Université Lille1 : Sciences et Technologies

Ecole doctorale **SESAM**

UFR de géographie et aménagement

Le laboratoire **T**erritoires, **V**illes, **E**nvironnement et **S**ociété (**TVES**)

THESE

Pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Lille1 Sciences et Technologies

Aménagement et urbanisme

Présentée et soutenue publiquement

par

Estain ABESSOLO. O

Analyse fréquentielle appliquée au dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales

Thèse soutenue le 10 Décembre 2010, devant le jury composé de :

M. François BUYLE-BODIN, professeur des universités, Université Lille 1	**Président**
M. Olivier BLANPAIN, professeur des universités, Université Lille 1	**Directeur de thèse**
M. Youssef DIAB, professeur des universités, Université de Marne la Vallée	**Rapporteur**
MME. Sylvie BARRAUD, maître de conférences HDR, Université Claude Bernard, Lyon	**Rapporteur**

ABSTRACT

StormWater storage structures or alternative techniques are used in urban areas to chop the stormwater runoff thus permitting to prevent the risks of flood, and the overflows of the storage structures downstream. They cover a large variety of forms and uses, and have design methods (mainly methods resulting from the Technical Guidelines of 1977) which are not very satisfactory. Therefore, other more reliable design methods must be conceived. That is the objective pursued by this thesis.

Our challenge was to find a new tool to design, starting from the Design Storm concept. Hydrological simulation of the watersheds (outflow rate calculation of watershed) and of storage structures (storage volumes calculation) by reservoir models of storage allowed, by the means of a frequential study and on the basis of 16 years of historical rains resulting from the measuring site of Garland station in Lyon (France), to estimate storage volumes of return periods 1, 2, 5 and 10 years for 36 cases tests resulting from the construction of an experimental design. At the conclusion of these operations, we sought the Design Storm morphology adapted to our problems and retained the form simple triangle.

Then, we worked to establish a relationship between Design Storm duration, return period and the characteristics of watersheds and storage structures. This procedure succeeded to the construction of a model on which a survey of performance permitted to reduce explanatory variables number to 3. We retained this last for the quality of its results (criterion of best fit) and its practical side (few variables to be informed). It was finally tested on a practical case.

Finally, we obtain a method completely adapted to the numerical models currently used and allowing to estimate storage volume of a drainage system. It remains to check its generalization in other geographical areas.

KEYWORDS: storage structure, Drainage, frequency analysis, help user to design

Résumé

Les ouvrages de stockage des eaux pluviales ou techniques alternatives sont utilisés en milieu urbain pour écrêter les débits de ruissellement des eaux pluviales permettant ainsi de prévenir les risques d'inondation et les débordements des ouvrages en aval. Ils ont comme particularités de revêtir une grande variété de formes et d'usages et de posséder des méthodes de dimensionnement (principalement les méthodes issues de l'Instruction techniques de 1977) qui ne sont pas des plus satisfaisantes. Par conséquent d'autres méthodes de dimensionnement plus fiables doivent être conçues. Tel est l'objectif poursuivi par cette thèse.

Nous avons donc pris le parti de concevoir un nouvel outil de dimensionnement à partir du concept de pluie de projet. La simulation hydrologique des bassins versants (calcul des débits à l'exutoire des bassins versants) et des ouvrages de stockage (calcul des volumes de stockage) par des modèles de réservoir a permis, par le biais d'une étude fréquentielle et sur la base de 16 ans de pluies historiques issues de la station de mesure de Gerland à Lyon (France), d'estimer les volumes de stockage de période de retour 1, 2, 5 et 10 ans pour 36 cas tests issus de la construction d'un plan d'expérience. A l'issue de ces opérations, nous avons cherché la morphologie de pluie de projet adaptée à notre problématique et avons retenu la forme simple triangle.

Ensuite, nous avons travaillé à l'établissement d'une relation entre la durée de la pluie de projet, la période de retour et les caractéristiques des bassins versants et des ouvrages de stockage. Cette procédure a abouti à la construction d'un modèle sur lequel une étude de performance a permis de réduire le nombre de variables explicatives à 3. Nous avons retenu ce dernier pour la qualité de ses résultats (critère d'ajustement optimal) et son côté pratique (peu de variables à renseigner). Il a enfin été testé sur un cas pratique.

Au final, nous obtenons une méthode tout à fait adaptée aux outils de modélisation actuellement utilisés et permettant d'estimer le volume de stockage d'un ouvrage d'assainissement. Il reste à vérifier sa généralisation à d'autres zones géographiques.

Mots clés : Ouvrage de stockage, Assainissement, Analyse fréquentielle, Aide à la conception

Sommaire

Introduction Générale 9
Chapitre 1 : Situation actuelle des ouvrages de stockage 11
1.1) Introduction 11
1.2) Présentation des ouvrages de stockage des eaux pluviales 11
1.2.1) Les types d'ouvrages de stockage 12
1.2.1.1) Les bassins en eau 12
1.2.1.1.1) Fonctionnement et avantages 12
1.2.1.1.2) Conception 14
1.2.1.1.3) Entretien 15
1.2.1.1.4) Coûts 15
1.2.1.2) Les bassins secs 15
1.2.1.2.1) Fonctionnement et avantages 15
1.2.1.2.2) Conception 16
1.2.1.2.3) Entretien 16
1.2.1.2.4) Coûts 17
1.2.1.3) Les bassins enterrés 17
1.2.1.3.1) Fonctionnement et avantages 17
1.2.1.3.2) Conception 19
1.2.1.3.3) Entretien 19
1.2.1.3.4) Coûts 20
1.2.1.4) Les toits stockants 20
1.2.1.4.1) Fonctionnement et avantages 20
1.2.1.4.2) Conception 22
1.2.1.4.3) Entretien 22
1.2.1.4.4) Coûts 23
1.2.1.5) Les chaussées à structure réservoir 23
1.2.1.5.1) Fonctionnement et avantages 23
1.2.1.5.2) Conception 27
1.2.1.5.3) Entretien 27
1.2.1.5.4) Les coûts 28
1.2.1.6) Les puits 28
1.2.1.6.1) Fonctionnement et avantages 28
1.2.1.6.2) Conception 30
1.2.1.6.3) Entretien 31
1.2.1.6.4) Les coûts 31
1.2.1.7) Les noues 31
1.2.1.7.1) Fonctionnement et avantages 31

1.2.1.7.2) Conception 34
1.2.1.7.3) Entretien 35
1.2.1.7.4) Les coûts 35
1.2.1.8) Les tranchées 35
1.2.1.8.1) Fonctionnement et avantages 35
1.2.1.8.2) Conception 39
1.2.1.8.3) Entretien 39
1.2.1.8.4) Les coûts 40
1.2.2) Conclusion 40
1. 3) Synthèse bibliographique des méthodes de dimensionnement des ouvrages de stockage 40
1.3.1) Introduction 40
1.3.2) Méthode des pluies 41
1.3.2.1) Hypothèses de la méthode 42
1.3.2.2) Principes de la méthode 42
1.3.2.2.1) Analyse statistique des intensités ou des hauteurs 42
1.3.2.2.2) Détermination des courbes hauteurs-durée-fréquence (HDF) 43
1.3.2.2.3) Détermination de la hauteur à stocker 43
1.3.2.2.4) Limites d'application de la méthode des pluies 45
1.3.3) Méthode des Abaques 46
1.3.3.1) Hypothèses de la méthode 46
1.3.3.2) Méthode pratique de calcul 46
1.3.3.3) Limites d'application de la méthode 48
1.3.4) Méthodes dynamiques ou de simulation 48
1.3.4.1) Les séries chronologiques de pluies et leurs dérivés 50
1.3.4.2) Les pluies de projet 52
1.3.4.2.1) Définition générale 52
1.3.4.2.2) Méthode de construction de la pluie de projet 53
1.3.4.2.3) Types de pluies de projet utilisés en France 54
1. 3.5) Conclusion 59
Chapitre 2 : Méthodologie 60
2.1) Introduction 60
2.2) Les données de base utilisées 61
2.2.1) traitement appliqué dans l'approche des séries chronologiques 61
2.2.2) Traitement appliqué dans l'approche des courbes IDF 64
2.2.2.1) Conditionnement des données 65
2.2.2.2) Constitution de l'échantillon des maxima 66
2.2.2.3) Choix du modèle fréquentiel 68

2.2.2.3.1) Loi Normale 68
2.2.2.3.2) Loi Log-Normale 68
2.2.2.3.3) L'expérience et la coutume 68
2.2.2.3.4) Loi Gumbel 69
2.2.2.4) Calage des données avec la loi de Gumbel 69
2.3) Modélisation 74
2.3.1) Présentation du modèle pour les bassins versants 75
2.3.1.1) La fonction de production 75
2.3.1.2) La fonction de transfert 75
2.3.2) Présentation du modèle pour les ouvrages de stockage 77
2.4) Plan d'expériences 78
2.4.1) Principes généraux du plan d'expériences 79
2.4.1.1) Contexte et objectif 79
2.4.1.2) Les moyens permettant d'atteindre l'objectif 80
2.4.1.3) Le modèle « représentatif » 81
2.4.2) Le plan orthogonal 82
2.4.2.1) Les essais 82
2.4.2.2) Propriétés statistiques du plan orthogonal 86
2.4.2.2.1) Se prémunir contre l'inadéquation 86
2.4.2.2.2) Test de Fisher-Snedecor 87
2.4.2.2.3) Isoler chaque variable du modèle 89
2.4.2.2.4) Le test de contribution marginale avec le *t de Student*. 90
2.4.3) Analyse des résultats d'essais 90
2.4.3.1) L'estimation des coefficients 91
2.5) Conclusion 92
Chapitre 3 : Application des méthodes des pluies et des abaques au dimensionnement des ouvrages de stockage 93
3.1) Calcul des volumes de stockage avec la loi de Gumbel 93
3.1.1) Modélisation de la transformation pluie-débit 93
3.1.2) Analyse fréquentielle des volumes de stockage 94
3.1.3) Calcul des volumes de stockage 95
3.2) Calcul des volumes de stockage avec la méthode des pluies 98
3.2.1) Calcul des hauteurs de stockage 98
3.2.2 Calcul des volumes de stockage 100
3.3) Comparaisons des résultats de volumes de stockage entre les méthodes de Gumbel et des pluies. 102
3.3.1) Calcul des écarts 102
3.3.2) Analyse des écarts 104

3.3.3) Corrélation des résultats 107
3.4) Calcul des volumes de stockage avec la méthode des Abaques 109
3.5) Comparaison des résultats de volumes de stockage entre les méthodes de Gumbel et des Abaques 112
3.5.1) Calcul des écarts 112
3.5.2) Analyse des écarts 113
3.5.3) Corrélation des résultats 117
3.6) Conclusion 119
Chapitre 4 : Proposition d'un nouvel outil de dimensionnement des ouvrages de stockage . 120
4.1) Introduction 120
4.2) Choix du type de pluies de projet 120
4.2.1) simulation avec une pluie de projet rectangle 121
4.2.2) Simulation avec une pluie de projet simple triangle 125
4.3) Relation entre la durée totale de pluie et les caractéristiques du bassin versant 127
4.3.1) Introduction 127
4.3.2) Estimation des coefficients du modèle 128
4.4) Analyse des résultats d'essais 130
4.4.1) Recherche du meilleur sous-modèle 131
4.4.1.1) Analyse de la variance du modèle 131
4.4.1.2) Test de Fisher-Snedecor 132
4.4.1.3) Test du t de Student 132
4.4.2) Optimisation du sous-modèle 133
4.4.2.1) Optimisation du sous-modèle D = f (C, Qad, T) 134
4.4.2.2) Optimisation du sous-modèle D = f (C, I, Qad, T) 136
4.4.2.3) Optimisation du sous-modèle D = f (C, M, Qad, T) 139
4.4.2.4) Optimisation du sous-modèle D = f (S, C, Qad, T) 141
4.4.2.5) Choix final du modèle 143
4.5) Comparaison des résultats entre la méthode de Gumbel et la Nouvelle méthode 144
4.5.1) Calcul des écarts 144
4.5.2) Analyse des écarts 147
4.5.3) Corrélation des résultats 150
4.6) Conclusion 152
Chapitre 5 : Test de la Nouvelle Méthode sur des bassins en série et parallèles 153
5.1) Description de l'étude test 153
5.2) Calcul des volumes de stockage en utilisant la loi de Gumbel 154
5.2.1) Calcul du volume de stockage Vs_1 sur le BR1 154
5.2.2) Calcul du volume de stockage Vs_2 sur le BR2 156
5.2.3) Calcul du volume de stockage Vs_3 sur le BR3 158

5.2.4) Calcul du volume de stockage Vs_4 sur le BR4 160
5.2.5) Calcul du volume de stockage Vs_5 sur le BR5 162
5.3) Calcul des volumes de stockage en utilisant la nouvelle méthode 164
5.3.1) Calcul du volume de stockage Vs_1 sur le BR1 165
5.3.2) Calcul du volume de stockage Vs_2 sur le BR 2 166
5.3.3) Calcul du volume de stockage Vs_3 sur le BR 3 168
5.3.4) Calcul du volume de stockage Vs_4 sur BR 4 169
5.3.4.1) Approche 1 170
5.3.4.2) Approche 2 172
5.3.5) Calcul du volume de stockage Vs_5 sur le BR 5 174
5.3.5.1) Approche 1 174
5.3.5.2) Approche 2 177
5.3.5.3) Approche 3 180
5.4) Calcul des écarts entre les deux méthodes 182
5.5) Conclusion 183
Conclusion Générale 184
Perspectives 188
Références bibliographiques 190
ANNEXE A – Délimitation des régions de pluviométrie homogène (source : Instruction technique de 1977) 197
ANNEXE B – Présentation de quelques hyétogrammes remarquables 198
ANNEXE C - Présentation des simulations non réussies sous la pluie de projet rectangle... 202
ANNEXE D – Présentation des 144 essais 205
ANNEXE E – Calculs de l'analyse de variance 211
ANNEXE F – Table de Fisher- Snedecor 216
ANNEXE G – Table du t de Student 218
ANNEXE H – Présentation des 144 essais du modèle D = f (C, Qad, T) 220
ANNEXE I – Table des figures 223
ANNEXE J – Table des tableaux 228

Introduction Générale

Il a été remarqué que la plupart des déclarations de l'état de catastrophes naturelles relèvent d'aménagements sommaires du réseau hydrographique, voire du domaine de la conception et de l'entretien des dispositifs d'assainissement pluvial**,** [Tassin B & *al*, 2004]. Et pourtant, ces ouvrages d'assainissement ont été conçus à partir des méthodes de conception préconisées par l'Instruction technique de 1977 [Ministères, 1977]. Aussi depuis près d'une vingtaine d'années, une question demeure constante : faut-il ou non renouveler les méthodes de conception de l'assainissement et donc renouveler l'Instruction technique de 1977 ? [CERTU, 2003].

Question d'autant plus légitime que depuis 1949, l'approche de l'intégration de l'assainissement dans l'urbanisme et l'environnement a changé autant sur le plan juridique que technique (confère Loi sur l'eau du 03/01/92, la directive européenne du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux résiduaires urbaines, la Loi de décentralisation de 1982). De plus, l'acquisition des connaissances scientifiques et techniques a permis la mise au point de méthodes qui mettent l'accent sur la prise en compte des conditions locales. Du fait donc de cette évolution permanente de connaissances, le [CERTU, 2003] dans son document « La ville et son assainissement » rappelle qu'il est justifié d'utiliser d'autres modèles si ceux-ci s'avèrent mieux adaptés au contexte que les modèles généralement proposés. Il ajoute qu'en ce qui concerne les méthodes de dimensionnement : *« […] les méthodes de dimensionnement recommandées correspondent à des solutions qui sont techniquement et économiquement réalistes pour résoudre le problème traité dans la majorité des situations et non dans leur totalité. Il s'agit donc de méthodes à envisager en priorité mais absolument pas de méthodes à utiliser de façon systématique. »*

Aujourd'hui, aucune des méthodes de dimensionnement proposées dans l'Instruction technique de 1977 ne semble satisfaisante notamment pour les ouvrages de stockage des eaux pluviales. En effet, dans leur étude *d'analyse des caractéristiques « dimensionnantes » des pluies à l'aide d'un modèle stochastique de pluie* [Gaume E & *al*, 2000] ont montré que les deux méthodes de dimensionnement proposées dans la circulaire de 1977 (méthode des pluies et méthodes des volumes) ne donnent pas entièrement satisfaction. Elles semblent conduire assez souvent à surdimensionner ou à sous-dimensionner les ouvrages. Ils ont utilisé dans

cette étude comme méthode de référence la simulation de chacune des pluies d'une série chronologique à l'aide d'un modèle complet hydrologique et hydraulique, prenant en compte les pertes initiales de ruissellement, l'effet de laminage du réseau, les singularités présentes sur les réseaux, les effets de remous éventuels. Cette méthode est par ailleurs, recommandée par [Chocat B *&* *al*, 1997] et [STU, 1983]. Cependant elle est lourde dans sa mise en œuvre et souvent irréaliste dans la mesure où la plupart des bureaux d'étude ne disposent ni des modèles hydrologiques urbains capables de simuler en continu à partir de longues chroniques de pluies ni des compétences d'analyse statistique nécessaires.

Compte tenu de tout ce qui précède, nous avons pris le parti de concevoir un nouvel outil de dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales pour leurs caractères fonctionnels, économiques et environnementaux (écrêtement des pointes d'orages, réduction des dimensions des collecteurs d'évacuation et donc réduction de la facture, revalorisation du site, etc).

Nous envisageons d'utiliser le concept de pluie de projet qui utilise les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) pour dimensionner les ouvrages de stockage et apporter autant soit peu des solutions quant aux difficultés que rencontrent les bureaux d'étude à savoir de disposer à la fois de données pluviométriques et de méthodes robustes de dimensionnement à la mise en œuvre aisée.

Le présent travail après avoir présenté, au chapitre 1, la situation actuelle des ouvrages de stockage des eaux pluviales ainsi que leurs méthodes de dimensionnement, aborde, au chapitre 2, la méthodologie de notre travail puis aboutit, au chapitre 3, à l'application des méthodes de dimensionnement les plus usuelles. Nous proposons ensuite, au quatrième chapitre, un nouvel outil de dimensionnement. Nous achevons le présent travail par un test du nouvel outil de dimensionnement sur un système d'assainissement composé d'ouvrages de stockage en série et parallèle.

Chapitre 1 : Situation actuelle des ouvrages de stockage

1.1) Introduction

La dynamique actuelle des villes (activités industrielles, les aménagements, l'accroissement de la population et les nouveaux modes de vie, etc. …) et le souci permanent de la protection de l'environnement nous amènent à reconsidérer les méthodes de dimensionnement des systèmes d'assainissement qui avaient donné lieu à l'Instruction technique de 77.

Ce chapitre fait état dans sa première partie des connaissances actuelles des ouvrages de stockage des eaux de pluie. Dans sa deuxième partie, il présente une synthèse bibliographique de leurs méthodes de dimensionnement.

1.2) Présentation des ouvrages de stockage des eaux pluviales

Les ouvrages de stockage des eaux pluviales appelés aussi Techniques alternatives reposent sur deux principes : la rétention et/ou l'infiltration de l'eau pour réguler les débits vers l'aval, et la limitation de la pollution des milieux naturels.

Parmi ces techniques, nous pouvons citer, les bassins secs, les bassins en eau, les bassins enterrés, les chaussées à structures réservoir, les puits d'infiltration et d'injection, les tranchées de retenue et d'infiltration, les noues et fossés de retenue ou d'infiltration et enfin les toits stockants et les citernes.

Ces techniques peuvent être utilisées de manière autonome (sans réseau de conduites) ou bien associées à un réseau d'assainissement classique. Elles peuvent être présentes à toutes les échelles d'aménagement : soit au niveau de la parcelle (puits, toits stockants, etc.) ou bien au niveau secondaire (tranchées à structure réservoir, noues, etc.) ou bien encore au niveau primaire (bassins secs, en eau, etc.). Ces techniques sont de plus en plus utilisées à travers le monde, [Hubert W.C & *al*, 1988] ; [Neil T & *al*, 2003]**.**

1.2.1) Les types d'ouvrages de stockage

L'instruction technique de 1977 [Ministères, 1977] distingue deux types de bassins : *les bassins secs* qui restent vides sauf pendant une durée maximale de quelques jours après les pluies, et *les bassins en eau* qui présentent un plan d'eau permanent, même en période sèche de longue durée.

[STU, 1994] distingue quant à lui *les bassins à ciel ouvert,* d'une part, et *les bassins enterrés*, d'autre part. Le choix entre ces différents types de bassins dépend de considérations et de contraintes nombreuses, parmi lesquelles la surface disponible et le contexte urbain, mais surtout la nature du sous-sol, ainsi que la présence d'une nappe et la variation de son niveau. [Neil T & *al*, 2003], désignent les ouvrages de retenue et de tampon sous le terme générique de *storage facilities* (ouvrages de stockage) car ils considèrent que toutes les procédures de base de conception de ces ouvrages sont les mêmes.

1.2.1.1) Les bassins en eau

1.2.1.1.1) Fonctionnement et avantages

Tous les experts conviennent que tous les ouvrages de stockage en particulier les bassins en eau sont les éléments structurants importants à l'intérieur de la ville**,** [B.Tassin et *al*, 2004]. Dans certains cas, l'image urbaine est complètement liée à la présence fréquente de l'eau, en raison de ces bassins.

La lisibilité de ces bassins de retenue dans le paysage urbain est une condition nécessaire pour le développement de nombreuses et diverses pratiques [STU, 1994]. Comme ces bassins sont souvent connectés les uns aux autres, ils forment une sorte de corridor bleu, et sont généralement accompagnés d'aménagements tels des pistes cyclables et piétonnes.

La majeure partie du temps, ils servent à la promenade et parfois à la pêche. Les activités de baignade sont généralement interdites sur ces bassins. Cependant, des sports nautiques peuvent y être pratiqués.

Puisque le contexte social d'un bassin évolue avec le temps, ses utilisations évoluent aussi. Les utilisations envisagées a priori pendant la phase de conception d'un bassin sont souvent différentes de celles réellement mises en oeuvre après sa construction. Elles ne sont donc pas une conséquence de la phase de conception du projet mais de l'appropriation de l'ouvrage , par une lecture facile du paysage du bassin par toutes les catégories des utilisateurs pouvant induire des utilisations inattendues [Tassin B *& al*, 2004].

A ces rôles, [Chocat B *& al,* 1997] ajoutent deux autres éléments caractérisant au mieux l'intérêt des bassins en eau :

La sécurité hydrologique : les bassins en eau, dont le marnage est faible, offrent des marges de sécurité importantes, car quelques centimètres de marnage supplémentaires sur la surface maximale du plan d'eau représentent des volumes considérables permettant de faire face à des pluies exceptionnelles.

Les rôles pratiques : les bassins en eau peuvent aussi jouer des rôles pratiques : réserve d'incendie ou d'arrosage, ou encore recharge de la nappe phréatique (et contribution au soutien des étiages).

Enfin, [Neil T *& al*, 2003] ajoutent que ces bassins sont esthétiquement plaisants et mettent en valeur le site sur lequel ils sont installés tout en réduisant la pollution (fig. 1).



Figure 1 : Bassin en eau régulant les écoulements d'un bassin versant de 2300ha. Profond d'un à deux mètres, il stocke près de 50000 m^3. Il est utilisé pour la pêche (réserve écologique) et la promenade. Source CETE du Sud-Ouest.

1.2.1.1.2) Conception

La conception d'un bassin exige des compromis entre le choix du volume de stockage, de la morphologie, des équipements et de la localisation. Ces choix sont fonction des contraintes physiques (topographie, hydrogéologie, occupation du sol), économiques (foncier, gestion, maintenance), techniques (niveaux de protection retenus, entretien), environnementales (impacts sur le milieu récepteur, paysage et qualité de vie) [STU, 1994] et [CETE Sud-ouest, 2002].

Le choix de concevoir un bassin en eau est conditionné par la perméabilité du sol, de la vulnérabilité de la nappe et de l'importance de l'évaporation. En effet, le bassin en eau pourra être en relation directe avec la nappe et alimenté par celle-ci, ou être étanche, auquel cas les risques de surpression doivent être évalués. Par ailleurs, si on souhaite agrémenter une zone urbanisée avec un plan d'eau, le bassin en eau s'y prête bien, [CETE Sud-ouest, 2002]**.** Le volume disponible dépend du marnage acceptable.

1.2.1.1.3) Entretien

L'entretien de ces bassins s'effectue, d'une part, par le ramassage régulier des flottants et l'entretien des berges ; d'autre part par le contrôle de la végétation en favorisant l'ombrage, en limitant les arrivés de fertilisants dans le bassin, en réalisant chaque année un faucardage avec enlèvement des végétaux et enfin en vidant périodiquement le bassin (tous les dix ans environ), pour entretenir les ouvrages habituellement noyés et éventuellement curer le bassin pour un renouvellement de la masse d'eau, [STU, 1994].

Une vérification de l'épaisseur des boues accumulées peut se faire après quelques années de mise en service, puis tous les cinq ans, [CETE Sud-ouest, 2002]. Leur évacuation se fait vers un dispositif de traitement pour une filière de valorisation ou suivant leur composition, vers un dépôt définitif. Une analyse de la qualité des boues permettra de préciser la filière de valorisation.

1.2.1.1.4) Coûts

[STU, 1994] donne certaines indications quant aux éléments de coûts à savoir 30 à 40 FF par mètre de berge ou 20 000 à 50 000 FF par hectare/an de plan d'eau.

1.2.1.2) Les bassins secs

1.2.1.2.1) Fonctionnement et avantages

L'eau est collectée par un ouvrage d'arrivée, stockée dans le bassin, puis infiltrée ou évacuée à débit régulé vers un exutoire. Ces bassins secs sont vides la majeure partie du temps (stade d'entraînement, vélodrome, parcours de golf, etc.) et la durée de leur fonctionnement hydraulique est courte, de l'ordre de quelques heures seulement.

Les principaux avantages liés à l'utilisation de cette technique sont la création de zones vertes en milieu urbain ou péri-urbain (fig. 2) et une mise en œuvre facile et bien maîtrisée. [Neil T & *al*, 2003]**,** ajoutent que cette technique limite la pollution tout en présentant une certaine esthétique de la zone. Cette technique présente néanmoins comme inconvénient la consommation d'espace, [Chocat B & *al*, 1997] et [CETE Sud-ouest, 2002]**.**



Figure 2 : Bassin sec conciliant l'utile (recueil des eaux pluviales), l'utilitaire (jeux pour enfants) et l'agréable (espaces verts). Source : O.Norette/ Certu.

1.2.1.2.2) Conception

Les règles recensées pour les bassins en eau sont également valables pour les bassins secs. Le bassin sec peut être aménagé en zone de loisirs ou de sport s'il n'est pas trop souvent sollicité. Le volume disponible est égal à la capacité totale du bassin.

1.2.1.2.3) Entretien

Un bassin sec exige une certaine vigilance, en effet s'il est laissé à l'abandon il peut rapidement devenir inesthétique dans le paysage urbain. Une tonte régulière ainsi qu'un fauchage sont à prévoir pour le bassin enherbé, [CETE Sud-ouest, 2002].

De plus, [CETE Sud-ouest, 2002] estime que si le bassin n'a d'autre utilité que de stocker l'eau, il se dégrade visuellement très vite. D'où l'importance d'un usage secondaire, en

veillant à ce que celui-ci ne soit pas au détriment de l'usage premier de régulation des eaux pluviales.

1.2.1.2.4) Coûts

Les coûts inhérents aux bassins secs sont de même nature que ceux des bassins en eau. Et les estimations de ces coûts sont dans les mêmes proportions que celles des bassins en eau. Pour avoir un ordre d'idée sur le coût d'exploitation des bassins secs**,** [Chocat B *&* *al*, 1997] donnent quelques chiffres sur l'exploitation annuelle d'un bassin sec revêtu et clos de 50 000 m^3 en Seine-Saint-Denis évalué à 150 000 FF, valeur 1993: 70 000 FF pour les espaces verts environnants, 30 000 FF pour le curage et le reste attribué aux frais de personnel.

1.2.1.3) Les bassins enterrés

1.2.1.3.1) Fonctionnement et avantages

Les bassins enterrés sont adaptés pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain dense. Ils nécessitent de grands travaux de génie civil (fig. 3 et 4) mais ne monopolisent nullement la surface au sol : ils s'adaptent parfaitement aux secteurs urbains anciens ou à un objectif de dépollution [Chocat B *&* *al*, 1997].

Les bassins enterrés sont alimentés par les eaux pluviales d'un réseau et peuvent remplir trois fonctions principales : création d'une réserve (les eaux sont stockées pour une réserve d'incendie, par exemple), tamponnement des flux (les eaux sont stockées puis restituées à débit contrôlé), infiltration (dans le sol si la perméabilité le permet) (fig.5) [Grand Lyon, 2007]**.**

Parmi les avantages que procurent ces ouvrages, nous pouvons citer l'écrêtement des hydrogrammes ruisselés et l'infiltration qui permet de se rapprocher le plus possible du cycle naturel de l'eau. Il existe un choix important de matériaux utilisables pour leur réalisation (béton, structure porteuse légère et modulaire, structure tubulaire). Les principaux inconvénients de cette technique sont liés au nombre d'études à réaliser en amont de sa réalisation (étude de perméabilité, recherche de la meilleure solution pour répondre aux problèmes d'encombrement, d'indice de vide, la portance du sol, étude du cycle de vie des

matériaux utilisés.) [Grand Lyon, 2007].

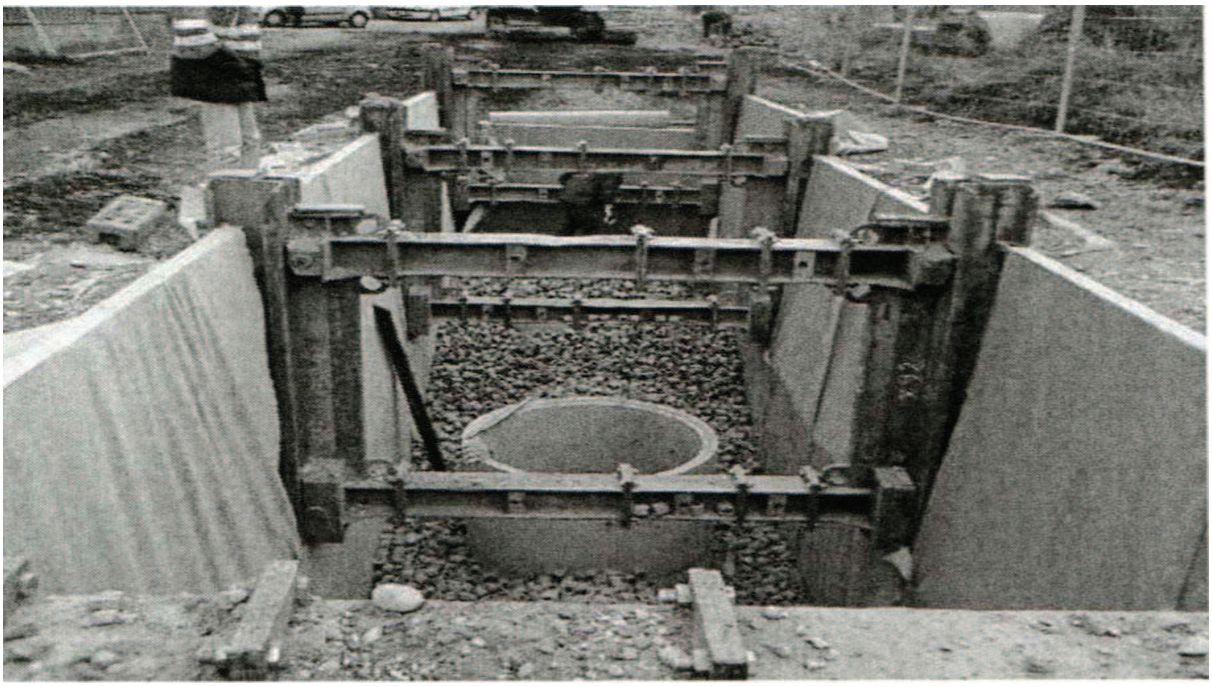


Figure 3 : Exemple de bassin enterré en cours de réalisation, [Grand Lyon, 2007].

