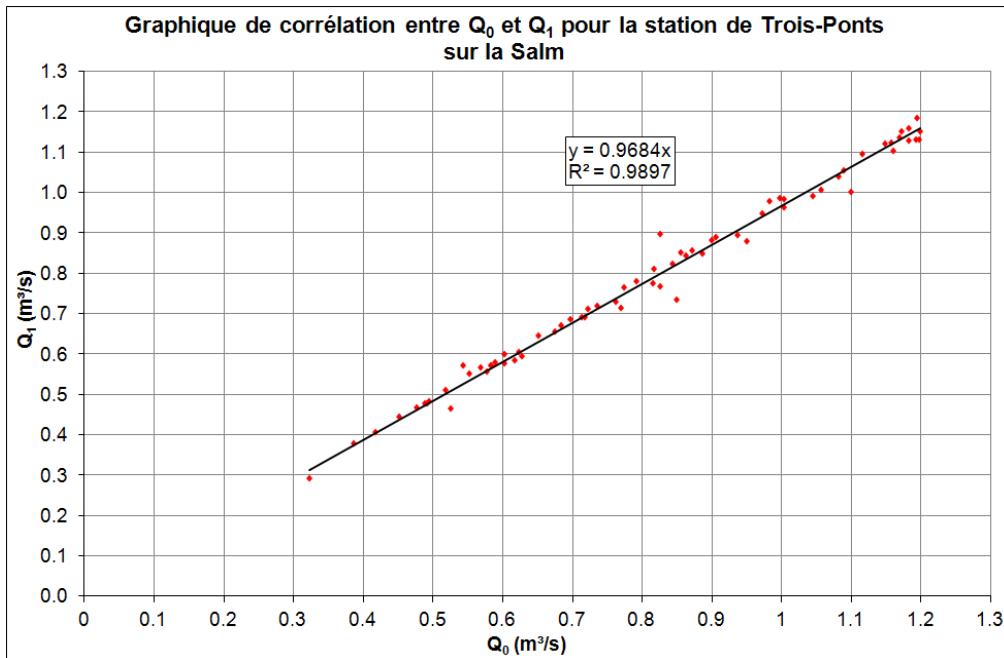


Figure 60 : Graphique de corrélation entre Q_0 et Q_1 pour la station de Trois-Ponts sur la Salm

Le rapport $a_t = Q_t/Q_0$ correspondant à la pente de la droite de régression peut donc être calculé pour les durées allant de 1 jour à t_{max} .

Le Tableau 18 présente les rapports a_t pour la station de Trois-Ponts sur la Salm ainsi que les coefficients de détermination R^2 correspondants.

Le coefficient de détermination R^2 permet d'apprécier la qualité d'un modèle de régression. Il est calculé à partir de la formule suivante :

$$R^2 = \frac{SCE_{Modèle}}{SCE_{Totale}}.$$

Le coefficient de détermination R^2 est toujours compris entre 0 et 1 étant donné que la somme des carrés des écarts du modèle $SCE_{Modèle}$ est toujours inférieure à la somme des carrés des écarts totale SCE_{Totale} .

Sur le graphique des valeurs prédictives en fonction des valeurs observées, si l'ensemble des points sont alignés sur la droite $x=y$, nous obtenons une SCE_{Erreur} égale à 0. Dans ce cas, le coefficient de détermination R^2 vaut 1 ($SCE_{Totale} = SCE_{Modèle}$).

Une valeur de R^2 faible signifie que le modèle de régression obtenu a un faible pouvoir prédictif.

Tableau 18 : Calcul du rapport a_t pour chaque durée t

T (jour)	a_t	R^2
0	1	
1	0.968	0.990
2	0.951	0.990
3	0.926	0.979
4	0.903	0.971
5	0.890	0.973
6	0.876	0.937
7	0.858	0.897
8	0.846	0.875

A titre d'exemples, le rapport a_t correspondant à une durée de 1 jour signifie que l'on a une diminution d'environ 3 % du débit après le premier jour, le débit à 1 jour ne valant plus que 97% du débit de départ. De la même manière, au bout de 8 jours, on observera une diminution d'environ 15 % du débit.

La décroissance de ces rapports lorsque le nombre de jours augmente, peut être considérée comme représentant le tarissement.

Les rapports a_t sont calculés pour la durée du tarissement maximum observée pour la station de mesures considérée sachant qu'au-delà d'un certain nombre de jours, l'échantillon ne permet plus de calculer une valeur de a_t représentative.

La Figure 61.1 présente les durées minimum, maximum, médiane ainsi que le percentile90 de l'ensemble des séquences de tarissement sélectionnées pour l'ensemble des stations de mesures. Il est à remarquer que le percentile90 se situe aux alentours de 10 jours en moyenne pour l'ensemble des stations de mesures.

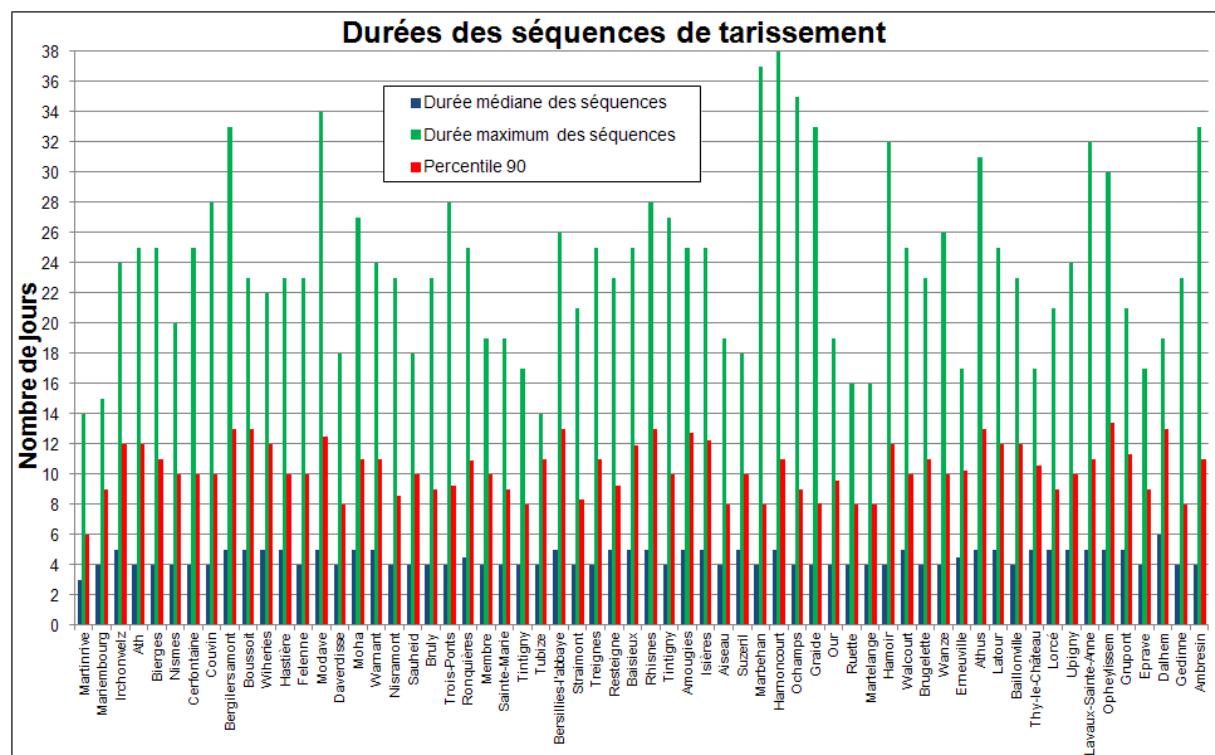


Figure 61 : Durées minimum, maximum, médiane et percentile90 des séquences tarissement

Pour la construction de la courbe maîtresse, c'est-à-dire d'une courbe moyenne de tarissement, les valeurs de a_t retenues sont toutes les valeurs décroissantes pour autant que le R^2 correspondant reste aux alentours d'une valeur acceptable. De plus, l'ajustement de l'exponentielle réalisé ultérieurement devra être correct, c'est-à-dire avec un coefficient de détermination supérieur à 0,8. (Lang et Gille, 2006)

Les valeurs de a_t retenues sont mises en relation avec la durée t et la courbe maîtresse est obtenue en ajustant une courbe de type exponentielle, qui correspond à la loi de Maillet dans laquelle α est le coefficient de tarissement et t la durée de celui-ci :

$$a_t = e^{-\alpha t}.$$

La Figure 6262 présente les résultats de l'ajustement d'une courbe exponentielle sur les rapports a_t en fonction de la durée de l'évènement de récession pour la station de Trois-Ponts sur la Salm.

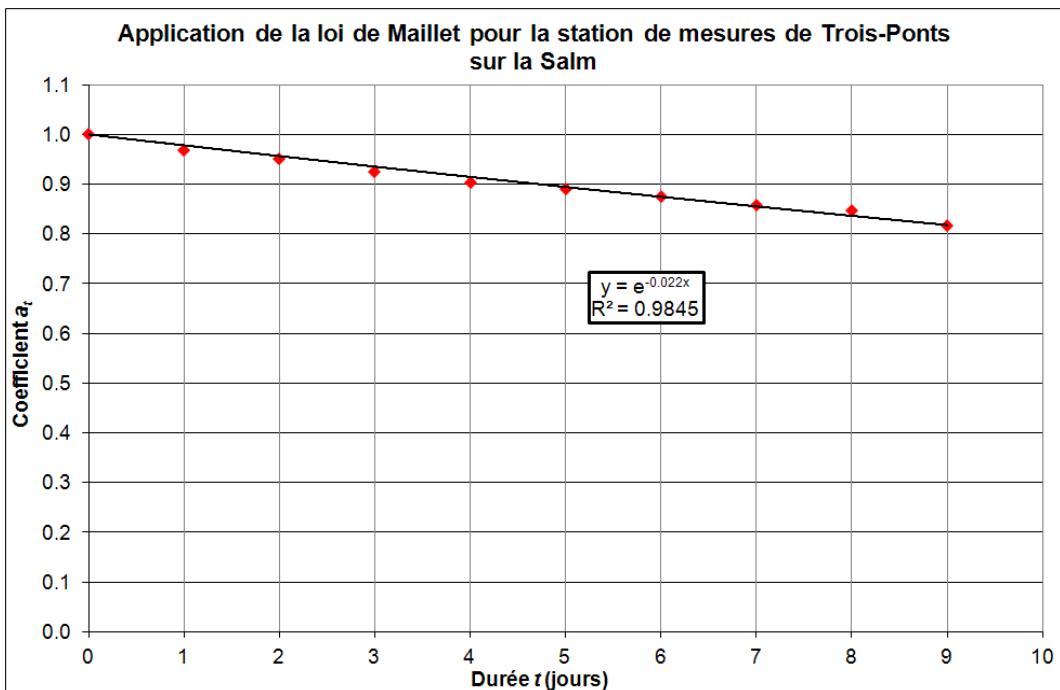


Figure 62 : Application de la loi de Maillet pour la station de mesures de Trois-Ponts sur la Salm

Le coefficient de tarissement obtenu pour cet exemple vaut 0,022.

D. Résultats

Les coefficients de tarissement obtenus pour chaque station de mesures sélectionnée sont présentés en Annexe 16. Les valeurs les plus faibles obtenues pour le coefficient de tarissement signifient que l'on a un soutien à l'étiage par les nappes plus important que pour les stations de mesures dont le coefficient de tarissement est élevé.

Le coefficient de détermination R^2 obtenu lors de l'application de la loi de Maillet est également présenté pour chaque station de mesures.

E. Interprétation des résultats

La Figure 6363 présente les résultats obtenus pour le coefficient de tarissement avec les sept formations aquifères principales en Région wallonne.

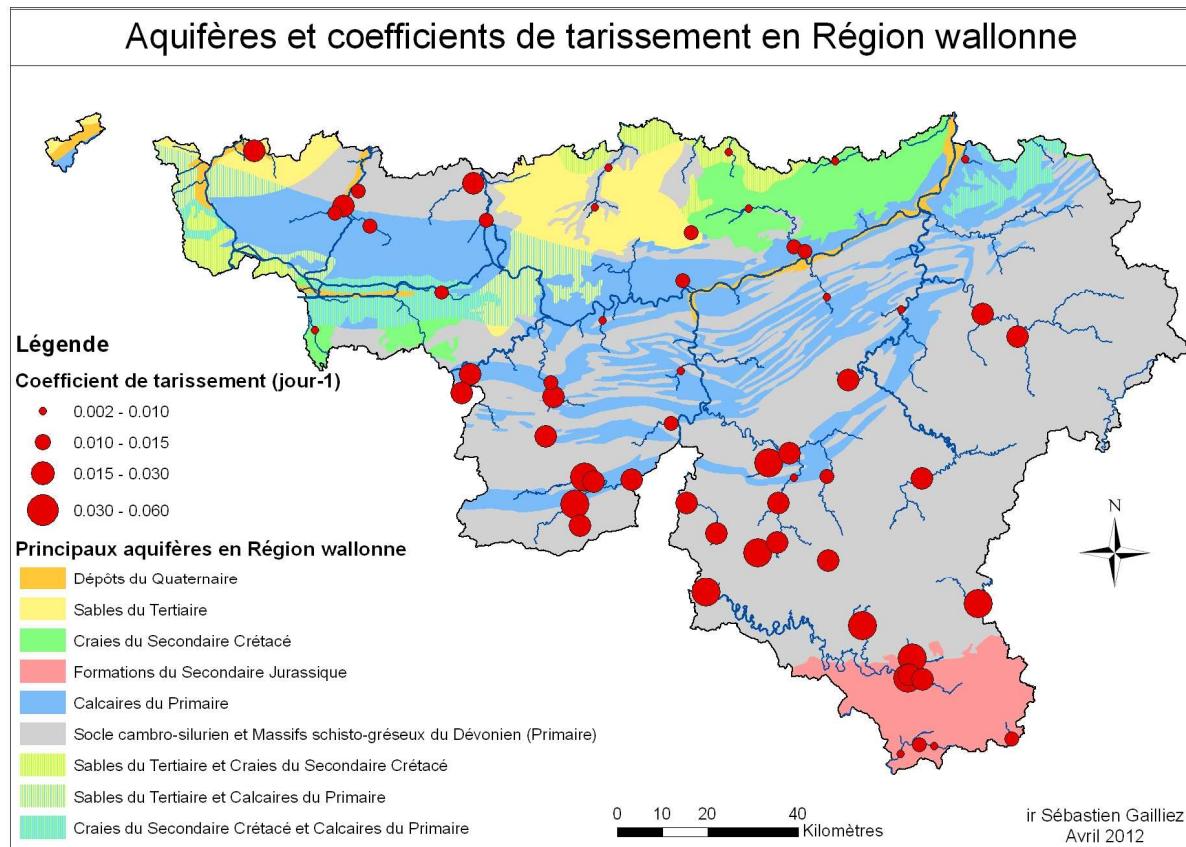


Figure 63 : Aquifères et coefficients de tarissement en Région wallonne

Les bassins versants pour lesquels les valeurs les plus élevées sont obtenues pour le coefficient de tarissement, se situent au niveau du socle Cambro-Silurien. Ce dernier affleure en deux régions de l'Ardenne ainsi qu'au nord dans le Massif du Brabant. Les formations sont principalement constituées de schistes, phyllades, quartzophyllades et quartzites fissurés. Une des caractéristiques de cette formation aquifère qui couvre une grande partie de la carte de la Wallonie, est qu'il possède une faible capacité de rétention et peut même s'assécher par endroit en été.

C'est le cas de bassins versants du Viroin, de la Houille, de la Rulles et de la Semois à partir de la confluence de cette dernière, de l'Amblève, de l'Ourthe et de la Sambre. Dans le Hainaut, les bassins de la Senne et de la Dendre ont également des valeurs élevées du coefficient de tarissement.

Les calcaires du Primaire regroupent les Calcaires carbonifères et dévonien du Bord Nord et Sud du Synclinorium de Namur, du Synclinorium de Dinant et du bassin de la Vesdre. Il s'agit de l'aquifère le plus important en Wallonie, il se prolonge au-delà de la frontière vers la France et la Flandre.

On peut observer un coefficient de tarissement faible pour les stations de mesures dont le bassin versant est situé sur ce socle comme par exemple la Molignée, le Hoyoux, le Néblon, la station de Resteigne sur la Lesse ou encore pour la Dendre orientale.

En Wallonie, on retrouve les formations du Secondaire Jurassique au niveau de la Gaume (sud de la Province de Luxembourg). Ce socle regroupe un ensemble de roches de différents types : calcaire, sable ou grès. Cette formation aquifère consiste en une alternance de couches perméables (calcaires et sables gréseux) et imperméables (marnes ou sables schisteux). Les valeurs observées du coefficient de tarissement sont classées de faibles à moyennes.

Les craies du Secondaire Crétacé renferment différentes nappes comme par exemple : Craies de Hesbaye, Craies captives du Brabant, Craies du pays de Herve, Craies du Bassin de Mons.

Les valeurs du coefficient de tarissement observées pour les bassins versants dont le socle est de la craie du Secondaire Crétacé sont faibles (Baisieux, Bergilers, Ambresin et Boussoit).

Les sables du Tertiaire comprennent les Sables bruxelliens et les Sables du Landénien et de l'Yprésien. En ce qui concerne la formation des Sables bruxelliens, elle est constituée de roches meubles (sables quartzeux, concrétions gréseuses et sables et grès calcarifères) et se situe essentiellement dans le Brabant wallon où le réseau hydrographique joue le rôle d'axes de drainage (Dyle, Gette et Senne).

Sur base des valeurs obtenues pour le coefficient de tarissement calculé pour les différents bassins versants des stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude, on peut établir un classement en fonction de la composition du sous-sol.

Pour chaque station bassin versant des stations de mesures, une formation aquifère a été attribuée en fonction de la plus grande superficie de recouvrement du bassin versant de surface ou en fonction d'une particularité hydrogéologique. Il est à remarquer qu'il faut être prudent étant donné que le bassin versant d'une station de mesures peut être différent de son bassin hydrogéologique.

Les aquifères de compositions semblables ont été regroupées comme par exemple les calcaires du primaire et les craies du Secondaire Crétacé.

Les résultats sont présentés sous forme chiffrée dans le Tableau 19 et sous forme graphique à la Figure 6464. La longueur du rectangle est délimitée par les percentiles 25 et 75 des coefficients de tarissement du groupe considéré. Le trait horizontal au sein de la box présente la médiane tandis que les traits verticaux indiquent les valeurs minimum et maximum

Tableau 19 : Coefficients de tarissement obtenus par aquifère

Composition de l'aquifère	Coefficient de tarissement (jour ⁻¹)			
	Minimum	Moyen	Maximum	Ecart-type
Sables tertiaires	0.0040	0.0113	0.0250	0.0118
Calcaires primaires et craies du secondaire	0.0020	0.0111	0.0250	0.0047
Calcaires jurassiques	0.0080	0.0124	0.0200	0.0046
Schistes-grès du Dévonien et socle cambro-silurien	0.0150	0.0273	0.0540	0.0097

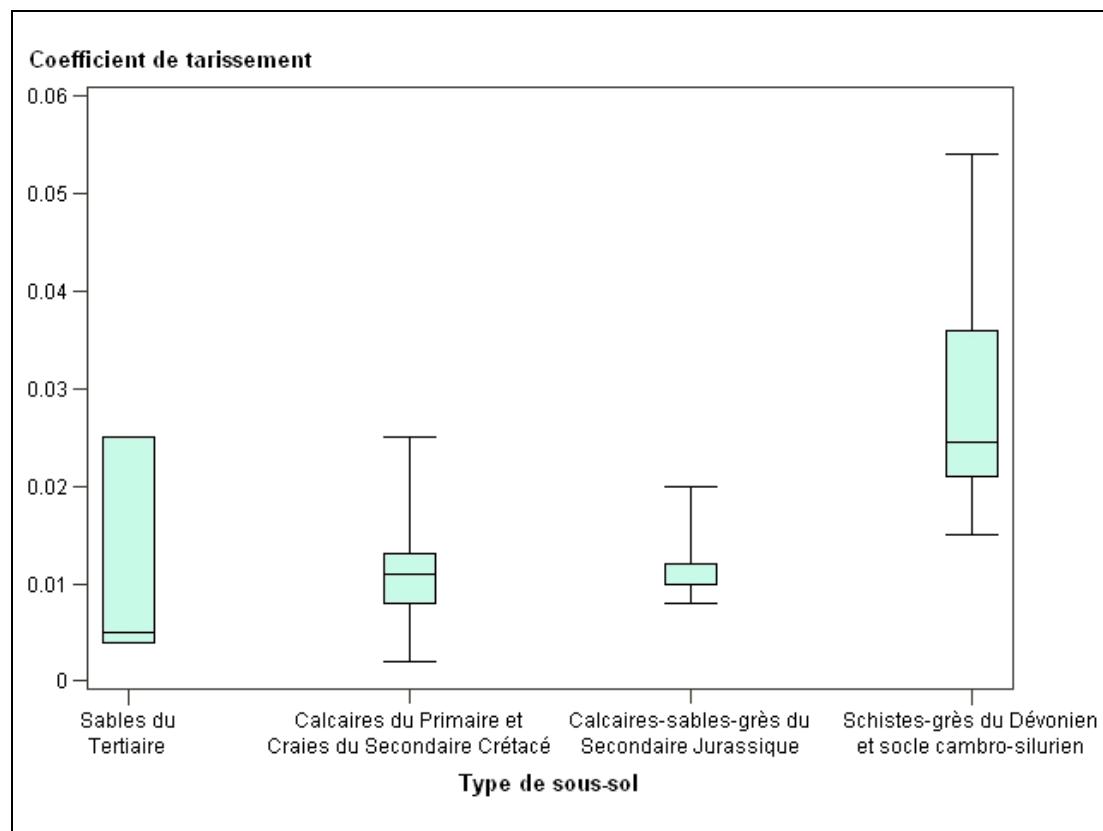


Figure 64 : Coefficients de tarissement minimum, moyen et maximum par type de composition d'aquifère

On peut observer que les sables du Tertiaire engendrent les valeurs moyennes les plus faibles pour le coefficient de tarissement ($0,008 \text{ jour}^{-1}$) tandis que le socle cambro-silurien et les massifs schisto-gréseux du Dévonien donnent des valeurs les plus élevées de ce même coefficient ($0,026 \text{ jour}^{-1}$). La valeur maximum est obtenue pour la station de mesures de Marbehan ($0,054 \text{ jour}^{-1}$).

Cela signifie que nous avons un soutien à l'étiage plus important par les formations aquifères des sables du Tertiaire, des calcaires du Primaire et des craies du Secondaire Crétacé. A l'opposé, on observe un tarissement rapide pour les bassins versants surplombant le socle cambro-silurien et les massifs schisto-gréseux du Dévonien.

Selon la méthode proposée en France par le Centre d'Etudes géographiques de l'Université de Metz dans le cadre d'un financement par l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse, les résultats montrent que les substrats gréseux engendrent une vidange plus lente des nappes à l'inverse des sous-sols composés de marne et d'argile. Le Tableau 20 présente la classification réalisée dans le cadre de cette étude.

Tableau 20 : Résultats issus de l'étude des coefficients de tarissement obtenus en France (Lang et Gille, 2006)

Substrat perméable		Substrat imperméable	
Grès	Calcaire	Granite	Marne et argile
α de 0.023 à 0.029	α de 0.031 à 0.040	α de 0.070 à 0.080	α de 0.080 à 0.098

La différence principale entre les résultats obtenus dans le cadre de l'étude ci-dessus et notre recherche se situe principalement autour du fait que les valeurs du coefficient de tarissement pour les régions dont le substrat est de type calcaire sont supérieures aux

valeurs obtenues pour les substrats de type gréseux. L'explication se trouve dans le type de sous-sol. En effet, en Wallonie, les régions calcaires constituent essentiellement des zones karstiques tandis qu'en France il s'agit de grands plateaux dont la perméabilité est moindre.

4.3 Définition des zones homogènes

4.3.1 Introduction

Dans le début de ce présent chapitre, l'ensemble des paramètres qui seront utilisés pour la définition des zones homogènes ont été déterminés.

Pour rappel, cette définition des zones homogènes est réalisée à l'aide de la classification numérique qui a pour objectif de subdiviser un ensemble de n individus en un nombre k de groupes. Cette subdivision est réalisée à partir des observations relatives à p variables. (Hingray *et al.*, 2009)

Pour rappel, les variables utilisées pour cette analyse sont :

- altitude (m) : Alt,
- coordonnées Lambert (m) : X et Y,
- superficie (km²) : Sup,
- densité de drainage (km/km²) : DD,
- percentile 10 des pentes (%) : Pente10,
- médiane des pentes (%) : Pente50,
- percentile 90 des pentes (%) : Pente90,
- proportion des territoires artificialisés (%) : Terr_Artif,
- proportion des forêts (%) : Forets,
- proportion des terres arables (%) : Terres_arables,
- proportion des cultures permanentes (%) : Cult_perma,
- proportion des surfaces enherbées (%) : Surf_enherb,
- proportion de sol du groupe hydrologique A (%) : Sol A,
- proportion de sol du groupe hydrologique B (%) : Sol B,
- proportion de sol du groupe hydrologique C (%) : Sol C,
- proportion de sol du groupe hydrologique D (%) : Sol D,
- proportion de sol non classé dans un groupe hydrologique (%) : SolINC,
- précipitations moyennes inter-annuelles (mm) : P,
- précipitations moyennes hivernales (d'octobre à avril, mm) : PH,
- précipitations moyennes estivales (de juillet à septembre, mm) : PE,
- température moyenne estivale (°C) : TE,
- évapotranspiration potentielle (mm) : ETP,
- percolation moyenne inter-annuelle (mm) : Perco,
- coefficient de tarissement (jour⁻¹) : CT.

4.3.2 La classification numérique

A. Notion de distance

Afin de déterminer si des individus sont proches ou éloignés lors de la définition des zones homogènes à l'aide de la classification numérique, on étudie la ressemblance des individus. Cette dernière est quantifiée à l'aide de la notion de distance euclidienne d_{ii} qui est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$d_{ii'} = \sqrt{\sum_{j=1}^p (x_{ij} - x_{i'j})^2},$$

x_{ij} étant l'observation relative à la variable j sur l'objet i .

La distance entre deux groupes d'objets peut également être calculée. Cette distance peut être définie de différentes manières.

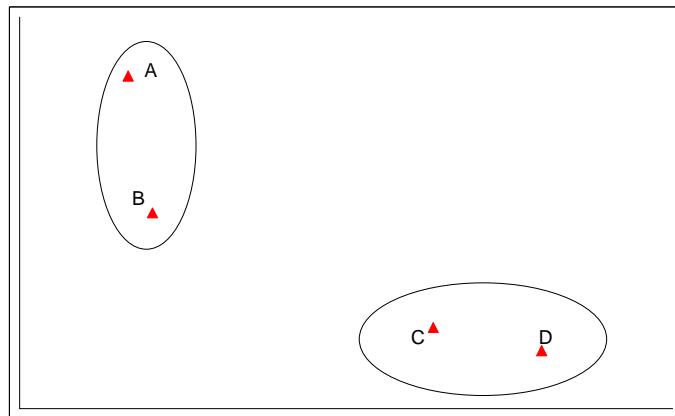


Figure 65 : Représentation schématique de deux groupes d'objets

La distance entre les deux groupes présentés à la Figure 6565 est :

- La distance minimum, qui est la distance entre les deux objets les plus proches, c'est-à-dire d_{BC} ;
- La distance maximum, qui est la distance entre les deux objets les plus éloignés, c'est-à-dire d_{AD} ;
- La distance moyenne, qui est la moyenne quadratique des distances entre toutes les paires :

$$d_{moy} = \sqrt{(d_{AC}^2 + d_{AD}^2 + d_{BC}^2 + d_{BD}^2)}.$$

B. Coefficient R²

La variabilité totale est le résultat de la somme de la variabilité entre les groupes et de la variabilité au sein des groupes.

La variabilité entre les groupes est obtenue en calculant la somme des carrés des écarts entre les moyennes des groupes et la moyenne générale :

$$SS_{BETWEEN} = \sum_{i=1}^y n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$$

avec,

n_i = nombre d'individus dans les groupes,

\bar{x} = moyenne générale,

\bar{x}_i = moyenne du groupe avec i variant de 1 à y .

La variabilité au sein du groupe est obtenue à partir de la somme des carrés des écarts entre les valeurs observées et la moyenne du groupe :

$$SS_{WITHIN} = \sum_{i=1}^y \left[\sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 \right]$$

avec,

n_i = nombre d'individus dans les groupes,

\bar{x}_i = moyenne du groupe avec i variant de 1 à y .

La variabilité totale est la somme des $SS_{BETWEEN}$ et des SS_{WITHIN} .

Le coefficient R^2 peut être défini comme étant le rapport entre la somme des écarts globale entre les groupes et la somme des carrés des écarts globale totale. Ce coefficient permet d'obtenir la proportion de l'information conservée après le regroupement effectué entre les individus.

C. Stratégie d'agrégation

Deux grands types de méthodes de classification existent. La méthode agglomérative et la méthode divisive.

Dans le cas de la méthode agglomérative, on part de n groupes et on arrive au final à un groupe tandis que dans le cas de la méthode divisive, on part d'un groupe et obtient n groupes.

Dans le cadre de ce travail, la méthode hiérarchique agglomérative sera appliquée. Cette dernière a pour principe de prendre comme point de départ la partition de n objets en n classes d'un objet. A chaque étape ultérieure, on fusionne deux classes pour en former une nouvelle. On obtient donc à partir de n groupes, par fusions successives, un seul groupe de n objets. Grâce à cette méthode, on pourra rechercher les explications lors de l'ajout d'une station de mesures au sein d'un groupe donné. (Yadav *et al.*, 2007) (Tsakiris *et al.*, 2011)

Différentes méthodes hiérarchiques agglomératives existent et se distinguent par la méthode d'agrégation des groupes. Les différentes méthodes sont les suivantes :

- la méthode de Ward qui se base sur le principe que la différence de R^2 pour deux partitions successives soit aussi faible que possible.
- la méthode du simple lien qui permet de fusionner les groupes pour lesquels la distance minimum est la plus faible.
- la méthode du lien complet à partir de laquelle on fusionne les groupes pour lesquels la distance maximum est la plus faible.
- la méthode du lien moyen où les groupes dont la distance moyenne est la plus faible sont fusionnés.

Etant donné la nature quantitative de toutes les variables, la stratégie d'agrégation adoptée est l'algorithme de Ward. De plus, cette méthode est couramment utilisée dans le cadre de travaux de régionalisation dans le domaine de l'hydrologie. (Nathan et McMahon, 1992) (Gwo-Fong et Lu-Hsien, 2006) (Ramachandra Rao, 2006)

D'autres stratégies ont été testées mais les classes obtenues sont moins cohérentes d'un point de vue hydrologique. La méthode du lien moyen donne une partition de 6 groupes dont 3 ne sont constitués que d'une station (Figure 6666).

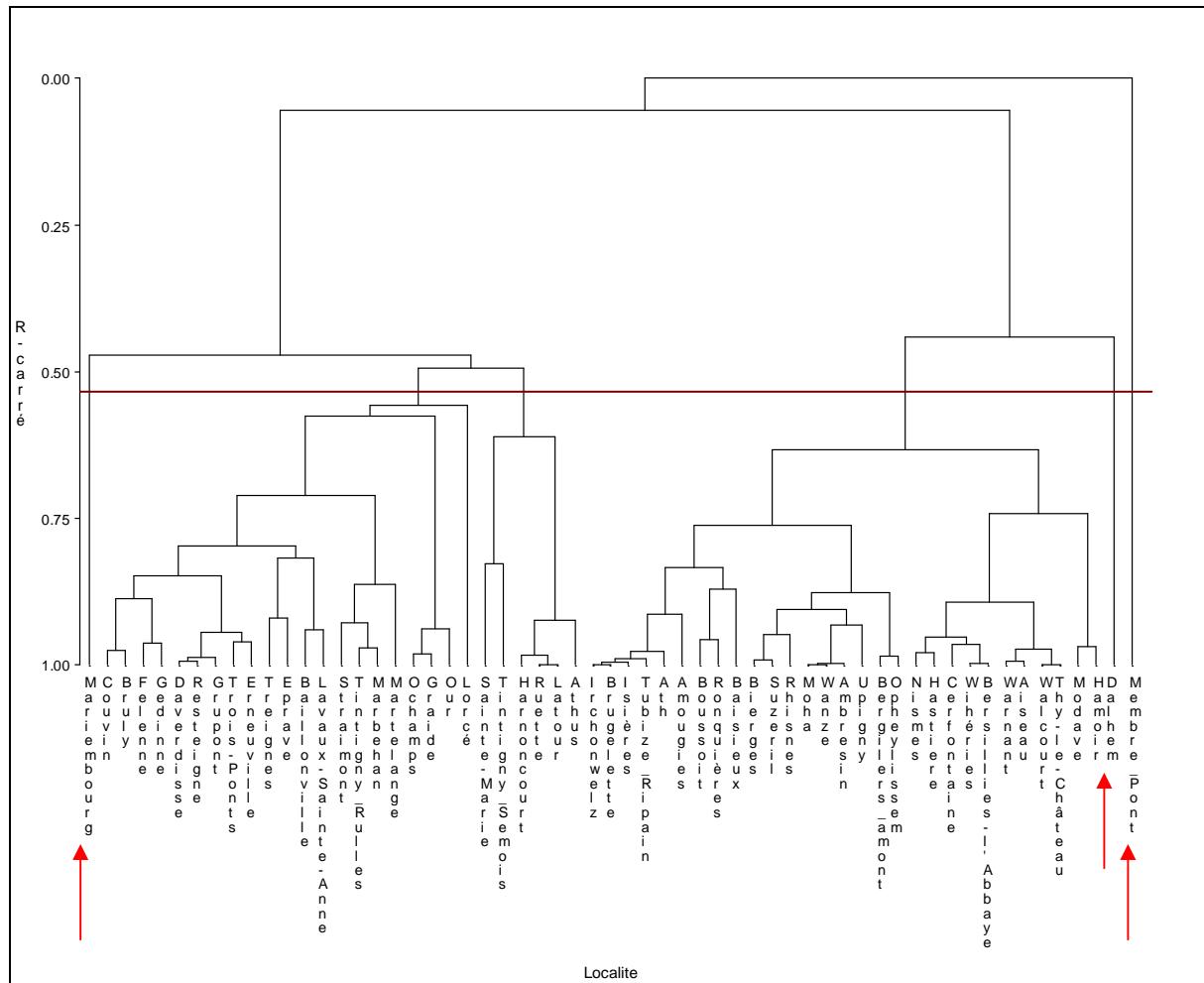


Figure 66 : Dendrogramme relatif à la classification en utilisant la méthode du lien moyen

De la même manière, on obtient 4 groupes et une station isolée avec la méthode du lien complet (Figure 6767).

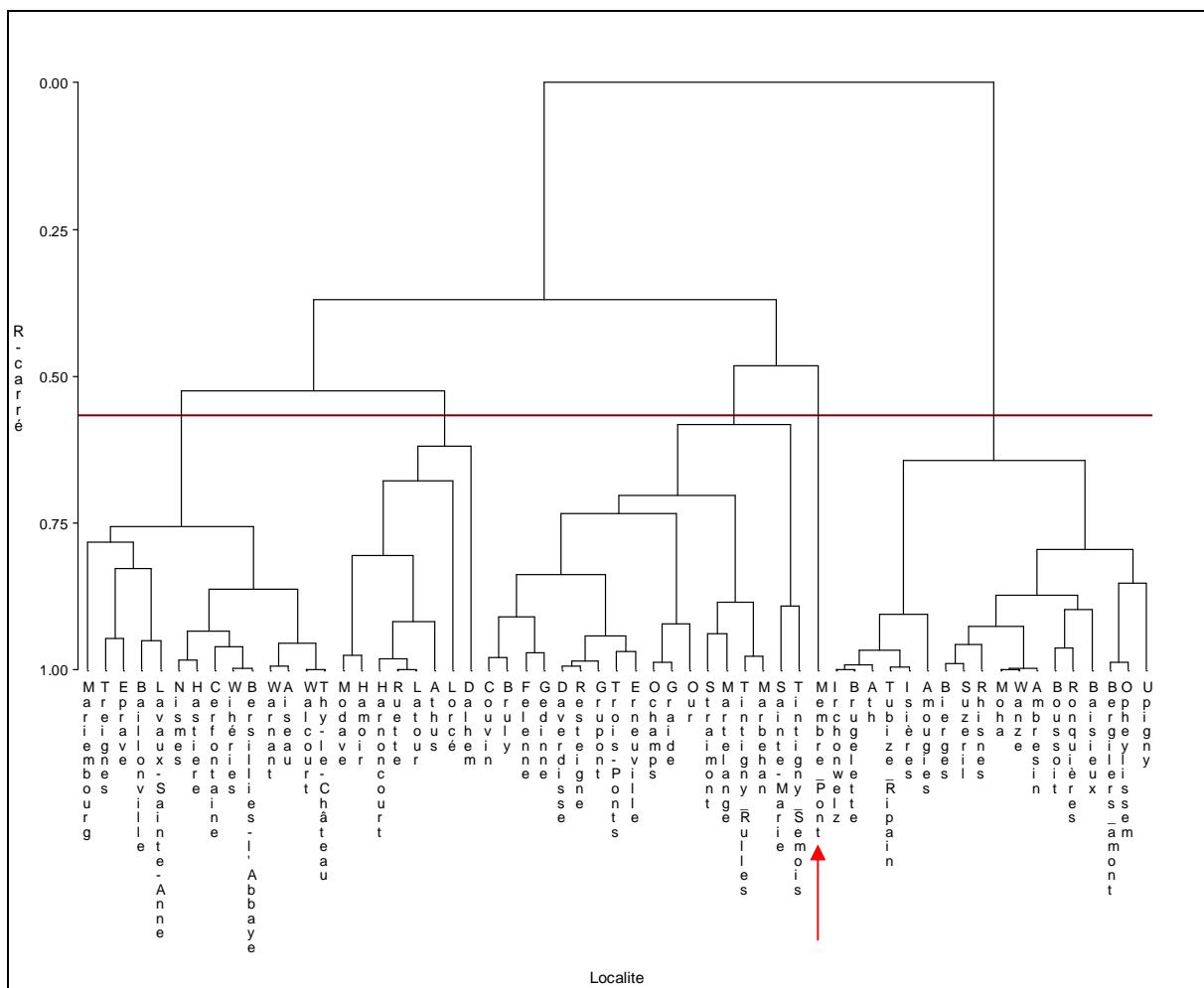


Figure 67 : Dendrogramme relatif à la classification en utilisant la méthode du lien complet

Afin d'éviter de travailler avec des groupes composés d'une seule station de mesures, il faudrait choisir une partition en seulement 1 ou 3 groupes, ce qui peut ne pas être représentatif de la diversité des bassins en Région wallonne.

Le nombre de classes ou groupes à retenir peut être déterminé par un grand nombre de méthodes. Celle adoptée ici consiste à suivre l'évolution de la valeur du coefficient R^2 . On arrête les fusions avant le regroupement qui engendre une diminution importante de ce coefficient, c'est-à-dire lorsque $SS_{BETWEEN}$ est très faible et SS_{WITHIN} est très élevé.

D. Préparation des données

Afin de rendre les différentes variables comparables, il faut éliminer le facteur d'échelle comme par exemple lorsque les unités sont différentes. Pour ce faire, on effectue une standardisation des données à l'aide de la formule suivante :

$$x_{ij} = \frac{(y_{ij} - \bar{y}_j)}{\hat{\sigma}_j} \quad (i = 1, \dots, n ; j = 1, \dots, p)$$

avec,

y_{ij} = valeur de l'observation i de la variable j ,

\bar{y}_j = moyenne arithmétique de la variable j ,

$\hat{\sigma}_j$ = écart-type estimé de la variable j ,

La moyenne des variables standardisées est nulle et leur écart-type est égal à 1.

Il est à remarquer que le poids d'une caractéristique est également lié au nombre de variables qui la caractérisent. En effet, dans notre cas, l'occupation du sol et la pédologie des bassins versants sont représentées respectivement par les classes d'occupation du sol et les groupes hydrologiques qui sont au nombre de cinq (territoires artificialisés, forêts, terres arables, cultures permanentes et surfaces enherbées pour l'occupation du sol ; A, B, C, D et NC pour la pédologie).

On dispose donc de cinq variables pour chacune de ces deux caractéristiques du bassin versant. A contrario, pour la superficie du bassin versant par exemple, une seule variable est nécessaire.

Dès lors, afin de donner le même poids à chaque caractéristique du bassin versant, les valeurs des variables d'occupation du sol et de pédologie ont été divisées par la racine carrée de 5. (Palm, 1998)

E. Interprétation des résultats

L'interprétation des résultats consistera à calculer les moyennes et écarts-type de chaque groupe obtenu. Cette étape permettra de localiser les groupes dans l'espace des variables et d'évaluer leur homogénéité.

Une analyse en composantes principales sera également réalisée.

Lorsque les zones sont définies, les limites entre zones sont affinées en procédant à une nouvelle classification numérique comprenant 13 stations situées aux limites (chapitre 4.5).

4.3.3 L'analyse en composantes principales

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode descriptive qui permet d'étudier les relations qui existent entre des variables quantitatives, sans tenir compte, a priori, d'une quelconque structure, ni des variables, ni des individus. (Palm, 1998)

Afin de réaliser une analyse en composantes principales, les données de départ doivent être structurées sous la forme d'un tableau de n lignes et p colonnes représentant respectivement les individus et les variables observées.

Tout comme pour la classification numérique, les données devront être standardisées afin d'éliminer le facteur d'échelle. La standardisation se réalise en appliquant aux données la formule suivante :

$$x_{ij} = (y_{ij} - \bar{y}_j) / \hat{\sigma}_j \quad (i=1, \dots, n ; j = 1, \dots, p)$$

avec \bar{y}_j et $\bar{\sigma}_j$ qui sont respectivement la moyenne et l'écart-type estimé de la colonne j .

Ce tableau peut contenir une multitude d'informations, c'est pourquoi l'objectif de cette analyse est de résumer les données sous forme d'indices synthétiques afin d'interpréter plus facilement l'information contenue dans le tableau.

Le premier indice synthétique z_{i1} , doit être tel qu'il doit être une combinaison linéaire des variables centrées réduites :

$$z_{i1} = u_{11}x_{i1} + \dots + u_{p1}x_{ip} \quad \text{avec} \quad u_{11} + \dots + u_{p1} = 1.$$

De plus, les coefficients u_{j1} doivent être tels que la variance des z_{i1} soit maximum.

La proportion de l'information contenue dans la première composante est obtenue en calculant le rapport entre la variance de l'indice et la somme des variances des p variables du tableau (qui est égale à p étant donné la standardisation).

De manière à ne pas perdre trop d'informations contenues dans le tableau de données initial, d'autres composantes principales peuvent être calculées.

La deuxième composante principale se détermine sous les conditions suivantes :

$$z_{i2} = u_{12}x_{i1} + \dots + u_{p2}x_{ip} \quad \text{avec} \quad u_{12} + \dots + u_{p2} = 1.$$

Comme pour la première composante principale, les coefficients u_{j2} doivent être tels que la variance des z_{i2} soit maximum.

Pour cette deuxième composante, une contrainte supplémentaire a été ajoutée qui est qu'il ne peut y avoir de corrélation entre les deux composantes principales de manière à ce que le second indice ne contienne pas d'informations redondantes par rapport au premier. Cette contrainte se traduit mathématiquement par la formule suivante :

$$u_{11}u_{12} + u_{21}u_{22} + \dots + u_{p1}u_{p2} = 0.$$

On peut calculer autant d'indices synthétiques qu'il y a de variables initiales. Dans ce cas, il faudra systématiquement ajouter comme condition que la corrélation entre ces indices soit nulle.

Les coefficients intervenant dans les combinaisons sont obtenus à l'aide de calculs matriciels dont le point de départ est la matrice de corrélation \mathbf{R} des p variables initiales. Cette matrice est de dimensions $p \times p$, de rang r et admet r valeurs propres positives :

$$l_1 \geq l_2 \geq \dots \geq l_r.$$

Les valeurs propres correspondent aux variances des valeurs des composantes principales.

A ces valeurs propres, on peut associer r vecteurs propres u_1, u_2, \dots, u_r dont les éléments sont les facteurs u intervenant dans les combinaisons linéaires utilisées pour le calcul des indices synthétiques.

Les n valeurs de la composante, z_{ij} , s'obtiennent par le produit matriciel $\mathbf{z}_j = \mathbf{X} \mathbf{u}_j$ dans laquelle \mathbf{X} est la matrice des données centrées et réduites.

La corrélation de la composante principale z_j avec chacune des variables initiales est obtenue en multipliant les éléments d'un vecteur propre \mathbf{u}_j par la racine carrée de la valeur propre correspondante.

On ne garde généralement qu'un faible nombre de composantes de manière à pouvoir les interpréter assez facilement. Dans cette étude, nous n'avons considéré que les composantes correspondant aux valeurs propres situées avant la réduction brutale de la pente du graphique des valeurs propres en fonction de la composante principale, cette réduction pouvant être détectée par un coude sur le graphique.

La classification numérique et l'analyse en composantes principales ont été réalisées à l'aide du logiciel SAS (Statistical Analysis System) en utilisant respectivement les procédures CLUSTER et PRINCOMP.

4.4 Résultats du regroupement en zones homogènes

La Figure 6868 montre l'historique des fusions sous la forme d'un dendrogramme.

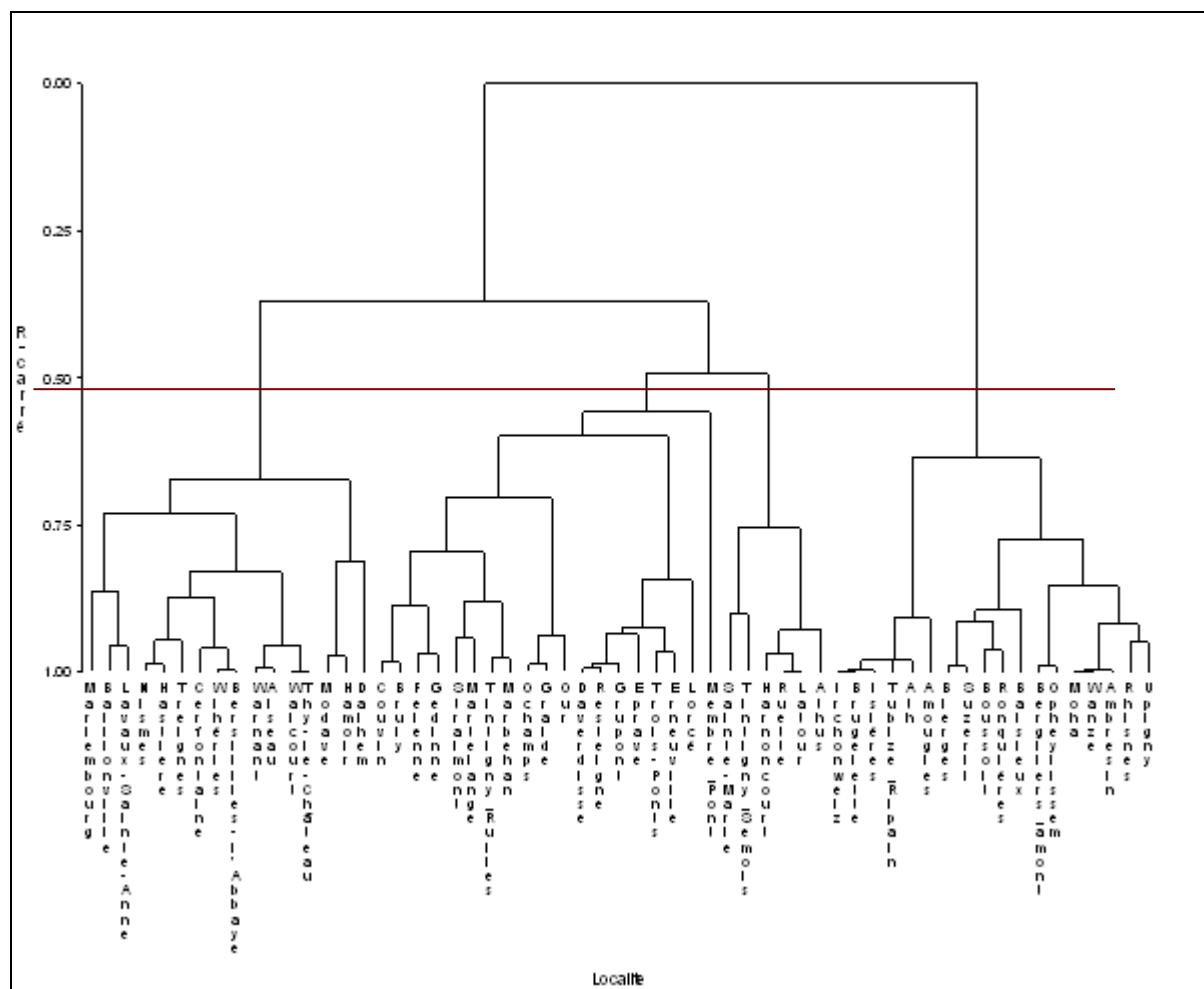


Figure 68 : Dendrogramme relatif à la classification

Un des critères qui définit l'arrêt du regroupement est qu'il faut éviter de retrouver des groupes composés d'une seule station de mesures. A partir de la Figure 6868, on observe

que le dernier individu à être ajouté à un groupe est le point de mesures de Membre sur la Semois.

De plus, il est conseillé de stopper le regroupement lorsque l'on observe une diminution importante du R^2 . L'étape suivant l'ajout de la station de Membre dans le groupe 3, engendre une différence de R^2 de 0,065 alors que lors des premiers pas, la différence oscillait entre 0,005 et 0,03.

Les 59 stations de mesures retenues dans le cadre de cette étude sont donc scindées en quatre groupes. La Figure 6969 présente les résultats spatialement à l'aide d'une carte de la Région wallonne.

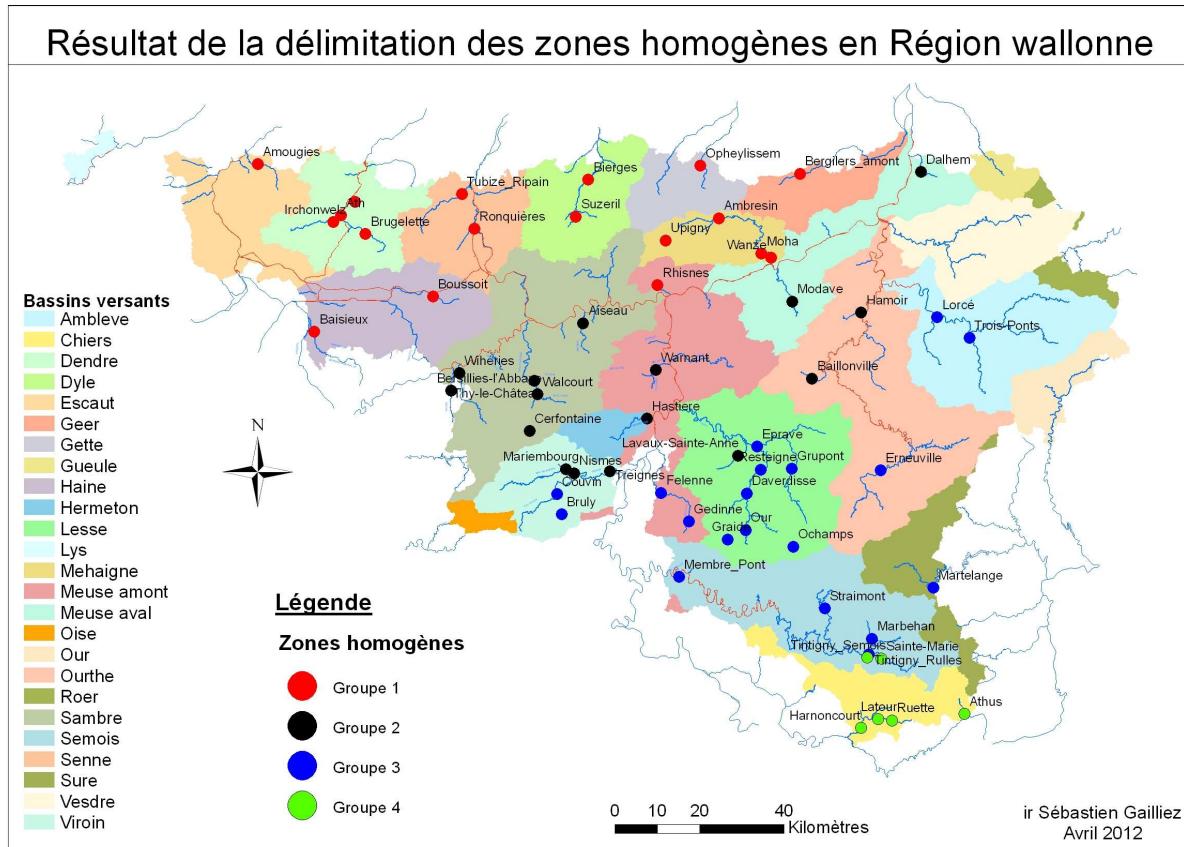


Figure 69 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne

4.5 Affinage des zones homogènes

Certains bassins versants dont les stations de mesures n'ont pas été retenues pour établir la régionalisation, se situent dans des zones limitrophes entre différents groupes homogènes. Ceci peut être observé à partir de la Figure 7070 qui est une représentation des zones homogènes par bassin versant.

Il est à remarquer que le contrôle qualité de ces stations n'a pas été aussi sévère que celui appliqué aux stations retenues pour la régionalisation.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Représentation par bassin versant

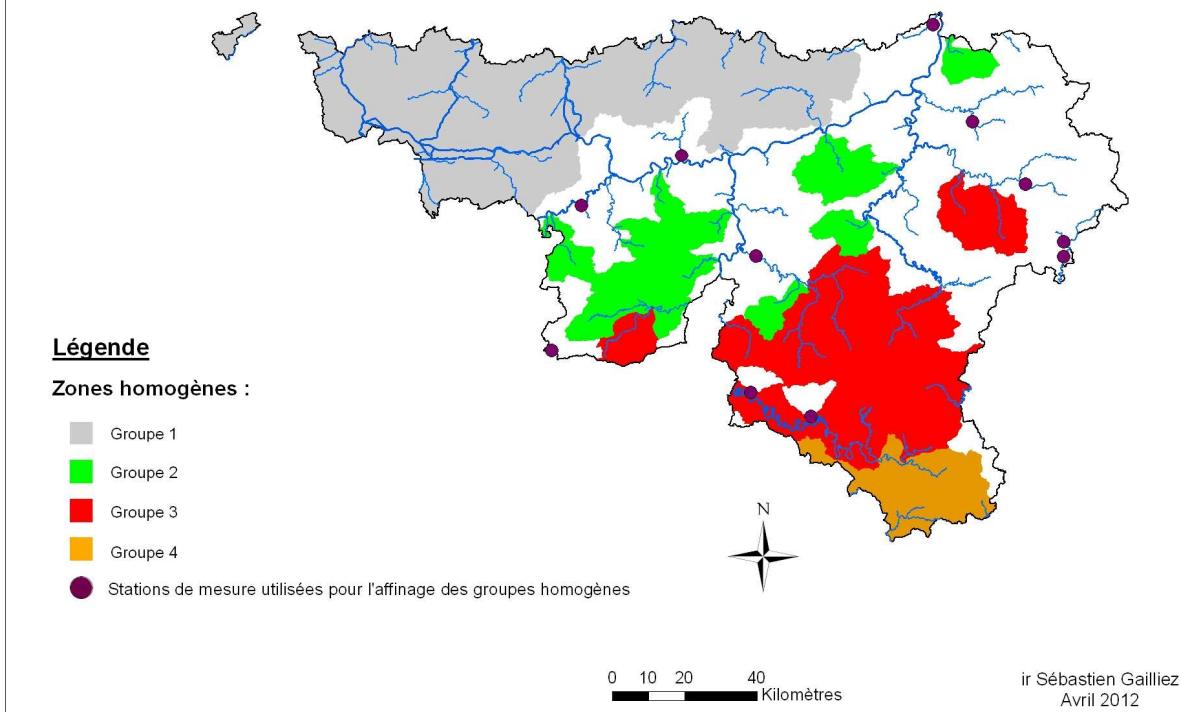


Figure 70 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne (Représentation par bassin versant)

L'objectif de l'affinage est de voir dans quel groupe vont se placer les bassins versants dont le débit d'étiage du cours d'eau n'est pas modifié par des barrages comme par exemple sur la Warche, la Vesdre ou encore l'Eau d'Heure.

Ces zones d'affinage sont également soit des parties aval ou amont de bassins versants (Lesse, Geer), soit des bassins versants non étudiés comme l'Our ou la Hoëgne.

La station de Lasninville sur l'Amblève est choisie pour ce bassin car elle est située en amont de la confluence de la Warche sur laquelle on retrouve le barrage de Robertville.

Seuls les cours d'eau équipés d'une station de mesures permettant le calcul du coefficient de tarissement peuvent être utilisés pour améliorer les résultats de la régionalisation.

Les stations de mesures retenues pour l'affinage sont reprises dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Stations de mesures utilisées pour l'affinage

Code	Localité	Cours d'eau	Bassin versant	Mise en service
67531002	Lasninville	Amblève	Amblève	1996/1998
82211002	Gendron	Lesse	Lesse	1968
L5860	Theux	Hoëgne	Vesdre	1979
L6080	Reuland	Ulf	Our	1991
L6090	Lommersweiler	Braunlauf	Our	1991
L6340	Eben-Emael	Geer	Geer	1991
L6630	Thuin	Biesme l'Eau	Haute Sambre	2004
L6990	Auby-sur-Semois	Ruisseau des Aleines	Semois	2003
L7000	Vresse-sur-Semois	Ry du Moulin	Semois	2003
L7200	Macquenoise	Oise	Oise	2004
L7241	Jemeppe-sur-Sambre	Orneau	Basse Sambre	2007

L'ensemble des paramètres déterminés pour la régionalisation sont calculés sur base de la méthodologie mise au point dans le cadre de cette étude.

Un nouveau regroupement en zones homogènes est ensuite réalisé en incorporant à la liste initiale de 59 points de mesures les stations reprises dans le Tableau 21. Le nombre de groupes homogènes retenus est également au nombre de quatre.

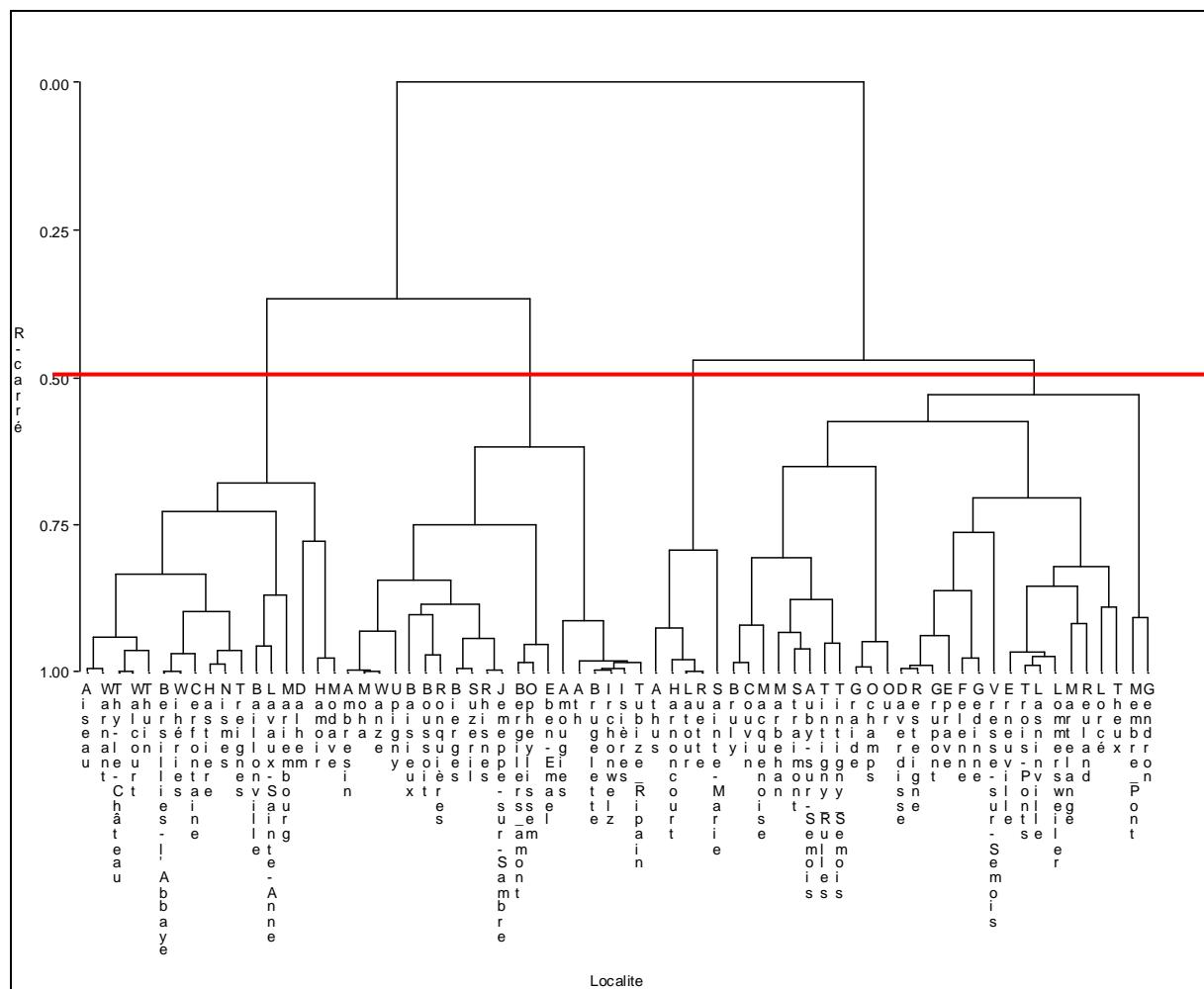


Figure 71 : Dendrogramme relatif à la classification après affinage

La Figure 7171 présente le dendrogramme issu du regroupement de l'ensemble des stations de mesures, à savoir les 59 stations de mesures de départ et celles retenues pour l'affinage. Les stations de départ se retrouvent dans les mêmes groupes qu'avant l'affinage sauf pour la station de Tintigny sur la Semois qui passe de la zone 4 à la 3.

Les bassins versants retenus pour l'affinage s'insèrent correctement d'un point de vue géographique dans les différents groupes. Par exemple, le bassin de l'Orneau est ajouté au groupe 1 situé au Nord de la Sambre et de la Meuse.

La Figure 7272 présente les groupes homogènes obtenus après l'opération d'affinage réalisé.

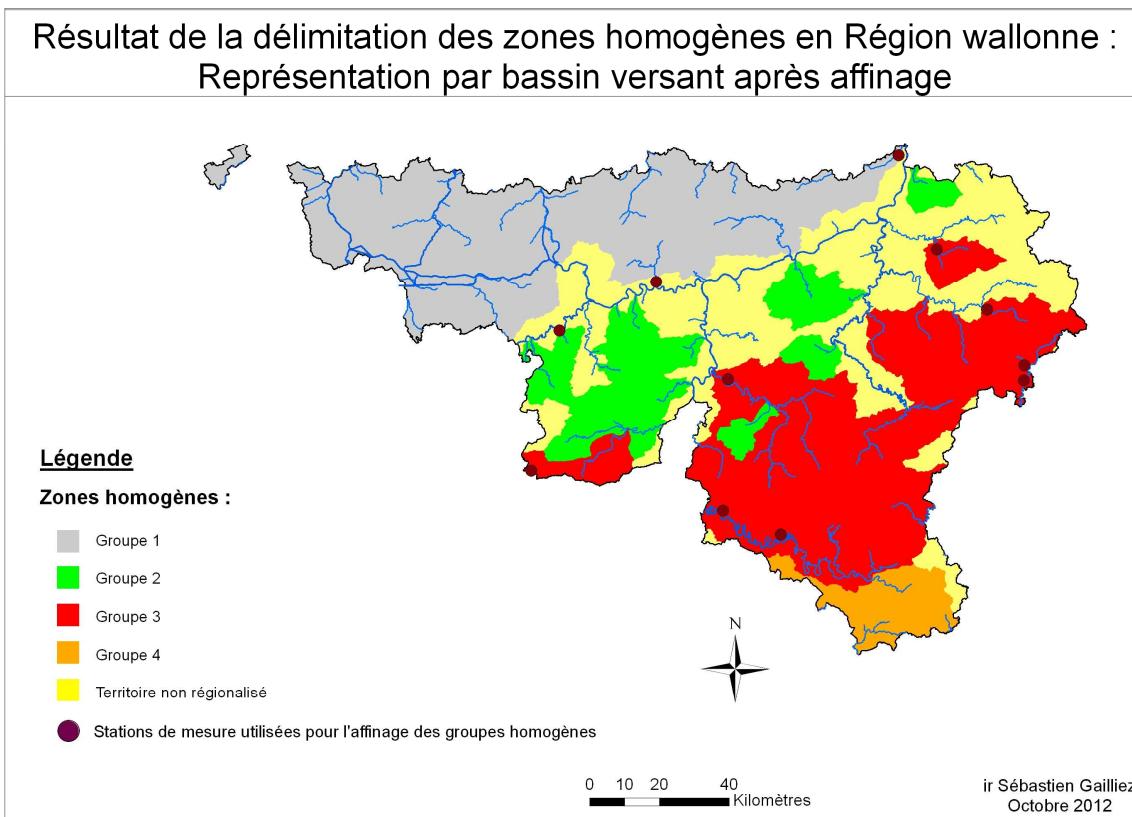


Figure 72 : Carte des stations limnimétriques réparties en zones hydrologiquement homogènes en Région wallonne après affinage (Représentation par bassin versant)

Les bassins versants qui ne sont pas associés à ce stade à un groupe homogène le sont pour diverses raisons comme par exemple, l'influence d'un barrage, la présence de captage d'eau avec export ou tout simplement par l'absence de stations de mesures.

4.6 Caractérisation des zones homogènes

Une des représentations les plus communément utilisées et fournies par le logiciel SAS est le graphique appelé Boxplot. Ce dernier présente par groupe et pour un paramètre les valeurs suivantes : le percentile25, la médiane, le percentile75, la moyenne et les valeurs extrêmes. De la Figure 7373 à la Figure 8787, les boxplots présentent les résultats pour :

- l'altitude,
- la pente médiane,
- l'occupation du sol,

- la pédologie,
- les précipitations,
- la température,
- l'évapotranspiration,
- la percolation,
- le coefficient de tarissement.

Seuls les boxplots mettant en évidence des différences significatives entre les groupes seront repris.

La Figure 7373 présente l'altitude synthétisée par groupe homogène. On retrouve le gradient Nord-Ouest → Sud-Est de l'altitude en Wallonie. On observe que les altitudes sont plus faibles pour les groupes 1 et 2 tandis que les valeurs maximum sont principalement observées dans le groupe 3 reprenant la région des Ardennes.