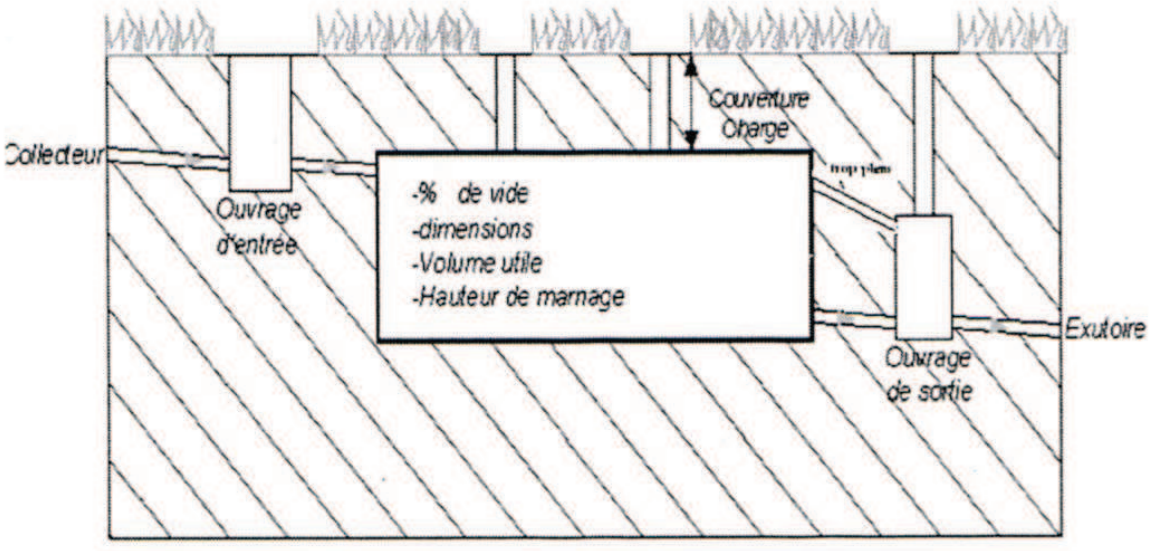


Figure 4 : Schéma type d'un bassin enterré caractérisé par son indice de vide, sa hauteur de marnage et ses dimensions qui définissent son volume utile, [Grand Lyon, 2007].

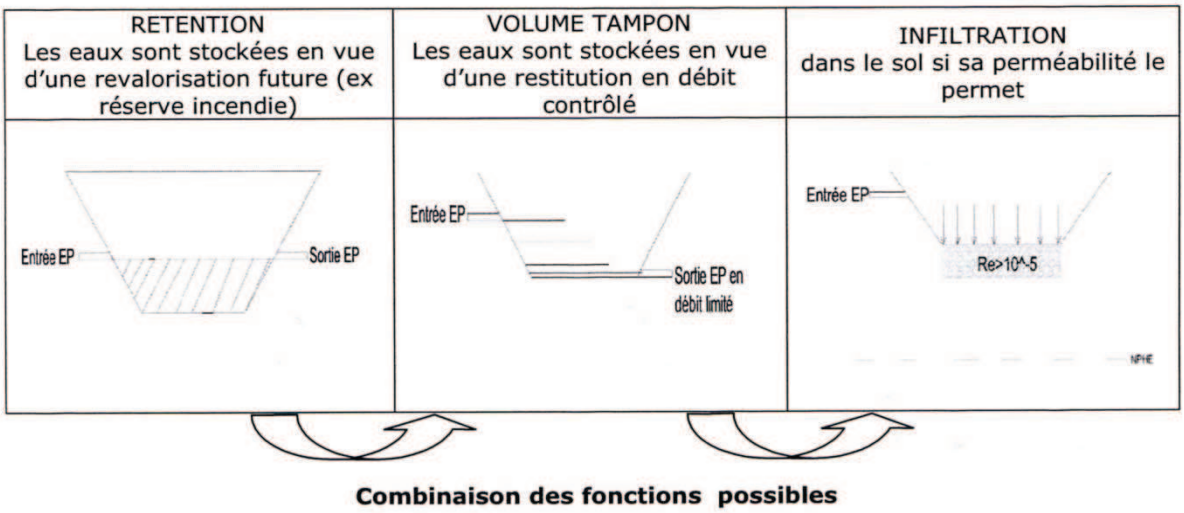


Figure 5 : Exemple de combinaison des fonctions possibles. Les bassins enterrés sont alimentés par les eaux pluviales d'un réseau de type séparatif, ils peuvent ainsi remplir trois fonctions principales pouvant se combiner les unes avec les autres, [Grand Lyon, 2007].

1.2.1.3.2) Conception

La conception du bassin enterré est articulée autour de la vérification des conditions de faisabilité (étude physique du site, analyse des apports potentiels en éléments solides en fonction des types de revêtement des surfaces ruisselées, etc.), du choix du procédé constructif (indice des vides de la structure, charges, portance du sol, etc.), du dimensionnement hydraulique (calcul du volume de stockage) et l'étude des ouvrages connexes (ouvrages de traitement ou de régulation) en amont et aval du bassin, [Grand Lyon, 2007].

1.2.1.3.3) Entretien

L'entretien des bassins enterrés se focalise sur des systèmes de traitement et de régulation. Le bon état de fonctionnement de ces organes est assuré d'une part par des inspections systématiques après un événement pluvieux important et d'autre part par une intervention annuelle. Une fiche d'entretien est recommandée pour chaque ouvrage. Dans cette fiche on reporte la périodicité et la technique à employer pour le nettoyage de l'ouvrage amont et du bassin lui-même.

1.2.1.3.4) Coûts

Le coût des bassins enterrés est en moyenne supérieur à celui d'un bassin sec enherbé. [Chocat B & *al*, 1997] rappellent que les coûts moyens, en 1992, de ces ouvrages sont estimés de 1 000 à 4 000 FF le m^3.

1.2.1.4) Les toits stockants

1.2.1.4.1) Fonctionnement et avantages

Les toits stockants sont des toits qui stockent temporairement les eaux pluviales pour les restituer ensuite à un exutoire avec un débit limité. Cette technique ralentit ainsi le ruissellement grâce à un stockage temporaire sur les toits le plus souvent plats mais éventuellement en pente. Le principe consiste à retenir, grâce à un acrotère, une certaine hauteur d'eau, puis à la restituer à faible débit. Sur toits plats, le dispositif d'évacuation est constitué d'une ogive centrale avec filtre, raccordée au tuyau d'évacuation et d'un anneau extérieur, percé de rangées de trous dont le nombre et la répartition conditionnent le débit de vidange (fig. 6, 7 et 8). Sur les toits en pente, le stockage est aussi possible par utilisation de caissons cloisonnant la surface.

Stockage temporaire et vidange sont ainsi assurés par un ou plusieurs organes de régulation ; ils sont généralement améliorés par la présence d'une protection d'étanchéité généralement d'une épaisseur de 5 cm pour une porosité de 30% si c'est granulaire.

Les avantages spécifiques à cette technique avancés par le [CETE Sud-ouest, 2002], sont les suivantes :

- l'intégration de façon esthétique à tous types d'habitats à toitures terrasses,
- un procédé de stockage immédiat à la parcelle,
- pas d'emprise foncière,
- sa mise en œuvre ne demande pas de technicité particulière par rapport aux toitures traditionnelles, mais sa réalisation doit être soignée,

A ces avantages s'ajoutent le ruissellement retardé et la possible protection contre le feu, [Neil T & *al*, 2003].

Les toitures stockantes entraînent un léger surcoût du bâtiment (étanchéité soignée) largement compensé par un gain financier sur les équipements d'assainissement (pose de conduites de plus petit diamètre), [Chocat B & *al*, 1997].

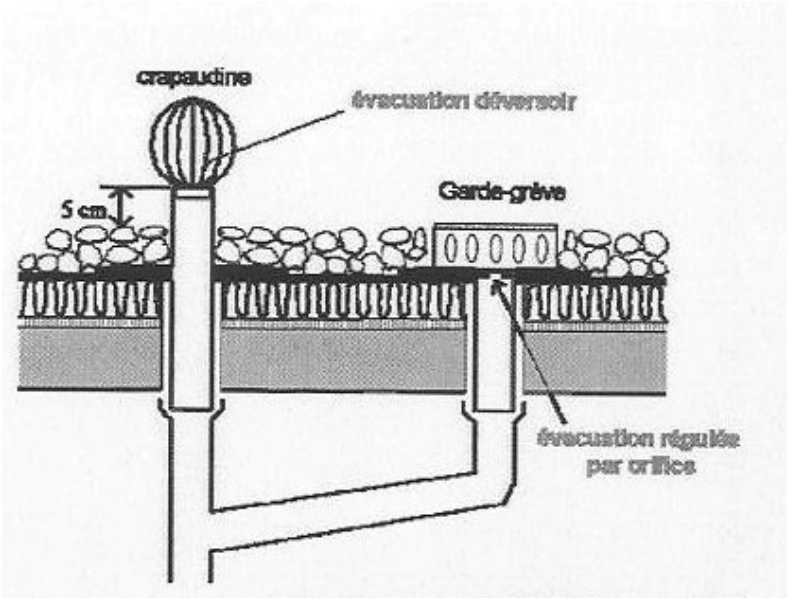


Figure 6 : Exemple d'évacuation régulée et d'évacuation déversoir distinctes avec régulation réalisée par un simple orifice, [Chocat B & al, 1997].

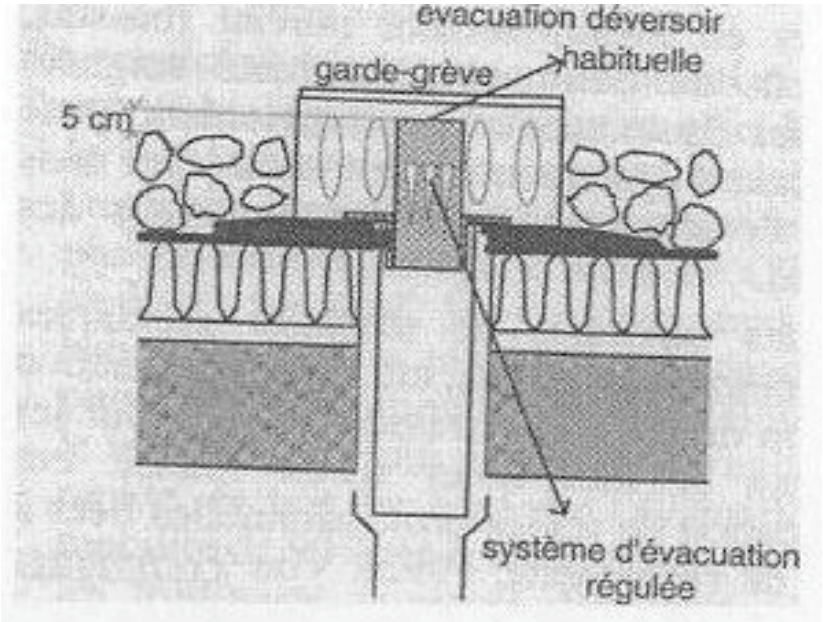


Figure 7 : Exemple d'évacuation régulée par tubes percés d'orifices triangulaires, [Chocat B & al, 1997].

1.2.1.4.2) Conception

L'utilisation de cette technique exige la prise en compte des problèmes d'étanchéité (fuite d'eau, utilisation de couche de revêtement non adaptée) qui pourraient survenir suite à la présence d'eau sur le toit. Mis à part ces problèmes d'étanchéité, d'autres conditions doivent être réunies pour sa réalisation à savoir la stabilité (la vérification de la stabilité prend systématiquement en compte la surcharge d'eau), la pente du toit (qui doit être inférieur à 5% pour une plus grande efficacité), et l'accès au toit (qui doit être inaccessible aux piétons et véhicules), hormis pour les toitures jardin, [CETE Sud-Ouest, 2002].

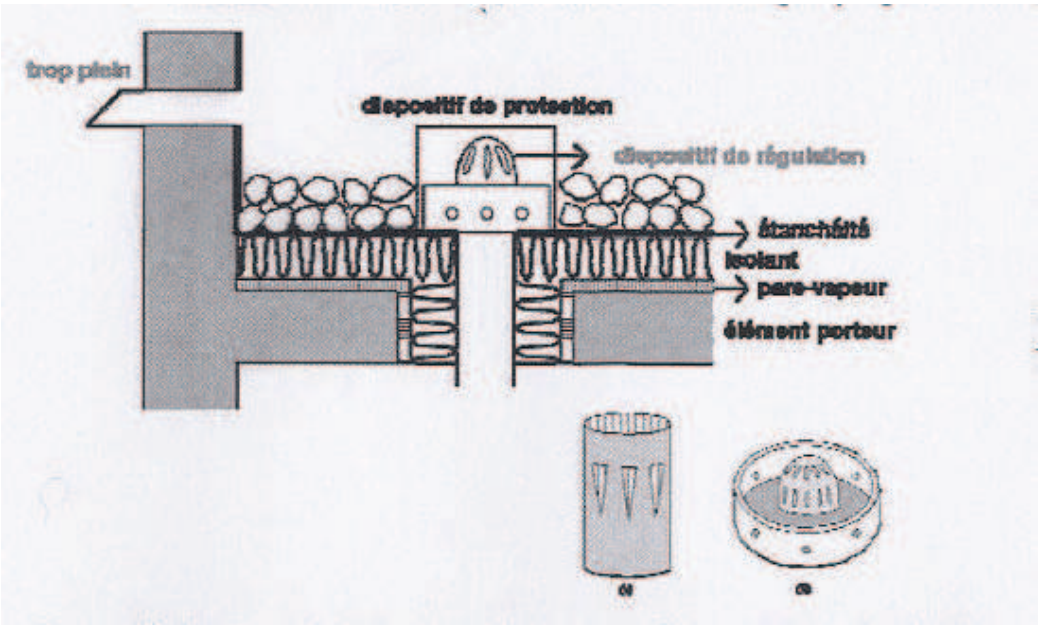


Figure 8: Schéma de principe des constituants d'une toiture stockante, [Chocat B & al, 1997].

1.2.1.4.3) Entretien

Pour leur pérennité, les toitures stockantes demandent un entretien léger et à ce propos, le CETE Sud-ouest, 2002, stipule que La Chambre Syndicale Nationale de l'Etanchéité recommande au minimum deux visites par an : en fin d'automne, pour vérifier que les feuilles des arbres n'ont pas obstrué les descentes, et en début d'été, afin de contrôler le bon fonctionnement des dispositifs de régulation.

1.2.1.4.4) Coûts

Les coûts sont liés au matériau utilisé (le gravillon, le matériau d'étanchéité et les dispositifs de vidange). Les coûts de réalisation estimés par le [Grand Lyon, 2007] varient de 7 euros/m^2 à 30 euros/m^2 (en fonction des aménagements réalisés sur la toiture). Pour ce qui est de l'entretien et du nettoyage de ces ouvrages, le [Grand Lyon, 2007] estime que les coûts sont d'environ 1 euro/an/m^2.

1.2.1.5) Les chaussées à structure réservoir

1.2.1.5.1) Fonctionnement et avantages

Les chaussées à structure réservoir sont des ouvrages routiers (voiries, parkings, etc.) permettant d'écrêter les débits de pointe ou les volumes de ruissellement.

Leur principe est de stocker temporairement les eaux de pluie dans le corps de la chaussée, dans les vides des matériaux, et les restituer à débit limité soit dans un exutoire de surface, soit dans le sous-sol par infiltration ou dans un réseau d'eau pluviale. L'eau est collectée, soit localement par un système d'avaloirs et de drains diffuseurs qui la conduisent dans le corps de la chaussée (pour les chaussée à revêtement imperméable), soit par infiltration répartie à travers un revêtement drainant en surface, enrobé drainant ou pavé poreux (fig.10 à 13).

La nature des matériaux constituant le corps de la chaussée est fonction à la fois de leur rôle mécanique et de leur position dans la chaussée. Ils peuvent donc être soit des matériaux non liés, soit des matériaux traités au liant bitumineux ou encore des matériaux traités au liant hydraulique et enfin des matériaux alvéolaires. Par ailleurs, une géomembrane est souvent utilisée pour étancher le fond du sous-sol si ce dernier est vulnérable**,** [Chocat B & *al*, 1997].

[CETE Sud-ouest, 2002] liste ci-après quelques avantages de cette technique:

- insertion très facile en milieu urbain sans consommation d'espace (fig. 9),
- diminution du bruit de roulement, pour des vitesses supérieures à 50km/h, si le revêtement de surface est un enrobé drainant,
- amélioration de l'adhérence,
- piégeage de la pollution.

Les inconvénients sont liés au risque de pollution de la nappe (pollution accidentelle) et au colmatage lorsque les enrobés drainants sont utilisés.



Figure 9 : Chaussée réservoir sur le site d'un supermarché. L'eau s'infiltre par le matériau drainant de surface puis elle est stockée dans la structure réservoir pour enfin être restituée progressivement dans le réseau aval. Source CETE Sud-Ouest.

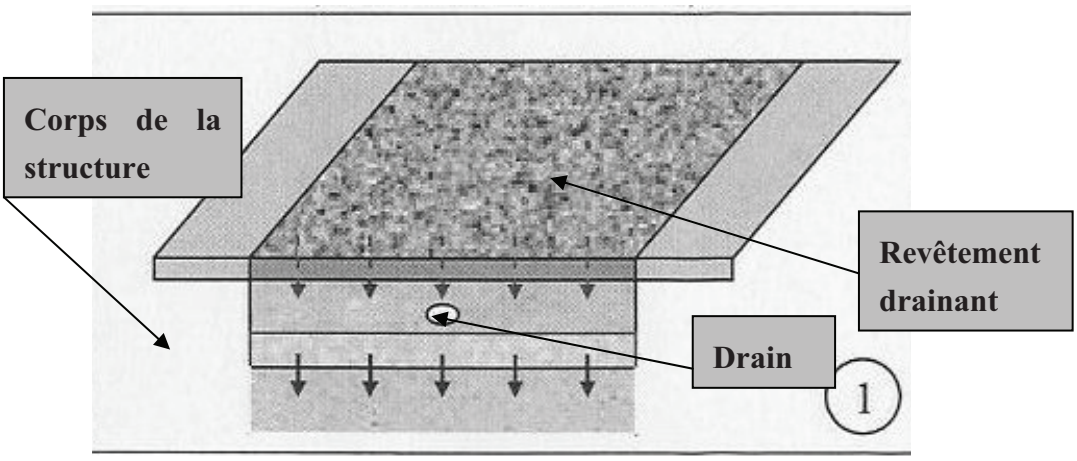


Figure 10 : Exemple d'évacuation répartie (infiltration) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est drainant. Il existe dans le corps de la structure un drain central vers une surverse de sécurité.

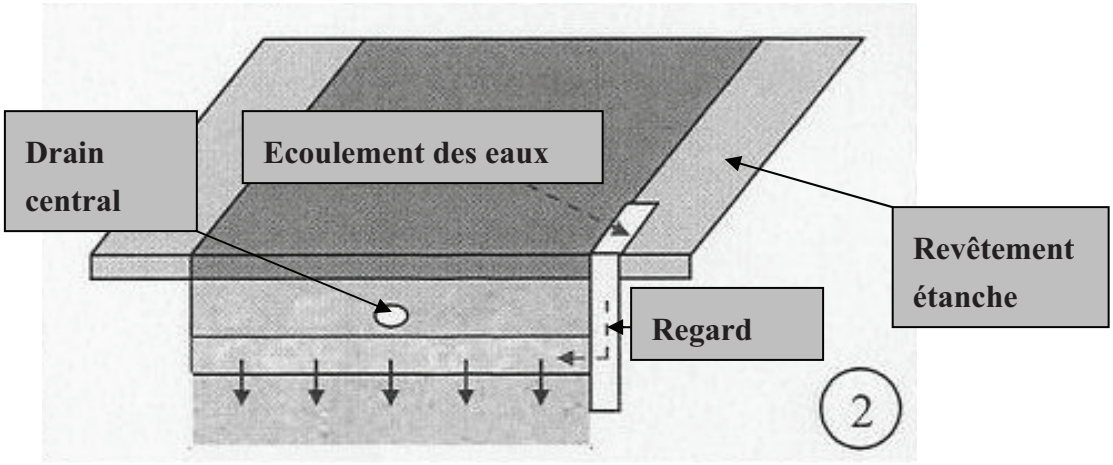


Figure 11: Exemple d'évacuation répartie (infiltration) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est étanche. Il existe dans le corps de la structure un drain central vers une surverse de sécurité.

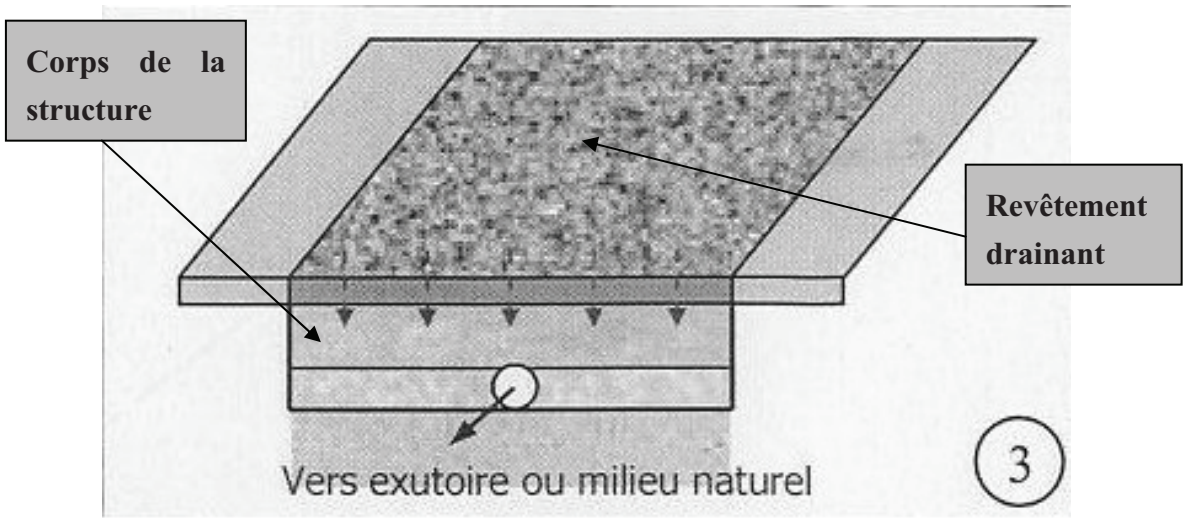


Figure 12 : Exemple d'évacuation localisée (rétention) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est drainant. Il existe dans le corps de la structure un drain d'évacuation de vidange.

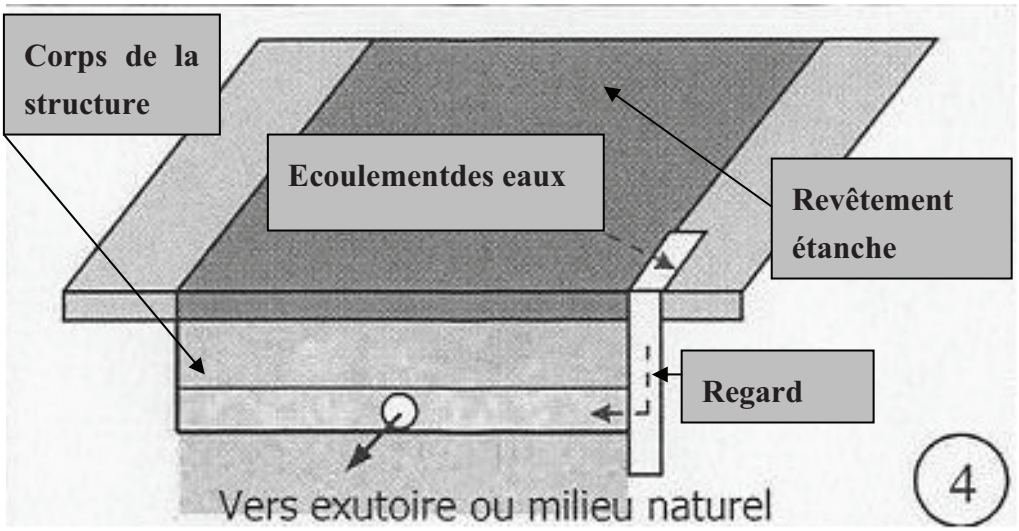


Figure 13 : Exemple d'évacuation localisée (rétention) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est étanche. Il existe dans le corps de la structure un drain d'évacuation de vidange.

D'après le [Grand Lyon, 2007], un regard de visite avec un puisard pour permettre l'accès aux ajutages sur le drain ou pour passer une buse doit être mis en place tous les 75 m.

1.2.1.5.2) Conception

La conception de cette technique prend en compte la topographie, la délimitation des bassins versants, les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des sols.

Après avoir réuni ces éléments de conception, il est procédé au calcul du volume de rétention de la structure réservoir sur une base hydraulique et mécanique.

Le dimensionnement mécanique des chaussées à structure réservoir est identique à celui des chaussées classiques. L'épaisseur de la chaussée est fonction du trafic, du sol support et des propriétés mécaniques des matériaux utilisés. Le dimensionnement s'effectue en trois étapes : déterminer la classe de portance du sol de 0 (pour les sols très déformables) à 4 (pour les sols peu déformables), choisir les matériaux et estimer l'agressivité du trafic lourd, [CETE Sud-ouest, 2002].

Quant au dimensionnement hydraulique, il consiste à évaluer, d'une part, le volume d'eau à stocker et d'autre part à calculer l'épaisseur de la chaussée à structure réservoir.

$$Ep\ (m) = Vs / (e * S) \qquad \text{(éq. 1)}$$

avec Ep = épaisseur de matériau (m),

Vs = Volume d'eau à stocker (m^3),

e = Porosité du matériau ou indice de vide,

S = Surface de stockage (m^2).

1.2.1.5.3) Entretien

L'entretien des chaussées à structure réservoir s'effectue au niveau du revêtement, de la structure réservoir et des ouvrages hydrauliques.

L'entretien d'un revêtement drainant se résume, en préventif, au nettoyage de la chaussée par aspiration sur toute sa largeur. L'usage du balayage est déconseillé car il entraîne un

colmatage plus rapide des vides du matériau. En curatif, le lavage à l'eau sous haute pression combiné à l'aspiration donne des résultats satisfaisants : l'enrobé retrouve les niveaux d'absorption d'origine, [CETE Sud-ouest, 2002].

Pour l'entretien de la structure réservoir, compte tenu de la nature des matériaux constituant la structure réservoir (matériaux concassés), quelques précautions doivent être prises en cas de travaux : notamment, les parois latérales des tranchées ne seront pas verticales et lors du remblayage, il faudra reconstituer la structure poreuse à l'identique ou au moins assurer les écoulements à sa base. D'autre part, afin d'éviter la migration d'éléments fins vers les matériaux poreux de la structure réservoir, il faut éviter de mettre celle-ci en contact avec des matériaux constitués de tels éléments ; pour cela, on peut éventuellement protéger les matériaux poreux par un géotextile, [CETE Sud-ouest, 2002].

Enfin, les matériels classiques tels les hydrocureuses et les aspiratrices généralement utilisés pour le curage des réseaux d'assainissement seront utilisés pour l'entretien des ouvrages hydrauliques.

1.2.1.5.4) Les coûts

A titre indicatif, le [Grand Lyon, 2007] avance une fourchette de prix quant à la réalisation et l'entretien de cette technique : pour la réalisation d'une chaussée classique (imperméable) les prix varient de 240 à 290 euros HT (hors taxes)/ml de chaussée. La réalisation d'une chaussée poreuse coûte en moyenne 270 à 450 euros HT/ml de chaussée. L'entretien quant à lui se résume au lavage simple dont le coût est estimé à 1 euro HT/an/m^2 et au lavage avec changement de la couche de roulement dont le coût est de l'ordre de 3 euros HT/an/m^2.

1.2.1.6) Les puits

1.2.1.6.1) Fonctionnement et avantages

Les puits sont des dispositifs qui permettent l'évacuation des eaux pluviales dans le sol afin d'assurer un débit de rejet compatible avec les surfaces drainées, après stockage et prétraitement éventuels (fig. 14 et 15).

On distingue généralement deux types de puits : les puits d'infiltration et les puits d'injection (interdits aujourd'hui). Dans le premier cas, les eaux sont infiltrées dans le sol en passant au travers d'une couche de sol non saturée. Ces puits d'infiltration sont en général remplis d'un matériau très poreux qui assure la tenue des parois. Ce matériau est entouré d'un géotextile qui évite la migration des éléments les plus fins. Dans le deuxième cas, les eaux pluviales sont directement injectées dans la nappe. Les puits sont habituellement associés à des techniques de stockage de type chaussée-réservoir, tranchée drainante, fossé et bassin de retenue dont ils assurent le débit de fuite.

Mis à part leur fonction d'écrêtement des débits de pointe et de diminution des volumes d'eau, les puits présentent des avantages non négligeables à savoir une bonne intégration dans le tissu urbain, une utilisation sur des sols superficiels imperméables et des sous-sols perméables sans contrainte topographique majeure. Enfin, l'infiltration des eaux contribue à l'alimentation de la végétation environnante et des nappes. Ils conviennent à tous types d'usages, sauf usages industriels. Les principaux inconvénients sont notamment le risque de pollution de la nappe et le colmatage.

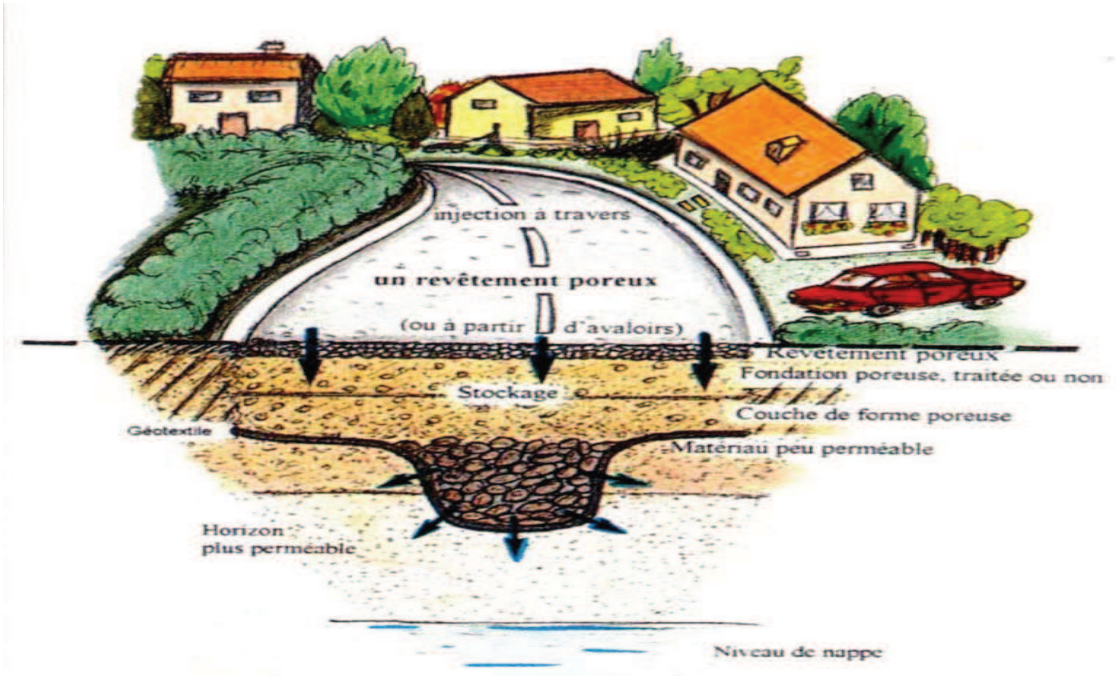


Figure 14 : Puits d'infiltration associé à une chaussée réservoir, assurant le débit de fuite. Source CETE du Sud-Ouest.

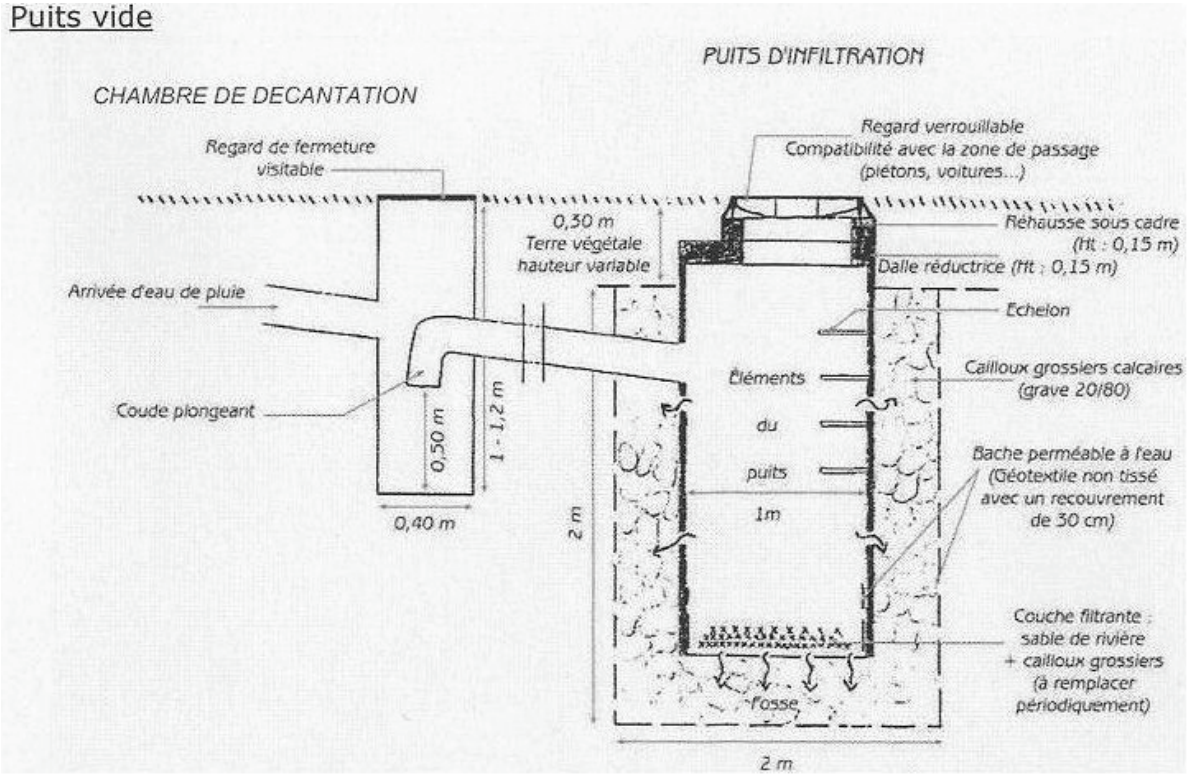


Figure 15 : Exemple de puits. Source Adopta.

1.2.1.6.2) Conception

La conception d'un puits passe par une analyse de la nature et de la perméabilité du sol et du sous-sol, le débit de rejet autorisé, la qualité et la nature des matériaux utilisés, [CETE Sud-ouest, 2002]**.** L'étape d'analyse étant faite, il faut ensuite procéder au dimensionnement de l'ouvrage.

Ce dimensionnement est fonction de la perméabilité du sol et du volume à stocker et consiste à déterminer le volume à stocker, à calculer le volume géométrique en fonction des dimensions du puits (rayon et profondeur et porosité du matériau dans le cas d'un puits comblé), puis à comparer ensuite ces deux volumes, [CETE Sud-ouest, 2002] :

« si le volume nécessaire de stockage est supérieur au volume géométrique, alors il faudra augmenter le rayon ou la profondeur du puits, ou la porosité du matériau, ou le nombre de puits, ou encore créer un stockage supplémentaire ;

si le volume nécessaire de stockage est inférieur au volume géométrique, alors on peut diminuer le rayon ou la profondeur du puits, ou la porosité du matériau. »

1.2.1.6.3) Entretien

L'entretien peut se faire à deux niveaux à savoir au niveau préventif et curatif. Au niveau préventif, il s'agit de minimiser, tous les trois mois, le colmatage par des actions de vidange des chambres de décantation, de nettoyage des dispositifs filtrants, de vérification du système trop plein.

Au niveau curatif il s'agit de curer ou de pomper lorsque le puits ne fonctionne plus ou déborde. En cas de pollution accidentelle, le système de prétraitement à l'amont du puits peut limiter le risque, sinon il faudra la pomper après avoir vidé le puits de ses matériaux.

1.2.1.6.4) Les coûts

La fourchette des prix donnée par le [Grand Lyon, 2007] estime que la réalisation d'un puits coûte en moyenne 5 euros HT/m^2 de surface assainie. L'entretien coûte quant à lui 3 euros HT/an/m^2 de surface assainie et 80 euros/an pour le curage.

1.2.1.7) Les noues

1.2.1.7.1) Fonctionnement et avantages

Une noue est un fossé large et peu profond avec des rives en pente douce (fig. 16). Sa fonction principale est le stockage des eaux pluviales. Le stockage et l'écoulement de l'eau se font à l'air libre, à l'intérieur de la noue. L'eau est ainsi collectée soit par l'intermédiaire de canalisations dans le cas, par exemple, de récupération des eaux de toitures et de chaussées, soit directement après ruissellement sur des surfaces adjacentes. L'eau est ensuite évacuée vers un exutoire (réseau + puits ou bassin de rétention) ou par infiltration dans le sol et évaporation (fig. 17 à 20). En général, lorsque le rejet à l'exutoire est limité, l'infiltration est nécessaire, à condition qu'elle soit possible [CETE Sud-ouest, 2002].

Les noues présentent des avantages certains, [CETE Sud-ouest, 2002] ; [Chocat B & *al*, 1997] :

- l'utilisation en un seul système des fonctions de drainage des terrains, de rétention, de régulation, d'écrêtement qui limitent les débits de pointes en aval,
- la création d'un paysage végétal et d'espaces verts pour une bonne intégration dans le site.

[Chocat B & *al*, 1997] notent cependant que cette technique peut mobiliser des surfaces foncières importantes et que le risque de pollution de la nappe n'est pas négligeable.



Figure 16 : Noue peu profonde avec des rives en pente douce. Sa fonction principale est le stockage des eaux pluviales. Le stockage et l'écoulement de l'eau se font à l'air libre, à l'intérieur de la noue. Source, CETE Sud-Ouest.

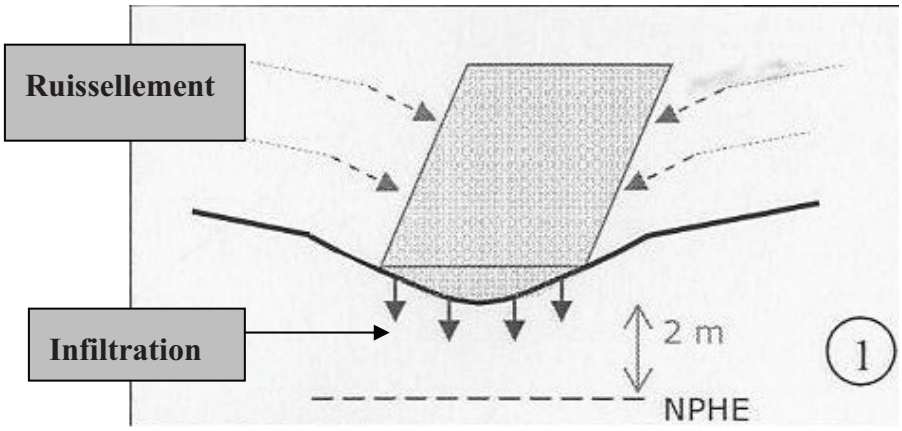


Figure 17 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation répartie (infiltration) pour des noues et des fossés.

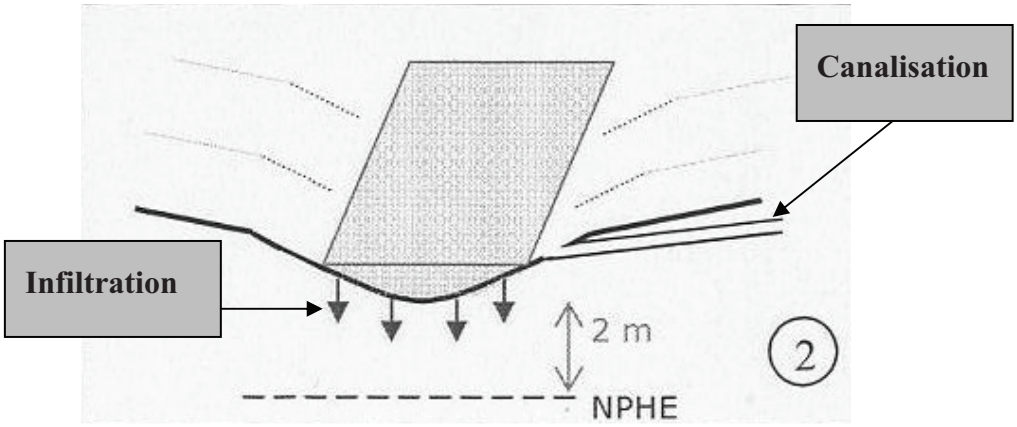


Figure 18 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation répartie (infiltration) pour des noues et des fossés.

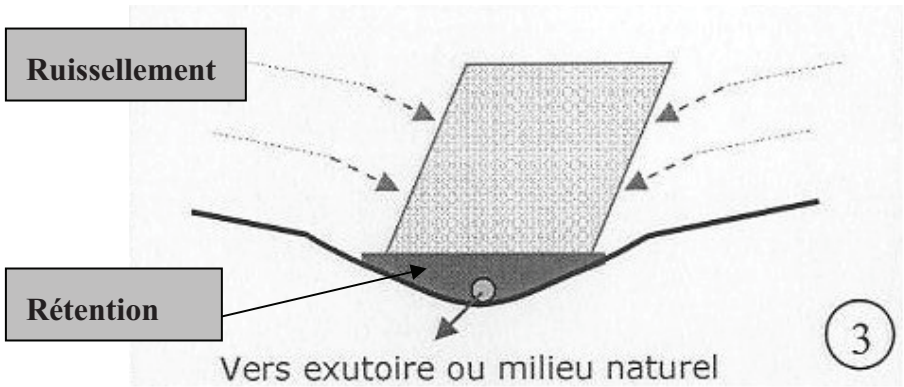


Figure 19 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation localisée (rétention) pour des noues et des fossés.

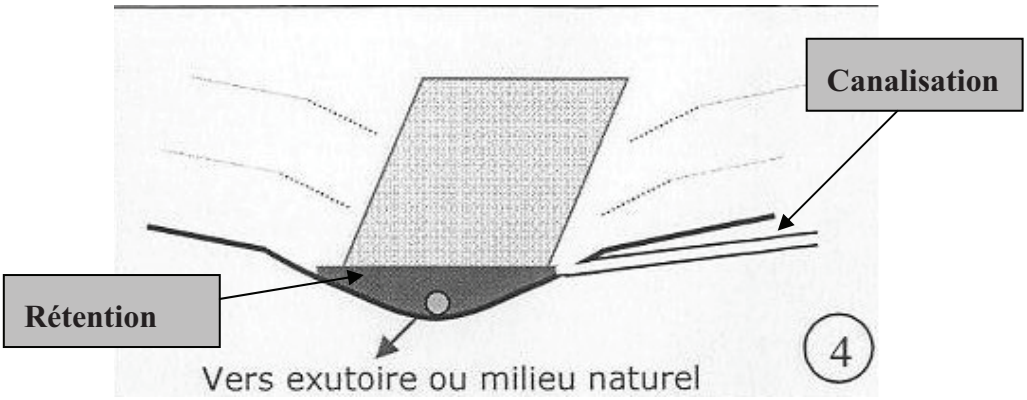


Figure 20 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation localisée (rétention) pour des noues et des fossés.

1.2.1.7.2) Conception

La section d'une noue peut prendre plusieurs formes (triangulaire, trapézoïdale, etc.) selon les lignes de niveaux qu'elles suivent. Cette section peut avoir une forme évolutive sur sa longueur : elle peut alors s'évaser par endroits pour inclure un espace vert ou se rétrécir par endroits par manque de place, ce qui permet d'adapter la noue le long des routes et sur des lotissements, [CETE Sud-ouest, 2002].

Le revêtement de la noue peut être de nature végétal (pelouses, arbustes et arbres) ou minéral (revêtement de galets).

Pour ce qui est du dimensionnement de le noue, il se pratique à deux niveaux : au niveau du calcul du volume de stockage et au niveau du calcul du volume d'écoulement. Le dimensionnement du volume de stockage consiste à découper la longueur de la noue en biefs et de considérer le bief à l'amont comme un bassin de retenue de même que le bief en aval en prenant en compte dans ce dernier cas les eaux de son sous-bassin versant mais aussi le débit de fuite du bief à l'amont. Tous les biefs de la noue sont ainsi dimensionnés les uns après les autres.

Quant au dimensionnement du volume d'écoulement, il s'agit de générer un événement pluvieux plus rare que celui pouvant être stocké dans la noue. [CETE Sud-ouest, 2002] estime à ce propos que : « *si le stockage est dimensionné pour la compensation de*

l'imperméabilisation correspondant à une pluie de période de retour décennale à vingtennale et que l'on souhaite pouvoir évacuer par la noue des pluies de période de retour centennale, le débit de pointe à prendre en compte (pour la surface de la « zone d'écoulement centennal », correspond au débit de pointe centennal auquel on soustrait le débit de la zone de stockage (déjà compté dans la « zone de stockage pour compensation ». »

1.2.1.7.3) Entretien

Une noue exige un entretien préventif régulier pour éviter qu'elle ne se transforme en mare ou en égout à ciel ouvert. Il consiste donc à tondre la pelouse, fréquemment en été et à arroser quand les sols sont secs pour que la végétation ne dépérisse pas, à ramasser les feuilles à l'automne et les détritus d'origine humaines et à curer les orifices.
Pour pallier le risque de bouchage des orifices de vidange, [CETE Sud-ouest, 2002] propose de mettre en place un drain sous la noue; l'eau s'infiltre alors dans le fond de la noue puis atteint le drain et s'écoule vers l'exutoire. En cas de pollution accidentelle, on limitera la zone polluée en isolant les biefs (fermeture des orifices) et les drains écouleront la pollution à l'aval.

1.2.1.7.4) Les coûts

Les fourchettes des prix données par le [Grand Lyon, 2007] varient de 12 euros HT/m^3 terrassé (ou environ 22 euros HT/ml). Les coûts d'entretien sont estimés de 0,3 à 0,45 euro/an/m^3.

1.2.1.8) Les tranchées

1.2.1.8.1) Fonctionnement et avantages

La tranchée est une excavation de profondeur et de largeur faibles, servant à retenir les eaux puis à les évacuer soit par infiltration, soit vers un exutoire (réseau, puits, etc.). Elle peut revêtir en surface divers matériaux tels qu'un enrobé drainant, une dalle en béton, des galets ou de la pelouse, selon l'usage superficiel qu'on en fait : parkings de centres commerciaux, trottoirs le long de la voirie, pistes cyclables ou jardins (fig. 21).

Le fonctionnement hydraulique des tranchées est assurée par trois fonctions : une fonction de réception de l'eau, une fonction de stockage et enfin une fonction de vidange, [Chocat B & *al*, 1997]. La collecte de l'eau de ruissellement s'effectue soit directement après le ruissellement (les pentes des surfaces drainées sont alors orientées vers la tranchée) soit par l'intermédiaire d'un réseau.

Les tranchées ont pour principale fonction l'écrêtement des débits et la limitation des volumes d'eaux pluviales. Si les capacités d'absorption du sol suffisent, les tranchées ne nécessitent pas alors de collecteur à l'aval. Elles peuvent ainsi être utilisées dans des zones dépourvues d'exutoire naturel. L'avantage de la tranchée est sa facilité d'intégration dans le paysage urbain. L'infiltration des eaux de ruissellement par l'intermédiaire des tranchées contribue à la recharge de la nappe, [Neil T & *al*, 2003]. En contrepartie, ces techniques sont soumises au phénomène de colmatage et en cas d'infiltration de l'eau dans le sous-sol, le risque de pollution accidentelle de la nappe est toujours possible.

La tranchée est remplie de matériaux poreux afin d'assurer le stockage des eaux recueillies. On utilise généralement des graves concassées, des graviers roulés, des cylindres béton, des caissons polymères, des pneus. A. Proton, [Proton, 2008], estime que parmi cet éventail de matériaux, le gravier propre est le plus utilisé pour des raisons de coût et de bonne résistance mécanique. Ces graves et graviers possèdent généralement une porosité supérieure à 30% alors que les matériaux alvéolaires en plastique (caissons polymères) ont une porosité qui peut dépasser 90%, [Chocat B & *al*, 1997]. La mise en place de drains de diffusion permet de mieux répartir les flux entrants dans le cas où les eaux de ruissellement sont introduites par un regard. L'évacuation se fait de façon classique vers un exutoire prédéfini, un réseau d'assainissement pluvial ou une infiltration dans le sol support (fig. 22 à 25).



Figure 21 : La tranchée sert à retenir les eaux puis à les évacuer soit par infiltration, soit vers un exutoire (réseau, puits, etc.). Elle peut revêtir différents matériaux de surface (minéral ou végétal). Ici la tranchée est revêtue de galets. Source CETE Sud-Ouest.

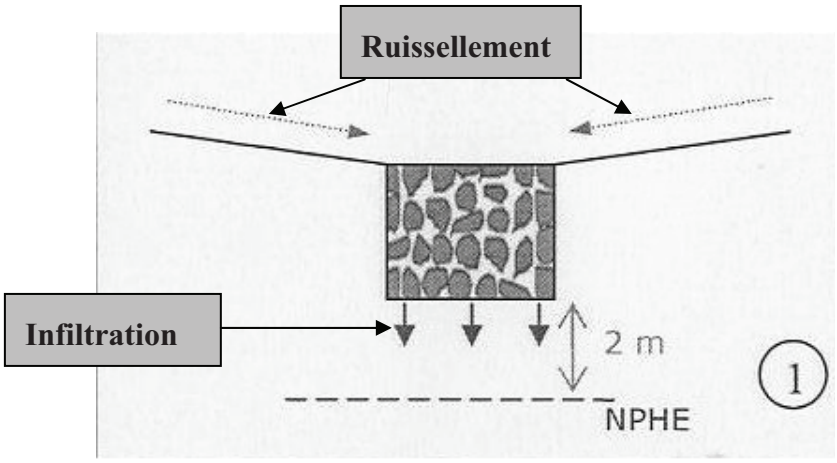


Figure 22 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation répartie (infiltration) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration.

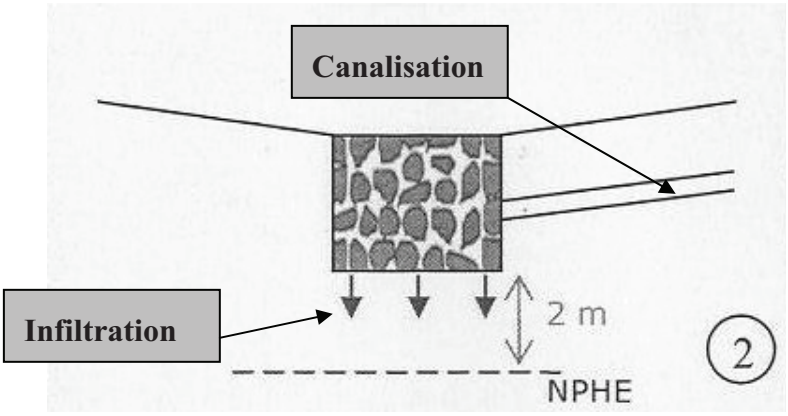


Figure 23 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation répartie (infiltration) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration.

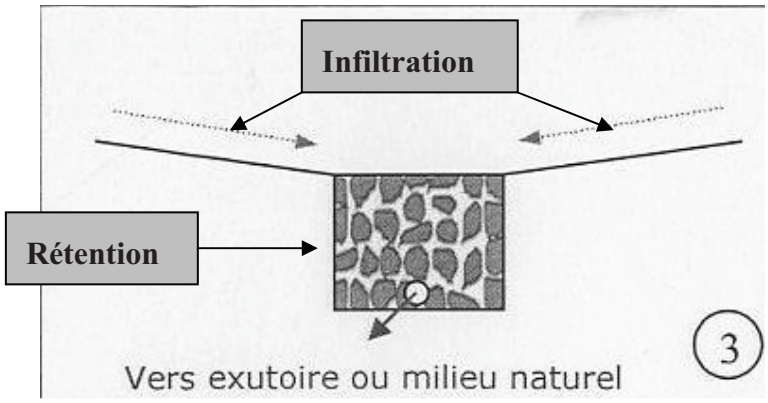


Figure 24 : Exemple d'apport réparti (infiltration) et d'évacuation localisée (rétention) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration.

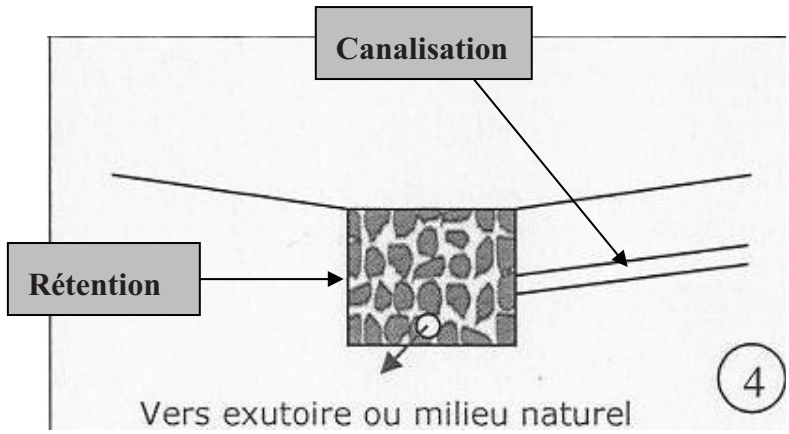


Figure 25 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation localisée (rétention) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration.

1.2.1.8.2) Conception

Le choix des matériaux de surface et de remplissage tient une place importante dans la conception de ces ouvrages. Les matériaux de surface sont choisis en fonction de l'usage que l'on veut en faire en surface (revêtement étanche ou drainant destiné à la circulation des voitures ou des piétons, par exemple). Les matériaux de remplissage sont en revanche choisis en fonction du rôle mécanique et hydraulique qu'on souhaite leur faire jouer, [CETE Sud-ouest, 2002] :

- le rôle mécanique dépend des charges en surface et de leur transmission à travers le matériau de surface,
- le rôle hydraulique a pour but de retenir l'eau dans les vides du matériau. En fonction du volume d'eau à stocker, un matériau de type grave à 30% de porosité ou un matériau alvéolaire en plastique à plus de 90% de porosité est choisi.

La section de la tranchée est fonction du volume de stockage, du matériau de remplissage et des contraintes d'espace.

1.2.1.8.3) Entretien

[L'EPA, 1999] (Environmental Protection Agency) citée dans [Proton A, 2008], préconise deux types de maintenance :

La première se base sur des inspections et des actions curatives simples et régulières. Cela consiste à un nettoyage (enlever) systématique des sables et débris après chaque événement pluvieux de forte intensité.

Le deuxième type d'action se résume à des opérations spécifiques de maintenance dont la fréquence d'application serait d'une fois par an. Afin d'optimiser ces opérations de maintenance, EPA préconise l'installation d'un puits d'observation dans la tranchée afin d'observer la vidange et de vérifier le bon fonctionnement hydraulique de la tranchée par comparaison des observations au dimensionnement initial.

De plus, si la tranchée est alimentée par le haut, [EPA, 1999] recommande de prélever une

fois par an un échantillon de matériau poreux dont la quantité de sédiments qui s'y est accumulée serait, juge-t-elle, un bon indicateur du colmatage de la tranchée.

1.2.1.8.4) Les coûts

Les fourchettes de prix données par le [Grand Lyon, 2007] varie de 40 à 50 euros HT/m^3 terrassé (ou environ 60 euros HT /ml) pour la réalisation d'une tranchée drainante et le coût d'entretien de cette dernière varie de 0,4 à 0,6 euro/an/m^3.

1.2.2) Conclusion

Nous avons présenté précédemment les différents types d'ouvrages de stockage des eaux pluviales. Il ressort de cette présentation que si tous ces ouvrages ont la même finalité hydraulique (écrêtement des volumes ruisselés) et environnementale (réduction de la pollution), leurs coûts varient nettement d'un ouvrage à un autre de même que leurs critères de conception. A ce propos, [Neil T *&* *al*, 2003] citent les critères de conception suivants qui doivent être pris en compte : le débit de vidange, le volume de stockage, la profondeur de l'ouvrage, les conditions de sécurité, les impacts environnementaux et les divers usages, l'exutoire et la localisation.

Dans la suite de ce chapitre, nous allons maintenant présenter les différentes méthodes de dimensionnement de ces ouvrages de stockage.

1. 3) Synthèse bibliographique des méthodes de dimensionnement des ouvrages de stockage

1.3.1) Introduction

En matière d'assainissement, des techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux pluviales urbaines notamment les techniques alternatives (les bassins de retenue, les chaussées réservoirs, les noues etc.) ont été développées à travers le monde. Les divers ouvrages de stockage dont le rôle est de contrôler l'évacuation des eaux pluviales ont été présentés dans le paragraphe 1.2.

Ces techniques alternatives n'ont pas toujours existé dans le passé. En effet, les eaux pluviales étaient évacuées au travers, dans un premier temps, de réseaux unitaires puis, par la suite, séparatifs. Cependant, l'urbanisation intensive, au sortir de la deuxième guerre mondiale, entraînant l'imperméabilisation de surfaces considérables augmente les volumes d'écoulement. Les débordements des réseaux deviennent alors plus fréquents. La conséquence immédiate à cet état de faits est qu'il devient très coûteux d'évacuer le plus loin et le plus rapidement possible les eaux des villes, [Chocat B & *al,* 1997]. Dès lors on commence à penser à des techniques de stockage et d'infiltration des eaux pluviales.

Aujourd'hui, en France, le dimensionnement de ces ouvrages reste problématique au regard de la Loi sur l'eau du 03/01/92 et des habitudes des praticiens des réseaux d'assainissement qui, suite à la Loi de décentralisation de 1982, ont acquis des responsabilités dans ce domaine et ne sont plus obligés d'appliquer les méthodes techniques de la circulaire de 1977 qui leur avaient été imposées par l'Etat. De fait cette circulaire de 1977 devient caduque du seul fait de la loi de décentralisation de 1982, [CERTU, 2003].

Il existe dans le monde de nombreuses méthodes utilisées pour dimensionner les ouvrages de rétention. [Hubert. W.C & *al,* 1998] ; [Neil T & *al*, 2003] citent parmi ces méthodes:

- Calculations without considering time of concentration,
- Calculations considering time of concentration,
- Time-area method,
- Rain point diagram method,
- Summation curve method,
- Detailed flow routing methods.
- Rational method,
- Unit graph methods.

Il est question dans ce chapitre de passer en revue les méthodes actuellement utilisées en France pour le dimensionnement des ouvrages de stockage pour la gestion des eaux pluviales.

1.3.2) Méthode des pluies

Cette méthode utilise l'analyse statistique des pluies. Elle est aussi connue sous le nom de

Méthode Hollandaise. Elle a l'avantage de permettre directement l'évaluation de la hauteur spécifique de stockage à partir d'une construction graphique simple établie sur la base d'un débit constant.

1.3.2.1) Hypothèses de la méthode

Pour son application, cette méthode repose sur les hypothèses suivantes, [Chocat B & *al,* 1997]:

le débit de fuite de l'ouvrage de stockage est constant *;* cette hypothèse suppose la mise en œuvre d'ouvrages de régulation ;

- il y a transfert instantané de la pluie à l'ouvrage de retenue, c'est-à-dire que les phénomènes d'amortissement dus au ruissellement sur le bassin sont négligés (cette méthode ne sera donc utilisée que pour les bassins versants relativement petits) ;
- les événements pluvieux sont indépendants. Ceci signifie que lors des dépouillements les périodes de temps sec ne sont pas prises en compte.

1.3.2.2) Principes de la méthode

1.3.2.2.1) Analyse statistique des intensités ou des hauteurs

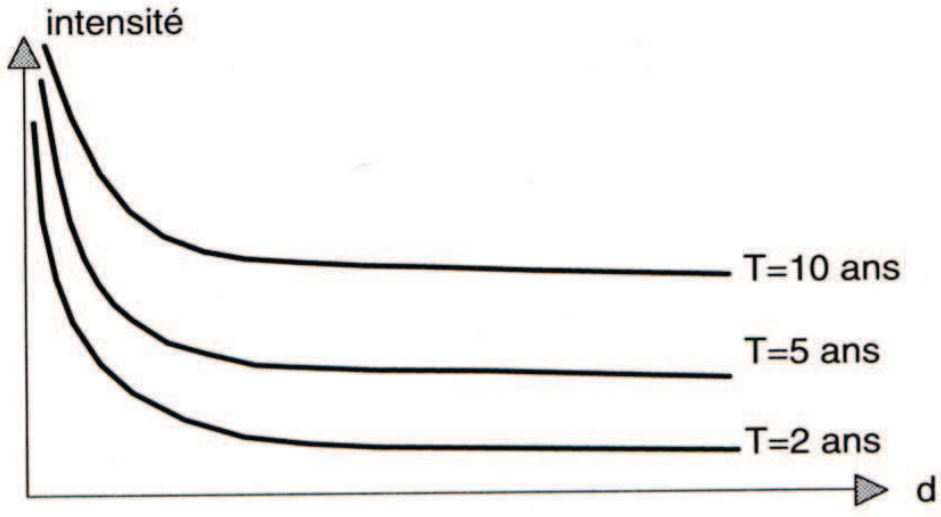


Figure 26 : Courbes Intensité-durée-fréquence, [Chocat B & al, 1997].

Sur un ensemble d'épisodes pluvieux mesurés pendant p années, les p intensités moyennes maximales i_{max} pour différents intervalles de temps k.Δt où Δt est le pas de temps de mesure

sont calculées. Un classement fréquentiel des valeurs i_{max} est alors réalisé. Il est ainsi possible de déterminer des courbes d'intensités moyennes maximales pour les durées d'analyse et des fréquences F (ou périodes de retour T) différentes (fig.26).

1.3.2.2.2) Détermination des courbes hauteurs-durée-fréquence (HDF)

Pour calculer le volume de la retenue, il est nécessaire de transformer ces intensités i_{max} (k.Δt, T) en hauteurs h (k.Δt, T) :

$$h\ (k.\Delta t,\ T) = i_m\ (k.\Delta t,\ T) * k.\Delta t \qquad \text{(éq 2)}$$

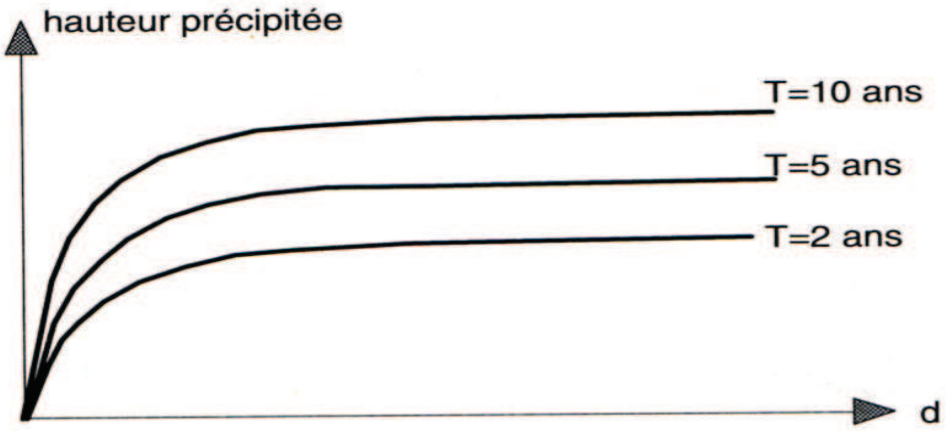


Figure 27: Courbes Hauteur-durée-fréquence, [Chocat B & al, 1997].

Ces courbes déterminées statistiquement représentent l'évolution des hauteurs précipitées pour différentes durées; on parle aussi de courbes « enveloppes » (fig. 27).

1.3.2.2.3) Détermination de la hauteur à stocker

On détermine toutes les valeurs fondamentales nécessaires au calcul :
la valeur Q du débit fuite (du projet) admissible à l'aval, en m^3/s,
la valeur Sa de la surface active du bassin versant, en ha.