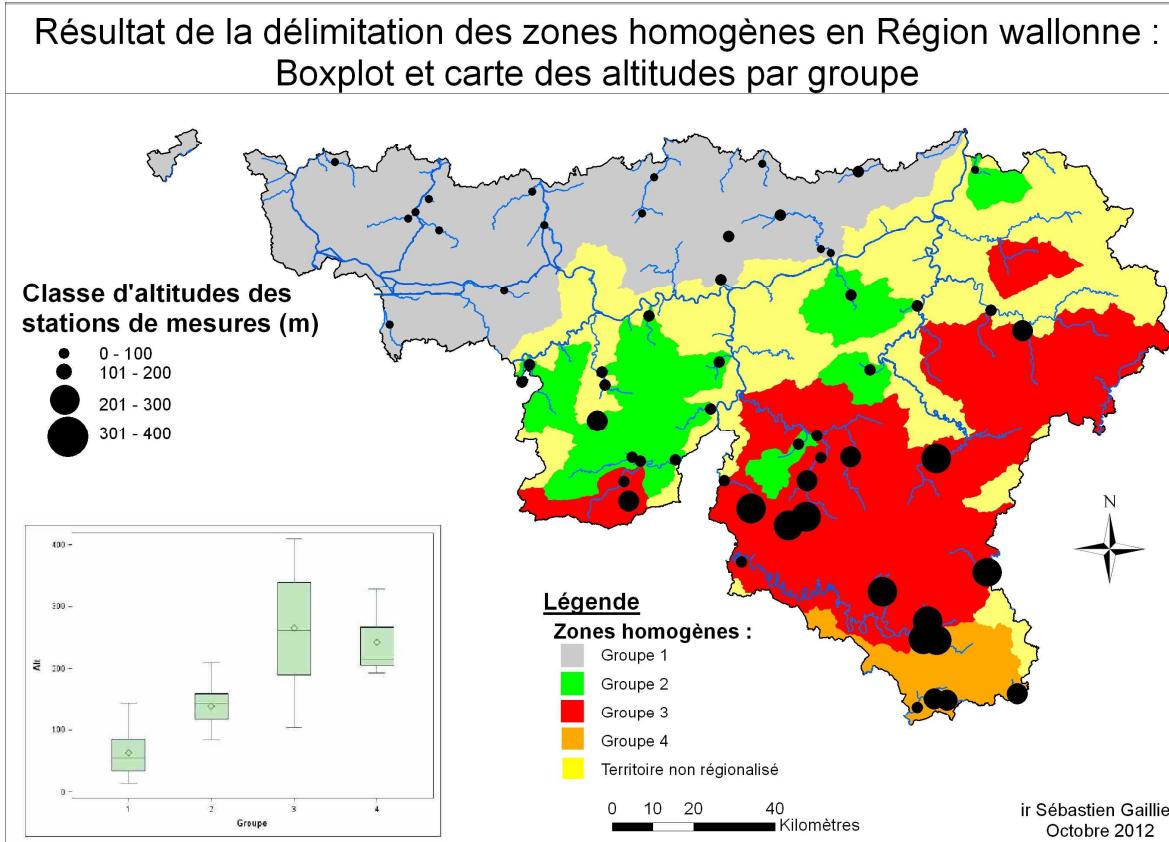


Figure 73 : Boxplot et carte d'altitudes par groupe

La pente médiane par groupe est présentée à la Figure 7474. La même évolution au niveau de la Région wallonne que pour l'altitude observée pour la pente moyenne des bassins versants repris dans les différentes zones homogènes. La pente du groupe 1 représenté majoritairement par des bassins versants du district hydrographique de l'Escaut est nettement plus faible que pour les autres groupes.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des pentes médianes par groupe

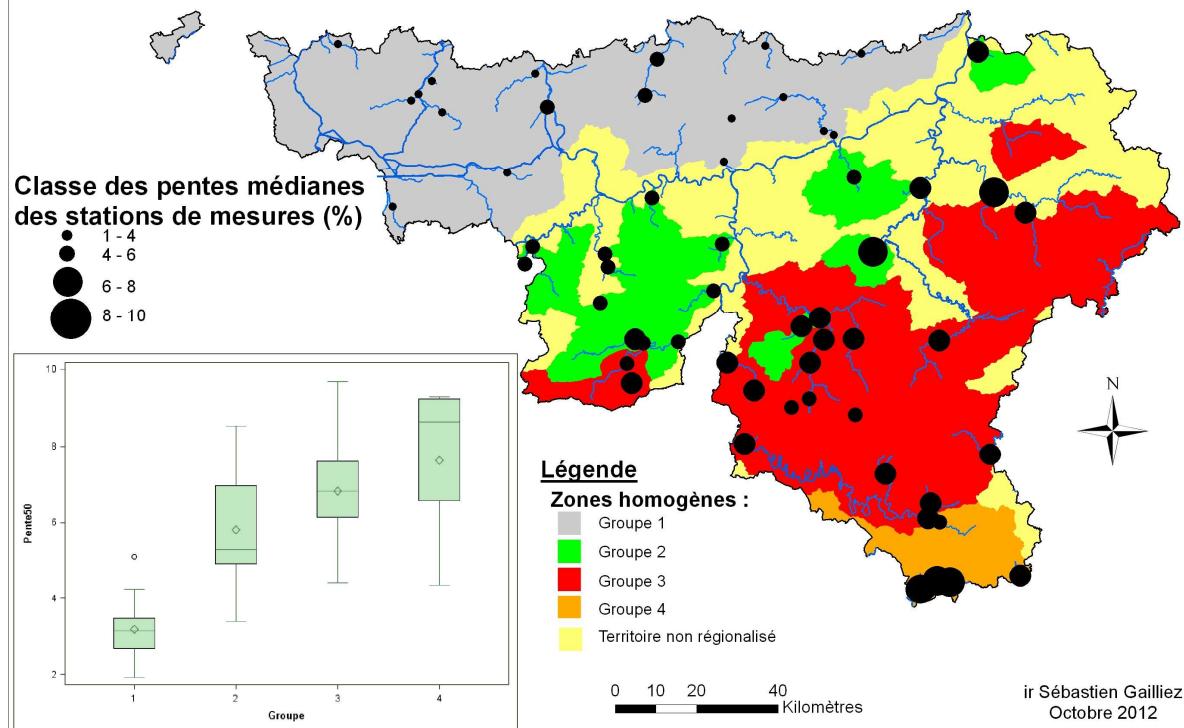


Figure 74 : Boxplot et carte des pentes médianes par groupe

Les boxplots correspondant à l'occupation du sol sont présentés de la Figure 7575 à la Figure 7878.

Le groupe 1 est caractérisé par une grande proportion de territoires artificialisés et de terres arables, et par une faible proportion de forêts et de surfaces enherbées contrairement aux trois autres groupes. Inversement, on trouve une proportion moins importante de forêts et de surfaces enherbées dans la zone homogène 1 que dans les autres zones.

La proportion des territoires artificialisés du groupe 4 est intermédiaire entre celle du groupe 1 d'une part et celles des groupes 3 et 4 d'autre part. Ceci provient principalement de la vallée de la Messancy.

Du point de vue des cultures permanentes, le groupe 1 en possède une plus grande proportion alors que la proportion dans le groupe 3 est légèrement plus faible que celle des autres groupes.

Le groupe 3 est quant à lui caractérisé par une couverture importante de forêts et de manière logique une très faible proportion de zones de cultures.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des territoires artificialisés par groupe

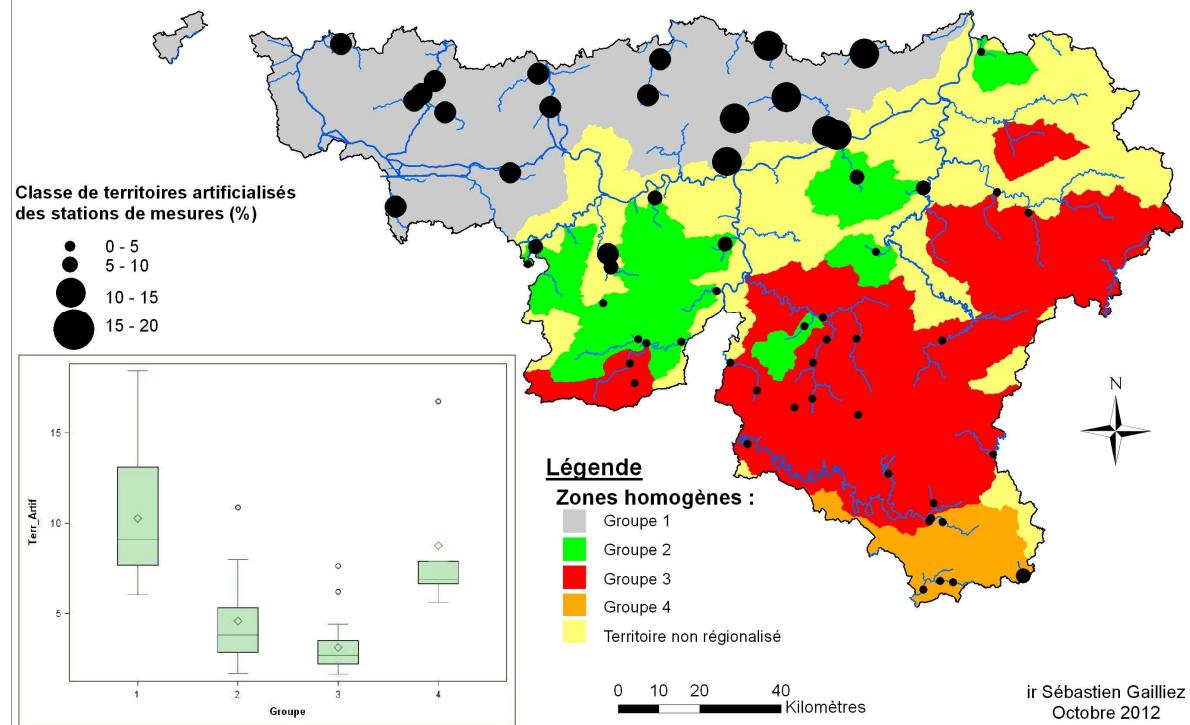


Figure 75 : Boxplot de la proportion des territoires artificialisés par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des terres arables par groupe

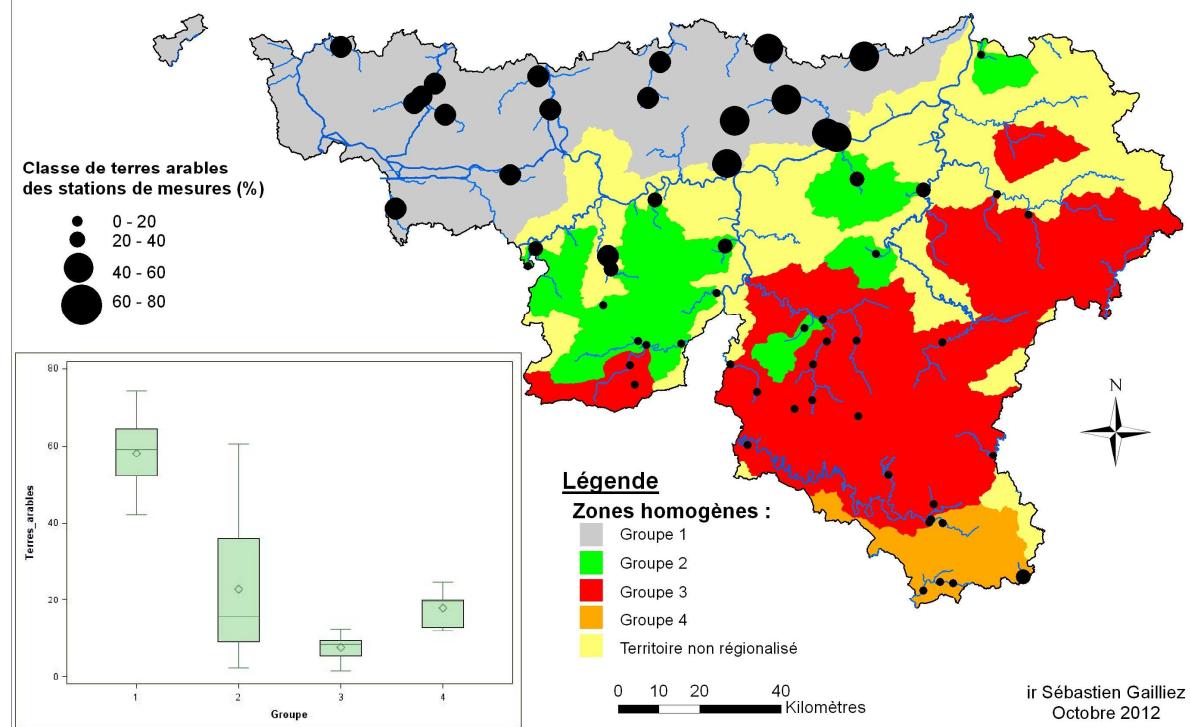


Figure 76 : Boxplot de la proportion des terres arables par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des forêts par groupe

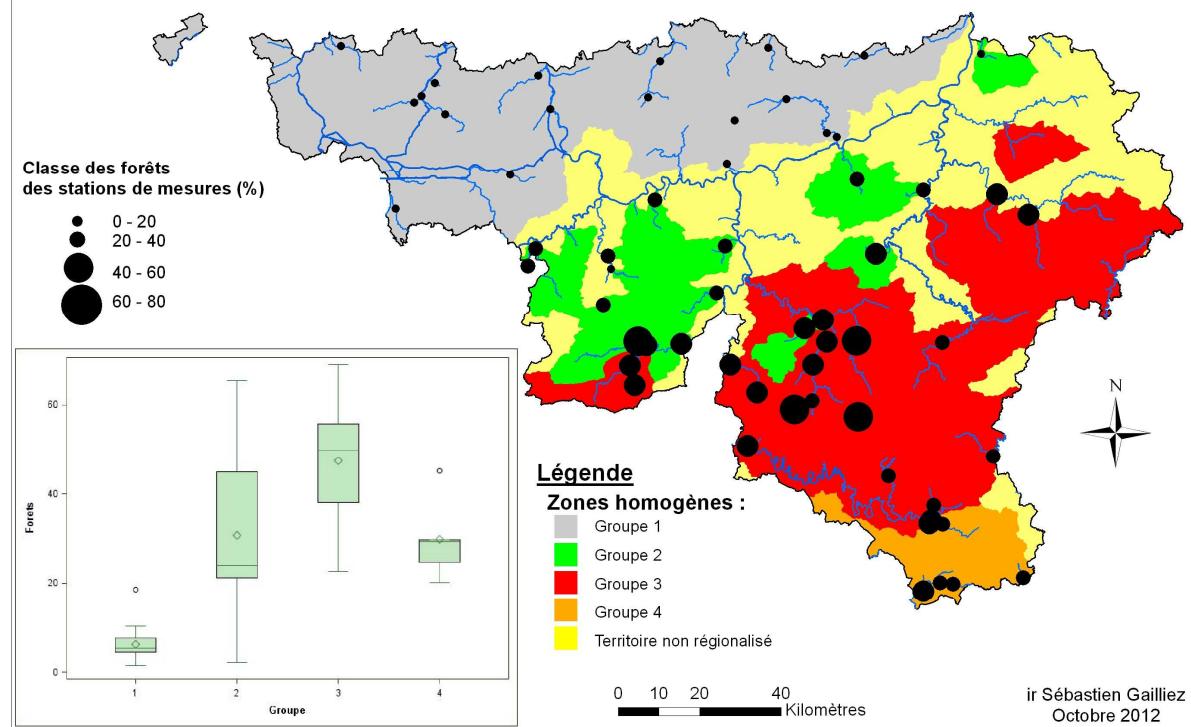


Figure 77 : Boxplot de la proportion des forêts par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des surfaces enherbées par groupe

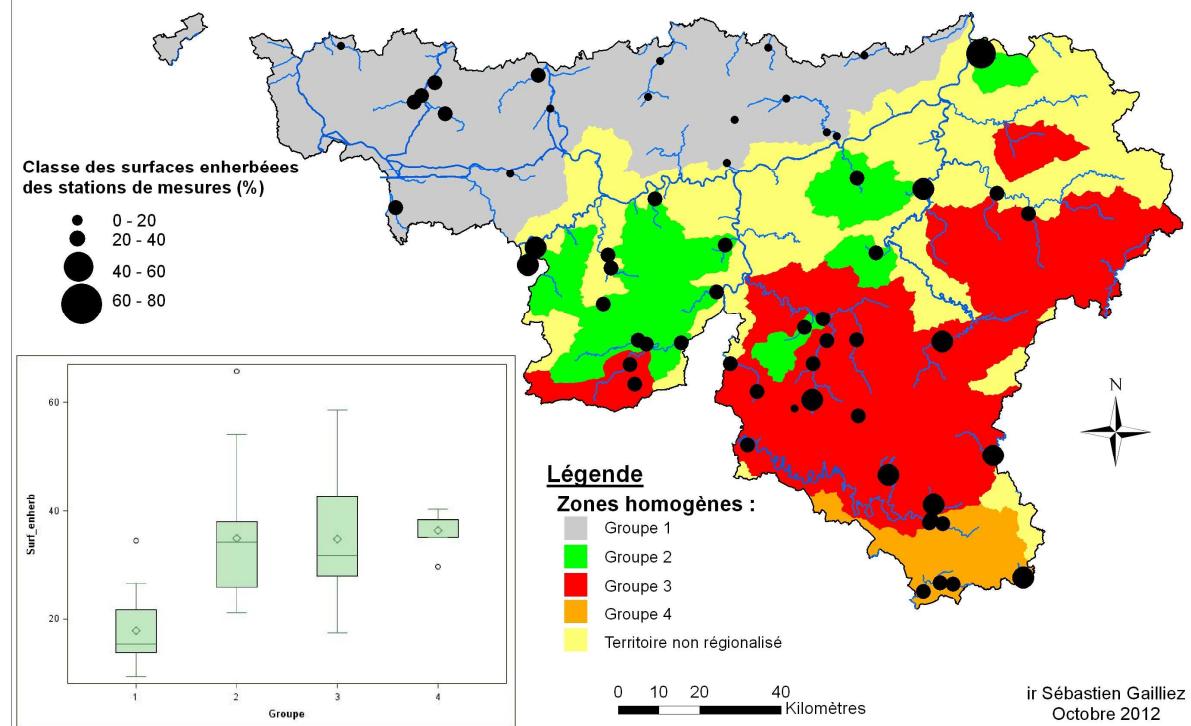


Figure 78 : Boxplot de la proportion des surfaces enherbées par groupe

D'un point de vue pédologique, le groupe 1 se distingue par une plus grande proportion de sol du groupe hydrologique A et une plus faible proportion de sol du groupe hydrologique C, tandis que les groupes 2 et 3 se différencient par une proportion plus élevée de sol du groupe hydrologique B et plus faible de sol du groupe hydrologique D.

Pour rappel, les zones urbanisées considérées comme imperméables ont été ajoutées au sol de groupe hydrologique D.

Le groupe 3 possède une très faible proportion de sol du groupe hydrologique A mais la proportion la plus élevée de sol du groupe hydrologique B.

Le groupe 4, quant à lui, est caractérisé par une proportion élevée de sol du groupe hydrologique C.

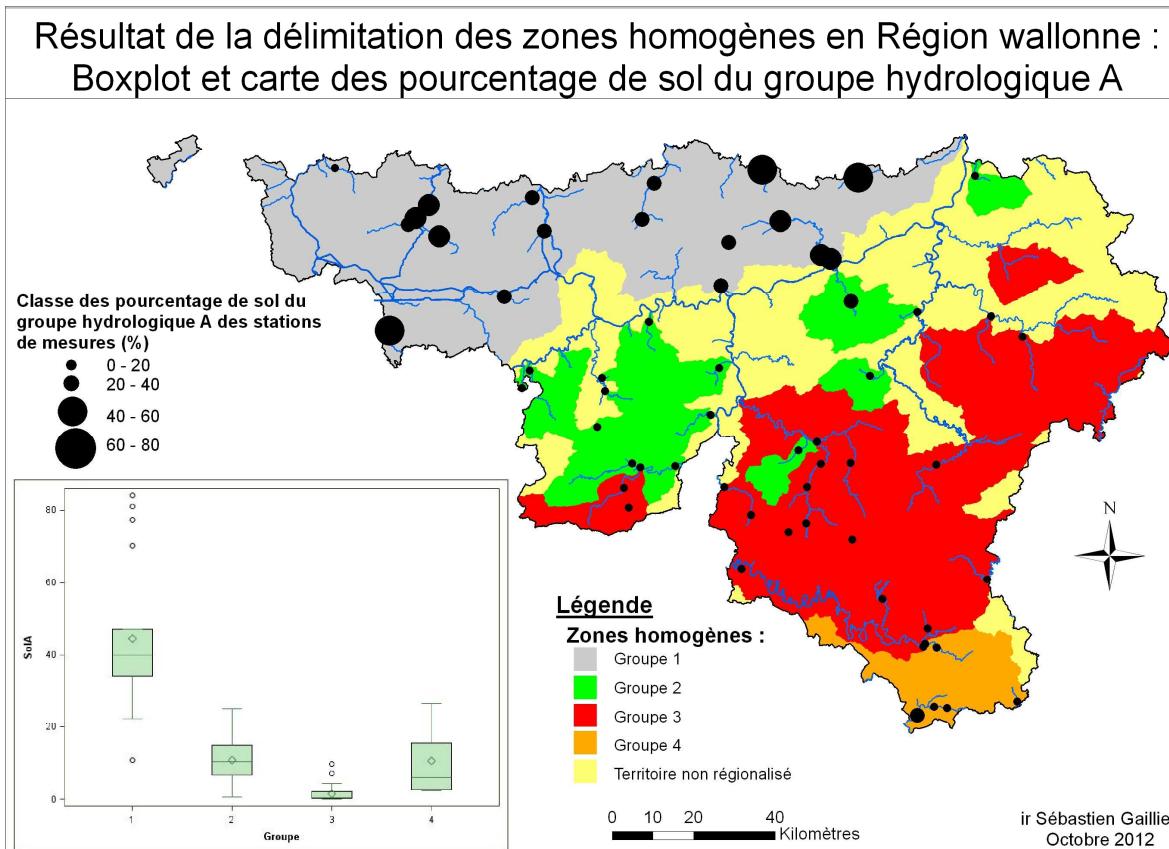


Figure 79 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique A par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des pourcentage de sol du groupe hydrologique B

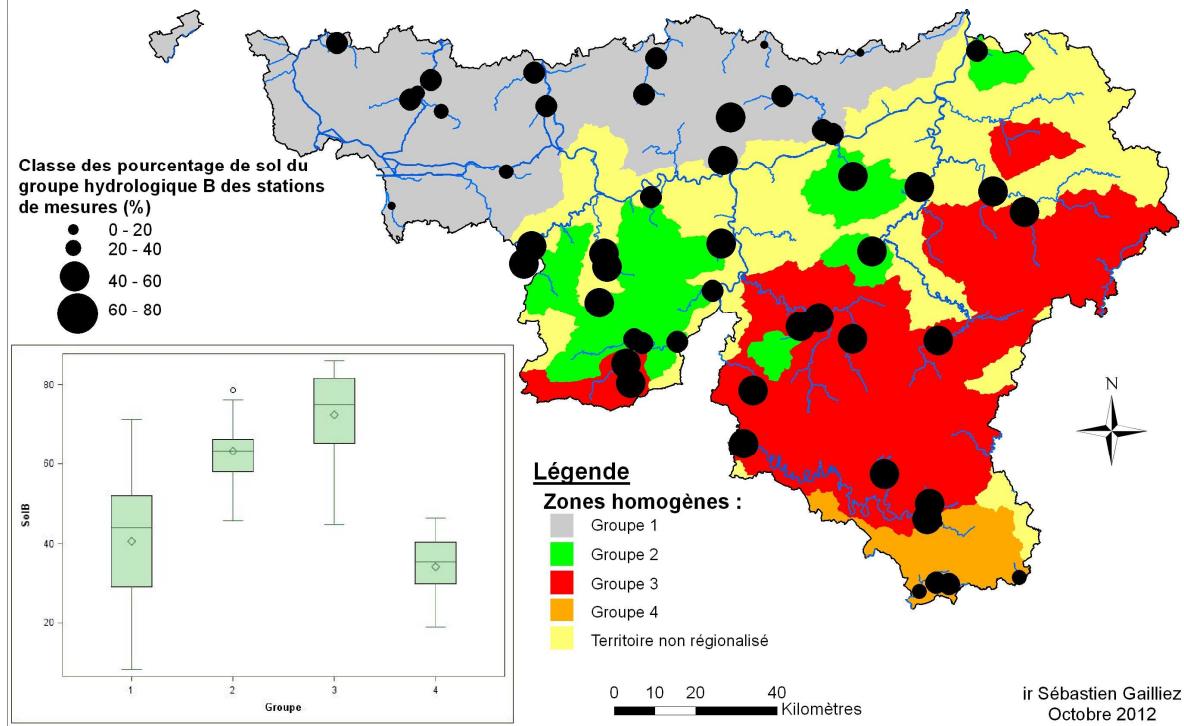


Figure 80 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique B par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des pourcentage de sol du groupe hydrologique C

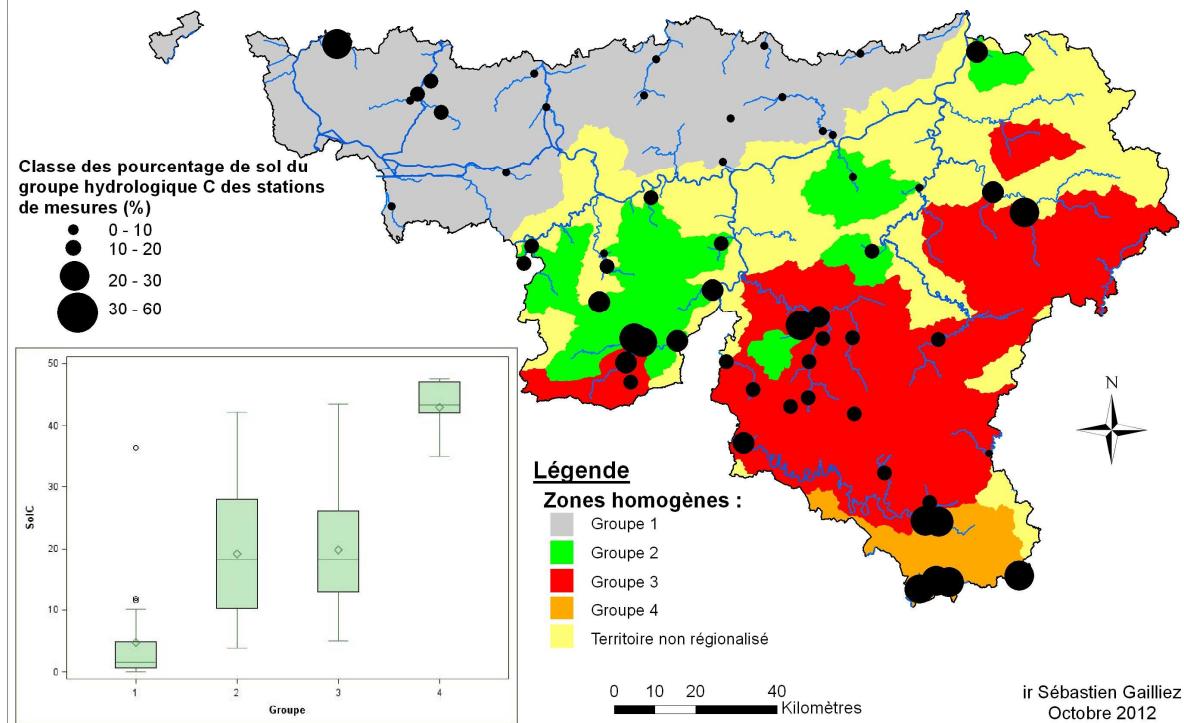


Figure 81 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique C par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des pourcentage de sol du groupe hydrologique D

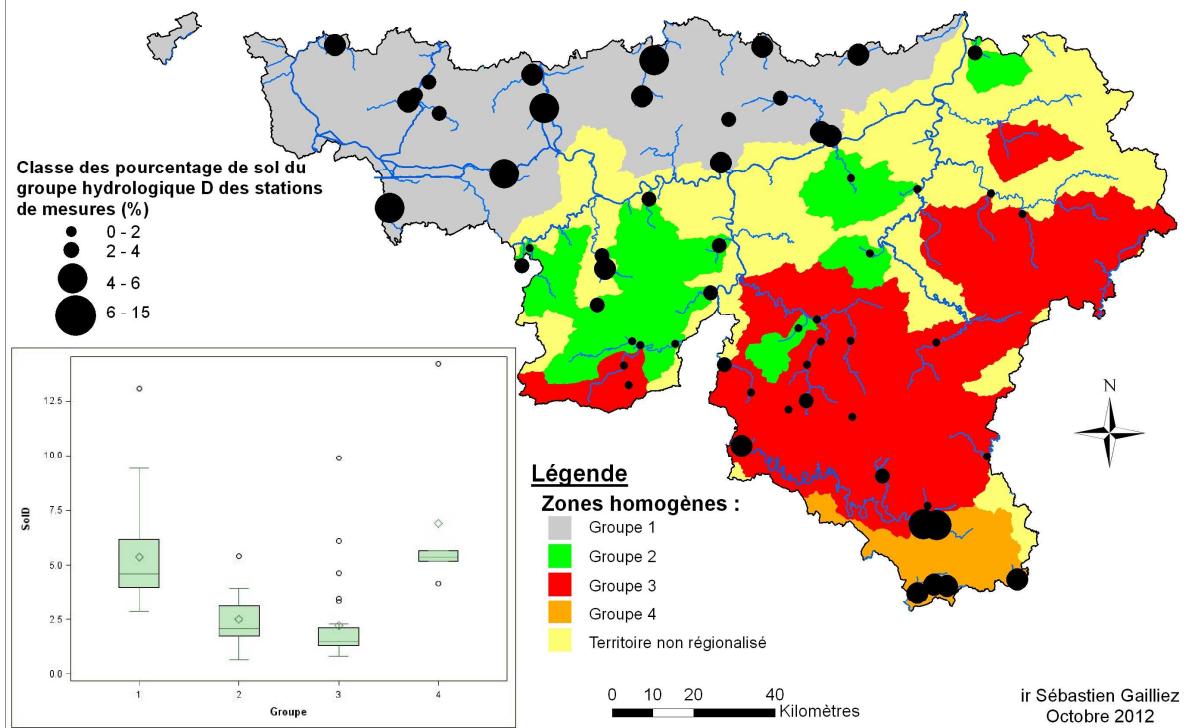


Figure 82 : Boxplot de la proportion de sol du groupe hydrologique D par groupe

Les précipitations suivent une tendance similaire à l'altitude, alors que pour la température estivale, le gradient est plutôt Sud-est → Nord-Ouest.

Le groupe 4 a cependant des précipitations plus faibles et des températures plus élevées que le groupe 3, ce qui est lié à son altitude plus faible.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des précipitations par groupe

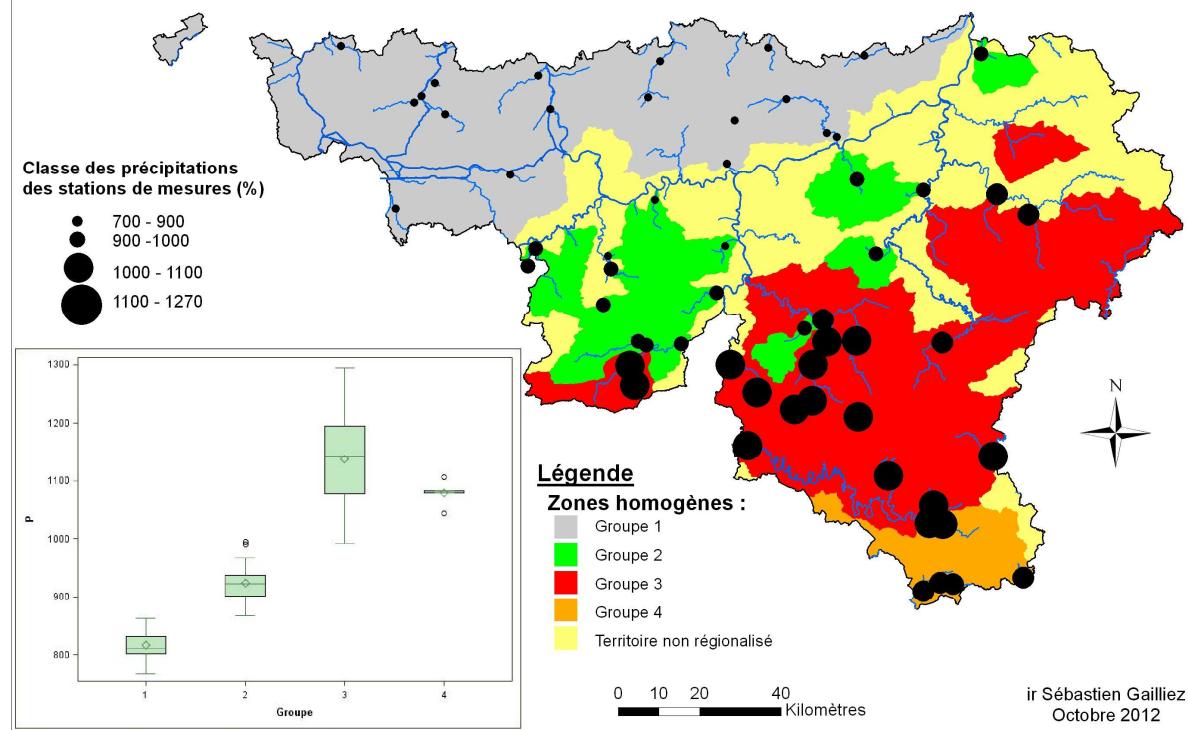


Figure 83 : Boxplot de des précipitations par groupe

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des températures estivales par groupe

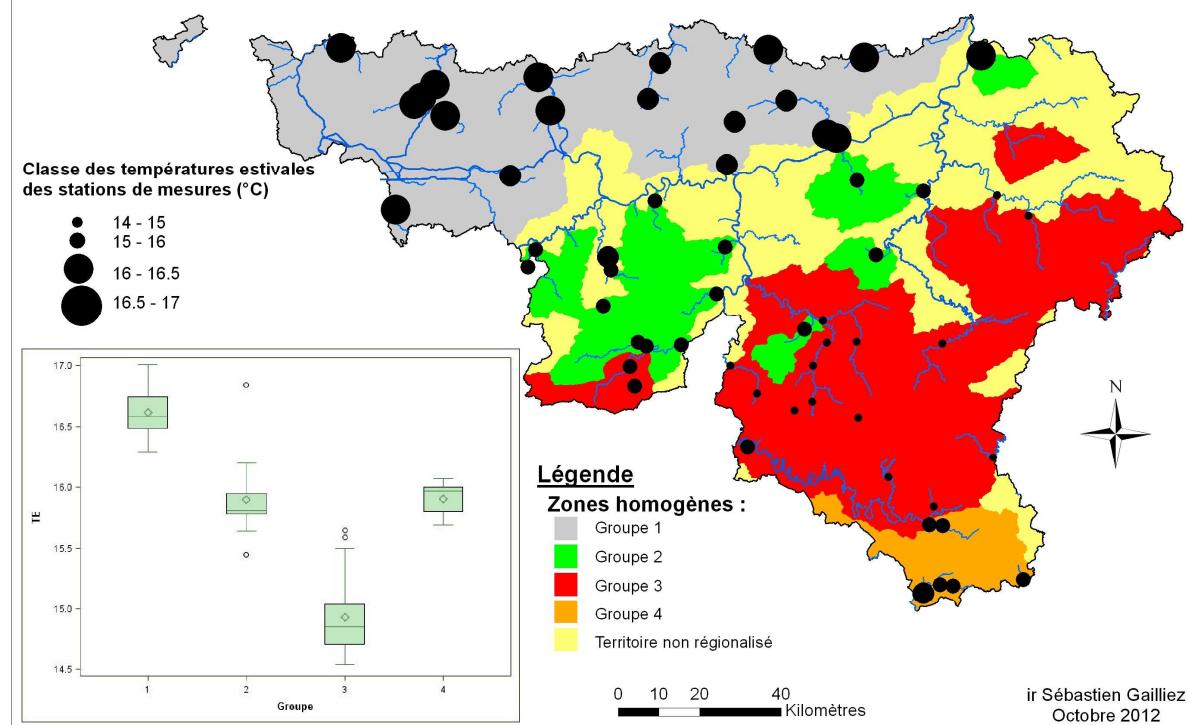


Figure 84 : Boxplot de la température par groupe

En ce qui concerne l'évapotranspiration potentielle, le groupe 4 se distingue par des valeurs plus faibles que les autres groupes.

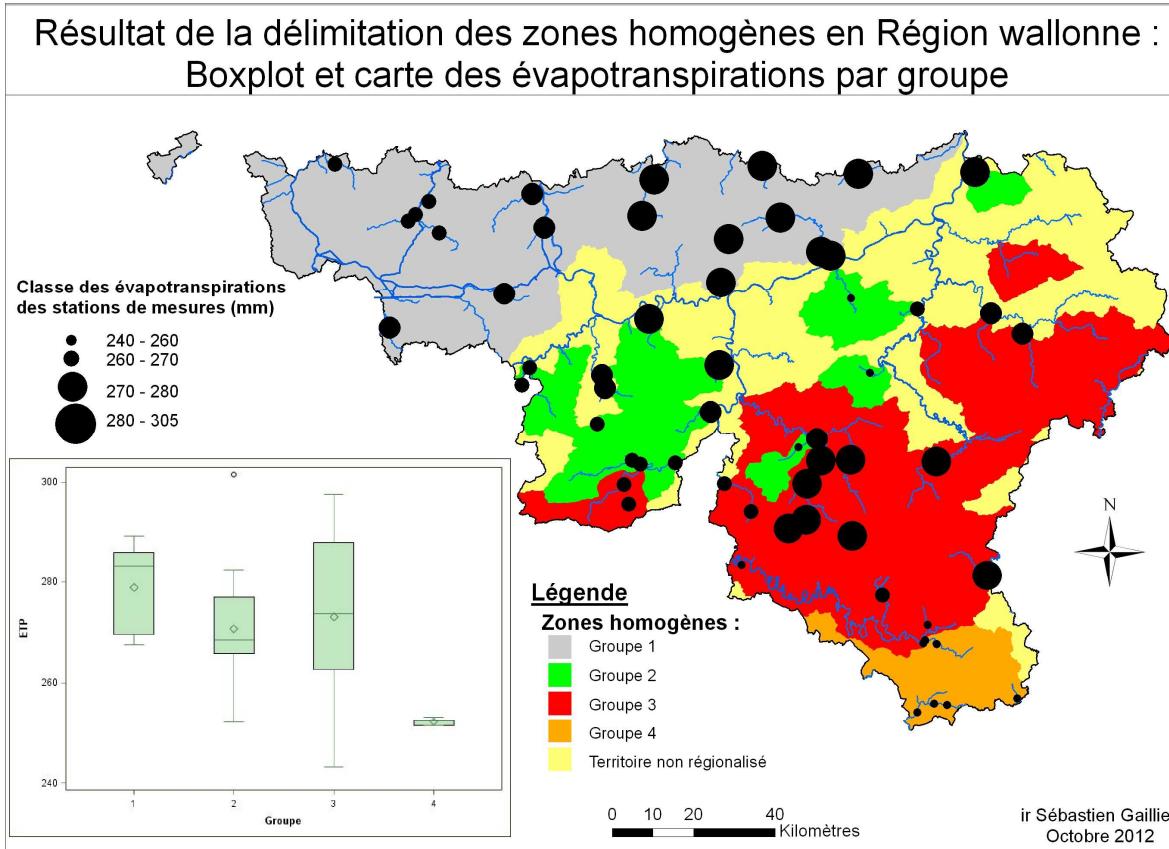


Figure 85 : Boxplot de l'évapotranspiration potentielle par groupe

Le boxplot de la percolation se caractérise principalement par une percolation plus importante pour la zone homogène 4.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne :
Boxplot et carte des percolations par groupe

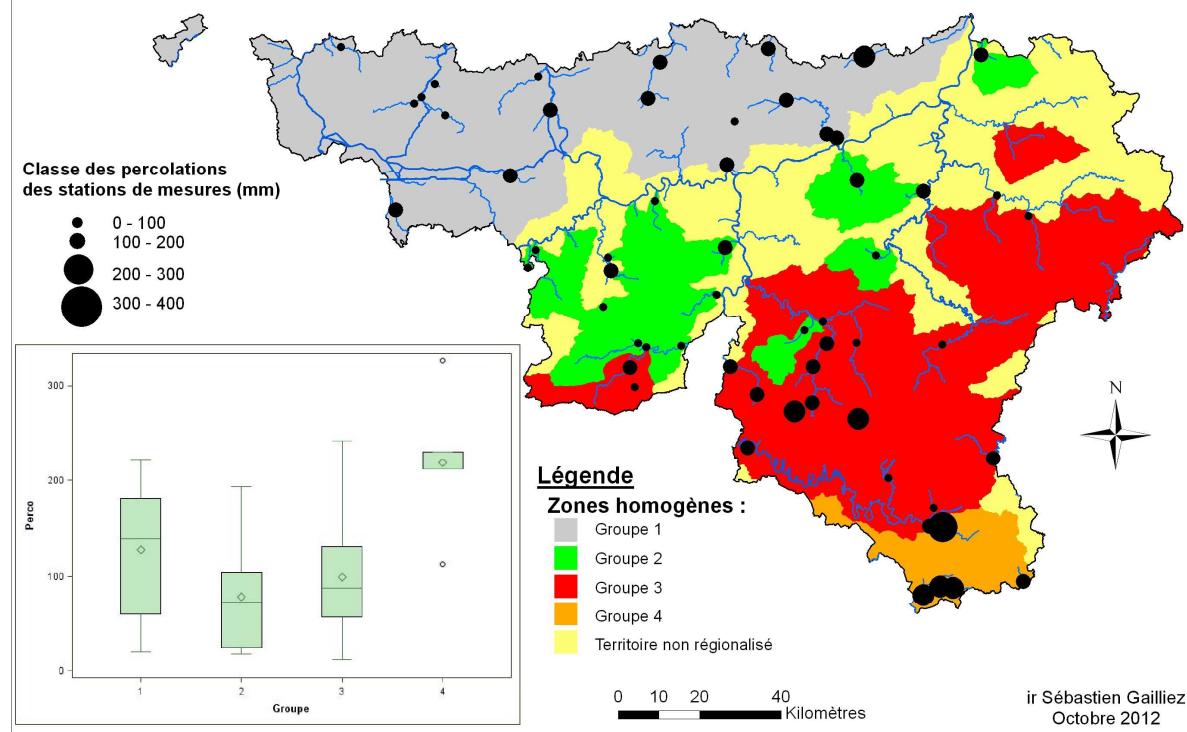


Figure 86 : Boxplot de la percolation par groupe

Le groupe 3 se caractérise par un coefficient de tarissement plus élevé que les autres groupes. Les groupes 1 et 4 quant à eux ont des valeurs similaires et plus faibles que les groupes 2 et 3.

Résultat de la délimitation des zones homogènes en Région wallonne : Boxplot et carte des coefficients de tarissement par groupe

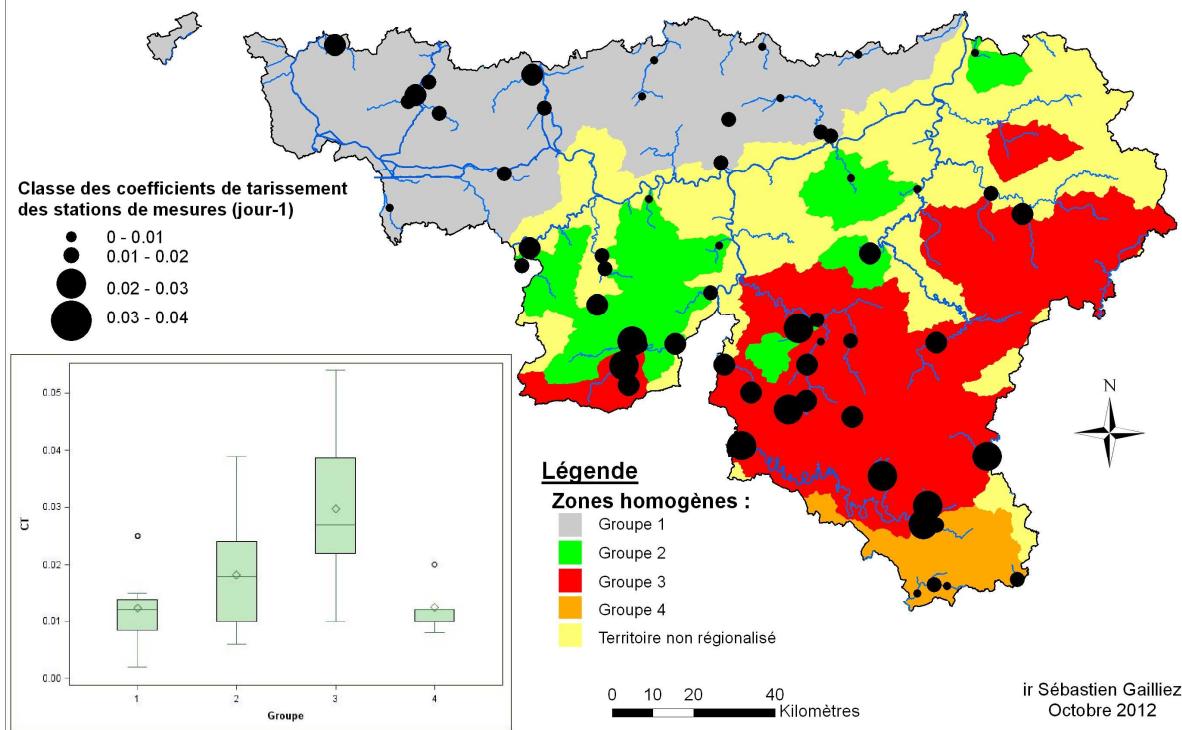


Figure 87 : Boxplot du coefficient de tarissement par groupe

A partir de la percolation et du coefficient de tarissement, on observe que la région 4 se distingue par un coefficient de tarissement faible et une valeur de percolation élevée, ce qui traduit qu'elle est singulière d'un point de vue hydrogéologique par rapport aux trois autres zones homogènes.

4.7 Analyse en composantes principales

4.7.1 Introduction

L'analyse en composantes principales (ACP) est une technique descriptive qui permet une interprétation plus globale des groupes par l'étude de ses composantes principales.

Le graphique mettant en relation les valeurs propres en fonction de la composante principale permet de déterminer le nombre de composantes à retenir. A partir du graphique de la Figure 8888, un premier coude est détecté à 2 composantes et un plus léger à 5 composantes, la première composante expliquant déjà 48% de la variance totale. Finalement, quatre composantes principales ont été retenues car elles expliquent 73% de la variance.

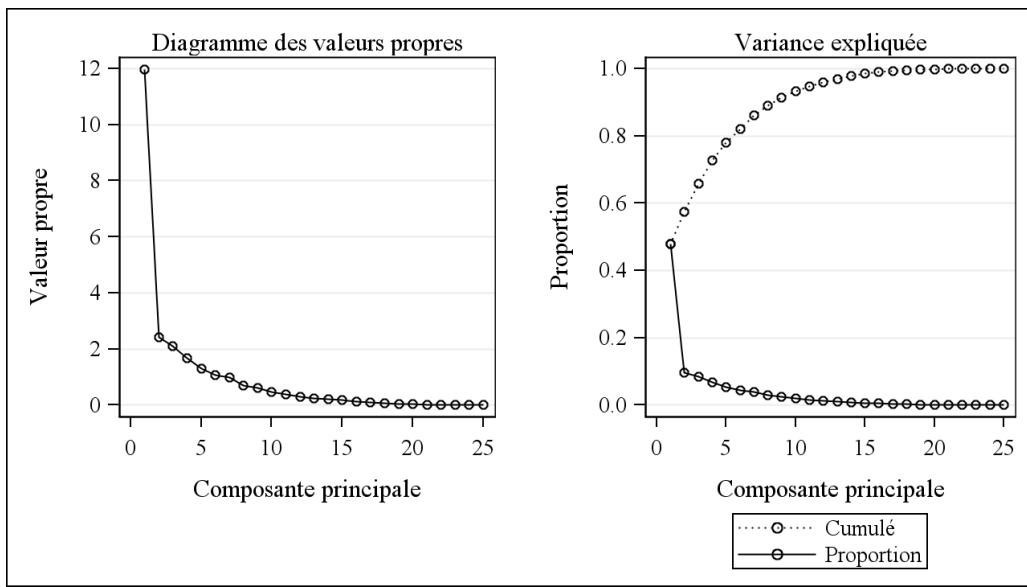


Figure 88 : Graphiques des valeurs propres et de la proportion de la variance expliquée en fonction de la composante principale

4.7.2 Cercles de corrélation

Les cercles de corrélation représentés de la Figure 8989 à la Figure 9191 positionnent les variables dans l'espace des composantes principales et permettent donc d'interpréter ces composantes.

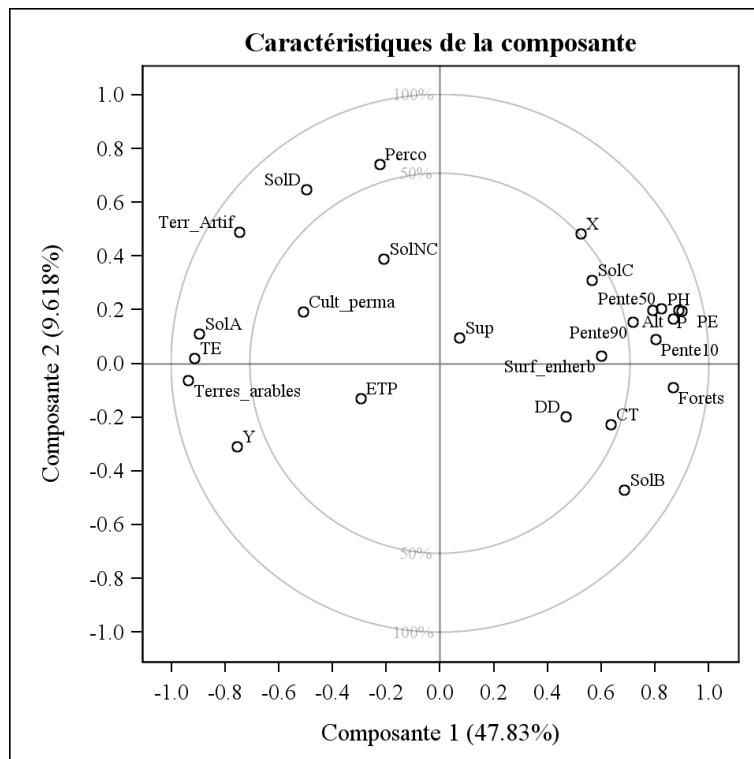


Figure 89 : Cercle des corrélations dans le plan des deux premières composantes principales

On observe que la première composante principale (Figure 8989) est positivement et fortement corrélée aux paramètres suivants :

- les précipitations,
 - le pourcentage de forêts,
 - les pentes,
 - l'altitude,
 - le pourcentage de sol B.

Dans une moindre mesure que ces derniers paramètres, la composante principale 1 est également corrélée au coefficient de tarissement.

On peut également remarquer que la première composante est négativement corrélée aux variables suivantes :

- le pourcentage de terres arables et de territoires artificialisés,
 - le pourcentage de sols de groupe A,
 - la température estivale,
 - la coordonnée Lambert Y.

Les résultats obtenus pour cette première composante ont une signification physique assez prononcée. En effet, la région sud de la Wallonie correspondant aux faibles coordonnées Lambert Y, est caractérisée par une altitude et des pentes plus importantes.

A l'inverse, les zones ayant un pourcentage de sol A élevé se situent dans le Nord de la Région wallonne dans laquelle les précipitations sont plus faibles. On y observe beaucoup plus de terres arables. Il s'agit également de la région la plus urbanisée avec les grands centres ville du Hainaut et du Brabant wallon.

Quant à la deuxième composante, elle est positivement corrélée à la percolation et au pourcentage de sol D.

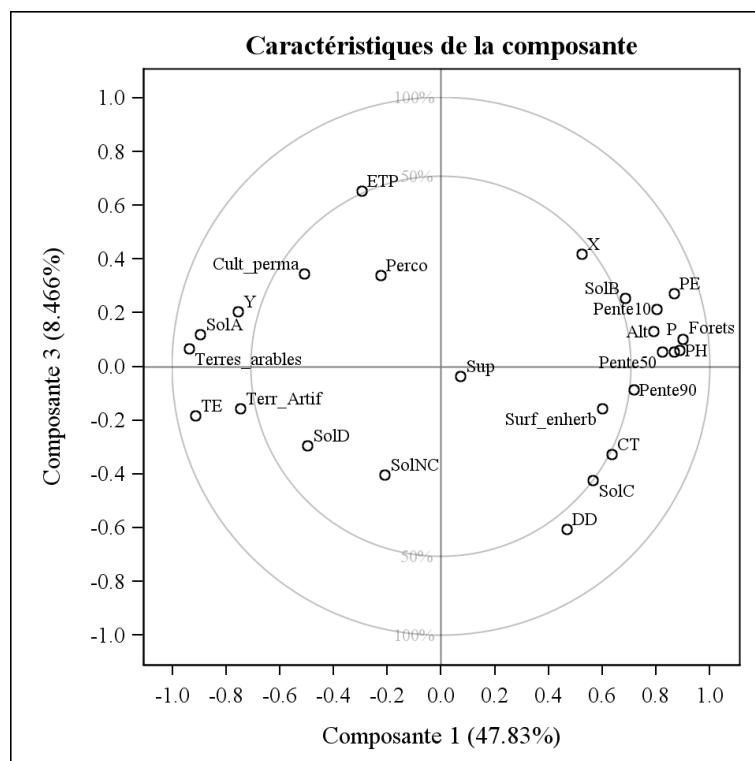


Figure 90 : Cercle des corrélations dans le plan des première et troisième composantes principales

A partir de la Figure 9090, on observe que la troisième composante est positivement corrélée à l'évapotranspiration et négativement à la densité de drainage. Aucune interprétation géographique ne peut être tirée à partir de cette troisième composante. En effet, il n'y a pas de lien entre l'évapotranspiration et la densité de drainage.

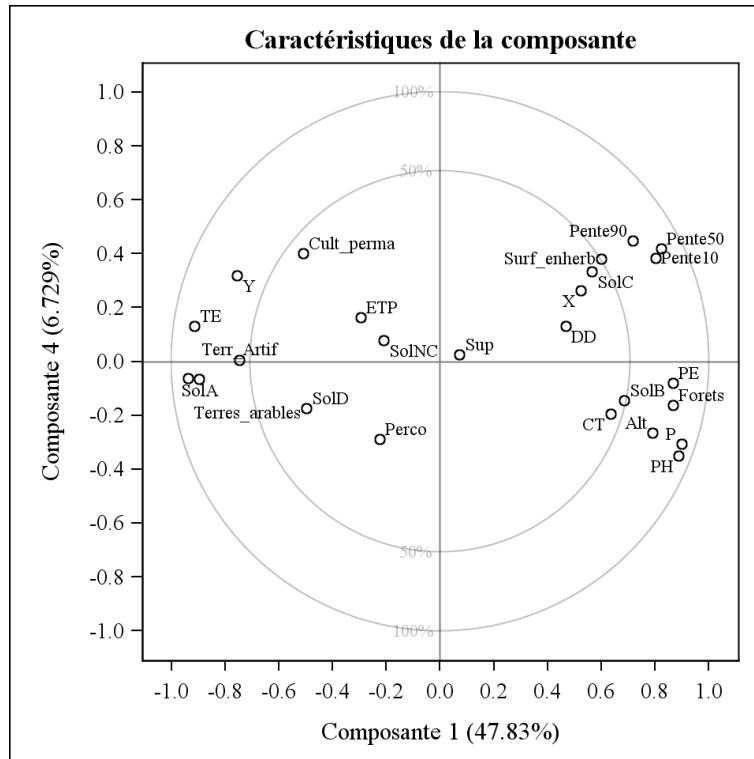


Figure 91 : Cercle des corrélations dans le plan des première et quatrième composantes principales

La Figure 9191 montre que la quatrième composante est faiblement corrélée positivement aux pourcentages de cultures permanentes, de surfaces enherbées et aux pentes.

4.7.3 Graphiques des individus

Une autre représentation permettant d'interpréter les résultats est le graphique des individus. Il met en relation les observations dont les coordonnées sont les valeurs de la composante z_{i1} et z_{i2} , par exemple.

Les graphiques de la Figure 9292 à la Figure 9494 permettent de situer les groupes dans l'espace des composantes principales et ainsi de mieux analyser les résultats de la classification.

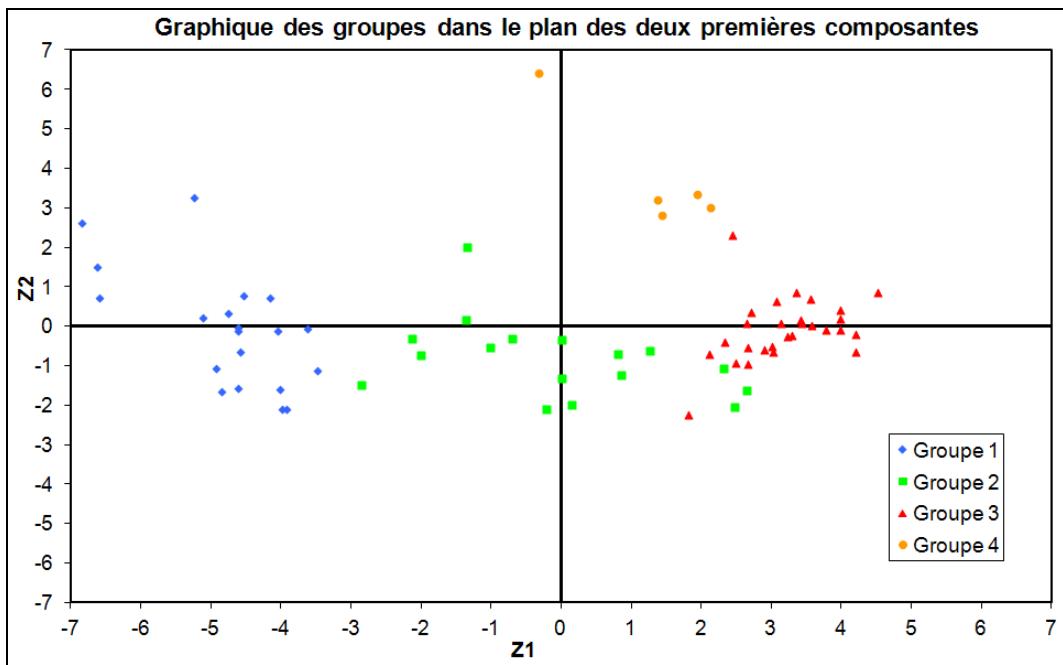


Figure 92 : Graphique des groupes dans le plan des deux premières composantes

A partir du graphique de la Figure 9292, on remarque que la première composante permet de distinguer le groupe 1 des groupes 3 et 4 d'autre part. Lorsque l'on reprend les paramètres qui expliquent la première composante, on observe que les groupes 3 et 4 ont des précipitations, altitudes, pentes et un pourcentage de forêts et de sol B plus élevés que le groupe 1. A l'opposé le pourcentage de sol A et de terres arables, des températures estivales et des Y sont plus faibles pour le groupe 3 que pour le groupe 1.

La deuxième composante permet essentiellement de différencier le groupe 4 dont les bassins versants possèdent des percolations et un pourcentage de sols du groupe D, ou assimilés, plus élevés que ceux observés pour le groupe 3.

Le groupe 2 a quant à lui une position centrale et est donc caractérisé par des paramètres moyens, ce qui correspond également à sa position géographique au sein de la Région wallonne.

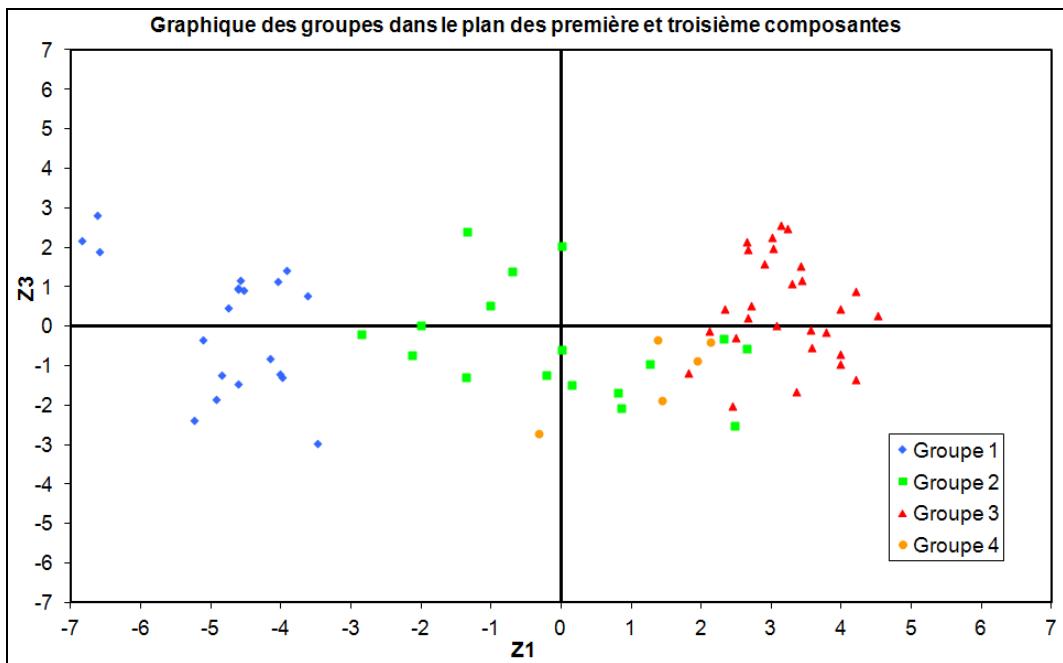


Figure 93 : Graphique des groupes dans le plan des première et troisième composantes

La Figure 93 permet une différenciation des groupes 3 et 4 mais de manière moins significative qu'à partir de la deuxième composante. On peut dire que le groupe 4 est caractérisé par des densités de drainage plus élevées et une évapotranspiration plus faible que le groupe 3.

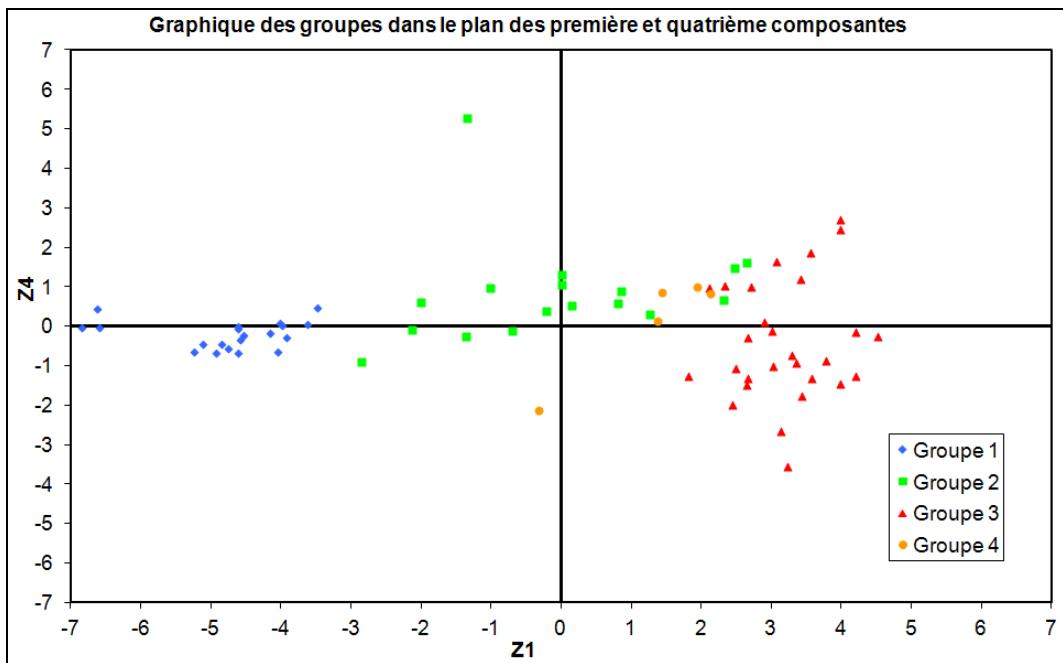


Figure 94 : Graphique des groupes dans le plan des première et quatrième composantes

Selon la quatrième composante, le groupe 4 a un pourcentage de cultures permanentes et de surfaces enherbées ainsi que des pentes plus élevées que le groupe 3. Aucune interprétation ne peut être réalisée pour les groupes 1 et 2.

4.8 Interprétation des résultats

L'analyse en composantes principales permet de visualiser globalement les relations entre les variables ainsi qu'entre les groupes et les variables. En effet, la position d'un groupe dans l'espace des composantes est parfois difficile à interpréter étant donné que les composantes sont souvent un regroupement de plusieurs variables.

Par contre, les graphiques sous forme de boxplots permettent d'affiner l'interprétation et de détecter les variables qui interviennent dans la différenciation des groupes issus de la régionalisation.

En résumé et à partir de l'analyse en composantes principales, et plus particulièrement de la première composante, on peut différencier le groupe 1 d'une part des groupes 3 et 4 d'autre part selon les précipitations, la température, l'altitude, les pentes et le pourcentage de forêts, de terres arables, de sol A et de sol B.

A partir des corrélations entre variables fournies par le logiciel SAS (Annexe 17), on remarque que les précipitations sont fortement et positivement corrélées à l'altitude ainsi qu'au pourcentage de forêts (coefficients de corrélation supérieurs à 0,80). Le pourcentage de sol A, la température estivale et le pourcentage de terres arables sont quant à eux fortement corrélés entre eux (coefficients de corrélation supérieurs à 0,75).

Les pourcentages de forêts et de terres arables ainsi que les pourcentages de sol A et de sol B sont par contre logiquement négativement corrélés (coefficients de corrélation supérieurs à 0,75). Le pourcentage de terres arables est également négativement corrélé aux pentes et aux précipitations (coefficients de corrélation supérieurs à 0,75).

La différence entre les groupes 3 et 4 est mise en évidence à partir des trois autres composantes (2, 3 et 4) et plus particulièrement au niveau de la proportion des sols C et D, des cultures permanentes et de l'évapotranspiration. Ces groupes sont également légèrement différents selon certaines variables de la première composante, à savoir la température, la proportion de territoires artificialisés, de terres arables, de sol A et de sol B.

Le groupe 2 est, par contre, assez central du point de vue des composantes, possédant donc des valeurs moyennes pour la plupart des paramètres, excepté les proportions de sol B, de sol D et de territoires artificialisés.

Le Tableau 22 synthétise les différences observées à partir des résultats de l'analyse en composantes principales entre les groupes.

Tableau 22 : Résumé des différences entre groupes

	Paramètres aux valeurs élevées	Paramètres aux valeurs faibles
Zone 1	<ul style="list-style-type: none"> - territoires artificialisés - terres arables - cultures permanentes - sol A - température 	<ul style="list-style-type: none"> - altitude - densité de drainage - pentes - forêts - surfaces enherbées - sol C - précipitations - coefficient de tarissement
Zone 2	<ul style="list-style-type: none"> - sol B 	<ul style="list-style-type: none"> - territoires artificialisés - sol D
Zone 3	<ul style="list-style-type: none"> - altitude - forêts - sol B - précipitations - coefficient de tarissement 	<ul style="list-style-type: none"> - territoires artificialisés - terres arables - cultures permanentes - sol A - sol D - température
Zone 4	<ul style="list-style-type: none"> - altitude - sol C - précipitations - percolation 	<ul style="list-style-type: none"> - ETP - coefficient de tarissement

Etant donné le regroupement géographiquement de bassins versants contigus en zones homogènes, il est apparu nécessaire de vérifier l'importance des coordonnées Lambert dans la démarche de régionalisation. Pour ce faire, la classification numérique est à nouveau réalisée sur le jeu de données à l'exclusion des coordonnées Lambert X et Y.

Si l'on maintient un nombre de quatre zones homogènes, il apparaît que l'ancien groupe 2 (Sambre, Viroin, Hoyoux, Néblon, ...) et le groupe 4 correspondant à la région de la Lorraine belge sont fusionnés. Le groupe 3 reste inchangé et on voit l'apparition d'un nouveau groupe reprenant les stations de Gendron sur la Lesse et de Membre sur la Semois qui dispose des plus grandes superficies de bassins versants.

Le regroupement du groupe 2 initial et de la Lorraine belge provient des similitudes des bassins versants au niveau de la proportion de terre arable, de forêts, de sol du groupe hydrologique A, de la température moyenne estivale. Il s'agit des paramètres les plus corrélés à la première composante principale.

Par cette démarche, on peut donc affirmer que le regroupement des bassins versants contigus en zones homogènes provient principalement des caractéristiques physiques et climatiques de la Wallonie et non d'un positionnement à l'aide des coordonnées Lambert.

5 ESTIMATION DES DÉBITS D'ÉTIAGE EN RÉGION WALLONNE POUR LES BASSINS VERSANTS NON JAUGÉS

5.1 Introduction

En l'absence de mesures, une estimation des valeurs de débit d'étiage peut être réalisée à partir des débits obtenus pour les stations de mesures utilisées et des paramètres physiques et climatiques des bassins versants correspondants.

L'objectif de cette partie du travail est d'obtenir, pour chaque zone homogène ou pour l'ensemble des bassins versants de la Wallonie, une équation de régression qui permettra, à partir d'un ou plusieurs paramètres, d'estimer une valeur caractérisant l'étiage en n'importe quel point d'un bassin versant non jaugé. (Monjoie *et al.*, 1989) (Smakhtin, 2001)

Chalise propose de discréteriser le bassin versant du point non jaugé pour lequel on souhaite définir un débit caractérisant l'étiage sur base de la réponse hydrologique aux précipitations. Le débit d'étiage est calculé à partir de la proportion de surface d'un groupe (caractérisée par son hydrogéologie) multiplié par le pourcentage du débit moyen annuel obtenu pour ce groupe. (Chalise *et al.*, 2003)

Dans un autre contexte, Bastola utilise le principe de régionalisation mais dans un objectif de détermination des paramètres d'un modèle hydrologique. Il utilise pour ce faire le principe de la régression linéaire. (Bastola *et al.*, 2007)

En Italie centrale, Castiglioni a étudié l'applicabilité d'effectuer des interpolations dans un espace à deux dimensions défini par les deux premières composantes obtenues à partir de l'analyse en composantes principales réalisées sur les paramètres physiques et climatiques (superficie du bassin versant, longueur de cours d'eau, pourcentage de zones perméables, altitude, temps de concentration). (Castiglioni *et al.*, 2009)

Gibbs propose une méthodologie basée sur la régression – régionalisation. L'objectif est de lier à partir d'équations de régression, les paramètres du modèle pluie-débit aux caractéristiques physiques des bassins versants. Ensuite, les paramètres sont calculés pour les bassins non jaugés afin d'en déterminer le débit. (Gibbs *et al.*, 2012)

Aux Royaumes-Unis, le débit moyen annuel pour les sites non jaugés sont calculés à partir d'une équation ayant comme régresseur les précipitations moyennes annuelles, l'évaporation potentielle obtenue à partir de l'équation de Penman et de la superficie du bassin versant. L'équation est obtenue à partir du bilan hydrologique réalisé sur 687 points de mesures ayant au minimum six années d'historique de données. La superficie des bassins versants de l'étude va de 0,6 à 8231 km², avec une moyenne de 283,5 km² et un écart-type de 627,6 km². (Gustard *et al.*, 1992)

$$MF = 2.70 \cdot 10^{-7} \cdot AREA^{1.02} \cdot SAAR^{1.82} \cdot PE^{-0.284} \quad (R^2 \text{ de calibration} = 0,977)$$

avec,

- MF : débit moyen annuel (m³/s),
- AREA : superficie du bassin versant (km²),
- SAAR : précipitations annuelles moyennes (mm),
- PE : évaporation potentielle (mm).