On suppose ici que l'ouvrage a un débit de fuite constant Q_s que l'on transforme en un débit spécifique q_s (en mm/h) répartie sur la surface active, soit, en tenant compte de la concordance des unités :

$$q_s = ((Q_s * 3600) * 10^3) / (S_a * 10^4) \quad \text{(éq. 3)}$$

d'où $$q_s = (360 * Q_s) / S_a \quad \text{(éq. 4)}$$

avec q_s en mm/h ;

Q_s en m^3/s ;

S_a en ha

S_a est la surface active de ruissellement alimentant l'ouvrage de stockage. Elle est déterminée par le produit du coefficient d'apport C_a et de la surface totale du bassin versant drainé.

Ainsi on peut tracer conjointement la hauteur précipitée pour une période de retour donnée $h(k.\Delta t, T)$ et la courbe représentant l'évolution des hauteurs d'eaux évacuées $q_s.k.\Delta t$ en fonction des durées d'évacuation $k.\Delta t$ (fig. 28).

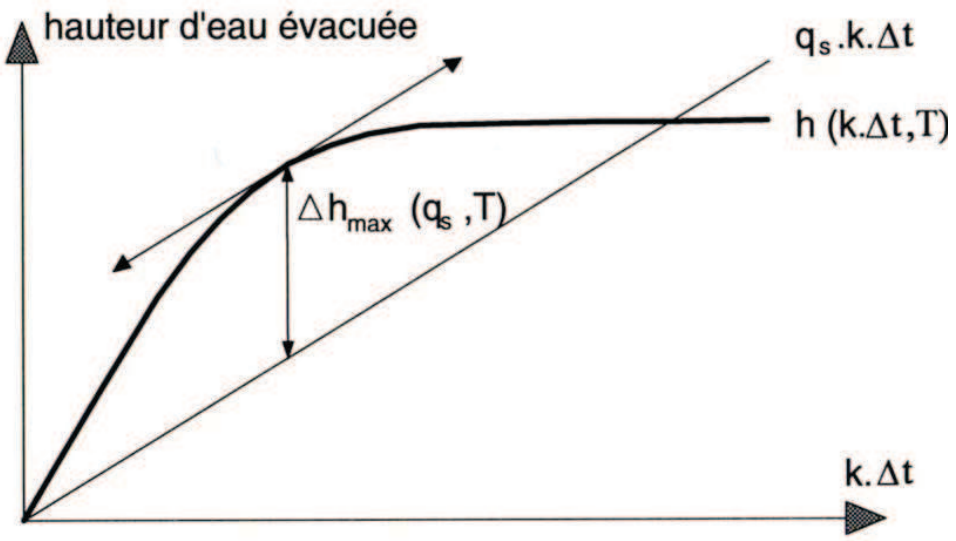


Figure 28 : Superposition de la courbe Hauteur-durée pour une fréquence choisie et de la courbe d'évacuation, [Chocat B & al, 1997].

Les différences Δh (q_s, T, $k.\Delta t$.) entre la courbe $q_s.k.\Delta t$ et h ($k.\Delta t$, T) correspondent aux hauteurs à stocker pour différentes durées $k.\Delta t$. Le maximum Δh_{max} (q_s, T) correspond à la hauteur totale à stocker. Le volume d'eau à stocker se détermine alors facilement par :

$$V = 10 * \Delta h_{max}(q_s, T) * S_a \quad \text{(éq. 5)}$$

avec V en m^3 ;

Δh_{max} en mm ;
S_a en ha.

En l'absence de données locales spécifiques à la méthode des pluies, il est possible d'utiliser soit des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) locales (ou plus exactement leurs ajustements pour diverses périodes de retour), confère paragraphe 2.2.2, soit directement les ajustements que l'on peut trouver dans l'Instruction Technique de 1977 (ajustement de Montana). Il faut ensuite construire les courbes hauteur-durée-fréquence à partir de ces courbes IDF. Différentes précautions doivent être prises. En particulier, les ajustements des courbes IDF ne sont généralement valables que pour une plage donnée de durées de pluie. Par exemple, les coefficients a et b de la formule de Montana utilisée dans l'instruction technique de 1977 pour le dimensionnement des réseaux de conduites n'est correcte que pour des durées de 5 minutes à 2 heures. L'extrapolation de ces courbes pour des durées plus grandes donne des résultats incorrects (généralement des volumes très importants), [Chocat B & *al,* 1997] ; [CERTU, 2003].

Il est donc conseillé de faire un effort important pour rassembler des données pluviométriques de bonne qualité et adaptée aux objectifs poursuivis.

1.3.2.2.4) Limites d'application de la méthode des pluies

Bien que l'emploi de cette méthode, fondée sur la seule analyse fréquentielle des hauteurs des pluies observées, soit assez simple, la méthode des pluies, s'agissant des valeurs à déduire pour les volumes à stocker, ne peut être utilisée que pour des débits de fuite forts et des vidanges de courtes durées. Aussi, son utilisation ne peut se faire dans un cas autre car [Desbordes M, 1985], montre que ce mode de calcul peut surdimensionner les ouvrages dans un rapport de 1 à 2.

Pour notre part nous utiliserons, au chapitre 3, cette méthode au-delà de ses limites d'utilisation afin de voir concrètement ce qui se passe sur le plan du dimensionnement.

1.3.3) Méthode des Abaques

Cette méthode encore appelée méthode des volumes dans l'Instruction technique de 1997, est fondée sur le calcul et l'analyse statistique des volumes à stocker. Son utilisation pratique est décrite ci-après.

1.3.3.1) Hypothèses de la méthode

Cette méthode repose sur les hypothèses suivantes, [Chocat B & *al,* 1997]:

- le débit de fuite de l'ouvrage de stockage est supposé constant ;
- il y a transfert instantané de la pluie à l'ouvrage de la retenue. Les phénomènes d'amortissement dus au ruissellement sur le bassin sont négligés. Cela veut dire que la méthode ne sera applicable que pour les bassins versants relativement petits.

1.3.3.2) Méthode pratique de calcul

On utilise ici les abaques de l'Instruction Technique de 1977 (fig. 29). Pour chaque région pluviométrique française (il en existe trois), un abaque a été tracé et permet de passer directement du débit de fuite, par unité de surface active, à la hauteur de stockage nécessaire pour la même unité.

Au début du phénomène, le débit de fuite n'est pas considéré comme constant. Par la suite, on admet que si « V_o » est la capacité pour laquelle ce débit de fuite devient sensiblement constant, la capacité totale « V » sera augmentée d'une fraction de « V_o » pour tenir compte de la montée du débit de fuite « Q » en début du phénomène.

On pose :
Q = débit de fuite en m^3/seconde,
S_a = surface active en hectares.

Aussi, la capacité totale « V » est obtenue en reportant « q_s » **(**éq 4**)**, hauteur équivalente, sur l'abaque, ci-après, des bassins de retenue correspondant à la région et sur la courbe de période de retour choisie.

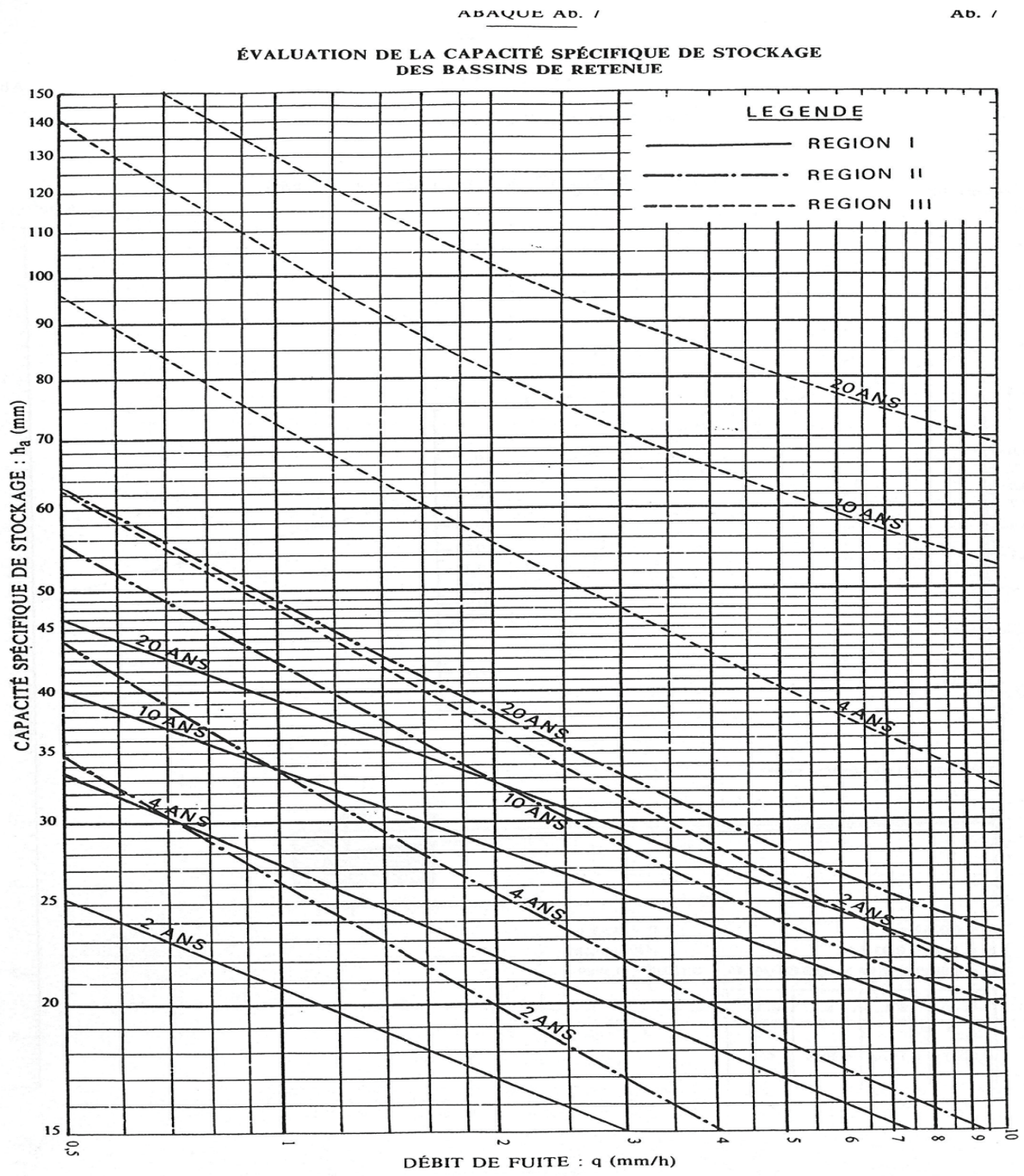


Figure 29 : Abaque de l'Instruction technique de 1977.

La lecture de cet abaque permet de déduire en ordonnée la capacité spécifique de stockage « h_a » (mm), puis la capacité totale de rétention « V » par la formule :

$V\ (m^3) = 10 * h_a * S_a$ (+ fraction « V_o » correspondant au début du phénomène) (éq. 6)

Dans l'application de cette méthode au chapitre 3 de notre étude, nous admettons que le débit de fuite est constant au début du phénomène et donc que par simplification, $V_o = 0$.

L'Instruction technique de 1977 donne par ailleurs des coefficients permettant de passer des débits et volumes de stockage décennaux aux débits et volumes de stockage de périodes de retour inférieurs (1an, 5ans) ou supérieurs (50 ans ou 100 ans) :

$V_1 = 0{,}45\ V_{10}$ $V_5 = 0{,}8\ V_{10}$ $V_{50} = 1{,}6\ V_{10}$ $V_{100} = 2\ V_{10}$

1.3.3.3) Limites d'application de la méthode

Malgré la prise en compte des chroniques pluvieuses complètes, la méthode des volumes est encore limitée pour des bassins versants de petites tailles car l'hypothèse de base de cette méthode, tient dans le fait qu'il y a transfert instantané de la pluie à l'ouvrage de retenue . Cette règle ne s'applique uniquement qu'aux petits bassins versants.

L'abaque ne permet pas de dimensionner des bassins de retenue pour des périodes de retour supérieures à 20 ans. Toutefois, les coefficients présentés précédemment permettront de déterminer en première approximation les volumes de stockage de période de retour supérieur à 20 ans. Cependant**,** le [CERTU, 2003] estime que ces abaques peuvent conduire à un sous-dimensionnement des ouvrages de l'ordre de 30% si le débit de vidange est faible. La difficulté majeure de cette méthode réside dans le fait de pouvoir rassembler les données pluviométriques locales pour la construction d'abaques locaux.

Enfin, le [CERTU, 2003] conclut que la méthode reste approximative du fait des hypothèses simplificatrices retenues pour son élaboration. La méthode des abaques reste malgré tout très pratique pour les bassins versants de petites tailles (lotissement, ZAC,…).

1.3.4) Méthodes dynamiques ou de simulation

En hydrologie urbaine, le **[**CERTU, 2003] définit le « modèle » comme étant : *« une représentation mathématique ou physique du cycle de l'eau construite dans le but de mieux comprendre son fonctionnement et de le faire évoluer. »*

La modélisation, par exemple, de la pluie sera donc différente selon le but recherché (prévision ou recherche d'impact). A ce propos, le [CERTU, 2003] ajoute : « *un modèle n'est donc que la représentation fragmentée d'une réalité et non de la réalité. »*

Le lecteur trouvera plus amples informations sur les différents modèles existants dans le Guide « La Ville et son Assainissement » du [CERTU, 2003].

La modélisation a ainsi donné naissance aux méthodes dites détaillées ou dynamiques ou encore de simulation. Ces méthodes reposent sur une double décomposition à la fois du bassin versant en sous-bassins versants, tronçons, etc… et du phénomène de transformation pluie-débit en sous-phénomènes s'appliquant sur chacun des sous-éléments. A ce propos, le [CERTU, 2003], dans son Guide « La ville et son assainissement » stipule : *« il est nécessaire de représenter les transformations de pluie en débit de façon à obtenir un hydrogramme à l'exutoire de chaque sous-bassins versants. Traditionnellement, la modélisation de cette transformation fait appel à deux opérateurs supposés s'appliquer successivement : les fonctions de production et les fonctions de transfert ».*

Les fonctions de production (confère paragraphe 2.3.1.1) ont pour but de tenir compte des pertes au ruissellement et de fournir comme grandeur l'hydrogramme de pluie nette. La qualité principale attendue d'une fonction de production est de reproduire correctement le volume ruisselé à l'exutoire. On raisonne souvent en pertes au ruissellement, les pertes étant constituées par la partie de la pluie qui ne s'écoule pas vers l'exutoire.

Les fonctions de transfert (confère paragraphe 2.3.1.2) représentent la déformation du signal de pluie lors de son transfert dans le bassin versant. Les modèles sont toujours conservatifs. Ceci signifie que le volume de l'hydrogramme correspondant à la pluie nette (entrée de la fonction de transfert) est égal au volume de l'hydrogramme à l'exutoire du sous-bassin versant (sortie de la fonction de transfert). Le [CERTU, 2003] estime : *« dans un système réel, les phénomènes contribuant à la déformation du signal sont extrêmement complexes et il n'est pas généralement raisonnable de vouloir les représenter tous dans le détail. On s'oriente toujours vers des modèles conceptuels issus d'une approche heuristique ».*

Ces méthodes utilisent en entrée des pluies de projet ou des pluies historiques et permettent ainsi de déterminer, en différents points d'un bassin versant, les hydrogrammes de crue

produits ainsi que leurs caractéristiques associées (évolution des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement en fonction du temps). Les résultats obtenus sont statistiquement analysés de façon à associer un risque d'occurrence à l'une des caractéristiques hydrologiques.

La nature des données utilisées en entrées de ces modèles a été préconisée par le [CERTU, 2003] qui estime : *« Pour analyser la réponse à des pluies de caractéristiques différentes (faibles, moyennes, fortes,), mais non exceptionnelles, la meilleure solution consiste à prendre un ensemble représentatif de pluies de référence réelles mesurées sur le site ou sur un site voisin et qui seront représentatives de la pluviosité locale.*

En cas d'indisponibilité de ce type d'entrée (liée au coût financier de leur obtention), on utilisera un ensemble de pluies de projet. Pour analyser la réponse à des pluies exceptionnelles (analyse des crues extrêmes), à défaut d'observations locales, il est préférable de prendre des pluies très violentes observées sur des sites de climats comparables. La prise en compte de la répartition spatiale de la précipitation est indispensable dès que la surface totale de la zone étudiée dépasse 3000ha ».

1.3.4.1) Les séries chronologiques de pluies et leurs dérivés

Les séries chronologiques de pluies (confère paragraphe 2.2.1) sont par définition : « *une succession d'événements pluvieux observés sur un site, pouvant être utilisées en entrée d'un modèle hydrologique en tenant compte des périodes de temps sec qui les séparent* », [Chocat B & *al,* 1997]. Ce sont donc des données d'entrée constituées à partir de mesures pluviographiques effectuées en continu sur une durée de plusieurs années ou dizaines d'années. Il est ainsi constitué une base de données contenant les hyétogrammes et les caractéristiques globales (dates, durées, intensités, etc) de tous les événements pluvieux mesurés. Ces séries permettent d'évaluer la fréquence et l'importance des rejets urbains de temps de pluie et de tenir compte de la variabilité du phénomène dans ses différentes composantes temporelles.

Un autre champ avéré d'utilisation de ces séries réside dans l'analyse des crues exceptionnelles. Le manque généralisé de données et la particularité des situations climatiques engendrant les pluies extrêmes rendent difficile la construction des pluies de projet représentatives d'événements ayant des périodes de retour de 30, 50 ou 100. Une façon

démonstrative de résoudre ce problème consiste à prendre comme entrée un événement pluvieux observé sur un site ayant des caractéristiques climatiques voisines.

Cependant, l'utilisation de ce type de données en entrée d'un modèle dynamique est conditionnée par la validité statistique de la durée de la série chronologique qui devra être suffisante par rapport à la période de retour de dysfonctionnement pour laquelle on souhaite se protéger. Si la durée de la série chronologique est suffisante, il n'en demeure pas moins que le temps de simulation peut devenir très rapidement important. Aussi on essaye de limiter le nombre de pluies à simuler (et, de fait, l'information sur le temps sec est perdue). Pour ce faire, trois techniques sont souvent utilisées :

- simuler que des pluies dépassant un seuil donné (tab. 1) . C'est la méthode de référence de Météo France qui utilise les seuils donnés dans le tableau ci-après indépendamment du lieu et de la durée d'observation,
- les valeurs maximales annuelles, soient autant de valeurs que d'années d'observation,
- les P plus fortes valeurs, avec P généralement pris égal au nombre d'années d'observation.

Durée de cumul	Hauteur minimale (mm)	Intensité équivalente (mm/h)
6 mn	4	40
15 mn	6	24
30 mn	7	14
1h	9	9
2h	11	5,5
3h	14	4,7
6h	17	2,8
12h	21	1,7
24h	26	1,1
48h	36	0,7
96h	48	0,5

Tableau 1: Seuils de sélection des intensités moyennes maximales retenus par Météo France pour différentes durées de cumul, [Chocat B & *al,* 1997].

1.3.4.2) Les pluies de projet

1.3.4.2.1) Définition générale

« Il s'agit d'une pluie fictive, définie par un hyétogramme synthétique (courbe d'évolution de l'intensité en fonction du temps) et statistiquement équivalente aux pluies réelles (bien que jamais observée). On lui affecte une période de retour qui est celle d'un ou plusieurs de ses éléments constitutifs : hauteur totale précipitée, hauteur précipitée sur un intervalle de temps inférieur à la durée totale (période intense), etc. », [STU, 1983].

La pluie de projet fut longtemps utilisée exclusivement pour le dimensionnement des collecteurs. Depuis peu ces pluies de projet sont utilisées dans certaines études de dimensionnement des bassins de rétention, [STU, 1983] ; [CERTU, 2003] ; [Xia Z, 2005]**.**

Comme toute méthode, la méthode des pluies de projet présente certains inconvénients et avantages. A ce propos, [STU, 1983] rappelle que : « *Les avantages et inconvénients que présente l'utilisation des pluies de projet résultent essentiellement de leur caractère synthétique* ». En effet, résumer en un seul événement unique l'ensemble de l'information d'une série d'observations pluviométriques présente l'avantage, quant à l'exploitation de cette information, de traiter une quantité de données moindre et par l'occasion de réduire le volume des calculs à effectuer. De plus, le fait que les valeurs des paramètres caractéristiques de ces pluies de projet (durée totale t_3, durée de la période de pluie intense t_1, position de la pointe d'intensité par rapport au début de la pluie t_2, l'intensité moyenne pendant la période de pluie intense, l'intensité moyenne en dehors de la période de pluie intense, pour les modèles double triangle asymétrique), se déterminent par analyse statistique confère une représentativité certaine de ces pluies de projet, [STU, 1983].

Quant aux inconvénients, [STU, 1983] cite : *« Ces évènements synthétiques ne peuvent pas traduire la réalité de la variabilité du phénomène de pluie, à une échelle fine de temps. De plus ils ne prennent en compte d'autres aspects de la pluviométrie réelle qui peuvent avoir une incidence sur le ruissellement et donc sur le dimensionnement des ouvrages. C'est le cas notamment de l'état initial de l'humidité des surfaces perméables ou du stock dans les bassins de retenue, variables liées à la chronologie des évènements pluvieux ».*

1.3.4.2.2) Méthode de construction de la pluie de projet

Les précipitations observées sont de trois types à savoir les précipitations de convection (orage ou pluies équatoriales), les précipitations orographiques (provenant de l'océan) et les précipitations cycloniques (front froid-front chaud). La modélisation des pluies en France est d'autant difficile que les trois types de pluies y existent : il est donc difficile d'attribuer une forme unique et représentative de pluie dans un tel pays. La seule alternative qui s'offre de fait aux hydrologues est d'utiliser une approche plus complexe qui permet de prendre en compte la grande diversité morphologique des hyétogrammes mesurés.

L'élaboration des pluies de projet repose sur l'analyse statistique des divers éléments d'un épisode pluvieux : durée de pluie, hauteur maximale précipitée sur un intervalle de temps, position de l'intensité au sein de l'averse car l'objectif recherché est d'associer un risque à une pluie donnée.

Les valeurs de l'intensité i(T, d), la durée d et la période de retour T de la pluie sont donc déduites des lois de probabilité ajustées sur des observations de ces variables : c'est le domaine d'utilisation privilégié des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) qui représentent les relations entre ces variables. Elles sont généralement décrites par la formule de Montana :

$$i\,(T,d) = a\,(T).d^{b(t)} \qquad \text{(éq. 7)}$$

Cette relation permet ainsi de déterminer une variable en fonction des deux autres grâce aux deux coefficients « a » et « b » dits de Montana à partir desquels on peut concevoir une pluie synthétique censée représenter une pluviométrie locale pour un risque donné. Pour chaque région pluviométrique Française, l'Instruction Technique de 77 a déterminé les coefficients de Montana qui sont présentés dans le tableau suivant (tab. 2):

Période de retour	Région 1		Région 2		Région 3	
	a	b	a	B	A	b
10ans	5,9	-0,59	6,7	- 0,55	6,1	- 0,44
5ans	5,0	- 0,61	5,5	- 0,57	5,9	- 0,51
2ans	3,7	- 0,62	4,6	- 0,62	5,0	- 0,54
1an	3,1	- 0,64	3,5	- 0,62	3,8	- 0,53

Tableau 2 : Coefficients de Montana pour les trois régions administratives françaises, Instruction Technique de 77

1.3.4.2.3) Types de pluies de projet utilisés en France

Créer une pluie, synthèse de la pluviométrique locale, à partir des données pluviométriques n'est pas une entreprise facile. Aussi M.Desbordes, 1980**,** prend le parti de rechercher à quels paramètres pluviométriques les modèles décrivant les écoulements sur les bassins versants sont sensibles. Une fois ces paramètres définis, il ne reste plus qu'à créer une pluie ne tenant compte que de ceux-ci. Cette démarche a ainsi abouti à la mise en œuvre d'un modèle double triangle asymétrique (fig. 30).

A) Pluie de projet double triangle

Le concept de pluie de projet double triangle asymétrique part d'un double constat fait par [Desbordes M, 1980]:
les événements pluvieux réels provoquant des désordres dans les réseaux d'assainissement pluvial sont généralement constitués d'une période de pluie intense relativement courte située à l'intérieur d'une séquence de pluie de quelques heures**.**
le point précédent mis à part, aucune forme particulière de distribution temporelle des intensités n'est plus probable qu'une autre.

[Desbordes M, 1980] a opté pour une forme de pluie de projet en raisonnant non plus par rapport au phénomène pluviométrique, mais uniquement en fonction des réponses des bassins versants soumis à un épisode pluvieux. L'idée de base a été de choisir une forme simple telle qu'une erreur sur le paramètre principal du bassin versant à savoir le lag-time K ait le moins d'influence possible sur l'obtention des valeurs hydrauliques à la sortie du bassin versant. Ce lag-time représente le décalage temporel entre les centres de gravité des signaux d'entrée (la pluie) et de sortie (hydrogramme à l'exutoire).

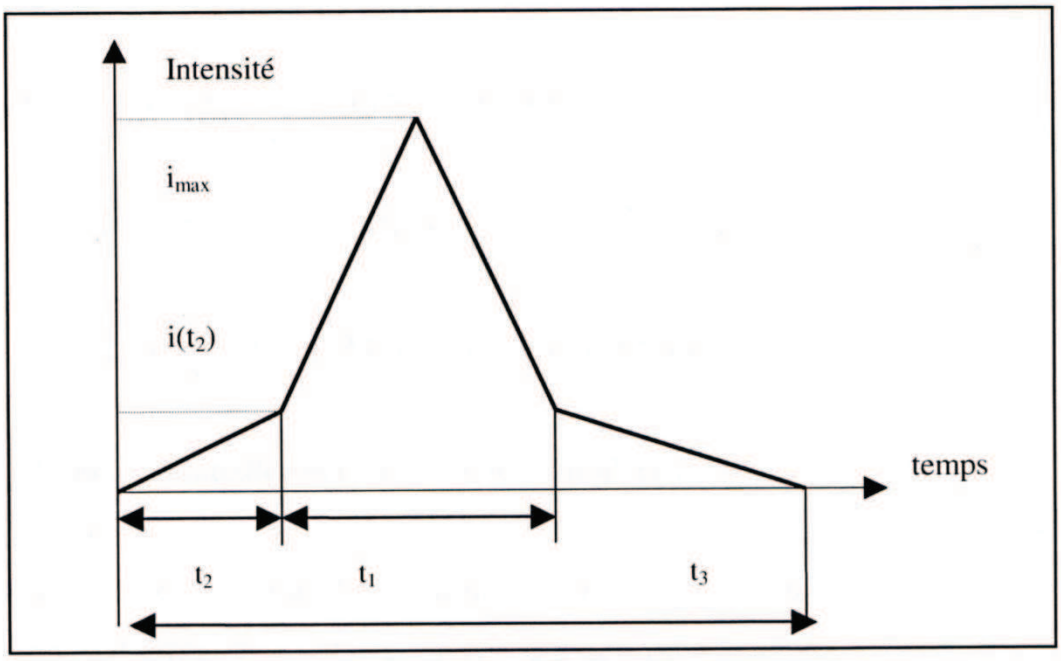


Figure 30 : Pluie de projet double triangle, [Chocat B & al, 1997].

A travers une étude concernant l'emploi de cette pluie de projet effectuée à l'INSA de Lyon, [Chocat *& al,* 1981], préconisent d'utiliser une forme symétrique car les valeurs de débit de pointe calculées sont peu sensibles aux valeurs de t_2 et t_3. Par ailleurs, Chocat rattache la durée totale de la pluie et la durée de période de pluie intense aux caractéristiques du bassin versant sur lequel on applique la pluie de projet. La construction de cette pluie de projet suit alors les formules suivantes :

$$t_1 = 0{,}5 * K \qquad \text{et} \qquad t_1 + t_2 + t_3 = 10 * t_1 \qquad \text{(éq. 8) et (éq. 9)}$$

$$Imax = (t_1/2)^b * 120 * a * 2^b * ((0{,}1^b - 1) / (0{,}9 * 0{,}1^b)) \qquad \text{(éq. 10)}$$

$$i\,(t_2) = (t_1/2)^b * 120 * a * 2^b * (1-0{,}1^{b+1}) / (0{,}9 * 0{,}1^b) \qquad \text{(éq. 11)}$$

avec t_1 en minutes, A surface d'abattement de la pluie en ha, i_{max} en mm/h, a et b coefficients de Montana et K le lag-time en mn.

En ce qui concerne le dimensionnement des bassins de retenue, [Xia Z, 2005] a montré que l'utilisation du modèle double triangle ne semble pas adapté au dimensionnement des bassins de rétention. En effet, les résultats qu'il a obtenus montrent (fig. 31, 32, 33) que:

1) Les volumes de stockage calculés ne présentent pas de maximum,
2) Les volumes de stockage obtenus par la simulation des séries chronologiques de pluies ne sont pas toujours supérieurs à ceux de la méthode de Gumbel (confère paragraphe 2.2.2.3.4) pour chaque période de retour retenue,
3) Plus la période de retour étudiée est grande, plus le nombre de pluie de projet donnant une valeur de volume supérieure à celle obtenue par la loi de Gumbel est important.

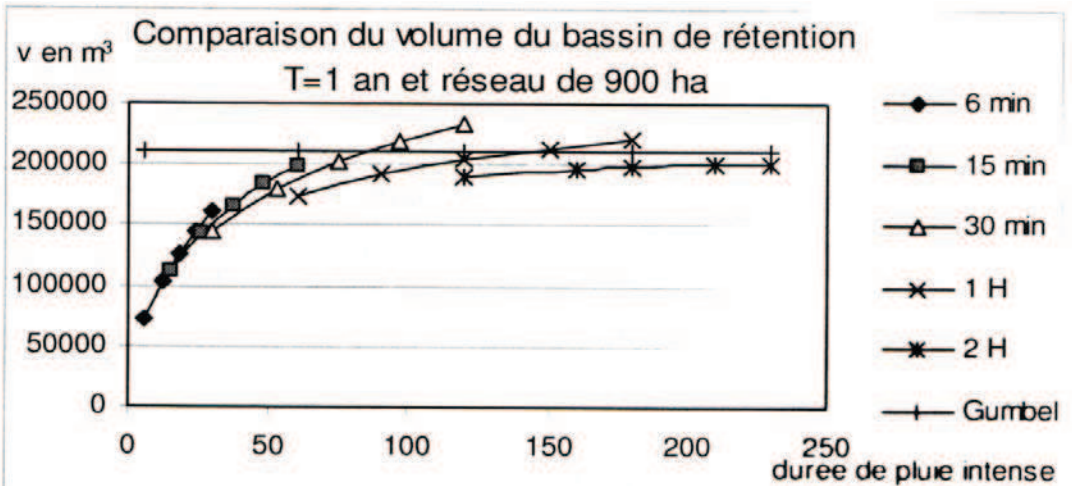


Figure 31 : Volume de rétention pour la période de retour 1 an, [Xia Z, 2005].

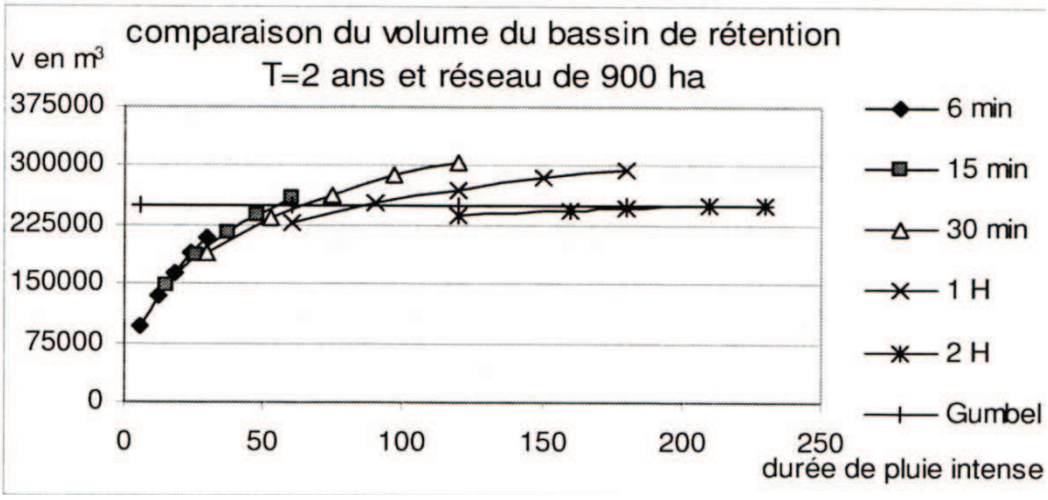


Figure 32 : Volume de rétention pour la période de retour 2 ans, [Xia Z, 2005].

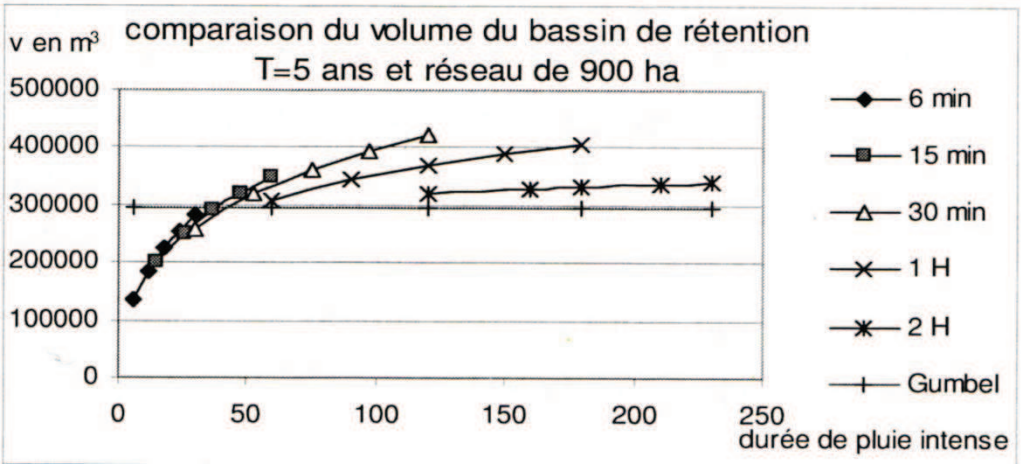


Figure 33 : Volume de rétention pour la période de retour 5 ans, [Xia Z, 2005]

Ces résultats ne sont donc pas pertinents pour garantir la période de retour de débordement et le modèle n'est pas fiable quant au dimensionnement des volumes de rétention. De plus, ces résultats ne permettent d'expliquer ni la marge d'erreur par rapport au dimensionnement correct, ni le sens de l'erreur.

B) Pluie de projet simple triangle

Le modèle de pluie simple triangle a été développé par [Yen et Chow ,1980]. Il s'agit d'une forme asymétrique. Cependant, en France, c'est la forme symétrique (fig. 34) développée par Chocat qui connaît un usage courant. Ce modèle est défini par deux paramètres : la durée totale t et l'intensité maximale i. Ces deux paramètres sont déterminés par les formules suivantes :

$$t = 106 * A^{0,441} * \exp(4,23*b) \qquad \text{(éq. 12)}$$

$$i = 120 * a * t^{b} \qquad \text{(éq. 13)}$$

avec t la durée de la pluie en mn, i l'intensité maximale en mm/h, la surface d'abattement de la pluie en ha et a, b les coefficients de Montana.

Le modèle simple triangle est généralement utilisé sur les bassins versants de petite taille pour le dimensionnement des conduites [Petit L, 1999]**.** Par ailleurs, [L.Curry**,** *de l'U.S Engineer District de Louisville Kentucky*], a utilisé le modèle simple triangle sur des bassins versants de

10 km^2 pour dimensionner les ouvrages de rétention et a montré que le modèle permettait d'obtenir des résultats corrects.

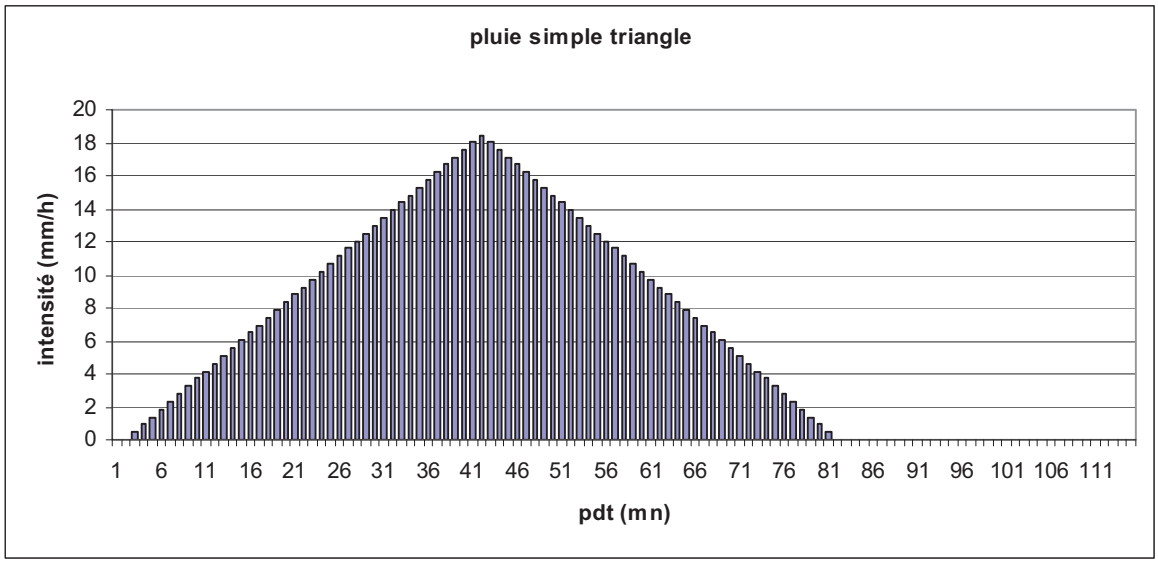


Figure 34 : Pluie de projet simple triangle

C) Pluie de projet rectangle

Le modèle rectangle est une forme d'hyétogramme de durée t avec une intensité constante i (fig. 35). Dans son document « la Ville et son assainissement », le CERTU 2003] fait remarquer que ce type de pluie de projet est utilisé pour calculer les débits. Et à ce propos, Petrovic et Despotovic, cité dans [Einfalt T & *al,* 1998**]** ont montré dans une étude de comparaison des débits de pointes simulés et observés, utilisant les pluies historiques, dans une ville de la Yougoslavie, que la pluie de projet rectangle sous-dimensionnait les débits de pointe. Ils concluent que les écarts entre débits simulés et observés sont largement imputables aux conditions initiales d'humidité des sols.

Enfin, [Einfalt T & *al,* 1998] et le [CERTU, 2003] font remarquer que cette pluie de projet et bien d'autres peuvent êtres utilisées en entrée des modèles numériques plus détaillés.

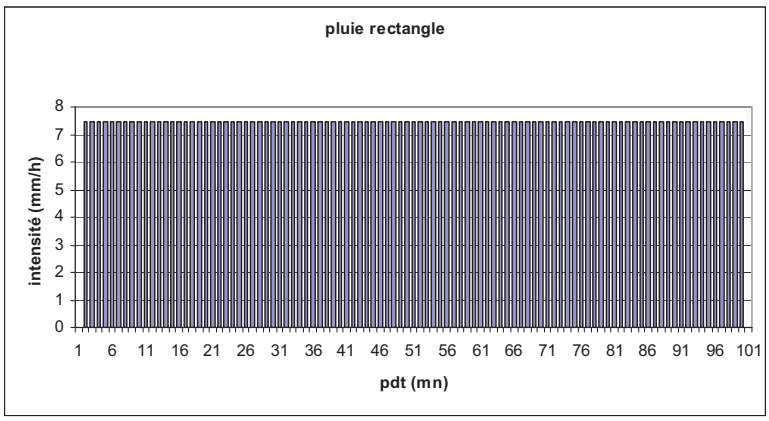


Figure 35 : Pluie de projet rectangle.

1. 3.5) Conclusion

Les méthodes ponctuelles de dimensionnement présentées dans ce chapitre montrent que si la méthode des pluies et des volumes sont construites sur deux approches différentes, respectivement l'analyse statistique des hauteurs de pluie à stocker et l'analyse statistique des volumes de stockage, elles présentent toutes deux une mise en œuvre aisée. Cependant, elles restent soumises à des limites d'application très fortes et ne sont pas a priori fiables pour le calcul des volumes de stockage sur des bassins versants de grandes tailles. De plus, les méthodes des pluies et des volumes ont tendance respectivement à sur-dimensionner et sous-dimensionner les ouvrages.

Quant aux méthodes dynamiques, elles permettent de mieux appréhender le fonctionnement des systèmes hydrologiques et hydrauliques étudiés tout en offrant la possibilité d'attribuer une signification physique à certains paramètres facilitant ainsi l'utilisation et le calage de ces modèles. Elles utilisent en entrée des données de nature différente (les pluies de projet et/ou des séries chronologiques de pluies). Ces données présentent l'avantage l'une par rapport à l'autre d'être des alternatives. Cependant, le principal reproche fait à la pluie de projet qui revêt différentes formes (double triangle, simple triangle et rectangle) est son caractère synthétique qui ne permet de prendre en compte ni la variabilité du phénomène de pluie, ni les possibles interactions entre le temps de vidange et la durée de temps sec séparant deux évènements pluvieux successifs. Alors que pour les séries chronologiques de pluies, leur utilisation est limitée par le coût financier de leur acquisition, la masse globale de données à gérer et les compétences requises pour l'analyse des résultats.

Chapitre 2 : Méthodologie

2.1) Introduction

Au paragraphe 1.2 nous avons présenté différentes pluies de projet définies chacune par sa durée totale, la hauteur correspondante lue sur la courbe I.D.F (confère paragraphe 2.2.2) et une courbe d'évolution des intensités en fonction de la durée appelée hyétogramme. La hauteur et l'intensité sont fonction des coefficients de Montana « a » et « b » issus des courbes I.D.F. Nous envisageons d'utiliser le concept de pluie de projet pour dimensionner les ouvrages de stockage en utilisant successivement la forme simple (pluie de projet rectangle) et la forme complexe (pluie simple triangle), la forme double triangle ayant montré ses limites ne sera pas utilisée (confère paragraphe 1.3.4.2.3).

Aussi, par analyse statistique d'un ensemble de pluies mesurées (qui permet entre autre de déterminer leur loi de distribution), nous cherchons à définir le profil de pluie de projet adapté à notre étude. Par la suite, en simulant le comportement hydrologique de bassins versants par un modèle de réservoir linéaire (confère paragraphe 2.3), nous comparons les résultats obtenus d'une part avec les séries observées et d'autre part avec les pluies de projet, citées précédemment, afin de retenir la durée totale de la pluie de projet permettant d'obtenir une estimation correcte du volume de stockage à partir de la fonction de transfert du modèle de réservoir linéaire. Ce volume de stockage doit être juste supérieur à celui obtenu avec les séries chronologiques pour la période de retour T choisie pour la pluie de projet.

Enfin, nous cherchons à relier calculer cette durée au problème de dimensionnement posé. Pour ce faire, nous effectuons une étude de sensibilité de cette durée sur les caractéristiques du bassin versant et de l'ouvrage de stockage. Nous réalisons à cet effet un plan d'expériences qui permet de planifier tous les essais nécessaires à la résolution de notre problème. Il s'agit donc d'établir expérimentalement une relation mathématique entre cette durée de pluie et les caractéristiques de l'ouvrage de stockage et du bassin versant.

Nous présentons dans un premier temps les données de base utilisées, leurs finalités ainsi que les différentes méthodes de calage des données. En second temps nous présentons l'outil de modélisation et enfin le plan d'expériences.

2.2) Les données de base utilisées

Nous utilisons, ici, une série de pluies issue de la station de mesure de Gerland de la communauté urbaine de Lyon, en entrée de nos simulations. Ces données sont des enregistrements originaux de hyétogrammes au nombre de 1567 répartis sur 16 années. Ce sont des données de bonne qualité car mesurées à des pas de temps de quelques minutes (6 minutes) et ne présentant pas d'anomalies particulières.

2.2.1) traitement appliqué dans l'approche des séries chronologiques

L'utilisation des séries chronologiques permet la comparaison entre phénomènes hydrologiques observés et modélisés en ayant préalablement pris soin de définir la loi statistique qui permettra d'analyser de manière fréquentielle les variables hydrologiques obtenues après simulation. C'est donc à cette fin que nous les utilisons dans notre étude.
La représentativité temporelle dans cette approche n'est admise qu'à deux conditions:

- La durée d'observation doit être plus longue que la période de retour étudiée (2 à 5 fois selon la variabilité climatique interannuelle), [Paturel, 1991],
- L'échantillon de pluies doit comporter suffisamment d'individus (au moins quelques dizaines, souvent de l'ordre de 50) pour tenir compte de la diversité des situations climatiques et de la diversité des formes de précipitations, [Chocat & *al*, 2006].

Par exemple**, [**Schilling, 1991] estime qu'une série de pluies de 20 ans serait nécessaire pour le dimensionnement hydraulique décennal des ouvrages de drainage urbains. Par ailleurs [Cabane, 2001], ayant estimé les incertitudes sur les rejets de temps de pluie des réseaux d'assainissement unitaires à partir d'une série de mesures de 11 années de pluies, arrive à la conclusion que l'incertitude associée à la lame d'eau annuelle déversante décroît logiquement avec le nombre d'années de mesure. En effet, il observe que l'incertitude diminue rapidement au début (de 18% pour une année à 10% pour cinq ans) et beaucoup lentement par la suite (10% à 5% entre cinq et dix ans de mesure). Il conclu enfin qu'une durée de cinq ans paraît être un minimum en dessous duquel il ne faudra pas descendre pour les estimations de rejets de temps de pluie.

A ce propos, [Aires & *al*, 2003] relèvent cependant que ces contraintes diffèrent d'une région

à une autre et que 5 ans sont insuffisants en région méditerranéenne (sujette à des forts orages) pour les ouvrages de dépollutions.

Pour l'étude qui nous concerne à savoir le dimensionnement des ouvrages de stockage et qui demande de se protéger contre les risques de dysfonctionnement de période de retour de 10 ans ou 20 ans, [Chocat & *al*, 2006] estiment que les durées des séries doivent être beaucoup plus longues et que si une durée de mesures de 30 ans constitue un minimum, une durée de 70 ans est souhaitable pour estimer correctement un risque décennal.

La durée d'observation de nos données (1567 hyétogrammes) est de 16 ans mais dans toute notre étude nous effectuons des simulations pour des périodes de retour de 1an ; 2ans ; 5ans et 10 ans. Compte tenu de ce qui précède, les résultats que nous obtiendrons sur des variables hydrologiques, calculés sur la période d'occurrence de 10 ans pourraient être incertains mais ils auront l'avantage de donner un ordre de grandeur.

Nous présentons ci-après quelques uns de ces hyétogrammes remarquables car présentant les plus fortes intensités et définis au pas de temps de 6 minutes (fig. 36 à 38):

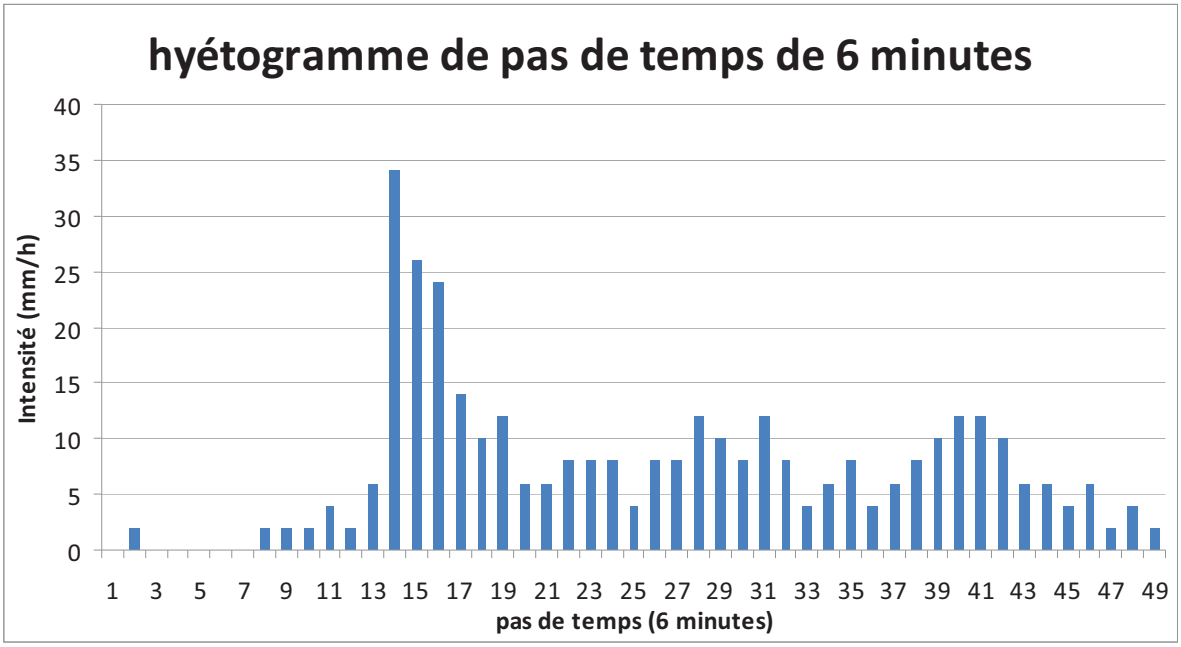


Figure 36: Hyétogramme du 23/11/2000

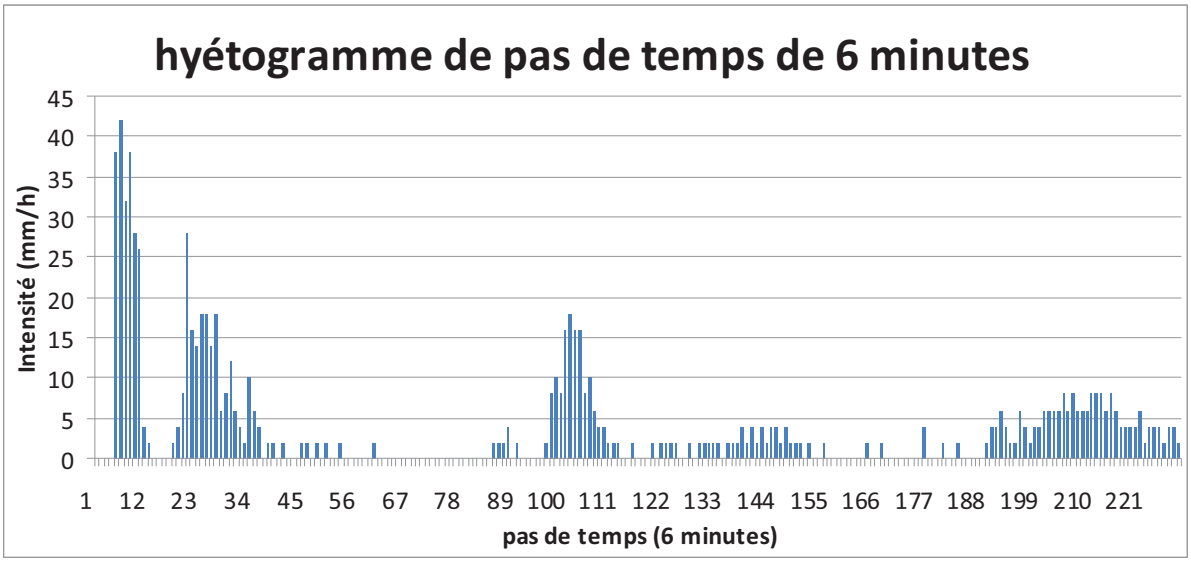


Figure 37 : Hyétogramme du 14/07/2001

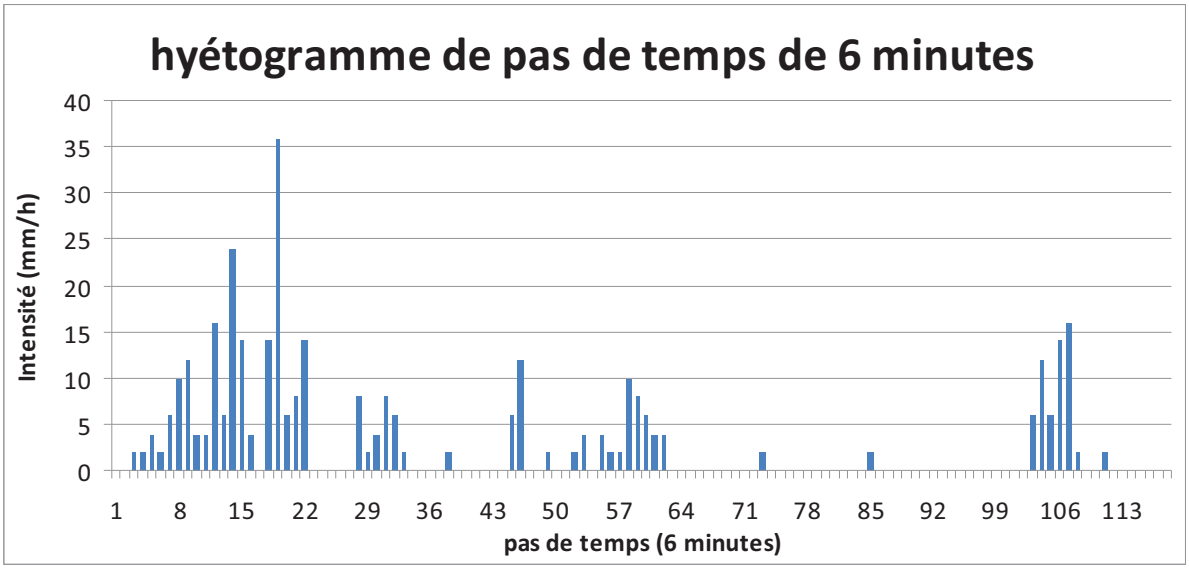


Figure 38: Hyétogramme du 20/10/2001

Remarque :

Un autre type de données, pouvant être utilisées en entrée des modèles de simulation, est la pluie historique définie dans le Guide du CERTU, 2003, comme étant *« un événement pluvieux observé sur un ou plusieurs postes pluviométriques et ayant provoqué localement des ruissellements importants. »*

Cependant, le principal reproche fait à ce type de données est qu'il n'est pas possible

d'associer une période de retour aux débits calculés. Néanmoins, les données historiques peuvent être utilisées en guise de comparaison. En effet, Petrovic et Despotovic cités dans [Einfalt T & *al,* 1998] ont décrit l'application des données de pluies historiques sur un bassin versant expérimental d'une ville de Yougoslavie. Ils ont montré que la fréquence de distribution des débits simulés diffère légèrement de la distribution enregistrée (observée). Ils concluent que cette différence est imputable aux conditions initiales d'humidité du sol.

2.2.2) Traitement appliqué dans l'approche des courbes IDF

Les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) représentent un outil très employé pour à la fois dimensionner les ouvrages mais également effectuer des estimations régionales ou locales des précipitations extrêmes, [Madsen H & *al,* 1998] ; [Roux, 1996] ; [Xia Z, 2005].

Ces courbes sont la représentation de relation entre les intensités, les durées et les périodes de retour d'un évènement pluvieux. Elles sont généralement décrites par la formule de Montana (éq. 7), paragraphe 1.3.4.2.2**.** Elles permettent donc de définir un paramètre en fonction des deux autres grâce aux deux coefficients « a » et « b » dits de Montana. D'autres formules existent telles que la formule de Talbot ou de Keiffer-Chu mais elles sont plus rarement utilisées en France.

Il est question dans cette approche de présenter l'étude statistique des données de mesures qui est un préalable à la construction d'une pluie de projet. Aussi, disposant de 16 années de mesures effectuées sur des pas de temps de 6 minutes à la station de Gerland, nous effectuons une analyse statistique de ces mesures dans l'optique de construire des pluies de projet. En effet, notre but étant d'associer un risque à une pluie donnée, une approche statistique nous paraît indiquée. Elle se concrétise en effet par la construction des courbes IDF obtenues à partir d'un dépouillement statistique des données de la station de Gerland.

La construction de ces courbes IDF passe par trois phases : une phase de conditionnement des données suivie d'une phase de constitution de l'échantillon des maxima et enfin d'une phase d'ajustement.

2.2.2.1) Conditionnement des données

Il s'agit ici de caractériser pour chaque événement de la série chronologique l'intensité moyenne maximale c'est-à-dire que nous cherchons les maxima correspondant aux différentes durées de cumul que nous avons retenues à savoir 6mn ; 12mn ; 18mn ; 24mn ; 30 mn; 60mn ; 120 mn; 240mn ; 360mn ; 480mn. Pour ce qui est de la plus petite durée (6mn) c'est-à-dire celle qui correspond au pas de temps de mesure, l'intensité moyenne maximale est simplement la plus grande valeur mesurée pendant l'événement.

Dans cette étude de conditionnement, nous faisons le choix d'une origine variable de date de mesure qui permet contrairement à une origine fixe de date de mesure d'éviter une sous-estimation des maxima (fig. 39). Par ailleurs, [STU, 1986] estime que cette sous-estimation des maxima peut atteindre 10%. Le dépouillement à origine variable consiste à rechercher pour chaque événement j, de la série chronologique, une date origine $t_j = t_o + n_j.dt$ telle que l'intensité moyenne $I_k\,(t_j + k.dt)$ soit la plus grande de l'événement.

avec dt pas de temps de mesure, n_j numéro d'ordre de mesure, t_o date de la première mesure et k.dt temps multiple de dt.

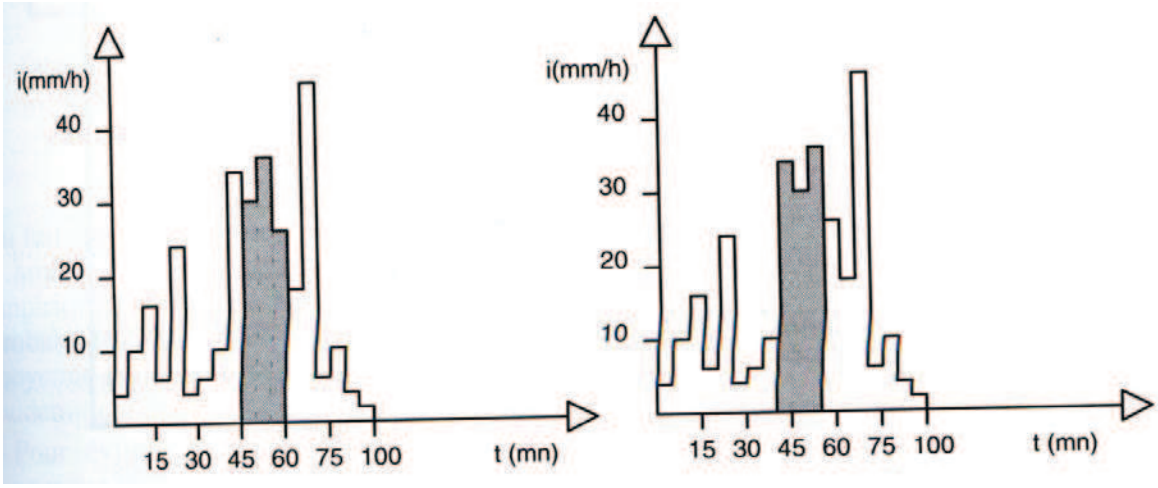


Figure 39: Exemple de dépouillement d'un hyétogramme à origine fixe et à origine variable, Chocat et al, 1997.

Dans cet exemple donné par [Chocat B & *al,* 1997] (fig.39) pour une pluie connue avec un pas de temps de 5 minutes et où on recherche l'intensité moyenne maximum en 15 minutes, on trouve, dans le cas d'un dépouillement à origine fixe, une intensité maximum entre 45 et 60 minutes de 38 mm/h. En revanche, dans le cas du dépouillement à origine variable, on trouve un maximum entre 40 et 55 minutes de 42 mm/h.

2.2.2.2) Constitution de l'échantillon des maxima

Le conditionnement des données présenté précédemment nous permet ainsi d'attribuer à chaque événement pluvieux un ensemble d'intensités moyennes maximales définies sur les différentes durées de cumul que nous avons choisies. A présent, il nous faut retenir parmi ces maxima ceux sur lesquels nous allons mener une analyse fréquentielle. Afin de constituer notre échantillon des maxima, nous retenons les P plus fortes valeurs, avec P compris entre N et 2N avec N le nombre d'années d'observation (16 années).

Nous avons constitué ainsi un échantillon de taille P = 30 valeurs d'intensités moyennes maximales, puis nous avons attribué à chacune de ces valeurs une fréquence empirique de non- dépassement. Pour chacune des durées de cumul, nous avons classé les P valeurs par ordre décroissant, voir tableau ci-après (tab. 3):

6mn	12mn	18mn	24mn	30mn	60mn	120mn	240mn	360mn	480mn	Rang	1-F
124	96	74	57,5	54,8	41	25	14,05	10,75	9,75	1	0,98
114	90	65,3	57	49,2	28,67	24,1	13,1	10,4	7,775	2	0,94
96	86	64	55,5	47,6	28	22,6	12,5	10,2	7,375	3	0,9
92	75	63,3	51	46,4	27	16,6	11,7	9,933	7,275	4	0,86
92	71	63,3	49,5	41,2	26	15,9	11,65	8,4	6,725	5	0,82
88	70	56,7	47,5	41,2	25,33	14,7	10,3	7,9	6,5	6	0,78
82	69	56	47	40	25,33	13,9	9,85	7,833	6,35	7	0,74
74	63	50,7	44,5	36,4	24,8	13,8	9,8	7,7	6,325	8	0,7
72	62	50,7	39	35,6	24,4	13,6	9,45	7,6	6,3	9	0,66
70	57	48,7	37,5	35,6	23,8	13,6	8,9	7,267	6,2	10	0,62
64	53	46	37	34,4	23,2	13,1	8,75	7,067	6,175	11	0,58
64	53	42	37	32,8	22,67	12,8	8,4	7	5,875	12	0,54
60	51	42	36,5	32	22,4	12,4	8,35	6,967	5,7	13	0,5
60	49	38,7	36	29,2	22,33	12,4	8,25	6,833	5,4625	14	0,46
60	48	38,7	33	29,2	21,67	11,8	7,85	6,767	5,4	15	0,42
58	48	37,3	32,5	28,8	21	11,8	7,85	6,7	5,225	16	0,38
58	48	37,3	32,5	28,8	21	11,8	7,75	6,467	5,15	17	0,34
58	48	37,3	32	28,4	21	11,6	7,55	6,433	5,125	18	0,3
58	47	37,3	31	26,8	21	11,5	7,5	6,4	5,05	19	0,26
58	46	36	31	26,8	20,8	11,2	7,5	6,35	4,875	20	0,22
56	46	35,3	30	26,4	20,33	11,2	7,45	5,867	4,7	21	0,18
56	45	35,3	30	26,4	20,33	10,8	7,35	5,833	4,575	22	0,14
56	43	35,3	29	26	20,33	10,6	7,15	5,833	4,45	23	0,1
56	42	34,7	28,5	25,6	20	10,5	7	5,667	4,4	24	0,06
54	42	34,7	28,5	25,6	20	10,4	6,9	5,567	4,375	25	0,02
54	42	34	28,5	25,2	19,6	10,4	6,85	5,4	4,3	26	0,15
54	41	33,3	28	24,8	19,33	10,25	6,8	5,4	4,25	27	0,1167
54	41	32,7	28	24	19,2	10,2	6,8	5,333	4,125	28	0,0833
54	40	32,7	28	24	18,33	10,2	6,8	5,2	4,075	29	0,05
52	40	32,7	27,5	23,6	18,33	10,1	6,75	5,167	4,075	30	0,0167

Tableau 3: Echantillon des 30 plus grandes intensités (mm/h) pour chaque durée de cumul.

Nous calculons la fréquence empirique de dépassement F au cours d'un événement à partir de la formule de Hazen pour les raisons qui seront évoquées au paragraphe 2.2.2.3.4:

$$F = (r - 0,5) / N \qquad \text{(éq. 14)}$$

Avec r le rang et N la taille de l'échantillon. Mais dans la suite des calculs nous raisonnons sur le complément à 1 de F, c'est-à-dire sur la fréquence empirique de non-dépassement :

$$F_d = 1 - F \qquad \text{(éq. 15)}$$

Avec F défini par Hazen.

2.2.2.3) Choix du modèle fréquentiel

Dans le chapitre précédent, nous avons constitué notre échantillon des intensités maximales. A présent, nous cherchons à les ajuster à un modèle fréquentiel qui est une équation décrivant le comportement statistique de données. Divers modèles existent et nous faisons ci-après la présentation de quelques uns d'entre eux.