Gustard a également appliqué sa méthodologie sur l'ensemble de l'Europe, l'équation obtenue utilise les mêmes régresseurs que pour les Royaumes-Unis auxquels on ajoute une

caractéristique propre du type de sol obtenue à partir du Base Flow Index. (Gustard *et al.*, 1997)

Aux Etats-Unis, Kroll (Kroll *et al.*, 2004) a mis en place une nouvelle base de données contenant différentes informations relatives à la topographie (pente, altitude, superficie du bassin versant, ...), à la pédologie, à la géologie (perméabilité), à l'hydrogéologie (base Flow Index et constante de récession) et climatologique (précipitations et températures). A partir de ces données, une équation de régression permettant le calcul d'un débit caractéristique de l'étiage ($Q_{7,10}$: débit minimum annuel lissé sur 7 jours ayant une période de retour de 10 ans) est déterminée pour les 29 régions définies. Plus de 900 sites ont été utilisés sur l'ensemble de la zone d'étude avec en moyenne environ trente sites par régions.

Pour chaque zone homogène définie pour l'Autriche, une équation de régression permettant la détermination du percentile95 a été déterminée dans les recherches proposées par Laaha. Pour ce faire, 31 caractéristiques des bassins versants ont été utilisées et regroupées en différentes catégories : superficie, densité de drainage, pente, altitude, précipitations, géologie, occupation du sol. (Laaha et Blöschl, 2006)

Dans la démarche de Nathan, les variables les plus pertinentes pour établir un regroupement en zones homogènes sont définies à l'aide de la réalisation de régressions pas à pas. Cette étude est réalisée sur 184 bassins versants du sud-est de l'Australie. (Nathan et McMahon, 1992)

Selon Schreiber, les étiages d'un cours d'eau sont fortement influencés par les caractéristiques hydrogéologiques de la région où il se situe. L'objectif de la recherche réalisée sur le sud de l'Allemagne est de proposer une méthodologie qui fait appel à l'hydrogéologie afin de déterminer l'étiage moyen de dix journées consécutives. Finalement, la géologie, l'hydrogéologie, la pédologie et l'occupation du sol sont utilisées. La superficie des bassins versants étudiés a volontairement été limitée à 500 km². (Schreiber et Demuth, 1997)

Selon Smakhtin qui établit une revue bibliographique sur la notion d'étiage, les modèles de régression les plus couramment utilisés sont définis à l'aide de la méthode pas à pas. Le choix du descripteur de l'étiage dépend de l'expérience locale. Généralement, le débit caractérisant l'étiage est fortement corrélé à la superficie et la pente moyenne du bassin versant ainsi que la constante de récession. (Smakhtin, 2001)

Dans le Nord de l'Italie, Vezza a déterminé pour différentes régions homogènes une équation permettant la prédiction du percentile95. Les variables retenues sont la pente, l'altitude ainsi que l'occupation du sol. (Vezza *et al.*, 2010)

Cette revue bibliographique montre la diversité des méthodologies réalisées pour la détermination d'un débit caractéristique de l'étiage. Un des points communs est l'utilisation des modèles de régression, les variables retenues diffèrent selon les caractéristiques du bassin versant de départ utilisées ainsi que des régions d'étude.

5.2 Modèle régional ou modèle global

La première question qui se pose est de savoir si on détermine un modèle par groupe homogène ou un modèle global pour la Wallonie. Afin de répondre à cette question, une analyse de la variance est réalisée sur les percentiles95 exprimés sous forme de débit spécifique par groupe homogène.

Pour rappel, l'objectif de l'analyse de la variance est de comparer les moyennes de plusieurs populations supposées normales et de même variance à partir d'échantillons aléatoires, simples et indépendants les uns des autres. (Dagnelie, 1975) (Laaha et Blöschl, 2006)

L'hypothèse nulle émise pour tester l'égalité des moyennes de p populations (4 groupes dans notre cas) est :

$$H_0 : m_1 = m_2 = \dots = m_p.$$

Considérons p échantillons d'effectifs n_1, n_2, \dots, n_p . Cette hypothèse est rejetée lorsque F_{obs} est supérieur à $F_{1-\alpha}$:

$$F_{obs} = \frac{SCE_a / (p-1)}{SCE_r / (n-p)}$$

dans laquelle :

- somme des carrés des écarts factorielle : $SCE_a = \sum_{i=1}^p n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2$,
- somme des carrés des écarts résiduelle : $SCE_r = \sum_{i=1}^p \sum_{k=1}^{n_i} (x_{ik} - \bar{x}_i)^2$.

Une valeur de α égale à 0,05 est prise en considération dans le cadre de cette analyse de la variance. $F_{1-\alpha}$ vaut dès lors 2,78.

Puisque F_{obs} est égal à 2,51, l'hypothèse nulle ne peut être rejetée (p-value de 0,0682 supérieure au seuil fixé de 0,05) et les moyennes des débits par zone homogène ne peuvent donc pas être considérées comme significativement différentes.

Tableau 23 : Tableau d'analyse de la variance

	Degrés de liberté	Somme des carrés des écarts
SCE_a	3	0,0000169
SCE_r	55	0,0001235
SCE_t	58	0,0001404

De plus, le coefficient de détermination R^2 de l'analyse de la variance vaut 0,1204, ce qui signifie que cette répartition en zones homogènes n'explique que 12% de la variabilité spatiale des débits spécifiques.

La Figure 9595 présente le boxplot qui permet d'illustrer la différence non significative des moyennes entre les groupes homogènes obtenus lors de la régionalisation.

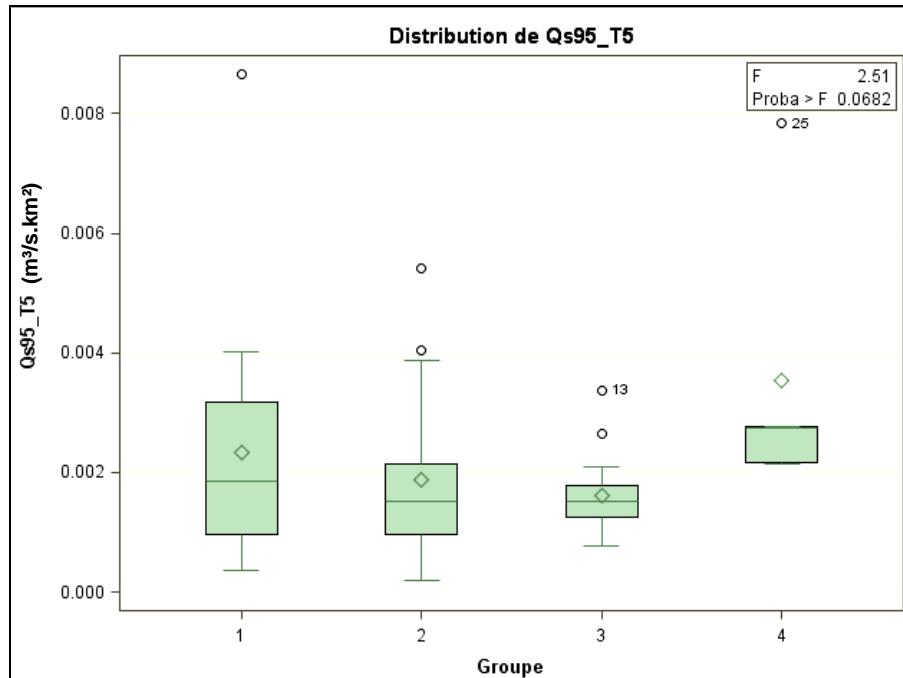


Figure 95 : Boxplot illustrant l'égalité des moyennes des percentiles95 spécifiques entre les groupes homogènes

De plus, le nombre de stations par zone homogène est assez restreint et ceci pourrait engendrer un non-respect des conditions d'application de la régression. En effet, nous ne disposons que d'un effectif total de départ inférieur à soixante points de mesures. Par exemple, pour la zone homogène 4 (Lorraine belge), nous ne retrouvons que cinq points de mesures. Or, dans certaines études, le nombre de stations de mesures atteint frôle les 1000 unités. (Kroll *et al.*, 2004)

Finalement, pour ces raisons, un modèle global pour l'ensemble de la Région wallonne sera donc déterminé. Il est cependant important de rappeler que le tri initial des stations reposait en partie sur l'historique disponible, le réseau étant relativement jeune. Le choix ici posé pourrait donc être amené à être modifié à moyen terme.

5.3 Modèle linéaire ou non linéaire

La deuxième question qui se pose avant d'entamer toute démarche de régression est le choix du type de modèle qui sera utilisé. En effet, nous pouvons utiliser soit un modèle linéaire, soit un modèle non linéaire.

Dans la revue sur les étiages réalisée en 2001, Smakhtin écrivait déjà que le meilleur modèle pour la prévision des débits d'étiage en un point d'un cours d'eau non jaugé était la régression linéaire. (Smakhtin, 2001)

Depuis d'autres études ont montré que le modèle linéaire est régulièrement utilisé. (Bastola *et al.*, 2008) (Kroll *et al.*, 2004) (Laaha et Blöschl, 2007) (Seiber, 2009) (Vezza *et al.*, 2010) (Yadav *et al.*, 2007) (Young, 2006)

Dans un chapitre ultérieur, nous vérifierons l'existence potentielle d'une relation linéaire entre les paramètres calculés dans le cadre de la régionalisation des débits et le débit caractérisant l'étiage.

5.4 La régression linéaire multiple

5.4.1 Introduction

L'objectif de la régression linéaire multiple est de déterminer un modèle qui permet d'estimer le plus précisément possible la valeur de la variable Y ou variable à expliquer à partir des valeurs associées aux variables x ou variables explicatives.

La finalité de cette démarche est de trouver une équation du paramètre caractérisant l'étiage (percentile95) en fonction des paramètres physiques et climatiques du bassin versant du cours d'eau dont on souhaite obtenir le percentile95.

L'équation générale d'une régression linéaire multiple est :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \varepsilon_i$$

dans laquelle β_i sont les coefficients de régression et ε_i les erreurs.

Ces coefficients sont estimés à partir de la méthode des moindres carrés qui cherche à minimiser la somme des carrés des écarts entre Y observé et Y estimé par l'équation de régression.

5.4.2 Les conditions d'application d'un modèle de régression

A. Variables indépendantes

Une des conditions d'application d'un modèle de régression linéaire multiple est qu'une variable calculée, dite variable dépendante doit être exprimée en fonction de plusieurs variables indépendantes.

A la vue de la matrice de corrélation des paramètres utilisés dans le cadre de ce travail (Annexe 17), il est évident que des relations existent entre certaines variables. A titre d'exemple, on observe une corrélation de -0,699 entre l'altitude et la proportion de terres arables ou encore, une valeur de corrélation de -0,744 entre la proportion de forêts et la proportion de sols du groupe hydrologique A.

Les variables utilisées pour la détermination de l'équation de régression seront considérées indépendantes malgré le fait que certaines d'entre elles sont corrélées.

B. Normalité des résidus

Un résidu au point i peut être défini comme étant la différence entre le Y observé et le Y estimé par le modèle de régression :

$$\varepsilon = Y_i - \hat{Y}_i .$$

Une des conditions d'application d'un modèle de régression, considérée vérifiée a priori, est que les erreurs doivent être indépendantes et identiquement distribuées selon une loi normale.

La normalité des résidus peut être vérifiée par le graphique de leur distribution sous forme d'histogramme, ainsi que par le graphique des résidus en fonction des quantiles de la loi Normale appelé graphique Q-Q (Figure 9696). Ce dernier permet de vérifier graphiquement l'adéquation à la loi Normale ($0, s^2$) où s^2 est estimé par le carré de l'écart moyen résiduel. Pour ce faire, on demande dans le logiciel SAS, le tracé de R (variable interne des résidus) contre NQQ (variable interne contenant les quantiles de la loi Normale).

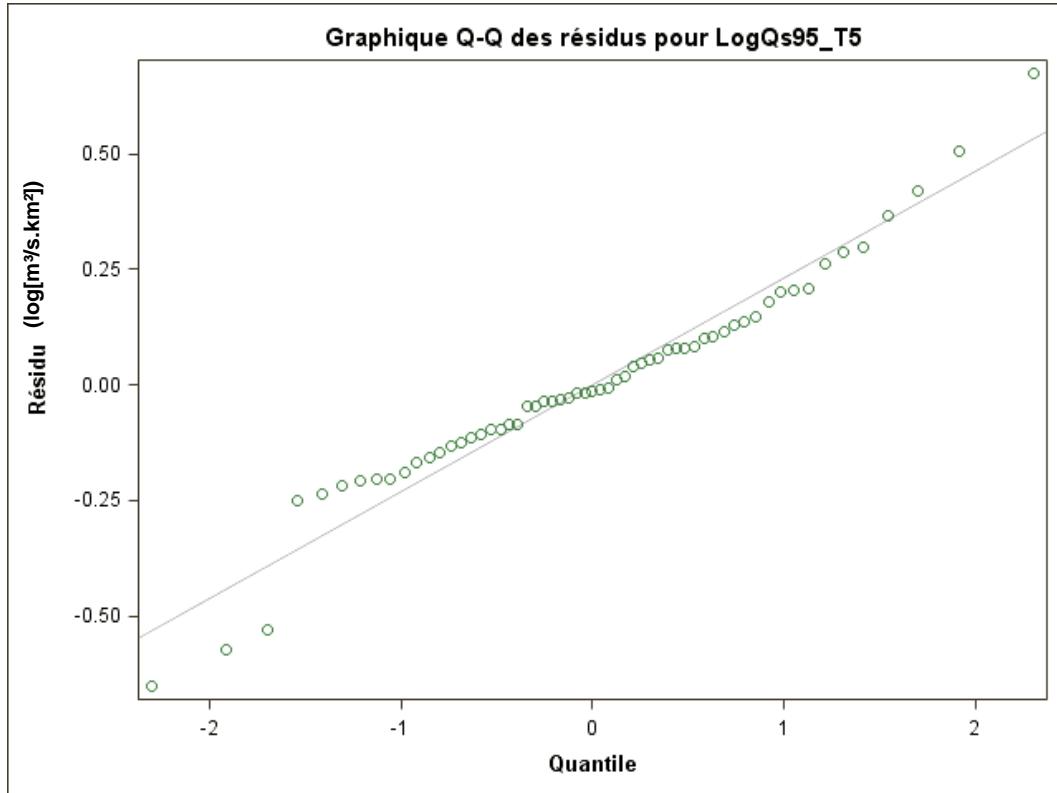


Figure 96 : Exemple de vérification de la normalité des résidus

A partir de la Figure 9696, on peut observer que les points (x_i, u_i) sont alignés sur la droite d'équation $u_i = (x_i - m) / \sigma$.

C. Egalités de la variance des résidus

De plus, les résidus doivent être d'égale variance (homoscédasticité). Pour ce faire, les graphiques des résidus en fonction de l' Y estimé (Figure 9797 et Figure 9898), permettent de visualiser si les résidus sont répartis dans une bande horizontale de valeurs autour de 0. Sinon, on peut alors détecter quelle est la variable responsable de l'hétérosécédasticité grâce aux graphiques des résidus contre les différents régresseurs X_j .

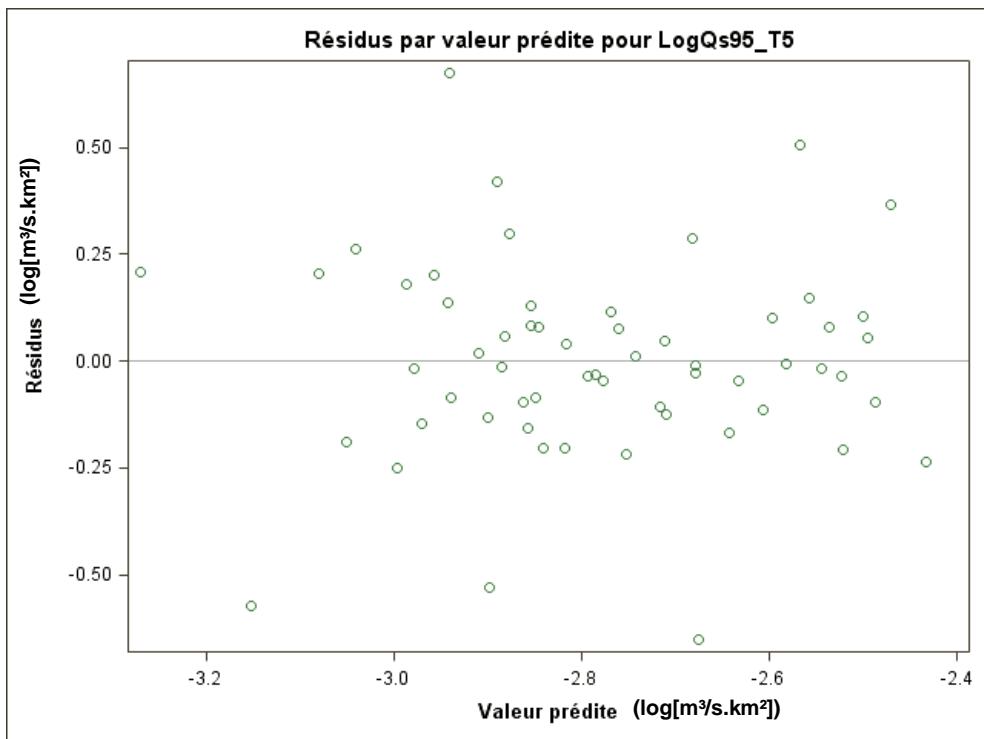


Figure 97 : Exemple de graphique réalisé pour la vérification de l'homoscédasticité des résidus (cas d'homoscédasticité)

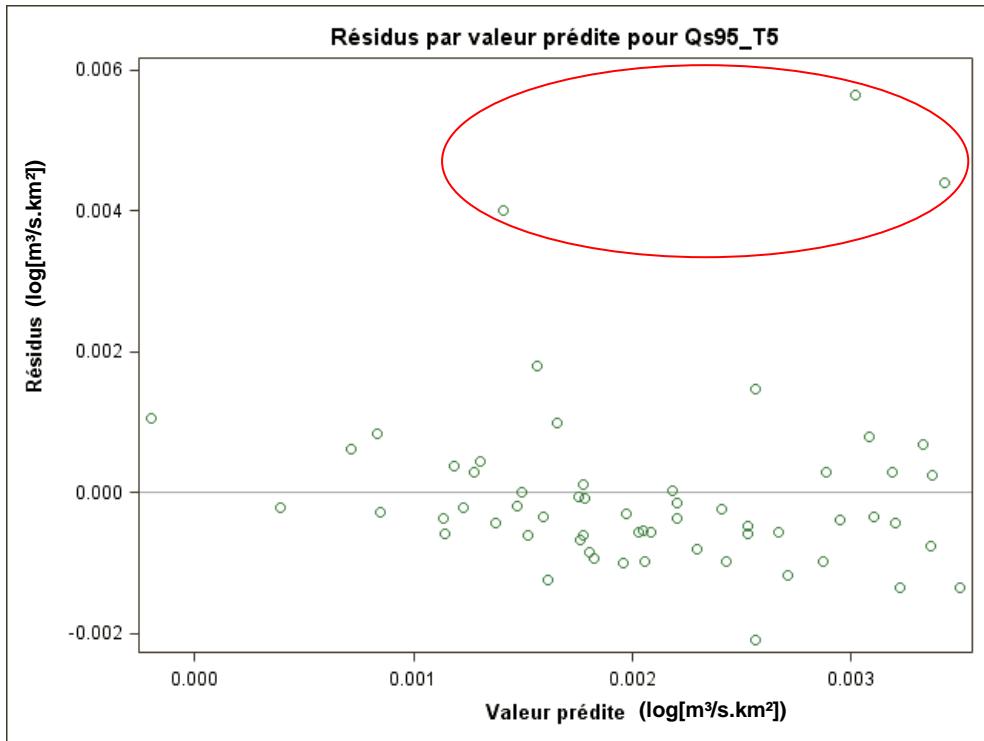


Figure 98 : Exemple de graphique réalisé pour la vérification de l'homoscédasticité des résidus (cas d'hétéroscélasticité)

La Figure 97 montre un cas d'homoscédasticité tandis que la Figure 98 indique un cas d'hétéroscélasticité par la présence de trois points situés au-dessus de la bande horizontale formée par les autres observations.

5.4.3 Formulation mathématique

La formulation mathématique de la régression linéaire peut être représentée sous forme de calcul matriciel :

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

dans laquelle,

- Y est le vecteur colonne des n observations de la variable à expliquer ;
- $X(n,p)$ la matrice des observations des p vecteurs X_i , chacun de dimension $(n,1)$. A cette matrice, une première colonne constituée uniquement de 1 est ajoutée, ce qui correspond au vecteur de la constante X_0 . La matrice X est donc de dimension $(n,p+1)$. La constante X_0 peut donc être considérée comme une variable explicative ;
- β est le vecteur colonne des $(p+1)$ coefficients de régression ou paramètres inconnus β_i ;
- ε représente le vecteur des erreurs.

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1p} \\ 1 & & & & \\ 1 & & & & \\ \dots & & & & \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \dots \\ \beta_p \end{pmatrix} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_p \end{pmatrix}$$

Les coefficients β_i qui minimisent le critère des moindres carrés peuvent être déterminés par le système d'équations à résoudre obtenu à partir de la représentation matricielle :

$$(XX')B = (X'Y)$$

dans laquelle, X' désignant la matrice transposée de X .

Le vecteur B des coefficients solution s'obtient donc en inversant la matrice $(X'X)$:

$$B = (XX')^{-1}(X'Y).$$

La résolution du système d'équations n'est pas toujours réalisable car cette dernière est conditionnée par la possibilité d'inversion de la matrice $(X'X)$.

En effet, si nous supposons que deux variables X_i et X_j sont corrélées entre elles, c'est-à-dire qu'il existe une relation linéaire permettant de passer de X_i à X_j , nous avons donc deux lignes de la matrice $(X'X)$ qui sont proportionnelles. Lorsque l'on souhaite résoudre le système, il ne reste plus que p équations indépendantes et tandis que nous avons toujours $(p+1)$ inconnues à trouver. Le système est alors indéterminé, il existe une infinité de solutions. On parle alors de colinéarité. Ce point sera explicité dans un chapitre ultérieur.

5.4.4 Analyse de la variance

Afin de déterminer les variables à prendre en considération dans le modèle de régression, le principe de l'analyse de la variance est utilisé.

Considérons l'équation de cette analyse :

$$SCE_{\text{Totale}} = SCE_{\text{Modèle}} + SCE_{\text{Erreur}}$$

dans laquelle, si on considère que \hat{Y}_i est l'estimation de Y_i obtenue à partir de la droite de régression retenue :

$$\begin{aligned} SCE_{\text{Modèle}} &= \sum_{i=1}^n \left(\hat{Y}_i - \bar{Y} \right)^2 \text{ avec } p \text{ degrés de liberté,} \\ SCE_{\text{Erreur}} &= \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \hat{Y}_i \right)^2 \text{ avec } n-p-1 \text{ degrés de liberté,} \\ SCE_{\text{Totale}} &= \sum_{i=1}^n \left(Y_i - \bar{Y} \right)^2 \text{ avec } n-1 \text{ degrés de liberté.} \end{aligned}$$

SCE_{Totale} , représentant la somme des carrés des écarts entre Y et sa moyenne, est invariant quel que soit le nombre de variables explicatives p dans le modèle.

Lorsque l'on introduit une nouvelle variable explicative dans un modèle, la somme des carrés des écarts du modèle $SCE_{\text{Modèle}}$ augmente et donc la somme des carrés des écarts des erreurs SCE_{Erreur} diminue de la même quantité.

Le logiciel SAS fournit deux types de SCE_{Erreur} :

- TYPE I SS : correspond à la réduction de SCE_{Erreur} liée à la variable lorsqu'elle est introduite séquentiellement dans le modèle.
- TYPE II SS : correspond à la réduction de SCE_{Erreur} liée à la variable lorsqu'elle est introduite la dernière dans le modèle.

A la valeur de TYPE I SS, une valeur de F (Fischer-Snedecor) peut être associée :

$$F_{\text{Obs}} = \frac{\text{TYPEISS}}{MS_{\text{ERREUR}}}.$$

Pour rappel, le numérateur TYPE I SS correspond à la réduction de SCE_{Erreur} lorsque l'on passe du modèle à $(k-1)$ régresseurs - la variable étudiée étant exclue - au modèle à k régresseurs.

La variance de l'erreur est représentée par MS_{Erreur} correspondant au modèle complet à p régresseurs et est obtenue par :

$$MS_{\text{ERREUR}} = \frac{SCE_{\text{Erreur}}}{n-p-1}.$$

L'hypothèse nulle H_0 suivante du test de signification peut dès lors être émise :

$$H_0 : \beta_k = 0.$$

L'hypothèse nulle H_0 doit être rejetée au niveau de signification de α lorsque F_{Obs} est supérieur ou égal à la variable F de Fischer-Snedecor à 1 et $n-p-1$ degrés de liberté :

$$F_{Obs} \geq F_{1-\alpha}(1, n-p-1).$$

De la même manière, à la valeur de Type II SS, une variable F de Fischer-Snedecor peut être associée :

$$F_{Obs} = \frac{TYPEIISS}{MS_{ERREUR}}.$$

L'hypothèse nulle H_0 suivante peut également être émise :

$$H_0 : \beta_k = 0.$$

H_0 est rejetée au niveau de signification de α lorsque F_{Obs} est supérieur ou égal à la variable F de Fischer-Snedecor à 1 et $n-p-1$ degrés de liberté :

$$F_{Obs} \geq F_{1-\alpha}(1, n-p-1).$$

Un rejet de l'hypothèse nulle signifie que la variable introduite dans le modèle est significative.

Si le modèle de régression obtenu ne comporte qu'une seule variable explicative alors, TYPE I SS = TYPE II SS = SCE_{Modèle}.

Si pour un régresseur X_i , le F obtenu à partir de TYPE I SS et le F obtenu à partir de TYPE II SS sont plus grands que ceux des autres régresseurs, alors X_i a une contribution plus grande puisqu'il réduit plus la variation de SCE_{Erreur}, que la variable soit entrée en séquence dans le modèle ou en dernier.

Si pour un régresseur X_i , le F obtenu à partir de TYPE I SS est significatif et le F obtenu à partir de TYPE II SS ne l'est plus, c'est qu'on est en présence de colinéarités entre les régresseurs. L'information apportée par ce régresseur est redondante par rapport à l'information apportée par les précédents régresseurs déjà introduits dans le modèle. Le problème des colinéarités sera abordé ultérieurement lors de la validation des modèles de régression.

5.4.5 Coefficient de détermination

Afin d'apprécier la qualité d'un modèle de régression, on utilisera le coefficient de détermination R^2 qui pour rappel, se calcule à l'aide de la formule suivante :

$$R^2 = \frac{SCE_{Modèle}}{SCE_{Totale}}.$$

5.4.6 Modèles de régression linéaire

La construction d'un modèle de régression a pour objectif d'obtenir un nombre réduit de variables non corrélées et offrant la plus grande précision possible. (Claustriaux, 2007)

Pour cela, la méthode de régression pas à pas ou stepwise peut être utilisée car elle maximise la robustesse et la puissance prédictive du modèle et minimise les colinéarités entre variables (Laaha et Blöschl, 2007). Cette méthode se base sur le calcul de la statistique F reflétant la contribution de la variable dans le modèle. Le modèle ne contient pas de variable au départ et la première variable introduite est celle qui possède la valeur de F la plus élevée, c'est-à-dire la variable qui contribue le plus au modèle. Ensuite, à chaque étape, la statistique F est recalculée pour chaque variable et trois alternatives sont considérées : ajouter, supprimer ou échanger une variable. La procédure s'arrête lorsque plus aucune variable ne contribue significativement au modèle, le niveau de signification de la p-value associée à F étant fixé à 0,05. (Claustriaux, 2007)

De plus, deux autres méthodes liées au coefficient de détermination R^2 seront testées. Le coefficient de détermination représente la part de variabilité de Y expliquée par le modèle. (Claustriaux, 2007)

La méthode du gain maximal sur le R^2 permet de trouver le « meilleur » modèle pour chaque nombre de variables. La première étape consiste à sélectionner la variable qui est la plus corrélée à la variable Y et qui engendre donc le modèle à une variable possédant le plus grand R^2 . La variable qui provoque la plus grande augmentation du R^2 est ensuite ajoutée au modèle. Toutes les permutations entre une variable du modèle et une autre variable sont alors examinées et celle qui produit un gain maximal au niveau du R^2 est effectuée. Cette procédure est répétée jusqu'à ce qu'il n'existe plus de permutations augmentant le R^2 , et pour chaque nombre de variables. Parmi tous les modèles, celui caractérisé par le coefficient de Mallow (C_p) se rapprochant le plus du nombre de variables augmenté de 1 ($p+1$) est choisi. Ce coefficient est basé sur la recherche des variables ayant le meilleur pouvoir prédictif et permet de comparer des modèles différant par le nombre de variables et la précision atteinte. (Confais et Le Guen, 2006)

La dernière méthode calcule tous les modèles possibles, et celui présentant la valeur du R^2 ajusté le plus élevé est choisi. Le R^2 ajusté tient compte des degrés de liberté et permet donc de comparer des modèles comportant un nombre différent de variables. (Confais et Le Guen, 2006)

Le coefficient de détermination R^2 peut approcher la valeur de 1 qui traduit un très bon modèle de régression lorsque l'on ajoute suffisamment de variables explicatives.

Un coefficient de détermination ajusté peut alors être calculé et ce dernier tient compte du rapport p/n entre le nombre de paramètres du modèle et le nombre d'observations.

Le coefficient de détermination R^2 ajusté est obtenu à partir de la formule suivante :

$$R^2_{Ajusté} = 1 - \frac{((n-1)(1-R^2))}{n-p}.$$

Pour ces deux dernières méthodes, les variables non significatives (p-value > 0,05) sont supprimées des modèles une à une.

5.4.7 Problème des colinéarités

La colinéarité provient de problèmes d'inversion de $X'X$ qui entraînent une augmentation des variances des coefficients, et donc leur instabilité. La non-inversion de $X'X$ se rencontre lorsqu'il existe des combinaisons linéaires entre les colonnes de X , c'est-à-dire que l'on observe des corrélations entre les régresseurs.

En présence de colinéarité, la variance des estimateurs des paramètres infectés par cette dernière peut devenir importante. Or, pour rappel, un test de signification est réalisé sur le coefficient β_i . Même si l'on observe que le régresseur X_i semble fournir une information importante sur Y , s'il est colinéaire à un ou plusieurs autres régresseurs, la variance estimée de l'estimateur sera élevée de manière à ce que la statistique du test de signification devienne très petite. De ce fait, le test ne permettra plus de traduire l'hypothèse que l'on avait a priori sur la qualité du régresseur X_i pour expliquer Y . On aura donc une fausse idée de la contribution de la variable.

La colinéarité statistique crée donc des difficultés importantes dans l'interprétation des résultats.

La colinéarité peut être décelée de plusieurs manières. Lorsque les signes des coefficients sont opposés à ceux dont on s'attend par intuition ou après avoir examiné les corrélations entre la variable à expliquer et les variables explicatives.

La colinéarité peut également être observée lorsque l'on voit apparaître un grand changement dans les coefficients quand on ajoute ou enlève un régresseur.

Une autre méthode pour évaluer la colinéarité consiste à estimer le VIF (Variance Inflation Factor). La méthode de détermination de cette valeur est explicitée ci-après.

On note \mathbf{R} la matrice de corrélation entre les p variables X_1, \dots, X_p . On la suppose inversible (de rang p) et elle possède donc p valeurs propres strictement positives.

Nous pouvons écrire que :

$$(XX') = nR$$

Dans laquelle \mathbf{R} est la matrice carrée symétrique des coefficients de corrélation entre les p régresseurs.

Le coefficient d'inflation de la variance est obtenu à l'aide de l'équation suivante :

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2}$$

Dans laquelle R_j^2 est le coefficient de détermination multiple de la régression avec constante de X_j sur les $(p-1)$ autres variables. Le facteur d'inflation de la variance est donc d'autant plus grand que la variable X_j est corrélée aux autres variables explicatives.

Lorsqu'une valeur du VIF supérieure à 10 est observée, cela traduit un problème de colinéarité. Dans ce cas, la variable en question est supprimée du modèle de régression. (Kroll *et al.*, 2004)

Afin de détecter la présence de colinéarité, on peut également utiliser l'indice de conditionnement qui est obtenu selon la méthodologie suivante.

On note $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p$ les valeurs propres de la matrice R rangées par ordre décroissant. Le déterminant de la matrice R est égal au produit des valeurs propres. Ainsi, des problèmes numériques ou de variances excessives apparaissent dès que les dernières valeurs propres sont relativement trop petites.

L'indice de conditionnement est obtenu en calculant le rapport de la plus grande sur la plus petite valeur propre :

$$k = \sqrt{\frac{\lambda_1}{\lambda_p}}.$$

En pratique, si l'indice de conditionnement est inférieur à 30, on peut considérer qu'il n'y a pas de problème de colinéarité tandis qu'au-dessus de la valeur de 1000, il faut être vigilant.

L'indice de conditionnement fournit une vision globale des problèmes liés à la colinéarité tandis que les coefficients d'inflations de la variance permettent d'identifier les variables les plus problématiques.

5.4.8 Recherche de valeurs influentes

De manière à obtenir un modèle de régression plus robuste, il est important de rechercher les valeurs influentes, c'est-à-dire des valeurs qui se situent en dehors du nuage de points ou encore au niveau de la queue de ce dernier.

Pour ce faire, un critère de recherche des valeurs influentes est la distance de Cook D_i . Pour chaque observation i , la distance entre le vecteur B des coefficients de la régression et le vecteur $B(-i)$ obtenu en refaisant la régression sans l'observation i est calculée. La distance de Cook se mesure à l'aide de $(X'X)$ et est normée par s^2 , estimation de σ^2 .

La distance de Cook D_i est obtenue à partir de la formule suivante :

$$D_i = \frac{|B - B(-i)|^2 (X'X) B - B(-i)}{(p+1)s^2}.$$

La distance de Cook étant normée, une valeur supérieure à 1 peut être considérée comme suspecte. Une valeur élevée de la distance de Cook signifie que la valeur est influente et joue un rôle prépondérant dans le calcul des coefficients de régression.

Afin que les conclusions issues du modèle de régression ne soient pas biaisées, la valeur influente est écartée si elle est considérée comme anormale et un nouveau modèle de régression est déterminé. (Palm, 1988) (Laaha et Blöschl, 2007) (Confais et Le Guen, 2006)

5.4.9 Validation du modèle de régression

Une autre méthode de vérification de la qualité d'un modèle est la validation croisée qui consiste à redéfinir le modèle de régression en enlevant une observation et à utiliser ce modèle pour calculer la valeur de Y pour l'observation en question.

Le root-mean-square error (RMSE), écart moyen résiduel, permet de comparer la validation croisée des différents modèles. Il évalue la performance prédictive du modèle et est calculé selon la formule suivante (Laaha et Blöschl, 2006) (Vezza et al., 2010) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

dans laquelle,

- n est le nombre d'observations (stations) ;
- Y_i est la valeur observée de Y pour l'observation i ;
- \hat{Y}_i est la valeur prédictée de Y pour l'observation i par le modèle défini après avoir supprimé cette observation i .

Cette méthode de validation n'est pas appliquée dans le cadre de ce travail étant donné que nous disposons de stations de validation. Celles-ci sont des stations de mesures qui n'ont pas été retenues dans le cadre de ce travail étant donné leur faible historique de données (15 – 20 ans). Il s'agit de l'ensemble des points de mesures utilisé dans le cadre de l'affinage lors du travail de régionalisation.

Les paramètres physiques sont calculés pour les bassins versants de ces points de mesures.

Ensuite, à partir des équations de régression obtenues, les valeurs prédictées des percentiles95 spécifiques sont calculées et comparées aux valeurs observées.

Les modèles de régression peuvent être comparés grâce aux paramètres suivants (Laaha et Blöschl, 2006) (Vezza et al., 2010) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}$$

où,

- Y_i est la valeur observée de Y pour l'observation i ;
- \hat{Y}_i est la valeur prédictée de Y pour l'observation i .

La Figure 9999 présente la répartition des stations de mesures de validation sur l'ensemble de la Wallonie.

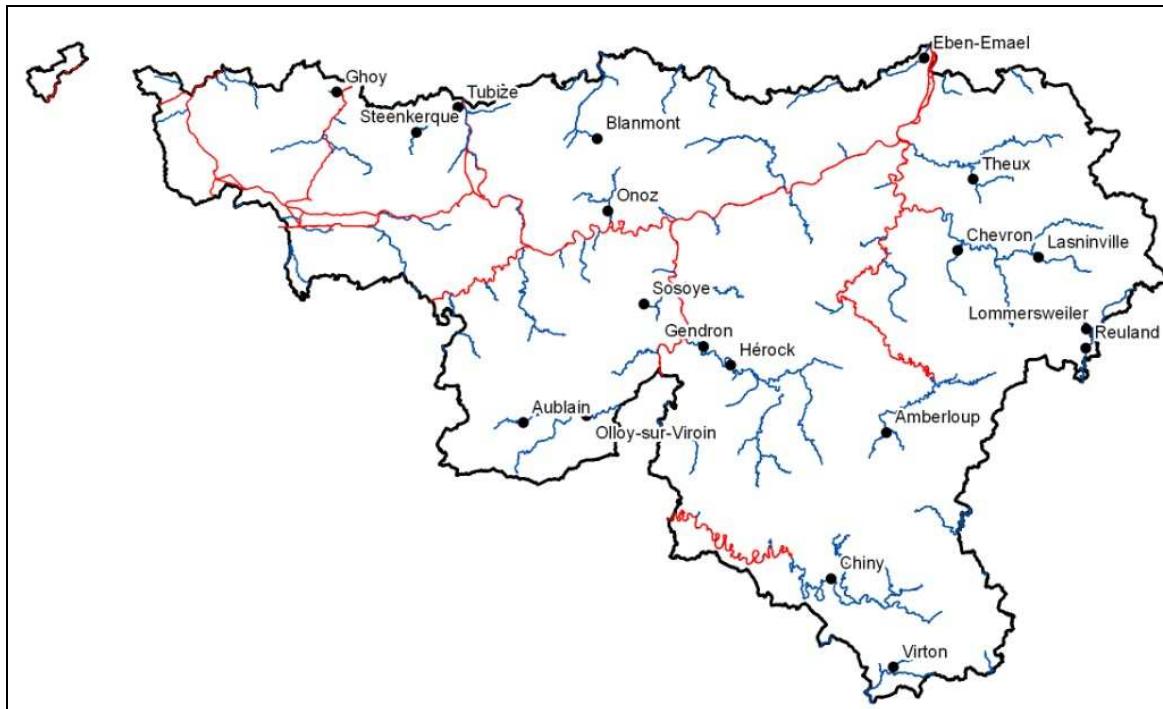


Figure 99 : Répartition des stations de mesures utilisées pour la validation des modèles de régression

5.4.10 Intervalle de confiance d'un modèle de régression

Afin de quantifier la précision des valeurs estimées, un intervalle de confiance doit être calculé. L'intervalle de confiance pour l'estimation d'une valeur à partir d'une équation de régression est appelé intervalle de prédiction. (Verdel, 2007)

Il tient compte de l'erreur liée à la calibration du modèle ainsi que de l'erreur associée aux observations avec lesquelles on veut calculer la valeur estimée.

Les limites de l'intervalle sont calculées comme suit (Dagnelie, 2006) (Olive, 2007) :

$$\hat{y} \pm t_{1-\alpha/2} (n - k - 1) se[\hat{y}^*]$$

où

- \hat{Y}^* est la valeur estimée ;
- $t_{1-\alpha/2}$ est issu de la distribution t de Student à $n-k-1$ degré de liberté, n étant le nombre d'observations et k le nombre de variables. Dans notre cas, pour un risque α de 5%, $t_{0,975}$ avec 56 degrés de liberté est égale à 2,003 ;
- $se[\hat{Y}^*]$ est l'écart-type de la valeur estimée obtenu à partir de l'équation suivante :

$$se[\hat{y}^*] = s \sqrt{1 + X^{*T} (X^T X)^{-1} X^*}$$

avec

- $s = \text{SCE}/n-k-1 = \text{RMSE}$;
- X est la matrice des observations qui ont servi à la calibration du modèle ;
- X^* est le vecteur des observations qui ont servi à calculer la valeur estimée ;
- X^T est la matrice transposée, obtenue en permutant les lignes et les colonnes de X ;
- X^{-1} est la matrice inverse, calculée par la formule $C^T/\det X$ où $\det X$ est le déterminant de la matrice X et C est la comatrice de X c'est-à-dire la matrice des cofacteurs de X .

5.5 Etape intermédiaire de la recherche du modèle de régression pour les cours d'eau de Wallonie

5.5.1 Superficie des bassins versants

Etant donné qu'il est communément admis que la superficie du bassin versant du cours d'eau étudié joue un rôle prépondérant dans la détermination du débit d'un cours d'eau, cette variable n'est pas prise en considération lors de la recherche du modèle de régression.

En effet, par exemple, le coefficient de corrélation entre le percentile95 de période de retour de 5 ans et la superficie est de 0,78.

Dans la recherche du modèle, les percentiles95 ont été exprimés en débit spécifique soit en $\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ ($Q95_s$).

Il est à remarquer que le bassin versant utilisé est celui de surface et non le bassin versant hydrogéologique.

5.5.2 Application d'une transformation de variable

Après la réalisation des différents modèles de régression sur base du jeu de données, il s'est avéré indispensable d'appliquer une transformation logarithmique sur les débits spécifiques utilisés ($Q95_s$).

Pour rappel, un des critères de validation du modèle de régression est la normalité des résidus de ce dernier. Suite à cette transformation logarithmique, la normalité des résidus a été améliorée pour les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour, à savoir 2, 5, 10, 20 et 50 ans.

A titre d'exemple, les Figure 100100 et Figure 101101 présentent les graphiques décrivant la normalité des résidus obtenus pour le modèle calculé pour une période de retour de 5 ans respectivement avant et après l'application d'une transformation logarithmique des $Q95_s$. La symétrie de la distribution des résidus est améliorée et cette dernière se rapproche de la distribution Normale.

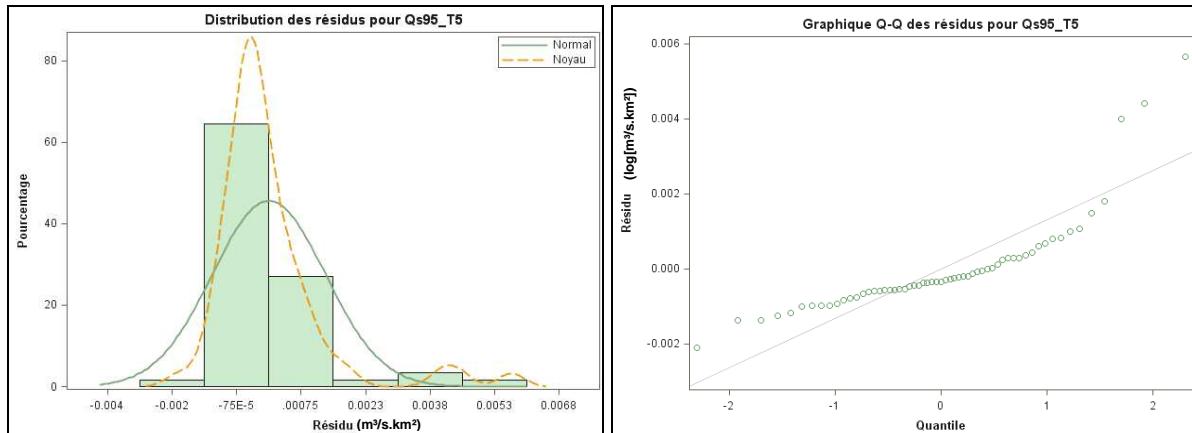


Figure 100: Normalité des résidus pour le modèle obtenu pour la période de retour 5 ans avant la transformation de variables

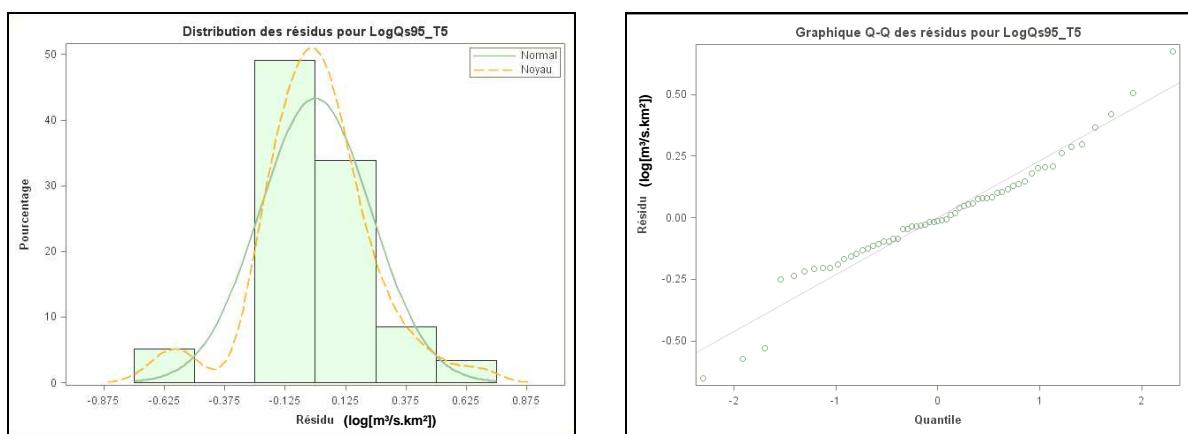


Figure 101 : Normalité des résidus pour le modèle obtenu pour la période de retour 5 ans après la transformation de variables

Etant donné que le nombre de valeurs prédites de débit qui sont éloignées des valeurs observées correspondantes augmentent avec le débit spécifique observé, le fait d'appliquer une transformation logarithmique aux Q95_s permet de diminuer cette différence. (Laaha et Blöschl, 2006)

La Figure 102102 illustre la diminution de l'écart entre les valeurs observées et les valeurs prédites pour les valeurs élevées du Q95_s de période de retour 5 ans.

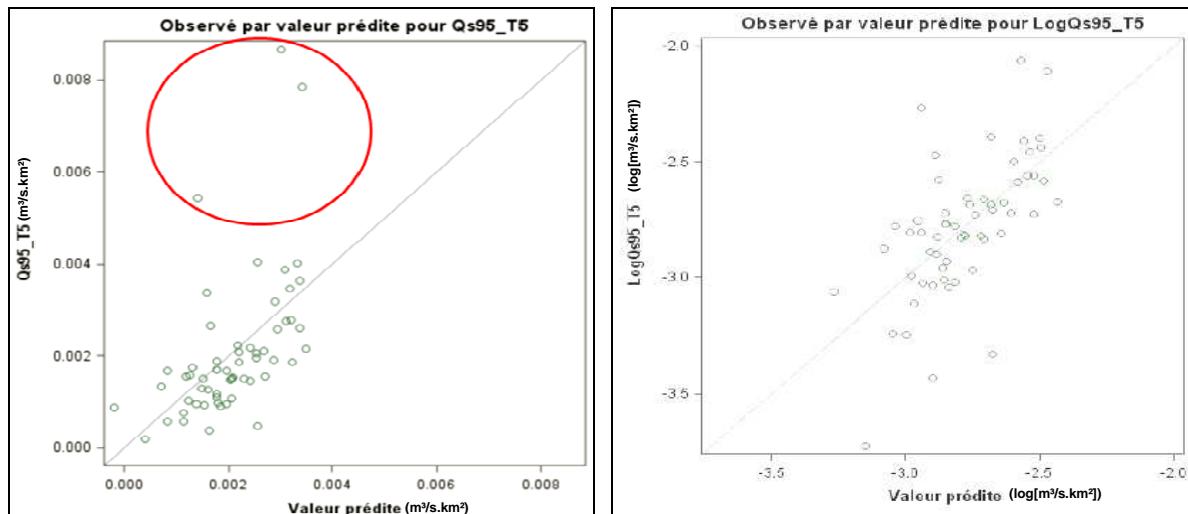


Figure 102 : Observation de l'augmentation du nombre de valeurs prédictes de débit qui sont éloignées des valeurs observées correspondantes avec le débit spécifique observé

Le dernier avantage que la transformation logarithmique va apporter est l'absence de valeurs prédictes négatives de percentiles95 spécifiques.

5.5.3 Recherche d'une relation linéaire entre le débit caractérisant l'étiage et les caractéristiques des bassins versant

Ce présent chapitre a pour objectif de détecter a priori l'existence d'une relation linéaire entre les caractéristiques des bassins versants et de la variable décrivant l'étiage, soit le logarithme du percentile95 (LogQ_s95). Seuls, les graphiques (Figure 103103) montrant l'existence d'une tendance d'une relation sont présentés, et ce dans le cas d'une période de retour équivalente à 5 ans.

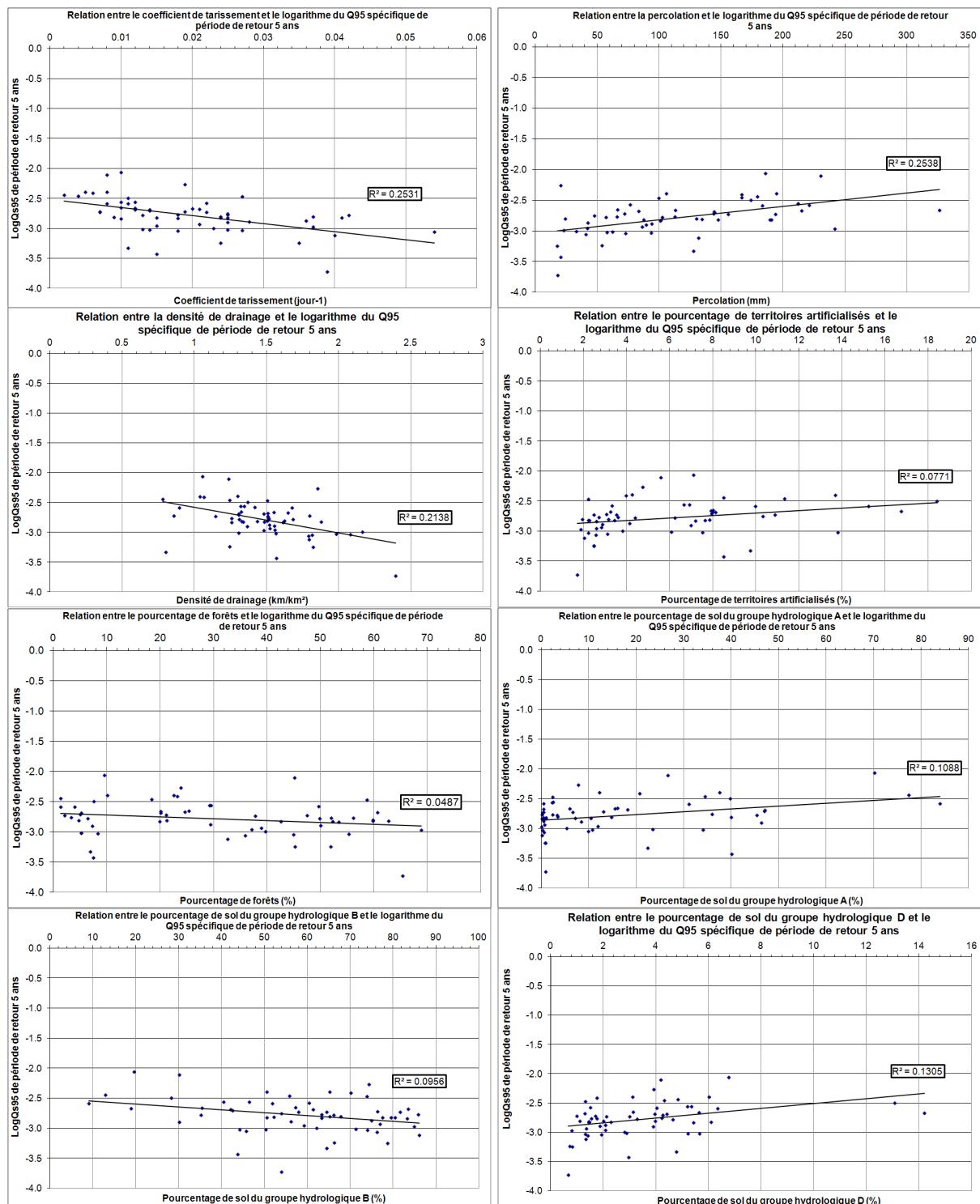


Figure 103 : Relation entre les caractéristiques des bassins versants et le logarithme du percentile95 spécifique de période de retour 5 ans

On peut remarquer que les meilleurs coefficients de détermination sont obtenus pour les caractéristiques hydrogéologiques des bassins versants (percolation et coefficient de tarissement) ainsi que pour la densité de drainage. Ensuite, viennent les sols des groupes hydrologiques A, B et D et enfin l'occupation du sol avec le pourcentage de territoires artificialisés et de forêts.

Cette tendance est également observée pour les périodes de retour plus importantes. On remarque que plus cette dernière augmente, meilleure est la relation avec le coefficient de tarissement. On obtient un coefficient de détermination R^2 de 0,32 pour une période de 50 ans, ce qui signifie que plus l'étiage est sévère, plus on aura une relation entre la nappe et le cours d'eau importante.

5.5.4 Choix du modèle de régression

Afin de choisir la meilleure méthode de recherche d'un modèle de régression, des tests ont été réalisés pour les trois possibilités décrites dans ce texte, à savoir, stepwise, gain maximum du R^2 , sélection avec comparaison des valeurs du R^2 ajusté.

Le Tableau 24 présente les résultats des trois méthodes de calcul d'un modèle de régression. Les valeurs présentées sont les coefficients de détermination du modèle, les RMSE (écart moyen résiduel) du modèle et de la validation ainsi que les coefficients de détermination de la validation.

Il est à remarquer que les méthodes du gain maximum du R^2 et de sélection avec comparaison des valeurs du R^2 ajusté donnent les mêmes modèles, c'est pourquoi les résultats obtenus sont présentés dans la même colonne.

Tableau 24 : Comparaison de trois méthodes de détermination d'un modèle de régression

	Stepwise	Gain maximum du R^2 Sélection R^2 ajusté
R^2 modèle	0,705	0,744
R^2 ajusté modèle	0,695	0,735
RMSE modèle	0,213	0,198
RMSE validation	0,215	0,301
R^2 validation	0,828	0,662
R^2 ajusté validation	0,807	0,566

Les méthodes du gain maximum du R^2 et de sélection avec comparaison du R^2 ajusté donnent un meilleur résultat lorsque l'on regarde les coefficients de détermination ajustés du modèle ainsi que pour l'écart moyen résiduel.

Par contre, lorsque l'on compare les résultats obtenus à partir des stations de mesures retenues pour la validation des modèles, on peut observer que l'écart moyen résiduel du modèle obtenu par la méthode stepwise est plus faible que pour les deux autres méthodes. De plus, le coefficient de détermination ajusté de la validation est plus important.

Etant donné que l'objectif de ce travail est de pouvoir estimer en n'importe quel point d'un linéaire d'un cours d'eau non jaugé, le débit qui caractérise l'étiage, il est primordial de retenir un modèle de régression qui offre les meilleures estimations. Il s'agit dans ce cas de la méthode stepwise.

De plus, pour rappel, la méthode de régression stepwise permet de minimiser les colinéarités entre variables (Laaha et Blöschl, 2007), ce qui permettra d'obtenir une meilleure validation du modèle retenu.

5.6 Modèles de régression pour les cours d'eau de Wallonie

5.6.1 Introduction

Pour rappel, les modèles de régression sont recherchés pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20 et 50 ans à partir de 24 variables et du percentile95 spécifique (Q95_s).

Comme justifié précédemment, la méthode retenue pour la détermination des modèles de régression est la 'Stepwise'.

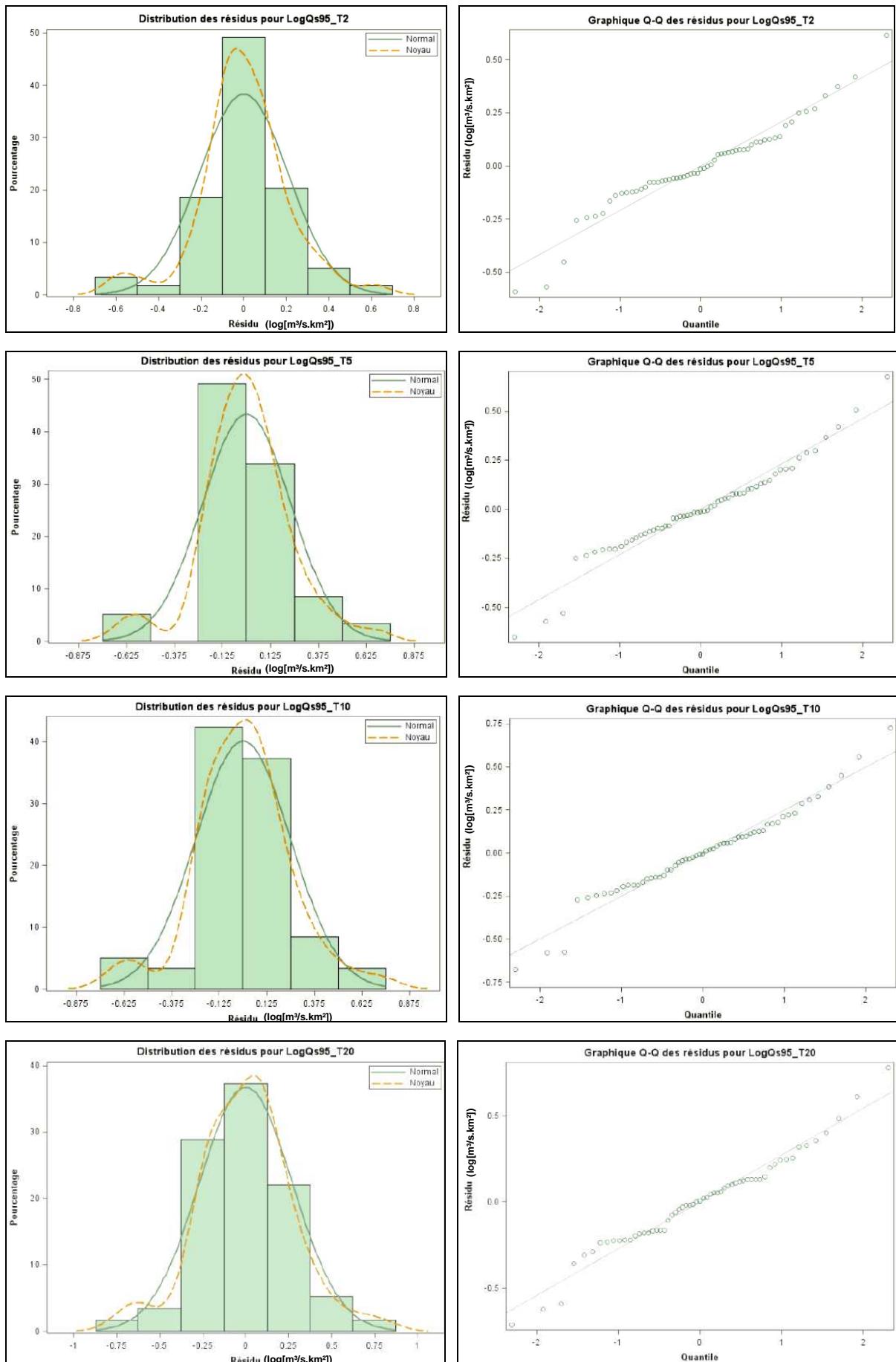
Cependant, il est apparu en cours de travail que pour la période de retour de 2 ans, la méthode Stepwise propose un modèle à trois variables : la percolation, le coefficient de tarissement et le pourcentage de surface enherbée. L'ajout de cette dernière variable n'engendrant qu'une faible amélioration du coefficient de détermination du modèle, il a été décidé de forcer le logiciel SAS à fournir un modèle ne reprenant que la percolation et le coefficient de tarissement.

Les résultats sont présentés simultanément pour les modèles obtenus pour les cinq périodes de retour.

5.6.2 Vérification des conditions d'application : Normalité des résidus

La normalité des résidus est vérifiée pour les cinq modèles de régression obtenus. La Figure 104104 présente les graphiques permettant de vérifier la normalité des résidus dans le cas du modèle obtenu pour toutes les périodes de retour simulées.

On peut y observer que les résidus suivent une loi symétrique centrée autour de la valeur 'zéro'.



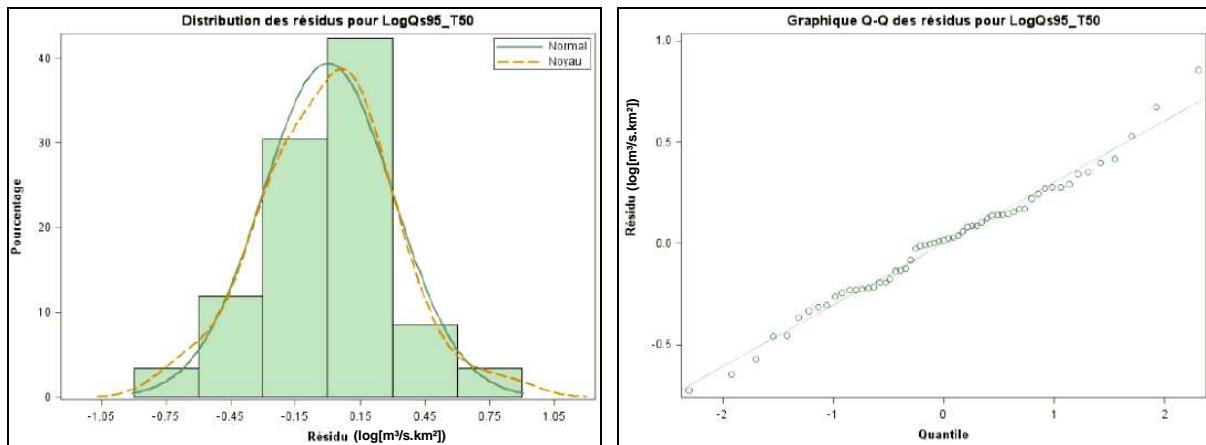


Figure 104 : Normalité des résidus pour les modèles obtenus pour les cinq périodes de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans)

5.6.3 Vérification des conditions d'application : Egalité des variances des résidus

Pour rappel, les résidus doivent être d'égale variance. L'homoscédasticité est contrôlée à partir des graphiques des résidus en fonction de l'Y estimé dans lesquels on vérifie que les résidus sont répartis dans une bande horizontale de valeurs autour de 0.

Dans le cas contraire, les graphiques des résidus contre les différents régresseurs X_j permettent de détecter quelle est la variable responsable de l'hétéroscédasticité.

La Figure 105105 présente les résultats du test de l'égalité de variances correspondant aux modèles de régression obtenus pour toutes les périodes de retour. On peut observer que l'ensemble des points se situent autour de la droite des résidus nuls. Aucune valeur ne se distingue.

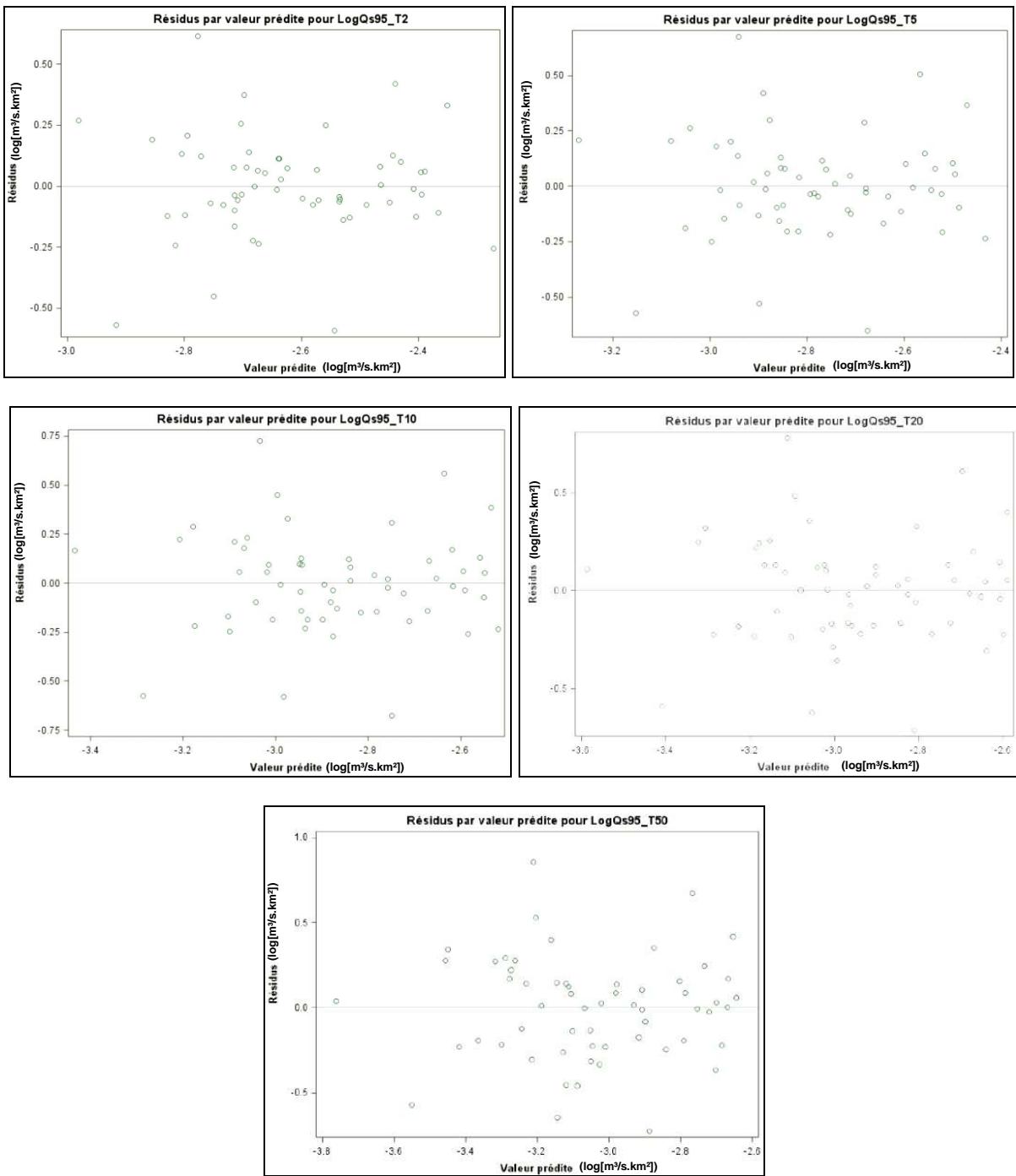


Figure 105 : Vérification de l'égalité des variances des résidus

On peut conclure que la condition d'application liée à l'égalité des variances des résidus est vérifiée et ce pour les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour.

5.6.4 Vérification des conditions d'application : Recherche de valeurs influentes

Les observations qui influencent la régression peuvent être détectées à l'aide de la distance de Cook. Les valeurs sont dites influentes lorsque la distance de Cook est supérieure à 1 ou à $4/(n-p-1)$ selon les auteurs.

Les observations influentes qui ont un résidu studentisé/standardisé supérieur à 2 peuvent être considérées comme anormales et leur suppression peut être envisagée. Un résidu studentisé représente la valeur du résidu divisée par l'erreur type, avec suppression de l'observation courante.

La Figure 106106 présente les distances de Cook obtenues pour l'ensemble des stations de mesures utilisées pour calculer le modèle de régression pour une période de retour égale à 5 ans.

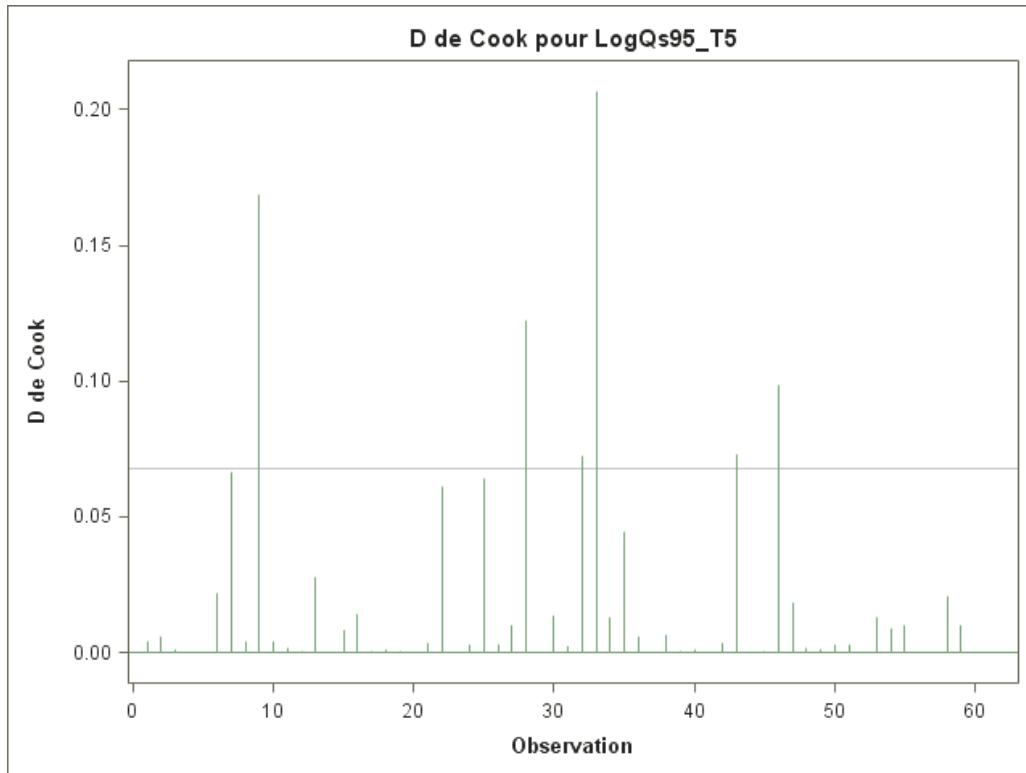


Figure 106 : Recherche de valeurs influentes à partir de la distance de Cook

Aucune valeur de distance supérieure à 1 n'est observée et ce pour les cinq modèles de régression obtenus pour les différentes périodes de retour.

Par contre, la ligne horizontale présente le seuil équivalent à $4/(n-p-1) = 4/(59-2-1) = 0,071$ qui est une valeur définie par certains auteurs et permet de détecter plusieurs valeurs qualifiées d'influentes. (Rawlings, 1988) (Rawlings *et al.*, 1998)

Il s'agit des observations 9, 28, 33, 46 qui correspondent respectivement aux stations de :

- Bersillies-l'Abbaye sur la Thure,
- Isières sur la Sille,
- Mariembourg sur la Brouffe,
- Sainte-Marie sur la Semois.

A partir des valeurs de résidus standardisés ou studentisés, on recherche les valeurs supérieures à 2 dans le graphique présenté à la Figure 107107.

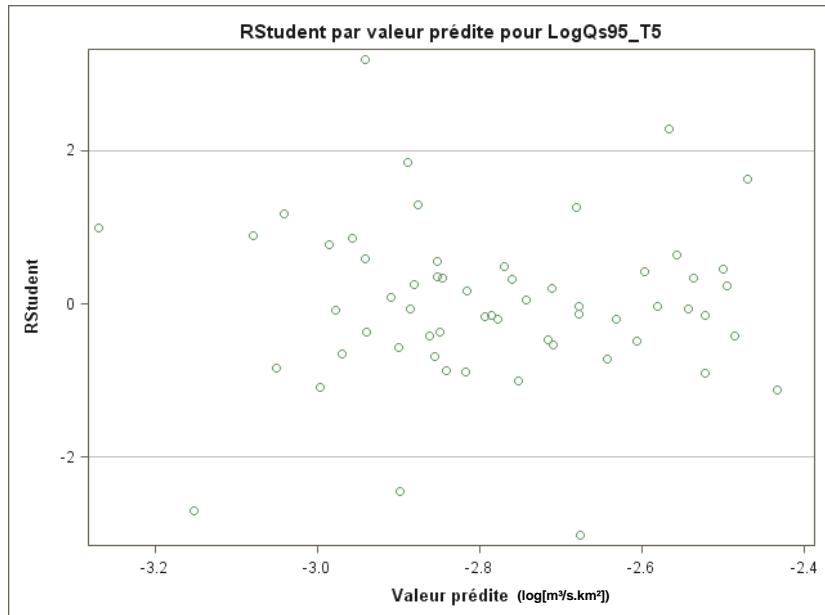


Figure 107 : Recherche de valeurs anomalies éventuelles à partir des résidus studentisés

Trois des quatre stations de mesures pouvant être considérées comme influentes à partir de la distance de Cook obtiennent un score supérieur à 2 pour leur résidu standardisé. Les stations de Rhisnes sur le Houyoux et de Baisieux sur la Grande Honnelle se trouvent également dans cette situation.

Tableau 25 : Valeurs de différentes variables dans le cadre de la recherche de valeurs influentes

ID	Localité	Cours d'eau	Qs95 T5 observé	Perco (mm)	CT (jour ⁻¹)	Qs T5 estimé	Résidu en %	Résidu standardisé du LogQs95_T5	Résidu studentisé du LogQs95 T5
9	Bersillies-l'Abbaye	Thure	0,0054	20,4	0,019	0,0011	78,83	2,958	3,191
28	Isières	Sille	0,0004	20,5	0,015	0,0013	-239,74	-2,340	-2,442
33	Mariembourg	Brouffe	0,0002	18	0,039	0,0007	-274,14	-2,557	-2,697
46	Sainte-Marie	Semois	0,0021	326,3	0,02	0,0037	-72,28	-1,120	-1,123
	Moyenne		0,0021	117,5	0,019				

Les quatre stations de mesures qualifiées d'influentes, influencent toutes l'estimation du coefficient de régression de la percolation à cause de leur valeur éloignée de la moyenne (Tableau 25).

Seule la station de Mariembourg influence l'estimation du coefficient de régression du coefficient de tarissement. Il s'agit des variables qui sont reprises dans l'équation du modèle de régression obtenu.

Etant donné qu'il ne s'agit pas d'erreur de mesure, ces points de mesures ne sont pas considérés comme anormaux et sont maintenus donc pour la détermination du modèle de régression.

En ce qui concerne les résidus standardisés supérieurs à 2, à savoir pour Bersillies-l'Abbaye, Isières et Mariembourg ainsi que Rhisnes et Baisieux, elles ont comme caractéristiques des valeurs soit élevées, soit faibles de leur percentile95 spécifique.

Il est à remarquer que Baisieux possède le plus grand percentile95 spécifique (0,0087 m³/s.km²), Bersillies-l'Abbaye le troisième plus grand (0,0054 m³/s.km²) tandis que Mariembourg possède le plus faible percentile95 spécifique (0,00019 m³/s.km²), Isières le deuxième plus faible (0,00037 m³/s.km²) et Rhisnes le troisième plus faible (0,00047 m³/s.km²).

Si nous enlevions ces valeurs extrêmes du modèle, nous perdrons de la précision dans cette gamme de débits spécifiques, c'est pourquoi il est décidé de les maintenir pour la détermination du modèle de régression.

En ce qui concerne les résultats obtenus pour les autres périodes de retour, il est à remarquer que la station de Mariembourg (33) n'a plus de résidus standardisés supérieurs à 2 pour une période de retour égale à 50 ans.

La station de Graide (22) devient influente dans le modèle obtenu pour une période de retour de 10 ans (Tableau 26). La percolation et le coefficient de tarissement sont élevés par rapport à la valeur moyenne mais les résidus standardisés restent inférieurs à 2.

Tableau 26 : Valeurs de différentes variables pour la station de Graide dans le cadre de la recherche de valeurs influentes

ID	Localité	Cours d'eau	Perco (mm)	CT (jour ⁻¹)	Résidu standardisé du LogQs95 T5	Résidu studentisé du LogQs95 T5	Qs95 T5
22	Graide	Ruisseau de Graide	241,9	0,037	-1,006	-1,006	0,0011

Cette dernière station reste influente pour les périodes de retour de 20 et 50 ans alors que Sainte-Marie (46) ne l'est plus.

5.6.5 Vérification des conditions d'application : Colinéarité

On parle de colinéarité lorsqu'il existe des corrélations entre les régresseurs. Malgré l'utilisation de la méthode stepwise qui tend à diminuer ce problème lors de la détermination du modèle de régression, la recherche de colinéarité sera effectuée à l'aide de plusieurs critères.

La détection d'une colinéarité est établie lorsque l'on a soit une valeur du facteur d'inflation de la variance (VIF) supérieure à 10, soit un indice de conditionnement supérieur à 30, ou soit une forte contribution (supérieur à 0,5) d'une composante à l'indice de conditionnement élevé à la variance de deux ou plusieurs coefficients de régression (Palm, 1988).

Les résultats proposés ci-dessous sont pour le modèle de régression obtenu pour une période de retour de 5 ans. Les conclusions tirées quant à la présence ou non de colinéarité pourront être étendues pour tous les autres modèles obtenus pour les autres périodes de retour.

Le facteur d'inflation VIF_j correspond à l'augmentation de variance due à la corrélation entre la variable j et les autres variables explicatives. A partir du Tableau 27, on observe que le VIF est inférieur à 10 et donc qu'il n'y a pas de colinéarité.

Tableau 27 : Recherche de problème de colinéarité à partir du facteur d'inflation de la variance

Valeurs estimées des paramètres													
Variable	d d I	Valeur estimée des paramètres	Erreur type	Valeur du test t	Pr > t	SC Type I	SC Type II	Corr. Type I au carré partielle	Corr. Type II au carré partielle	Tolérance	Inflation de variance	Intervalle de confiance à 95 %	
Intercept	1	-2.777	0.093	-29.70	<.0001	456.21	48.49	.	.	.	0	-2.96	-2.59
Perco	1	0.0017	0.001	3.64	0.0006	1.30	0.73	0.254	0.191	0.921	1.086	0.001	0.003
CT	1	-10.399	2.867	-3.63	0.0006	0.72	0.72	0.190	0.190	0.921	1.086	-16.14	-4.66

L'indice de conditionnement est le rapport entre la racine carrée de la valeur propre la plus élevée et la racine carrée de la valeur propre la plus faible. Les valeurs obtenues (Tableau 28) sont toutes inférieures au seuil de trente. Il n'y a donc pas de problème de colinéarité observé à partir de cet indice.

Tableau 28 : Recherche de problème de colinéarité à partir de l'indice de conditionnement

Diagnostics de colinéarité								
Nombre	Valeur propre	Index de conditionnement	Proportion de variation			Intercept	Perco	CT
1	2.612	1.00	0.015	0.028	0.027			
2	0.319	2.86	0.000	0.369	0.350			
3	0.068	6.17	0.985	0.603	0.623			

Un problème de colinéarité peut également être mis en évidence lorsque le signe du coefficient de régression est opposé au signe du coefficient de corrélation entre la variable à expliquer et la variable explicative en question.

5.6.6 Modèle de régression

Pour rappel, les modèles de régression sont obtenus à partir de la méthode Stepwise pour les périodes de retour de 5, 10, 20 et 50 ans.

Pour la période de retour de deux ans la méthode 'Stepwise' propose un modèle reprenant trois variables, à savoir le pourcentage de surface enherbée, la percolation et le coefficient de tarissement. L'ensemble des conditions d'application du modèle sont respectées.

$$\begin{aligned} \log Qs95_T2 &= -2,81168 + 0,00506 \text{SURF_ENHERB} + 0,00173 \text{Percolation} - 8,08392 \text{CT} \\ Q95_T5 &= \text{Superficie.}10^{-2,81168+0,00506 \text{SURF_ENHERB}+0,00173 \text{Percolation}-8,08392 \text{CT}} \\ R^2_{\text{Modèle,ajusté}} &= 0,728. \end{aligned}$$

Etant donné que pour les autres périodes de retour, seules les variables caractérisant la percolation et le coefficient de tarissement sont retenues, il a été décidé de forcer le choix de celles-ci pour la période de retour de 2 ans.

Le coefficient de détermination obtenu en forçant le choix des deux variables liées à l'hydrogéologie est de 0,760, soit légèrement supérieur à celui du modèle de régression obtenue par la méthode 'Stepwise'.

Une des deux variables sélectionnées pour le modèle est la percolation qui correspond à la recharge des nappes. Durant la période estivale, le débit d'un cours d'eau

est généralement équivalent au débit de base qui peut être défini comme étant le débit restitué par l'eau souterraine.

L'autre variable retenue est le coefficient de tarissement. Cet indice est utilisé car il est déterminé à partir du rythme de décroissance du débit du cours d'eau observé au niveau des stations de mesures sélectionnées afin de caractériser l'apport d'eau provenant des nappes en période estivale.

Ces variables n'apparaissent pas dans le même ordre dans les différents modèles (Tableau 29). En effet, par exemple, dans le cas de la période de retour de 5 ans, la percolation est la première variable retenue tandis que pour une période de retour de 50, il s'agit du coefficient de tarissement. Les données ne sont pas présentées pour la période de retour de 2 ans étant donné que la méthode 'Stepwise' n'a pas été utilisée. Pour rappel, le choix des variables a été forcé afin d'obtenir une cohérence entre les modèles pour les différentes périodes de retour.

Tableau 29 : Etape du choix des variables pour la détermination du modèle de régression

Période de retour : 5 ans				Période de retour : 20 ans			
Etape	Variable	R ² partiel	R ² modèle	Etape	Variable	R ² partiel	R ² modèle
1	PERCO	0,254	0,254	1	CT	0,308	0,308
2	CT	0,142	0,396	2	PERCO	0,104	0,412
Période de retour : 10 ans				Période de retour : 50 ans			
Etape	Variable	R ² partiel	R ² modèle	Etape	Variable	R ² partiel	R ² modèle
1	CT	0,285	0,285	1	CT	0,316	0,316
2	PERCO	0,124	0,409	2	PERCO	0,089	0,405

Les coefficients de détermination fournis par SAS sont calculés à partir des logarithmes des percentiles95 spécifiques. Or, de manière à simplifier la validation du modèle et de manière à être cohérent dans la suite de ce travail, les coefficients de détermination présentés par la suite seront calculés à partir des Percentiles95.

Les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour sont les suivants :

- Période de retour de 2 ans :

$$\log Q_{95_T2} = -2,68217 + 0,00167 \text{Percolation} - 6,78561CT$$

$$Q_{95_T2} = \text{Superficie}.10^{-2,68217+0,00167 \text{Percolation}-6,78561CT}$$

$$R_{\text{Modèle}}^2 = 0,760$$

- Période de retour de 5 ans :

$$\log Q_{95_T5} = -2,7774 + 0,0017 \text{Percolation} - 10,3991CT$$

$$Q_{95_T5} = \text{Superficie}.10^{-2,7774+0,0017 \text{Percolation}-10,3991CT}$$

$$R_{\text{Modèle}}^2 = 0,705$$

- Période de retour de 10 ans :

$$\log Qs95_T10 = -2,8317 + 0,0017 \text{Percolation} - 12,4673CT$$

$$Q95_T10 = \text{Superficie}.10^{-2,8317+0,0017 \text{Percolation}-12,4673CT}$$

$$R_{\text{Modèle}}^2 = 0,671$$

- Période de retour de 20 ans :

$$\log Qs95_T20 = -2,8704 + 0,0017 \text{Percolation} - 14,5842CT$$

$$Q95_T20 = \text{Superficie}.10^{-2,8704+0,0017 \text{Percolation}-14,5842CT}$$

$$R_{\text{Modèle}}^2 = 0,641$$

- Période de retour de 50 ans :

$$\log Qs95_T50 = -2,9300 + 0,0018 \text{Percolation} - 16,7325CT$$

$$Q95_T50 = \text{Superficie}.10^{-2,9300+0,0018 \text{Percolation}-16,7325CT}$$

$$R_{\text{Modèle}}^2 = 0,610.$$

5.6.7 Intervalle de confiance des modèles de régression obtenu

Pour rappel, la formule permettant de déterminer l'intervalle de confiance d'une valeur prédite est la suivante :

$$\hat{y} \pm t_{1-\alpha/2} (n - k - 1) se \left[\hat{y}^* \right]$$

où

- \hat{Y}^* est la valeur estimée ;
- $t_{1-\alpha/2}$ est issu de la distribution t de Student à $n-k-1$ degré de liberté, n étant le nombre d'observations et k le nombre de variables. Dans notre cas, pour un risque α de 5%, $t_{0,975}$ avec 56 degrés de liberté est égal à **2,003** ;
- $se[\hat{Y}^*]$ est l'écart-type de la valeur estimée obtenu à partir de l'équation suivante :

$$se \left[\hat{y}^* \right] = s \sqrt{1 + X^{*T} (X^T X)^{-1} X^*}$$

avec

- $s = \text{SCE} / n - k - 1 = \text{RMSE}$;
- X est la matrice des observations qui ont servi à la calibration du modèle ;
- X^* est le vecteur des observations qui ont servi à calculer la valeur estimée ;
- X^T est la matrice transposée, obtenue en permutant les lignes et les colonnes de X ;

- X^{-1} est la matrice inverse, calculée par la formule $C^T/\det X$ où $\det X$ est le déterminant de la matrice X et C est la comatrice de X c'est-à-dire la matrice des cofacteurs de X .

Dans notre cas, la matrice inverse $(X^T X^{-1})^{-1}$ permettant le calcul des intervalles de confiance est :

$$\begin{pmatrix} 0,15907243 & -0,000595846 & -3,70977259 \\ -0,00059585 & 0,000003942 & 0,00682459 \\ -3,70977259 & 0,006824591 & 149,582607 \end{pmatrix}.$$

Cette matrice doit être multipliée par la matrice reprenant les valeurs de la percolation (mm) et du coefficient de tarissement (jour⁻¹) :

$$\begin{pmatrix} 1 \\ Perco \\ CT \end{pmatrix}.$$

Les valeurs du RMSE sont reprises dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Valeurs du RMSE pour les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour

Période de retour (années)	RMSE
2	0,21183
5	0,23444
10	0,25341
20	0,27627
50	0,30912

La formule permettant la détermination des intervalles de confiance est traduite en abaques à double entrées (la percolation et le coefficient de tarissement). Ces dernières fournissent la valeur qu'il faut additionner et soustraire à la valeur estimée du logarithme du percentile95 spécifique.

L'ensemble des abaques sont présentés en annexes (de l'Annexe 19 à l'Annexe 22).

5.6.8 Validation des modèles de régression

Comme vu précédemment, plusieurs stations de mesures ont été sélectionnées dans l'optique de validation du modèle.

Elles ont été choisies de manière à couvrir au mieux la Wallonie tout en faisant partie des quatre groupes obtenus lors de la partie consacrée à la régionalisation (Figure 108108).

Stations de mesures utilisées pour la détermination et la validation des modèles de régression

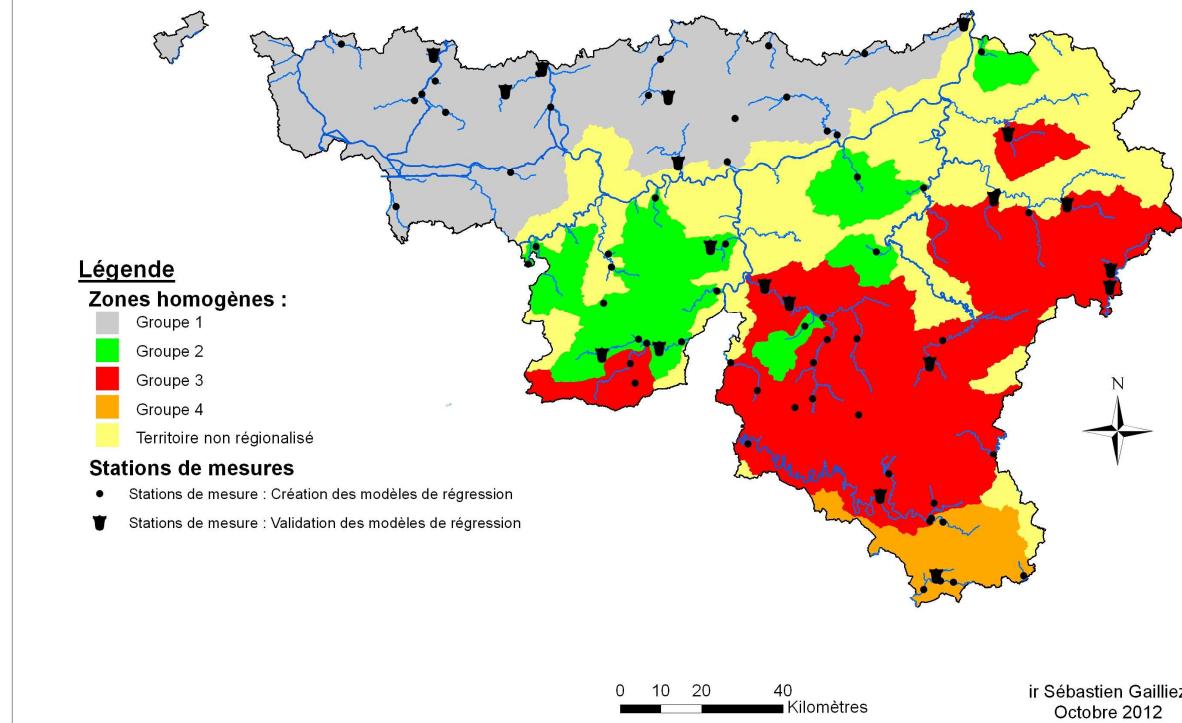


Figure 108 : Carte des stations utilisées pour la validation du modèle de régression

Il s'agit de points de mesures qui n'ont pas été retenus en première approche car la taille de leur historique ne répondait pas au critère de 20 années minimum.

Tableau 31 : Stations de mesures utilisées pour la validation des modèles de régression

Code	Localité	Cours d'eau	Bassin versant	Mise en service	X	Y
19511002	Tubize	Senne	Senne	1997	137850	153300
67531002	Lasninville	Amblève	Amblève	1996	266681	120028
68031002	Chevron	Lienne	Amblève	1993	248721	121549
81661002	Sosoye	Molignée	Meuse amont	1998	179107	109691
82211002	Gendron	Lesse	Lesse	1968	192424	100222
95411002	Chiny	Semois	Semois	1992	220742	48650
L5183	Onoz	Orneau	Sambre	1998	171179	130329
L5661	Steenkerque	Senne	Senne	1996	128679	147776
L5860	Theux	Hoëgne	Vesdre	1979	252201	137368
L6080	Reuland	Ulf	Our	1991	277217	99906
L6090	Lommersweiler	Braunlauf	Our	1991	277350	104134
L6101	Blanmont	Orne	Dyle	1992	168717	146383
L6290	Amberloup	Ourthe occidentale	Ourthe	1991	232962	81131
L6340	Eben-Emael	Geer	Geer	1991	241312	164275
L6380	Olloy-sur-Viroin	Viroin	Viroin	1992	166439	84824
L6440	Virton	Ton	Chiers	1991	234474	29038
L6530	Aublain	Eau Blanche	Viroin	1994	152353	83282
L6570	Ghoy	Ruisseau d'Ancre	Dendre	1994	110975	156690
L6610	Hérock	Lesse	Lesse	1996	198431	96041

Les différentes variables utilisées dans le cadre de ce travail de ces stations de mesures ont été déterminées selon la méthodologie mise en place dans le contexte de la régionalisation.

L'historique des ces points de mesures pris en considération débute à la date de l'installation de la station jusqu'à l'année 2010 incluse.

Le Tableau 32 présente les percentiles95 estimés à partir de l'analyse fréquentielle, les percentiles95 calculés à partir des droites de régression obtenues ainsi que les résidus exprimés en pourcent.

Tableau 32 : Résultats de la validation

Localité	Période de retour : 2 ans			Période de retour : 5 ans		
	Q95 T2	Q95 T2 estimé	Résidu en %	Q95 T5	Q95 T5 estimé	Résidu en %
Tubize	0.502	0.406	19.108	0.421	0.284	32.615
Lasninville	0.758	0.386	49.024	0.603	0.259	56.992
Chevron	0.411	0.250	39.276	0.269	0.158	41.258
Sosoye	0.155	0.124	19.716	0.113	0.090	20.276
Gendron	2.330	2.188	6.112	1.640	1.396	14.889
Chiny	1.550	1.621	-4.595	1.160	1.004	13.414
Onoz	0.600	0.500	16.678	0.453	0.356	21.379
Steenkerque	0.227	0.231	-1.921	0.192	0.164	14.370
Theux	0.296	0.270	8.844	0.155	0.148	4.257
Reuland	0.051	0.066	-29.073	0.031	0.036	-15.543
Lommersweiler	0.146	0.128	12.462	0.093	0.082	11.337
Blanmont	0.130	0.149	-14.268	0.099	0.112	-11.837
Amberloup	0.275	0.175	36.523	0.167	0.099	40.517
Eben-Emael	1.360	2.012	-47.925	1.110	1.566	-41.049
Olloy-sur-Viroin	1.070	1.199	-12.041	0.854	0.861	-0.803
Virton	1.120	0.490	56.259	0.931	0.370	60.258
Aublain	0.329	0.277	15.782	0.250	0.199	20.358
Ghoy	0.070	0.129	-84.171	0.049	0.081	-65.508
Hérock	2.710	2.068	23.706	1.660	1.342	19.174
Localité	Période de retour : 10 ans			Période de retour : 20 ans		
	Q95 T10	Q95 T10 estimé	Résidu en %	Q95 T20	Q95 T20 estimé	Résidu en %
Tubize	0.384	0.232	39.686	0.355	0.195	45.061
Lasninville	0.535	0.207	61.268	0.484	0.170	64.813
Chevron	0.211	0.122	42.132	0.170	0.097	42.949
Sosoye	0.096	0.075	21.474	0.084	0.065	22.722
Gendron	1.380	1.083	21.538	1.210	0.864	28.575
Chiny	1.020	0.769	24.622	0.935	0.602	35.623
Onoz	0.391	0.295	24.591	0.347	0.251	27.735
Steenkerque	0.176	0.136	22.962	0.163	0.115	29.264
Theux	0.105	0.106	-0.818	0.074	0.077	-4.596
Reuland	0.024	0.026	-6.422	0.020	0.019	3.653
Lommersweiler	0.071	0.064	9.838	0.056	0.051	8.478
Blanmont	0.085	0.095	-11.334	0.075	0.083	-10.542
Amberloup	0.129	0.072	43.943	0.104	0.054	48.156
Eben-Emael	0.998	1.370	-37.275	0.909	1.224	-34.613
Olloy-sur-Viroin	0.754	0.716	5.088	0.679	0.612	9.927
Virton	0.844	0.319	62.175	0.778	0.280	64.052
Aublain	0.215	0.166	22.930	0.188	0.142	24.674
Ghoy	0.041	0.062	-53.261	0.035	0.049	-41.335
Hérock	1.240	1.051	15.225	0.960	0.847	11.743
Localité	Période de retour : 50 ans					
	Q95 T50	Q95 T50 estimé	Résidu en %			
Tubize	0.326	0.157	51.789			
Lasninville	0.433	0.134	68.950			
Chevron	0.131	0.074	43.558			
Sosoye	0.0716	0.053	25.364			
Gendron	1.05	0.661	37.038			
Chiny	0.854	0.456	46.595			
Onoz	0.302	0.206	31.887			
Steenkerque	0.149	0.094	36.955			
Theux	0.0475	0.054	-14.410			
Reuland	0.0156	0.013	14.419			

Lommersweiler	0.0422	0.039	6.591
Blanmont	0.0642	0.071	-9.950
Amberloup	0.0814	0.039	52.458
Eben-Emael	0.815	1.069	-31.227
Olloy-sur-Viroin	0.6	0.504	16.059
Virton	0.71	0.242	65.942
Aublain	0.161	0.117	27.425
Ghoy	0.0292	0.037	-27.716
Hérock	0.703	0.655	6.824

On y observe que les résidus varient de quelques pourcents à près de 66 pourcents pour la station de Virton sur le Ton.

Pour rappel, le coefficient de détermination R^2 représente la part de la variance du Percentile95 qui explique le modèle tandis que le RMSE quantifie les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prédictes par le modèle de régression obtenu. (Claustriaux, 2007)

Le Tableau 33 présente les résultats obtenus par rapport aux performances des modèles de régression obtenus pour les différentes périodes de retour.

Tableau 33 : Performances des modèles de régression

	Période de retour (années)				
	2	5	10	20	50
R^2 modèle	0.768	0.705	0.671	0.641	0.610
RMSE modèle	0.257	0.213	0.193	0.178	0.163
R^2 validation	0.862	0.828	0.786	0.725	0.636
RMSE validation	0.279	0.215	0.200	0.198	0.198

On peut observer que le coefficient de détermination R^2 du modèle diminue lorsque la période de retour augmente, ce qui indique que le modèle devient moins précis. Par contre, on observe également que le RMSE diminue également, ce qui signifie que l'on a moins de différence entre les débits observés et les débits simulés.

D'un point de vue validation, le coefficient de détermination est relativement plus élevé mais diminue également lorsque la période de retour augmente.

On remarque également que le RMSE de la validation diminue comme celui du modèle, et ce dans les mêmes proportions. Cependant, le coefficient de détermination de la validation est meilleur que celui du modèle, ce qui signifie que le modèle est plus performant pour les prédictions.

Le fait que les coefficients de détermination sont meilleurs dans le contexte de validation provient également du fait que les stations de mesures utilisées pour cette dernière se situent dans la gamme de débit spécifique 0 à 0,002 m³/s.km² (sauf la station de Virton) alors que pour la calibration, cette plage s'étend de 0 à 0,004 m³/s.km² (excepté les stations de Baisieux, Harnoncourt et Bersillies-l'Abbaye).

La Figure 109109 présente les graphiques mettant en relation les valeurs prédictes en fonction des valeurs observées des percentiles95.

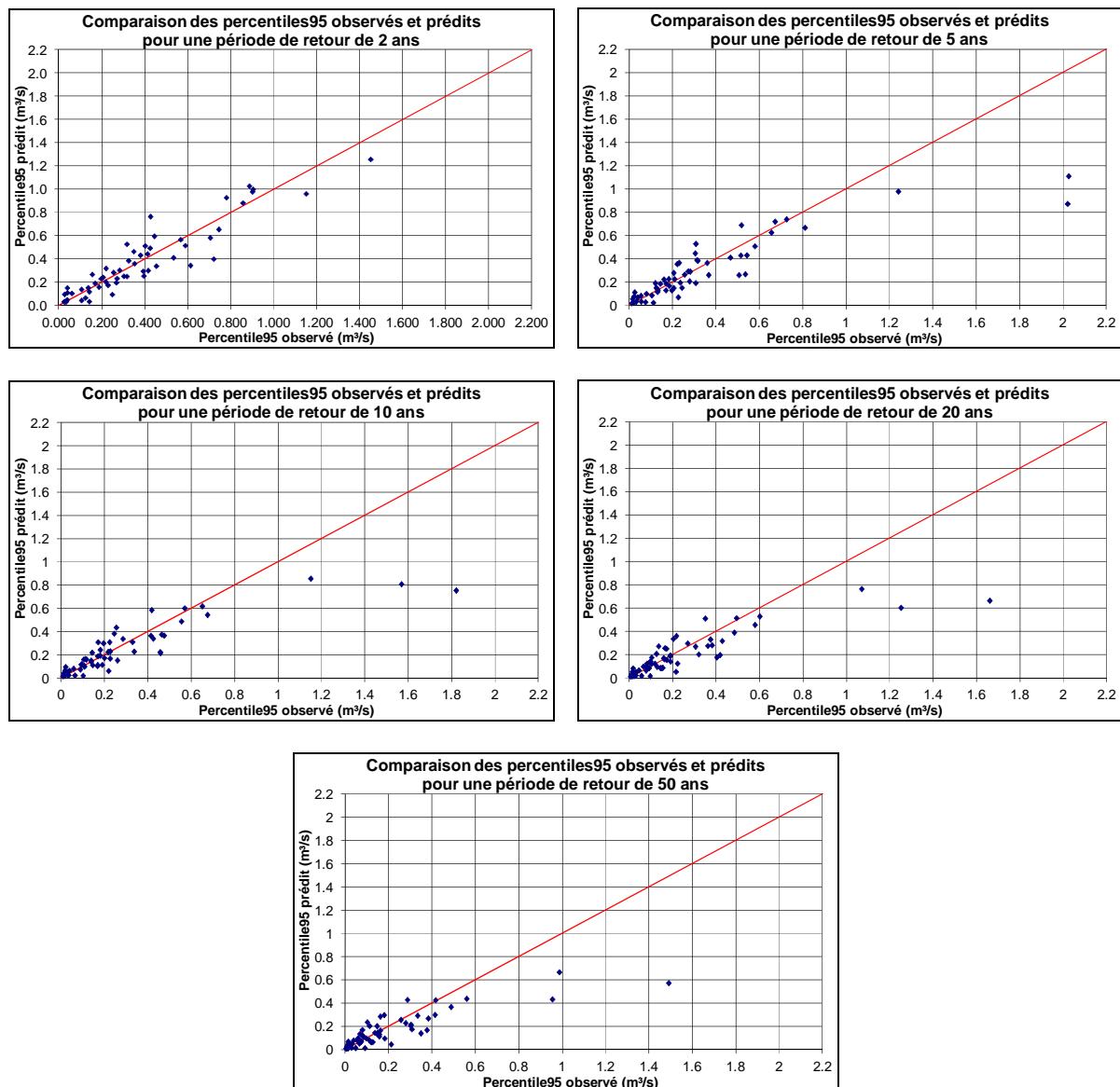


Figure 109 : Graphiques des valeurs prédictes et observées des percentiles95

On observe dans un premier temps que les prédictions divergent des observations pour les grandes valeurs du percentile95, et ce plus la période de retour augmente.

La Figure 110 montre que les résidus augmentent linéairement avec les percentiles95 spécifiques observés pour les différentes périodes de retour.

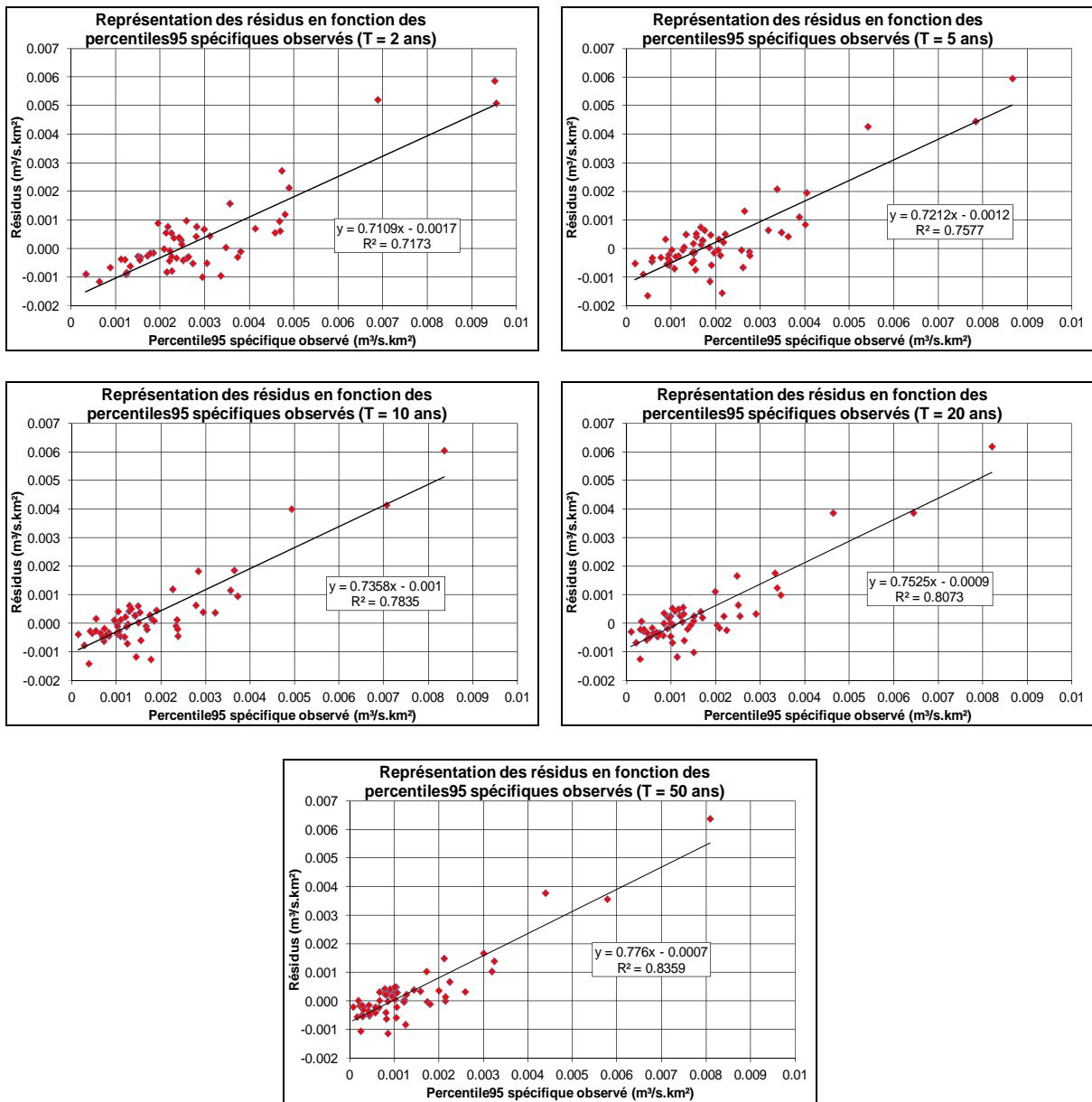


Figure 110 : Graphique des résidus en fonction des percentiles95 spécifiques observés

Cependant, le modèle surestime les faibles valeurs de percentiles95 spécifiques (principalement pour les valeurs inférieures à $0,001 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ pour les périodes de retour de 2, 5, 10 et 20 ans, et à $0,0009 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ pour une période de retour de 50 ans).

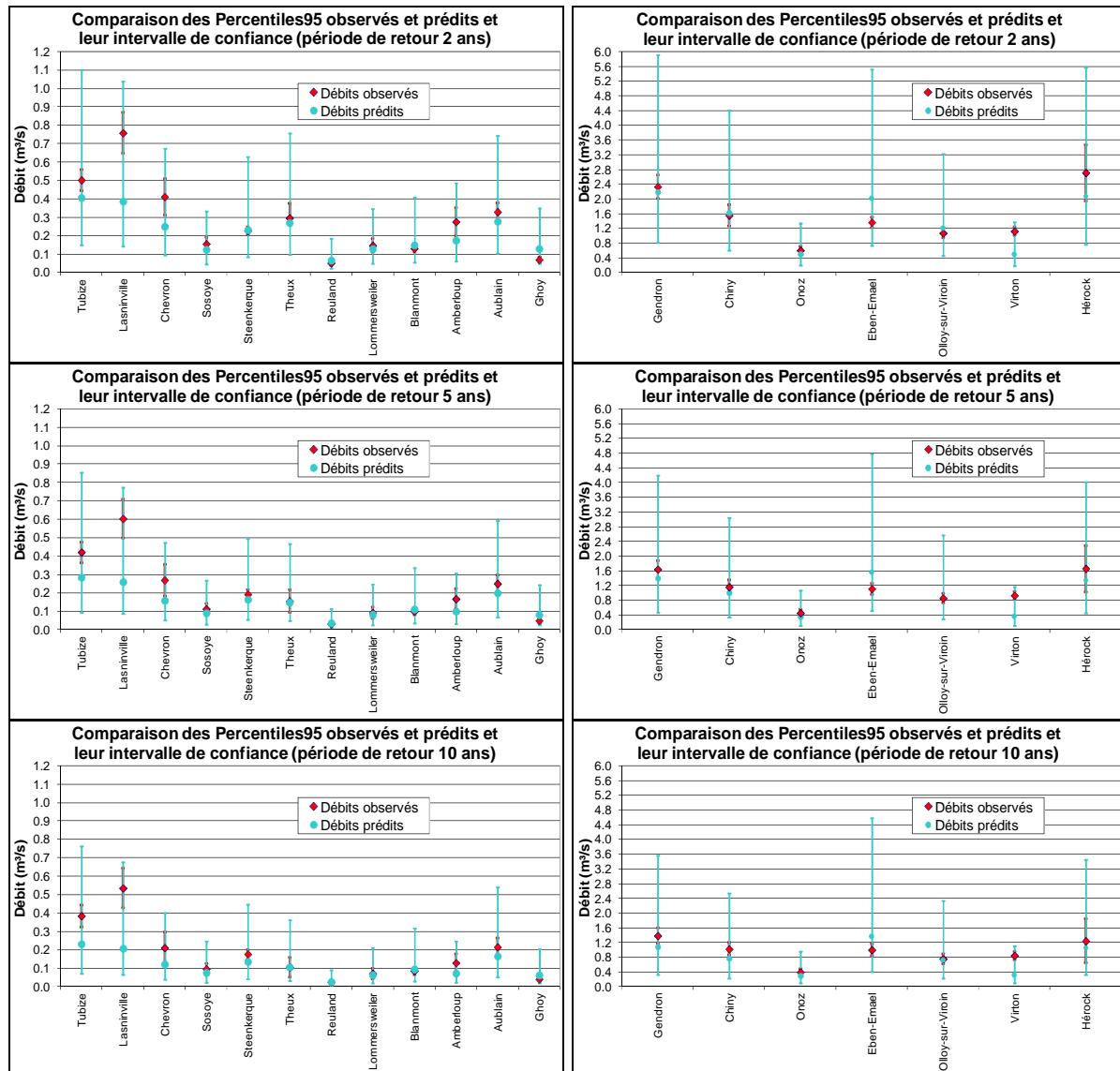
On observe une sous-estimation des débits spécifiques prédits pour des valeurs supérieures à $0,005 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ pour une période de retour de 2 ans, à $0,004 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{km}^2$ pour les périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans.

Ce problème de calibration pour les valeurs extrêmes provient du peu de valeurs pour ces plages de mesures de percentiles95 spécifiques. Ceci explique le faible coefficient de détermination des modèles de régression qui pourrait être solutionné par l'ajout de nouvelles stations qui ne sont pas encore disponible en Wallonie. Le modèle pourra être recalculé périodiquement avec l'ajout de nouveau point de mesures ayant un historique suffisant. Il s'agit des stations de mesures ayant un débit caractérisant l'étiage, le

percentile95 dans notre cas, supérieur à 0,8 m³/s pour la période de retour de 2 ans et à 0,6 m³/s pour les périodes de retour plus élevées.

Les stations de mesures qui pourront aider à cette amélioration sont les exutoires des grands bassins versants ainsi que les stations de mesures qui ont un débit d'étiage élevé grâce à l'apport des nappes, comme par exemple la Lorraine.

La Figure 111111 présente pour les stations de validation les percentiles95 observés (issus de l'analyse fréquentielle) et prédis à partir du modèle obtenu pour les différentes périodes de retour. Les intervalles de confiance des valeurs des différents percentiles95 sont également représentés.



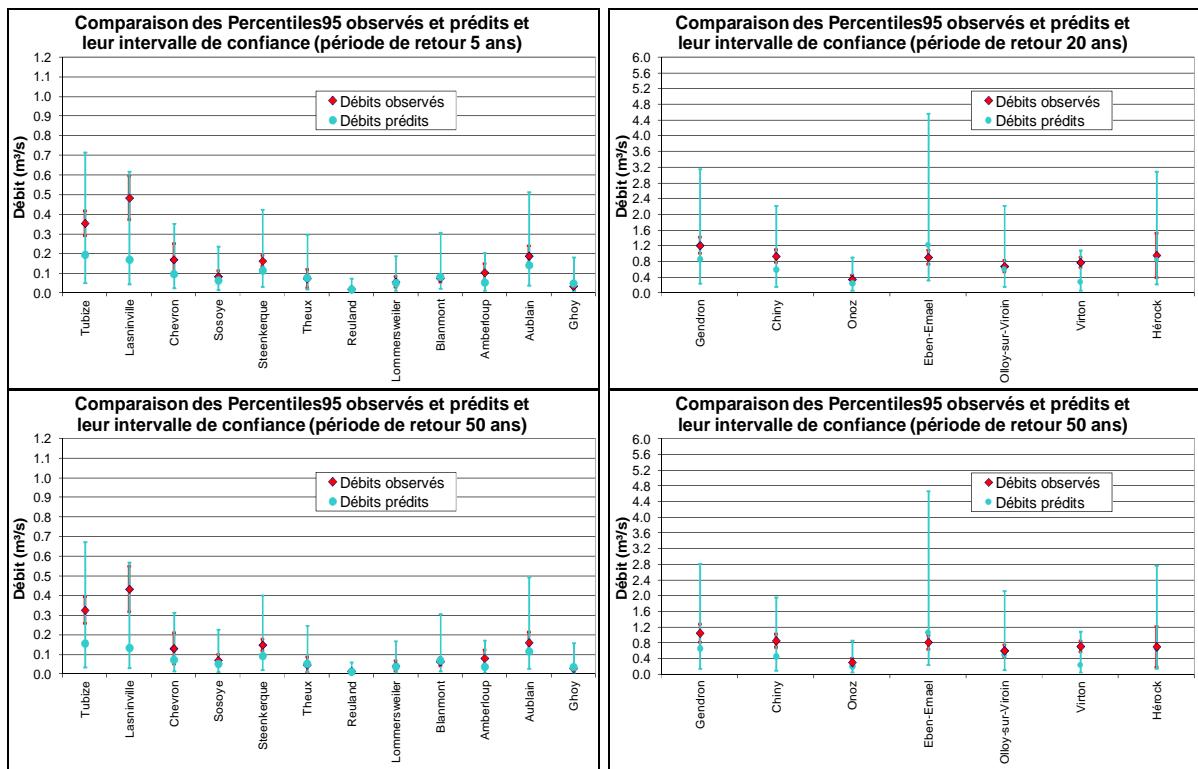


Figure 111 : Comparaison des percentiles95 observés et prédicts et leur intervalle de confiance

On peut observer que pour la majorité des stations de mesures de validation, les débits prédicts se situent dans l'intervalle de confiance des valeurs observées issues de l'analyse fréquentielle. Les exceptions sont Eben-Emael, Tubize, Lasninville, Chevron, Amberloup et Virton.

Selon le bilan hydrogéologique réalisé par Rouxhet (Rouxhet *et al.*, 1996), les captages au niveau de la nappe de Hesbaye représentent environ 70 mm (c'est-à-dire 10 % des précipitations moyennes annuelles) et le débit moyen annuel du Geer est de l'ordre de 130 mm, soit 17 %. Or, il a été démontré que le niveau de cette nappe est en relation directe avec le débit du Geer. Le débit naturel sans intervention humaine est donc plus élevé que le débit observé. Il n'est donc pas surprenant que l'on observe une forte surestimation du débit à Eben-Emael par le modèle. (Rouxhet *et al.*, 1996)

En ce qui concerne la station de Virton, le débit spécifique observé pour une période de retour de 5 ans est de $0,0103 \text{ m}^3/\text{s}.\text{km}^2$. Or la gamme de mesure utilisée pour la détermination du modèle de régression est $0,0002 - 0,0087 \text{ m}^3/\text{s}.\text{km}^2$. Virton se situe donc en dehors de cette plage, ce qui peut expliquer la différence entre la valeur observée et la valeur prédictive.

Le débit prédict pour une période de retour de 2 ans de la station de Ghoy sur le Ruisseau d'Ancre, est également situé en-dehors de l'intervalle de confiance des débits observés. A l'inverse de la Lorraine belge, on se situe ici dans les valeurs les plus faibles simulées.

On observe également que l'intervalle de confiance des valeurs prédictes est assez important. Ceci est dû au faible coefficient de détermination R^2 du modèle.

5.6.9 Comparaison des variables utilisées par d'autres auteurs

Dans son étude ayant pour objectif de définir différents paramètres caractérisant l'étiage par région homogène, Nathan utilise dans son modèle de régression principalement les caractéristiques hydrogéologique du bassin versant (Base Flow Index, constante de récession) ainsi que le débit moyen annuel. Les paramètres du modèle SFB sont également utilisés. Ce modèle utilise les pluies journalières ainsi que les données d'évaporation afin de produire des valeurs mensuelles de débit. Un modèle par groupe homogène peut être défini étant donné que le nombre de stations de mesures de départ est de 184 situées dans le sud-est de l'Australie. (Nathan et McMahon, 1990)

Laaha dans sa comparaison de méthodologie de régionalisation des débits d'étiage sur 132 bassins versant situés en Autriche. Selon les régions, les caractéristiques des bassins versants retenues dans les modèles de régression diffèrent. On retrouve majoritairement, les précipitations moyennes annuelles, les pentes, le pourcentage d'un substrat géologique, l'altitude et la densité de drainage. L'occupation du sol intervient dans quelques modèles selon la méthode employée. Les coefficients de détermination R^2 des modèles sont assez variables en fonction de la méthode de régionalisation appliquée. Par exemple, il varie de 0 à 0,89. Le nombre de groupes obtenus lors de la régionalisation varie de 5 à 10 groupes. (Laaha et Blöschl, 2006)

Aux Etats-Unis, dans son étude, Kroll a défini un modèle pour différentes régions dont les coefficients de détermination ajusté varient entre 0,83 et 0,98 dans le cas où toutes les variables sont utilisées. S'il ne prend pas en compte la constante de récession et le Base Flow Index, les coefficients de détermination sont moins bons (de 0,33 à 0,93). Le nombre de stations de mesures utilisées par région varie de 20 à 61. Les variables principalement utilisées sont la superficie du bassin versant, les caractéristiques hydrogéologiques, les précipitations. (Kroll *et al.*, 2004)

Vezza compare différentes méthodes de regroupement des bassins versants en régions homogènes. Les variables retenues dans ces modèles sont l'altitude maximum et médiane, la latitude, le Curve Number, les pourcentages de roche, de prairies ou de forêts au niveau de l'occupation du sol et la pente moyenne. Il est à remarquer que dans les variables de départ, on ne trouve aucune caractéristique relative à l'hydrogéologie. Les coefficients de détermination ajustés obtenus variant de 0,42 à 0,98 avec la majorité inférieure à 0,70. (Vezza *et al.*, 2010)

Dans le sud de l'Allemagne, la géologie est la variable la plus explicative dans le modèle de régression obtenu par Seibert qui permet de calculer le MAM10. L'hydrogéologie et l'occupation du sol jouent également un rôle important dans l'explication de la variance du MAM10. Le coefficient de détermination obtenu est de 0,56. (Seibert et Beven, 2009)

Gustard propose une équation déterminée à partir d'un bilan hydrologique car il a obtenu un meilleur coefficient de détermination ($R^2=0.977$) et estime que c'est plus simple que de définir un modèle de régression. L'équation reprend la superficie du bassin versant, les précipitations annuelles moyennes et l'évaporation potentielle. (Gustard *et al.*, 1992)

Cette revue bibliographique montre l'importance de l'hydrogéologie dans le contexte de la définition d'un débit caractérisant l'étiage, ce qui conforte les résultats obtenus lors de cette étude. Pour rappel, chaque modèle de régression déterminé pour les différentes périodes de retour envisagées retient comme variables explicatives la percolation correspondant à la recharge des nappes et le coefficient de tarissement.

5.6.10 Abstraction de la période de retour dans les modèles de régression

Selon l'objectif de la recherche d'un débit caractérisant l'étiage, il est parfois utile d'utiliser d'autres périodes de retour que celles qui ont été modélisées. C'est pourquoi, une équation englobant les paramètres retenus, à savoir la percolation (PERCO) et le coefficient de tarissement (CT), ainsi que la période de retour (T), a été déterminée.

Pour ce faire, les coefficients obtenus pour les deux variables ainsi que la constante des modèles en fonction de la période de retour relatifs au percentile95 ont été mis sous forme de graphique présenté à la Figure 112.

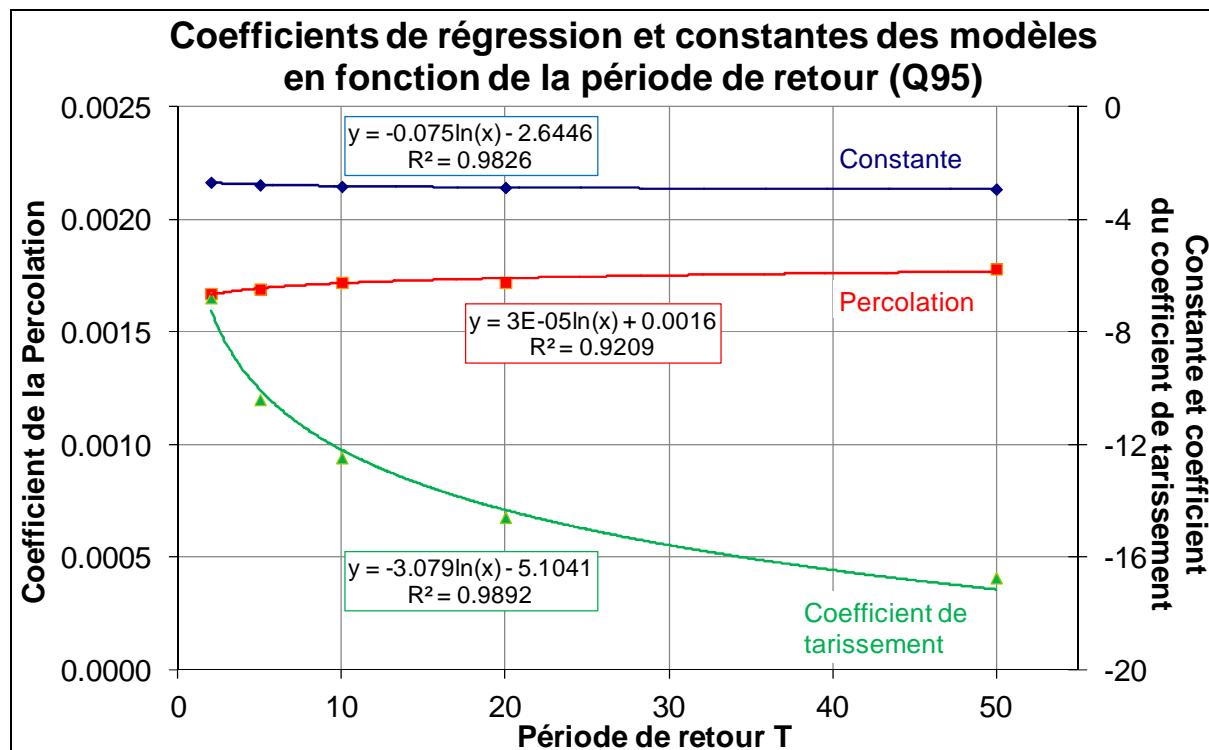


Figure 112 : Graphique mettant en relation les coefficients de régression et les constantes en fonction de la période de retour (Q95)

A partir du graphique, on remarque que l'on peut obtenir un ajustement de bonne qualité entre les coefficients de régression et la période de retour, ainsi que pour les constantes. En effet, les coefficients de détermination sont de 0,92 pour la percolation et supérieurs à 0,98 pour la constante et le coefficient de tarissement.

Il est dès lors possible d'établir une équation qui permet d'obtenir un percentile95 pour n'importe quelle période de retour et ce à pour n'importe quel point d'un linéaire de cours d'eau à partir de la formule suivante :

$$Q95 = S \cdot 10^{-2,6446 - 0,075 \cdot \ln T + 0,0016 \cdot PERCO - 5,1041 \cdot CT + 3 \cdot 10^{-5} \cdot PERCO \cdot \ln T - 3,079 \cdot CT \cdot \ln T}$$

dans laquelle, **S** est la superficie du bassin versant (km^2), **T** est la période de retour (année), **CT** le coefficient de tarissement (jour^{-1}) et **PERCO** la percolation (mm).

Le Tableau 34 présente les écarts moyens, exprimé en pourcent, entre les modèles obtenus pour chaque période de retour et le modèle global permettant le calcul d'un percentile95 pour n'importe quelle période de retour.

Tableau 34 : Ecarts moyens (%) entre les modèles obtenus pour les différentes périodes de retour et le modèle global

	Ecart moyens (%)				
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans
Moyenne	6.56	-3.01	-2.91	-0.19	5.58
Ecart-type	1.12	1.29	1.28	0.96	1.15
Minimum	5.00	-6.65	-6.17	-2.88	3.85
Maximum	9.60	-0.89	-0.28	1.42	8.81

On observe que les débits calculés à partir de l'équation globale surestiment les percentiles95 déterminés à partir des cinq modèles pour les périodes de retour de 2 et 50 ans. Par contre, en moyenne, une sous-estimation est observée pour les périodes de retour de 5, 10 et 20 ans.

Or, pour rappel, les modèles obtenus pour les cinq périodes de retour engendrent une sous-estimation des percentiles95 simulés. Dans ce cas, à partir du modèle global, on accentue légèrement cette différence pour les périodes de retour 2 et 50 ans tandis qu'en moyenne, on améliore l'estimation pour 5, 10 et 20 ans.

En ce qui concerne les intervalles de confiance, il faut travailler à partir des abaques repris de l'Annexe 18 à l'Annexe 22. Une règle de trois doit être appliquée entre les périodes de retour simulées et la période de retour dont on souhaite le débit caractérisant l'étiage pour obtenir la valeur que l'on doit ajouter et soustraire au logarithme du percentile95 spécifique.

Afin de valider la méthodologie, le test suivant est réalisé. Prenons comme hypothèse que l'on connaisse les valeurs à ajouter ou à soustraire pour les périodes de retour 5 et 20 ans et que la percolation est de 310 mm et le coefficient de tarissement de 0,028. Considérons que l'on souhaite obtenir l'intervalle de confiance pour une période de retour égale à 10 ans. Les résultats sont présentés dans le Tableau 35.

Tableau 35 : Comparaison des intervalles de confiance obtenus par calcul et à partir des abaques

Période de retour	Valeur à ajouter et à soustraire
5 ans	0.5137
20 ans	0.6053
10 ans (calculés)	0.5442
10 ans (abaque)	0.5552

On observe à partir du Tableau 35, nous avons une différence de 2 pourcents entre les valeurs à ajouter ou à soustraire obtenues à partir de l'abaque ou de la règle de trois.

5.6.11 Modèles de régression obtenus pour le MAM7

Les modèles de régression obtenus par la méthode Stepwise pour le paramètre MAM7 décrivant l'étiage sont les suivants :

$$\log MAMs7_T2 = -2,6969 + 0,00172.Percolation - 9,275.CT$$

$$MAM7_T2 = Superficie.10^{-2,6969+0,00172.Percolation-9,275.CT}$$

$$\log MAMs7_T5 = -2,7851 + 0,0017.Percolation - 13,4274.CT$$

$$MAM7_T5 = Superficie.10^{-2,7851+0,0017.Percolation-13,4274.CT}$$

$$\log MAMs7_T10 = -2,8396 + 0,0016Percolation - 15,5904CT$$

$$MAM7_T10 = Superficie.10^{-2,8396+0,0016Percolation-15,5904CT}$$

$$\log MAMs7_T20 = -2,8939 + 0,0016Percolation - 17,3211CT$$

$$MAM7_T20 = Superficie.10^{-2,8939+0,0016Percolation-17,3211CT}$$

$$\log MAMs7_T50 = -2,9808 + 0,0016Percolation - 19,0192CT$$

$$MAM7_T50 = Superficie.10^{-2,9808+0,0016Percolation-19,0192CT}$$

$$MAM7_T50 = Superficie.10$$

.

L'ensemble des conditions d'application du modèle sont respectées pour toutes les périodes de retour modélisées. Le Tableau 36 présente les coefficients de détermination des modèles ainsi que la RMSE, et ce y compris pour la validation.

Tableau 36 : Performances des modèles de régression utilisant le MAM7 comme descripteur de l'étiage

	Période de retour (années)				
	2	5	10	20	50
R² modèle	0.746	0.670	0.623	0.578	0.508
RMSE modèle	0.234	0.201	0.187	0.177	0.170
R² validation	0.838	0.796	0.754	0.703	0.608
RMSE validation	0.264	0.205	0.188	0.179	0.177

Tout comme pour le percentile95, un modèle global faisant abstraction de la période de retour est déterminé à partir de la Figure 113113. Pour ce faire, le graphique mettant en relation les coefficients des deux régresseurs ainsi que la constante en fonction de la période de retour est réalisé, l'objectif étant de trouver une relation entre ces derniers.

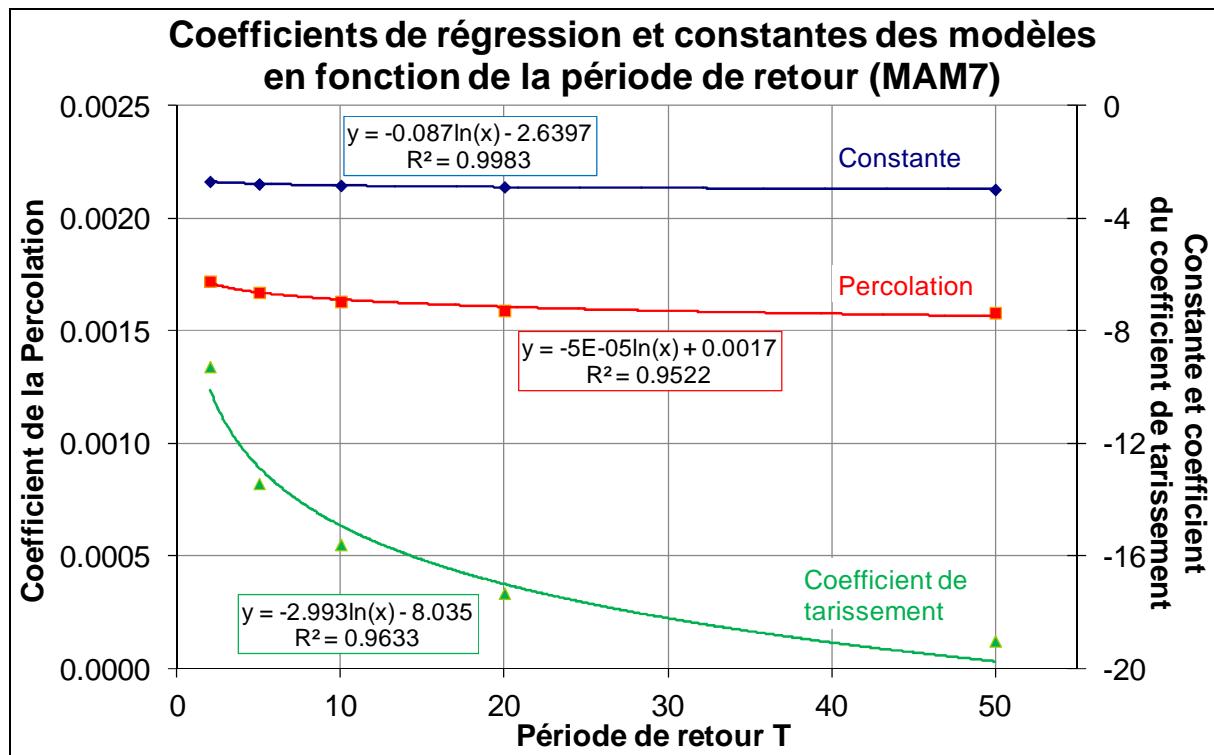


Figure 113 : Graphique mettant en relation les coefficients de régression et les constantes en fonction de la période de retour (MAM7)

On peut observer que les coefficients de détermination des relations obtenues sont supérieurs à 0,95, ce qui signifie que l'ajustement est de bonne qualité. Le modèle global obtenu est donc représenté par l'équation suivante :

$$MAM7 = S.10^{-2,6397-0,087.\ln T+0,0017.PERCO-8.035.CT+5.10^{-5}.PERCO.\ln T-2.993.CT.\ln T}$$

Les abaques permettant le calcul des intervalles de confiance sur la même méthodologie que dans le cas des percentiles95 se trouvent en annexes (de l'Annexe 23 à l'Annexe 27).

5.6.12 Comparaison des modèles de régression obtenus pour le Q95 et le MAM7

Une comparaison est réalisée sur les résultats des modèles de régression obtenus pour les deux descripteurs de l'étiage, à savoir le percentile95 et le MAM7 à partir des coefficients de détermination R^2 et des écarts moyens résiduels RMSE du modèle et de validation. Une synthèse de ces valeurs sont présentées dans le Tableau 37.

Tableau 37 : Résumé des performances des modèles de régression utilisant le Q95 ou le MAM7 comme descripteurs de l'étiage

	Période de retour (années)									
	2		5		10		20		50	
	Q95	MAM7	Q95	MAM7	Q95	MAM7	Q95	MAM7	Q95	MAM7
R² modèle	0.768	0.746	0.705	0.670	0.671	0.623	0.641	0.578	0.610	0.508
RMSE modèle	0.257	0.234	0.213	0.201	0.193	0.187	0.178	0.177	0.163	0.170
R² validation	0.862	0.838	0.828	0.796	0.786	0.754	0.725	0.703	0.636	0.608
RMSE validation	0.279	0.264	0.215	0.205	0.200	0.188	0.198	0.179	0.198	0.177

On peut observer que les coefficients de détermination obtenus dans le cas du percentile95 sont supérieurs à ceux calculés pour le MAM7, et ce tant pour les modèles que pour la validation. On remarque également que la différence augmente avec la période de retour.

En validation, la régression effectuée sur le percentile95 est meilleure également mais la différence est moins importante et n'augmente pas avec la période de retour.

Il est possible que la différence observée dans les coefficients de détermination entre les modèles obtenus pour le percentile95 et pour le MAM7 provienne d'une plus grande incertitude sur la valeur du MAM7. Pour rappel, le MAM7 est plus régulièrement inférieur au minimum jaugé et se trouve donc plus fréquemment dans la partie de la courbe de tarage extrapolée pour les bas débits.

D'une manière générale, le coefficient de détermination R^2 des modèles diminue avec la période de retour mais l'écart moyen résiduel RMSE également, ce qui est dû au fait que la variance des débits observés diminue aussi et dans des proportions plus importantes que la variance des résidus.

Outre le fait que les modèles obtenus sont de meilleure qualité pour le percentile95, ce descripteur avait, lors de la sélection des stations de mesures, l'avantage d'être plus souvent supérieur au maximum jaugé. Pour rappel, 41 % des stations de mesures ont un percentile95 minimum inférieur au minimum jaugé, tandis que ce chiffre monte à un peu plus de 60 % dans le cas du MAM7.

5.7 Utilisation et application des modèles de régression

5.7.1 Introduction

Afin de déterminer le débit caractérisant l'étiage (percentile95 ou MAM7) d'un cours d'eau non jaugé pour une période de retour donnée, il faut connaître le coefficient de tarissement de cette rivière ainsi que la recharge en nappe du bassin versant (percolation).

A ce stade, il est important de rappeler que les données utilisées pour la détermination des deux paramètres proviennent de stations de mesures ayant une taille d'historique limitée à un peu plus de trente ans. De ce fait, les modèles de régression obtenus sont considérés comme stationnaires, c'est-à-dire qu'ils ne prennent pas en considération toute évolution possible liée aux changements climatiques éventuels ou aux modifications de la gestion de l'eau au sein des bassins versants considérés. Ce dernier point n'a peu d'impact car pour rappel, lors de la sélection des stations de mesures, un test d'homogénéité a été réalisé sur les données caractérisant l'étiage. A titre d'exemple, nous pouvons rappeler que les points de mesures situés sur l'Eau d'Heure ont été écartés car la mise en service des barrages en amont influence le débit d'étiage du cours d'eau.

Le présent chapitre a comme objectif de proposer une méthodologie de détermination de ces deux variables.

5.7.2 Coefficient de tarissement

Le coefficient de tarissement est déterminé après l'extraction de périodes dites de tarissement. Pour ce faire, des données de débit et de précipitations sont nécessaires.

Afin d'obtenir un coefficient de tarissement pour le cours d'eau non jaugé, la valeur de cette variable calculée pour un bassin versant proche et ayant des caractéristiques hydrogéologiques similaires sera utilisée. (Tsakiris *et al.*, 2011)

Une vérification quant à la précision du coefficient de tarissement, peut être réalisée à partir du coefficient de détermination R^2 de l'application de la loi de Maillet sur les séquences de tarissement définies. Ces derniers sont présentés dans l'Annexe 16 en même temps que les valeurs du coefficient de tarissement.

A la vue de ce tableau, on observe que le coefficient de détermination est supérieur à 0,75 dans près de nonante-deux pourcents des cas, soit pour cinquante-quatre stations sur les soixante-et-une. Pour trois d'entre elles, la valeur obtenue pour ce coefficient de détermination est proche de 0,67 (Ath sur la Dendre orientale, Amougies sur la Rhosnes et Suzeryl sur la Thyle).

Par contre l'application de la loi de Maillet donne des résultats de moins bonne qualité sur les stations d'Irchonwelz sur la Dendre occidentale ($R^2 = 0,51$) et d'Opheyilissem sur la Petite Gette ($R^2 = 0,47$).

Il est à remarquer que le bassin versant des stations d'Amougies, de Suzeryl sont situés sur l'aquifère des Sables du Tertiaire tandis que pour la station d'Opheyilissem, il s'agit d'une part des Sables du Tertiaire et d'autre part de la craie du Secondaire Crétacé. A partir du Tableau 19, on observe également que l'écart-type obtenu pour l'aquifère des Sables du Tertiaire est le plus élevé des quatre groupes retenus.