2.2.2.3.1) Loi Normale

La loi normale se justifie, théoriquement par le théorème central-limite, comme la loi d'une variable formée de la somme d'un grand nombre de variables aléatoires. En hydrologie fréquentielle des valeurs extrêmes, les distributions ne sont cependant pas symétriques, ce qui constitue un obstacle à son utilisation. Cette loi s'applique toutefois généralement bien à l'étude des modules annuels des variables hydro-météorologiques en climat tempéré.

2.2.2.3.2) Loi Log-Normale

La loi log-normale est préconisée par certains hydrologues dont V.-T. Chow qui la justifie en argumentant que l'apparition d'un événement hydrologique résulte de l'action combinée d'un grand nombre de facteurs qui se multiplient. Dès lors la variable aléatoire $X = X_1.X_{2....}X_r$ suit une loi log-normale.

2.2.2.3.3) L'expérience et la coutume

Le choix d'un type de modèle probabiliste est souvent basé sur des habitudes locales, qui, à la longue, deviennent de véritables coutumes. Un tel choix résulte fréquemment de l'expérience d'un ou de plusieurs auteurs, constituant peu à peu des écoles. L'attitude du praticien, suivant telle ou telle école, est légitime dès lors qu'elle est le bénéfice d'une grande somme d'expérience.

Dans certains pays, il existe en effet des règles ou normes qui fixent la méthodologie d'une analyse fréquentielle. Exemple en Angleterre il est recommandé d'utiliser les lois de Gumbel et de Weibull, [Institute of Hydrology, 1990] ; [Polarski, 1989], alors qu'aux Etats-Unis ce sont les lois de log-Pearson III, [Loganathan & al, 1986], et de Gamma, [Bobée and Ashkar,

1991], qui sont recommandées.

Le lecteur trouvera dans [World Meteorological Organization, 1989]**,** toutes les autres lois de distribution des maximales annuelles.

2.2.2.3.4) Loi Gumbel

E.-J. Gumbel, 1963, postule que la loi double exponentielle, ou loi de Gumbel, est la forme limite de la distribution de la valeur maximale d'un échantillon de P valeurs. Le maximum annuel d'une variable étant considéré comme le maximum de 365 valeurs journalières, la loi de Gumbel est ainsi capable de décrire les séries de maxima annuels.

Il est à remarquer que plus le nombre de paramètres d'une loi est grand, plus l'incertitude dans l'estimation est importante. Il est par conséquent préférable d'éviter l'utilisation de lois à trois paramètres ou plus, [Miquel J, 1984].

Nous utilisons la loi de Gumbel pour mener notre analyse fréquentielle. En effet, au vu des pratiques en hydrologie urbaine, [Engeland K & al, 2005] ; [Lang M, 2000], [Margoum M, 1994], cette loi est fréquemment utilisée pour modéliser des événements extrêmes, notamment pour les pluies. D'autre part, [Musy, 2003] a montré que les résultats calés sont souvent satisfaisants si la loi de Gumbel et la distribution empirique de Hazen se combinent**.** Aussi utiliserons-nous cette combinaison.

2.2.2.4) Calage des données avec la loi de Gumbel

Nous avons retenu au paragraphe 2.2.2.2 les P plus fortes valeurs de nos séries de pluies. A présent, nous cherchons à savoir si elles doivent être conservées en vue d'une mise en œuvre pertinente de la loi de Gumbel. Pour ce faire, nous effectuons un calage avec les différentes valeurs de P suivantes : P = 30 ; P= 25 ; P = 20 ; P = 15 ; P=10.

Le calage permet de minimiser l'erreur, lors de l'estimation des paramètres de la loi statistique, par la mesure de la variabilité des valeurs estimées par la loi. Cette mesure est donnée par le calcul du coefficient de variation (Cv) ou du coefficient de dissymétrie de Pearson, [Roux, 1996] ; [Kakmier L.J, 1982] ; [Baillargeon, 2003].

[Roux, 1996] ; [Baillargeon G, 2003], pour ne citer que ceux-là, présentent différents tests statistiques d'ajustement :

- Le test du X^2 ;
- Le test de Kolmogorov-Smirnov ;
- Le test de Cramer von Mises ;
- Le test d'Anderson-Darling ;
- Le test de Watson…

Ces tests comparent les populations observées et estimées pour différents échantillons ou les fréquences empiriques et estimées de chaque échantillon.

Roux, 1996] présente cependant les techniques d'ajustements statistiques les plus courantes :

- La méthode des moments ;
- La méthode du maximum de vraisemblance ;
- La méthode des moments de probabilité pondérés.

Nous utiliserons comme technique d'ajustement la méthode des moments. Cette méthode permet d'égaler les moments échantillonnaux et les moments théoriques de la loi Gumbel à partir des relations ci-après. De plus, cette méthode procure des estimateurs (moyenne, écart-type) non biaisés (standard), [Roux, 1996].

La fonction de répartition de la loi de Gumbel s'exprime de la manière suivante :

$$F(x) = \exp[-\exp(-(x-a)/b))] \quad \text{(eq. 16)}$$

Soit $$x = s * [- \text{Ln} (- \text{Ln } F(x))] + xo \quad \text{(éq. 17)}$$

Paramètres : s et xo

$$s = 0{,}780 * \sigma(x) \quad \text{(éq 18)}$$

$$xo = \mu(x) - 0{,}577 * s \quad \text{(éq. 19)}$$

avec $\mu(x)$: moyenne de l'échantillon
et $\sigma(x)$: écart-type de l'échantillon

La figure 40 présente un exemple d'ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments.

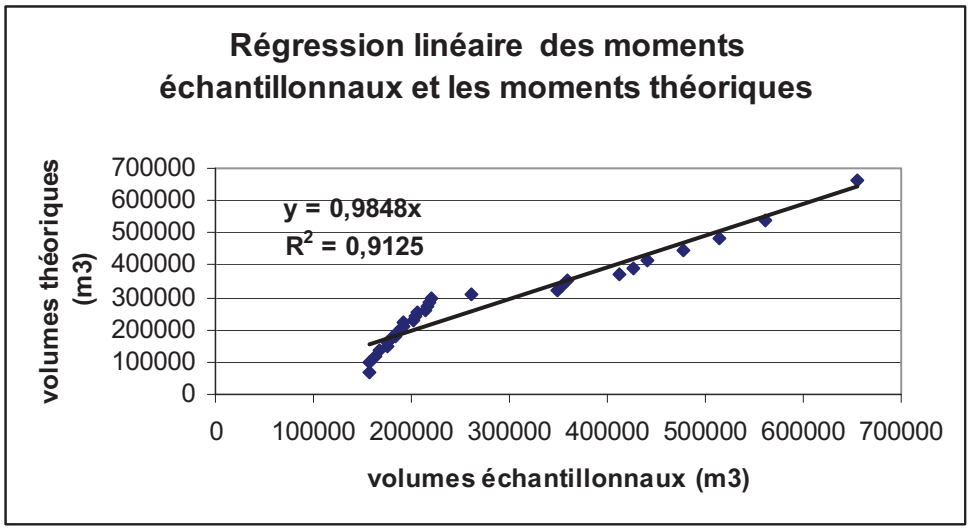


Figure 40 : Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour un échantillon de taille 30.

Le tableau 4 ci-après donne les résultats du calcul du coefficient de variation de l'échantillon $Cv(x) = \sigma(x) / \mu(x)$ afin de mesurer la variabilité de chaque type de population (observée et théorique).

Taille de l'échantillon	Population observée	Population estimée	Différence
	Cv	Cv	
P = 30	0,2768	0,2712	0,005
P = 25	0,2745	0,2683	0,006
P = 20	0,2697	0,2624	0,007
P = 15	0,2549	0,2465	0,008
P = 10	0,2164	0,2069	0,009

Tableau 4: Mesure de la variabilité par le calcul du coefficient de variation Cv.

Le tableau 4 permet de comparer la variabilité de ces deux populations pour chaque échantillon. La variabilité est plus faible (différence = 0,005) pour l'échantillon de taille P=30. Aussi nous retenons cet échantillon pour une mise en œuvre pertinente de la loi de Gumbel.

Ayant ajusté nos données d'intensités par la loi de Gumbel, nous pouvons à présent construire les courbes IDF. La démarche consiste à calculer pour chaque période de retour choisie (1an, 2ans, 5ans et 10ans) les intensités théoriques de Gumbel ainsi que ses paramètres. Le tableau suivant (tab. 5) présente les résultats que nous obtenons :

Pdt (mn)	Période de retour				Paramètres de Gumbel	
	1an	2ans	5ans	10ans	s	xo
6	62,7	68,8	90,3	100,8	14,4	58,7
12	50,9	62,1	74,7	83,7	12,4	47,5
18	39,9	47,7	56,5	62,7	8,6	37,5
24	34,1	41,1	49	54,6	7,7	32
30	30,6	36,6	43,2	48	6,6	28,8
60	21,5	24,9	28,4	30,9	3,4	20,9
120	12,3	15,1	18,2	20,5	3,1	11,5
240	8,2	9,6	11,2	12,4	1,6	7,7
360	6,6	7,7	8,9	9,8	1,2	6,2
480	5,2	6,2	7,2	7,9	1	5

Tableau 5 : Calcul des intensités avec Gumbel aux différentes périodes de retour.

A partir de ce tableau de valeurs nous construisons les courbes IDF suivantes (fig. 41 à 44) grâce à la formule de Montana (cf. 1.3.4.2.2) :

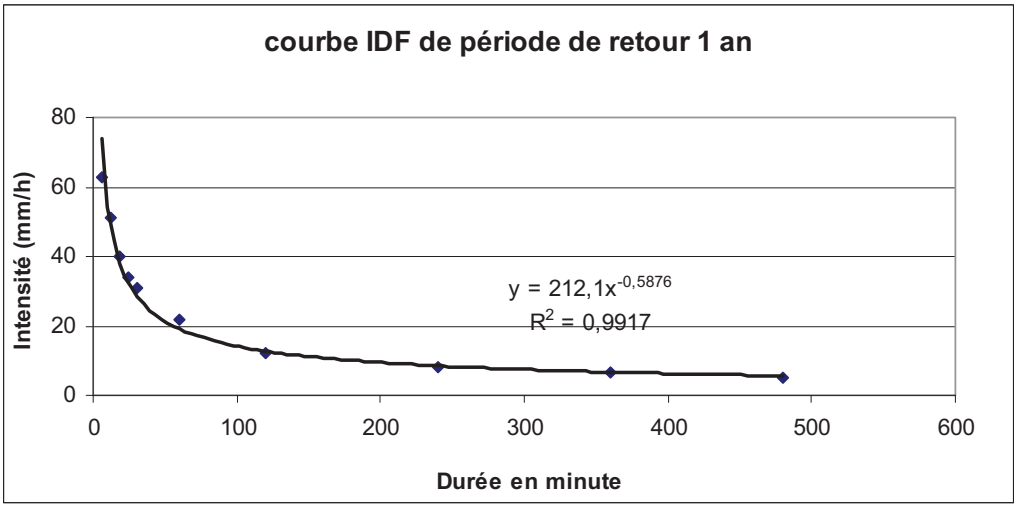


Figure 41 : Courbe IDF de période de retour 1 an.

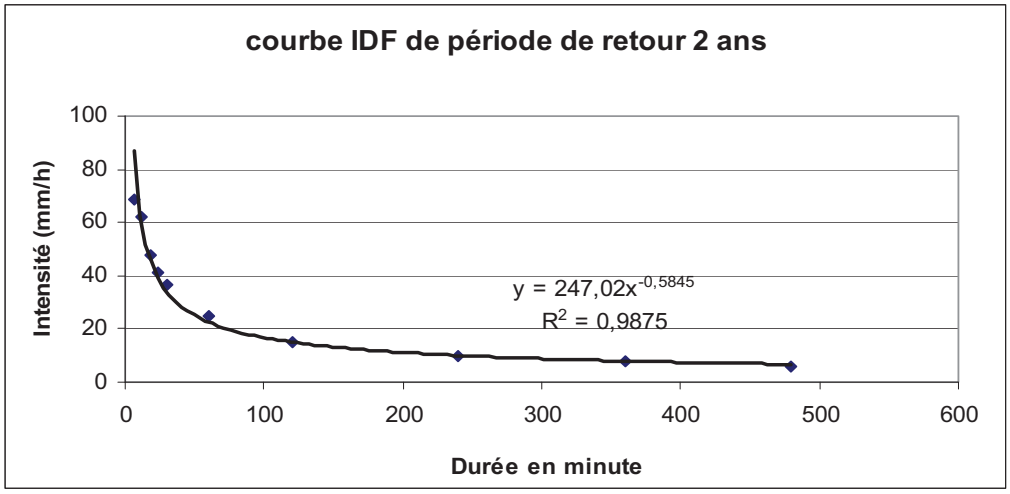


Figure 42: Courbe IDF de période de retour 2 ans.

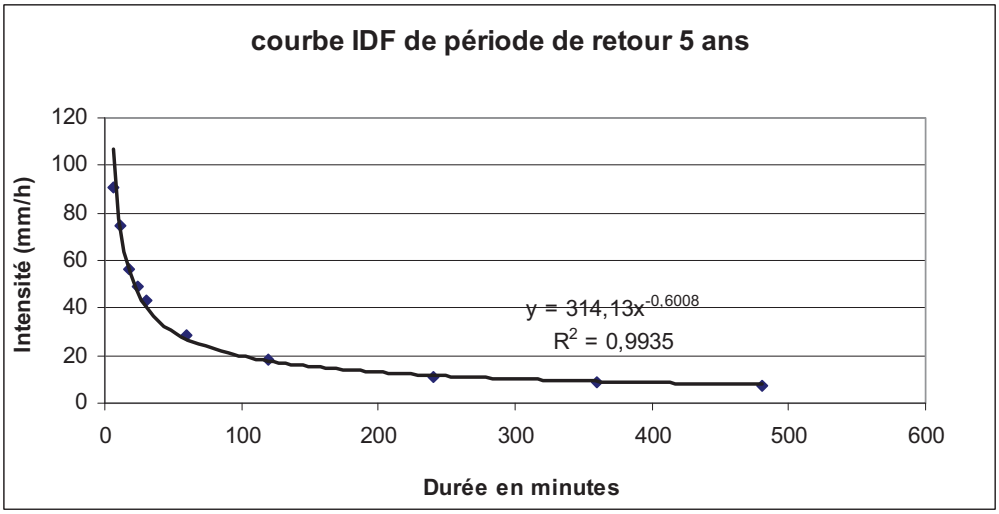


Figure 43: Courbe IDF de période de retour 5 ans.

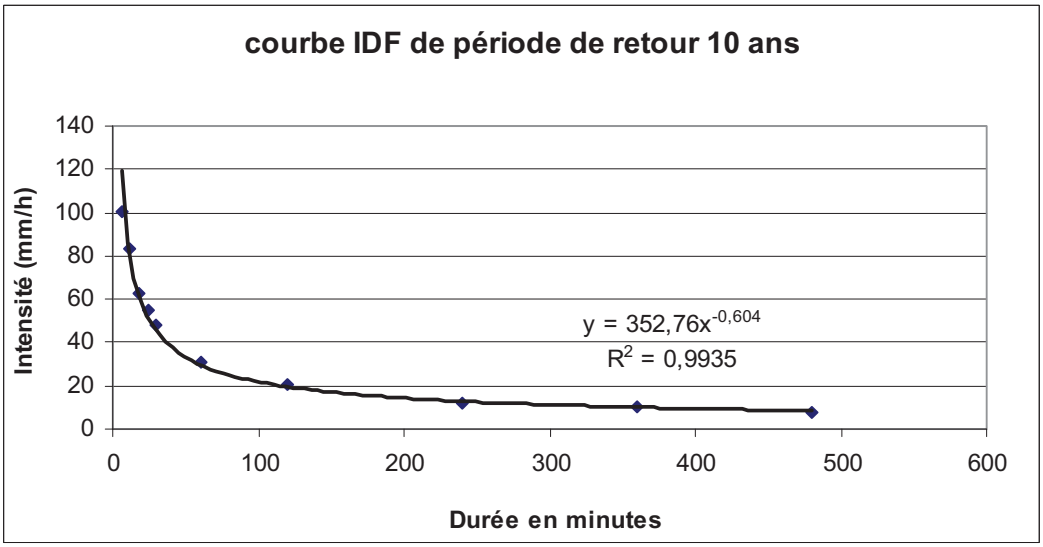


Figure 44: Courbe IDF de période de retour 10 ans.

Les coefficients de Montana « a » et « b » issus de ces courbes IDF sont présentés dans le tableau suivant (tab. 6) :

Période retour	**1an**	**2ans**	**5ans**	**10ans**
A	3,535	4,117	5,2355	5,8793
B	-0,5876	-0,5845	-0,6008	-0,604

Tableau 6: Coefficients de Montana de Gerland donnant l'intensité en mm/h par une durée en minute.

Pour les besoins de concordance des unités, le coefficient « a » de Montana est obtenu, dans le tableau 6, en divisant par 60 minutes, pour chaque période de retour, le coefficient directeur de l'équation de la courbe IDF.
Après avoir présenté les données pluviométriques ainsi que la finalité de leurs usages, nous présentons à présent dans le paragraphe ci-après l'outil de modélisation hydrologique que nous allons utiliser.

2.3) Modélisation

Les modèles de simulation des phénomènes hydrologiques agissant sur les bassins versants et les ouvrages de stockage ont pour finalité d'aider à la conception des ouvrages de stockage des eaux pluviales.

[Cabane, 2001], propose quelques indications quant au choix du modèle à utiliser :

- une fonction de production simple, présentant peu de paramètres afin de faciliter son utilisation et sa compréhension.
- un modèle présent dans de nombreux logiciels d'assainissement.
- un modèle offrant la possibilité de prendre en compte la variabilité spatiale des pertes au ruissellement.

Aussi avons-nous choisi, en fonction des critères ci-dessus, *le modèle de réservoir linéaire*. Ce modèle fait parti de la famille des modèles réservoir généralement destinés à représenter la transformation pluie-débit sur un bassin versant, consistant à imaginer le système comme un ensemble plus ou moins complet de réservoirs en série ou en parallèle.

De plus, le modèle de réservoir linéaire, sous sa forme la plus simple, apparaît bien adapté à des situations assez variables allant des petits bassins versants fortement urbanisés à des bassins versants de plusieurs centaines d'hectares urbanisés. C'est également le modèle le plus utilisé en hydrologie urbaine. Il a été particulièrement étudié en France par [Desbordes, 1974], qui a montré sa validité sur des bassins versants urbanisés, équipés d'un réseau d'assainissement.

2.3.1) Présentation du modèle pour les bassins versants

Le modèle de réservoir linéaire repose sur la fonction de transfert qui transforme en débit la pluie de la fonction de production.

2.3.1.1) La fonction de production

La fonction de production permet de calculer la partie de la pluie qui va effectivement s'écouler à l'exutoire du bassin versant ou du sous-bassin, c'est-à-dire la pluie nette. Elle utilise le concept du coefficient de ruissellement, modèle permettant de calculer la partie qui ruisselle sur le bassin versant, la partie non ruisselée étant une perte au ruissellement (infiltration, évaporation, stockage, etc.). Elle s'exprime par la relation :

$$H_R = C_R (H_P - P_i) \qquad \text{(éq 20)}$$

avec H_R la hauteur d'eau ruisselée (mm), H_p la hauteur précipitée (mm), P_i les pertes initiales (mm) que nous considérerons dans notre cas comme nulles et C_R le coefficient de ruissellement.

2.3.1.2) La fonction de transfert

Pour chaque bassin versant, la fonction de transfert transforme la pluie nette, issue de la fonction de production, en débit à l'entrée du système d'assainissement. Le modèle du réservoir s'exprime au travers de plusieurs relations :

Une relation linéaire entre le volume stocké et le débit sortant (équation de stockage)

$$V_s(t) = K.Q_s(t) \qquad \text{(éq. 21)}$$

avec K le lag-time (mn) ;

Q_s (t) débit de sortie (m^3/s).

La valeur de K représente le décalage temporel entre le centre de gravité de l'hydrogramme correspondant à la pluie nette et celui de l'hydrogramme à l'exutoire de chaque bassin. Le lag-time est évalué par l'ajustement de Desbordes faisant intervenir des paramètres descriptifs du bassin versant, [Chocat et *al,* 1997] :

$$K = 0{,}254 * S^{-0{,}0076} * C_R^{-0{,}512} * P^{-0{,}401} * L^{-0{,}608} \qquad \text{(éq. 22)}$$

où K est exprimé en minutes, S est la surface du bassin versant en hectare, C_R le coefficient de ruissellement du bassin en %, P la pente moyenne du bassin versant en m/m, et L le plus long parcours de l'eau en mètre.

Une équation de continuité ou équation de conservation des volumes

$$dV_s(t)/dt = Q_e(t) - Q_s(t) \qquad \text{(éq. 23)}$$

avec $Q_e(t) = C_R.A.i(t)$: débit entrant dans le bassin versant (m^3/s) ;

Q_s (t) : débit sortant (m^3/s) ;

V_s (t) : volumes stocké dans bassin versant (m^3).

i (t) : l'intensité pluvieuse (mm/h)

La solution générale prend la forme suivante :

$$Q_s(t) = 1/k \int_0^t Q_e(t) * e^{-(t-f)/k}.df + Q_s(0) \qquad \text{(éq. 24)}$$

Q_s (0) est le débit initial à t = 0, résultant par exemple d'un évènement pluvieux précédent. Comme i (t) n'est pas connue sous forme analytique mais sous forme discrète (succession de n segments horizontaux de droites sur chaque pas de temps Δt), en posant $Q_{si} = Q_s(i.\Delta t)$, on

obtient une formule de récurrence facile à utiliser :

$$Q_{si} = e^{-\Delta t/ k} * Q_{si-1} + (1-e^{-\Delta t/ k}) * Q_e(t) \qquad \text{(éq. 25)}$$

C'est donc le débit à la sortie de chaque sous-bassin et ce au pas de temps pris en compte.

2.3.2) Présentation du modèle pour les ouvrages de stockage

Un ouvrage de stockage peut quant à lui être représenté par le schéma suivant (fig. 45):

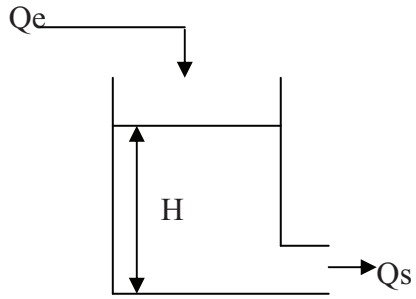


Figure 45: schéma d'un réservoir

avec Qe le débit d'entrée, H la hauteurd'eau dans le réservoir et Qs le débit de sortie.

L'algorithme et les équations régissant l'ouvrage de retenue avec limitateur de débit sont :

$$Qe(t) - Vs(t-dt)/dt + Vs(t)/dt \geq Qe(t) - Vs(t-dt)/dt \qquad \text{(éq.26)}$$

$$\text{Si } Qe(t) - Vs(t-dt)/dt > Qf \qquad \text{(éq.27)}$$

Alors Qs(t) estimé sera > Qf

$$\text{Le limitateur impose Sinon } Qs(t) = Qf \qquad \text{(éq.28)}$$

avec Vs le volume stocké, Qe le débit d'entrée, Qs le débit de sortie, Qf la limite supérieure de Qs et dt le pas de temps de calcul, t le temps.

2.4) Plan d'expériences

Nous cherchons d'une part, pour une période de retour donnée, à déterminer le volume de stockage de l'ouvrage et d'autre part à calculer la durée de la pluie de projet correspondant à ce dernier volume. En effet, nous envisageons d'utiliser le concept de pluie de projet pour dimensionner les ouvrages de stockage. Aussi, nous définissons cette pluie de projet par une utilisation conjointe du modèle de ruissellement de réservoir linéaire présenté au paragraphe 2.3 et de l'analyse statistique (avec la Loi de Gumbel, paragraphe 2.2.2.3.4) des séries chronologiques de pluies présentées au paragraphe 2.2.1. Cette démarche se schématise de la façon suivante (fig. 46 et 47):

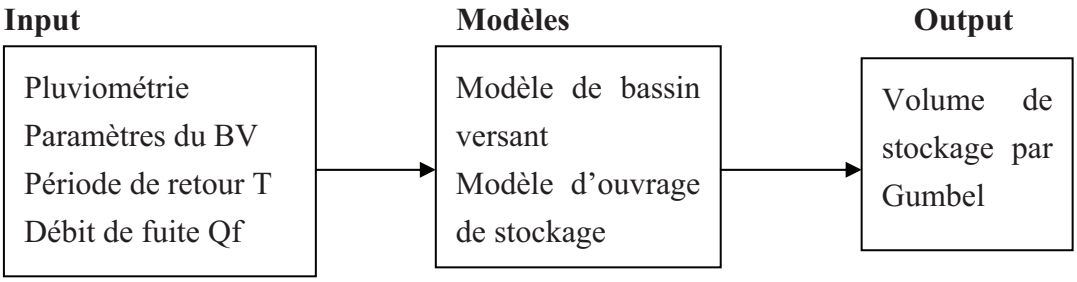


Figure 46 : Schéma 1 : Détermination du volume de stockage

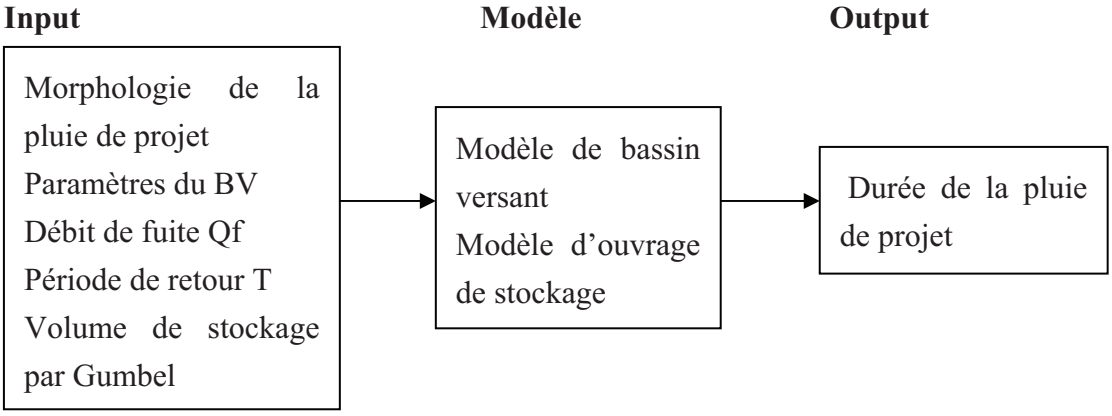


Figure 47: Schéma 2 : Détermination de la durée de la pluie de projet correspondant au volume de stockage défini par le schéma 1.

Ayant obtenu les durées de pluie de projet correspondant aux volumes à stocker avec les périodes de retour voulues, nous cherchons à les relier par le biais d'une étude de sensibilité mettant en œuvre les caractéristiques du bassin versant et de l'ouvrage de stockage. Il s'agit donc d'établir expérimentalement une relation mathématique entre la durée pluvieuse et les

caractéristiques de l'ouvrage de stockage et du bassin versant par la réalisation d'essais définis par un plan d'expériences.

[Benoist D & *al,* 1994] définissent le plan d'expériences comme étant *« une matrice d'essais c'est-à-dire une liste de combinaisons de facteurs définie à l'avance qu'il faudra réaliser pour obtenir les résultats d'essais à l'analyse* ». Construire un plan d'expériences revient donc à planifier les essais à réaliser.

Après une présentation des principes généraux des plans d'expériences, nous présentons le type de plan d'expérience retenu et enfin nous traitons du problème d'analyse des résultats des essais.

2.4.1) Principes généraux du plan d'expériences

2.4.1.1) Contexte et objectif

Le contexte d'utilisation des plans d'expériences recouvre des phénomènes de type « boîte noire » que l'on cherche à éclaircir pour mieux en comprendre le fonctionnement et en optimiser les performances. La démarche est expérimentale : l'information sur le phénomène observé est acquise à partir d'essais (ou calculs simulant les essais).

Aussi avons-nous listé les paramètres susceptibles d'agir sur le fonctionnement de la boîte noire c'est-à-dire le modèle. Ces paramètres sont aussi appelés *variables maîtrisables ou explicatives* car il faut pouvoir fixer leurs valeurs à un niveau donné:

- Les caractéristiques du bassin versant (Surface S, Coefficient de ruissellement C, la Pente I, l'allongement M),
- Le débit spécifique admissible à l'exutoire Qad,
- La période de retour T.

Les performances observées sur le phénomène étudié sont les « sorties » ou « output » de la boîte noire, appelées aussi *réponses.* Nous nous sommes assurés que ces réponses soient mesurables, il s'agit des durées de pluies.
A partir des résultats d'essais réalisés, nous cherchons à expliquer le fonctionnement de la

boîte noire en estimant les réponses pour des paramètres d'entrée qui ont une influence certaine sur la durée de pluie. Le but est de trouver une configuration des paramètres d'entrée qui résolve le problème.

2.4.1.2) Les moyens permettant d'atteindre l'objectif

Afin d'atteindre cet objectif, nous réalisons des combinaisons pour *modéliser* le phénomène étudié. Nous obtenons ainsi différentes fonctions (modèles) des paramètres d'entrée, et choisissons le meilleur vis-à-vis du phénomène posé.

Notre postulat de base pour le sujet qui nous intéresse est que le dimensionnement de l'ouvrage de stockage peut être approché par une fonction, par exemple un polynôme, sur les variables maîtrisables en prenant soin de restreindre leur plage de variation. Pour cela, nous utilisons la *méthode des moindres carrés* qui permet de comparer des données expérimentales à un modèle mathématique censé décrire ces données.

Dans le cas le plus courant, la méthode des moindres carrés permet d'examiner à partir d'une famille de fonctions $f(x,\alpha)$ d'une ou plusieurs variables x, indexées par un ajustement optimal. La méthode des moindres carrés permet de sélectionner parmi ces fonctions, celle qui reproduit le mieux les données expérimentales. On parle dans ce cas *d'ajustement par la méthode des moindres carrés*.

La méthode consiste en une prescription (initialement empirique) qui est que la fonction $f(x,\alpha)$ qui décrit « le mieux » les données est celle qui minimise la somme quadratique des déviations des mesures aux prédictions de $f(x,\alpha)$.

Si par exemple, nous disposons de N mesures $(y_i)_{i = 1,N}$, les paramètres α « optimaux » aux sens de la méthode des moindres carrés sont ceux qui minimisent la Somme des Carrés résiduelles:

$$SC_{RES} = \sum_{i=1}^{N} (y_i - f(x_i, \alpha))^2 \qquad \text{(éq. 29)}$$

La méthode que nous allons utiliser pour établir le modèle est *la régression linéaire multiple* préconisée par [Benoist et *al,* 1994]. Cette méthode permet de relier la variable dépendante

ou réponse aux variables maîtrisables, grâce à une fonction linéaire. A l'aide de cette équation, nous pouvons estimer ou prévoir les valeurs d'une variable à partir des valeurs prises par les autres variables jugées statistiquement significatives lors de l'analyse.

2.4.1.3) Le modèle « représentatif »

Pour permettre une illustration fidèle et une optimisation des performances du système étudié, le modèle doit être « représentatif » des essais réalisés. Deux étapes contribuent à construire et affiner le modèle : le calcul des coefficients de la régression linéaire et la recherche du meilleur sous-modèle:

a. les coefficients : nous les estimons par la régression linéaire multiple. Nous cherchons des coefficients tels que les estimations de la réponse « ajustent » le mieux possible les observations. Pour cela, il existe un critère d'ajustement qui revient à minimiser l'écart entre y et $\hat{y}$ (durée pluvieuse observée et durée pluvieuse calculée).

b. la recherche du meilleur sous-modèle consiste à sélectionner, parmi toutes les variables d'entrée citées précédemment, celles qui expliquent le mieux la réponse. Cela donne le meilleur sous-modèle, celui pour lequel *le critère d'ajustement est optimal*. Cette recherche du meilleur sous-modèle passe par une analyse de variance que nous présentons au paragraphe 2.4.2.2.1.