La Figure 114114 donne la valeur du coefficient de tarissement pour les bassins versants de stations utilisées dans cette étude, ainsi que la taille de l'historique des stations

de mesures ayant servi à son calcul, ce qui permet d'avoir une deuxième idée de la précision et de l'exactitude du coefficient.

En effet, plus l'historique est grand, plus le nombre de séquences de tarissement est élevé et plus le coefficient est précis. Cependant, aucun lien n'a été trouvé entre la taille de l'historique et le coefficient de détermination obtenu lors de l'application de la loi de Maillet.

La carte représente aussi les principaux aquifères de Wallonie et permet ainsi de choisir la valeur du coefficient du bassin versant le plus proche hydrogéologiquement et géographiquement. Il s'agira cependant, d'être prudent lors de la détermination du coefficient de tarissement pour les points non jaugés situés dans l'aquifère des Sables du Tertiaire pour lesquels on souhaite obtenir un débit caractérisant l'étiage.

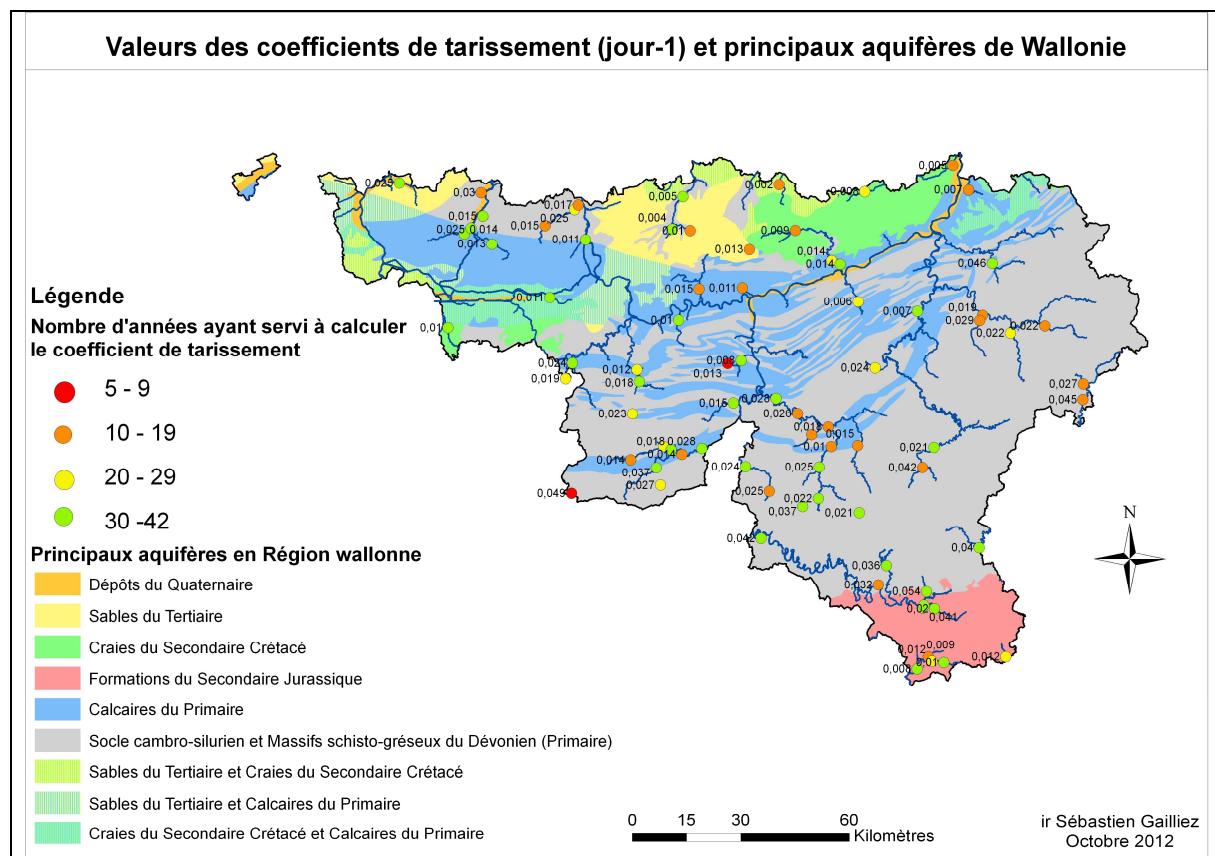


Figure 114 : Coefficients de tarissement des bassins versants étudiés et les principaux aquifères wallons

5.7.3 Recharge des nappes : Percolation

Pour rappel, la percolation moyenne annuelle est obtenue à partir de simulations réalisées à l'aide du modèle EPICGrid. (Sohier, 2011)

Afin de déterminer la percolation d'un bassin versant d'un cours d'eau non jaugé sans avoir recours à une modélisation, la Wallonie a été subdivisée sur base des bassins ORI⁶ qui existent au sein du Service public de Wallonie (subdivision purement administrative).

⁶ Une codification, appelée codification ORI, des bassins et cours d'eau de Wallonie a été créée par l'Office Régional d'Informatique (ORI). Chaque cours d'eau qui se développe en Wallonie a reçu un code hydrologique de 6 chiffres (les 3 premiers identifiant le sous-bassin, les 3 suivants le cours d'eau à l'intérieur du sous-bassin).

Ensuite, afin de tenir compte de la Directive-Cadre sur l'Eau⁷, la percolation est fournie pour les masses d'eau de surface qui sont l'unité de gestion dans un objectif de bon état écologique.

La percolation est déterminée à partir de simulations réalisées à l'aide du modèle EPICGrid pour l'ensemble des bassins versants ORI. Les résultats sont proposés à la Figure 115115. (Sohier, 2011).

Lorsque l'on souhaite définir un débit caractérisant l'étiage d'un cours d'eau non jaugé à partir des modèles de régression, la percolation du bassin versant de cette rivière est défini en calculant la moyenne des percolations des bassins ORI qui le compose.

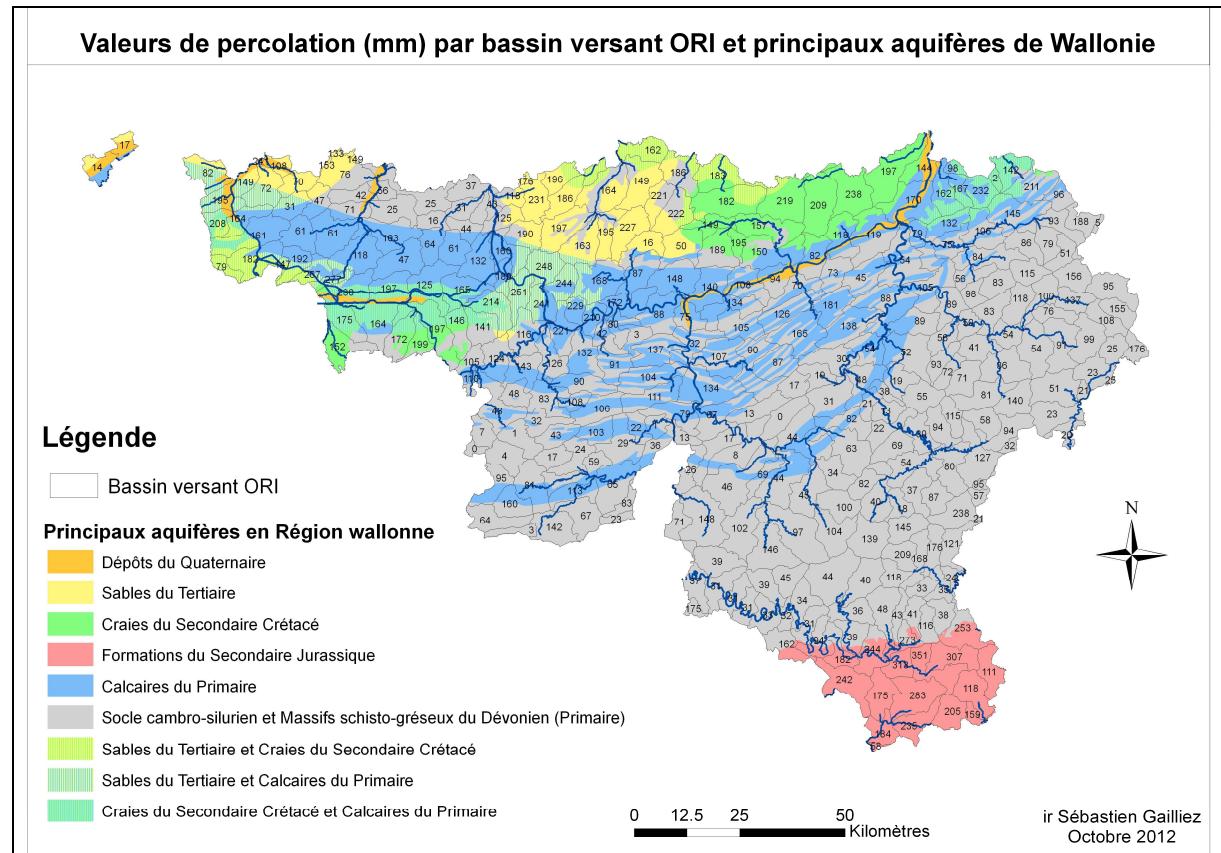


Figure 115 : Percolation (mm) pour les bassins versants ORI et les principaux aquifères de Wallonie

La Figure 116116 propose une comparaison des percolations des bassins versants des stations de mesures obtenues par modélisation à l'aide du modèle EPIC et celles obtenues en calculant la moyenne des percolations des bassins versants ORI qui compose le bassin.

⁷ Directive-Cadre sur l'Eau : Directive 2000/60/CE adoptée le 23 octobre 2000

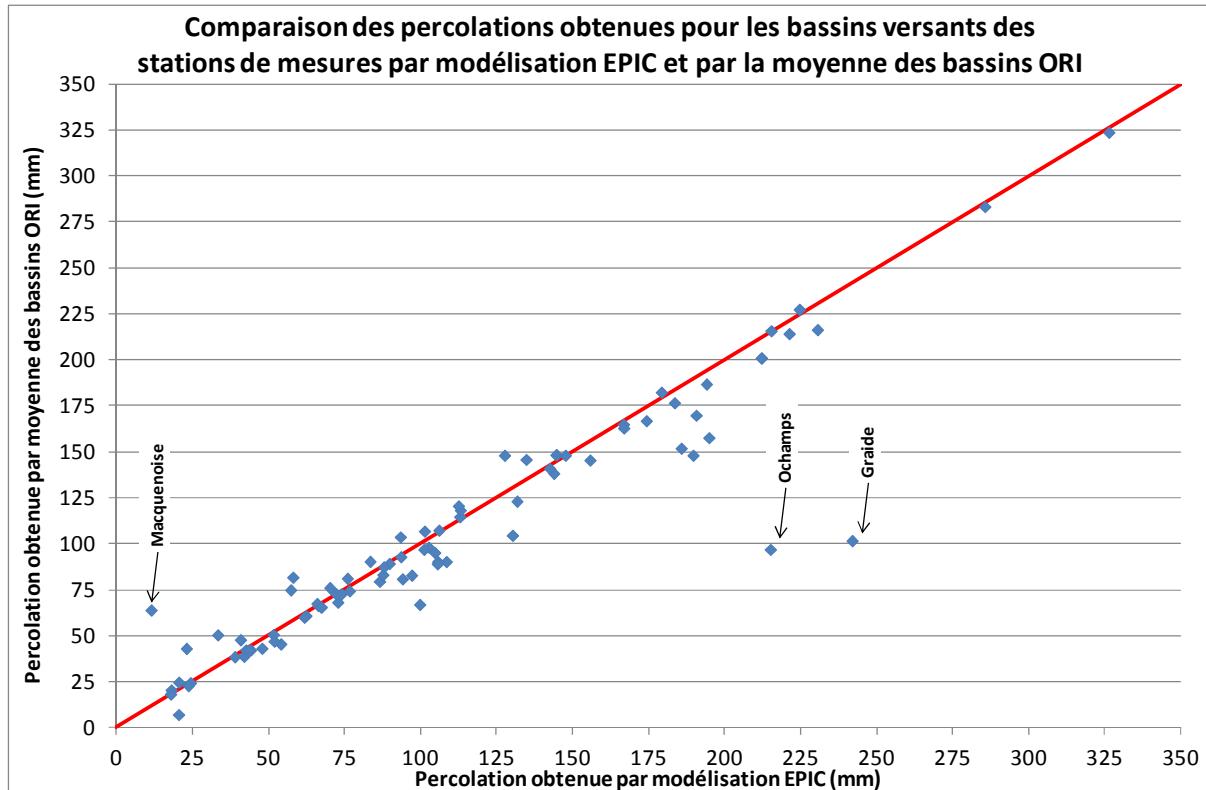


Figure 116 : Comparaison des percolations obtenues pour les bassins versants des stations de mesures par modélisation EPIC et par la moyenne des bassins ORI

Le Tableau 38 présente les valeurs caractéristiques des écarts entre les percolations obtenues par modélisation (EPIC) sur le bassin versant et la moyenne des percolations des bassins ORI obtenues également par modélisation (EPIC). On peut constater que l'écart moyen est de 16,3 %, ce qui est relativement faible. On observe également que plus de 90 pourcents des écarts sont inférieurs à 29 %.

Tableau 38 : Valeurs caractéristiques obtenues à partir des valeurs absolues des écarts (%) des percolations obtenues par modélisation EPIC et moyenne des bassins ORI

	Ecart (%)
Moyenne	16.3
Minimum	0.2
Maximum	462.5
Médiane	5.2
Percentile75	14.2
Percentile90	29.0

Par contre, on observe un maximum de plus de 450 % pour le bassin versant de la station de Macquenoise. Ceci permet d'attirer l'attention de l'utilisateur sur une situation particulière appelant la prudence. Ce bassin ne constitue en fait que la moitié d'un bassin ORI et les deux parties ont une géologie très différente (Figure 114114). Une partie du bassin versant repose sur les calcaires du Primaire tandis que la deuxième partie sur le socle Cambro-Silurien. La percolation moyenne du bassin ORI est de 64 mm mais elle varie de quelques mm à plus de 200 mm au sein de ce même bassin.

Ce problème apparaît également pour les bassins ORI situés à cheval entre le socle cambro-silurien et les massifs schisto-gréseux du Dévonien, et les formations du Secondaire

Jurassique. Il s'agit de la transition entre le bassin de la Semois et de la Chiers, et plus particulièrement du Ton.

On remarque également que pour les stations de Graide et d'Ochamps, nous obtenons une différence non négligeable. L'explication se trouve dans la superficie des bassins versants qui est respectivement de 11,19 et 9,51 km².

Au final, on peut juger acceptable l'utilisation de la moyenne des percolations des bassins ORI, ce qui permet d'éviter d'avoir recours à un modèle hydrologique.

Etant donné que dans le contexte de la Directive-Cadre sur l'Eau, l'unité de gestion est la masse d'eau de surface⁸, la percolation a été simulée pour ces dernières. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 117.

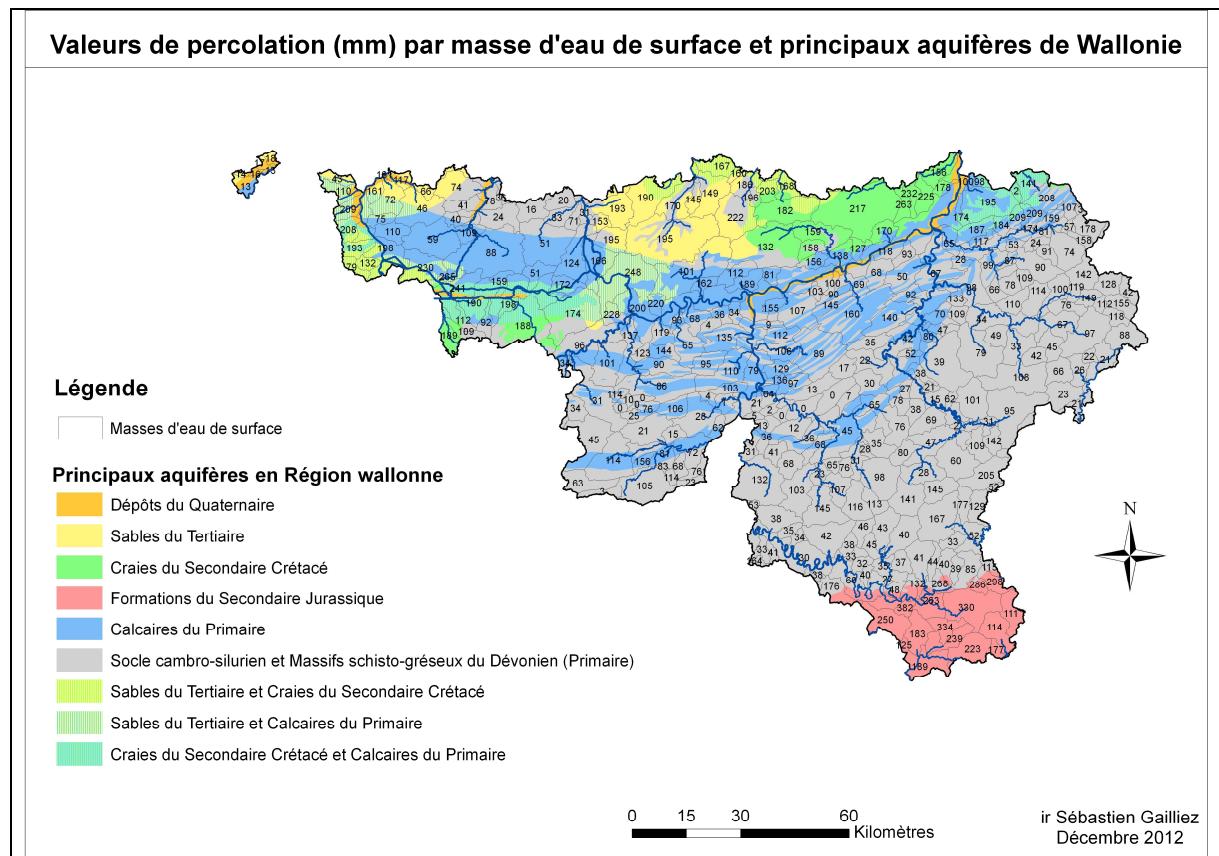


Figure 117 : Valeurs de percolation (mm) par masse d'eau de surface

5.7.4 Application du modèle global à différentes stations de mesures

A. Introduction

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier la qualité des résultats obtenus en utilisant la méthodologie mise en place pour la détermination des deux paramètres, à savoir la percolation et le coefficient de tarissement.

⁸ Masse d'eau de surface : Tronçon de cours d'eau homogène pour un certain nombre de caractéristiques afin de définir des objectifs de qualité à cette échelle.

Dans un premier, il était prévu d'utiliser les données limnimétriques de stations de mesures, de type 'échelle', qui étaient relevées une fois par jour à 08 heures du matin par un lecteur rémunéré par l'administration wallonne. Les hauteurs d'eau étaient ensuite converties en débit à l'aide des équations de tarage.

Cependant, les stations de ce type exploitables, c'est-à-dire qui ont une taille d'historique suffisante (environ vingt ans) ont été utilisées pour augmenter la quantité de données disponibles de certaines stations retenues dans la première partie de ce travail.

Les stations de mesures ayant une fréquence horaire de mesure, et ayant atteint environ vingt années de données ont été utilisées pour la validation des modèles de régression obtenus.

Pour ces deux raisons, il n'existe plus de stations de mesures au sein de la Wallonie, qui permettraient une validation de la méthodologie mise en place pour la détermination des valeurs de la percolation et du coefficient de tarissement.

De ce fait, un test à l'aveugle est réalisé en comparant les percentiles95 obtenus pour les périodes de retour étudiées (2, 5, 10, 20 et 50 ans) à partir des valeurs calculées du coefficient de tarissement et de la percolation lors de l'étape de régionalisation et les percentiles95 obtenus à partir des valeurs estimées de ces deux paramètres.

B. Comparaison des résultats

Pour chaque station de mesures utilisée aussi bien pour la création des modèles de régression que pour leur validation, les valeurs du coefficient de tarissement et de la percolation sont définies.

Pour rappel, le coefficient de tarissement d'une station donnée est déterminé à partir d'une station située soit sur le même cours d'eau, soit au sein du même bassin versant en tenant compte du fait que cette dernière doit être située dans le même aquifère.

A titre d'exemple, le coefficient de tarissement du point de mesures situé sur la Wimbe, à Lavaux-Sainte-Anne est pris comme étant égale à celui de la station de Hérock située sur la Lesse (en aval de la confluence avec la Wimbe). En effet, dans ce cas, les points de mesures situés en amont, sur la Lesse, se situent dans une zone karstique (Eprave, Resteigne).

Pour rappel, la percolation d'un bassin versant d'une station de mesures est calculée à partir de la moyenne des percolations issues des bassins ORI ou des masses d'eau de surface qui le compose. Ce point a été développé dans le paragraphe précédent.

Le Tableau 39 présente les écarts moyens exprimés en pourcent entre les valeurs des percentiles95 obtenus à partir des coefficients de tarissement et des percolations calculées lors de l'étape de régionalisation et les percentiles95 obtenus sur base des paramètres estimés selon la méthodologie mise en place dans ce chapitre.

Tableau 39 : Ecart moyen (%) entre les percentiles95 obtenus sur base des paramètres (percolation et coefficient de tarissement) calculés et estimés

	Période de retour (années)				
	2	5	10	20	50
Moyenne	0.66	-0.19	-0.97	-1.88	-3.27
Ecart-type	13.06	17.16	20.53	24.11	29.15

A partir du Tableau 39, on peut observer que l'écart moyen, ainsi que l'écart-type augmentent (en valeur absolue) avec la période de retour. Les valeurs moyennes des écarts restent faibles. Cependant, on peut observer un écart-type important pour les périodes de retour supérieures à 10 ans.

Les valeurs des écarts les plus élevées sont obtenues principalement sur l'est de la Wallonie : la Hoëgne à Theux, l'Ulf à Reuland, la Braunlauf à Lommersweiler et l'Ourthe occidentale à Erneuveille. Etant donné que les valeurs des percolations retenues sont semblables, l'écart observé provient d'une faiblesse dans l'estimation du coefficient de tarissement. La cause est à rechercher dans le peu de points de mesures pour lesquels ce paramètre a pu être calculé.

Des écarts importants sont également observés au niveau des stations de Marbehan sur la Mellier et de Tintigny sur la Rulles. Il est à remarquer que les coefficients de tarissement calculés sont de $0,054 \text{ jour}^{-1}$ pour la première et de $0,041 \text{ jour}^{-1}$ pour la deuxième. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la Mellier est alimentée par l'aquifère du socle Cambro-Silurien et Massifs schisteux-gréseux du Dévonien tandis que la Rulles, dans sa partie avale, est alimentée par les formations du Secondaire Jurassique.

Ce phénomène est également observé dans une moindre mesure au niveau des stations d'Ath ($CT = 0,025 \text{ jour}^{-1}$) et de Brugelette ($CT = 0,013 \text{ jour}^{-1}$) sur la Dendre orientale.

Par contre pour la station d'Ochamps sur la Lesse, l'écart observé provient de la différence obtenue pour l'estimation de la percolation, comme cela a été montré au point 5.7.3.

La Figure 118 présente une comparaison entre les percentiles95 obtenus à partir des valeurs estimées de la percolation et du coefficient de tarissement et les percentiles95 calculés sur base des valeurs de ces paramètres déterminées lors de l'étape de régionalisation.

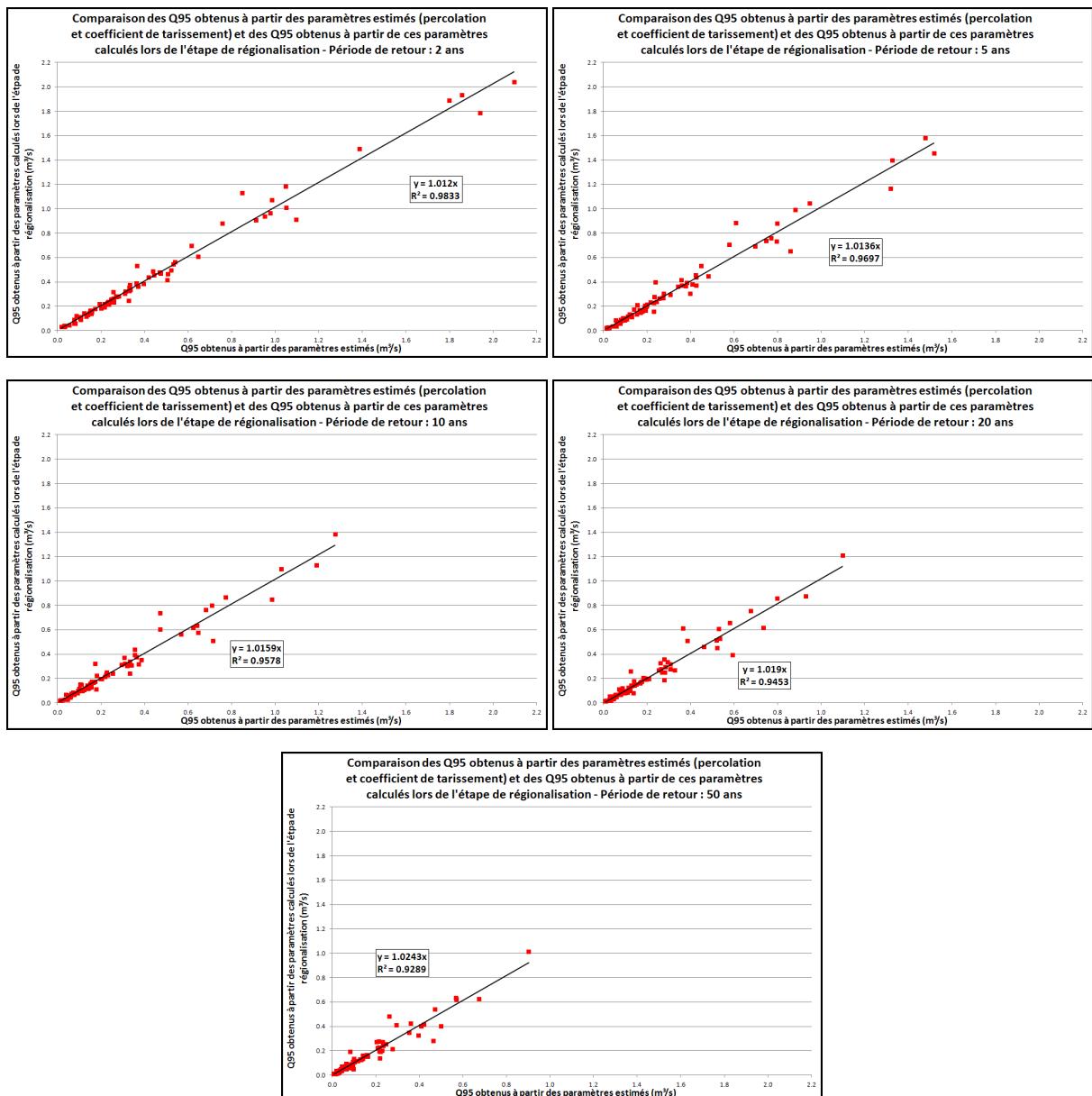


Figure 118 : Comparaison des Q95 obtenus à partir des paramètres estimés (percolation et coefficient de tarissement) et des Q95 obtenus à partir de ces paramètres calculés lors de l'étape de régionalisation pour les différentes périodes de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans)

On observe que l'ajustement d'une droite $Y = X$ est de qualité moindre au fur et à mesure que la période de retour augmente ($R^2 = 0,98$ pour une période de retour de 2 ans et $R^2 = 0,93$ pour une période de retour de 50 ans).

A ce stade, il est important de rappeler que lorsque l'on utilise des données d'étiage dans un objectif opérationnel, les périodes de retour envisagées ne dépassent généralement pas dix ans.

6 CONCLUSIONS

A l'heure de la mise en application de la Directive cadre sur l'Eau, cette thèse propose au gestionnaire des cours d'eau ainsi que des permis d'environnement, un outil permettant la définition des débits caractérisant l'étiage.

Pour ce faire, la qualité et l'utilisation potentielle de plus de deux cent stations de mesures hydrométriques situées en Wallonie ont été étudiées à partir de critères tels que l'homogénéité des données et la taille suffisante de l'historique des stations.

L'historique de certains points de mesures a été augmenté soit par l'ajout de données ayant un pas de temps plus faible, soit par la validation des données ou la complétude de ces dernières.

Au final, un peu moins de soixante stations ont été retenues sur l'ensemble de la zone d'étude.

D'un point de vue bibliographique, il existe un grand nombre de descripteurs pour l'étiage. Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes limités à l'utilisation du percentile95 (débit atteint ou dépassé 95 % du temps) ainsi que du MAM7 (plus faible valeur de la moyenne mobile des débits atteints pendant 7 jours consécutifs de l'année).

Sur base de ces deux paramètres, une analyse fréquentielle a été réalisée afin d'associer une période de retour aux débits. Plusieurs lois d'ajustement utilisées couramment pour les étiages ont été testées. Il ressort de cette analyse qu'aucune loi unique ne peut être privilégiée pour la zone d'étude, et que le choix de cette dernière n'était pas influencé par la taille de l'historique des données ni par la position géographique du point de mesures.

Les paramètres physiques des bassins versants (altitude, occupation du sol, pédologie, coordonnées Lambert, pentes, densité de drainage), climatiques (précipitations, évapotranspiration, température) et hydrogéologique (coefficient de tarissement) ont été déterminés pour l'ensemble des stations de mesures.

Sur base de la méthode de classification numérique, quatre groupes homogènes de bassins versants ont été définis pour l'ensemble du territoire wallon. L'analyse en composantes principales a permis d'expliquer le regroupement. Le regroupement s'explique par les précipitations, les pentes, l'altitude, l'occupation du sol, les groupes hydrologiques des sols.

Nous montrons qu'en l'état actuel des bases de données disponibles, cette régionalisation ne peut être utilisée pour la définition de modèles de régression sous-régionaux, étant donné le nombre relativement faible de stations de mesures dans certains groupes (principalement la Lorraine belge). Cependant, cette définition en zones homogènes pourra être utilisée dans un futur proche, lorsqu'un grand nombre de points de mesures aura vu sa taille d'historique atteindre vingt ans.

Sur base des paramètres définis lors de l'étape de régionalisation et des logarithmes des percentiles95 ou MAM7 spécifiques, les modèles de régression pour cinq périodes de retour (2, 5, 10, 20 et 50 ans) ont été déterminés sur base de la méthode 'pas à pas'. Les conditions d'application des modèles obtenus ont été vérifiées.

Il est apparu que les modèles obtenus utilisaient les deux paramètres caractérisant l'hydrogéologie, à savoir le coefficient de tarissement et la percolation (recharge des nappes).

Il est à remarquer que ces deux paramètres retenus lors de la détermination des modèles de régression, diffèrent de ceux mis en évidence lors de l'étape de régionalisation. Cela provient du fait que selon la méthode 'pas à pas' utilisée pour la régression, seules les variables non corrélées sont retenues.

Un ensemble de dix-neuf stations de mesures a été utilisé pour valider ces modèles à partir du coefficient de détermination de l'écart moyen résiduel.

Afin de faire abstraction de la période de retour, les coefficients obtenus de chaque paramètre et de la constante ont été mis en relation en fonction de la période de retour. Une loi logarithmique a été déterminée pour chaque facteur.

Au final, tant pour le percentile95 que pour le MAM7, une seule équation est nécessaire pour définir le débit caractérisant l'étiage en n'importe quel point d'un linéaire de cours d'eau et ce pour n'importe quelle période de retour, entre 2 et 50 ans.

L'intervalle de confiance de ces équations sont obtenus à partir d'abaques générés pour les modèles déterminés pour les cinq périodes de retour et en appliquant une règle de trois.

Deux cartes de la Wallonie permettent la détermination du coefficient de tarissement et de la percolation lorsque l'on souhaite calculer un débit caractéristique de l'étiage en un point non jaugé. Les tests effectués montrent de bons résultats quant à l'application de la méthodologie mise en place. Il faut être prudent lors de la détermination du coefficient de tarissement dans les régions pour lesquelles on dispose de peu de point de mesures ainsi que pour les bassins versants situés sur deux aquifères différents.

D'ici 5 à 6 ans, un potentiel d'environ trente stations de mesures pourra être utilisé afin d'améliorer la qualité de l'ajustement. En effet, ces stations qui couvrent différents cours d'eau répartis sur l'ensemble de la Wallonie, disposeront d'une taille d'historique suffisante, à savoir vingt ans. Les différents critères de sélection, comme par exemple l'homogénéité des données, ... seront appliqués à celles-ci afin de vérifier la possibilité de leur utilisation.

Ces stations de mesures pourront dès lors être ajoutées aux différents groupes homogènes obtenus dans le cadre de cette thèse. En fonction du nombre de points obtenus par groupe, des modèles de régression par zone homogène pourront éventuellement être déterminés. Dans le cas contraire, un modèle global pour la Région wallonne sera recalculé afin de diminuer l'incertitude sur les valeurs de débits estimées à l'aide de ce dernier.

Les stations de mesures ayant atteint une taille d'historique acceptable, deviendront également des nouveaux points pour l'estimation du coefficient de tarissement. Plusieurs points sont situés dans l'est de la Wallonie (Warchenne, Wayai, Our, Ourthe orientale, ...), zone pour laquelle on ne dispose pas de suffisamment de valeurs de coefficients de tarissement, ce qui engendre pour rappel, une incertitude plus importante sur les débits obtenus à l'aide du modèle de régression global obtenu.

Pour rappel, pour la détermination des modèles de régression, nous disposons de peu de stations de mesures ayant un débit spécifique caractérisant l'étiage soit faible, soit élevé. Ceci engendre une incertitude plus importante sur les débits estimés pour les cours d'eau ou bassins versants concernés. Il serait donc opportun de proposer à l'administration wallonne ayant en charge la gestion des cours d'eau, l'ajout de points de mesures supplémentaires dans les régions où le débit spécifique se situe dans les valeurs faibles et élevées. Il s'agit des bassins versants de la Brouffe, du Houyoux et de la Silles pour les

faibles valeurs et de la région de la Lorraine belge et de la Grand Honnelle pour les débits spécifiques élevés.

7 BIBLIOGRAPHIE

- Armentrout G.W. and Wilson J.F. (1987). Assessment of low flows in streams in northeastern Wyoming. USGS Water Resources Investigations Report, 85-4246, 30p.
- Ashkar F. and Mahdi, S. (2006). Fitting the log-logistic distribution by generalized moments. *Journal of Hydrology* 328, pp. 694–703.
- Atkins J.B. and Pearman J.L. (1995). Low-flow and flow-duration characteristics of Alabama streams. USGS Water-Resources Investigations Report 93-4186, 269p.
- Bastola S., Ishidaira H. and Takeuchi K., 2008. Regionalisation of hydrological model parameters under parameter uncertainty: A case study involving TOPMODEL and basins across the globe. *Journal of Hydrology* 357. Pages 188 – 20.
- Bernier, M.J. (1957). Sur l'application de diverses lois limites des valeurs extrêmes au problème des débits de crues. *Revue de statistique appliquée*, tome 5, n°2. Pages 91-101.
- Boussinecq, J., 1877. Essai sur la théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers savants à l'Académie des Sciences de l'Institut national de France. Tome XXIII, N°
- Brodie R.S. and Hostetler S., 2005. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. *Proceedings of the NZHS-IAH-NZSSS 2005 Conference*, 28 November–2 December, Auckland, New Zealand.
- Burn D. H., 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology* 202. Pages 212 – 230.
- Castiglioni S., Castellarin A. and, Montanari A., 2009. Prediction of low-flow indices in ungauged basins through physiographical space-based interpolation. *Journal of Hydrology* 378. Pages 272 – 280.
- Cemagref-HHLY, Lyon, ESA-CNRS 5023, INPG-UMR LTÉ, IRD, CIG, UMR Sysiphe (1998). Programme National de Recherche en Hydrologie, Régimes hydrologiques. Projet "Régimes" n°97-PNRH-23, rapport de première année 1 997-1998.
- Chalise S. R., Sunil R. Kansakar, Gwyn Rees, Karen Croker, Maxine Zaidman, 2003. Management of water resources and low flow estimation for the himalayan basins of Nepal. *Journal of Hydrology* 282 (2003), pages 25 - 35.
- Claustriaux J.J., 2007. Régression et corrélation linéaires multiple. Cours de statistique appliquée. Gembloux Agro-Bio Tech.
- Confais J. et Le Guen M., 2006. Premiers pas en régression linéaire avec SAS®. *Revue Modulad* 35. Accessible à l'adresse <https://www.rocq.inria.fr/axis/modulad/numero-35/Tutoriel-confais-35/confais-35.pdf>
- Condie R. and Nix G.A. (1975). Modelling of low flow frequency distributions and parameter estimation. *Proceedings of the International Water Resources Symposium, Water for Arid Lands, Iran*.
- Dacharry M., (1997), Dictionnaire français d'Hydrologie.
- Dagnelie P., 1975. Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. 463 P, Les Presses agronomiques de Gembloux.

Dagnelie P., 1992. Statistique théorique et appliquée. Tome 1. 492 P, Les Presses agronomiques de Gembloux.

Dagnelie P., 2006. Statistique théorique et appliquée Tome 2. Les Presses agronomiques de Gembloux.

Dautrebande S., Degré A., Smoos A. et Demarcin P., 2008. - Projet ERRUISSOL - Cartographie numérique des zones à risque de ruissellement et d'érosion des sols en Région wallonne – Rapport finale décembre 2008 – Convention de recherche : Service public de Wallonie – DGO3 – DRCE - DDR.

Demarcin *et al.*, 2011. Essai de cartographie des classes d'infiltabilité des sols de Wallonie. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement (BASE).

Directive 2000/60/CE, 2000. Directive Cadre sur l'eau adoptée par le Parlement européen le 23 octobre 2000.

Donald H. Burn, 1997. Catchment similarity for regional flood frequency analysis using seasonality measures. *Journal of Hydrology* 202 (1997), pages 212 - 230.

El-Adlouni S., Bobée B. and Ouarda T. B.M.J., 2007. Caractérisation des distributions à queue lourde pour l'analyse des crues. Rapport de Recherche N°R-929.

El-Adlouni S., Bobée, B., Ouarda T.B.MJ. and Dussaychoy A. (2008). On the tails of extreme event distributions in hydrology. *Journal of hydrology* 355. Pages 16 - 33.

Galéa G., Javelle P. et Chaput N.. Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des Sciences de l'Eau*, 13/4 (2000), pages 421-440.

Galéa G., Mercier G. et Adler M. J., 1999. Modèle débit-durée-fréquence d'étiage, concept et usage pour une approche régionale des régimes des basses eaux des bassins hydrographiques de la Loire (France) et du Crisul-Alb (Roumanie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/1 (1999), pages 93-122.

Galéa G. and Canali S., 2005. Régionalisation des modules annuels et des régimes d'étiages du bassin hydrographique de la Moselle française : lien entre modèles régionaux. *Revue des Sciences de l'Eau* 18/3 (2005), pages 331 – 352.

Gibbs M.S., Maier H.R. and Dandy G.C., 2012. A generic framework for regression regionalization in ungauged catchments. *Environmental Modelling et Software* 27 - 28. Pages 1 – 14.

Giese G.L. and Mason R.R. (1993). Low-flow characteristics of streams in north Carolina. *USGS Water-Supply Paper* 2403, 29p.

Gloos R. et Walter M., 1986. Estimation des débits d'étiage sur des cours d'eau sans mesures directes. *Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne*.

Gomes O., Combes C. and Dussaychoy A. (2008). Parameter estimation of the generalized gamma distribution. *Elsevier – Mathematics and computers in simulation* 79. Pages 955 - 963.

Greenwood J.A., Landwehr J.M., Matalas N.C. and Wallis J.R. (Landwehr *et al.*, 1979). Probability weighted moments: definition and relation to parameters of several distributions expressible in inverse form. *Water Resources Research* 15/5, pp. 1049–1054.

Gottschalka L., Tallaksena L. M. and Perzynab G., 1997. Derivation of low flow distribution functions using recession curves. *Journal of Hydrology* 194. Pages 239–262.

Gumbel E.J. (1954). Statistical theory of drought. *Comptes rendus du American Society of Civil Engineers*, vol. 80, Separate 439.

Gustard A., Bullock A. and Dixon J. M., 1992. Low flow estimation in the United Kingdom. *Institute of Hydrology*

Gustard A., Rees H. G., Croker K. M. and Dixon J. M., 1997. Using regional hydrology for assessing European water resources. *FRIEND '97 - Regional Hydrology. Concepts and Models for Sustainable Water Resource Management (Proceedings of the Postojna, Slovenia, Conference, September - October 1997)*. IAHS Publ. N°246, 1997.

Gwo-Fong Lin and Lu-Hsien Chen. (2006). Identification of homogeneous regions for regional frequency analysis using the self-organizing map. *Journal of Hydrology* 324, pp.1 – 9.

Hamza A., 1999. Estimation régionale des débits d'étiage de la Province Québec (Développement des modèles régionaux de queues et d'invariance d'échelle). Mémoire. Université du Québec (INRS-EAU).

Hingray B., Picouet C. et Musy A., 2009. *Hydrologie – Une science pour l'ingénieur*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Hoang V.D. (1978). Meilleur ajustement statistique aux débits journaliers de crue et d'étiage des rivières du Québec. Ministère des Richesses Naturelles, Direction générale des eaux, H.P., 47p.

Hosking J.R.M. (1986). *The Theory of Probability Weighted Moments*. Research Report RC12210, IBM Thomas J. Watson Research Center, New York.

Hosking J.R.M. (1990). L-Moment – Analysis and estimation of distributions using linear-combinations of order-statistics. *Journal of the Royal statistical society series B-Methodological*, vol. 52/1, pp. 105-124.

Hubert P. (2005). La prédétermination des crues. *Comptes rendus Geoscience* 337. Pages 219 - 227.

Interagency Advisory Committee on Water Data (1982). Guidelines for determining flood-flow frequency: Bulletin 17B of the Hydrology Subcommittee. Office of Water Data Coordination, U.S. Geological Survey, Reston, Va., 183 p.

Joseph E.S. (1970). Probability distribution of annual droughts. *Journal of the irrigation and drainage division, Proceedings of the ASCE*, 96 (IR4), pp. 461-474.

Kroll C., Luz J., Allen B. and Vogel R.M., 2004. Developing a Watershed Characteristics Database to Improve Low Streamflow Prediction. *Journal of Hydrologic Engineering*, mars – Avril 2004. Pages 116 - 125.

Laaha G. and Blöschl G., 2005. Low flow estimates from short stream flow records – a comparison of methods. *Journal of Hydrology* 306 (2005), pages 264 - 286.

Laaha G. and Blöschl G., 2006. A comparaison of low regionalization methods – catchment grouping. *Journal of Hydrology* 323 (2006), pages 193 - 214.

Laaha G. and Blöschl G., 2007. A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques*, 52(4) August 2007. Pages 625 – 644.

Landwehr J.M., Matalas N.C. and Wallis J.R. (1979). Probability weighted moments compared with some traditional techniques in estimating Gumbel Parameters and quantiles. *Water Resources Research*, vol. 15/5, pp. 1055-1064.

Lang C. et Gille E., 2006. Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Norois*, numéro 201 (2006/4).

Leppajarvi R. (1989). Frequency analysis of flood and low flow. *FRIENDS in Hydrology*, IAHS Publication n°187, p 435-442.

Maidment D.R. (1993). *Handbook of hydrology*. McGraw- Hil, New York, 1424p.

Martin G.N., 1973. Characterisation of simple exponential baseflow recessions. *J. Hydrol.* NZ, 12(1) : pages 57-62.

Matalas N.C. (1963). Probability distribution of low flows. U.S. Geological survey, professional, report n°434 A.

Meylan P., Favre A-C. et Musy A., 2008. *Hydrologie fréquentielle, une science prédictive*. 173 P, Presse polytechniques et universitaires romandes.

Miquel J. (1984). *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues*. Eyrolles, Paris, 160p.

Monjoie A, Materne M et Heynderickx J (1989). Etude des étiages, Rapport des recherches réalisées à l'Institut d'Hydrologie de Wallingford dans le cadre de la convention Génie rural/Région wallonne/Ministère des Travaux publics.

Nathan R.J. and McMahon T.A. (1990). Practical aspects of low-flow frequency analysis. *Water Resources Research*, vol. 26/9, pp. 2135-2041.

Nathan R.J. and McMahon T.A. (1992). Estimating Low Flow Characteristics in Ungauged Catchments. *Water Resources Research* 6, pp. 85 - 100.

Olive D.J., 2007. Prediction Intervals for Regression Models. *Computational Statistics et Data Analysis*, 51. Pages 3115 - 3122 Southern Illinois University Carbondale

Palm R., 1988. Les critères de validation des équations de régression linéaire. Gembloux Agro-Bio Tech.

Palm R, 1998. La classification numérique : principe et application. Cours d'éléments d'analyse statistique à plusieurs variables.

Parent E. and Bernier J. (2003). Bayesian POT modeling for historical data. *Journal of hydrology* 274. Pages 95 - 108.

Patil S. and Stieglitz M. (2012). Controls on hydrologic similarity: role of nearby gauged catchments for prediction at an ungauged catchment. *Hydrology and Earth System Sciences*.

Pilgrim D.H. (1987). *Australian Rainfall and Runoff, a guide to flood estimation*. Vol. I, the Institute of Engineers, Barton ACT, Australia.

Prakash A. (1981). Statistical determination of design low flows. *Journal of Hydrology* 51, pp. 109–118.

Ramachandra Rao A. and Srinivas V. V., 2006. Regionalization of watershed by hybrid-cluster analysis. *Journal of Hydrology* 318 (2006), pages 37 - 56.

Rawlings J.O., 1988. *Applied Regression Analysis : A Research Tool*, Belmont, CA : Wadsworth

Rawlings J.O., Pantula S.G. and Dickey D.A., 1998. *Applied Regression Analysis : A Research Tool*, Springer Texts in Statistics, Second Edition, New York: Springer-Verlag.

Rouxhet F., Guiot J., Dewez A., Dautrebande S., Hallet V. et Monjoie A., 1996. Programme-action Hesbaye – Rapport de synthèse.

Runge J. and Nguimale C-R. (2005). Physiogeographic features of the Oubangui catchment and environmental trends reflected in discharge and floods at Bangui 1911–1999, Central African Republic. Elsevier – *Geomorphology* 70. Pages 311 - 324

Rutledge A.T., 1998. Computer Programs for Describing the Recession of Ground-Water Discharge and for Estimating Mean Ground-Water Recharge and Discharge from Streamflow Records. USGS. Water-Resources Investigations Report 98-4148

Salvadori, G., De Michele, C., Kottekoda, N.T. and Rosso, R. (2007). *Extremes in nature: An approach using Copulas*. Water Science and Technology Library, Springer. 292 pp.

Schreiber P. and Demuth S., 1997. Regionalization of low flows in southwest Germany. *Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(6). Pages 845 – 858

Soil Conservation Service (1972). *National engineering handbook: Hydrology*, Section 4. USDA-SCS, Washington, DC.

Seibert JI and Beven K. J., 2009. Gauging the ungauged basin: how many discharge measurements are needed? *Hydrology and Earth System Sciences* 13 (2009), pages 883 – 892.

Shao Q. and Chen Y.D., Zhang L. (2008). An extension of three-parameter Burr III distribution for low-flow frequency analysis. *Computational Statistics et Data Analysis* 52, pp. 1304-1314.

Sloto R.A. and Crouse M.Y., 1996. HYSEP : A computer program for streamflow hydrograph separation and analysis. USGS. Water-Resources Investigations Report 96-4040.

Smakhtin V., 2001. Low flow hydrology : a review. *Journal of Hydrology* 240 (2001), pages 147 - 186.

Sohier C., 2011. Développement d'un modèle hydrologique sol et zone vadose afin d'évaluer l'impact des pollutions diffuses et des mesures d'atténuation sur la qualité des eaux en Région wallonne. Thèse de doctorat. Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech.

Tallaksen L.M. 1995. A review of baseflow analysis. *Journal of Hydrology*, pages 349-370.

Tallaksen, L.M., Van Lanen H.A.J., 2004. Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater Developments in Water science 48. Elsevier. Amsterdam.

Tasker G.D. (1987). A comparison of methods for estimating low flow characteristics of streams. *Water Resources Bulletin*, vol. 112/6, pp. 1077-1083.

Tsakiris G., Ioannis N and Cavadias G., 2011. Regionalization of low flow based on Canonical Correlation Analysis. *Advances in Water Resources* 34 (2011), pages 865 - 872.

Ungtai Kim and Jagath J. Kaluarachchi, 2008. Application of parameter estimation and regionalization methodologies to ungauged basins of the Upper Blue Nile River Basin, Ethiopia. *Journal of Hydrology* 318 (2008), pages 39 - 56.

Ven Te Chow, D. Maidment and L. W. Mayx, 1988. *Applied Hydrology*. 572 P, McGraw-Hill Book Copany.

Verdel T., 2007. Décision et Prévision Statistiques. Cours issus de l'école des Mines de Nancy. Chapitre 7 : La Régression linéaire.

Veron P. et Bah B. (2005). Dir. Sc. : Bock L, Rondeux J. et Lejeune P. Mise en œuvre de la phase « interprétation » du Projet de Cartographie Numérique des Sols de Wallonie (P.C.N.S.W.). Unité Sol-Ecologie-Territoire, Laboratoire de Géopédologie, Unité de Gestion de Ressources forestières et des Milieux naturels, Faculté universitaire des Sciences agronomiques, Gembloux, Belgique, 38 p. + annexes.

Vezza P., Comoglio C., Rosso M. and Viglione A., 2010. Low Flows Regionalization in North-Western Italy. *Water Resour Manage* (2010) 24. Pages 4049 – 4074.

Vogel R.M. and Kroll C.N., 1989. Low flow frequency analysis using probability-plot correlation coefficients. *Journal of Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, Volume 26, n°2.

WMO, 1974. World Meteorological Organization, 1974. *International Glossary of Hydrology*, WMO. Geneva.

Xanthoulis D., 1985. Modélisation mathématique des débits d'étiage des cours d'eau. Application au bassin versant de la Lesse. Thèse présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences agronomiques.

Xanthoulis D. et Debauche O., 2010. Actualisation des limites de bassins versants en Région wallonne – Rapport Novembre 2010 – Marché de Service : Service public de Wallonie – DGO3 – DRCE - DCENN.

Yadav M., Wagener T. and Gupta H, 2007. Regionalization of constraints on expected watershed response behavior for improved predictions in ungauged basins. *Advances in Water Resources* 30. Pages 1756 – 1774.

Young A.R., 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 320. Pages 155 – 172.

8 ANNEXES

Annexe 1 : Liste des stations de mesures

Code	Localité	Cours D'eau	Bassin Versant
92231002	Pétigny	Ry Ermitage	Viroin
92241002	Pétigny	Ry Font Aux Serpents	Viroin
78431002	Boussu-Lez-Walcourt	Ry D'erpion	Sambre
92211002	Pétigny	Ry De Rome	Viroin
78631002	Sileneux (Ry)	Ry Jaune	Sambre
L5530	Ochamps	Lesse	Lesse
L5540	Graide	Ruisseau De Graide	Lesse
78831002	Soumoy	Ry De Soumoy	Sambre
92011002	Couvin	Ry De Rome	Viroin
25361002	Gouy	Piéton	Sambre
L6260	Upigny	Mehaigne	Mehaigne
65261002	Belleheid	Hoëgne	Vesdre
78911002	Cerfontaine	Eau D'heure	Sambre
69811002	Bullinghen	Warche	Amblève
L5961	Wiers	Verne Blanche	Escaut
L6721	Bougnies	By	Haine
L7080	Estinnes-Au-Val	Rau Des Estinnes	Haine
L6860	Baisieux	Petite Honnelle	Haine
L6460	Huccorgne	Burdinale	Mehaigne
L6770	Dalhem	Bolland	Meuse Aval
69911002	Malmedy	Warchenne	Amblève
L6100	Blanmont	Nil	Dyle
69711002	Wirtzeld	Holzwarche	Amblève
L7200	Macquenoise	Oise	Oise
L6900	Awirs	Ruisseau Des Awirs	Meuse Aval
L6101	Blanmont	Orne	Dyle
92321002	Bruly	Ry De Pernelle	Viroin
L6960	Dottignies	Grande Espierres	Escaut
L6780	Prayon	Magne	Vesdre
L5200	Rhinses	Houyoux	Meuse Amont
L6560	Bistain	Ruisseau De Rettigny	Ourthe
L6590	Lens	Dendre Orientale	Dendre
L6940	Hargimont	Hédrière	Lesse
L5201	Rhinses	Houyoux	Meuse Amont
10811002	Bousval	Dyle	Dyle
L7120	Marche-en-Famenne	Marchette	Ourthe
L6060	Thy-Le-Château	Thyria	Sambre
81661002	Sosoye	Molignée	Meuse Amont
L6970	Bornival	Thines	Senne
L6300	Vieuxville	Ry De Logne	Ourthe
L6400	Gedinne	Houille	Meuse Amont
L6640	Noirha	Dyle	Dyle
L5701	Mesvin	By	Haine
L5702	Hyon	By	Haine
L6710	Givry	Trouille	Haine
L6920	Escanaffles	Rieu De L'haye	Escaut
L7060	Dampicourt	Chavratte	Chiers
L7090	Saint-Vaast	Haine	Haine
79781002	Bersillies L'abbaye	Thure	Sambre
L5680	Leuze	Dendre Occidentale	Dendre
L6080	Reuland	Ulf	Our
L6930	Falisolle	Ruisseau De Fosses	Sambre
L5420	Isières	Sille	Dendre
L5670	Ronquières	Sennette	Senne
L6670	Hemtinne	Soile	Mehaigne
L6830	Châtelet	Ruisseau D'hanzinne	Sambre

	Vresse-Sur-Semois	Ry Du Moulin	Semois
81811002	Foy	Flavion	Meuse Amont
L6022	Athus	Messancy	Chiers
L6021	Athus	Messancy	Chiers
L6020	Athus	Messancy	Chiers
L5500	Marbehan	Mellier	Semois
L6040	Grandville	Yerne	Geer
L6090	Lommersweiler	Braunlauf	Our
L6980	Martilly	Rau De Neufchâteau	Semois
L6000	Profondenville	Burnot	Meuse Amont
L6001	Profondenville	Burnot	Meuse Amont
L6690	Erezée	Aisne	Ourthe
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	Ourthe
L5460	Suzeril	Thyle	Dyle
L5590	Ethe	Ton	Chiers
L5550	Our	Eau D'our	Lesse
L5480	Hévillers	Orne	Dyle
L6450	Estaimpuis	Espierres	Escaut
L6850	Sprimont	Ruisseau De Laval	Ourthe
L5630	Hamoir	Néblon	Ourthe
L7070	Rensiwé (Wibrin)	Martin-Moulin	Ourthe
L6570	Ghoy	Ruisseau D'ancre	Dendre
L5442	Aiseau	Biesme	Sambre
L5710	Biesme-Sous-Thuin	Biesme	Sambre
L6870	Marchipont	Anneau	Haine
78311002	Silene (Barrage)	Eau D'heure	Sambre
L6430	Harmignies	Trouille	Haine
L7020	Braine-le-Château	Hain	Senne
L6370	Hargimont	Wamme	Lesse
91111002	Mariembourg	Brouffe	Viroin
L6950	Maffle	Hunelle	Dendre
L6220	Villers-Devant-Orval	Marge	Chiers
L5560	Vencimont	Houille	Meuse Amont
L6880	Beaumont	Hantes	Sambre
L6150	Archennes	Train	Dyle
L6630	Thuin	Biesme L'eau	Sambre
L5640	Walcourt	Ry D'yves	Sambre
78121002	Walcourt-Vogenee	Ry D'yves	Sambre
L6840	Daverdisse	Ruisseau De Gembes	Lesse
L6990	Auby-Sur-Semois	Ruisseau Des Aleines	Semois
L6440	Virton	Ton	Chiers
L5880	Chantemelle	Semois	Semois
L5570	Saint-Martin	Ligne	Sambre
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	Lesse
L6600	Spiennes	Trouille	Haine
L6790	Spixhe	Wayai	Vesdre
72281002	Modave	Hoyoux	Samson - Hoyoux
L5970	Habay-La-Vieille	Rulles	Semois
L6550	Brizy	Ourthe Orientale	Ourthe
77841002	Walcourt (Seuil)	Eau D'heure	Sambre
L6130	Beaurieux	Orne	Dyle
L6131	Beaurieux	Orne	Dyle
99261002	Schoenberg	Our	Our
L6350	Couvin	Eau Noire	Viroin
L5661	Steenkerque	Senne	Senne
L5600	Ruette	Vire	Chiers
L6620	Ligne	Dendre Occidentale	Dendre
L5370	Rosières	Lasne	Dyle
L6530	Aublain	Eau Blanche	Viroin
L5980	Mozet	Samson	Samson - Hoyoux
L6290	Amberloup	Ourthe Occidentale	Ourthe
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	Dendre
86611002	Felenne	Houille	Meuse Amont
L5060	Romedenne	Hermeton	Hermeton

L6390	Dalhem	Berwinne	Meuse Aval
L6730	Hyon	Wampe	Haine
L6660	Sippenaeken	Gueule	Gueule
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	Haine
56211002	Berneau	Berwinne	Meuse Aval
55721002	Bergilers Amont	Geer	Geer
L6180	Etalle	Semois	Semois
L6030	Latour	Vire	Chiers
81631002	Warnant	Molignée	Meuse Amont
29521002	Irchonwelz	Dendre Occidentale	Dendre
L6280	Opheylissem	Petite Gette	Gette
L5720	Saint-Jean-Geest	Grande Gette	Gette
23711002	Ronquières	Samme	Senne
68031002	Chevron	Lienne	Amblève
79441002	Wihéries	Hantes	Sambre
95711002	Sainte-Marie	Semois	Semois
L5660	Steenkerque	Senne	Senne
L6240	Lorcé	Lienne	Amblève
69461002	Bévercé	Warche	Amblève
35611002	Bousoit	Haine	Haine
L5412	Amougies	Rhosnes	Escaut
L7320	Spontin	Bocq	Meuse Amont
86221002	Hastiere	Hermeton	Hermeton
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	Senne
L7130	Martilly	Vierre	Semois
90711002	Couvin	Eau Noire	Viroin
L5930	Houffalize	Ourthe Orientale	Ourthe
L6320	Grupont	Lhomme	Lesse
96511002	Straimont	Vierre	Semois
L5491	Juzaïne	Aisne	Ourthe
L5490	Juzaïne	Aisne	Ourthe
69331002	Malmedy	Warche	Amblève
L6520	Malmedy	Warche	Amblève
L5860	Theux	Hoëgne	Vesdre
L5180	Onoz	Orneau	Sambre
77811002	Walcourt (Gare)	Eau D'heure	Sambre
L5580	Thioux	Warche	Amblève
L6470	Ambresin	Mehaigne	Mehaigne
67531002	Lasnenville	Amblève	Amblève
68321002	Trois-Ponts	Salm	Amblève
L6070	Trois-Ponts	Salm	Amblève
L5183	Onoz	Orneau	Sambre
L5181	Jemeppe-Sur-Sambre	Orneau	Sambre
L5182	Jemeppe-Sur-Sambre	Orneau	Sambre
L5610	Martelange	Sûre	Sûre
19511002	Tubize	Senne	Senne
1951SVC2	Tubize	Senne	Senne
L5220	Tintigny	Rulles	Semois
L7140	Suxy	Vierre	Semois
36431002	Hyon	Trouille	Haine
29711002	Ath	Dendre Orientale	Dendre
81341002	Yvoir	Bocq	Meuse Amont
L5800	Yvoir	Bocq	Meuse Amont
L5990	Marchin	Hoyoux	Samson - Hoyoux
L6310	Forrières	Lhomme	Lesse
90811002	Nismes	Eau Blanche	Viroin
L7010	Oisquercq	Sennette	Senne
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	Ourthe
85271002	Jemelle	Lhomme	Lesse
L6140	Limelette	Dyle	Dyle
L5520	Harnoncourt	Ton	Chiers
83411002	Daverdisse	Lesse	Lesse
7244SVC2	Huccorgne	Mehaigne	Mehaigne
10461002	Bierges	Dyle	Dyle

60211002	Mabompré	Ourthe Orientale	Ourthe
77111002	Jamioulx	Eau D'heure	Sambre
L5870	Verviers	Vesdre	Vesdre
L7150	Verviers	Vesdre	Vesdre
72421002	Moha	Mehaigne	Mehaigne
L5021	Resteigne	Lesse	Lesse
L5020	Resteigne	Lesse	Lesse
L5820	Wanze	Mehaigne	Mehaigne
99141002	Reuland	Our	Our
6122SVC2	Ortho	Ourthe Occidentale	Ourthe
95611002	Tintigny	Semois	Semois
L6330	Ouren - Reuland	Our	Our
L6010	Jemelle	Lhomme	Lesse
L5080	Eprave	Lesse	Lesse
L6650	Rochefort	Lhomme	Lesse
L6160	Florival	Dyle	Dyle
L6340	Eben-Emael	Geer	Geer
67321002	Stavelot	Amblève	Amblève
L6360	Eprave	Lhomme	Lesse
L6380	Olloy-Sur-Viroin	Viroin	Viroin
L6510	Stavelot	Amblève	Amblève
L6760	Treignes	Viroin	Viroin
90211002	Treignes	Viroin	Viroin
97411002	Torgny	Chiers	Chiers
6228SVC2	Chaudfontaine	Vesdre	Vesdre
59911002	Nisramont	Ourthe	Ourthe
95411002	Chiny	Semois	Semois
35151002	Hensies Bar.	Haine	Haine
66711002	Targnon	Amblève	Amblève
59611002	Hotton	Ourthe	Ourthe
L6890	Lorcé	Amblève	Amblève
66211002	Martinrive	Amblève	Amblève
L5620	Vignée - Ciergnon	Lesse	Lesse
L6610	Hérock	Lesse	Lesse
82311002	Houyet	Lesse	Lesse
59531002	Durbuy	Ourthe	Ourthe
94341002	Membre Pont	Semois	Semois
82211002	Gendron	Lesse	Lesse
59221002	Hamoir	Ourthe	Ourthe
5921SVC2	Tabreux	Ourthe	Ourthe
5826SCC2	Sauheid	Ourthe	Ourthe
5808SCC2	Angleur (2 Bis)	Ourthe	Ourthe
L7190	Wanlin	Biran	Lesse
L6461	Marneffe	Burdinale	Mehaigne
L6671	Hemptinne	Soile	Mehaigne
L7241	Jemeppe-Sur-Sambre	Orneau	Sambre
L7280	Monteneau	Amblève	Amblève
L7290	Trou De Bra	Lienne	Amblève
L7310	Papignies	Trimpont	Dendre
L7330	Bellignies	Grande Honnelle	Haine
L7300	Herbeumont	Semois	Semois
L7250	Eth	Ruisseau Du Sart	Haine
L7260	Gussignies	Grande Honnelle	Haine
L7270	Jenlain	Anneau	Haine
L7160	Stavelot	Eau Rouge	Amblève
L7220	Nethen	Nethen	Dyle
L7180	Biesme-Sous-Thuin	Biesme L'eau	Sambre
L7210	Grandrieu	Thure	Sambre
L6910	Pecq	Pas À Wasmes	Escaut
L7110	Bernissart	Grand Courant	Haine

Annexe 2 : Nombre d'année minimum tel que l'écart relatif entre la moyenne (variance) des Q95 (ou MAM7) de l'échantillon et la moyenne (variance) des Q95 (ou MAM7) obtenue pour l'historique complet est inférieur à 10%

Localité	Cours d'eau	Nombre d'années de fonctionnement	Nombre d'années complètes	Année pivot (Q95)	Taille de l'historique minimum requis (Q95)	Année pivot (MAM7)	Taille de l'historique minimum requis (MAM7)
Martinrive	Amblève	36	36	1987	22	1987	22
Mariembourg	Brouffe	29	29	1986	23	1986	23
Irchonwelz	Dendre occidentale	32	32	1996	13	2000	9
Ath	Dendre orientale	35	34	1985	24	1986	23
Bierges	Dyle	35	35	1988	21	1988	21
Nismes	Eau blanche	41	40	1983	25	1983	25
Cerfontaine	Eau d'heure	30	30	1987	22	1986	23
Couvin	Eau noire	36	32	1987	22	1987	22
Bergilers amont	Geer	25	25	1991	18	1992	17
Bousoit	Haine	36	34	1987	20	1986	21
Wihéries	Hantes	31	30	1987	22	1987	22
Hastiere	Hermeton	41	41	1979	30	1981	28
Felenne	Houille	42	42	1985	24	1985	24
Modave	Hoyoux	23	23	1994	15	1995	14
Daverdisse	Lesse	42	42	1985	24	1985	24
Moha	Mehaigne	36	27	1987	13	1987	13
Warnant	Molignée	41	41	1986	23	1986	23
Nisramont	Ourthe	32	32	1987	22	1987	22
Sauheid	Ourthe	23	23	1987	22	1987	22
Bruly	Ry de Pernelle		29	1988	21	1988	21
Trois-ports	Salm	22	22	1997	12	1995	14
Ronquières	Samme	21	21	1997	12	1998	11
Membre pont	Semois	42	42	1987	22	1986	23
Sainte-marie	Semois	32	31	1988	21	1988	21
Tintigny	Semois	36	36	1987	22	1987	22
Tubize (Ripain)	Senne	24	24	1976	22	1976	22
Bersillies-l'abbaye	Thure	26	23	1987	19	1994	15
Straimont	Vierre	36	35	1987	22	1987	22
Treignes	Viroin	36	41	1988	21	1987	22
Resteigne	Lesse	41	33	1979	22	1978	23
Baisieux	Grande Honnelle	39	30	1979	21	1987	17
Rhisnes	Houyoux	39	37	1987	21	1987	21
Tintigny	Rulles	38	34	1987	17	1987	17
Amougies	Rhosnes	37	29	1978	22	1978	22
Isières	Sille	37	36	1988	19	1987	20
Aiseau	Biesme	37	20	1982	15	1982	15
Suzeril	Thyle	36	35	1998	11	1995	14
Marbehan	Mellier	35	36	1979	25	1979	25
Harnoncourt	Ton	35	36	1979	27	1979	27
Ochamps	Lesse	35	33	1981	26	1981	26
Graide	Ruisseau de Graide	35	32	1979	27	1979	27
Our	Eau d'Our	35	29	1984	19	1983	20
Ruette	Vire	34	28	1981	22	1980	23
Martelange	Sûre	34	29	1979	24	1981	22
Hamoir	Néblon	33	36	1988	19	1977	29
Walcourt	Ry d'Yves	33	40	1974	32	1974	32

Brugelette	Dendre Orientale	32	28	1991	18	1991	18
Wanze	Mehaigne	31	29	1988	19	1987	20
Erneuville	Ourthe Occidentale	30	38	1975	32	1975	32
Athus	Messancy	29	29	1981	19	1981	19
Latour	Vire	40	40	1981	28	1981	28
Baillonville	Ruisseau d'Heure	38	38	1979	28	1981	26
Thy-le-Château	Thyria	40	40	1982	24	1981	25
Lorcé	Lienne	27	27	1982	21	1981	22
Upigny	Mehaigne	29	29	1976	22	1975	23
Lavaux-Ste-Anne	Wimbe	34	34	1976	27	1977	26
Opheylissem	Petite Gette	35	35	1974	29	1980	23
Grupont	Lhomme	28	28	1977	22	1978	21
Eprave	Lhomme	30	30	1997	12	1995	14
Dalhem	Berwinne	37	37	1970	33	1984	20
Gedinne	Houille	31	31	1972	25	1973	24
Ambresin	Mehaigne	38	38	1987	17	1994	15

Annexe 3 : Liste intermédiaire des stations de mesures retenues avant le test d'homogénéité

Code	Localité	Cours d'eau	Bassin versant
66211002	Martinrive	Amblève	Amblève
81341002	Yvoir	Bocq	Meuse amont
91111002	Mariembourg	Brouffe	Viroin
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	Dendre
29711002	Ath	Dendre orientale	Dendre
10461002	Bierges	Dyle	Dyle
90811002	Nismes	Eau blanche	Viroin
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	Sambre
90711002	Couvin	Eau noire	Viroin
55721002	Bergilers amont	Geer	Meuse aval
55311002	Kanne	Geer	Meuse aval
15510102	Hoegaarden	Grande Gette	Gette
35611002	Bousoit	Haine	Haine
79441002	Wihéries	Hantes	Sambre
86221002	Hastiere	Hermeton	Meuse amont
86611002	Felenne	Houille	Meuse amont
72281002	Modave	Hoyoux	Meuse aval
83411002	Daverdisse	Lesse	Lesse
72421002	Moha	Mehaigne	Meuse aval
81631002	Warnant	Molignée	Meuse amont
59911002	Nisramont	Ourthe	Ourthe
58261002	Sauheid	Ourthe	Ourthe
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	Viroin
68321002	Trois-ponts	Salm	Amblève
23711002	Ronquières	Samme	Senne
94341002	Membre pont	Semois	Semois
95711002	Sainte-marie	Semois	Semois
95611002	Tintigny	Semois	Semois
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	Senne
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	Sambre
96511002	Straimont	Vierre	Semois
90211002	Treignes	Viroin	Viroin
L5021	Resteigne	Lesse	Lesse
L5060	Romedenne	Hermeton	Meuse amont
L5080	Eprave	Lesse	Lesse
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	Haine
L5201	Rhisnes	Houyoux	Meuse amont
L5220	Tintigny	Rulles	Semois
L5412	Amougies	Rhosnes	Escaut
L5420	Isières	Sille	Dendre
L5442	Aiseau	Biesme	Sambre
L5460	Suzeril	Thyle	Dyle
L5500	Marbehan	Mellier	Semois
L5520	Harnoncourt	Ton	Chiers
L5530	Ochamps	Lesse	Lesse
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	Lesse
L5550	Our	Eau d'Our	Lesse
L5570	Saint-Martin	Ligne	Sambre
L5600	Ruette	Vire	Chiers

L5610	Martelange	Sûre	Sûre
L5630	Hamoir	Néblon	Ourthe
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	Sambre
L5660	Steenkerque	Senne	Senne
L5690	Brugelette	Dendre orientale	Dendre
L5820	Wanze	Mehaigne	Meuse aval
L5930	Houffalize	Ourthe orientale	Ourthe
L5950	Erneuville	Ourthe occidentale	Ourthe
L5961	Wiers	Verne Blanche	Escaut
L5970	Habay-la-vieille	Rulles	Semois
L6020	Athus	Messancy	Chiers
L6030	Latour	Vire	Chiers
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	Ourthe
L6060	Thy-le-Château	Thyria	Sambre
L6240	Lorcé	Lienne	Amblève
L6260	Upigny	Mehaigne	Meuse aval
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	Lesse
L6280	Opheyliessel	Petite Gette	Gette
L6300	Vieuxville	Ry de Logne	Ourthe
L6310	Forrières	Lhomme	Lesse
L6320	Grupont	Lhomme	Lesse
L6360	Eprave	Lhomme	Lesse
L6380	Olloy-sur-Viroin	Viroin	Viroin
L6390	Dalhem	Berwinne	Meuse aval
L6400	Gedinne	Houille	Meuse amont
L6440	Virton	Ton	Chiers
L6450	Estaimpuis	Espierres	Escaut
L6470	Ambresin	Mehaigne	Meuse aval

Annexe 4 : Liste finale des stations de mesures sélectionnées

Code	Localité	Cours d'eau	Code	Localité	Cours d'eau
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	L5170	Baisieux	Grande Honnelle
29711002	Ath	Dendre orientale	L5220	Tintigny	Rulles
10461002	Bierges	Dyle	L5412	Amougies	Rhosnes
90811002	Nismes	Eau blanche	L5420	Isières	Sille
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	L5442	Aiseau	Biesme
90711002	Couvin	Eau noire	L5460	Suzeril	Thyle
55721002	Bergilers amont	Geer	L5500	Marbehan	Mellier
55311002	Kanne	Geer	L5520	Harnoncourt	Ton
15510102	Hoegaarden	Grande Gette	L5530	Ochamps	Lesse
35611002	Boussoit	Haine	L5540	Graide	Ruisseau de Graide
79441002	Wihéries	Hantes	L5550	Our	Eau d'Our
86221002	Hastiere	Hermeton	L5600	Ruette	Vire
86611002	Felenne	Houille	L5610	Martelange	Sûre
72281002	Modave	Hoyoux	L5630	Hamoir	Néblon
83411002	Daverdisse	Lesse	L5640	Walcourt	Ry d'Yves
72421002	Moha	Mehaigne	L5690	Brugelette	Dendre Orientale
81631002	Warnant	Molignée	L5820	Wanze	Mehaigne
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	L5950	Erneuville	Ourthe Occidentale
68321002	Trois-ponts	Salm	L6050	Baillonville	Ruisseau Heure
23711002	Ronquières	Samme	L6060	Thy-le-Château	Thyria
94341002	Membre pont	Semois	L6240	Lorcé	Lienne
95711002	Sainte-marie	Semois	L6260	Upigny	Mehaigne
95611002	Tintigny	Semois	L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	L6280	Opheylissem	Petite Gette
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	L6320	Grupont	Lhomme
96511002	Straimont	Vierre	L6360	Eprave	Lhomme
90211002	Treignes	Viroin	L6390	Dalhem	Berwinne
L5021	Resteigne	Lesse	L6400	Gedinne	Houille
			L6470	Ambresin	Mehaigne

Annexe 5 : Choix du meilleur ajustement pour quelques stations de mesures avec les valeurs des périodes de retour considérées

Station	Loi	Percentile95									
		T2	Intervalle de confiance (95%)	T5	Intervalle de confiance (95%)	T10	Intervalle de confiance (95%)	T20	Intervalle de confiance (95%)	T50	Intervalle de confiance (95%)
Trois-Ponts (Salm)	Lognormale	0,720	0,614-0,827	0,535	0,219-0,336	0,457	0,170-0,280	0,402	0,137-0,242	0,348	0,106-0,206
Lorcé (Lienne)	Lognormale	0,415	0,340-0,489	0,278	0,219-0,336	0,225	0,170-0,280	0,189	0,137-0,242	0,156	0,106-0,206
Harnoncourt (Ton)	Gamma	2,460	2,280-2,640	2,020	1,840-2,210	1,820	1,620-2,020	1,660	1,450-1,870	1,490	1,260-1,720
Ruette (Vire)	Lognormale	0,282	0,245-0,319	0,209	0,177-0,241	0,179	0,147-0,211	0,157	0,125-0,189	0,136	0,104-0,168
Latour (Vire)	Lognormale	0,352	0,310-0,393	0,255	0,220-0,290	0,216	0,181-0,251	0,188	0,154-0,222	0,161	0,127-0,195
Athus (Messancy)	Gamma	0,177	0,156-0,199	0,130	0,106-0,155	0,107	0,082-0,131	0,090	0,065-0,114	0,073	0,048-0,097
Irchonwelz (Dendre occidentale)	Lognormale	0,155	0,138-0,172	0,120	0,105-0,135	0,104	0,089-0,120	0,093	0,078-0,109	0,082	0,066-0,098
Ath (Dendre orientale)	Gamma	0,412	0,353-0,471	0,281	0,229-0,334	0,226	0,173-0,279	0,187	0,135-0,239	0,149	0,098-0,200
Isières (Sille)	Gamma	0,039	0,032-0,046	0,023	0,017-0,029	0,017	0,012-0,023	0,013	0,008-0,018	0,010	0,005-0,014
Bruelette (Dendre orientale)	Lognormale 3 param.	0,270	-	0,184	-	0,138	-	0,101	-	0,059	-
Bierges (Dyle)	Gamma	1,450	1,360-1,530	1,240	1,160-1,330	1,150	1,050-1,240	1,070	0,963-1,170	0,986	0,871-1,100
Suzeril (Thyle)	Gamma	0,316	0,281-0,352	0,235	0,201-0,269	0,199	0,164-0,233	0,172	0,136-0,207	0,145	0,109-0,181
Amougies (Rhosnes)	Gamma	0,196	0,160-0,232	0,124	0,093-0,154	0,095	0,065-0,124	0,075	0,046-0,103	0,056	0,030-0,082
Bergilers (Geer)	Pearson type III	0,401	0,349-0,453	0,312	0,278-0,345	0,284	0,256-0,311	0,268	0,246-0,290	0,256	-
Opheylissem (Petite Gette)	Lognormale	0,588	0,534-0,642	0,466	0,416-0,516	0,413	0,361-0,464	0,373	0,320-0,426	0,333	0,279-0,388
Boussoit (Haine)	Pearson type III	0,704	0,626-0,781	0,542	0,475-0,608	0,474	0,411-0,538	0,427	0,362-0,492	0,382	0,310-0,454
Baisieux (Grande Honnelle)	Fréchet	0,247	0,224-0,271	0,226	0,203-0,250	0,218	0,195-0,242	0,214	0,190-0,237	0,211	0,187-0,234
Hastière (Hermeton)	Fréchet	0,219	0,182-0,256	0,182	0,144-0,219	0,169	0,131-0,205	0,162	0,124-0,198	0,157	0,120-0,194
Modave (Hoyoux)	Pearson type III	0,453	0,400-0,506	0,366	0,329-0,402	0,336	0,306-0,367	0,319	0,294-0,345	0,306	0,286-0,325
Daverdisse (Lesse)	Lognormale	0,744	0,646-0,843	0,514	0,435-0,594	0,424	0,348-0,500	0,361	0,287-0,436	0,302	0,231-0,373
Resteigne (Lesse)	Lognormale	0,779	0,649-0,909	0,517	0,416-0,617	0,417	0,322-0,511	0,349	0,259-0,439	0,286	0,201-0,371
Ochamps (Lesse)	Lognormale	0,033	0,026-0,039	0,020	0,016-0,025	0,016	0,012-0,020	0,013	0,009-0,017	0,010	0,007-0,014
Graide (Ruisseau de Graide)	Gamma	0,024	0,018-0,030	0,012	0,007-0,016	0,008	0,004-0,011	0,005	0,002-0,008	0,003	0,001-0,006
Our (Eau d'Our)	Lognormale	0,199	0,164-0,235	0,132	0,104-0,159	0,106	0,080-0,132	0,089	0,064-0,113	0,072	0,049-0,095
Lavaux (Wimbe)	Lognormale	0,105	0,077-0,133	0,054	0,037-0,071	0,038	0,024-0,052	0,029	0,017-0,040	0,021	0,011-0,030
Grupont (Lhomme)	Gamma	0,533	0,392-0,673	0,272	0,168-0,375	0,180	0,091-0,269	0,124	0,048-0,201	0,078	0,016-0,140
Eprave (Lhomme)	Lognormale	1,150	0,980-1,330	0,810	0,668-0,953	0,674	0,536-0,811	0,578	0,444-0,713	0,487	0,357-0,618
Moha (Méhaigne)	Gamma	0,903	0,790-1,020	0,672	0,564-0,781	0,569	0,457-0,681	0,493	0,377-0,608	0,416	0,299-0,534
Wanze (Méhaigne)	Fréchet	0,886	0,754-1,017	0,725	0,593-0,857	0,65	0,518-0,781	0,6	0,468-0,732	0,559	0,427-0,690
Upigny (Méhaigne)	Pearson type III	0,027	0,022-0,032	0,017	0,012-0,022	0,012	0,007-0,017	0,009	0,003-0,014	0,005	-
Ambresin (Méhaigne)	Gamma	0,444	0,384-0,503	0,304	0,250-0,357	0,244	0,190-0,298	0,202	0,149-0,255	0,161	0,109-0,212
Gedinne (Houille)	Gamma	0,128	0,100-0,156	0,079	0,056-0,102	0,057	0,037-0,078	0,043	0,024-0,062	0,030	0,013-0,047
Felenne (Houille)	Lognormale	0,254	0,217-0,290	0,170	0,142-0,199	0,138	0,112-0,165	0,117	0,091-0,142	0,096	0,072-0,121
Warnant (Molignée)	Gamma	0,612	0,571-0,653	0,506	0,464-0,548	0,456	0,410-0,501	0,417	0,368-0,466	0,376	0,324-0,428
Rhisnes (Houyoux)	Lognormale	0,039	0,033-0,046	0,025	0,020-0,030	0,020	0,015-0,025	0,016	0,012-0,021	0,013	0,009-0,017
Dalhem (Berwinne)	Gamma	0,348	0,292-0,404	0,221	0,173-0,269	0,170	0,123-0,216	0,134	0,090-0,178	0,101	0,060-0,142
Hamoir (Néblon)	Gamma	0,205	0,178-0,232	0,143	0,118-0,167	0,116	0,091-0,141	0,097	0,072-0,121	0,078	0,053-0,102

Erneuville (Ourthe occidentale)	Gamma	0.566	0.453-0.679	0,316	0,227-0,404	0,223	0,143-0,303	0,163	0,091-0,235	0,111	0,049-0,172
Baillonville (Ruisseau d'Heure)	Lognormale	0.060	0.050-0.069	0,039	0,031-0,046	0,031	0,024-0,038	0,026	0,019-0,032	0,021	0,014-0,027
Cerfontaine (Eau d'Heure)	Pearson type III	0.038	0.035-0.042	0,032	0,030-0,034	0,030	0,028-0,031	0,029	0,027-0,030	0,028	-
Wihéries (Hantes)	Lognormale	0,267	0,232-0,302	0,196	0,166-0,226	0,167	0,137-0,196	0,146	0,116-0,175	0,126	0,096-0,155
Bersillies (Thure)	Pearson type III	0,141	0,123-0,160	0,111	0,098-0,123	0,101	0,090-0,111	0,095	0,086-0,103	0,090	-
Âiseau (Biesme)	Lognormale	0,228	0,192-0,264	0,169	0,138-0,200	0,145	0,118-0,175	0,127	0,096-0,158	0,110	0,079-0,140
Walcourt (Ry d'Yves)	Fréchet	0,184	0,155-0,214	0,13	0,090-0,170	0,092	0,052-0,131	0,064	0,024-0,103	0,038	0-0,077
Thy-Le-Château (Thyria)	Gamma	0,141	0,126-0,156	0,104	0,090-0,118	0,088	0,073-0,102	0,076	0,061-0,091	0,064	0,049-0,079
Membre (Semois)	Gamma	3,145	2,684-3,605	2,025	1,627-2,424	1,568	1,182-1,954	1,251	0,879-1,623	0,954	0,603-1,30
Sainte-Marie (Semois)	Gamma	0,426	0,370-0,481	0,307	0,255-0,358	0,254	0,202-0,307	0,216	0,163-0,270	0,179	0,125-0,232
Tintigny (Semois)	Gamma	0,856	0,735-0,976	0,579	0,471-0,688	0,463	0,356-0,570	0,380	0,274-0,486	0,301	0,194-0,404
Straimont (Vierre)	Lognormale	0,395	0,320-0,470	0,243	0,189-0,297	0,189	0,134-0,238	0,153	0,108-0,198	0,121	0,080-0,162
Tintigny (Rulles)	Gamma	0,379	0,295-0,463	0,205	0,141-0,269	0,142	0,085-0,199	0,102	0,051-0,152	0,067	0,024-0,109
Marbehan (Mellier)	Gamma	0,123	0,089-0,156	0,055	0,032-0,077	0,034	0,016-0,051	0,021	0,007-0,035	0,012	0,001-0,022
Ronquières (Samme)	Gamma	0,424	0,389-0,459	0,359	0,323-0,395	0,328	0,288-0,368	0,304	0,261-0,346	0,278	0,231-0,324
Tubize (Senne)	Weibull (MM)	0,392	0,351-0,432	0,306	0,252-0,359	0,259	0,200-0,318	0,221	0,160-0,283	0,181	0,118-0,243
Martelange (Sûre)	Lognormale	0,324	0,225-0,422	0,160	0,103-0,217	0,111	0,065-0,156	0,081	0,042-0,120	0,058	0,026-0,089
Mariembourg (Brouffe)	Lognormale	0,026	0,020-0,032	0,015	0,010-0,019	0,011	0,007-0,014	0,008	0,005-0,011	0,006	0,004-0,009
Nismes (Eau Blanche)	Lognormale	0,316	0,279-0,353	0,230	0,199-0,262	0,195	0,164-0,226	0,170	0,139-0,201	0,146	0,115-0,176
Couvin (Eau Noire)	Lognormale	0,302	0,254-0,350	0,205	0,167-0,243	0,168	0,132-0,204	0,142	0,107-0,177	0,118	0,084-0,151
Treignes (Viroin)	Lognormale	0,900	0,796-1,000	0,655	0,566-0,743	0,554	0,467-0,641	0,483	0,396-0,569	0,413	0,328-0,499
Brûly (Ry de Pernelle)	Lognormale	0,105	0,090-0,120	0,075	0,063-0,088	0,063	0,051-0,076	0,055	0,043-0,067	0,047	0,035-0,059

Station	Distribution	MAM7									
		T2	Intervalle de confiance (95%)	T5	Intervalle de confiance (95%)	T10	Intervalle de confiance (95%)	T20	Intervalle de confiance (95%)	T50	Intervalle de confiance (95%)
Trois-Ponts (Salm)	Lognormal 3	0,612	0,513 - 0,711	0,464	0,397-0,531	0,412	0,353 - 0,470	0,378	0,322 - 0,434	0,348	0,288 - 0,407
Lorcé (Lienne)	Lognormal	0,338	0,276 - 0,401	0,224	0,176 - 0,273	0,181	0,135 - 0,226	0,151	0,108 - 0,195	0,124	0,083 - 0,165
Harnoncourt (Ton)	Gamma	2,34	2,150 - 2,520	1,900	1,710 - 2,080	1,690	1,490 - 1,890	1,530	1,310 - 1,740	1,360	1,140 - 1,590
Ruette (Vire)	Gamma	0,263	0,229 - 0,297	0,194	0,162 - 0,226	0,163	0,130 - 0,196	0,140	0,107 - 0,174	0,118	0,084 - 0,152
Athus (Messancy)	Gamma	0,162	0,135 - 0,190	0,106	0,082 - 0,130	0,083	0,059 - 0,106	0,066	0,043 - 0,089	0,051	0,029 - 0,073
Latour (Vire)	Gamma	0,316	0,275 - 0,357	0,218	0,181 - 0,255	0,176	0,139 - 0,213	0,146	0,109 - 0,182	0,117	0,081 - 0,153
Irchonwelz (Dendre occidentale)	Lognormal	0,143	0,127 - 0,159	0,110	0,095 - 0,124	0,095	0,081 - 0,110	0,085	0,070 - 0,099	0,074	0,060 - 0,089
Ath (Dendre orientale)	Pearson type III	0,377	0,321 - 0,434	0,254	0,199 - 0,308	0,195	0,136 - 0,254	0,149	0,081 - 0,217	0,101	0,016 - 0,187
Isières (Sille)	Gamma	0,029	0,024 - 0,034	0,017	0,013 - 0,022	0,013	0,009 - 0,017	0,010	0,006 - 0,014	0,007	0,004 - 0,010
Brugelette (Dendre orientale)	Lognormal 3	0,245	N/D	0,163	N/D	0,121	N/D	0,086	N/D	0,047	N/D
Bierges (Dyle)	Gamma	1,390	1,310 - 1,470	1,190	1,100 - 1,280	1,090	0,999 - 1,190	1,020	0,917 - 1,120	0,939	0,828 - 1,050
Suzeril (Thyle)	Gamma	0,295	0,263 - 0,327	0,221	0,191 - 0,252	0,188	0,156 - 0,220	0,163	0,131 - 0,196	0,139	0,105 - 0,172
Amougies (Rhosnes)	Gamma	0,165	0,133 - 0,198	0,101	0,094 - 0,128	0,075	0,050 - 0,101	0,058	0,034 - 0,082	0,043	0,021 - 0,064
Bergilers (Geer)	Lognormal	0,404	0,351 - 0,458	0,305	0,258 - 0,352	0,263	0,216 - 0,310	0,233	0,185 - 0,280	0,203	0,155 - 0,251
Ophélysimsem (Petite Gette)	Lognormal	0,576	0,525 - 0,626	0,461	0,413 - 0,508	0,410	0,361 - 0,459	0,372	0,322 - 0,423	0,334	0,282 - 0,386
Haine	Gamma	0,685	0,612 - 0,759	0,517	0,446 - 0,588	0,441	0,368 - 0,515	0,385	0,309 - 0,461	0,328	0,250 - 0,406

(Boussoit)											
Baisieux (Grande Honnelle)	Lognormal	0.255	0.239 - 0.270	0.221	0.206 - 0.237	0.205	0.189 - 0.222	0.193	0.175 - 0.211	0.180	0.161 - 0.200
Hastiére (Hermeton)	Pearson type III	0.223	0.200 - 0.247	0.171	0.154 - 0.187	0.153	0.140 - 0.167	0.143	0.132 - 0.154	0.135	0.126 - 0.143
Modave (Hoyoux)	Lognormal	0.451	0.401 - 0.501	0.359	0.313 - 0.406	0.319	0.271 - 0.367	0.289	0.240 - 0.339	0.259	0.208 - 0.310
Daverdisse (Lesse)	Lognormal	0.640	0.547 - 0.733	0.428	0.315 - 0.500	0.346	0.278 - 0.414	0.291	0.226 - 0.356	0.239	0.178 - 0.301
Resteigne (Lesse)	Lognormal	0.654	0.540 - 0.769	0.426	0.339 - 0.512	0.340	0.259 - 0.420	0.282	0.206 - 0.358	0.229	0.158 - 0.300
Ochamps (Lesse)	Gamma	0.029	0.023 - 0.035	0.017	0.013 - 0.022	0.013	0.008 - 0.017	0.010	0.006 - 0.014	0.007	0.003 - 0.010
Graide (Ruisseau de Graide)	Gamma	0.017	0.011 - 0.023	0.007	0.003 - 0.010	0.004	0.001 - 0.006	0.002	0.0001 - 0.004	0.001	N/D
Our (Eau d'Our)	Lognormal	0.174	0.144 - 0.204	0.117	0.093 - 0.140	0.095	0.073 - 0.117	0.080	0.059 - 0.101	0.066	0.046 - 0.086
Lavaux (Wimbe)	Lognormal	0.085	0.059 - 0.111	0.040	0.026 - 0.054	0.027	0.016 - 0.038	0.019	0.010 - 0.028	0.013	0.006 - 0.020
Grupont (Lhomme)	Gamma	0.405	0.279 - 0.532	0.217	0.128 - 0.306	0.139	0.065 - 0.214	0.093	0.030 - 0.155	0.055	0.007 - 0.104
Eprave (Lhomme)	Lognormal	0.977	0.837 - 1.120	0.698	0.581 - 0.814	0.585	0.471 - 0.699	0.506	0.394 - 0.618	0.430	0.320 - 0.539
Moha (Mehaigne)	Fréchet	0.742	0.678 - 0.942	0.595	0.470 - 0.721	0.528	0.402 - 0.654	0.483	0.357 - 0.609	0.447	0.321 - 0.573
Wanze (Mehaigne)	Lognormal	0.907	0.802 - 1.010	0.695	0.601 - 0.788	0.605	0.510 - 0.699	0.539	0.443 - 0.635	0.474	0.376 - 0.571
Upigny (Mehaigne)	Pearson type III	0.025	0.022 - 0.028	0.014	0.009 - 0.018	0.009	0.004 - 0.014	0.006	-0.0113	0.002	-0.015
Ambresin (Mehaigne)	Gamma	0.391	0.338 - 0.445	0.266	0.218 - 0.314	0.213	0.165 - 0.260	0.175	0.128 - 0.222	0.139	0.093 - 0.185
Felenne (Houille)	Lognormal	0.215	0.185 - 0.246	0.145	0.121 - 0.169	0.118	0.095 - 0.141	0.099	0.078 - 0.121	0.082	0.061 - 0.103
Wavant (Molignée)	Gamma	0.585	0.546 - 0.625	0.484	0.444 - 0.524	0.436	0.393 - 0.480	0.399	0.353 - 0.446	0.361	0.311 - 0.410
Rhines (Houyoux)	Gamma	0.036	0.030 - 0.043	0.022	0.017 - 0.027	0.016	0.011 - 0.021	0.012	0.008 - 0.017	0.009	0.005 - 0.013
Gedinne (Houille)	Pearson type III	0.126	0.102 - 0.151	0.075	0.051 - 0.099	0.050	0.024 - 0.077	0.031	0.001 - 0.061	0.011	-0.077
Dalhem (Berwinne)	Lognormal 3	0.324	0.266 - 0.382	0.196	0.144 - 0.248	0.139	0.085 - 0.193	0.096	0.035 - 0.157	0.052	-0.148
Hamoir (Néblon)	Gamma	0.187	0.161 - 0.213	0.128	0.105 - 0.151	0.103	0.080 - 0.126	0.085	0.062 - 0.108	0.068	0.045 - 0.090
Erneuveille (Ourthe occidentale)	Gamma	0.490	0.392 - 0.588	0.273	0.196 - 0.349	0.192	0.123 - 0.261	0.140	0.078 - 0.202	0.095	0.042 - 0.148
Baillonville (Ruisseau d'Heure)	Gamma	0.048	0.040 - 0.056	0.030	0.023 - 0.037	0.023	0.016 - 0.029	0.018	0.012 - 0.024	0.013	0.008 - 0.019
Cerfontaine (Eau d'Heure)	Lognormal	0.036	0.033 - 0.039	0.030	0.027 - 0.033	0.027	0.024 - 0.030	0.025	0.022 - 0.028	0.023	0.020 - 0.026
Wihéries (Hantes)	Lognormal	0.235	0.205 - 0.265	0.174	0.148 - 0.200	0.149	0.123 - 0.174	0.131	0.105 - 0.156	0.113	0.087 - 0.139
Bersillies (Thure)	Lognormal	0.128	0.115 - 0.140	0.105	0.093 - 0.116	0.094	0.082 - 0.107	0.087	0.074 - 0.100	0.079	0.065 - 0.092
Aiseau (Biesme)	Gamma	0.206	0.174 - 0.239	0.150	0.120 - 0.176	0.125	0.098 - 0.153	0.107	0.082 - 0.137	0.089	0.067 - 0.122
Walcourt (Ry d'Yves)	Lognormal 3	0.197	0.162 - 0.231	0.120	0.091 - 0.149	0.087	0.058 - 0.116	0.063	0.031 - 0.095	0.040	0.002 - 0.077
Thy-Le-Château (Thyria)	Fréchet	0.122	0.118 - 0.146	0.090	0.078 - 0.102	0.069	0.057 - 0.080	0.050	0.038 - 0.062	0.028	0.016 - 0.040
Membre (Semois)	Lognormal	2.500	2.110 - 2.890	1.630	1.330 - 1.920	1.300	1.030 - 1.570	1.080	0.823 - 1.340	0.877	0.636 - 1.120
Sainte-Marie (Semois)	Gamma	0.350	0.293 - 0.407	0.230	0.180 - 0.280	0.180	0.131 - 0.229	0.146	0.098 - 0.193	0.113	0.067 - 0.158
Tintigny (Semois)	Lognormal	0.691	0.585 - 0.796	0.467	0.384 - 0.550	0.380	0.301 - 0.459	0.321	0.245 - 0.396	0.265	0.193 - 0.337
Sirainmont (Vierre)	Gamma	0.291	0.220 - 0.362	0.164	0.110 - 0.218	0.111	0.064 - 0.158	0.078	0.037 - 0.118	0.049	0.016 - 0.083
Tintigny (Rulles)	Lognormal	0.275	0.210 - 0.340	0.152	0.110 - 0.194	0.111	0.075 - 0.147	0.086	0.054 - 0.118	0.065	0.037 - 0.092
Marbehan (Mellier)	Lognormal	0.079	0.053 - 0.105	0.034	0.021 - 0.047	0.022	0.012 - 0.032	0.016	0.008 - 0.023	0.010	0.004 - 0.016
Ronquières (Samme)	Gamma	0.378	0.343 - 0.412	0.314	0.278 - 0.349	0.283	0.244 - 0.322	0.259	0.218 - 0.301	0.235	0.190 - 0.279
Tubize (Senne)	Weibull (MM)	0.360	0.321 - 0.398	0.278	0.229 - 0.328	0.234	0.181 - 0.288	0.199	0.144 - 0.255	0.161	0.106 - 0.216
Martelange (Sûre)	Lognormal	0.264	0.180 - 0.348	0.127	0.080 - 0.174	0.087	0.049 - 0.124	0.063	0.032 - 0.094	0.044	0.019 - 0.069
Mariembourg (Brouffe)	Lognormal	0.018	0.014 - 0.023	0.011	0.008 - 0.014	0.008	0.006 - 0.011	0.007	0.004 - 0.009	0.005	0.003 - 0.007
Nismes (Eau Blanche)	Gamma	0.279	0.242 - 0.316	0.190	0.156 - 0.223	0.152	0.119 - 0.185	0.125	0.092 - 0.158	0.099	0.067 - 0.131
Couvin (Eau Noire)	Gamma	0.255	0.214 - 0.296	0.168	0.132 - 0.204	0.132	0.097 - 0.167	0.106	0.072 - 0.141	0.083	0.050 - 0.115
Treignes (Viroin)	Gamma	0.800	0.701 - 0.899	0.557	0.467 - 0.647	0.453	0.362 - 0.543	0.378	0.287 - 0.468	0.305	0.216 - 0.394
Bruly (Ry de Pernelle)	Lognormal	0.088	0.074 - 0.101	0.062	0.050 - 0.073	0.051	0.040 - 0.062	0.044	0.033 - 0.054	0.037	0.027 - 0.047

Annexe 6 : Altitudes des 'zéros' des échelles limnimétriques des stations de mesures sélectionnées

Code	Localité	Cours d'eau	Altitude du 'O' de l'échelle
91111002	Mariembourg	Brouffe	155,92
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	30,92
29711002	Ath	Dendre orientale	28,85
10461002	Bierges	Dyle	42,01
90811002	Nismes	Eau blanche	150,66
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	209,24
90711002	Couvin	Eau noire	191,09
55721002	Bergilers amont	Geer	102,66
35611002	Boussoit	Haine	44,79
79441002	Wihéries	Hantes	125,53
86221002	Hastiere	Hermeton	102,81
86611002	Felenne	Houille	188,85
72281002	Modave	Hoyoux	168,37
83411002	Daverdisse	Lesse	211,87
72421002	Moha	Mehaigne	81,26
81631002	Warnant	Molignée	107,51
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	266,05
68321002	Trois-ponts	Salm	256,03
23711002	Ronquières	Samme	57,49
94341002	Membre pont	Semois	175,59
95711002	Sainte-marie	Semois	328,34
95611002	Tintigny	Semois	325,74
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	35,77
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	143,29
96511002	Straimont	Vierre	346,61
90211002	Treignes	Viroin	119,7
L5021	Resteigne	Lesse	178,78
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	30,83
L5201	Rhisnes	Houyoux	104,36
L5220	Tintigny	Rulles	329,03
L5412	Amougies	Rhosnes	13,76
L5420	Isières	Sille	25,49
L5442	Aiseau	Biesme	105,09
L5460	Suzeril	Thyle	65,53
L5500	Marbehan	Mellier	348,21
L5520	Harnoncourt	Ton	193,19
L5530	Ochamps	Lesse	409,55
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	357,54
L5550	Our	Eau d'Our	304,16
L5600	Ruette	Vire	214,98
L5610	Martelange	Sûre	361,08
L5630	Hamoir	Néblon	127,92
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	164,65
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	42,41
L5820	Wanze	Mehaigne	71,40
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	325,37
L6020	Athus	Messancy	265,64
L6030	Latour	Vire	205,83
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	174,02
L6060	Thy-le-Château	Thyria	156,03
L6240	Lorcé	Lienne	190,15
L6260	Upigny	Mehaigne	144,75
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	158,82
L6280	Opheylissem	Petite Gette	51,26
L6320	Grupont	Lhomme	226,35
L6360	Eprave	Lhomme	147,79
L6390	Dalhem	Berwinne	83,93
L6400	Gedinne	Houille	308,79
L6470	Ambresin	Mehaigne	123,36

Annexe 7 : Coordonnées Lambert (m) des stations de mesures sélectionnées

Code	Localité	Cours d'eau	X	Y
91111002	Mariembourg	Brouffe	161432	87031
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	106353	145554
29711002	Ath	Dendre orientale	108196	147155
10461002	Bierges	Dyle	166780	155589
90811002	Nismes	Eau blanche	163452	86047
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	152856	96015
90711002	Couvin	Eau noire	159393	81077
55721002	Bergilers amont	Geer	216964	156990
35611002	Boussoit	Haine	129957	127880
79441002	Wihéries	Hantes	136223	109802
86221002	Hastiere	Hermeton	180675	98977
86611002	Felenne	Houille	184061	81377
72281002	Modave	Hoyoux	215125	126740
83411002	Daverdisse	Lesse	204412	81300
72421002	Moha	Mehaigne	207785	138109
81631002	Warnant	Molignée	182800	110472
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	160545	76305
68321002	Trois-ports	Salm	257247	118096
23711002	Ronquières	Samme	139808	143935
94341002	Membre pont	Semois	188327	61505
95711002	Sainte-marie	Semois	236216	42161
95611002	Tintigny	Semois	232965	42382
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	136825	152150
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	134311	105572
96511002	Straimont	Vierre	222920	53999
90211002	Treignes	Viroin	171955	86456
L5021	Resteigne	Lesse	207730	86925
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	101819	119540
L5201	Rhisnes	Houyoux	183172	130635
L5220	Tintigny	Rulles	233319	43098
L5412	Amougies	Rhosnes	88408	159315
L5420	Isières	Sille	111467	150313
L5442	Aiseau	Biesme	165528	121605
L5460	Suzeril	Thyle	163837	146834
L5500	Marbehan	Mellier	234016	46840
L5520	Harnoncourt	Ton	231435	25671
L5530	Ochamps	Lesse	215429	68645
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	199808	70379
L5550	Our	Eau d'Our	204130	72555
L5600	Ruette	Vire	238786	27460
L5610	Martelange	Sûre	248595	58934
L5630	Hamoir	Néblon	231494	124110
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	154691	104779
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	113968	142725
L5820	Wanze	Mehaigne	210171	137156
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	236102	86718
L6020	Athus	Messancy	255953	29042
L6030	Latour	Vire	235528	27785
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	219839	108499
L6060	Thy-le-Château	Thyria	154019	107979
L6240	Lorcé	Lienne	249530	123011
L6260	Upigny	Mehaigne	185079	141226
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	202284	90218
L6280	Opheylissem	Petite Gette	193333	158910
L6320	Grupont	Lhomme	215042	87185
L6360	Eprave	Lhomme	206845	92363
L6390	Dalhem	Berwinne	245623	157426
L6400	Gedinne	Houille	190600	74600
L6470	Ambresin	Mehaigne	197782	146460

Annexe 8 : Superficie du bassin versant des stations de mesures sélectionnées

Code	Localité	Cours d'eau	Superficie (km ²)
91111002	Mariembourg	Brouffe	79,73
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	126,00
29711002	Ath	Dendre orientale	223,62
10461002	Bierges	Dyle	309,19
90811002	Nismes	Eau blanche	254,40
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	31,62
90711002	Couvin	Eau noire	131,04
55721002	Bergilers amont	Geer	119,48
35611002	Boussoit	Haine	170,48
79441002	Wihéries	Hantes	125,63
86221002	Hastière	Hermeton	165,60
86611002	Felenne	Houille	112,85
72281002	Modave	Hoyoux	94,41
83411002	Daverdisse	Lesse	301,73
72421002	Moha	Mehaigne	343,06
81631002	Warnant	Molignée	125,21
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	22,22
68321002	Trois-ponts	Salm	202,28
23711002	Ronquières	Samme	139,31
94341002	Membre pont	Semois	1218,2
95711002	Sainte-marie	Semois	143,39
95611002	Tintigny	Semois	386,90
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	174,81
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	20,49
96511002	Straimont	Vierre	182,34
90211002	Treignes	Viroin	508,25
L5021	Resteigne	Lesse	353,88
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	26,09
L5201	Rhisnes	Houyoux	53,26
L5220	Tintigny	Rulles	221,74
L5412	Amougies	Rhosnes	131,35
L5420	Isières	Sille	61,88
L5442	Aiseau	Biesme	76,47
L5460	Suzeril	Thyle	67,62
L5500	Marbehan	Mellier	63,27
L5520	Harnoncourt	Ton	257,77
L5530	Ochamps	Lesse	9,51
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	11,19
L5550	Our	Eau d'Our	71,21
L5600	Ruette	Vire	75,55
L5610	Martelange	Sûre	209,01
L5630	Hamoir	Néblon	75,15
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	87,99
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	110,16
L5820	Wanze	Mehaigne	352,99
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	271,64
L6020	Athus	Messancy	59,85
L6030	Latour	Vire	92,62
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	68,78
L6060	Thy-le-Château	Thyria	50,30
L6240	Lorcé	Lienne	147,57
L6260	Upigny	Mehaigne	17,56
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	94,07
L6280	Opheylissem	Petite Gette	128,58
L6320	Grupont	Lhomme	178,82
L6360	Eprave	Lhomme	475,79
L6390	Dalhem	Berwinne	118,28
L6400	Gedinne	Houille	52,54
L6470	Ambresin	Mehaigne	196,80

Annexe 9 : Densité de drainage (km/km²)

Code	Localité	Cours d'eau	Densité de drainage (km/km ²)
91111002	Mariembourg	Brouffe	2,395
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	1,566
29711002	Ath	Dendre orientale	1,366
10461002	Bierges	Dyle	1,039
90811002	Nismes	Eau blanche	1,815
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	2,164
90711002	Couvin	Eau noire	1,506
55721002	Bergilers amont	Geer	0,896
35611002	Boussoit	Haine	1,369
79441002	Wihéries	Hantes	1,624
86221002	Hastière	Hermeton	1,559
86611002	Felenne	Houille	1,338
72281002	Modave	Hoyoux	1,066
83411002	Daverdisse	Lesse	1,259
72421002	Moha	Mehaigne	1,308
81631002	Warnant	Molignée	1,301
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	1,506
68321002	Trois-ponts	Salm	1,420
23711002	Ronquières	Samme	1,677
94341002	Membre pont	Semois	1,685
95711002	Sainte-marie	Semois	1,650
95611002	Tintigny	Semois	1,879
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	1,514
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	1,855
96511002	Straimont	Vierre	1,518
90211002	Treignes	Viroin	1,554
L5021	Resteigne	Lesse	1,258
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	1,057
L5201	Rhisnes	Houyoux	0,802
L5220	Tintigny	Rulles	2,080
L5412	Amougies	Rhosnes	1,983
L5420	Isières	Sille	1,568
L5442	Aiseau	Biesme	1,323
L5460	Suzeril	Thyle	1,244
L5500	Marbehan	Mellier	1,792
L5520	Harnoncourt	Ton	1,239
L5530	Ochamps	Lesse	1,510
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	1,480
L5550	Our	Eau d'Our	1,146
L5600	Ruette	Vire	1,320
L5610	Martelange	Sûre	1,795
L5630	Hamoir	Nélon	0,857
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	1,613
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	1,312
L5820	Wanze	Mehaigne	1,308
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	1,524
L6020	Athus	Messancy	1,552
L6030	Latour	Vire	1,346
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	1,824
L6060	Thy-le-Château	Thyria	1,482
L6240	Lorcé	Lienne	1,797
L6260	Upigny	Mehaigne	1,308
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	1,243
L6280	Opheylissem	Petite Gette	0,782
L6320	Grupont	Lhomme	1,328
L6360	Eprave	Lhomme	1,517
L6390	Dalhem	Berwinne	1,509
L6400	Gedinne	Houille	1,484
L6470	Ambresin	Mehaigne	1,435

Annexe 10 : Pentes caractéristiques du bassin versant

Code	Localité	Percentile10 (%)	Pente médiane (%)	Percentile90 (%)
91111002	Mariembourg	2,47	7,88	19,65
29521002	Irchonwelz	0,80	2,38	6,28
29711002	Ath	0,67	1,92	5,10
10461002	Bierges	1,49	4,25	12,42
90811002	Nismes	1,43	5,11	16,07
78911002	Cerfontaine	1,81	5,69	15,93
90711002	Couvin	1,61	5,47	18,26
55721002	Bergilers amont	1,02	2,74	5,47
35611002	Bousoit	1,21	3,51	10,24
79441002	Wiheries	1,56	4,91	13,46
86221002	Hastiere	1,52	4,99	19,89
86611002	Felenne	3,00	7,75	18,97
72281002	Modave	1,97	5,19	12,86
83411002	Daverdisse	2,52	6,55	15,24
72421002	Moha	1,16	2,96	7,41
81631002	Warnant	2,16	5,99	17,87
92321002	Bruly	2,02	6,21	12,20
68321002	Trois-ponts	2,77	6,96	17,19
23711002	Ronquières	1,43	4,12	10,68
94341002	Membre pont	2,05	6,76	22,61
95711002	Sainte-marie	1,25	4,36	9,98
95611002	Tintigny	1,50	5,18	13,03
19531002	Tubize (Ripain)	1,12	3,74	9,11
79781002	Bersillies-l'abbaye	1,66	5,28	13,57
96511002	Straimont	2,48	6,22	13,18
90211002	Treignes	1,61	5,79	19,27
L5021	Resteigne	2,58	6,88	17,70
L5170	Baisieux	1,29	3,33	9,80
L5201	Rhines	1,32	3,25	8,36
L5220	Tintigny	1,98	6,08	15,67
L5412	Amougies	1,01	3,38	11,42
L5420	Isières	1,14	3,12	7,77
L5442	Aiseau	1,65	4,81	13,46
L5460	Suzeril	1,66	5,11	13,47
L5500	Marbehan	2,28	6,33	14,51
L5520	Harnoncourt	1,90	8,63	22,29
L5530	Ochamps	1,85	4,81	9,71
L5540	Graide	1,50	4,52	8,54
L5550	Our	2,23	5,58	11,23
L5600	Ruette	2,71	9,30	20,79
L5610	Martelange	2,96	7,68	18,89
L5630	Hamoir	2,50	6,96	19,54
L5640	Walcourt	1,71	4,63	12,65
L5690	Brugelette	0,68	2,04	5,84
L5820	Wanze	1,17	2,98	7,75
L5950	Erneuville	2,56	6,30	12,99
L6020	Athus	2,21	6,58	19,84
L6030	Latour	2,55	9,23	20,55
L6050	Baillonville	2,69	8,53	22,13
L6060	Thy-le-Château	1,65	4,42	12,67
L6240	Lorcé	4,04	9,68	25,76
L6260	Upigny	1,11	2,50	4,46
L6270	Lavaux-Ste-Anne	2,53	7,51	18,30
L6280	Opheylissem	1,06	2,98	6,90
L6320	Grupont	3,01	7,11	17,68
L6360	Eprave	2,73	7,44	20,28
L6390	Dalhem	2,37	7,69	18,27
L6400	Gedinne	2,73	6,37	12,43
L6470	Ambresin	1,08	2,63	5,00

Annexe 11 : Occupation du sol (exprimée en pour-cent)

Code	Localité	Territoires artificialisés (%)	Forêts (%)	Terres arables (%)	Cultures permanentes (%)	Surfaces enherbées (%)
91111002	Mariembourg	1,71	65,40	2,32	0,02	23,91
29521002	Irchonwelz	7,54	5,27	59,33	0,40	21,07
29711002	Ath	7,00	7,35	57,52	0,50	22,31
10461002	Bierges	13,68	10,16	53,56	0,25	13,72
90811002	Nismes	3,13	45,01	6,82	0,07	38,03
78911002	Cerfontaine	3,81	39,72	9,79	0,80	36,70
90711002	Couvin	1,96	59,86	2,42	0,01	31,43
55721002	Bergilers amont	9,98	1,37	67,78	3,75	11,84
35611002	Bousoit	18,40	7,59	42,19	0,62	19,47
79441002	Wihéries	3,17	21,29	24,25	0,09	46,73
86221002	Hastiere	2,61	37,13	15,49	0,19	35,20
86611002	Felenne	2,24	59,80	7,53	0,06	24,14
72281002	Modave	3,99	23,26	34,03	0,21	34,32
83411002	Daverdisse	2,73	52,03	8,55	0,02	30,05
72421002	Moha	7,96	5,04	64,16	1,29	15,42
81631002	Warnant	4,26	22,57	39,44	0,26	27,39
92321002	Bruly	2,24	58,74	3,31	0,02	32,91
68321002	Trois-ponts	3,34	49,72	5,54	0,01	32,90
23711002	Ronquières	15,24	4,05	47,32	0,58	19,62
94341002	Membre pont	4,41	49,84	7,31	0,02	30,18
95711002	Sainte-marie	16,74	24,64	11,92	0,03	35,07
95611002	Tintigny	7,65	42,66	8,82	0,02	31,77
19531002	Tubize (Ripain)	10,32	3,35	50,88	0,42	26,80
79781002	Bersillies-l'abbaye	4,75	23,91	14,50	0,07	54,10
96511002	Straimont	4,14	29,44	8,60	0,02	48,22
90211002	Treignes	2,88	50,07	6,75	0,15	32,96
L5021	Resteigne	2,60	53,48	8,38	0,05	28,39
L5170	Baisieux	7,11	9,58	46,62	0,59	34,47
L5201	Rhisnes	9,74	6,95	60,10	0,50	14,32
L5220	Tintigny	2,24	55,33	6,95	0,01	27,75
L5412	Amougies	13,80	8,35	55,04	0,43	19,29
L5420	Isières	8,50	7,54	53,51	0,34	24,50
L5442	Aiseau	8,02	25,39	38,22	0,65	21,13
L5460	Suzeril	11,34	18,44	47,21	0,08	14,88
L5500	Marbehan	2,59	35,94	10,66	0,01	40,19
L5520	Harnoncourt	5,59	45,15	12,62	0,31	29,81
L5530	Ochamps	3,27	60,69	3,25	0,02	25,19
L5540	Graide	1,88	68,91	5,17	0,02	17,34
L5550	Our	3,55	37,85	9,72	0,00	40,63
L5600	Ruette	6,66	29,54	19,94	0,36	38,35
L5610	Martelange	2,04	32,59	11,51	0,00	46,45
L5630	Hamoir	3,07	21,13	30,26	0,48	40,87
L5640	Walcourt	7,20	19,94	36,03	0,28	26,03
L5690	Brugelette	6,25	6,44	58,80	0,38	23,59
L5820	Wanze	8,13	5,23	63,78	1,29	15,42
L5950	Erneuville	2,85	38,96	8,25	0,01	44,64
L6020	Athus	7,92	20,07	24,80	0,20	40,23
L6030	Latour	6,92	29,25	19,38	0,54	38,40
L6050	Baillonville	2,50	45,23	8,80	0,06	36,51
L6060	Thy-le-Château	8,00	20,13	42,13	0,42	21,14
L6240	Lorcé	2,50	47,47	4,76	0,08	37,41
L6260	Upigny	6,09	5,25	68,94	2,00	12,49
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	2,49	51,97	9,88	0,21	31,05
L6280	Opheylissem	8,52	1,39	74,37	1,41	9,31
L6320	Grupont	3,45	62,79	5,27	0,00	20,83
L6360	Eprave	3,60	56,19	8,42	0,18	24,44
L6390	Dalhem	10,88	2,18	8,97	5,48	65,66
L6400	Gedinne	2,28	52,29	9,52	0,03	29,27
L6470	Ambresin	7,86	4,77	66,36	1,40	14,47

Annexe 12 : Pourcentage des groupes hydrologiques des sols (%)

Code	Localité	Cours d'eau	A	B	C	D	NC
91111002	Mariembourg	Brouffe	0,90	53,99	42,21	0,66	2,24
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	34,02	50,35	5,12	5,66	4,85
29711002	Ath	Dendre orientale	46,31	30,22	11,95	3,91	7,61
10461002	Bierges	Dyle	37,56	50,55	1,01	6,02	4,86
90811002	Nismes	Eau blanche	9,94	45,80	38,81	1,93	3,52
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	5,39	62,18	23,61	2,81	6,01
90711002	Couvin	Eau noire	3,41	67,84	25,65	1,11	1,99
55721002	Bergilres amont	Geer	84,00	9,10	0,01	4,04	2,85
35611002	Boussoit	Haine	39,75	28,28	4,61	13,08	14,28
79441002	Wihéries	Hantes	14,78	65,22	14,73	2,00	3,27
86221002	Hastiere	Hermeton	11,89	59,21	22,83	2,08	3,99
86611002	Felenne	Houille	0,46	80,53	14,67	2,30	2,04
72281002	Modave	Hoyoux	20,68	70,17	4,85	1,75	2,55
83411002	Daverdisse	Lesse	0,13	85,83	10,38	1,55	2,11
72421002	Moha	Mehaigne	47,00	42,55	2,04	4,27	4,13
81631002	Warnant	Molignée	12,30	65,20	14,44	3,12	4,94
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	2,39	73,93	19,95	1,32	2,43
68321002	Trois-ponts	Salm	0,50	60,47	30,94	1,52	6,58
23711002	Ronquières	Samme	31,13	51,86	3,78	6,35	6,88
94341002	Membre pont	Semois	3,37	66,15	20,78	4,64	5,05
95711002	Sainte-marie	Semois	15,57	18,93	42,06	14,20	9,24
95611002	Tintigny	Semois	7,20	50,55	30,62	6,11	5,52
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	35,96	53,94	1,32	4,22	4,56
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	7,81	74,37	11,35	3,92	2,55
96511002	Straimont	Vierre	0,48	75,01	18,37	2,09	4,05
90211002	Treignes	Viroin	8,48	56,25	29,96	1,87	3,45
L5021	Resteigne	Lesse	0,20	83,24	13,01	1,46	2,09
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	70,21	19,62	0,73	6,77	2,67
L5201	Rhisnes	Houyoux	22,37	64,54	1,75	4,79	6,55
L5220	Tintigny	Rulles	0,33	74,06	21,14	1,32	3,14
L5412	Amougies	Rhosnes	10,79	44,30	36,48	5,23	3,20
L5420	Isières	Sille	40,13	43,75	10,09	2,97	3,07
L5442	Aiseau	Biesme	16,11	57,30	18,52	3,13	4,94
L5460	Suzeril	Thyle	34,52	55,85	1,13	4,33	4,16
L5500	Marbehan	Mellier	0,59	76,21	18,25	1,42	3,53
L5520	Harnoncourt	Ton	26,62	30,15	34,89	4,18	4,17
L5530	Ochamps	Lesse	0,53	83,51	13,04	1,30	1,62
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	0,07	84,90	11,98	0,80	2,25
L5550	Our	Eau d'Our	0,23	81,65	12,89	2,12	3,11
L5600	Ruette	Vire	2,50	46,52	43,41	5,20	2,37
L5610	Martelange	Sûre	0,14	86,07	9,26	1,34	3,19
L5630	Hamoir	Néblon	13,10	76,37	7,34	1,70	1,49
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	10,40	63,31	10,28	5,43	10,59
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	45,37	35,20	11,52	3,28	4,62
L5820	Wanze	Mehaigne	47,06	42,09	2,08	4,41	4,36
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	0,75	77,01	18,44	1,35	2,46
L6020	Athus	Messancy	5,98	35,49	47,10	5,65	5,78
L6030	Latour	Vire	2,30	40,48	47,58	5,36	4,28
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	0,76	78,72	18,28	0,82	1,43
L6060	Thy-le-Château	Thyria	18,22	61,33	7,32	3,96	9,17
L6240	Lorcé	Lienne	0,53	64,57	26,45	0,99	7,45
L6260	Upigny	Mehaigne	23,43	71,28	0,00	2,88	2,41
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	0,90	66,29	30,41	0,73	1,66
L6280	Opheylissem	Petite Gette	77,37	12,99	0,79	4,84	4,01
L6320	Grupont	Lhomme	1,01	77,59	17,61	1,46	2,33
L6360	Eprave	Lhomme	2,44	63,36	29,46	1,75	2,98
L6390	Dalhem	Berwinne	6,67	58,02	27,99	3,00	4,31
L6400	Gedinne	Houille	0,90	79,50	15,77	1,47	2,36
L6470	Ambresin	Mehaigne	40,02	52,23	0,39	3,98	3,38

Annexe 13 : Données climatiques

Code	Localité	Cours d'eau	P (mm)	Ecart-type P	PH (mm)	Ecart-type PH	PE (mm)	Ecart-type PE	TE (°C)	Ecart-type TE
91111002	Mariembourg	Brouffe	912,88	153,40	542,16	121,15	218,40	61,90	15,80	1,09
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	820,75	125,89	472,27	93,79	205,11	69,41	16,82	1,01
29711002	Ath	Dendre orientale	802,17	132,10	465,31	105,13	198,70	63,41	16,70	1,04
10461002	Bierges	Dyle	834,98	125,12	479,13	97,16	210,68	68,62	16,48	0,90
90811002	Nismes	Eau blanche	955,06	157,50	575,58	127,56	223,03	61,28	15,70	1,08
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	937,33	142,25	556,14	119,45	225,03	63,78	15,78	1,12
90711002	Couvin	Eau noire	1116,30	206,00	699,96	170,47	247,27	63,78	15,59	1,07
55721002	Bergiliers amont	Geer	799,63	116,90	442,99	87,47	214,22	62,19	16,77	1,03
35611002	Boussoit	Haine	863,57	129,41	498,40	106,32	215,24	67,13	16,47	0,99
79441002	Wihéries	Hantes	929,40	151,70	554,40	128,30	222,09	69,41	15,95	1,01
86221002	Hastiere	Hermeton	901,74	139,59	531,81	117,41	217,39	57,31	15,81	1,11
86611002	Felenne	Houille	1146,98	205,17	720,77	170,63	253,42	71,73	14,68	0,98
72281002	Modave	Hoyoux	935,50	140,02	550,61	108,77	231,74	63,38	15,79	1,02
83411002	Daverdisse	Lesse	1180,12	207,43	746,74	172,58	259,44	72,68	14,84	1,00
72421002	Moha	Mehaigne	805,65	121,95	455,17	92,45	208,45	60,32	16,56	0,93
81631002	Warnant	Molignée	888,55	130,12	522,30	113,45	215,37	58,44	15,92	1,03
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	1149,65	214,12	725,35	178,18	253,05	64,80	15,65	1,05
68321002	Trois-ponts	Salm	1050,62	176,32	642,32	144,00	250,67	67,74	14,87	0,95
23711002	Ronquières	Samme	850,58	138,67	501,03	106,98	209,79	68,28	16,52	0,99
94341002	Membre pont	Semois	1203,33	222,78	775,76	185,89	254,92	69,52	15,24	1,04
95711002	Sainte-marie	Semois	1106,12	218,71	703,80	180,75	238,32	68,03	15,69	1,12
95611002	Tintigny	Semois	1154,75	224,90	741,26	184,91	246,07	68,07	15,29	1,12
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	802,05	137,26	466,82	102,42	200,61	66,95	16,66	1,01
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	926,04	150,17	551,45	129,78	221,07	69,07	15,91	1,02
96511002	Straimont	Vierre	1208,26	223,24	778,91	185,19	255,99	72,75	14,82	1,07
90211002	Treignes	Viroin	995,53	169,14	606,83	137,70	229,09	61,18	15,69	1,06
L5021	Resteigne	Lesse	1140,95	196,44	716,76	163,61	253,52	70,30	14,92	1,01
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	799,66	124,70	462,57	100,73	196,67	59,10	16,92	1,04
L5201	Rhines	Houyoux	829,06	147,71	472,04	111,72	214,64	62,84	16,49	0,93
L5220	Tintigny	Rulles	1188,25	230,92	767,50	188,63	251,10	70,12	14,97	1,15
L5412	Amougies	Rhosnes	842,36	147,43	479,42	103,05	217,14	78,63	16,82	1,01
L5420	Isières	Sille	829,61	136,18	479,73	103,31	208,54	65,50	16,65	1,04
L5442	Aiseau	Biesme	866,43	128,17	507,24	107,40	213,14	60,92	15,95	1,01
L5460	Suzeril	Thyle	827,62	119,99	474,76	97,21	209,96	65,30	16,44	0,91
L5500	Marbehan	Mellier	1172,26	225,35	755,32	184,96	249,09	69,50	14,94	1,14
L5520	Harnoncourt	Ton	1082,08	239,58	678,62	191,22	238,28	71,88	16,07	1,09
L5530	Ochamps	Lesse	1212,27	222,21	765,79	185,94	265,32	75,23	14,71	1,08
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	1260,23	229,22	813,57	191,61	268,23	76,08	14,77	0,98
L5550	Our	Eau d'Our	1189,46	220,87	755,64	182,10	261,16	75,70	14,83	1,00
L5600	Ruette	Vire	1083,29	261,72	681,75	204,76	234,98	76,11	15,97	1,10
L5610	Martelange	Sûre	1138,17	222,03	726,65	175,89	244,62	66,26	14,75	1,02
L5630	Hamoir	Néblon	917,79	136,02	533,59	109,30	232,61	60,27	15,95	1,00
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	923,41	135,13	546,31	118,01	221,57	60,26	15,81	1,14
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	789,71	137,38	456,47	107,20	196,77	65,18	16,72	1,04
L5820	Wanze	Mehaigne	805,20	121,57	454,83	92,23	208,37	60,24	16,56	0,93
L5950	Erneuveille	Ourthe Occidentale	1068,16	176,54	652,19	144,98	248,24	66,12	14,54	1,02
L6020	Athus	Messancy	1044,22	199,61	659,63	163,56	225,36	65,65	15,80	1,13
L6030	Latour	Vire	1080,10	256,60	679,00	201,60	235,17	75,17	16,00	1,10
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	968,27	152,87	572,70	130,44	236,87	57,19	15,64	1,04
L6060	Thy-le-Château	Thyria	878,75	129,60	516,74	110,05	214,39	61,75	16,04	1,04
L6240	Lorcé	Lienne	1084,47	160,53	644,82	134,52	269,73	70,68	14,88	1,04
L6260	Upigny	Mehaigne	833,81	136,54	478,51	102,81	211,17	65,31	16,38	0,93
L6270	Lavaux-Ste-Anne	Wimbe	990,93	161,20	600,80	130,50	230,94	61,76	15,45	1,04
L6280	Opheylissem	Petite Gette	767,48	118,07	427,48	84,86	202,15	58,73	16,61	0,95
L6320	Grupont	Lhomme	1121,21	185,69	683,13	153,85	260,25	72,67	14,69	1,06
L6360	Eprave	Lhomme	1017,62	155,14	604,21	129,82	245,63	64,96	14,94	1,07
L6390	Dalhem	Berwinne	914,33	138,10	516,70	101,61	243,49	70,01	16,84	1,10
L6400	Gedinne	Houille	1199,60	218,33	763,00	182,55	260,25	74,81	14,67	0,97
L6470	Ambresin	Mehaigne	814,55	126,72	463,56	96,47	208,19	32,03	16,49	0,93

Annexe 14 : Evapotranspiration de juillet à septembre (mm)

Code	Localité	Cours d'eau	Moyenne	Ecart-type
91111002	Mariembourg	Brouffe	267,7	34,4
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	269,0	34,2
29711002	Ath	Dendre orientale	267,9	33,9
10461002	Bierges	Dyle	284,9	32,4
90811002	Nismes	Eau blanche	268,4	33,8
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	265,8	36,0
90711002	Couvin	Eau noire	268,5	33,6
55721002	Bergilers amont	Geer	286,8	35,3
35611002	Bousoit	Haine	273,7	33,4
79441002	Wihéries	Hantes	266,5	35,4
86221002	Hastière	Hermeton	278,7	33,6
86611002	Felenne	Houille	262,4	32,0
72281002	Modave	Hoyoux	257,9	33,4
83411002	Daverdisse	Lesse	285,5	37,1
72421002	Moha	Mehaigne	285,9	32,6
81631002	Warnant	Molignée	282,5	34,4
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	269,2	33,2
68321002	Trois-ponts	Salm	276,3	41,8
23711002	Ronquières	Samme	278,0	33,8
94341002	Membre pont	Semois	249,6	33,6
95711002	Sainte-Marie	Semois	251,5	35,8
95611002	Tintigny	Semois	247,8	35,4
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	271,0	34,6
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	266,3	35,5
96511002	Straimont	Vierre	263,3	33,9
90211002	Treignes	Viroin	269,7	33,3
L5021	Resteigne	Lesse	281,8	36,2
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	270,1	33,8
L5201	Rhisnes	Houyoux	285,7	33,2
L5220	Tintigny	Rulles	245,0	35,2
L5412	Amougies	Rhosnes	268,0	34,0
L5420	Isières	Sille	267,8	33,6
L5442	Aiseau	Biesme	281,6	34,1
L5460	Suzeril	Thyle	282,6	32,0
L5500	Marbehan	Mellier	243,2	35,0
L5520	Harnoncourt	Ton	253,3	35,6
L5530	Ochamps	Lesse	294,0	41,0
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	297,5	39,4
L5550	Our	Eau d'Our	290,9	38,5
L5600	Ruette	Vire	252,4	35,6
L5610	Martelange	Sûre	280,1	35,6
L5630	Hamoir	Néblon	264,8	35,4
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	275,0	34,6
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	267,6	34,0
L5820	Wanze	Mehaigne	285,9	32,6
L5950	Erneville	Ourthe Occidentale	292,4	39,0
L6020	Athus	Messancy	251,5	35,7
L6030	Latour	Vire	252,4	35,6
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	252,2	36,7
L6060	Thy-le-Château	Thyria	276,9	34,3
L6240	Lorcé	Lienne	275,8	41,6
L6260	Upigny	Mehaigne	284,7	33,0
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	254,4	33,8
L6280	Opheylissem	Petite Gette	288,1	34,3
L6320	Grupont	Lhomme	294,3	39,5
L6360	Eprave	Lhomme	277,6	36,0
L6390	Dalhem	Berwinne	301,5	38,6
L6400	Gedinne	Houille	263,0	31,7
L6470	Ambresin	Mehaigne	286,4	33,1

Annexe 15 : Percolation annuelle (mm)

Code	Localité	Cours d'eau	Moyenne	Ecart-type
91111002	Mariembourg	Brouffe	18,0	7,6
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	62,3	23,0
29711002	Ath	Dendre orientale	89,7	35,5
10461002	Bierges	Dyle	194,8	82,0
90811002	Nismes	Eau blanche	72,8	22,3
78911002	Cerfontaine	Eau d'heure	23,0	7,7
90711002	Couvin	Eau noire	130,2	36,5
55721002	Bergilers amont	Geer	221,2	94,0
35611002	Bousoit	Haine	174,2	66,7
79441002	Wihéries	Hantes	24,3	10,3
86221002	Hastière	Hermeton	41,9	14,8
86611002	Felenne	Houille	147,6	34,0
72281002	Modave	Hoyoux	166,7	55,8
83411002	Daverdisse	Lesse	112,9	22,4
72421002	Moha	Mehaigne	144,7	54,3
81631002	Warnant	Molignée	106,0	37,2
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	99,7	26,4
68321002	Trois-ponts	Salm	76,6	21,4
23711002	Ronquières	Samme	183,5	74,0
94341002	Membre pont	Semois	102,6	33,7
95711002	Sainte-marie	Semois	326,3	111,4
95611002	Tintigny	Semois	190,6	64,8
19531002	Tubize (Ripain)	Senne	47,8	16,7
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	20,4	7,2
96511002	Straimont	Vierre	42,5	13,1
90211002	Treignes	Viroin	94,0	26,9
L5021	Resteigne	Lesse	101,1	20,1
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	185,7	87,5
L5201	Rhisnes	Houyoux	127,6	56,8
L5220	Tintigny	Rulles	93,5	31,2
L5412	Amougies	Rhosnes	58,0	22,6
L5420	Isières	Sille	20,5	3,3
L5442	Aiseau	Biesme	66,3	23,5
L5460	Suzeril	Thyle	166,8	75,9
L5500	Marbehan	Mellier	40,8	13,3
L5520	Harnoncourt	Ton	230,5	89,7
L5530	Ochamps	Lesse	215,0	42,9
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	241,9	49,0
L5550	Our	Eau d'Our	155,7	32,2
L5600	Ruette	Vire	212,1	88,4
L5610	Martelange	Sûre	131,7	33,5
L5630	Hamoir	Néblon	143,8	50,4
L5640	Walcourt	Ry d'Yves	101,3	34,0
L5690	Brugelette	Dendre Orientale	57,3	22,9
L5820	Wanze	Mehaigne	144,5	54,5
L5950	Erneville	Ourthe Occidentale	86,5	21,5
L6020	Athus	Messancy	113,1	38,6
L6030	Latour	Vire	212,0	87,9
L6050	Baillonville	Ruisseau Heure	17,8	7,4
L6060	Thy-le-Château	Thyria	83,4	29,6
L6240	Lorcé	Lienne	72,1	17,3
L6260	Upigny	Mehaigne	33,3	13,4
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	54,0	12,7
L6280	Opheylissem	Petite Gette	179,2	89,3
L6320	Grupont	Lhomme	87,6	17,0
L6360	Eprave	Lhomme	65,9	14,3
L6390	Dalhem	Berwinne	194,0	70,1
L6400	Gedinne	Houille	189,6	42,7
L6470	Ambresin	Mehaigne	134,7	47,9

Annexe 16 : Coefficient de tarissement (jour⁻¹)

Code	Localité	Cours d'eau	Coefficient de tarissement (Jour ⁻¹)	Coefficient de détermination R ² du calcul du coefficient de tarissement à partir de la loi de Maillet
91111002	Mariembourg	Brouffe	0,039	0.78
29521002	Irchonwelz	Dendre occidentale	0,014	0.51
29711002	Ath	Dendre orientale	0,025	0.66
10461002	Bierges	Dyle	0,005	0.78
90811002	Nismes	Eau Blanche	0,018	0.84
78911002	Cerfontaine	Eau d'Heure	0,023	0.97
90711002	Couvin	Eau noire	0,037	0.96
55721002	Bergilers amont	Geer	0,008	0.96
35611002	Boussoit	Haine	0,011	0.97
79441002	Wihéries	Hantes	0,024	0.97
86221002	Hastière	Hermeton	0,015	0.96
86611002	Felenne	Houille	0,024	0.95
72281002	Modave	Hoyoux	0,006	0.97
83411002	Daverdisse	Lesse	0,025	0.97
72421002	Moha	Mehaigne	0,014	0.97
81631002	Warnant	Molignée	0,008	0.98
92321002	Bruly	Ry de Pernelle	0,027	0.86
68321002	Trois-Ponts	Salm	0,022	0.99
23711002	Ronquières	Samme	0,011	0.86
94341002	Membre	Semois	0,042	0.98
95711002	Sainte-Marie	Semois	0,020	0.88
95611002	Tintigny	Semois	0,027	0.98
19531002	Tubize	Senne	0,025	0.91
79781002	Bersillies-l'abbaye	Thure	0,019	0.86
96511002	Straimont	Vierre	0,036	0.99
90211002	Treignes	Viroin	0,028	0.98
L5021	Resteigne	Lesse	0,010	0.92
L5170	Baisieux	Grande Honnelle	0,010	0.94
L5201	Rhinsnes	Houyoux	0,011	0.95
L5220	Tintigny	Rulles	0,041	0.93
L5412	Amougies	Rhosnes	0,025	0.67
L5420	Isières	Silles	0,015	0.80
L5442	Aiseau	Biesme	0,010	0.90
L5460	Suzeril	Thyle	0,004	0.68
L5500	Marbehan	Mellier	0,054	0.96
L5520	Harnoncourt	Ton	0,008	0.92
L5530	Ochamps	Lesse	0,021	0.89
L5540	Graide	Ruisseau de Graide	0,037	0.89
L5550	Our	Eau d'Our	0,022	0.87
L5600	Ruette	Vire	0,010	0.90
L5610	Martelange	Sûre	0,040	0.99
L5630	Hamoir	Néblon	0,007	0.87
L5640	Walcourt	Ruisseau d'Yves	0,018	0.83
L5690	Brugelette	Dendre orientale	0,013	0.76
L5820	Wanze	Mehaigne	0,014	0.99
L5950	Erneuville	Ourthe occidentale	0,021	0.95
L6020	Athus	Messancy	0,012	0.97
L6030	Latour	Vire	0,012	0.96
L6050	Baillonville	Ruisseau d'Heure	0,024	0.97
L6060	Thy-le-Château	Thyria	0,012	0.80
L6240	Lorcé	Lienne	0,019	0.87
L6260	Upigny	Mehaigne	0,013	0.94
L6270	Lavaux-Sainte-Anne	Wimbe	0,035	0.95
L6280	Opheylissem	Petite Gette	0,002	0.47
L6320	Grupont	Lhomme	0,015	0.95
L6360	Eprave	Lhomme	0,018	0.92
L6390	Dalhem	Berwinne	0,007	0.80
L6400	Gedinne	Houille	0,025	0.95
L6470	Ambresin	Mehaigne	0,009	0.81