Le modèle de régression multiple permet donc de décrire la relation entre une variable dépendante y (durée de pluie), pour l'étude qui nous concerne, et un ensemble de variables explicatives (Surface S, le Coefficient de ruissellement C, la Pente I, le Débit de fuite Qad et l'allongement M, période de retour T) qui peuvent être notées v_1, $v_{2,...}$ v_p. La forme générale de cette relation s'écrit :

$$y = f(v) = \hat{a}_1 v_1 + \hat{a}_2 v_2 + \dots \hat{a}_j v_j + \dots \hat{a}_p v_p + \varepsilon \qquad \text{(éq 30)}$$

Les $\hat{a}_j$ sont les estimations des coefficients du modèle ;
ε représente les écarts entre les valeurs observées (y) et les valeurs estimées ($\hat{y}$) de la réponse ($\varepsilon = y - \hat{y}$), appelé aussi « résidu » ;
Les v_j sont les variables explicatives.

2.4.2) Le plan orthogonal

Le plan orthogonal a été imaginé pour ses propriétés statistiques exposées au paragraphe 2.4.2.2 et pour simplifier les calculs de la régression. A défaut de le construire, nous pouvons rechercher dans les tables de base les plans orthogonaux déjà construits et qui ont le même nombre de configurations que celles que nous cherchons à établir. Ces configurations définissent la réalisation des essais.

Il existe dans la littérature, *« plans d'expériences : construction et analyse »* de [Benoist & *al,* 1994], pour ne citer que celui-là, d'autres types de plans d'expériences : les plans centraux composites, optimaux, en blocs et des plans de base. Nous ne traiterons pas ici ces autres types de plans car seul le type orthogonal nous intéresse notamment pour ses propriétés statistiques.

2.4.2.1) Les essais

Un essai est une *réalisation* d'une configuration (modélisation) des variables d'entrée de la boîte noire, pour laquelle la valeur de la réponse est mesurée. Les essais permettent ainsi de mesurer les réponses pour toutes les configurations des paramètres indiquées dans la matrice d'essais. La modélisation n'est rendue possible qu'au prix d'une hypothèse très souvent vérifiée, [Benoist et *al,* 1994] : « *il existe au moins un modèle représentant « fidèlement » la boîte noire et ne nécessitant qu'un nombre réduit de termes (variables d'entrée) ».*

En outre, plus on accroît le nombre de paramètres du modèle et sa complexité, plus il faut faire d'essais. Il faut donc limiter le nombre de termes afin d'obtenir un nombre moins important d'essais à réaliser. Aussi, la matrice du plan d'expériences à partir duquel nous allons réaliser les essais est la suivante (tab. 7):

Variables explicatives	S	C	M	Qad	I
Réalisations	Niveaux				
1	0	0	0	0	0
2	0	1	1	1	1
3	0	2	2	2	2
4	0	3	3	3	3
5	1	0	1	2	3
6	1	1	0	3	3
7	1	2	3	0	1
8	1	3	2	1	0
9	2	0	2	3	1
10	2	1	3	2	0
11	2	2	0	1	3
12	2	3	1	0	2
13	3	0	3	1	2
14	3	1	2	0	3
15	3	2	1	3	0
16	3	3	0	2	1

Tableau 7: Matrice du plan orthogonal de type $L_{16}4^5$ tirée des tables de base des plans orthogonaux déjà construits. Cette matrice possède le même nombre de configurations que celles que nous cherchons à établir.

Cette matrice est composée de configurations de 5 variables explicatives (S, C, M, Qad, I) réparties sur 4 niveaux (0 ; 1 ; 2 ; 3). C'est un plan orthogonal car chaque niveau de chaque variable explicative est associé à tous les niveaux des autres variables un même nombre de fois.

Il est à noter cependant que la variable explicative T (période de retour) n'apparaît pas dans la matrice d'essais. En effet, la période de retour T est ce qu'on appelle un « facteur bloc ». Ce facteur représente une condition d'expérimentation qui va varier au cours des essais. Il a pour fonction de répéter les essais dans le temps, ce qui conduit à regrouper les essais par période de réalisation (1an, 2ans, 5ans, 10ans).

Afin de définir les essais à réaliser, nous avons discrétisé les variables rattachées aux bassins versants et aux ouvrages de stockage comme suit (tab. 8) :

Variables	Discrétisation			
S (ha)	0,01	0,1	1	10
C (%)	30	50	70	90
M	1	2	3	4
Qad (l/s/ha)	1	2	3	4
Pente (% ou ‰)	1‰	5‰	1%	2%

Variables	Discrétisation			
S (ha)	50	100	500	1000
C (%)	30	50	70	90
M	1	2	3	4
Qad (l/s/ha)	1	2	3	4
Pente (% ou ‰)	1‰	5‰	1%	2%

Tableau 8: Discrétisation des caractéristiques des bassins versants et ouvrages de stockage.

Remarque : ayant remarqué dans la discrétisation précédente que l'amplitude était importante entre les bassins versants de 100ha et 500ha, nous avons fait le choix de la réduire en rajoutant un nouveau bassin versant de 250ha.

Compte tenu de cette remarque, nous aurons à modéliser finalement 36 bassins versants (ou 36 cas) car nous avons initialement 9 bassins versants (0,01ha ; 0,1ha ; 1ha ; 10ha ; 50ha ; 100ha ; 250ha ; 500ha ; 1000ha) qui possèdent chacun 4 niveaux (les 4 valeurs de chaque variable du tableau 7), soit donc un total de 9*4 bassins versants à modéliser.

A partir des discrétisations précédentes et de la matrice du plan d'expériences, nous avons établi la matrice d'essais suivante (tab. 9):

Variables explicatives	S	C	M	Qad	I
Les essais					
1	0,01	30	1	1	1‰
2	0,01	50	2	2	5‰
3	0,01	70	3	3	1%
4	0,01	90	4	4	2%
5	0,1	30	2	3	2%
6	0,1	50	1	4	2%
7	0,1	70	4	1	5‰
8	0,1	90	3	2	1‰
9	1	30	3	4	5‰
10	1	50	4	3	1‰
11	1	70	1	2	2%
12	1	90	2	1	1%
13	10	30	4	2	1%
14	10	50	3	1	2%
15	10	70	2	4	1‰
16	10	90	1	3	5‰
17	50	30	1	1	1‰
18	50	50	2	2	5‰
19	50	70	3	3	1%
20	50	90	4	4	2%
21	100	30	2	3	2%
22	100	50	1	4	2%
23	100	70	4	1	5‰
24	100	90	3	2	1‰
25	250	30	3	4	5‰
26	250	50	4	3	1‰
27	250	70	1	2	2%
28	250	90	2	1	1%
29	500	30	4	2	1%
30	500	50	3	1	2%
31	500	70	2	4	1‰
32	500	90	1	3	5‰
33	1000	30	1	1	1‰
34	1000	50	2	2	5‰
35	1000	70	3	3	1%
36	1000	90	4	4	2%

Tableau 9 : Planification des essais à réaliser pour une période de retour T donnée.

2.4.2.2) Propriétés statistiques du plan orthogonal

Le plan orthogonal présente une propriété importante pour l'analyse de variance : *la contribution de chaque terme du modèle peut être isolée, car elle devient indépendante de celle des autres termes,* [Benoist & *a*l, 1994]**.** L'analyse de la variance permet ainsi de conclure sur l'influence de chaque terme indépendamment des autres après avoir au préalable vérifié la qualité initiale de la régression.

2.4.2.2.1) Se prémunir contre l'inadéquation

L'inadéquation d'un modèle résulte de l'oubli de termes, interactions ou niveaux.
L'adéquation caractérise le fait que le modèle ajusté explique bien les variations de la réponse moyenne observée.

Un modèle inadéquat indique que la courbe ajustée s'écarte des points des réponses moyennes observées. Les résultats obtenus figure 48 montre que le modèle est inadéquat car nous observons une dispersion des points autour de la droite ajustée.

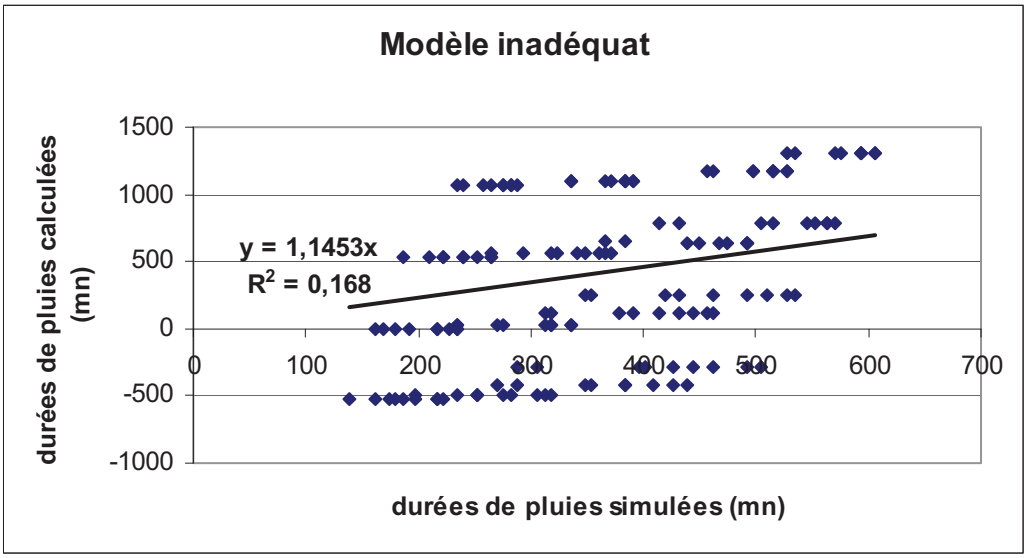


Figure 48: Exemple d'un modèle inadéquat.

Le modèle donnant les résultats de la figure 49 est nettement plus adéquat que celui de la figure 47 car les points s'écartent très peu de la droite.

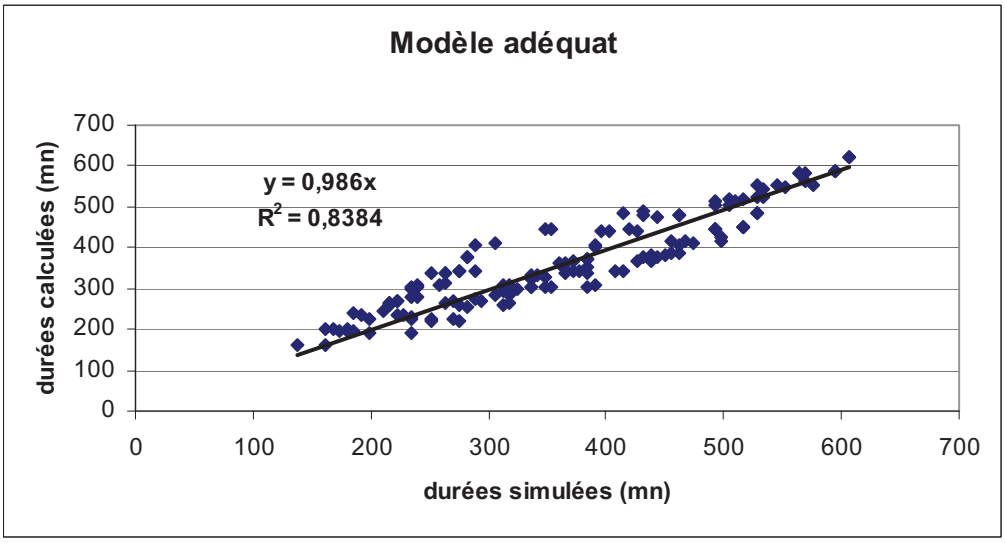


Figure 49: Exemple de modèle adéquat.

Tout le problème est de définir si le modèle testé est suffisamment adéquat par rapport à la problématique posée. Pour cela, nous allons utiliser le test de Fisher-Snedecor [Benoist & *al,* 1994]**,** [Baillargeon, 2003].

2.4.2.2.2) Test de Fisher-Snedecor

Nous cherchons ici à expliquer si les variations des résultats du modèle testé sont causées par les variations des variables explicatives (variation expliquée par la régression) ou par les fluctuations aléatoires dues à la dispersion du phénomène observé (variation résiduelle). Pour l'analyse de cette variance nous avons construit un tableau dit « d'analyse de variance » et qui va nous permettre de tester quelle source de variation est significative.

Le tableau 10 (tiré des résultats de notre étude) est un exemple de tableau d'analyse de variance où la somme des carrés totale (SCT) = 893335,7 est égale à la somme des carrés attribuables à la régression (SC_R) = 674856,5 et à la somme de carré résiduelle (SC_{RES}) = 218479,2. On a donc SCT = SC_R + SC_{RES}.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carrés moyens	Rapport F
Expliquée par la Régression	674856,5	6	112476,1	**29,3**
Attribuable à la variation Résiduelle	218479,2	57	3833	
Total	893336	63	14180	

Tableau 10 : Analyse de la variance pour un modèle de degré de liberté 6.

A chaque somme de carrés correspond des degrés de liberté.

Dans le cas de SCT, nous avons (N-1) degrés de liberté soit 63; nous avons au total N = 64 essais mais nous en perdons un degré de liberté puisque nous devons estimer la moyenne générale pour calculer les écarts $(y_{ij} – \hat{y})$, avec y_{ij} la ième observation pour le niveau j et $\hat{y}$ la moyenne générale ou moyenne de tous les résultats.

Pour $SC_{R,}$ nous avons (k-1) degrés de liberté soit 6 ; avec k = 7 nombre de paramètres (coefficients) à déterminer. Cependant, nous perdons un degré de liberté du fait que nous devons estimer la moyenne générale pour calculer les écarts $(\tilde{y}_j - \hat{y})$, avec $\tilde{y}_j$ la moyenne des résultats sous le niveau j.

Enfin dans le cas de $SC_{RES,}$ nous avons (N-k) degrés de liberté soit 57 ; nous avons N observations mais nous perdons k degrés de liberté puisque nous devons estimer k moyennes pour calculer les écarts $(y_{ij} - \tilde{y}_j)$.

Les estimations des variances attribuables à chaque source de variation s'obtiennent par calcul des carrés moyens qui sont le rapport d'une somme de carrés par son nombre de degré de liberté.

Le carré moyen dû à la régression (carré moyen attribuable à la variabilité entre les moyennes de k niveaux) = $CM_R = SC_R / (k-1)$ = 112476,1, dans le tableau 10.

Le carré moyen résiduel (carré moyen attribuable à la variabilité des résultats sous chacun des k niveaux) = $CM_{RES} = SC_{RES} / (N-k)$ = 3832,9 dans le tableau 10.

Nous appliquons le test de Fisher-Snedecor aux carrés moyens CM_R et CM_{RES} :

- Hypothèse statistique : avec Ho : $\beta1 = \beta2 = \beta3 = \beta4 = \beta5 = \beta6 = 0$ et H1: Au moins un des βj est différent de 0 avec βj coefficients du modèle de regression.
- Seuil de signification :α
- Conditions d'application du test : on suppose que les observations constituent des échantillons prélevés au hasard et indépendamment de k populations normales de variance identique σ^2
- La statistique : c'est le rapport des carrés moyens. En supposant Ho vraie et selon les conditions d'application, la quantité $F = CM_R / CM_{RES}$ est distribuée selon la loi de Fischer avec (k-1) et (N-k) degrés de liberté.
- Règle de décision : au seuil α, la valeur critique du F de Fischer est $F_{a\ ;\ (k-1),\ (N-k).}$ Si $F > F_{a\ ;\ (k-1),\ (N-k)}$, nous rejetons Ho et favorisons H_1.
- Calcul du quotient des carrés moyens : $F = CM_R / CM_{RES.}$
- Décision et conclusion : Si le F obtenu est supérieur à la valeur critique $F_{a\ ;\ (k-1),\ (N-k)}$, nous rejetons Ho et favorisons H_1 et nous conclurons alors à une influence significative de la régression.

2.4.2.2.3) Isoler chaque variable du modèle

En général, la contribution d'un paramètre dépend des autres paramètres présents dans le modèle. Cependant, dans un plan orthogonal, les paramètres sont indépendants : chacun contribue aux variations de la réponse sans être perturbé par les autres paramètres. On peut alors conclure, dans l'analyse de variance, sur l'influence de chaque paramètre sans tenir compte de la présence des autres.

De plus, le plan orthogonal est le cas idéal en terme d'analyse de variance, car les contributions ne dépendent ni des méthodes de calcul, ni de l'ordre d'introduction des variables dans le modèle. On dit alors que *la décomposition de la somme des carrés totale (SCT) est unique*, [Benoist & *al,* 1994]**.**

Le principe d'analyse de la variance consiste ici à décomposer la variation totale dans les données obtenues pour la variable concernée (dite variable dépendante) en diverses composantes attribuables aux différentes sources possibles de variation (variation attribuable à la régression et variation résiduelle). Nous établissons alors un tableau d'analyse de variance afin de tester quelles sources de variation sont significatives.

L'analyse de la variance permet ainsi de comparer les influences des différentes variables explicatives et de débarrasser le modèle de tous les paramètres non significatifs. Le but est d'obtenir le modèle le plus simple possible, car plus le nombre de termes est important plus il faudra maîtriser de variables pour optimiser le système étudié. Un modèle qui ne contient que le strict nécessaire est donc plus pratique.

L'outil statistique que nous mettons en œuvre pour la recherche du meilleur sous-modèle est le test de contribution marginale avec le *t de Student*.

2.4.2.2.4) Le test de contribution marginale avec le *t de Student*.

Ce test permet de juger de la pertinence de chaque variable explicative en examinant si l'ajout d'une variable explicative à la suite d'autres variables explicatives, déjà présentes dans l'équation de régression, apporte une contribution significative dans l'explication de la variabilité de la réponse. Le test de contribution marginale avec le t de Student se base sur le fait que, sous l'hypothèse de normalité des erreurs (ou celle des réponses), la distribution d'échantillonnage du coefficient bj, j = 0,1,….k est celle d'une loi normale de moyenne E(bj) = βj et de variance $\sigma^2(bj)$. On obtient une estimation de $\sigma^2(bj)$ avec la variance des résidus $s^2(bj)$. L'erreur-type s(bj) de chaque coefficient de régression s'obtient de $s(bj) = \sqrt{s^2(bj)}$. Nous calculons ainsi $t = \beta j / s(bj)$.

Il s'agit donc de tester les hypothèses suivantes :

$H_o : \beta_j = 0$, $j = 1,2,\ldots k$ $H_1 : \beta_j \neq 0$.

H_o est rejeté si $t > t_{\alpha/2\ ;\ n-k-1}$ ou si $t < -t_{\alpha/2\ ;\ n-k-1}$

avec n = nombre d'essais et k = nombre de coefficients (ou paramètres) à déterminer.

Si H_o est rejeté, la contribution marginale de la variable explicative x_i est significative au seuil de α.

2.4.3) Analyse des résultats d'essais

L'analyse statistique justifie toute la démarche des plans d'expériences, mais n'est mise en œuvre qu'après la construction du plan et la réalisation des essais. Cette analyse statistique des résultats permet d'extraire le maximum d'information.

Notre but n'est pas ici de faire de la statistique pure sur la régression, nous n'utiliserons donc que des outils nécessaires à l'analyse des résultats de plans d'expériences.

2.4.3.1) L'estimation des coefficients

La régression linéaire multiple est une généralisation de la régression linéaire simple et à laquelle nous avons recours dans l'estimation des coefficients du modèle. Cependant, le système d'équations à résoudre peut rapidement devenir lourd à manipuler.

La méthode des moindres carrés consiste à déterminer l'équation de la droite pour laquelle la somme des carrés résiduelle est minimale. A partir de nos variables explicatives, le modèle de régression multiple s'écrit :

$$yi = \beta o + \beta 1Si + \beta 2Ci + \beta 3Ii + \beta 4Mi + \beta 5Qfi + \beta 6Ti + \varepsilon i, \quad i = 1,\ldots, n \qquad \text{(éq. 31)}$$

où les βi sont les coefficients du modèle.

Dans ce modèle, nous avons 7 coefficients à déterminer par résolution d'un système d'équations.

Les lecteurs trouveront dans la littérature « Méthodes de calcul numérique » de [Nougier, 1991], toutes les procédures des méthodes de résolution des systèmes d'équations.

2. 4.3.2) Recherche du meilleur sous-modèle

Après l'obtention des coefficients du modèle, nous cherchons à présent le meilleur sous-modèle, étape dans laquelle nous éliminons les variables explicatives qui n'expliquent pas suffisamment la réponse car elles agissent peu sur les variations de la réponse.

Nous avons présenté la procédure de recherche du meilleur sous-modèle dans les paragraphes précédents notamment en évoquant l'analyse de variance. La recherche du meilleur sous-modèle permet ainsi d'affiner le modèle en cherchant le sous-ensemble de variables explicatives qui optimise le critère d'ajustement. Le critère choisi est généralement la variance

résiduelle (carré moyen), CM_{RES}, et non simplement la somme des carrés des résidus (SC_{RES}), car la variance résiduelle tient compte du poids des actions ; cela permet de comparer des sous-modèles de tailles différentes ($CM_{RES} = SC_{RES} / (N – k)$, N étant le nombre d'essais, et k le nombre total de degrés de liberté du modèle).

Notons que, comme le modèle parfait correspondrait à une droite de régression affine de pente 1 et de coefficient de corrélation égal à 1, dans la pratique, la pente et le coefficient de corrélation R^2 de la droite de régression affine suffisent pour se faire une opinion de la validité d'un modèle.

2.5) Conclusion

Le choix de la méthode d'analyse fréquentielle est plus souvent fonction des pratiques analytiques du pays où se fait l'étude que des conditions d'utilisation de la méthode. Diverses pistes contribuent à faciliter ce choix, mais il n'existe pas de méthode universelle et infaillible. En fonction de l'objectif de l'analyse, on adaptera la démarche en conséquence.

La constitution statistique d'échantillons s'effectue au travers de différentes techniques qui permettent de définir une série de données réduites dont l'utilisation dépend à la fois de leur qualité et représentativité.

L'utilisation des plans orthogonaux est justifiée par cette analyse fréquentielle. En effet, à l'instar d'autres plans, le plan orthogonal présente des propriétés statistiques particulières dont la plus importante est l'indépendance de la contribution de chaque variable explicative par rapport aux autres variables du modèle. Aussi, l'analyse de la variance est simplifiée.

La suite de notre travail se compose de trois phases : la première phase est une application des méthodes usuelles de dimensionnement des volumes de stockage ; la deuxième phase est une proposition d'un nouvel outil de dimensionnement et la troisème phase constitue quant à elle un test du nouvel outil de dimensionnement sur système d'assainissement.

Chapitre 3 : Application des méthodes des pluies et des abaques au dimensionnement des ouvrages de stockage

Ces méthodes qui sont conseillées par l'Instruction technique de 1977, ont pour objectif de permettre de dimensionner facilement les ouvrages de stockage.

Dans un premier temps, nous calculerons les volumes de stockage pour chaque essai avec la loi de Gumbel, ces volumes de stockage seront nos résultats de références. Nous les comparerons ensuite aux résultats obtenus avec les méthodes des pluies et des abaques.

3.1) Calcul des volumes de stockage avec la loi de Gumbel

3.1.1) Modélisation de la transformation pluie-débit

Avec les modèles décrits précédemment (cf. 2.3), nous modélisons la transformation pluie-débit puis calculons les volumes à stocker. Cette modélisation se fait pour chacun de nos 36 essais en utilisant en entrée les hyétogrammes de la station de mesure de Gerland (cf. 2.2).

Nous retiendrons les 30 volumes à stocker les plus importants et les classerons de façon décroissante (tab. 11).

rang	1	2	3	4	5	6	7	8
volume (m^3)	14899	13638	11904	11709,3	8230,4	8153	7853	7157
rang	9	10	11	12	13	14	15	16
volume (m^3)	7073,2	6421,3	5913	5306,4	5293	5140	4871,1	4652,1
rang	17	18	19	20	21	22	23	24
volume (m^3)	4541	4280,4	4279	4186,1	4125	3952	3929	3900
rang	25	26	27	28	29	30		
volume (m^3)	3791,1	3702	3619	3582	3301,2	2991		

Tableau 11: Volumes à stocker calculés avec les modèles de réservoir pour l'essai n°21

Afin d'attribuer une période d'occurrence à ces volumes, nous avons mené une analyse fréquentielle de ces résultats en utilisant la loi de Gumbel.

3.1.2) Analyse fréquentielle des volumes de stockage

Nous allons, ici, estimer les volumes de stockage à partir de la loi Gumbel associée à la distribution empirique de Hazen. En somme, nous menons une analyse fréquentielle des volumes de stockage obtenus avec les séries pluviométriques.

Cette analyse fréquentielle est effectuée dans le tableau 12 où les volumes de stockage calculés sont désignés comme étant la série brute. Le reste du tableau reprend les étapes de l'analyse fréquentielle d'une série à savoir le classement fréquentiel des volumes de stockage calculés, le calcul des périodes de retour empiriques, le calcul des fréquences de non-dépassement de ces volumes et enfin le calcul des volumes à partir des paramètres de la loi Gumbel s et xo.

Vs calculés par les modèles de réservoir	Rang	Périodes de retour empiriques	-Ln (-Ln (F))	Vs calculé suivant la loi de Gumbel
14899	1	32	4,1	14750,8
13637,5	2	10,7	3	11993,6
11903,7	3	6,4	2,4	10687,6
11709,3	4	4,6	2,1	9811,2
8230,4	5	3,6	1,8	9143,8
8152,8	6	2,9	1,6	8600
7852,6	7	2,5	1,4	8137,6
7156,7	8	2,1	1,2	7732,6
7073,2	9	1,9	1,1	7370
6421,3	10	1,7	1	7039,8
5913	11	1,5	0,8	6734,9
5306,4	12	1,4	0,7	6449,9
5293	13	1,3	0,6	6181,1
5140	14	1,2	0,5	5925
4871,1	15	1,1	0,4	5679,2
4652,1	16	1	0,3	5441,5
4540,8	17	1	0,2	5209,8
4280,4	18	0,9	0,1	4982,4
4278,8	19	0,9	0,1	4757,6
4186,1	20	0,8	-0,1	4533,6
4125	21	0,8	-0,1	4308,6
3952	22	0,7	-0,2	4080,5
3928,6	23	0,7	-0,3	3846,6
3900	24	0,7	-0,4	3603,9
3791,1	25	0,7	-0,5	3347,9
3701,6	26	0,6	-0,6	3071,4
3618,8	27	0,6	-0,8	2764
3581,7	28	0,6	-0,9	2404,5
3301,2	29	0,6	-1,1	1942,5
2991	30	0,5	-1,4	1170,4

Tableau 12 : Analyse fréquentielle des 30 plus forts volumes de stockage obtenus pour l'essai n°21.

Nous obtenons pour cet essai, l'ajustement de Gumbel suivant :

$$s = 2471,15$$

$$x_o = 4653,77$$

La figure 50 illustre la distribution des volumes du tableau 12 en fonction de –Ln (-Ln (F)).

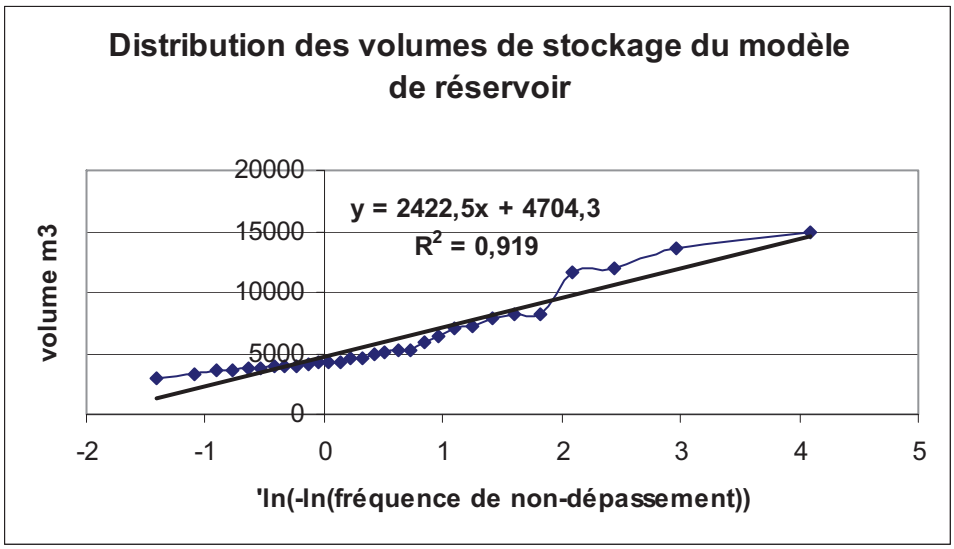


Figure 50: Représentation graphique de la distribution des volumes de stockage calculés avec les modèles de réservoir pour l'essai n°21.

3.1.3) Calcul des volumes de stockage

Nous calculons maintenant pour les différentes périodes de retour (1an, 2ans, 5ans et 10ans) les volumes de stockage Gumbel à partir de l'équation (éq. 17) de Gumbel.
Cette équation peut s'écrire, en prenant en compte la fréquence de non-dépassement (éq.15) et la formule de Hazen (éq.14), de la manière suivante:

$$X = s*(-LN\ (-LN\ (1-16/\ (T*30)))) + xo \qquad \text{(éq.32)}$$

Avec 16 : la durée d'observation (année) ;

30 : la taille de l'échantillon des valeurs ;

T : période de retour (année) ;

s et xo : les paramètres de Gumbel.

Nous obtenons les ajustements de Gumbel suivant pour les 36 essais (tab. 13):

Paramètres de Gumbel	**s**	**xo**
Essais		
1	0,4	0,8
2	0,6	1,2
3	0,8	1,7
4	1	2,1
5	2,4	5,4
6	4,5	9,8
7	9,4	20,7
8	11,6	24,8
9	20,9	41,3
10	50,7	100
11	86,4	184,8
12	123,5	273
13	293,2	571,2
14	651,2	1396,8
15	722,4	1419,8
16	1079,7	2276,4
17	1803,8	3548,2
18	2888,2	5781,4
19	3966,5	8011,9
20	5037,3	10305
21	2471,6	4653,8
22	4548,3	9146,9
23	9417,4	20056
24	11520,1	23297,1
25	6178,8	11051,2
26	11408	22263,1
27	23523,3	49596,5
28	28741,9	56866,2
29	9888,3	9362,9
30	24328,7	30542
31	43327,9	90332,4
32	61671,7	134427,4
33	28892,5	42034,9
34	64864,6	131888,8
35	71338,2	108067,7
36	108341,2	217858,4

Tableau 13 : Paramètres d'ajustement de Gumbel.

Les paramètres d'ajustement du tableau 13 nous permettent de calculer les volumes de stockage sur l'ensemble de nos 36 essais. Nous obtenons les résultats suivants (tab. 14):

Période retour	1an	2ans	5ans	10ans
Essais	Volumes de stockage (m^3)			
1	0,9	1,2	1,5	1,8
2	1,8	1,9	2,5	2,9
3	1,9	2,6	3,4	4
4	2,4	3,3	4,3	5,1
5	6	8,2	10,7	12,4
6	11	15,1	19,6	22,9
7	23,2	31,7	41,2	48
8	27,9	38,3	50	58,4
9	47	65,8	86,9	102
10	113,8	159,4	210,6	247,2
11	208,3	286	373,4	435,8
12	306,5	417,5	542,5	631,6
13	650,8	914,4	1210,9	1422,5
14	1573,6	2159,1	2817,7	3287,7
15	1616,1	2265,5	2996,2	3517,6
16	2569,7	3540,4	4632,5	5411,7
17	4038,8	5660	7484,5	8786,4
18	6565,9	9162,6	12084	14168,5
19	9089,3	12655,4	16667,5	19530,3
20	11673,3	16202,1	21297,3	24933
21	5325	7546,7	10046,3	11829,8
22	10382,3	14471,5	19072,1	22354,8
23	22614	31080,8	40606,4	47403,3
24	26426,2	36783,5	48436,1	56750,6
25	12729,5	18284,6	24534,4	28993,9
26	25361,8	35618,3	47157,5	55391,1
27	55986	77134,8	100928,5	117906,1
28	64673,2	90513,9	119586,1	140330,2
29	12048,8	20938,9	30940,8	38077,5
30	37150,2	59023,2	83631,6	101190,5
31	102101,4	141055,7	184881,8	216153
32	151180,1	206630,1	269014,8	313528,4
33	49882,9	75858,9	105083,6	125936,3
34	149507,7	207824,8	273435,1	320250,2
35	127444,9	191582,1	263740,3	315227,6
36	247286,5	344691,6	454278,2	532472

Tableau 14 : Volumes de stockage de Gumbel obtenus pour les 36 essais pour différentes périodes de retour.