Annexe 17 : Matrice de corrélation des variables

	Alt	X	Y	Sup	DD	Pente 10	Pente 50	Pente 90	Terres Artif	Forets	Terres arables	Cult perma
Alt	1.000	0.652	-0.792	-0.040	0.285	0.524	0.478	0.274	-0.489	0.656	-0.711	-0.344
X	0.652	1.000	-0.519	0.117	-0.083	0.627	0.608	0.452	-0.294	0.351	-0.449	0.095
Y	-0.792	-0.520	1.000	-0.129	-0.300	-0.482	-0.620	-0.527	0.429	-0.661	0.736	0.462
Sup	-0.040	0.117	-0.129	1.000	0.078	0.037	0.093	0.254	-0.0439	0.163	-0.132	-0.086
DD	0.285	-0.083	-0.300	0.078	1.000	0.151	0.240	0.289	-0.187	0.351	-0.456	-0.246
Pente10	0.524	0.627	-0.482	0.037	0.151	1.000	0.910	0.782	-0.548	0.632	-0.713	-0.237
Pente50	0.478	0.608	-0.620	0.093	0.240	0.910	1.000	0.911	-0.494	0.652	-0.778	-0.217
Pente90	0.274	0.452	-0.527	0.254	0.290	0.782	0.911	1.000	-0.447	0.5992	-0.719	-0.260
Terr Artif	-0.489	-0.294	0.429	-0.044	-0.187	-0.548	-0.494	-0.447	1.000	-0.720	0.604	0.350
Forets	0.656	0.351	-0.661	0.163	0.351	0.632	0.652	0.599	-0.720	1.000	-0.875	-0.513
Terres arables	-0.711	-0.449	0.736	-0.132	-0.456	-0.713	-0.778	-0.719	0.604	-0.875	1.000	0.379
Cult perma	-0.344	0.095	0.462	-0.086	-0.246	-0.237	-0.217	-0.260	0.350	-0.513	0.379	1.000
Surf enherb	0.390	0.321	-0.430	-0.044	0.317	0.480	0.561	0.518	-0.345	0.223	-0.630	-0.006
SolA	-0.661	-0.397	0.642	-0.056	-0.492	-0.699	-0.716	-0.654	0.547	-0.742	0.842	0.432
SolB	0.525	0.248	-0.279	-0.014	0.211	0.572	0.426	0.328	-0.645	0.585	-0.562	-0.352
SolC	0.356	0.330	-0.636	0.086	0.471	0.394	0.614	0.630	-0.191	0.476	-0.616	-0.191
SolD	-0.284	-0.214	0.092	0.051	-0.123	-0.472	-0.380	-0.322	0.857	-0.539	0.405	0.121
SolINC	-0.194	-0.172	0.136	0.057	0.061	-0.248	-0.254	-0.151	0.604	-0.368	0.242	0.028
P	0.880	0.554	-0.827	0.182	0.257	0.632	0.628	0.477	-0.536	0.803	-0.839	-0.417
PH	0.882	0.534	-0.850	0.186	0.265	0.596	0.603	0.455	-0.521	0.786	-0.823	-0.441
PE	0.809	0.614	-0.643	0.155	0.195	0.737	0.672	0.512	-0.544	0.794	-0.832	-0.268
TE	-0.835	-0.548	0.666	-0.156	-0.253	-0.734	-0.607	-0.483	0.668	-0.838	0.810	0.508
ETP	-0.182	-0.053	0.511	-0.117	-0.359	-0.107	-0.306	-0.351	0.103	-0.175	0.267	0.393
Perco	0.192	0.331	-0.195	-0.007	-0.419	-0.074	-0.004	-0.125	0.391	-0.072	0.043	0.213
CT	0.541	0.090	-0.479	0.236	0.582	0.229	0.241	0.206	-0.452	0.546	-0.550	-0.384

	Surf enherb	SolA	SolB	SolC	SolD	SolINC	P	PH	PE	TE	ETP	Perco	CT
Alt	0.390	-0.661	0.525	0.356	-0.284	-0.194	0.880	0.882	0.809	-0.835	-0.182	0.192	0.541
X	0.321	-0.397	0.248	0.330	-0.214	-0.172	0.554	0.534	0.614	-0.548	-0.053	0.331	0.090
Y	-0.430	0.642	-0.279	-0.636	0.092	0.136	-0.827	-0.850	-0.643	0.666	0.511	-0.195	-0.479
Sup	-0.044	-0.056	-0.014	0.086	0.051	0.057	0.182	0.186	0.155	-0.156	-0.117	-0.007	0.236
DD	0.317	-0.492	0.211	0.471	-0.123	0.061	0.257	0.265	0.195	-0.253	-0.359	-0.419	0.582
Pente 10	0.480	-0.699	0.572	0.394	-0.472	-0.248	0.633	0.596	0.737	-0.734	-0.107	-0.074	0.229
Pente 50	0.561	-0.716	0.426	0.614	-0.380	-0.254	0.628	0.603	0.672	-0.607	-0.306	-0.004	0.241
Pente 90	0.518	-0.654	0.328	0.630	-0.322	-0.151	0.477	0.455	0.512	-0.483	-0.351	-0.125	0.206
Terr Artif	-0.345	0.547	-0.645	-0.191	0.857	0.604	-0.536	-0.521	-0.544	0.668	0.103	0.391	-0.452
Forets	0.223	-0.742	0.585	0.476	-0.539	-0.368	0.803	0.786	0.794	-0.838	-0.175	-0.072	0.546
Terres arables	-0.630	0.842	-0.562	-0.616	0.405	0.242	-0.839	-0.823	-0.832	0.810	0.267	0.043	-0.550
Cult perma	-0.006	0.432	-0.352	-0.191	0.121	0.028	-0.417	-0.441	-0.268	0.508	0.393	0.213	-0.384
Surf enherb	1.000	-0.535	0.309	0.450	-0.208	-0.150	0.409	0.403	0.410	-0.334	-0.284	-0.136	0.272
SolA	-0.535	1.000	-0.759	-0.574	0.435	0.199	-0.755	-0.739	-0.757	0.766	0.229	0.224	-0.518
SolB	0.309	-0.759	1.000	-0.067	-0.666	-0.406	0.582	0.558	0.648	-0.713	0.117	-0.319	0.416
SolC	0.450	-0.574	-0.067	1.000	-0.030	-0.035	0.436	0.439	0.367	-0.299	-0.489	-0.003	0.293
SolD	-0.208	0.435	-0.666	-0.030	1.000	0.686	-0.319	-0.291	-0.418	0.491	-0.146	0.477	-0.322
SolINC	-0.150	0.199	-0.406	-0.035	0.686	1.000	-0.251	-0.241	-0.271	0.260	-0.035	0.132	-0.166
P	0.409	-0.755	0.582	0.436	-0.319	-0.251	1.000	0.997	0.939	-0.884	-0.247	0.184	0.582
PH	0.403	-0.739	0.558	0.439	-0.291	-0.241	0.997	1.000	0.910	-0.866	-0.286	0.189	0.600
PE	0.410	-0.757	0.648	0.367	-0.418	-0.271	0.939	0.910	1.000	-0.886	-0.061	0.154	0.475
TE	-0.334	0.766	-0.713	-0.299	0.491	0.260	-0.884	-0.866	-0.886	1.000	0.081	0.049	-0.540
ETP	-0.284	0.229	0.117	-0.490	-0.146	-0.035	-0.247	-0.286	-0.061	0.081	1.000	0.111	-0.374
Perco	-0.136	0.224	-0.319	-0.002	0.477	0.132	0.184	0.189	0.154	0.049	0.111	1.000	-0.281
CT	0.272	-0.518	0.416	0.293	-0.322	-0.166	0.582	0.600	0.475	-0.540	-0.374	-0.281	1.000

Annexe 18 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du percentile95 spécifique pour une période de retour de deux ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.4517	0.4492	0.4469	0.4448	0.4429	0.4413	0.4399	0.4388	0.4379	0.4372	0.4368	0.4366	0.4367
20	0.4497	0.4471	0.4449	0.4428	0.4410	0.4394	0.4381	0.4370	0.4361	0.4355	0.4352	0.4351	0.4352
30	0.4477	0.4453	0.4430	0.4410	0.4392	0.4377	0.4364	0.4354	0.4346	0.4340	0.4337	0.4337	0.4339
40	0.4459	0.4435	0.4413	0.4394	0.4376	0.4362	0.4349	0.4340	0.4332	0.4327	0.4325	0.4325	0.4327
50	0.4443	0.4419	0.4398	0.4379	0.4362	0.4348	0.4336	0.4327	0.4320	0.4315	0.4313	0.4314	0.4317
60	0.4428	0.4405	0.4384	0.4365	0.4349	0.4335	0.4324	0.4315	0.4309	0.4305	0.4304	0.4305	0.4309
70	0.4415	0.4392	0.4372	0.4354	0.4338	0.4325	0.4314	0.4306	0.4300	0.4297	0.4296	0.4298	0.4302
80	0.4403	0.4381	0.4361	0.4343	0.4328	0.4316	0.4306	0.4298	0.4293	0.4290	0.4290	0.4292	0.4297
90	0.4393	0.4371	0.4352	0.4335	0.4320	0.4308	0.4299	0.4291	0.4287	0.4285	0.4285	0.4288	0.4293
100	0.4384	0.4363	0.4344	0.4328	0.4314	0.4302	0.4293	0.4287	0.4283	0.4281	0.4282	0.4286	0.4292
110	0.4378	0.4357	0.4339	0.4323	0.4309	0.4298	0.4290	0.4284	0.4280	0.4279	0.4281	0.4285	0.4291
120	0.4372	0.4352	0.4334	0.4319	0.4306	0.4296	0.4288	0.4282	0.4279	0.4279	0.4281	0.4286	0.4293
130	0.4369	0.4349	0.4332	0.4317	0.4305	0.4295	0.4287	0.4283	0.4280	0.4280	0.4283	0.4288	0.4296
140	0.4367	0.4347	0.4331	0.4317	0.4305	0.4296	0.4289	0.4284	0.4283	0.4283	0.4287	0.4292	0.4301
150	0.4366	0.4348	0.4332	0.4318	0.4307	0.4298	0.4292	0.4288	0.4287	0.4288	0.4292	0.4298	0.4307
160	0.4367	0.4349	0.4334	0.4321	0.4310	0.4302	0.4296	0.4293	0.4293	0.4295	0.4299	0.4306	0.4315
170	0.4370	0.4353	0.4338	0.4325	0.4315	0.4308	0.4303	0.4300	0.4300	0.4303	0.4307	0.4315	0.4325
180	0.4375	0.4358	0.4343	0.4332	0.4322	0.4315	0.4311	0.4309	0.4309	0.4312	0.4318	0.4326	0.4336
190	0.4381	0.4364	0.4351	0.4339	0.4330	0.4324	0.4320	0.4319	0.4320	0.4323	0.4329	0.4338	0.4349
200	0.4388	0.4373	0.4359	0.4349	0.4340	0.4335	0.4331	0.4330	0.4332	0.4336	0.4343	0.4352	0.4363
210	0.4397	0.4382	0.4370	0.4360	0.4352	0.4347	0.4344	0.4344	0.4346	0.4351	0.4358	0.4367	0.4380
220	0.4408	0.4394	0.4382	0.4372	0.4365	0.4361	0.4358	0.4359	0.4362	0.4367	0.4374	0.4385	0.4397
230	0.4421	0.4407	0.4396	0.4387	0.4380	0.4376	0.4374	0.4375	0.4379	0.4384	0.4393	0.4403	0.4416
240	0.4435	0.4422	0.4411	0.4402	0.4396	0.4393	0.4392	0.4393	0.4397	0.4403	0.4412	0.4423	0.4437
250	0.4450	0.4438	0.4428	0.4420	0.4414	0.4411	0.4411	0.4413	0.4417	0.4424	0.4433	0.4445	0.4459
260	0.4467	0.4455	0.4446	0.4439	0.4434	0.4431	0.4432	0.4434	0.4439	0.4446	0.4456	0.4468	0.4483
270	0.4486	0.4475	0.4466	0.4459	0.4455	0.4453	0.4454	0.4457	0.4462	0.4470	0.4480	0.4493	0.4508
280	0.4506	0.4495	0.4487	0.4481	0.4477	0.4476	0.4477	0.4481	0.4487	0.4495	0.4506	0.4519	0.4534
290	0.4528	0.4517	0.4510	0.4504	0.4501	0.4500	0.4502	0.4506	0.4513	0.4522	0.4533	0.4546	0.4562
300	0.4551	0.4541	0.4534	0.4529	0.4526	0.4526	0.4529	0.4533	0.4540	0.4550	0.4561	0.4575	0.4592
310	0.4575	0.4566	0.4559	0.4555	0.4553	0.4554	0.4556	0.4562	0.4569	0.4579	0.4591	0.4605	0.4622
320	0.4601	0.4593	0.4587	0.4583	0.4581	0.4582	0.4586	0.4591	0.4599	0.4609	0.4622	0.4637	0.4654
330	0.4628	0.4620	0.4615	0.4612	0.4611	0.4612	0.4616	0.4622	0.4631	0.4641	0.4655	0.4670	0.4687
340	0.4657	0.4650	0.4645	0.4642	0.4642	0.4644	0.4648	0.4655	0.4664	0.4675	0.4688	0.4704	0.4722
350	0.4687	0.4680	0.4676	0.4674	0.4674	0.4676	0.4681	0.4688	0.4698	0.4709	0.4723	0.4739	0.4758

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.4370	0.4376	0.4384	0.4395	0.4408	0.4423	0.4441	0.4461	0.4484	0.4508	0.4535	0.4565
20	0.4356	0.4362	0.4371	0.4382	0.4396	0.4412	0.4430	0.4451	0.4474	0.4500	0.4527	0.4557
30	0.4343	0.4350	0.4360	0.4371	0.4386	0.4402	0.4421	0.4443	0.4466	0.4492	0.4520	0.4551
40	0.4332	0.4340	0.4350	0.4362	0.4377	0.4394	0.4414	0.4436	0.4460	0.4486	0.4515	0.4546
50	0.4323	0.4331	0.4341	0.4354	0.4370	0.4388	0.4408	0.4430	0.4455	0.4482	0.4512	0.4543
60	0.4315	0.4324	0.4335	0.4348	0.4364	0.4383	0.4403	0.4427	0.4452	0.4480	0.4509	0.4542
70	0.4309	0.4318	0.4330	0.4344	0.4360	0.4379	0.4401	0.4424	0.4450	0.4479	0.4509	0.4542
80	0.4304	0.4314	0.4326	0.4341	0.4358	0.4378	0.4400	0.4424	0.4450	0.4479	0.4510	0.4543
90	0.4301	0.4312	0.4325	0.4340	0.4358	0.4378	0.4400	0.4425	0.4452	0.4481	0.4513	0.4546
100	0.4300	0.4311	0.4324	0.4340	0.4359	0.4379	0.4402	0.4428	0.4455	0.4485	0.4517	0.4551
110	0.4300	0.4312	0.4326	0.4342	0.4361	0.4382	0.4406	0.4432	0.4460	0.4490	0.4523	0.4557
120	0.4302	0.4315	0.4329	0.4346	0.4365	0.4387	0.4411	0.4438	0.4466	0.4497	0.4530	0.4565
130	0.4306	0.4319	0.4334	0.4351	0.4371	0.4394	0.4418	0.4445	0.4474	0.4506	0.4539	0.4575
140	0.4311	0.4325	0.4340	0.4358	0.4379	0.4402	0.4427	0.4454	0.4484	0.4516	0.4550	0.4586
150	0.4318	0.4332	0.4348	0.4367	0.4388	0.4411	0.4437	0.4465	0.4495	0.4527	0.4562	0.4598
160	0.4327	0.4341	0.4358	0.4377	0.4399	0.4422	0.4448	0.4477	0.4507	0.4540	0.4575	0.4612
170	0.4337	0.4352	0.4369	0.4389	0.4411	0.4435	0.4462	0.4491	0.4522	0.4555	0.4590	0.4627
180	0.4349	0.4364	0.4382	0.4402	0.4425	0.4449	0.4477	0.4506	0.4537	0.4571	0.4607	0.4644
190	0.4362	0.4378	0.4397	0.4417	0.4440	0.4465	0.4493	0.4523	0.4554	0.4588	0.4625	0.4663
200	0.4377	0.4394	0.4413	0.4434	0.4457	0.4483	0.4511	0.4541	0.4573	0.4608	0.4644	0.4682
210	0.4394	0.4411	0.4430	0.4452	0.4476	0.4502	0.4530	0.4561	0.4593	0.4628	0.4665	0.4704
220	0.4412	0.4429	0.4449	0.4471	0.4495	0.4522	0.4551	0.4582	0.4615	0.4650	0.4687	0.4726
230	0.4432	0.4450	0.4470	0.4492	0.4517	0.4544	0.4573	0.4604	0.4638	0.4673	0.4711	0.4750
240	0.4453	0.4471	0.4492	0.4515	0.4540	0.4567	0.4597	0.4628	0.4662	0.4698	0.4736	0.4776
250	0.4476	0.4494	0.4515	0.4539	0.4564	0.4592	0.4622	0.4654	0.4688	0.4724	0.4762	0.4802
260	0.4500	0.4519	0.4540	0.4564	0.4590	0.4618	0.4648	0.4681	0.4715	0.4752	0.4790	0.4831
270	0.4525	0.4545	0.4567	0.4591	0.4617	0.4646	0.4676	0.4709	0.4744	0.4781	0.4819	0.4860
280	0.4552	0.4572	0.4594	0.4619	0.4646	0.4675	0.4705	0.4739	0.4774	0.4811	0.4850	0.4891
290	0.4580	0.4601	0.4624	0.4648	0.4676	0.4705	0.4736	0.4769	0.4805	0.4842	0.4881	0.4922
300	0.4610	0.4631	0.4654	0.4679	0.4707	0.4736	0.4768	0.4801	0.4837	0.4875	0.4914	0.4956
310	0.4641	0.4662	0.4686	0.4711	0.4739	0.4769	0.4801	0.4835	0.4871	0.4909	0.4948	0.4990
320	0.4674	0.4695	0.4719	0.4745	0.4773	0.4803	0.4835	0.4869	0.4906	0.4944	0.4984	0.5025
330	0.4707	0.4729	0.4753	0.4780	0.4808	0.4838	0.4871	0.4905	0.4942	0.4980	0.5020	0.5062
340	0.4742	0.4764	0.4789	0.4815	0.4844	0.4875	0.4908	0.4942	0.4979	0.5017	0.5058	0.5100
350	0.4778	0.4801	0.4826	0.4853	0.4882	0.4913	0.4945	0.4980	0.5017	0.5056	0.5096	0.5139

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.4596	0.4629	0.4665	0.4702	0.4742
20	0.4589	0.4623	0.4659	0.4697	0.4737
30	0.4583	0.4618	0.4654	0.4693	0.4734
40	0.4579	0.4614	0.4652	0.4691	0.4732
50	0.4577	0.4612	0.4650	0.4690	0.4732
60	0.4576	0.4612	0.4650	0.4691	0.4733
70	0.4576	0.4613	0.4652	0.4693	0.4735
80	0.4578	0.4616	0.4655	0.4696	0.4740
90	0.4582	0.4620	0.4660	0.4702	0.4745
100	0.4587	0.4626	0.4666	0.4708	0.4752
110	0.4594	0.4633	0.4674	0.4716	0.4761
120	0.4603	0.4642	0.4683	0.4726	0.4771
130	0.4612	0.4652	0.4694	0.4737	0.4783
140	0.4624	0.4664	0.4706	0.4750	0.4796
150	0.4637	0.4677	0.4720	0.4764	0.4810
160	0.4651	0.4692	0.4735	0.4779	0.4826
170	0.4667	0.4708	0.4751	0.4796	0.4843
180	0.4684	0.4726	0.4769	0.4815	0.4862
190	0.4703	0.4745	0.4789	0.4834	0.4882
200	0.4723	0.4765	0.4810	0.4856	0.4903
210	0.4744	0.4787	0.4832	0.4878	0.4926
220	0.4767	0.4810	0.4855	0.4902	0.4950
230	0.4792	0.4835	0.4880	0.4927	0.4976
240	0.4817	0.4861	0.4906	0.4954	0.5002
250	0.4844	0.4888	0.4934	0.4981	0.5030
260	0.4873	0.4917	0.4963	0.5010	0.5060
270	0.4902	0.4947	0.4993	0.5041	0.5090
280	0.4933	0.4978	0.5024	0.5072	0.5122
290	0.4965	0.5010	0.5057	0.5105	0.5155
300	0.4999	0.5044	0.5090	0.5139	0.5189
310	0.5033	0.5078	0.5125	0.5174	0.5224
320	0.5069	0.5114	0.5161	0.5210	0.5260
330	0.5106	0.5151	0.5198	0.5247	0.5297
340	0.5144	0.5189	0.5236	0.5285	0.5336
350	0.5183	0.5228	0.5276	0.5325	0.5375

Annexe 19 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du percentile95 spécifique pour une période de retour de cinq ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.5000	0.4971	0.4946	0.4922	0.4902	0.4884	0.4869	0.4856	0.4846	0.4839	0.4834	0.4832	0.4833
20	0.4977	0.4949	0.4924	0.4901	0.4881	0.4863	0.4849	0.4836	0.4827	0.4820	0.4816	0.4815	0.4817
30	0.4955	0.4928	0.4903	0.4881	0.4861	0.4844	0.4830	0.4819	0.4810	0.4804	0.4800	0.4800	0.4802
40	0.4935	0.4908	0.4884	0.4863	0.4844	0.4827	0.4814	0.4803	0.4794	0.4789	0.4786	0.4786	0.4789
50	0.4917	0.4891	0.4867	0.4846	0.4828	0.4812	0.4799	0.4788	0.4781	0.4776	0.4774	0.4775	0.4778
60	0.4901	0.4875	0.4852	0.4831	0.4813	0.4798	0.4786	0.4776	0.4769	0.4765	0.4763	0.4765	0.4769
70	0.4886	0.4861	0.4838	0.4818	0.4801	0.4786	0.4775	0.4765	0.4759	0.4755	0.4755	0.4756	0.4761
80	0.4873	0.4848	0.4826	0.4807	0.4790	0.4776	0.4765	0.4757	0.4751	0.4748	0.4748	0.4750	0.4755
90	0.4862	0.4838	0.4816	0.4798	0.4781	0.4768	0.4757	0.4750	0.4744	0.4742	0.4742	0.4746	0.4752
100	0.4852	0.4829	0.4808	0.4790	0.4774	0.4762	0.4752	0.4744	0.4740	0.4738	0.4739	0.4743	0.4750
110	0.4845	0.4822	0.4802	0.4784	0.4769	0.4757	0.4748	0.4741	0.4737	0.4736	0.4738	0.4742	0.4749
120	0.4839	0.4817	0.4797	0.4780	0.4766	0.4754	0.4745	0.4739	0.4736	0.4736	0.4738	0.4743	0.4751
130	0.4835	0.4813	0.4794	0.4778	0.4764	0.4753	0.4745	0.4740	0.4737	0.4737	0.4740	0.4746	0.4754
140	0.4833	0.4811	0.4793	0.4777	0.4764	0.4754	0.4747	0.4742	0.4740	0.4741	0.4744	0.4751	0.4760
150	0.4832	0.4812	0.4794	0.4779	0.4766	0.4757	0.4750	0.4746	0.4744	0.4746	0.4750	0.4757	0.4767
160	0.4833	0.4814	0.4796	0.4782	0.4770	0.4761	0.4755	0.4751	0.4751	0.4753	0.4758	0.4765	0.4776
170	0.4837	0.4817	0.4801	0.4787	0.4776	0.4768	0.4762	0.4759	0.4759	0.4762	0.4767	0.4775	0.4786
180	0.4841	0.4823	0.4807	0.4794	0.4783	0.4776	0.4771	0.4769	0.4769	0.4772	0.4779	0.4787	0.4799
190	0.4848	0.4830	0.4815	0.4802	0.4793	0.4786	0.4781	0.4780	0.4781	0.4785	0.4792	0.4801	0.4813
200	0.4857	0.4839	0.4825	0.4813	0.4804	0.4797	0.4794	0.4793	0.4795	0.4799	0.4806	0.4816	0.4829
210	0.4867	0.4850	0.4836	0.4825	0.4817	0.4811	0.4808	0.4807	0.4810	0.4815	0.4823	0.4834	0.4847
220	0.4879	0.4863	0.4850	0.4839	0.4831	0.4826	0.4824	0.4824	0.4827	0.4833	0.4841	0.4853	0.4866
230	0.4893	0.4877	0.4865	0.4855	0.4848	0.4843	0.4841	0.4842	0.4846	0.4852	0.4861	0.4873	0.4888
240	0.4908	0.4894	0.4882	0.4872	0.4866	0.4862	0.4861	0.4862	0.4867	0.4874	0.4883	0.4896	0.4911
250	0.4925	0.4911	0.4900	0.4891	0.4886	0.4882	0.4882	0.4884	0.4889	0.4896	0.4907	0.4920	0.4935
260	0.4944	0.4931	0.4920	0.4912	0.4907	0.4904	0.4905	0.4907	0.4913	0.4921	0.4932	0.4945	0.4961
270	0.4965	0.4952	0.4942	0.4935	0.4930	0.4928	0.4929	0.4932	0.4938	0.4947	0.4958	0.4972	0.4989
280	0.4987	0.4975	0.4966	0.4959	0.4955	0.4954	0.4955	0.4959	0.4966	0.4975	0.4987	0.5001	0.5018
290	0.5011	0.5000	0.4991	0.4985	0.4982	0.4981	0.4983	0.4987	0.4994	0.5004	0.5017	0.5032	0.5049
300	0.5036	0.5026	0.5018	0.5012	0.5010	0.5009	0.5012	0.5017	0.5025	0.5035	0.5048	0.5064	0.5082
310	0.5064	0.5054	0.5046	0.5041	0.5039	0.5040	0.5043	0.5048	0.5057	0.5068	0.5081	0.5097	0.5116
320	0.5092	0.5083	0.5076	0.5072	0.5070	0.5071	0.5075	0.5081	0.5090	0.5101	0.5115	0.5132	0.5151
330	0.5122	0.5114	0.5108	0.5104	0.5103	0.5105	0.5109	0.5116	0.5125	0.5137	0.5151	0.5168	0.5188
340	0.5154	0.5146	0.5140	0.5138	0.5137	0.5139	0.5144	0.5151	0.5161	0.5174	0.5189	0.5206	0.5226
350	0.5187	0.5180	0.5175	0.5173	0.5173	0.5176	0.5181	0.5189	0.5199	0.5212	0.5227	0.5245	0.5265

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.4837	0.4843	0.4852	0.4864	0.4878	0.4895	0.4915	0.4937	0.4962	0.4990	0.5019	0.5052
20	0.4821	0.4828	0.4838	0.4850	0.4865	0.4883	0.4903	0.4926	0.4952	0.4980	0.5010	0.5043
30	0.4807	0.4815	0.4825	0.4838	0.4854	0.4872	0.4893	0.4917	0.4943	0.4972	0.5003	0.5036
40	0.4795	0.4803	0.4814	0.4828	0.4844	0.4863	0.4885	0.4909	0.4936	0.4965	0.4997	0.5031
50	0.4784	0.4793	0.4805	0.4819	0.4836	0.4856	0.4878	0.4903	0.4931	0.4961	0.4993	0.5028
60	0.4776	0.4785	0.4797	0.4812	0.4830	0.4850	0.4873	0.4899	0.4927	0.4958	0.4991	0.5026
70	0.4769	0.4779	0.4792	0.4807	0.4826	0.4847	0.4870	0.4897	0.4925	0.4957	0.4990	0.5026
80	0.4764	0.4774	0.4788	0.4804	0.4823	0.4845	0.4869	0.4896	0.4925	0.4957	0.4991	0.5028
90	0.4760	0.4772	0.4786	0.4803	0.4823	0.4845	0.4870	0.4897	0.4927	0.4960	0.4994	0.5032
100	0.4759	0.4771	0.4786	0.4804	0.4824	0.4847	0.4872	0.4900	0.4931	0.4964	0.4999	0.5037
110	0.4759	0.4772	0.4788	0.4806	0.4827	0.4850	0.4876	0.4905	0.4936	0.4970	0.5006	0.5044
120	0.4762	0.4775	0.4791	0.4810	0.4831	0.4855	0.4882	0.4911	0.4943	0.4977	0.5014	0.5053
130	0.4766	0.4780	0.4796	0.4816	0.4838	0.4863	0.4890	0.4920	0.4952	0.4986	0.5024	0.5063
140	0.4772	0.4786	0.4804	0.4824	0.4846	0.4871	0.4899	0.4930	0.4962	0.4998	0.5035	0.5075
150	0.4779	0.4795	0.4812	0.4833	0.4856	0.4882	0.4910	0.4941	0.4975	0.5010	0.5048	0.5089
160	0.4789	0.4805	0.4823	0.4844	0.4868	0.4894	0.4923	0.4955	0.4989	0.5025	0.5063	0.5104
170	0.4800	0.4817	0.4836	0.4857	0.4882	0.4909	0.4938	0.4970	0.5004	0.5041	0.5080	0.5121
180	0.4813	0.4830	0.4850	0.4872	0.4897	0.4924	0.4954	0.4987	0.5022	0.5059	0.5098	0.5140
190	0.4828	0.4846	0.4866	0.4889	0.4914	0.4942	0.4972	0.5005	0.5041	0.5078	0.5118	0.5160
200	0.4845	0.4863	0.4884	0.4907	0.4933	0.4961	0.4992	0.5025	0.5061	0.5099	0.5140	0.5182
210	0.4863	0.4882	0.4903	0.4927	0.4953	0.4982	0.5014	0.5047	0.5084	0.5122	0.5163	0.5206
220	0.4883	0.4902	0.4924	0.4948	0.4975	0.5005	0.5037	0.5071	0.5107	0.5146	0.5187	0.5231
230	0.4905	0.4924	0.4947	0.4972	0.4999	0.5029	0.5061	0.5096	0.5133	0.5172	0.5214	0.5257
240	0.4928	0.4948	0.4971	0.4997	0.5024	0.5055	0.5087	0.5122	0.5160	0.5200	0.5241	0.5286
250	0.4953	0.4974	0.4997	0.5023	0.5051	0.5082	0.5115	0.5151	0.5188	0.5228	0.5271	0.5315
260	0.4980	0.5001	0.5025	0.5051	0.5080	0.5111	0.5145	0.5180	0.5219	0.5259	0.5301	0.5346
270	0.5008	0.5030	0.5054	0.5081	0.5110	0.5141	0.5175	0.5212	0.5250	0.5291	0.5334	0.5379
280	0.5038	0.5060	0.5085	0.5112	0.5142	0.5173	0.5208	0.5244	0.5283	0.5324	0.5367	0.5413
290	0.5069	0.5092	0.5117	0.5145	0.5175	0.5207	0.5242	0.5278	0.5318	0.5359	0.5402	0.5448
300	0.5102	0.5125	0.5151	0.5179	0.5209	0.5242	0.5277	0.5314	0.5353	0.5395	0.5439	0.5484
310	0.5137	0.5160	0.5186	0.5214	0.5245	0.5278	0.5313	0.5351	0.5391	0.5433	0.5476	0.5522
320	0.5172	0.5196	0.5223	0.5251	0.5282	0.5316	0.5351	0.5389	0.5429	0.5471	0.5516	0.5562
330	0.5210	0.5234	0.5261	0.5290	0.5321	0.5355	0.5391	0.5429	0.5469	0.5511	0.5556	0.5602
340	0.5248	0.5273	0.5300	0.5329	0.5361	0.5395	0.5431	0.5470	0.5510	0.5553	0.5597	0.5644
350	0.5288	0.5313	0.5341	0.5371	0.5403	0.5437	0.5473	0.5512	0.5553	0.5596	0.5640	0.5687

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.5086	0.5124	0.5163	0.5204	0.5248
20	0.5079	0.5116	0.5156	0.5198	0.5243
30	0.5072	0.5111	0.5151	0.5194	0.5239
40	0.5068	0.5107	0.5148	0.5191	0.5237
50	0.5065	0.5105	0.5147	0.5191	0.5237
60	0.5064	0.5104	0.5147	0.5191	0.5238
70	0.5065	0.5106	0.5148	0.5194	0.5241
80	0.5067	0.5108	0.5152	0.5198	0.5245
90	0.5071	0.5113	0.5157	0.5203	0.5252
100	0.5077	0.5119	0.5164	0.5211	0.5260
110	0.5085	0.5127	0.5173	0.5220	0.5269
120	0.5094	0.5137	0.5183	0.5231	0.5280
130	0.5105	0.5149	0.5195	0.5243	0.5293
140	0.5117	0.5162	0.5208	0.5257	0.5308
150	0.5131	0.5176	0.5223	0.5272	0.5323
160	0.5147	0.5193	0.5240	0.5290	0.5341
170	0.5165	0.5211	0.5258	0.5308	0.5360
180	0.5184	0.5230	0.5278	0.5329	0.5381
190	0.5205	0.5251	0.5300	0.5350	0.5403
200	0.5227	0.5274	0.5323	0.5374	0.5427
210	0.5251	0.5298	0.5347	0.5399	0.5452
220	0.5276	0.5324	0.5374	0.5425	0.5479
230	0.5303	0.5351	0.5401	0.5453	0.5507
240	0.5332	0.5380	0.5430	0.5482	0.5536
250	0.5362	0.5410	0.5461	0.5513	0.5567
260	0.5393	0.5442	0.5492	0.5545	0.5600
270	0.5426	0.5475	0.5526	0.5579	0.5633
280	0.5460	0.5509	0.5560	0.5613	0.5668
290	0.5495	0.5545	0.5596	0.5650	0.5705
300	0.5532	0.5582	0.5634	0.5687	0.5742
310	0.5570	0.5620	0.5672	0.5726	0.5781
320	0.5610	0.5660	0.5712	0.5766	0.5821
330	0.5651	0.5701	0.5753	0.5807	0.5863
340	0.5693	0.5743	0.5795	0.5849	0.5905
350	0.5736	0.5786	0.5839	0.5893	0.5949

Annexe 20 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du percentile95 spécifique pour une période de retour de dix ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.5404	0.5374	0.5346	0.5321	0.5299	0.5279	0.5262	0.5249	0.5238	0.5230	0.5225	0.5223	0.5224
20	0.5379	0.5349	0.5322	0.5297	0.5276	0.5257	0.5241	0.5228	0.5218	0.5210	0.5206	0.5205	0.5206
30	0.5356	0.5327	0.5300	0.5276	0.5255	0.5236	0.5221	0.5209	0.5199	0.5192	0.5189	0.5188	0.5191
40	0.5335	0.5306	0.5279	0.5256	0.5236	0.5218	0.5203	0.5191	0.5182	0.5177	0.5174	0.5174	0.5177
50	0.5315	0.5287	0.5261	0.5238	0.5218	0.5201	0.5187	0.5176	0.5168	0.5162	0.5160	0.5161	0.5165
60	0.5297	0.5269	0.5244	0.5222	0.5203	0.5187	0.5173	0.5162	0.5155	0.5150	0.5149	0.5150	0.5155
70	0.5281	0.5254	0.5230	0.5208	0.5189	0.5174	0.5161	0.5151	0.5144	0.5140	0.5139	0.5141	0.5146
80	0.5267	0.5241	0.5217	0.5196	0.5178	0.5163	0.5151	0.5141	0.5135	0.5132	0.5132	0.5135	0.5140
90	0.5255	0.5229	0.5206	0.5186	0.5168	0.5154	0.5142	0.5134	0.5128	0.5126	0.5126	0.5130	0.5136
100	0.5245	0.5220	0.5197	0.5177	0.5161	0.5147	0.5136	0.5128	0.5123	0.5121	0.5123	0.5127	0.5134
110	0.5237	0.5212	0.5190	0.5171	0.5155	0.5142	0.5132	0.5125	0.5120	0.5119	0.5121	0.5126	0.5134
120	0.5230	0.5206	0.5185	0.5167	0.5151	0.5139	0.5129	0.5123	0.5119	0.5119	0.5121	0.5127	0.5135
130	0.5226	0.5203	0.5182	0.5164	0.5150	0.5138	0.5129	0.5123	0.5120	0.5121	0.5124	0.5130	0.5139
140	0.5224	0.5201	0.5181	0.5164	0.5150	0.5139	0.5131	0.5125	0.5123	0.5124	0.5128	0.5135	0.5145
150	0.5223	0.5201	0.5182	0.5165	0.5152	0.5142	0.5134	0.5130	0.5128	0.5130	0.5134	0.5142	0.5153
160	0.5225	0.5203	0.5185	0.5169	0.5156	0.5146	0.5140	0.5136	0.5135	0.5137	0.5143	0.5151	0.5162
170	0.5228	0.5207	0.5189	0.5174	0.5162	0.5153	0.5147	0.5144	0.5144	0.5147	0.5153	0.5162	0.5174
180	0.5233	0.5213	0.5196	0.5182	0.5170	0.5162	0.5157	0.5154	0.5155	0.5159	0.5165	0.5175	0.5187
190	0.5240	0.5221	0.5205	0.5191	0.5180	0.5173	0.5168	0.5166	0.5168	0.5172	0.5179	0.5190	0.5203
200	0.5250	0.5231	0.5215	0.5202	0.5192	0.5186	0.5182	0.5181	0.5182	0.5187	0.5195	0.5206	0.5220
210	0.5261	0.5243	0.5228	0.5216	0.5206	0.5200	0.5197	0.5196	0.5199	0.5205	0.5213	0.5225	0.5239
220	0.5274	0.5256	0.5242	0.5231	0.5222	0.5217	0.5214	0.5214	0.5218	0.5224	0.5233	0.5245	0.5260
230	0.5289	0.5272	0.5258	0.5248	0.5240	0.5235	0.5233	0.5234	0.5238	0.5245	0.5255	0.5268	0.5283
240	0.5305	0.5289	0.5277	0.5267	0.5259	0.5255	0.5254	0.5256	0.5260	0.5268	0.5278	0.5292	0.5308
250	0.5324	0.5309	0.5297	0.5287	0.5281	0.5277	0.5277	0.5279	0.5284	0.5293	0.5304	0.5318	0.5334
260	0.5344	0.5330	0.5318	0.5310	0.5304	0.5301	0.5301	0.5304	0.5310	0.5319	0.5331	0.5345	0.5363
270	0.5367	0.5353	0.5342	0.5334	0.5329	0.5327	0.5328	0.5331	0.5338	0.5347	0.5360	0.5375	0.5393
280	0.5391	0.5378	0.5368	0.5360	0.5356	0.5355	0.5356	0.5360	0.5367	0.5377	0.5390	0.5406	0.5424
290	0.5416	0.5404	0.5395	0.5388	0.5385	0.5384	0.5386	0.5391	0.5399	0.5409	0.5423	0.5439	0.5458
300	0.5444	0.5432	0.5424	0.5418	0.5415	0.5415	0.5417	0.5423	0.5431	0.5443	0.5457	0.5473	0.5493
310	0.5473	0.5462	0.5454	0.5449	0.5447	0.5447	0.5451	0.5457	0.5466	0.5478	0.5492	0.5509	0.5529
320	0.5504	0.5494	0.5487	0.5482	0.5481	0.5482	0.5486	0.5492	0.5502	0.5514	0.5529	0.5547	0.5568
330	0.5537	0.5527	0.5521	0.5517	0.5516	0.5518	0.5522	0.5530	0.5540	0.5553	0.5568	0.5586	0.5607
340	0.5571	0.5562	0.5556	0.5553	0.5553	0.5555	0.5560	0.5568	0.5579	0.5592	0.5608	0.5627	0.5649
350	0.5607	0.5599	0.5594	0.5591	0.5591	0.5594	0.5600	0.5609	0.5620	0.5634	0.5650	0.5670	0.5692

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.5228	0.5235	0.5245	0.5257	0.5273	0.5291	0.5313	0.5337	0.5364	0.5393	0.5426	0.5461
20	0.5211	0.5219	0.5229	0.5242	0.5259	0.5278	0.5300	0.5325	0.5352	0.5383	0.5416	0.5451
30	0.5196	0.5204	0.5215	0.5229	0.5246	0.5266	0.5289	0.5315	0.5343	0.5374	0.5408	0.5444
40	0.5183	0.5192	0.5203	0.5218	0.5236	0.5257	0.5280	0.5306	0.5335	0.5367	0.5401	0.5438
50	0.5171	0.5181	0.5194	0.5209	0.5228	0.5249	0.5273	0.5300	0.5330	0.5362	0.5397	0.5435
60	0.5162	0.5172	0.5186	0.5202	0.5221	0.5243	0.5268	0.5295	0.5326	0.5359	0.5395	0.5433
70	0.5155	0.5166	0.5180	0.5196	0.5216	0.5239	0.5265	0.5293	0.5324	0.5358	0.5394	0.5433
80	0.5149	0.5161	0.5175	0.5193	0.5214	0.5237	0.5263	0.5292	0.5324	0.5358	0.5395	0.5435
90	0.5146	0.5158	0.5173	0.5192	0.5213	0.5237	0.5264	0.5293	0.5326	0.5361	0.5399	0.5439
100	0.5144	0.5157	0.5173	0.5192	0.5214	0.5239	0.5266	0.5297	0.5330	0.5365	0.5404	0.5444
110	0.5145	0.5158	0.5175	0.5195	0.5217	0.5243	0.5271	0.5302	0.5335	0.5372	0.5411	0.5452
120	0.5147	0.5161	0.5179	0.5199	0.5222	0.5248	0.5277	0.5309	0.5343	0.5380	0.5419	0.5461
130	0.5151	0.5166	0.5185	0.5206	0.5229	0.5256	0.5285	0.5318	0.5352	0.5390	0.5430	0.5473
140	0.5158	0.5174	0.5192	0.5214	0.5238	0.5266	0.5296	0.5328	0.5364	0.5402	0.5443	0.5486
150	0.5166	0.5182	0.5202	0.5224	0.5249	0.5277	0.5308	0.5341	0.5377	0.5416	0.5457	0.5501
160	0.5176	0.5193	0.5213	0.5236	0.5262	0.5290	0.5322	0.5356	0.5392	0.5431	0.5473	0.5517
170	0.5189	0.5206	0.5227	0.5250	0.5277	0.5306	0.5338	0.5372	0.5409	0.5449	0.5491	0.5536
180	0.5203	0.5221	0.5242	0.5266	0.5293	0.5323	0.5355	0.5390	0.5428	0.5468	0.5511	0.5556
190	0.5219	0.5238	0.5260	0.5284	0.5312	0.5342	0.5375	0.5410	0.5448	0.5489	0.5532	0.5578
200	0.5237	0.5256	0.5279	0.5304	0.5332	0.5363	0.5396	0.5432	0.5471	0.5512	0.5556	0.5602
210	0.5256	0.5277	0.5300	0.5325	0.5354	0.5385	0.5419	0.5456	0.5495	0.5536	0.5581	0.5627
220	0.5278	0.5299	0.5322	0.5349	0.5378	0.5410	0.5444	0.5481	0.5521	0.5563	0.5607	0.5654
230	0.5302	0.5323	0.5347	0.5374	0.5404	0.5436	0.5471	0.5508	0.5548	0.5591	0.5636	0.5683
240	0.5327	0.5349	0.5373	0.5401	0.5431	0.5464	0.5499	0.5537	0.5577	0.5620	0.5666	0.5713
250	0.5354	0.5376	0.5402	0.5429	0.5460	0.5493	0.5529	0.5567	0.5608	0.5652	0.5697	0.5745
260	0.5383	0.5406	0.5431	0.5460	0.5491	0.5525	0.5561	0.5600	0.5641	0.5684	0.5730	0.5779
270	0.5413	0.5437	0.5463	0.5492	0.5523	0.5558	0.5594	0.5633	0.5675	0.5719	0.5765	0.5814
280	0.5446	0.5470	0.5496	0.5526	0.5558	0.5592	0.5629	0.5669	0.5711	0.5755	0.5802	0.5851
290	0.5480	0.5504	0.5531	0.5561	0.5593	0.5628	0.5666	0.5706	0.5748	0.5793	0.5839	0.5889
300	0.5515	0.5540	0.5568	0.5598	0.5631	0.5666	0.5704	0.5744	0.5787	0.5832	0.5879	0.5928
310	0.5552	0.5578	0.5606	0.5636	0.5669	0.5705	0.5743	0.5784	0.5827	0.5872	0.5920	0.5969
320	0.5591	0.5617	0.5645	0.5676	0.5710	0.5746	0.5784	0.5825	0.5869	0.5914	0.5962	0.6012
330	0.5631	0.5657	0.5686	0.5718	0.5752	0.5788	0.5827	0.5868	0.5912	0.5957	0.6005	0.6056
340	0.5673	0.5700	0.5729	0.5761	0.5795	0.5832	0.5871	0.5912	0.5956	0.6002	0.6050	0.6101
350	0.5716	0.5743	0.5773	0.5805	0.5840	0.5877	0.5916	0.5958	0.6002	0.6048	0.6097	0.6147

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.5498	0.5538	0.5581	0.5626	0.5673
20	0.5490	0.5530	0.5573	0.5619	0.5667
30	0.5483	0.5524	0.5568	0.5614	0.5663
40	0.5478	0.5520	0.5565	0.5612	0.5661
50	0.5475	0.5518	0.5563	0.5611	0.5660
60	0.5474	0.5517	0.5563	0.5611	0.5662
70	0.5475	0.5519	0.5565	0.5614	0.5665
80	0.5477	0.5522	0.5569	0.5618	0.5670
90	0.5482	0.5527	0.5574	0.5624	0.5677
100	0.5488	0.5534	0.5582	0.5632	0.5685
110	0.5496	0.5542	0.5591	0.5642	0.5696
120	0.5506	0.5553	0.5602	0.5654	0.5708
130	0.5518	0.5565	0.5615	0.5667	0.5721
140	0.5531	0.5579	0.5630	0.5682	0.5737
150	0.5547	0.5595	0.5646	0.5699	0.5754
160	0.5564	0.5613	0.5664	0.5718	0.5773
170	0.5583	0.5632	0.5684	0.5738	0.5794
180	0.5603	0.5653	0.5705	0.5760	0.5816
190	0.5626	0.5676	0.5729	0.5783	0.5840
200	0.5650	0.5701	0.5754	0.5809	0.5866
210	0.5676	0.5727	0.5780	0.5836	0.5893
220	0.5703	0.5755	0.5808	0.5864	0.5922
230	0.5732	0.5784	0.5838	0.5894	0.5952
240	0.5763	0.5815	0.5870	0.5926	0.5984
250	0.5795	0.5848	0.5902	0.5959	0.6018
260	0.5829	0.5882	0.5937	0.5994	0.6053
270	0.5865	0.5918	0.5973	0.6030	0.6089
280	0.5902	0.5955	0.6010	0.6068	0.6127
290	0.5940	0.5994	0.6049	0.6107	0.6166
300	0.5980	0.6034	0.6089	0.6147	0.6207
310	0.6021	0.6075	0.6131	0.6189	0.6249
320	0.6064	0.6118	0.6174	0.6232	0.6292
330	0.6108	0.6162	0.6219	0.6277	0.6337
340	0.6153	0.6208	0.6264	0.6323	0.6383
350	0.6200	0.6255	0.6311	0.6370	0.6430

Annexe 21 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du percentile95 spécifique pour une période de retour de vingt ans (intervalles de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.5892	0.5858	0.5828	0.5801	0.5776	0.5755	0.5737	0.5722	0.5710	0.5702	0.5697	0.5694	0.5695
20	0.5864	0.5832	0.5802	0.5775	0.5752	0.5731	0.5714	0.5699	0.5688	0.5680	0.5676	0.5674	0.5676
30	0.5839	0.5807	0.5778	0.5752	0.5729	0.5709	0.5692	0.5678	0.5668	0.5661	0.5657	0.5656	0.5659
40	0.5816	0.5784	0.5756	0.5730	0.5708	0.5689	0.5673	0.5660	0.5650	0.5643	0.5640	0.5640	0.5644
50	0.5794	0.5764	0.5736	0.5711	0.5689	0.5670	0.5655	0.5643	0.5634	0.5628	0.5626	0.5626	0.5631
60	0.5775	0.5745	0.5718	0.5693	0.5672	0.5654	0.5640	0.5628	0.5620	0.5615	0.5613	0.5615	0.5620
70	0.5758	0.5728	0.5702	0.5678	0.5658	0.5640	0.5626	0.5616	0.5608	0.5604	0.5603	0.5605	0.5611
80	0.5743	0.5714	0.5688	0.5665	0.5645	0.5629	0.5615	0.5605	0.5598	0.5595	0.5595	0.5598	0.5604
90	0.5729	0.5701	0.5676	0.5654	0.5635	0.5619	0.5606	0.5597	0.5591	0.5588	0.5589	0.5592	0.5599
100	0.5718	0.5691	0.5666	0.5645	0.5626	0.5611	0.5599	0.5591	0.5585	0.5583	0.5585	0.5589	0.5597
110	0.5709	0.5682	0.5658	0.5638	0.5620	0.5606	0.5595	0.5587	0.5582	0.5581	0.5583	0.5588	0.5597
120	0.5702	0.5676	0.5653	0.5633	0.5616	0.5602	0.5592	0.5585	0.5581	0.5581	0.5583	0.5589	0.5599
130	0.5698	0.5672	0.5649	0.5630	0.5614	0.5601	0.5592	0.5585	0.5582	0.5582	0.5586	0.5593	0.5603
140	0.5695	0.5670	0.5648	0.5630	0.5614	0.5602	0.5593	0.5588	0.5586	0.5586	0.5591	0.5598	0.5609
150	0.5694	0.5670	0.5649	0.5631	0.5617	0.5605	0.5597	0.5592	0.5591	0.5593	0.5598	0.5606	0.5617
160	0.5696	0.5672	0.5652	0.5635	0.5621	0.5611	0.5603	0.5599	0.5598	0.5601	0.5607	0.5616	0.5628
170	0.5699	0.5677	0.5657	0.5641	0.5628	0.5618	0.5612	0.5608	0.5608	0.5611	0.5618	0.5628	0.5640
180	0.5705	0.5683	0.5665	0.5649	0.5637	0.5628	0.5622	0.5619	0.5620	0.5624	0.5631	0.5642	0.5655
190	0.5713	0.5692	0.5674	0.5659	0.5648	0.5639	0.5634	0.5633	0.5634	0.5639	0.5647	0.5658	0.5672
200	0.5723	0.5703	0.5686	0.5672	0.5661	0.5653	0.5649	0.5648	0.5650	0.5655	0.5664	0.5676	0.5691
210	0.5735	0.5716	0.5699	0.5686	0.5676	0.5669	0.5666	0.5665	0.5668	0.5674	0.5684	0.5696	0.5712
220	0.5749	0.5731	0.5715	0.5703	0.5693	0.5687	0.5684	0.5685	0.5688	0.5695	0.5705	0.5718	0.5735
230	0.5766	0.5748	0.5733	0.5721	0.5713	0.5707	0.5705	0.5706	0.5711	0.5718	0.5729	0.5743	0.5760
240	0.5784	0.5767	0.5753	0.5742	0.5734	0.5729	0.5728	0.5730	0.5735	0.5743	0.5754	0.5769	0.5787
250	0.5804	0.5788	0.5774	0.5764	0.5757	0.5753	0.5753	0.5755	0.5761	0.5770	0.5782	0.5797	0.5816
260	0.5826	0.5811	0.5798	0.5789	0.5783	0.5780	0.5780	0.5783	0.5789	0.5799	0.5812	0.5827	0.5846
270	0.5851	0.5836	0.5824	0.5815	0.5810	0.5808	0.5808	0.5812	0.5819	0.5830	0.5843	0.5860	0.5879
280	0.5877	0.5863	0.5852	0.5844	0.5839	0.5838	0.5839	0.5844	0.5852	0.5862	0.5876	0.5894	0.5914
290	0.5905	0.5892	0.5881	0.5874	0.5870	0.5869	0.5872	0.5877	0.5886	0.5897	0.5912	0.5929	0.5950
300	0.5935	0.5923	0.5913	0.5907	0.5903	0.5903	0.5906	0.5912	0.5921	0.5933	0.5949	0.5967	0.5988
310	0.5967	0.5955	0.5947	0.5941	0.5938	0.5939	0.5942	0.5949	0.5959	0.5972	0.5988	0.6006	0.6028
320	0.6001	0.5990	0.5982	0.5977	0.5975	0.5976	0.5981	0.5988	0.5998	0.6012	0.6028	0.6048	0.6070
330	0.6036	0.6026	0.6019	0.6015	0.6014	0.6015	0.6020	0.6028	0.6039	0.6053	0.6070	0.6090	0.6113
340	0.6074	0.6064	0.6058	0.6054	0.6054	0.6056	0.6062	0.6071	0.6082	0.6097	0.6114	0.6135	0.6158
350	0.6113	0.6104	0.6098	0.6095	0.6096	0.6099	0.6105	0.6115	0.6127	0.6142	0.6160	0.6181	0.6205

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.5700	0.5707	0.5718	0.5732	0.5749	0.5769	0.5792	0.5818	0.5848	0.5880	0.5915	0.5953
20	0.5681	0.5689	0.5701	0.5715	0.5733	0.5754	0.5778	0.5805	0.5835	0.5868	0.5904	0.5943
30	0.5665	0.5674	0.5686	0.5701	0.5720	0.5741	0.5766	0.5794	0.5825	0.5859	0.5895	0.5935
40	0.5650	0.5660	0.5673	0.5689	0.5708	0.5731	0.5756	0.5785	0.5817	0.5851	0.5889	0.5929
50	0.5638	0.5648	0.5662	0.5679	0.5699	0.5722	0.5749	0.5778	0.5810	0.5846	0.5884	0.5925
60	0.5628	0.5639	0.5653	0.5671	0.5692	0.5716	0.5743	0.5773	0.5806	0.5842	0.5881	0.5923
70	0.5619	0.5632	0.5647	0.5665	0.5687	0.5712	0.5739	0.5770	0.5804	0.5841	0.5881	0.5923
80	0.5614	0.5626	0.5642	0.5662	0.5684	0.5709	0.5738	0.5770	0.5804	0.5842	0.5882	0.5925
90	0.5610	0.5623	0.5640	0.5660	0.5683	0.5709	0.5739	0.5771	0.5806	0.5844	0.5886	0.5929
100	0.5608	0.5622	0.5640	0.5661	0.5684	0.5711	0.5741	0.5774	0.5810	0.5849	0.5891	0.5936
110	0.5609	0.5624	0.5642	0.5663	0.5688	0.5716	0.5746	0.5780	0.5817	0.5856	0.5899	0.5944
120	0.5611	0.5627	0.5646	0.5668	0.5693	0.5722	0.5753	0.5788	0.5825	0.5865	0.5908	0.5954
130	0.5616	0.5633	0.5652	0.5675	0.5701	0.5730	0.5762	0.5797	0.5835	0.5876	0.5920	0.5966
140	0.5623	0.5640	0.5661	0.5684	0.5711	0.5741	0.5773	0.5809	0.5848	0.5889	0.5934	0.5981
150	0.5632	0.5650	0.5671	0.5695	0.5723	0.5753	0.5787	0.5823	0.5862	0.5904	0.5949	0.5997
160	0.5643	0.5662	0.5684	0.5709	0.5737	0.5768	0.5802	0.5839	0.5879	0.5921	0.5967	0.6015
170	0.5657	0.5676	0.5698	0.5724	0.5753	0.5784	0.5819	0.5857	0.5897	0.5940	0.5986	0.6035
180	0.5672	0.5692	0.5715	0.5741	0.5771	0.5803	0.5838	0.5876	0.5918	0.5961	0.6008	0.6057
190	0.5690	0.5710	0.5734	0.5761	0.5791	0.5824	0.5860	0.5898	0.5940	0.5984	0.6031	0.6081
200	0.5709	0.5730	0.5755	0.5782	0.5813	0.5846	0.5883	0.5922	0.5964	0.6009	0.6057	0.6107
210	0.5731	0.5753	0.5778	0.5806	0.5837	0.5871	0.5908	0.5948	0.5991	0.6036	0.6084	0.6135
220	0.5754	0.5777	0.5803	0.5831	0.5863	0.5898	0.5935	0.5976	0.6019	0.6065	0.6113	0.6164
230	0.5780	0.5803	0.5829	0.5859	0.5891	0.5926	0.5964	0.6005	0.6049	0.6095	0.6144	0.6195
240	0.5807	0.5831	0.5858	0.5888	0.5921	0.5957	0.5995	0.6036	0.6081	0.6127	0.6177	0.6229
250	0.5837	0.5861	0.5889	0.5919	0.5953	0.5989	0.6028	0.6070	0.6114	0.6161	0.6211	0.6263
260	0.5868	0.5893	0.5921	0.5952	0.5986	0.6023	0.6062	0.6105	0.6150	0.6197	0.6247	0.6300
270	0.5902	0.5927	0.5956	0.5987	0.6022	0.6059	0.6099	0.6141	0.6187	0.6235	0.6285	0.6338
280	0.5937	0.5963	0.5992	0.6024	0.6059	0.6097	0.6137	0.6180	0.6226	0.6274	0.6325	0.6378
290	0.5974	0.6000	0.6030	0.6063	0.6098	0.6136	0.6177	0.6220	0.6266	0.6315	0.6366	0.6420
300	0.6013	0.6040	0.6070	0.6103	0.6139	0.6177	0.6218	0.6262	0.6309	0.6358	0.6409	0.6463
310	0.6053	0.6081	0.6111	0.6145	0.6181	0.6220	0.6261	0.6306	0.6352	0.6402	0.6454	0.6508
320	0.6095	0.6123	0.6154	0.6188	0.6225	0.6264	0.6306	0.6351	0.6398	0.6448	0.6500	0.6554
330	0.6139	0.6168	0.6199	0.6234	0.6271	0.6310	0.6353	0.6397	0.6445	0.6495	0.6547	0.6602
340	0.6185	0.6214	0.6246	0.6280	0.6318	0.6358	0.6400	0.6446	0.6493	0.6544	0.6596	0.6651
350	0.6232	0.6261	0.6294	0.6329	0.6367	0.6407	0.6450	0.6495	0.6543	0.6594	0.6647	0.6702

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.5994	0.6038	0.6084	0.6133	0.6185
20	0.5985	0.6029	0.6076	0.6126	0.6178
30	0.5977	0.6023	0.6070	0.6121	0.6174
40	0.5972	0.6018	0.6067	0.6118	0.6171
50	0.5969	0.6016	0.6065	0.6117	0.6171
60	0.5968	0.6015	0.6065	0.6117	0.6173
70	0.5968	0.6016	0.6067	0.6120	0.6176
80	0.5971	0.6020	0.6071	0.6125	0.6181
90	0.5976	0.6025	0.6077	0.6132	0.6189
100	0.5983	0.6033	0.6085	0.6141	0.6198
110	0.5992	0.6042	0.6096	0.6151	0.6209
120	0.6003	0.6054	0.6108	0.6164	0.6222
130	0.6015	0.6067	0.6122	0.6178	0.6238
140	0.6030	0.6083	0.6137	0.6195	0.6254
150	0.6047	0.6100	0.6155	0.6213	0.6273
160	0.6066	0.6119	0.6175	0.6233	0.6294
170	0.6086	0.6140	0.6197	0.6255	0.6317
180	0.6109	0.6163	0.6220	0.6279	0.6341
190	0.6133	0.6188	0.6245	0.6305	0.6367
200	0.6160	0.6215	0.6273	0.6333	0.6395
210	0.6188	0.6243	0.6302	0.6362	0.6425
220	0.6218	0.6274	0.6332	0.6393	0.6456
230	0.6249	0.6306	0.6365	0.6426	0.6489
240	0.6283	0.6340	0.6399	0.6460	0.6524
250	0.6318	0.6375	0.6435	0.6497	0.6561
260	0.6355	0.6413	0.6472	0.6535	0.6599
270	0.6394	0.6452	0.6512	0.6574	0.6638
280	0.6434	0.6492	0.6552	0.6615	0.6680
290	0.6476	0.6534	0.6595	0.6658	0.6723
300	0.6519	0.6578	0.6639	0.6702	0.6767
310	0.6564	0.6623	0.6684	0.6747	0.6813
320	0.6611	0.6670	0.6731	0.6795	0.6860
330	0.6659	0.6718	0.6780	0.6843	0.6909
340	0.6708	0.6768	0.6829	0.6893	0.6959
350	0.6759	0.6819	0.6881	0.6944	0.7010

Annexe 22 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du percentile95 spécifique pour une période de retour de cinquante ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.6592	0.6555	0.6521	0.6491	0.6463	0.6440	0.6419	0.6403	0.6389	0.6380	0.6374	0.6371	0.6373
20	0.6562	0.6525	0.6492	0.6462	0.6435	0.6412	0.6393	0.6377	0.6365	0.6356	0.6351	0.6349	0.6351
30	0.6533	0.6497	0.6465	0.6436	0.6410	0.6388	0.6369	0.6354	0.6342	0.6334	0.6330	0.6329	0.6332
40	0.6507	0.6472	0.6440	0.6412	0.6387	0.6365	0.6347	0.6333	0.6322	0.6315	0.6311	0.6311	0.6315
50	0.6483	0.6449	0.6418	0.6390	0.6365	0.6345	0.6327	0.6314	0.6304	0.6297	0.6295	0.6295	0.6300
60	0.6462	0.6428	0.6397	0.6370	0.6347	0.6327	0.6310	0.6297	0.6288	0.6283	0.6281	0.6282	0.6288
70	0.6442	0.6409	0.6379	0.6353	0.6330	0.6311	0.6295	0.6283	0.6275	0.6270	0.6269	0.6272	0.6278
80	0.6425	0.6393	0.6364	0.6338	0.6316	0.6298	0.6283	0.6272	0.6264	0.6260	0.6260	0.6263	0.6270
90	0.6411	0.6379	0.6351	0.6326	0.6305	0.6287	0.6273	0.6262	0.6256	0.6253	0.6253	0.6257	0.6265
100	0.6398	0.6367	0.6340	0.6316	0.6295	0.6278	0.6265	0.6256	0.6250	0.6247	0.6249	0.6254	0.6263
110	0.6388	0.6358	0.6331	0.6308	0.6288	0.6272	0.6260	0.6251	0.6246	0.6245	0.6247	0.6253	0.6262
120	0.6380	0.6351	0.6325	0.6303	0.6284	0.6269	0.6257	0.6249	0.6245	0.6244	0.6247	0.6254	0.6264
130	0.6375	0.6346	0.6321	0.6300	0.6282	0.6267	0.6257	0.6249	0.6246	0.6246	0.6250	0.6258	0.6269
140	0.6372	0.6344	0.6320	0.6299	0.6282	0.6268	0.6259	0.6252	0.6250	0.6251	0.6255	0.6264	0.6276
150	0.6371	0.6344	0.6321	0.6301	0.6285	0.6272	0.6263	0.6257	0.6256	0.6258	0.6263	0.6272	0.6285
160	0.6373	0.6347	0.6324	0.6305	0.6290	0.6278	0.6270	0.6265	0.6264	0.6267	0.6273	0.6283	0.6297
170	0.6377	0.6352	0.6330	0.6312	0.6297	0.6286	0.6279	0.6275	0.6275	0.6279	0.6286	0.6297	0.6311
180	0.6384	0.6359	0.6338	0.6321	0.6307	0.6297	0.6290	0.6287	0.6288	0.6293	0.6301	0.6312	0.6328
190	0.6392	0.6369	0.6349	0.6332	0.6319	0.6310	0.6304	0.6302	0.6304	0.6309	0.6318	0.6330	0.6346
200	0.6404	0.6381	0.6362	0.6346	0.6334	0.6325	0.6321	0.6319	0.6322	0.6328	0.6337	0.6351	0.6368
210	0.6417	0.6395	0.6377	0.6362	0.6351	0.6343	0.6339	0.6339	0.6342	0.6349	0.6359	0.6373	0.6391
220	0.6433	0.6412	0.6395	0.6381	0.6370	0.6363	0.6360	0.6361	0.6365	0.6372	0.6384	0.6398	0.6417
230	0.6451	0.6431	0.6414	0.6401	0.6392	0.6386	0.6384	0.6385	0.6390	0.6398	0.6410	0.6426	0.6445
240	0.6472	0.6452	0.6437	0.6424	0.6416	0.6411	0.6409	0.6411	0.6417	0.6426	0.6439	0.6455	0.6475
250	0.6494	0.6476	0.6461	0.6450	0.6442	0.6438	0.6437	0.6440	0.6446	0.6456	0.6470	0.6487	0.6507
260	0.6519	0.6502	0.6488	0.6477	0.6470	0.6467	0.6467	0.6471	0.6478	0.6488	0.6503	0.6520	0.6542
270	0.6546	0.6530	0.6517	0.6507	0.6501	0.6498	0.6499	0.6504	0.6511	0.6523	0.6538	0.6556	0.6578
280	0.6576	0.6560	0.6548	0.6539	0.6534	0.6532	0.6533	0.6539	0.6547	0.6560	0.6575	0.6594	0.6617
290	0.6607	0.6592	0.6581	0.6573	0.6568	0.6567	0.6570	0.6576	0.6585	0.6598	0.6615	0.6634	0.6658
300	0.6641	0.6627	0.6616	0.6609	0.6605	0.6605	0.6608	0.6615	0.6625	0.6639	0.6656	0.6677	0.6700
310	0.6676	0.6663	0.6654	0.6647	0.6644	0.6645	0.6649	0.6657	0.6667	0.6682	0.6700	0.6721	0.6745
320	0.6714	0.6702	0.6693	0.6688	0.6685	0.6687	0.6692	0.6700	0.6712	0.6727	0.6745	0.6767	0.6792
330	0.6754	0.6743	0.6735	0.6730	0.6729	0.6731	0.6736	0.6745	0.6758	0.6773	0.6792	0.6815	0.6840
340	0.6796	0.6785	0.6778	0.6774	0.6774	0.6777	0.6783	0.6792	0.6805	0.6822	0.6841	0.6864	0.6891
350	0.6840	0.6830	0.6823	0.6820	0.6821	0.6824	0.6831	0.6842	0.6855	0.6872	0.6893	0.6916	0.6943

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.6377	0.6386	0.6398	0.6413	0.6432	0.6455	0.6481	0.6510	0.6543	0.6579	0.6618	0.6661
20	0.6357	0.6366	0.6379	0.6395	0.6415	0.6438	0.6465	0.6495	0.6529	0.6566	0.6606	0.6650
30	0.6338	0.6348	0.6362	0.6379	0.6400	0.6424	0.6452	0.6483	0.6518	0.6555	0.6596	0.6641
40	0.6322	0.6333	0.6347	0.6365	0.6387	0.6412	0.6441	0.6473	0.6508	0.6547	0.6589	0.6634
50	0.6308	0.6320	0.6335	0.6354	0.6377	0.6403	0.6432	0.6465	0.6501	0.6541	0.6584	0.6630
60	0.6297	0.6309	0.6326	0.6345	0.6369	0.6396	0.6426	0.6460	0.6497	0.6537	0.6581	0.6627
70	0.6288	0.6301	0.6318	0.6339	0.6363	0.6391	0.6422	0.6456	0.6494	0.6535	0.6580	0.6627
80	0.6281	0.6295	0.6313	0.6335	0.6360	0.6388	0.6420	0.6456	0.6494	0.6536	0.6581	0.6630
90	0.6277	0.6292	0.6311	0.6333	0.6359	0.6388	0.6421	0.6457	0.6497	0.6539	0.6585	0.6634
100	0.6275	0.6291	0.6311	0.6334	0.6360	0.6390	0.6424	0.6461	0.6501	0.6545	0.6592	0.6641
110	0.6275	0.6292	0.6313	0.6337	0.6364	0.6395	0.6429	0.6467	0.6508	0.6553	0.6600	0.6651
120	0.6278	0.6296	0.6317	0.6342	0.6370	0.6402	0.6437	0.6476	0.6518	0.6563	0.6611	0.6662
130	0.6284	0.6302	0.6324	0.6350	0.6379	0.6411	0.6447	0.6487	0.6529	0.6575	0.6624	0.6676
140	0.6292	0.6311	0.6334	0.6360	0.6390	0.6423	0.6460	0.6500	0.6543	0.6589	0.6639	0.6692
150	0.6302	0.6322	0.6345	0.6373	0.6403	0.6437	0.6475	0.6515	0.6559	0.6606	0.6657	0.6710
160	0.6314	0.6335	0.6360	0.6387	0.6419	0.6454	0.6492	0.6533	0.6578	0.6625	0.6676	0.6730
170	0.6329	0.6351	0.6376	0.6405	0.6437	0.6472	0.6511	0.6553	0.6598	0.6647	0.6698	0.6753
180	0.6346	0.6369	0.6395	0.6424	0.6457	0.6493	0.6533	0.6575	0.6621	0.6670	0.6722	0.6777
190	0.6366	0.6389	0.6416	0.6446	0.6479	0.6516	0.6556	0.6600	0.6646	0.6696	0.6749	0.6804
200	0.6388	0.6412	0.6439	0.6470	0.6504	0.6542	0.6582	0.6626	0.6673	0.6724	0.6777	0.6833
210	0.6412	0.6437	0.6465	0.6496	0.6531	0.6569	0.6611	0.6655	0.6703	0.6754	0.6807	0.6864
220	0.6438	0.6464	0.6493	0.6525	0.6560	0.6599	0.6641	0.6686	0.6734	0.6786	0.6840	0.6897
230	0.6467	0.6493	0.6523	0.6555	0.6591	0.6631	0.6673	0.6719	0.6768	0.6820	0.6874	0.6932
240	0.6498	0.6525	0.6555	0.6588	0.6625	0.6665	0.6708	0.6754	0.6804	0.6856	0.6911	0.6969
250	0.6531	0.6558	0.6589	0.6623	0.6660	0.6701	0.6745	0.6791	0.6841	0.6894	0.6950	0.7008
260	0.6566	0.6594	0.6626	0.6660	0.6698	0.6739	0.6783	0.6831	0.6881	0.6934	0.6990	0.7049
270	0.6603	0.6632	0.6664	0.6699	0.6738	0.6779	0.6824	0.6872	0.6923	0.6976	0.7033	0.7092
280	0.6643	0.6672	0.6705	0.6740	0.6779	0.6821	0.6867	0.6915	0.6966	0.7020	0.7077	0.7137
290	0.6684	0.6714	0.6747	0.6783	0.6823	0.6866	0.6911	0.6960	0.7011	0.7066	0.7123	0.7183
300	0.6727	0.6758	0.6792	0.6828	0.6868	0.6912	0.6958	0.7007	0.7059	0.7114	0.7171	0.7232
310	0.6773	0.6804	0.6838	0.6875	0.6916	0.6959	0.7006	0.7055	0.7108	0.7163	0.7221	0.7282
320	0.6820	0.6852	0.6886	0.6924	0.6965	0.7009	0.7056	0.7106	0.7159	0.7214	0.7272	0.7333
330	0.6869	0.6901	0.6936	0.6975	0.7016	0.7061	0.7108	0.7158	0.7211	0.7267	0.7326	0.7387
340	0.6920	0.6953	0.6988	0.7027	0.7069	0.7114	0.7162	0.7212	0.7266	0.7322	0.7381	0.7442
350	0.6973	0.7006	0.7042	0.7081	0.7124	0.7169	0.7217	0.7268	0.7322	0.7378	0.7437	0.7499

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.6707	0.6756	0.6807	0.6862	0.6920
20	0.6696	0.6746	0.6799	0.6854	0.6913
30	0.6688	0.6739	0.6792	0.6849	0.6908
40	0.6682	0.6734	0.6788	0.6845	0.6905
50	0.6679	0.6731	0.6786	0.6844	0.6905
60	0.6677	0.6730	0.6786	0.6845	0.6906
70	0.6678	0.6732	0.6788	0.6848	0.6910
80	0.6681	0.6736	0.6793	0.6853	0.6916
90	0.6687	0.6742	0.6800	0.6861	0.6925
100	0.6694	0.6750	0.6809	0.6871	0.6935
110	0.6704	0.6761	0.6820	0.6883	0.6948
120	0.6716	0.6774	0.6834	0.6897	0.6962
130	0.6731	0.6789	0.6849	0.6913	0.6979
140	0.6747	0.6806	0.6867	0.6931	0.6998
150	0.6766	0.6825	0.6887	0.6952	0.7019
160	0.6787	0.6847	0.6909	0.6975	0.7042
170	0.6810	0.6870	0.6933	0.6999	0.7068
180	0.6835	0.6896	0.6960	0.7026	0.7095
190	0.6863	0.6924	0.6988	0.7055	0.7124
200	0.6892	0.6954	0.7018	0.7086	0.7155
210	0.6924	0.6986	0.7051	0.7119	0.7189
220	0.6957	0.7020	0.7085	0.7153	0.7224
230	0.6993	0.7056	0.7122	0.7190	0.7261
240	0.7030	0.7094	0.7160	0.7229	0.7300
250	0.7069	0.7133	0.7200	0.7269	0.7341
260	0.7111	0.7175	0.7242	0.7311	0.7383
270	0.7154	0.7219	0.7286	0.7356	0.7428
280	0.7199	0.7264	0.7332	0.7402	0.7474
290	0.7246	0.7311	0.7379	0.7449	0.7522
300	0.7295	0.7360	0.7428	0.7499	0.7572
310	0.7345	0.7411	0.7479	0.7550	0.7623
320	0.7397	0.7463	0.7532	0.7602	0.7676
330	0.7451	0.7517	0.7586	0.7657	0.7730
340	0.7506	0.7573	0.7641	0.7713	0.7786
350	0.7563	0.7630	0.7699	0.7770	0.7844

Annexe 23 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du MAM7 spécifique pour une période de retour de deux ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.4696	0.4669	0.4645	0.4623	0.4604	0.4587	0.4573	0.4561	0.4551	0.4544	0.4540	0.4538	0.4539
20	0.4674	0.4648	0.4624	0.4603	0.4584	0.4568	0.4554	0.4542	0.4534	0.4527	0.4524	0.4522	0.4524
30	0.4654	0.4628	0.4605	0.4584	0.4566	0.4550	0.4537	0.4526	0.4517	0.4512	0.4509	0.4508	0.4510
40	0.4635	0.4610	0.4587	0.4567	0.4549	0.4534	0.4521	0.4511	0.4503	0.4498	0.4495	0.4495	0.4498
50	0.4618	0.4594	0.4571	0.4552	0.4534	0.4519	0.4507	0.4497	0.4490	0.4486	0.4484	0.4484	0.4488
60	0.4603	0.4579	0.4557	0.4538	0.4521	0.4507	0.4495	0.4486	0.4479	0.4475	0.4474	0.4475	0.4479
70	0.4589	0.4565	0.4544	0.4525	0.4509	0.4495	0.4484	0.4476	0.4470	0.4466	0.4466	0.4467	0.4472
80	0.4577	0.4554	0.4533	0.4515	0.4499	0.4486	0.4475	0.4467	0.4462	0.4459	0.4459	0.4461	0.4466
90	0.4566	0.4544	0.4524	0.4506	0.4491	0.4478	0.4468	0.4461	0.4456	0.4454	0.4454	0.4457	0.4463
100	0.4558	0.4535	0.4516	0.4499	0.4484	0.4472	0.4463	0.4456	0.4452	0.4450	0.4451	0.4455	0.4461
110	0.4550	0.4529	0.4510	0.4493	0.4479	0.4468	0.4459	0.4453	0.4449	0.4448	0.4450	0.4454	0.4461
120	0.4545	0.4524	0.4505	0.4489	0.4476	0.4465	0.4457	0.4451	0.4448	0.4448	0.4450	0.4455	0.4462
130	0.4541	0.4521	0.4503	0.4487	0.4475	0.4464	0.4457	0.4452	0.4449	0.4449	0.4452	0.4457	0.4465
140	0.4539	0.4519	0.4502	0.4487	0.4475	0.4465	0.4458	0.4454	0.4452	0.4452	0.4456	0.4462	0.4470
150	0.4538	0.4519	0.4502	0.4488	0.4477	0.4468	0.4461	0.4457	0.4456	0.4457	0.4461	0.4468	0.4477
160	0.4540	0.4521	0.4505	0.4491	0.4480	0.4472	0.4466	0.4463	0.4462	0.4464	0.4469	0.4476	0.4485
170	0.4543	0.4525	0.4509	0.4496	0.4486	0.4478	0.4472	0.4470	0.4470	0.4472	0.4477	0.4485	0.4495
180	0.4547	0.4530	0.4515	0.4502	0.4493	0.4485	0.4481	0.4479	0.4479	0.4482	0.4488	0.4496	0.4507
190	0.4553	0.4537	0.4522	0.4511	0.4501	0.4495	0.4491	0.4489	0.4490	0.4494	0.4500	0.4509	0.4521
200	0.4561	0.4545	0.4532	0.4520	0.4512	0.4506	0.4502	0.4501	0.4503	0.4507	0.4514	0.4524	0.4536
210	0.4571	0.4555	0.4542	0.4532	0.4524	0.4518	0.4516	0.4515	0.4518	0.4522	0.4530	0.4540	0.4552
220	0.4582	0.4567	0.4555	0.4545	0.4538	0.4533	0.4530	0.4531	0.4534	0.4539	0.4547	0.4558	0.4571
230	0.4595	0.4581	0.4569	0.4560	0.4553	0.4549	0.4547	0.4548	0.4551	0.4557	0.4566	0.4577	0.4591
240	0.4610	0.4596	0.4585	0.4576	0.4570	0.4566	0.4565	0.4567	0.4571	0.4577	0.4586	0.4598	0.4612
250	0.4626	0.4613	0.4602	0.4594	0.4589	0.4586	0.4585	0.4587	0.4592	0.4599	0.4608	0.4620	0.4635
260	0.4644	0.4631	0.4621	0.4614	0.4609	0.4606	0.4606	0.4609	0.4614	0.4622	0.4632	0.4645	0.4660
270	0.4663	0.4651	0.4642	0.4635	0.4631	0.4629	0.4629	0.4633	0.4638	0.4646	0.4657	0.4670	0.4686
280	0.4684	0.4673	0.4664	0.4658	0.4654	0.4653	0.4654	0.4658	0.4664	0.4672	0.4684	0.4697	0.4713
290	0.4706	0.4696	0.4688	0.4682	0.4679	0.4678	0.4680	0.4684	0.4691	0.4700	0.4712	0.4726	0.4742
300	0.4730	0.4720	0.4713	0.4708	0.4705	0.4705	0.4707	0.4712	0.4719	0.4729	0.4741	0.4756	0.4773
310	0.4756	0.4746	0.4739	0.4735	0.4733	0.4733	0.4736	0.4742	0.4749	0.4760	0.4772	0.4787	0.4805
320	0.4783	0.4774	0.4768	0.4764	0.4762	0.4763	0.4767	0.4772	0.4781	0.4791	0.4804	0.4820	0.4838
330	0.4811	0.4803	0.4797	0.4794	0.4793	0.4794	0.4798	0.4805	0.4813	0.4825	0.4838	0.4854	0.4872
340	0.4841	0.4833	0.4828	0.4825	0.4825	0.4827	0.4831	0.4838	0.4848	0.4859	0.4873	0.4890	0.4908
350	0.4872	0.4865	0.4860	0.4858	0.4858	0.4861	0.4866	0.4873	0.4883	0.4895	0.4910	0.4926	0.4945

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.4543	0.4549	0.4557	0.4568	0.4582	0.4598	0.4616	0.4637	0.4661	0.4686	0.4714	0.4745
20	0.4528	0.4534	0.4544	0.4555	0.4569	0.4586	0.4605	0.4627	0.4651	0.4677	0.4706	0.4737
30	0.4515	0.4522	0.4532	0.4544	0.4559	0.4576	0.4596	0.4618	0.4643	0.4669	0.4699	0.4730
40	0.4503	0.4511	0.4521	0.4534	0.4550	0.4568	0.4588	0.4611	0.4636	0.4663	0.4693	0.4725
50	0.4493	0.4502	0.4513	0.4526	0.4542	0.4561	0.4582	0.4605	0.4631	0.4659	0.4690	0.4722
60	0.4485	0.4494	0.4506	0.4520	0.4537	0.4556	0.4577	0.4601	0.4628	0.4656	0.4687	0.4721
70	0.4479	0.4488	0.4501	0.4515	0.4532	0.4552	0.4574	0.4599	0.4626	0.4655	0.4687	0.4721
80	0.4474	0.4484	0.4497	0.4512	0.4530	0.4550	0.4573	0.4598	0.4626	0.4656	0.4688	0.4723
90	0.4471	0.4482	0.4495	0.4511	0.4529	0.4550	0.4574	0.4600	0.4628	0.4658	0.4691	0.4726
100	0.4470	0.4481	0.4495	0.4512	0.4531	0.4552	0.4576	0.4602	0.4631	0.4662	0.4695	0.4731
110	0.4470	0.4482	0.4497	0.4514	0.4533	0.4555	0.4580	0.4607	0.4636	0.4667	0.4701	0.4737
120	0.4472	0.4485	0.4500	0.4518	0.4538	0.4560	0.4585	0.4613	0.4643	0.4675	0.4709	0.4745
130	0.4476	0.4489	0.4505	0.4523	0.4544	0.4567	0.4593	0.4621	0.4651	0.4683	0.4718	0.4755
140	0.4482	0.4495	0.4512	0.4530	0.4552	0.4575	0.4601	0.4630	0.4661	0.4694	0.4729	0.4767
150	0.4489	0.4503	0.4520	0.4539	0.4561	0.4585	0.4612	0.4641	0.4672	0.4706	0.4742	0.4779
160	0.4498	0.4513	0.4530	0.4550	0.4572	0.4597	0.4624	0.4654	0.4685	0.4719	0.4756	0.4794
170	0.4508	0.4524	0.4542	0.4562	0.4585	0.4610	0.4638	0.4668	0.4700	0.4735	0.4771	0.4810
180	0.4521	0.4537	0.4555	0.4576	0.4599	0.4625	0.4653	0.4684	0.4716	0.4751	0.4788	0.4828
190	0.4535	0.4551	0.4570	0.4591	0.4615	0.4642	0.4670	0.4701	0.4734	0.4770	0.4807	0.4847
200	0.4550	0.4567	0.4587	0.4609	0.4633	0.4660	0.4689	0.4720	0.4754	0.4789	0.4827	0.4867
210	0.4567	0.4585	0.4605	0.4627	0.4652	0.4679	0.4709	0.4741	0.4775	0.4811	0.4849	0.4889
220	0.4586	0.4604	0.4625	0.4648	0.4673	0.4700	0.4730	0.4763	0.4797	0.4833	0.4872	0.4913
230	0.4607	0.4625	0.4646	0.4669	0.4695	0.4723	0.4754	0.4786	0.4821	0.4858	0.4897	0.4938
240	0.4629	0.4648	0.4669	0.4693	0.4719	0.4747	0.4778	0.4811	0.4846	0.4884	0.4923	0.4964
250	0.4652	0.4672	0.4693	0.4718	0.4744	0.4773	0.4804	0.4838	0.4873	0.4911	0.4950	0.4992
260	0.4677	0.4697	0.4719	0.4744	0.4771	0.4800	0.4832	0.4866	0.4901	0.4939	0.4979	0.5021
270	0.4704	0.4724	0.4747	0.4772	0.4799	0.4829	0.4861	0.4895	0.4931	0.4969	0.5009	0.5052
280	0.4732	0.4753	0.4776	0.4801	0.4829	0.4859	0.4891	0.4926	0.4962	0.5001	0.5041	0.5084
290	0.4761	0.4782	0.4806	0.4832	0.4860	0.4890	0.4923	0.4958	0.4994	0.5033	0.5074	0.5117
300	0.4792	0.4814	0.4838	0.4864	0.4892	0.4923	0.4956	0.4991	0.5028	0.5067	0.5108	0.5151
310	0.4824	0.4846	0.4871	0.4897	0.4926	0.4957	0.4990	0.5026	0.5063	0.5102	0.5144	0.5187
320	0.4858	0.4880	0.4905	0.4932	0.4961	0.4993	0.5026	0.5062	0.5099	0.5139	0.5180	0.5224
330	0.4893	0.4916	0.4941	0.4968	0.4998	0.5029	0.5063	0.5099	0.5137	0.5176	0.5218	0.5262
340	0.4929	0.4952	0.4978	0.5006	0.5035	0.5067	0.5101	0.5137	0.5175	0.5215	0.5257	0.5301
350	0.4967	0.4990	0.5016	0.5044	0.5074	0.5106	0.5141	0.5177	0.5215	0.5255	0.5298	0.5341

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.4777	0.4812	0.4849	0.4888	0.4929
20	0.4770	0.4805	0.4843	0.4882	0.4924
30	0.4764	0.4800	0.4838	0.4878	0.4921
40	0.4760	0.4796	0.4835	0.4876	0.4919
50	0.4757	0.4794	0.4834	0.4875	0.4918
60	0.4756	0.4794	0.4834	0.4876	0.4920
70	0.4757	0.4795	0.4836	0.4878	0.4922
80	0.4759	0.4798	0.4839	0.4882	0.4927
90	0.4763	0.4802	0.4844	0.4887	0.4933
100	0.4768	0.4808	0.4850	0.4894	0.4940
110	0.4776	0.4816	0.4858	0.4903	0.4949
120	0.4784	0.4825	0.4868	0.4913	0.4959
130	0.4794	0.4836	0.4879	0.4924	0.4971
140	0.4806	0.4848	0.4892	0.4937	0.4985
150	0.4820	0.4862	0.4906	0.4952	0.5000
160	0.4834	0.4877	0.4922	0.4968	0.5016
170	0.4851	0.4894	0.4939	0.4986	0.5034
180	0.4869	0.4912	0.4958	0.5005	0.5054
190	0.4888	0.4932	0.4978	0.5025	0.5075
200	0.4909	0.4953	0.4999	0.5047	0.5097
210	0.4932	0.4976	0.5022	0.5071	0.5121
220	0.4956	0.5000	0.5047	0.5095	0.5146
230	0.4981	0.5026	0.5073	0.5122	0.5172
240	0.5008	0.5053	0.5100	0.5149	0.5200
250	0.5036	0.5081	0.5129	0.5178	0.5229
260	0.5065	0.5111	0.5159	0.5208	0.5259
270	0.5096	0.5142	0.5190	0.5240	0.5291
280	0.5128	0.5174	0.5222	0.5272	0.5324
290	0.5161	0.5208	0.5256	0.5306	0.5358
300	0.5196	0.5243	0.5291	0.5341	0.5393
310	0.5232	0.5279	0.5327	0.5378	0.5430
320	0.5269	0.5316	0.5365	0.5415	0.5468
330	0.5307	0.5354	0.5403	0.5454	0.5506
340	0.5347	0.5394	0.5443	0.5494	0.5546
350	0.5387	0.5435	0.5484	0.5535	0.5587

Annexe 24 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du MAM7 spécifique pour une période de retour de cinq ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.5353	0.5322	0.5295	0.5270	0.5248	0.5229	0.5212	0.5199	0.5188	0.5180	0.5175	0.5173	0.5174
20	0.5328	0.5298	0.5271	0.5247	0.5225	0.5207	0.5191	0.5178	0.5168	0.5161	0.5156	0.5155	0.5157
30	0.5305	0.5276	0.5249	0.5225	0.5205	0.5186	0.5171	0.5159	0.5149	0.5143	0.5139	0.5139	0.5141
40	0.5284	0.5255	0.5229	0.5206	0.5186	0.5168	0.5153	0.5142	0.5133	0.5127	0.5124	0.5124	0.5127
50	0.5264	0.5236	0.5211	0.5188	0.5168	0.5152	0.5138	0.5127	0.5118	0.5113	0.5111	0.5112	0.5115
60	0.5247	0.5219	0.5194	0.5172	0.5153	0.5137	0.5124	0.5113	0.5106	0.5101	0.5100	0.5101	0.5105
70	0.5231	0.5204	0.5180	0.5158	0.5140	0.5124	0.5112	0.5102	0.5095	0.5091	0.5090	0.5092	0.5097
80	0.5217	0.5191	0.5167	0.5146	0.5128	0.5114	0.5101	0.5092	0.5086	0.5083	0.5083	0.5085	0.5091
90	0.5205	0.5179	0.5156	0.5136	0.5119	0.5105	0.5093	0.5085	0.5079	0.5077	0.5077	0.5081	0.5087
100	0.5195	0.5170	0.5148	0.5128	0.5111	0.5098	0.5087	0.5079	0.5074	0.5073	0.5074	0.5078	0.5085
110	0.5187	0.5162	0.5141	0.5122	0.5106	0.5093	0.5083	0.5076	0.5071	0.5070	0.5072	0.5077	0.5085
120	0.5181	0.5157	0.5136	0.5117	0.5102	0.5090	0.5080	0.5074	0.5070	0.5070	0.5072	0.5078	0.5086
130	0.5176	0.5153	0.5133	0.5115	0.5100	0.5089	0.5080	0.5074	0.5071	0.5072	0.5075	0.5081	0.5090
140	0.5174	0.5151	0.5131	0.5115	0.5101	0.5090	0.5082	0.5077	0.5074	0.5075	0.5079	0.5086	0.5096
150	0.5173	0.5151	0.5132	0.5116	0.5103	0.5093	0.5085	0.5081	0.5079	0.5081	0.5085	0.5093	0.5103
160	0.5175	0.5153	0.5135	0.5120	0.5107	0.5097	0.5091	0.5087	0.5086	0.5088	0.5094	0.5102	0.5113
170	0.5178	0.5157	0.5140	0.5125	0.5113	0.5104	0.5098	0.5095	0.5095	0.5098	0.5104	0.5113	0.5124
180	0.5183	0.5163	0.5146	0.5132	0.5121	0.5113	0.5107	0.5105	0.5106	0.5109	0.5116	0.5125	0.5138
190	0.5190	0.5171	0.5155	0.5141	0.5131	0.5123	0.5119	0.5117	0.5118	0.5123	0.5130	0.5140	0.5153
200	0.5199	0.5181	0.5165	0.5153	0.5143	0.5136	0.5132	0.5131	0.5133	0.5138	0.5146	0.5156	0.5170
210	0.5210	0.5193	0.5178	0.5166	0.5157	0.5150	0.5147	0.5147	0.5149	0.5155	0.5163	0.5175	0.5189
220	0.5223	0.5206	0.5192	0.5181	0.5172	0.5167	0.5164	0.5165	0.5168	0.5174	0.5183	0.5195	0.5210
230	0.5238	0.5222	0.5208	0.5198	0.5190	0.5185	0.5183	0.5184	0.5188	0.5195	0.5205	0.5217	0.5233
240	0.5255	0.5239	0.5226	0.5216	0.5209	0.5205	0.5204	0.5206	0.5210	0.5218	0.5228	0.5241	0.5257
250	0.5273	0.5258	0.5246	0.5237	0.5230	0.5227	0.5226	0.5229	0.5234	0.5242	0.5253	0.5267	0.5283
260	0.5293	0.5279	0.5268	0.5259	0.5253	0.5251	0.5251	0.5254	0.5260	0.5268	0.5280	0.5294	0.5311
270	0.5315	0.5302	0.5291	0.5283	0.5278	0.5276	0.5277	0.5281	0.5287	0.5296	0.5308	0.5323	0.5341
280	0.5339	0.5326	0.5316	0.5309	0.5305	0.5303	0.5305	0.5309	0.5316	0.5326	0.5339	0.5354	0.5373
290	0.5365	0.5353	0.5343	0.5337	0.5333	0.5332	0.5334	0.5339	0.5347	0.5357	0.5371	0.5387	0.5406
300	0.5392	0.5381	0.5372	0.5366	0.5363	0.5363	0.5366	0.5371	0.5379	0.5391	0.5404	0.5421	0.5440
310	0.5421	0.5410	0.5402	0.5397	0.5395	0.5395	0.5399	0.5405	0.5414	0.5425	0.5440	0.5457	0.5477
320	0.5452	0.5442	0.5434	0.5430	0.5428	0.5429	0.5433	0.5440	0.5449	0.5462	0.5477	0.5494	0.5515
330	0.5484	0.5475	0.5468	0.5464	0.5463	0.5465	0.5470	0.5477	0.5487	0.5500	0.5515	0.5533	0.5554
340	0.5518	0.5509	0.5503	0.5500	0.5500	0.5502	0.5507	0.5515	0.5526	0.5539	0.5555	0.5574	0.5595
350	0.5553	0.5545	0.5540	0.5538	0.5538	0.5541	0.5547	0.5555	0.5566	0.5580	0.5596	0.5615	0.5637

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.5178	0.5185	0.5195	0.5207	0.5223	0.5241	0.5262	0.5286	0.5313	0.5342	0.5374	0.5408
20	0.5161	0.5169	0.5179	0.5192	0.5209	0.5228	0.5249	0.5274	0.5301	0.5331	0.5364	0.5399
30	0.5146	0.5154	0.5165	0.5179	0.5196	0.5216	0.5239	0.5264	0.5292	0.5323	0.5356	0.5392
40	0.5133	0.5142	0.5154	0.5168	0.5186	0.5206	0.5230	0.5256	0.5284	0.5316	0.5350	0.5386
50	0.5122	0.5131	0.5144	0.5159	0.5178	0.5199	0.5223	0.5249	0.5279	0.5311	0.5346	0.5383
60	0.5113	0.5123	0.5136	0.5152	0.5171	0.5193	0.5217	0.5245	0.5275	0.5308	0.5343	0.5381
70	0.5105	0.5116	0.5130	0.5147	0.5166	0.5189	0.5214	0.5242	0.5273	0.5306	0.5343	0.5381
80	0.5100	0.5111	0.5126	0.5143	0.5164	0.5187	0.5213	0.5242	0.5273	0.5307	0.5344	0.5383
90	0.5096	0.5109	0.5124	0.5142	0.5163	0.5187	0.5214	0.5243	0.5275	0.5310	0.5347	0.5387
100	0.5095	0.5108	0.5124	0.5143	0.5164	0.5189	0.5216	0.5246	0.5279	0.5314	0.5352	0.5393
110	0.5095	0.5109	0.5126	0.5145	0.5167	0.5193	0.5220	0.5251	0.5284	0.5320	0.5359	0.5400
120	0.5098	0.5112	0.5129	0.5149	0.5172	0.5198	0.5227	0.5258	0.5292	0.5328	0.5368	0.5409
130	0.5102	0.5117	0.5135	0.5156	0.5179	0.5206	0.5235	0.5267	0.5301	0.5338	0.5378	0.5420
140	0.5108	0.5124	0.5143	0.5164	0.5188	0.5215	0.5245	0.5278	0.5313	0.5350	0.5391	0.5433
150	0.5117	0.5133	0.5152	0.5174	0.5199	0.5227	0.5257	0.5290	0.5326	0.5364	0.5405	0.5448
160	0.5127	0.5144	0.5164	0.5186	0.5212	0.5240	0.5271	0.5304	0.5341	0.5379	0.5421	0.5465
170	0.5139	0.5157	0.5177	0.5200	0.5226	0.5255	0.5287	0.5321	0.5357	0.5397	0.5439	0.5483
180	0.5153	0.5171	0.5192	0.5216	0.5243	0.5272	0.5304	0.5339	0.5376	0.5416	0.5458	0.5503
190	0.5169	0.5188	0.5209	0.5234	0.5261	0.5291	0.5323	0.5359	0.5396	0.5437	0.5479	0.5525
200	0.5187	0.5206	0.5228	0.5253	0.5281	0.5311	0.5345	0.5380	0.5419	0.5459	0.5502	0.5548
210	0.5206	0.5226	0.5249	0.5275	0.5303	0.5334	0.5367	0.5404	0.5442	0.5484	0.5527	0.5573
220	0.5228	0.5248	0.5272	0.5298	0.5327	0.5358	0.5392	0.5429	0.5468	0.5510	0.5554	0.5600
230	0.5251	0.5272	0.5296	0.5323	0.5352	0.5384	0.5418	0.5456	0.5495	0.5537	0.5582	0.5629
240	0.5276	0.5298	0.5322	0.5349	0.5379	0.5412	0.5447	0.5484	0.5524	0.5567	0.5611	0.5659
250	0.5303	0.5325	0.5350	0.5378	0.5408	0.5441	0.5476	0.5514	0.5555	0.5598	0.5643	0.5690
260	0.5331	0.5354	0.5380	0.5408	0.5438	0.5472	0.5508	0.5546	0.5587	0.5630	0.5676	0.5724
270	0.5362	0.5385	0.5411	0.5439	0.5471	0.5504	0.5541	0.5580	0.5621	0.5664	0.5710	0.5758
280	0.5394	0.5417	0.5444	0.5473	0.5504	0.5539	0.5575	0.5615	0.5656	0.5700	0.5746	0.5795
290	0.5427	0.5451	0.5478	0.5508	0.5540	0.5574	0.5612	0.5651	0.5693	0.5737	0.5784	0.5832
300	0.5462	0.5487	0.5514	0.5544	0.5577	0.5612	0.5649	0.5689	0.5731	0.5776	0.5823	0.5872
310	0.5499	0.5524	0.5552	0.5582	0.5615	0.5651	0.5688	0.5729	0.5771	0.5816	0.5863	0.5912
320	0.5537	0.5563	0.5591	0.5622	0.5655	0.5691	0.5729	0.5770	0.5812	0.5858	0.5905	0.5954
330	0.5577	0.5603	0.5632	0.5663	0.5697	0.5733	0.5771	0.5812	0.5855	0.5901	0.5948	0.5998
340	0.5619	0.5645	0.5674	0.5706	0.5740	0.5776	0.5815	0.5856	0.5899	0.5945	0.5993	0.6043
350	0.5662	0.5688	0.5718	0.5750	0.5784	0.5821	0.5860	0.5901	0.5945	0.5991	0.6039	0.6089

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.5446	0.5485	0.5527	0.5572	0.5619
20	0.5437	0.5477	0.5520	0.5565	0.5613
30	0.5430	0.5472	0.5515	0.5561	0.5609
40	0.5426	0.5467	0.5511	0.5558	0.5607
50	0.5423	0.5465	0.5510	0.5557	0.5606
60	0.5422	0.5465	0.5510	0.5558	0.5608
70	0.5422	0.5466	0.5512	0.5560	0.5611
80	0.5425	0.5469	0.5516	0.5565	0.5616
90	0.5429	0.5474	0.5521	0.5571	0.5622
100	0.5435	0.5481	0.5529	0.5579	0.5631
110	0.5444	0.5489	0.5538	0.5588	0.5641
120	0.5453	0.5500	0.5549	0.5600	0.5653
130	0.5465	0.5512	0.5561	0.5613	0.5667
140	0.5478	0.5526	0.5576	0.5628	0.5682
150	0.5494	0.5542	0.5592	0.5645	0.5699
160	0.5511	0.5559	0.5610	0.5663	0.5718
170	0.5529	0.5578	0.5630	0.5683	0.5739
180	0.5550	0.5599	0.5651	0.5705	0.5761
190	0.5572	0.5622	0.5674	0.5728	0.5784
200	0.5596	0.5646	0.5699	0.5753	0.5810
210	0.5622	0.5672	0.5725	0.5780	0.5837
220	0.5649	0.5700	0.5753	0.5808	0.5865
230	0.5678	0.5729	0.5782	0.5838	0.5896
240	0.5708	0.5760	0.5813	0.5869	0.5927
250	0.5740	0.5792	0.5846	0.5902	0.5960
260	0.5774	0.5826	0.5880	0.5937	0.5995
270	0.5809	0.5861	0.5916	0.5972	0.6031
280	0.5845	0.5898	0.5953	0.6010	0.6069
290	0.5883	0.5936	0.5991	0.6048	0.6107
300	0.5923	0.5976	0.6031	0.6089	0.6148
310	0.5964	0.6017	0.6073	0.6130	0.6189
320	0.6006	0.6060	0.6115	0.6173	0.6232
330	0.6050	0.6103	0.6159	0.6217	0.6277
340	0.6095	0.6148	0.6204	0.6262	0.6322
350	0.6141	0.6195	0.6251	0.6309	0.6369

Annexe 25 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du MAM7 spécifique pour une période de retour de dix ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.5890	0.5857	0.5827	0.5799	0.5775	0.5754	0.5736	0.5721	0.5709	0.5700	0.5695	0.5693	0.5694
20	0.5863	0.5830	0.5801	0.5774	0.5750	0.5730	0.5712	0.5698	0.5687	0.5679	0.5674	0.5673	0.5675
30	0.5838	0.5806	0.5776	0.5750	0.5727	0.5707	0.5691	0.5677	0.5667	0.5659	0.5656	0.5655	0.5657
40	0.5814	0.5783	0.5754	0.5729	0.5706	0.5687	0.5671	0.5658	0.5648	0.5642	0.5639	0.5639	0.5642
50	0.5793	0.5762	0.5734	0.5709	0.5688	0.5669	0.5654	0.5641	0.5632	0.5627	0.5624	0.5625	0.5629
60	0.5774	0.5743	0.5716	0.5692	0.5671	0.5653	0.5638	0.5627	0.5619	0.5614	0.5612	0.5613	0.5618
70	0.5756	0.5727	0.5700	0.5677	0.5656	0.5639	0.5625	0.5614	0.5607	0.5602	0.5601	0.5604	0.5609
80	0.5741	0.5712	0.5686	0.5663	0.5644	0.5627	0.5614	0.5604	0.5597	0.5593	0.5593	0.5596	0.5603
90	0.5728	0.5700	0.5674	0.5652	0.5633	0.5617	0.5605	0.5596	0.5589	0.5587	0.5587	0.5591	0.5598
100	0.5717	0.5689	0.5665	0.5643	0.5625	0.5610	0.5598	0.5589	0.5584	0.5582	0.5583	0.5588	0.5596
110	0.5708	0.5681	0.5657	0.5636	0.5619	0.5604	0.5593	0.5585	0.5581	0.5580	0.5582	0.5587	0.5595
120	0.5701	0.5675	0.5651	0.5631	0.5615	0.5601	0.5591	0.5584	0.5580	0.5579	0.5582	0.5588	0.5597
130	0.5696	0.5671	0.5648	0.5629	0.5613	0.5600	0.5590	0.5584	0.5581	0.5581	0.5585	0.5591	0.5601
140	0.5693	0.5669	0.5647	0.5628	0.5613	0.5601	0.5592	0.5586	0.5584	0.5585	0.5589	0.5597	0.5608
150	0.5693	0.5669	0.5648	0.5630	0.5615	0.5604	0.5596	0.5591	0.5589	0.5591	0.5596	0.5604	0.5616
160	0.5694	0.5671	0.5651	0.5634	0.5620	0.5609	0.5602	0.5598	0.5597	0.5600	0.5605	0.5614	0.5626
170	0.5698	0.5675	0.5656	0.5640	0.5627	0.5617	0.5610	0.5607	0.5607	0.5610	0.5616	0.5626	0.5639
180	0.5704	0.5682	0.5663	0.5648	0.5635	0.5626	0.5620	0.5618	0.5619	0.5623	0.5630	0.5640	0.5654
190	0.5712	0.5691	0.5673	0.5658	0.5646	0.5638	0.5633	0.5631	0.5633	0.5637	0.5645	0.5656	0.5671
200	0.5722	0.5701	0.5684	0.5670	0.5659	0.5652	0.5648	0.5646	0.5649	0.5654	0.5663	0.5674	0.5689
210	0.5734	0.5714	0.5698	0.5685	0.5675	0.5668	0.5664	0.5664	0.5667	0.5673	0.5682	0.5695	0.5710
220	0.5748	0.5729	0.5714	0.5701	0.5692	0.5686	0.5683	0.5683	0.5687	0.5694	0.5704	0.5717	0.5733
230	0.5764	0.5746	0.5731	0.5720	0.5711	0.5706	0.5704	0.5705	0.5709	0.5717	0.5727	0.5741	0.5758
240	0.5782	0.5765	0.5751	0.5740	0.5732	0.5728	0.5727	0.5728	0.5733	0.5742	0.5753	0.5768	0.5785
250	0.5803	0.5786	0.5773	0.5763	0.5756	0.5752	0.5751	0.5754	0.5760	0.5769	0.5781	0.5796	0.5814
260	0.5825	0.5809	0.5797	0.5787	0.5781	0.5778	0.5778	0.5781	0.5788	0.5797	0.5810	0.5826	0.5845
270	0.5849	0.5834	0.5823	0.5814	0.5808	0.5806	0.5807	0.5811	0.5818	0.5828	0.5842	0.5858	0.5878
280	0.5875	0.5861	0.5850	0.5842	0.5838	0.5836	0.5838	0.5842	0.5850	0.5861	0.5875	0.5892	0.5912
290	0.5904	0.5890	0.5880	0.5873	0.5869	0.5868	0.5870	0.5876	0.5884	0.5896	0.5910	0.5928	0.5949
300	0.5934	0.5921	0.5912	0.5905	0.5902	0.5902	0.5905	0.5911	0.5920	0.5932	0.5947	0.5966	0.5987
310	0.5965	0.5954	0.5945	0.5939	0.5937	0.5937	0.5941	0.5948	0.5957	0.5970	0.5986	0.6005	0.6027
320	0.5999	0.5988	0.5980	0.5975	0.5974	0.5975	0.5979	0.5986	0.5997	0.6010	0.6027	0.6046	0.6068
330	0.6035	0.6025	0.6017	0.6013	0.6012	0.6014	0.6019	0.6027	0.6038	0.6052	0.6069	0.6089	0.6112
340	0.6072	0.6063	0.6056	0.6053	0.6052	0.6055	0.6060	0.6069	0.6081	0.6095	0.6113	0.6133	0.6157
350	0.6111	0.6102	0.6097	0.6094	0.6094	0.6097	0.6104	0.6113	0.6125	0.6140	0.6158	0.6180	0.6203

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.5698	0.5706	0.5716	0.5730	0.5747	0.5767	0.5791	0.5817	0.5846	0.5878	0.5914	0.5952
20	0.5680	0.5688	0.5699	0.5714	0.5732	0.5753	0.5777	0.5804	0.5834	0.5867	0.5903	0.5942
30	0.5663	0.5672	0.5684	0.5700	0.5718	0.5740	0.5765	0.5793	0.5823	0.5857	0.5894	0.5934
40	0.5649	0.5658	0.5671	0.5688	0.5707	0.5729	0.5755	0.5784	0.5815	0.5850	0.5887	0.5928
50	0.5636	0.5647	0.5661	0.5678	0.5698	0.5721	0.5747	0.5777	0.5809	0.5844	0.5882	0.5924
60	0.5626	0.5637	0.5652	0.5670	0.5690	0.5714	0.5742	0.5772	0.5805	0.5841	0.5880	0.5922
70	0.5618	0.5630	0.5645	0.5664	0.5685	0.5710	0.5738	0.5769	0.5803	0.5839	0.5879	0.5922
80	0.5612	0.5625	0.5641	0.5660	0.5682	0.5708	0.5737	0.5768	0.5803	0.5840	0.5881	0.5924
90	0.5608	0.5622	0.5639	0.5659	0.5682	0.5708	0.5737	0.5769	0.5805	0.5843	0.5884	0.5928
100	0.5607	0.5621	0.5638	0.5659	0.5683	0.5710	0.5740	0.5773	0.5809	0.5848	0.5890	0.5934
110	0.5607	0.5622	0.5640	0.5662	0.5686	0.5714	0.5745	0.5779	0.5815	0.5855	0.5897	0.5942
120	0.5610	0.5626	0.5645	0.5667	0.5692	0.5720	0.5752	0.5786	0.5823	0.5864	0.5907	0.5953
130	0.5615	0.5631	0.5651	0.5674	0.5700	0.5729	0.5761	0.5796	0.5834	0.5875	0.5918	0.5965
140	0.5622	0.5639	0.5659	0.5683	0.5709	0.5739	0.5772	0.5808	0.5846	0.5888	0.5932	0.5979
150	0.5631	0.5649	0.5670	0.5694	0.5721	0.5752	0.5785	0.5821	0.5861	0.5903	0.5948	0.5995
160	0.5642	0.5660	0.5682	0.5707	0.5735	0.5766	0.5800	0.5837	0.5877	0.5920	0.5965	0.6013
170	0.5655	0.5674	0.5697	0.5723	0.5751	0.5783	0.5818	0.5855	0.5896	0.5939	0.5985	0.6034
180	0.5671	0.5691	0.5714	0.5740	0.5769	0.5802	0.5837	0.5875	0.5916	0.5960	0.6006	0.6056
190	0.5688	0.5709	0.5733	0.5759	0.5789	0.5822	0.5858	0.5897	0.5938	0.5983	0.6030	0.6080
200	0.5708	0.5729	0.5753	0.5781	0.5811	0.5845	0.5881	0.5921	0.5963	0.6008	0.6055	0.6105
210	0.5729	0.5751	0.5776	0.5804	0.5835	0.5870	0.5907	0.5946	0.5989	0.6034	0.6082	0.6133
220	0.5753	0.5775	0.5801	0.5830	0.5862	0.5896	0.5934	0.5974	0.6017	0.6063	0.6111	0.6163
230	0.5778	0.5802	0.5828	0.5857	0.5889	0.5925	0.5963	0.6004	0.6047	0.6093	0.6142	0.6194
240	0.5806	0.5830	0.5857	0.5887	0.5919	0.5955	0.5994	0.6035	0.6079	0.6126	0.6175	0.6227
250	0.5835	0.5860	0.5887	0.5918	0.5951	0.5987	0.6026	0.6068	0.6113	0.6160	0.6210	0.6262
260	0.5867	0.5892	0.5920	0.5951	0.5985	0.6021	0.6061	0.6103	0.6148	0.6196	0.6246	0.6298
270	0.5900	0.5926	0.5954	0.5986	0.6020	0.6057	0.6097	0.6140	0.6185	0.6233	0.6284	0.6337
280	0.5935	0.5961	0.5991	0.6023	0.6057	0.6095	0.6135	0.6178	0.6224	0.6273	0.6323	0.6377
290	0.5972	0.5999	0.6029	0.6061	0.6096	0.6134	0.6175	0.6219	0.6265	0.6313	0.6365	0.6418
300	0.6011	0.6038	0.6068	0.6101	0.6137	0.6175	0.6217	0.6261	0.6307	0.6356	0.6407	0.6461
310	0.6052	0.6079	0.6110	0.6143	0.6179	0.6218	0.6260	0.6304	0.6351	0.6400	0.6452	0.6506
320	0.6094	0.6122	0.6153	0.6187	0.6223	0.6263	0.6305	0.6349	0.6396	0.6446	0.6498	0.6552
330	0.6138	0.6166	0.6198	0.6232	0.6269	0.6309	0.6351	0.6396	0.6443	0.6493	0.6546	0.6600
340	0.6183	0.6212	0.6244	0.6279	0.6316	0.6356	0.6399	0.6444	0.6492	0.6542	0.6595	0.6649
350	0.6230	0.6260	0.6292	0.6327	0.6365	0.6405	0.6448	0.6494	0.6542	0.6592	0.6645	0.6700

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.5993	0.6036	0.6082	0.6131	0.6183
20	0.5983	0.6028	0.6075	0.6124	0.6177
30	0.5976	0.6021	0.6069	0.6119	0.6172
40	0.5971	0.6017	0.6065	0.6116	0.6170
50	0.5967	0.6014	0.6063	0.6115	0.6169
60	0.5966	0.6013	0.6063	0.6116	0.6171
70	0.5967	0.6015	0.6066	0.6119	0.6174
80	0.5970	0.6018	0.6070	0.6124	0.6180
90	0.5975	0.6024	0.6076	0.6130	0.6187
100	0.5981	0.6031	0.6084	0.6139	0.6197
110	0.5990	0.6041	0.6094	0.6150	0.6208
120	0.6001	0.6052	0.6106	0.6162	0.6221
130	0.6014	0.6066	0.6120	0.6177	0.6236
140	0.6029	0.6081	0.6136	0.6193	0.6253
150	0.6046	0.6098	0.6154	0.6212	0.6272
160	0.6064	0.6118	0.6173	0.6232	0.6292
170	0.6085	0.6139	0.6195	0.6254	0.6315
180	0.6107	0.6162	0.6219	0.6278	0.6339
190	0.6132	0.6187	0.6244	0.6304	0.6365
200	0.6158	0.6213	0.6271	0.6331	0.6393
210	0.6186	0.6242	0.6300	0.6360	0.6423
220	0.6216	0.6272	0.6331	0.6391	0.6455
230	0.6248	0.6304	0.6363	0.6424	0.6488
240	0.6281	0.6338	0.6397	0.6459	0.6523
250	0.6317	0.6374	0.6433	0.6495	0.6559
260	0.6354	0.6411	0.6471	0.6533	0.6597
270	0.6392	0.6450	0.6510	0.6572	0.6637
280	0.6432	0.6490	0.6551	0.6613	0.6678
290	0.6474	0.6533	0.6593	0.6656	0.6721
300	0.6518	0.6576	0.6637	0.6700	0.6765
310	0.6563	0.6621	0.6683	0.6746	0.6811
320	0.6609	0.6668	0.6729	0.6793	0.6858
330	0.6657	0.6716	0.6778	0.6841	0.6907
340	0.6707	0.6766	0.6828	0.6891	0.6957
350	0.6758	0.6817	0.6879	0.6943	0.7009

Annexe 26 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du MAM7 spécifique pour une période de retour de vingt ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.6523	0.6486	0.6453	0.6422	0.6396	0.6372	0.6352	0.6336	0.6323	0.6313	0.6307	0.6305	0.6306
20	0.6493	0.6457	0.6424	0.6394	0.6368	0.6345	0.6326	0.6310	0.6298	0.6289	0.6284	0.6282	0.6284
30	0.6465	0.6429	0.6397	0.6368	0.6343	0.6321	0.6302	0.6287	0.6276	0.6268	0.6263	0.6262	0.6265
40	0.6439	0.6404	0.6373	0.6344	0.6320	0.6298	0.6280	0.6266	0.6255	0.6248	0.6245	0.6245	0.6248
50	0.6415	0.6381	0.6350	0.6323	0.6299	0.6278	0.6261	0.6248	0.6238	0.6231	0.6229	0.6229	0.6234
60	0.6394	0.6361	0.6330	0.6304	0.6280	0.6260	0.6244	0.6231	0.6222	0.6217	0.6215	0.6217	0.6222
70	0.6375	0.6342	0.6313	0.6287	0.6264	0.6245	0.6229	0.6218	0.6209	0.6204	0.6203	0.6206	0.6212
80	0.6358	0.6326	0.6297	0.6272	0.6250	0.6232	0.6217	0.6206	0.6198	0.6195	0.6194	0.6198	0.6205
90	0.6343	0.6312	0.6284	0.6260	0.6238	0.6221	0.6207	0.6197	0.6190	0.6187	0.6188	0.6192	0.6200
100	0.6331	0.6300	0.6273	0.6250	0.6229	0.6213	0.6200	0.6190	0.6184	0.6182	0.6183	0.6188	0.6197
110	0.6321	0.6291	0.6265	0.6242	0.6222	0.6207	0.6194	0.6186	0.6181	0.6179	0.6181	0.6187	0.6197
120	0.6313	0.6284	0.6259	0.6237	0.6218	0.6203	0.6191	0.6184	0.6179	0.6179	0.6182	0.6188	0.6199
130	0.6308	0.6280	0.6255	0.6234	0.6216	0.6202	0.6191	0.6184	0.6181	0.6181	0.6185	0.6192	0.6203
140	0.6305	0.6278	0.6254	0.6233	0.6216	0.6203	0.6193	0.6187	0.6184	0.6185	0.6190	0.6198	0.6210
150	0.6305	0.6278	0.6255	0.6235	0.6219	0.6206	0.6197	0.6192	0.6190	0.6192	0.6198	0.6207	0.6219
160	0.6306	0.6280	0.6258	0.6239	0.6224	0.6212	0.6204	0.6199	0.6198	0.6201	0.6208	0.6217	0.6231
170	0.6310	0.6285	0.6264	0.6246	0.6231	0.6220	0.6213	0.6209	0.6209	0.6213	0.6220	0.6231	0.6245
180	0.6317	0.6293	0.6272	0.6255	0.6241	0.6231	0.6224	0.6222	0.6222	0.6227	0.6235	0.6246	0.6261
190	0.6325	0.6302	0.6282	0.6266	0.6253	0.6244	0.6238	0.6236	0.6238	0.6243	0.6252	0.6264	0.6280
200	0.6337	0.6314	0.6295	0.6280	0.6268	0.6259	0.6254	0.6253	0.6256	0.6262	0.6271	0.6284	0.6301
210	0.6350	0.6328	0.6310	0.6295	0.6284	0.6277	0.6273	0.6272	0.6276	0.6282	0.6293	0.6307	0.6324
220	0.6366	0.6345	0.6328	0.6314	0.6303	0.6297	0.6294	0.6294	0.6298	0.6306	0.6317	0.6331	0.6349
230	0.6384	0.6364	0.6347	0.6334	0.6325	0.6319	0.6317	0.6318	0.6323	0.6331	0.6343	0.6358	0.6377
240	0.6404	0.6385	0.6369	0.6357	0.6348	0.6343	0.6342	0.6344	0.6349	0.6359	0.6371	0.6387	0.6407
250	0.6426	0.6408	0.6393	0.6382	0.6374	0.6370	0.6369	0.6372	0.6379	0.6388	0.6402	0.6419	0.6439
260	0.6451	0.6434	0.6420	0.6409	0.6402	0.6399	0.6399	0.6403	0.6410	0.6420	0.6435	0.6452	0.6473
270	0.6478	0.6461	0.6448	0.6439	0.6433	0.6430	0.6431	0.6435	0.6443	0.6455	0.6469	0.6488	0.6509
280	0.6507	0.6491	0.6479	0.6470	0.6465	0.6463	0.6465	0.6470	0.6479	0.6491	0.6506	0.6525	0.6548
290	0.6538	0.6523	0.6512	0.6504	0.6500	0.6499	0.6501	0.6507	0.6516	0.6529	0.6545	0.6565	0.6588
300	0.6571	0.6557	0.6547	0.6540	0.6536	0.6536	0.6539	0.6546	0.6556	0.6569	0.6586	0.6607	0.6630
310	0.6607	0.6593	0.6584	0.6578	0.6575	0.6575	0.6579	0.6587	0.6598	0.6612	0.6629	0.6650	0.6674
320	0.6644	0.6632	0.6623	0.6617	0.6615	0.6617	0.6622	0.6630	0.6641	0.6656	0.6674	0.6696	0.6720
330	0.6683	0.6672	0.6664	0.6659	0.6658	0.6660	0.6666	0.6675	0.6687	0.6702	0.6721	0.6743	0.6769
340	0.6725	0.6714	0.6707	0.6703	0.6703	0.6705	0.6712	0.6721	0.6734	0.6750	0.6770	0.6792	0.6818
350	0.6768	0.6758	0.6752	0.6749	0.6749	0.6753	0.6760	0.6770	0.6783	0.6800	0.6820	0.6844	0.6870

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.6311	0.6319	0.6331	0.6346	0.6365	0.6387	0.6413	0.6442	0.6474	0.6510	0.6549	0.6591
20	0.6290	0.6299	0.6312	0.6328	0.6348	0.6371	0.6397	0.6427	0.6461	0.6497	0.6537	0.6580
30	0.6272	0.6282	0.6295	0.6312	0.6333	0.6357	0.6384	0.6415	0.6449	0.6487	0.6527	0.6571
40	0.6256	0.6266	0.6281	0.6299	0.6320	0.6345	0.6373	0.6405	0.6440	0.6478	0.6520	0.6564
50	0.6242	0.6254	0.6269	0.6288	0.6310	0.6336	0.6365	0.6397	0.6433	0.6472	0.6515	0.6560
60	0.6231	0.6243	0.6259	0.6279	0.6302	0.6329	0.6358	0.6392	0.6429	0.6468	0.6512	0.6558
70	0.6222	0.6235	0.6252	0.6272	0.6296	0.6324	0.6355	0.6389	0.6426	0.6467	0.6511	0.6558
80	0.6215	0.6229	0.6247	0.6268	0.6293	0.6321	0.6353	0.6388	0.6426	0.6468	0.6513	0.6560
90	0.6211	0.6226	0.6245	0.6267	0.6292	0.6321	0.6354	0.6389	0.6429	0.6471	0.6516	0.6565
100	0.6209	0.6225	0.6244	0.6267	0.6294	0.6324	0.6357	0.6393	0.6433	0.6476	0.6522	0.6572
110	0.6210	0.6226	0.6247	0.6270	0.6297	0.6328	0.6362	0.6399	0.6440	0.6484	0.6531	0.6581
120	0.6213	0.6230	0.6251	0.6276	0.6304	0.6335	0.6370	0.6408	0.6449	0.6494	0.6541	0.6592
130	0.6218	0.6236	0.6258	0.6283	0.6312	0.6344	0.6380	0.6419	0.6461	0.6506	0.6554	0.6606
140	0.6226	0.6245	0.6267	0.6293	0.6323	0.6356	0.6392	0.6432	0.6474	0.6520	0.6569	0.6622
150	0.6236	0.6256	0.6279	0.6306	0.6336	0.6370	0.6407	0.6447	0.6490	0.6537	0.6587	0.6639
160	0.6248	0.6269	0.6293	0.6320	0.6351	0.6386	0.6424	0.6465	0.6509	0.6556	0.6606	0.6660
170	0.6263	0.6284	0.6309	0.6337	0.6369	0.6404	0.6443	0.6484	0.6529	0.6577	0.6628	0.6682
180	0.6280	0.6302	0.6328	0.6357	0.6389	0.6425	0.6464	0.6506	0.6552	0.6600	0.6652	0.6706
190	0.6299	0.6322	0.6349	0.6378	0.6411	0.6448	0.6488	0.6531	0.6577	0.6626	0.6678	0.6733
200	0.6321	0.6345	0.6372	0.6402	0.6436	0.6473	0.6513	0.6557	0.6604	0.6653	0.6706	0.6761
210	0.6345	0.6369	0.6397	0.6428	0.6463	0.6500	0.6541	0.6585	0.6633	0.6683	0.6736	0.6792
220	0.6371	0.6396	0.6425	0.6456	0.6491	0.6530	0.6571	0.6616	0.6664	0.6715	0.6768	0.6825
230	0.6399	0.6425	0.6454	0.6487	0.6522	0.6561	0.6603	0.6649	0.6697	0.6748	0.6802	0.6859
240	0.6430	0.6456	0.6486	0.6519	0.6555	0.6595	0.6638	0.6683	0.6732	0.6784	0.6839	0.6896
250	0.6463	0.6490	0.6520	0.6554	0.6591	0.6631	0.6674	0.6720	0.6770	0.6822	0.6877	0.6935
260	0.6497	0.6525	0.6556	0.6590	0.6628	0.6668	0.6712	0.6759	0.6809	0.6861	0.6917	0.6975
270	0.6534	0.6563	0.6594	0.6629	0.6667	0.6708	0.6752	0.6800	0.6850	0.6903	0.6959	0.7018
280	0.6573	0.6602	0.6634	0.6670	0.6708	0.6750	0.6795	0.6842	0.6893	0.6947	0.7003	0.7062
290	0.6614	0.6644	0.6676	0.6712	0.6751	0.6794	0.6839	0.6887	0.6938	0.6992	0.7049	0.7108
300	0.6657	0.6687	0.6720	0.6757	0.6796	0.6839	0.6885	0.6933	0.6985	0.7039	0.7096	0.7156
310	0.6702	0.6732	0.6766	0.6803	0.6843	0.6886	0.6933	0.6981	0.7033	0.7088	0.7145	0.7205
320	0.6749	0.6780	0.6814	0.6852	0.6892	0.6936	0.6982	0.7031	0.7084	0.7139	0.7196	0.7257
330	0.6797	0.6829	0.6864	0.6902	0.6943	0.6987	0.7033	0.7083	0.7136	0.7191	0.7249	0.7309
340	0.6847	0.6880	0.6915	0.6953	0.6995	0.7039	0.7086	0.7137	0.7189	0.7245	0.7303	0.7364
350	0.6900	0.6932	0.6968	0.7007	0.7049	0.7094	0.7141	0.7192	0.7245	0.7301	0.7359	0.7420

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.6636	0.6685	0.6736	0.6790	0.6847
20	0.6626	0.6675	0.6727	0.6783	0.6840
30	0.6618	0.6668	0.6721	0.6777	0.6836
40	0.6612	0.6663	0.6717	0.6773	0.6833
50	0.6609	0.6660	0.6715	0.6772	0.6832
60	0.6607	0.6660	0.6715	0.6773	0.6834
70	0.6608	0.6661	0.6717	0.6776	0.6838
80	0.6611	0.6665	0.6722	0.6782	0.6844
90	0.6617	0.6671	0.6729	0.6789	0.6852
100	0.6624	0.6679	0.6738	0.6799	0.6862
110	0.6634	0.6690	0.6749	0.6810	0.6875
120	0.6646	0.6703	0.6762	0.6824	0.6889
130	0.6660	0.6717	0.6778	0.6841	0.6906
140	0.6677	0.6735	0.6795	0.6859	0.6925
150	0.6695	0.6754	0.6815	0.6879	0.6946
160	0.6716	0.6775	0.6837	0.6901	0.6969
170	0.6739	0.6798	0.6861	0.6926	0.6994
180	0.6764	0.6824	0.6887	0.6952	0.7021
190	0.6791	0.6851	0.6915	0.6981	0.7050
200	0.6820	0.6881	0.6945	0.7011	0.7080
210	0.6851	0.6913	0.6977	0.7044	0.7113
220	0.6884	0.6946	0.7011	0.7078	0.7148
230	0.6919	0.6982	0.7047	0.7115	0.7185
240	0.6956	0.7019	0.7085	0.7153	0.7223
250	0.6995	0.7059	0.7125	0.7193	0.7264
260	0.7036	0.7100	0.7166	0.7235	0.7306
270	0.7079	0.7143	0.7210	0.7279	0.7350
280	0.7124	0.7188	0.7255	0.7324	0.7396
290	0.7170	0.7235	0.7302	0.7371	0.7443
300	0.7218	0.7283	0.7350	0.7420	0.7492
310	0.7268	0.7333	0.7401	0.7471	0.7543
320	0.7319	0.7385	0.7453	0.7523	0.7595
330	0.7373	0.7438	0.7506	0.7577	0.7649
340	0.7427	0.7493	0.7561	0.7632	0.7705
350	0.7484	0.7550	0.7618	0.7689	0.7762

Annexe 27 : Abaque permettant la détermination du logarithme de la valeur à ajouter et à soustraire du logarithme du MAM7 spécifique pour une période de retour de cinquante ans (intervalle de confiance)

CT Perco	0.002	0.004	0.006	0.008	0.01	0.012	0.014	0.016	0.018	0.02	0.022	0.024	0.026
10	0.7812	0.7768	0.7728	0.7692	0.7660	0.7631	0.7607	0.7588	0.7572	0.7561	0.7554	0.7551	0.7552
20	0.7776	0.7733	0.7693	0.7658	0.7627	0.7599	0.7576	0.7557	0.7543	0.7532	0.7526	0.7524	0.7526
30	0.7743	0.7700	0.7661	0.7627	0.7596	0.7570	0.7548	0.7530	0.7516	0.7506	0.7501	0.7500	0.7503
40	0.7712	0.7670	0.7632	0.7598	0.7569	0.7543	0.7522	0.7505	0.7492	0.7483	0.7479	0.7479	0.7483
50	0.7683	0.7642	0.7605	0.7572	0.7544	0.7519	0.7499	0.7482	0.7470	0.7463	0.7460	0.7461	0.7466
60	0.7658	0.7618	0.7581	0.7549	0.7521	0.7498	0.7478	0.7463	0.7452	0.7445	0.7443	0.7445	0.7451
70	0.7635	0.7595	0.7560	0.7529	0.7502	0.7479	0.7461	0.7446	0.7436	0.7431	0.7429	0.7432	0.7440
80	0.7615	0.7576	0.7542	0.7511	0.7485	0.7463	0.7446	0.7432	0.7423	0.7419	0.7418	0.7422	0.7431
90	0.7597	0.7559	0.7526	0.7497	0.7471	0.7450	0.7434	0.7421	0.7413	0.7410	0.7410	0.7415	0.7425
100	0.7582	0.7546	0.7513	0.7485	0.7460	0.7440	0.7425	0.7413	0.7406	0.7404	0.7405	0.7411	0.7422
110	0.7570	0.7535	0.7503	0.7475	0.7452	0.7433	0.7418	0.7408	0.7402	0.7400	0.7403	0.7410	0.7421
120	0.7561	0.7526	0.7496	0.7469	0.7447	0.7429	0.7415	0.7406	0.7401	0.7400	0.7403	0.7411	0.7424
130	0.7555	0.7521	0.7491	0.7466	0.7444	0.7427	0.7414	0.7406	0.7402	0.7402	0.7407	0.7416	0.7429
140	0.7551	0.7518	0.7490	0.7465	0.7445	0.7429	0.7417	0.7409	0.7406	0.7408	0.7413	0.7423	0.7437
150	0.7551	0.7519	0.7491	0.7467	0.7448	0.7433	0.7422	0.7416	0.7413	0.7416	0.7422	0.7433	0.7449
160	0.7553	0.7522	0.7495	0.7472	0.7454	0.7440	0.7430	0.7425	0.7423	0.7427	0.7434	0.7446	0.7462
170	0.7557	0.7527	0.7502	0.7480	0.7463	0.7450	0.7441	0.7436	0.7436	0.7441	0.7449	0.7462	0.7479
180	0.7565	0.7536	0.7511	0.7491	0.7474	0.7462	0.7455	0.7451	0.7452	0.7457	0.7467	0.7481	0.7499
190	0.7576	0.7548	0.7524	0.7504	0.7489	0.7478	0.7471	0.7469	0.7471	0.7477	0.7487	0.7502	0.7521
200	0.7589	0.7562	0.7539	0.7521	0.7506	0.7496	0.7490	0.7489	0.7492	0.7499	0.7510	0.7526	0.7546
210	0.7605	0.7579	0.7557	0.7540	0.7526	0.7517	0.7513	0.7512	0.7516	0.7524	0.7536	0.7553	0.7574
220	0.7624	0.7599	0.7578	0.7561	0.7549	0.7541	0.7537	0.7538	0.7543	0.7552	0.7565	0.7583	0.7604
230	0.7645	0.7621	0.7602	0.7586	0.7575	0.7568	0.7565	0.7566	0.7572	0.7582	0.7596	0.7615	0.7637
240	0.7669	0.7646	0.7628	0.7613	0.7603	0.7597	0.7595	0.7598	0.7604	0.7615	0.7630	0.7650	0.7673
250	0.7696	0.7674	0.7657	0.7643	0.7634	0.7629	0.7628	0.7632	0.7639	0.7651	0.7667	0.7687	0.7711
260	0.7726	0.7705	0.7688	0.7676	0.7668	0.7664	0.7664	0.7668	0.7677	0.7689	0.7706	0.7727	0.7752
270	0.7758	0.7738	0.7723	0.7711	0.7704	0.7701	0.7702	0.7707	0.7717	0.7730	0.7748	0.7770	0.7796
280	0.7793	0.7774	0.7759	0.7749	0.7743	0.7741	0.7743	0.7749	0.7759	0.7774	0.7792	0.7815	0.7841
290	0.7830	0.7812	0.7799	0.7789	0.7784	0.7783	0.7786	0.7793	0.7804	0.7819	0.7839	0.7862	0.7890
300	0.7870	0.7853	0.7841	0.7832	0.7828	0.7828	0.7831	0.7839	0.7852	0.7868	0.7888	0.7912	0.7940
310	0.7912	0.7897	0.7885	0.7878	0.7874	0.7875	0.7880	0.7888	0.7901	0.7918	0.7939	0.7964	0.7993
320	0.7957	0.7942	0.7932	0.7925	0.7923	0.7924	0.7930	0.7940	0.7954	0.7971	0.7993	0.8019	0.8049
330	0.8004	0.7990	0.7981	0.7975	0.7974	0.7976	0.7983	0.7994	0.8008	0.8027	0.8049	0.8076	0.8106
340	0.8054	0.8041	0.8032	0.8028	0.8027	0.8031	0.8038	0.8050	0.8065	0.8084	0.8108	0.8135	0.8166
350	0.8105	0.8094	0.8086	0.8083	0.8083	0.8087	0.8095	0.8108	0.8124	0.8144	0.8168	0.8196	0.8228

CT Perco	0.028	0.03	0.032	0.034	0.036	0.038	0.04	0.042	0.044	0.046	0.048	0.05
10	0.7558	0.7568	0.7582	0.7600	0.7623	0.7649	0.7680	0.7715	0.7754	0.7797	0.7843	0.7894
20	0.7533	0.7544	0.7559	0.7579	0.7602	0.7630	0.7662	0.7698	0.7737	0.7781	0.7829	0.7880
30	0.7511	0.7523	0.7539	0.7560	0.7584	0.7613	0.7646	0.7683	0.7724	0.7769	0.7817	0.7870
40	0.7492	0.7505	0.7522	0.7544	0.7569	0.7599	0.7633	0.7671	0.7713	0.7759	0.7808	0.7862
50	0.7476	0.7490	0.7508	0.7530	0.7557	0.7588	0.7623	0.7662	0.7704	0.7751	0.7802	0.7857
60	0.7462	0.7477	0.7496	0.7520	0.7547	0.7579	0.7615	0.7655	0.7699	0.7747	0.7798	0.7854
70	0.7451	0.7467	0.7488	0.7512	0.7541	0.7573	0.7610	0.7651	0.7696	0.7745	0.7798	0.7854
80	0.7443	0.7460	0.7482	0.7507	0.7537	0.7571	0.7608	0.7650	0.7696	0.7746	0.7800	0.7857
90	0.7438	0.7456	0.7479	0.7505	0.7536	0.7570	0.7609	0.7652	0.7699	0.7750	0.7804	0.7862
100	0.7436	0.7455	0.7478	0.7506	0.7537	0.7573	0.7613	0.7657	0.7705	0.7756	0.7811	0.7871
110	0.7437	0.7457	0.7481	0.7509	0.7542	0.7579	0.7619	0.7664	0.7713	0.7765	0.7822	0.7881
120	0.7440	0.7461	0.7486	0.7516	0.7549	0.7587	0.7629	0.7674	0.7724	0.7777	0.7834	0.7895
130	0.7447	0.7469	0.7495	0.7525	0.7560	0.7598	0.7641	0.7687	0.7738	0.7792	0.7850	0.7911
140	0.7456	0.7479	0.7506	0.7537	0.7572	0.7612	0.7655	0.7703	0.7754	0.7809	0.7868	0.7930
150	0.7468	0.7492	0.7520	0.7552	0.7588	0.7629	0.7673	0.7721	0.7773	0.7829	0.7888	0.7952
160	0.7483	0.7508	0.7537	0.7570	0.7607	0.7648	0.7693	0.7742	0.7795	0.7852	0.7912	0.7976
170	0.7501	0.7526	0.7556	0.7590	0.7628	0.7670	0.7716	0.7766	0.7819	0.7877	0.7938	0.8002
180	0.7521	0.7548	0.7578	0.7613	0.7652	0.7695	0.7742	0.7792	0.7847	0.7905	0.7966	0.8032
190	0.7544	0.7572	0.7603	0.7639	0.7679	0.7722	0.7770	0.7821	0.7876	0.7935	0.7997	0.8063
200	0.7570	0.7598	0.7631	0.7667	0.7708	0.7752	0.7801	0.7853	0.7909	0.7968	0.8031	0.8098
210	0.7599	0.7628	0.7661	0.7698	0.7740	0.7785	0.7834	0.7887	0.7943	0.8004	0.8067	0.8134
220	0.7630	0.7660	0.7694	0.7732	0.7774	0.7820	0.7870	0.7923	0.7981	0.8041	0.8106	0.8174
230	0.7664	0.7695	0.7730	0.7769	0.7811	0.7858	0.7908	0.7963	0.8020	0.8082	0.8147	0.8215
240	0.7701	0.7732	0.7768	0.7807	0.7851	0.7898	0.7949	0.8004	0.8063	0.8125	0.8190	0.8259
250	0.7740	0.7772	0.7809	0.7849	0.7893	0.7941	0.7993	0.8048	0.8107	0.8170	0.8236	0.8305
260	0.7781	0.7815	0.7852	0.7893	0.7938	0.7986	0.8039	0.8095	0.8154	0.8217	0.8284	0.8354
270	0.7826	0.7859	0.7897	0.7939	0.7985	0.8034	0.8087	0.8144	0.8204	0.8267	0.8334	0.8405
280	0.7872	0.7907	0.7945	0.7988	0.8034	0.8084	0.8137	0.8195	0.8255	0.8319	0.8387	0.8458
290	0.7921	0.7957	0.7996	0.8039	0.8086	0.8136	0.8190	0.8248	0.8309	0.8374	0.8442	0.8513
300	0.7973	0.8009	0.8049	0.8092	0.8140	0.8191	0.8245	0.8303	0.8365	0.8430	0.8498	0.8570
310	0.8026	0.8063	0.8104	0.8148	0.8196	0.8247	0.8303	0.8361	0.8423	0.8489	0.8557	0.8629
320	0.8082	0.8120	0.8161	0.8206	0.8254	0.8306	0.8362	0.8421	0.8484	0.8549	0.8618	0.8691
330	0.8140	0.8178	0.8220	0.8266	0.8315	0.8367	0.8423	0.8483	0.8546	0.8612	0.8681	0.8754
340	0.8201	0.8239	0.8282	0.8328	0.8377	0.8430	0.8487	0.8547	0.8610	0.8677	0.8746	0.8819
350	0.8263	0.8302	0.8345	0.8392	0.8442	0.8495	0.8553	0.8613	0.8677	0.8743	0.8813	0.8887

CT Perco	0.052	0.054	0.056	0.058	0.06
10	0.7948	0.8006	0.8067	0.8132	0.8201
20	0.7936	0.7995	0.8057	0.8123	0.8192
30	0.7926	0.7986	0.8049	0.8116	0.8186
40	0.7919	0.7980	0.8044	0.8112	0.8183
50	0.7915	0.7976	0.8042	0.8111	0.8183
60	0.7913	0.7976	0.8042	0.8112	0.8185
70	0.7914	0.7978	0.8045	0.8115	0.8189
80	0.7918	0.7982	0.8050	0.8122	0.8196
90	0.7924	0.7990	0.8058	0.8131	0.8206
100	0.7933	0.8000	0.8069	0.8142	0.8219
110	0.7945	0.8012	0.8083	0.8156	0.8233
120	0.7959	0.8027	0.8099	0.8173	0.8251
130	0.7976	0.8045	0.8117	0.8192	0.8271
140	0.7996	0.8065	0.8138	0.8214	0.8293
150	0.8018	0.8088	0.8162	0.8238	0.8318
160	0.8043	0.8114	0.8188	0.8265	0.8346
170	0.8070	0.8142	0.8217	0.8295	0.8376
180	0.8100	0.8172	0.8248	0.8326	0.8408
190	0.8133	0.8205	0.8281	0.8360	0.8443
200	0.8168	0.8241	0.8317	0.8397	0.8480
210	0.8205	0.8279	0.8356	0.8436	0.8519
220	0.8245	0.8319	0.8397	0.8477	0.8561
230	0.8287	0.8362	0.8440	0.8521	0.8605
240	0.8331	0.8406	0.8485	0.8566	0.8651
250	0.8378	0.8454	0.8533	0.8614	0.8699
260	0.8427	0.8503	0.8582	0.8665	0.8750
270	0.8478	0.8555	0.8634	0.8717	0.8803
280	0.8531	0.8608	0.8688	0.8771	0.8857
290	0.8587	0.8664	0.8745	0.8828	0.8914
300	0.8645	0.8722	0.8803	0.8886	0.8973
310	0.8704	0.8782	0.8863	0.8947	0.9034
320	0.8766	0.8844	0.8925	0.9009	0.9096
330	0.8830	0.8908	0.8990	0.9074	0.9161
340	0.8895	0.8974	0.9056	0.9140	0.9227
350	0.8963	0.9042	0.9124	0.9208	0.9296