3.2) Calcul des volumes de stockage avec la méthode des pluies

3.2.1) Calcul des hauteurs de stockage

Pour l'application de cette méthode nous utilisons les résultats des dépouillements des pluies obtenus lors de la construction des courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) faites au paragraphe 2.2.2.4.

Pour calculer le volume de stockage, nous devons transformer les intensités maximales I_{max} en hauteurs en utilisant la formule de Montana :

$$H(t, T) = a^* t^{b*} t = a * t^{b+1} \quad \text{(éq. 33)}$$

avec $a*t^b$ en mm/h ; t en heure (h) ; H en mm ; a et b les coefficients de Montana et T en année (période retour).

Nous supposons ensuite que l'ouvrage de stockage a un débit admissible constant Qad que nous exprimons ensuite sous la forme d'un débit spécifique q_s :

$$q_s = 360 * Qad / S_a \quad \text{(éq. 34)}$$

Ainsi nous traçons conjointement les hauteurs précipitées H (t, T) pour une période de retour donnée et les hauteurs d'eau évacuées q_s*t.

Les différences Δh (q_s, t, T) entre les courbes q_s*t et H (t, T) correspondent aux hauteurs à stocker pour les différents intervalles de temps. Le maximum Δh_{max} (q_s, T) correspond à la hauteur totale à stocker. Le volume d'eau à stocker se détermine alors facilement par l'équation suivante :

$$V_S = 10 * \Delta h_{max}(q_s, T) * Sa \quad \text{(éq. 35)}$$

avec Δh_{max} (mm) et Sa surface active (ha) du ruissellement alimentant l'ouvrage de stockage. Elle est déterminée par le produit du coefficient de ruissellement C (%) et de la surface totale du bassin versant drainé.

Un coefficient de 10 est appliqué à cette équation afin d'homogénéiser les unités des variables utilisées.

Nous obtenons les résultats suivants (fig. 51 à 54):

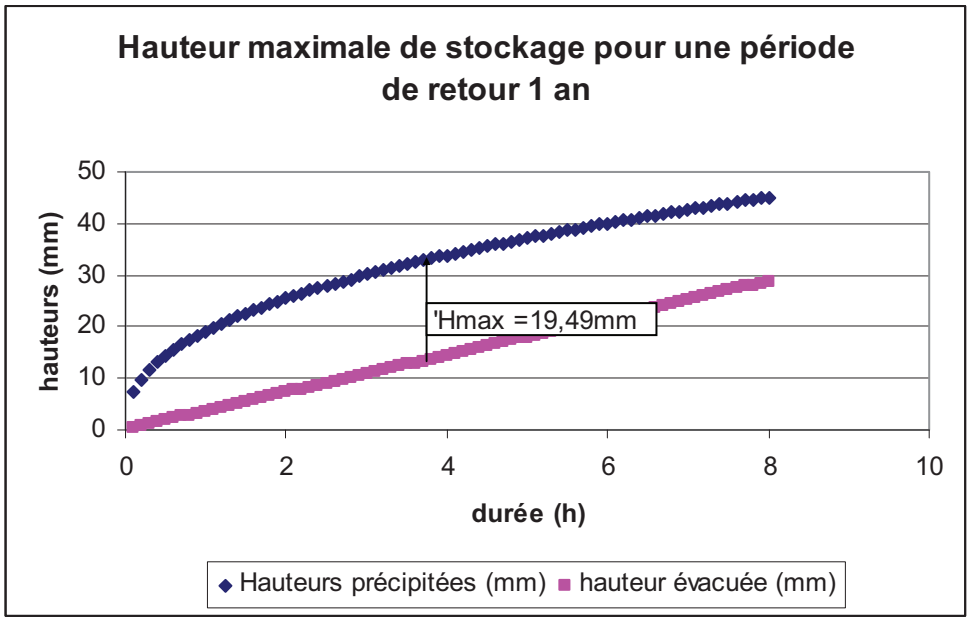


Figure 51: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 1 an pour l'essai n°21.

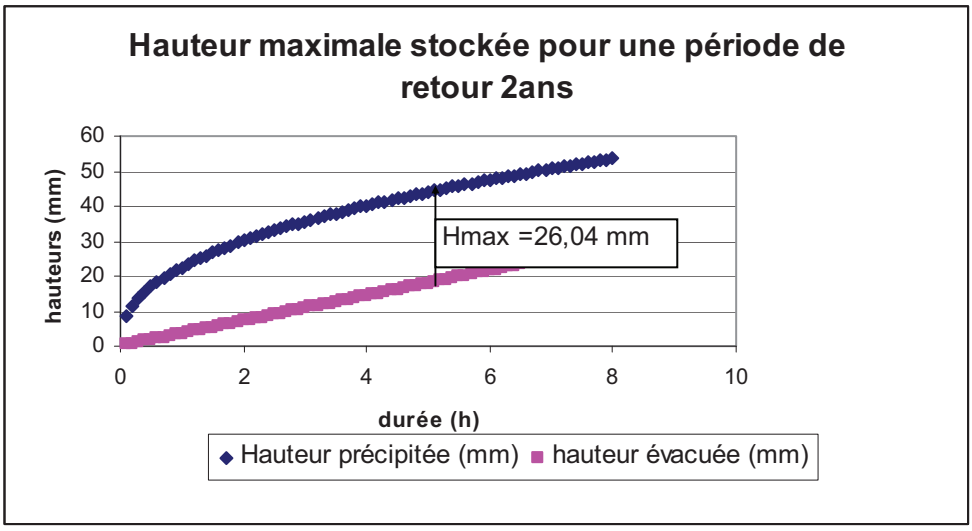


Figure 52: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 2 ans pour l'essai n°21.

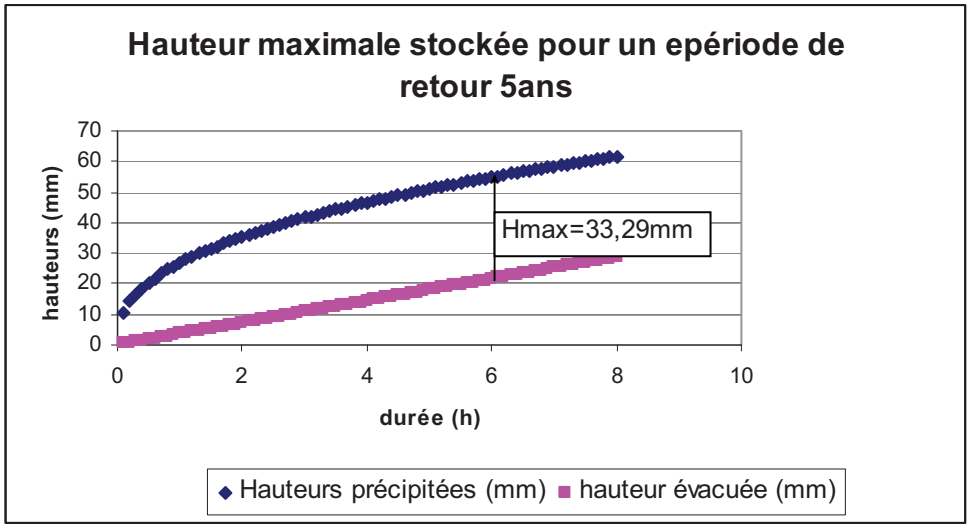


Figure 53: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 5 ans pour l'essai n°21.

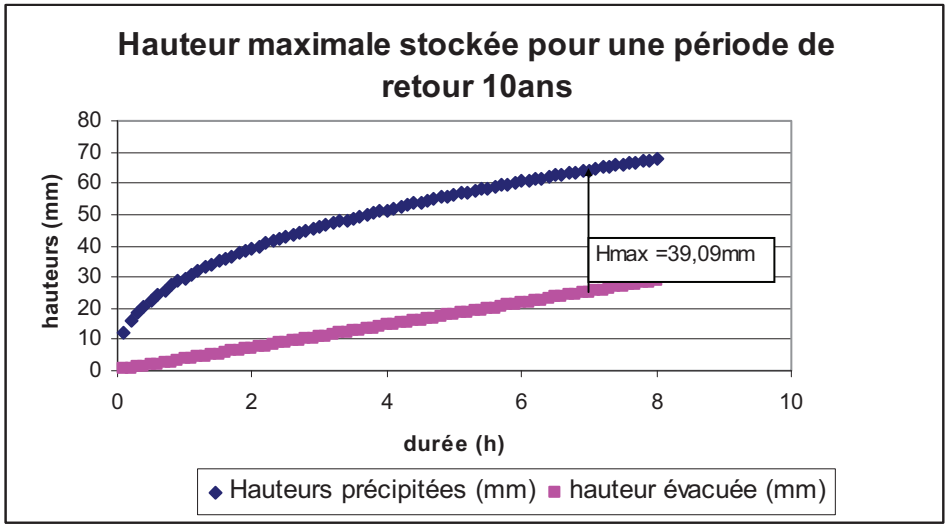


Figure 54: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 10 ans pour l'essai n°21.

3.2.2 Calcul des volumes de stockage

Sur l'ensemble de nos essais, nous avons obtenu les résultats de volumes de stockage suivants (tab. 15):

N° Essais	1an	2ans	5ans	10ans
	Volumes de stockage (m^3)			
1	1,1	1,3	1,6	1,7
2	1,7	2,1	2,5	2,8
3	2,3	2,9	3,4	3,9
4	3,0	3,7	4,4	5,0
5	5,8	7,8	9,9	11,7
6	11,4	15,3	19,3	22,4
7	28,7	34,6	40,2	44,6
8	34,8	42,4	49,6	55,2
9	47,8	63,7	82,5	97,1
10	139,1	181,3	221,4	252,5
11	258,1	317,1	373,3	416,9
12	377,1	453,0	525,3	581,2
13	777,3	1030,0	1270,8	1457,4
14	1966,8	2388,7	2790,1	3101,0
15	2004,7	2595,4	3157,3	3592,6
16	3194,6	3954,1	4676,5	5236,1
17	5324,3	6590,2	7794,2	8726,9
18	8394,0	10503,7	12510,4	14064,8
19	11463,4	14417,2	17226,5	19402,8
20	14531,0	18330,7	21942,7	24740,7
21	5848,3	7812,5	9985,8	11727,1
22	11399,5	15259,2	19260,8	22369,7
23	2867,0	34594,4	40213,1	44565,5
24	34826,0	42421,4	49645,4	55241,4
25	14620,7	19531,2	24964,4	29317,9
26	28498,8	38147,9	48152,0	55924,1
27	86486,0	71717,1	100532,7	111413,8
28	87065,0	106053,4	124113,5	138103,5
29	23894,5	31837,0	41242,0	48556,5
30	69538,8	90637,1	110704,0	126248,3
31	129034,3	158571,9	186665,5	208427,6
32	188529,8	226506,8	262627,1	290607,0
33	77734,8	103004,6	127084,7	145738,0
34	196677,6	238874,3	279007,8	310096,6
35	200468,6	259543,9	315731,0	359255,2
36	319459,6	395413,7	467654,1	523613,8

Tableau 15 : Volumes de stockage avec la méthode des pluies pour différentes périodes de retour pour les 36 essais.

3.3) Comparaisons des résultats de volumes de stockage entre les méthodes de Gumbel et des pluies.

3.3.1) Calcul des écarts

Les écarts de volumes, obtenus entre la méthode des pluies et la méthode Gumbel, sont présentés dans le tableau 16. Nous les avons calculés par la formule suivante :

$$\text{Ecart} = 100 * (V_P - V_G) / V_G \qquad \text{(éq. 36)}$$

avec V_P : Volume de stockage (m^3) déterminé par la méthode des pluies ;

V_G : Volume de stockage (m^3) déterminé par la méthode de Gumbel ;

Ecart : en pourcentage (%).

N° Essais	1an	2ans	5ans	10ans
	Ecarts (%) des volumes de stockage			
1	23,5	11,2	0,6	-3,5
2	22	10,9	1,1	-2,7
3	21	10,7	1,3	-2,3
4	20,4	10,5	1,3	-2,1
5	-2,9	-4,9	-6,5	-5,7
6	3,2	1,2	-1,9	-2,2
7	23,6	9,1	-2,5	-7,2
8	24,7	10,7	-0,8	-5,4
9	1,7	-3,2	-5,1	-4,8
10	22,2	13,7	5,1	2,1
11	23,9	10,9	-0,02	-4,3
12	23	8,5	-3,2	-8
13	19,4	12,7	5	2,5
14	25	10,6	-1	-5,7
15	24	14,6	5,4	2,1
16	24,3	11,7	1	-3,2
17	31,8	16,4	4,1	-0,7
18	27,8	14,6	3,5	-0,7
19	26,1	13,9	3,4	-0,7
20	24,5	13,1	3	-0,8
21	9,8	3,5	-0,6	-0,9
22	9,8	5,4	1	0,1
23	26,9	11,3	-1	-6
24	31,8	15,3	2,5	-2,7
25	14,9	6,8	1,8	1,1
26	12,4	7,1	2,1	1
27	54,5	-7	-0,4	-5,5
28	34,6	17,2	3,8	-1,6
29	98,3	52	33,3	27,5
30	87,2	53,6	32,4	24,8
31	26,4	12,4	1	-3,6
32	24,7	9,6	-2,4	-7,3
33	55,8	35,8	20,9	15,7
34	31,6	14,9	2	-3,2
35	57,3	35,5	19,7	14
36	29,2	14,7	2,9	-1,7

Tableau 16 : Ecarts (%) de volumes de stockage entre la méthode de pluies et la loi de Gumbel.

L'analyse du tableau 16 montre que les volumes de stockage obtenus avec la méthode des pluies sont très souvent supérieurs à ceux de Gumbel. La méthode des pluies a donc une forte tendance à surdimensionner les ouvrages de stockage.

3.3.2) Analyse des écarts

Nous allons analyser à travers une représentation graphique (fig.55 à 59), l'évolution de ces écarts.

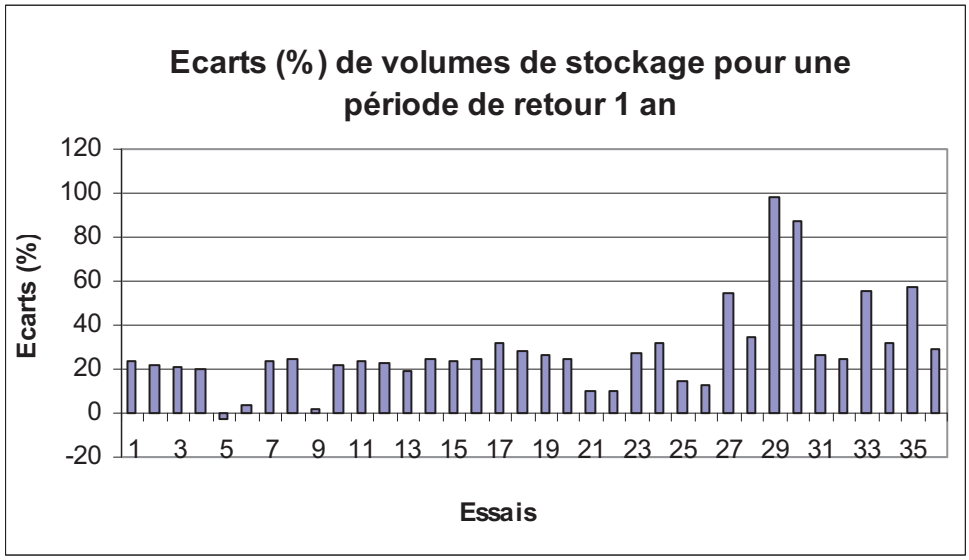


Figure 55 : Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 1 an entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Figure 55, nous obtenons une moyenne des écarts de 28,18 et un écart-type de 20,44.

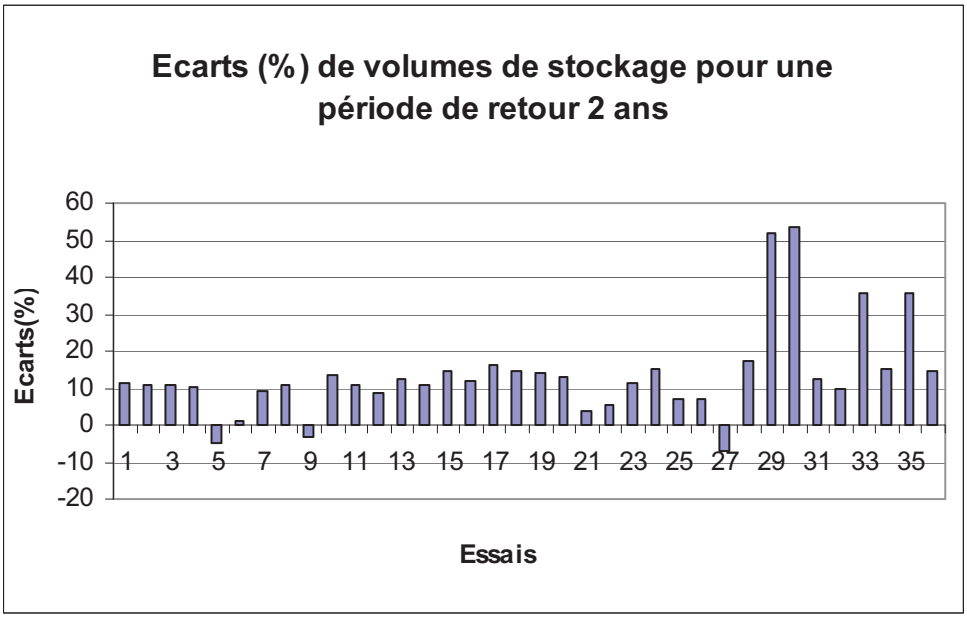


Figure 56: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 2 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Figure 56, nous obtenons une moyenne des écarts de 13,48 et un écart-type de 12,72.

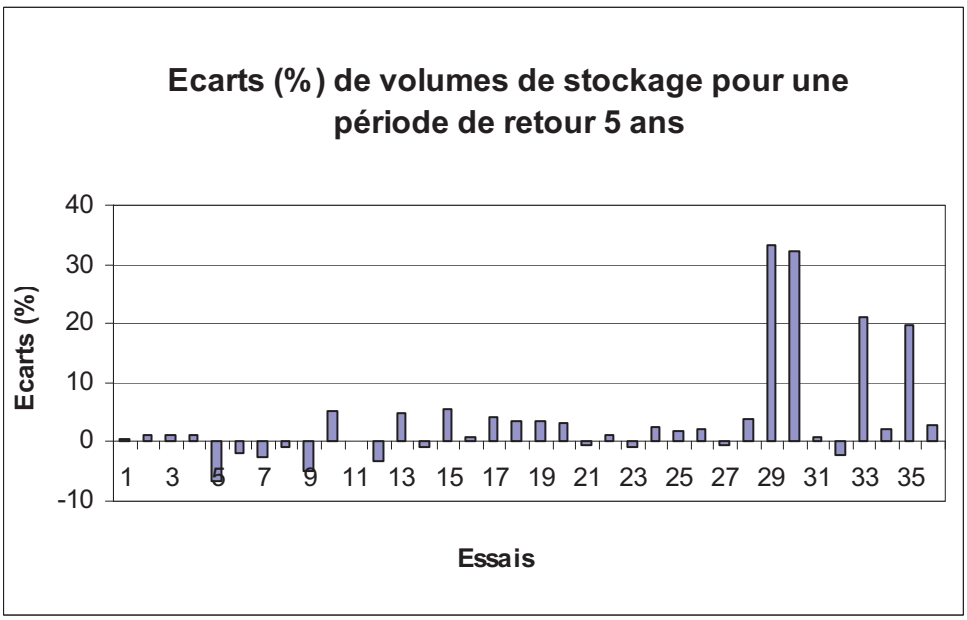


Figure 57: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 5 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Figure 57, nous obtenons une moyenne des écarts de 3,69 et un écart-type de 8,89.

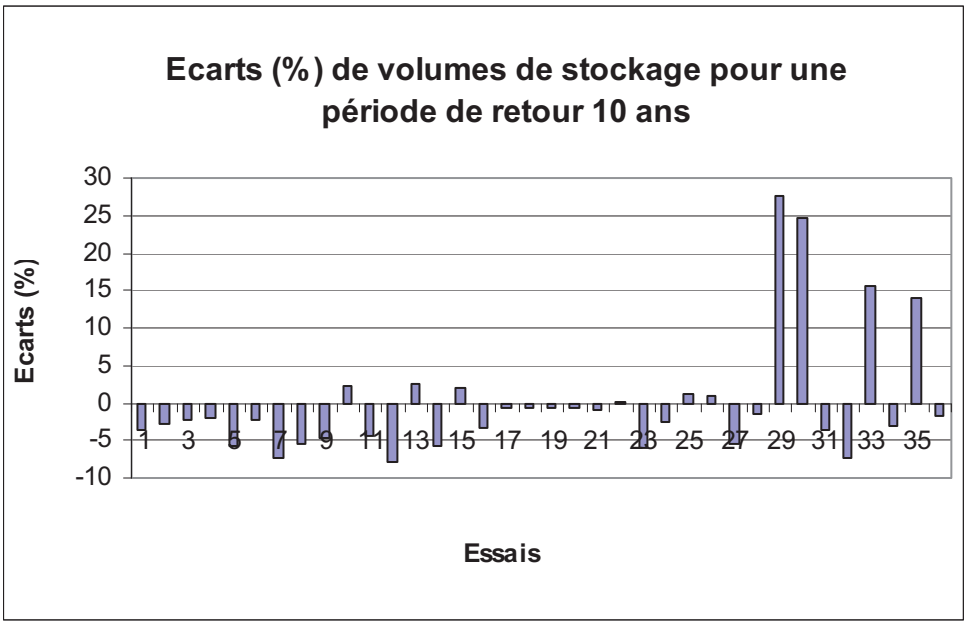


Figure 58: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 10 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Figure 58, nous obtenons une moyenne des écarts de -0,04 et un écart-type de 8,08.

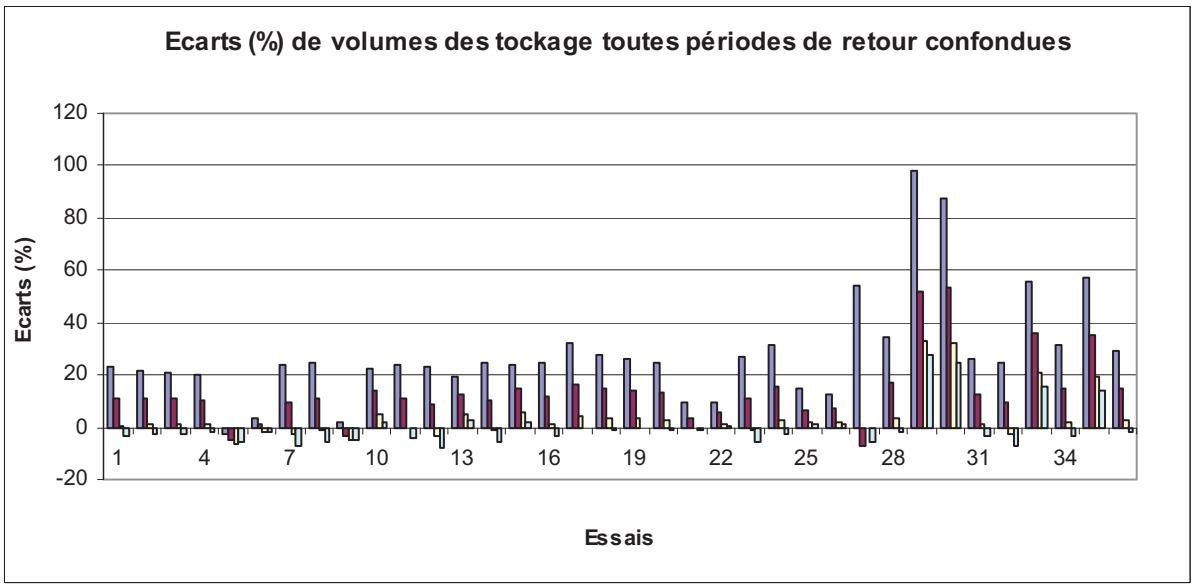


Figure 59: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai toutes périodes de retour confondues entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Figure 59, nous obtenons une moyenne des écarts de 11 et un écart-type de 17.

Ces figures montrent que **:**

La méthode des pluies, comparée à celle de Gumbel, a tendance à surdimensionner les ouvrages.

Pour les bassins versants de grande taille **>** 200ha (essais 25 à 36), la méthode des pluies surdimensionne nettement plus que pour les bassins versants de petite taille**<** 200ha. Ces résultats sont semblables à ceux obtenus par [Desbordes, 1985].

Plus la période de retour est grande, plus les écarts sont faibles.

Si la moyenne des écarts est faible, la dispersion de ces derniers est élevée.

Une autre façon d'apprécier ces écarts est d'établir une régression linéaire afin d'étudier la corrélation des résultats obtenus.

3.3.3) Corrélation des résultats

Les figures 60 à 63 montrent les résultats que nous obtenons.

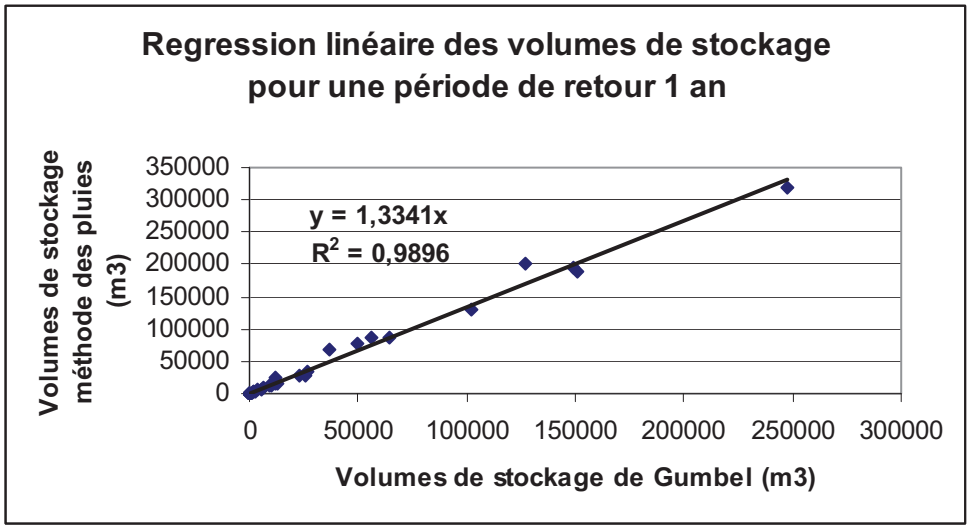


Figure 60: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

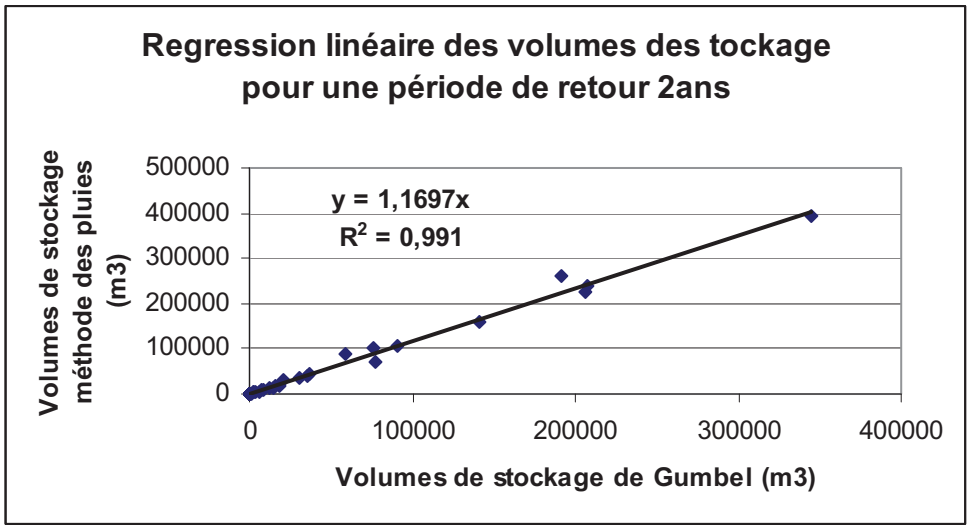


Figure 61: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

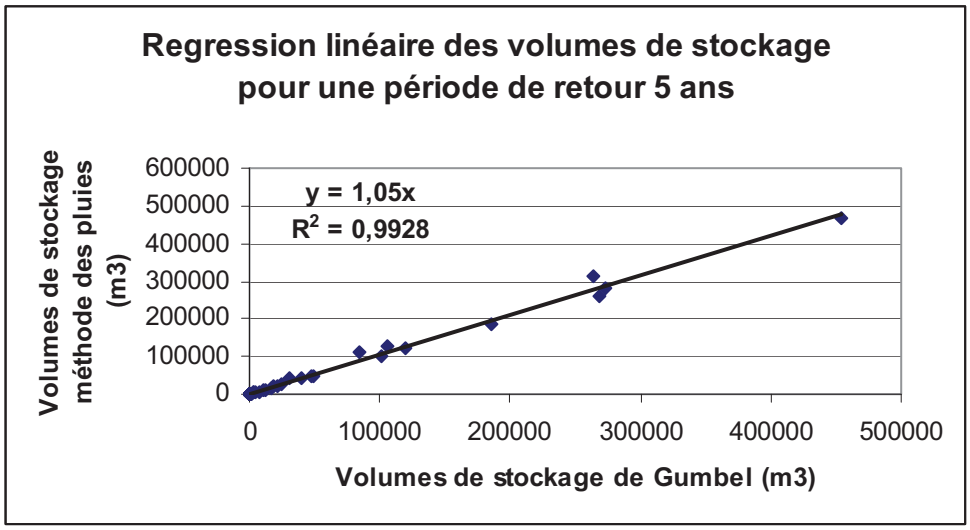


Figure 62: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

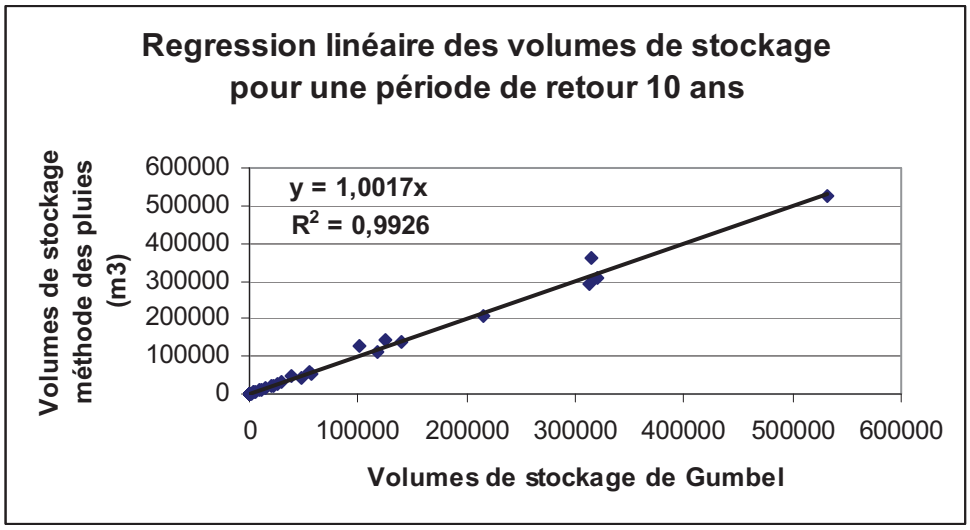


Figure 63: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel.

Ces figures montrent une bonne corrélation des résultats obtenus avec la méthode des pluies et la loi de Gumbel. Les valeurs des pentes des droites affines de régression confirment que la méthode des pluies a une forte tendance à surdimensionner les ouvrages. En revanche, cette méthode d'analyse ne permet pas de mettre en valeur la dispersion des écarts, la valeur des volumes pondérant la valeur des écarts. Elle n'est donc pas adaptée à l'étude du cas présent car ne mettant pas en valeur les cas où la méthode des pluies donne des résultats très éloignés de ceux obtenus avec la loi de Gumbel.

3.4) Calcul des volumes de stockage avec la méthode des Abaques

Cette méthode se démarque de la méthode des pluies par le fait que les hauteurs maximales de stockage encore appelées hauteurs spécifiques de stockage sont cette fois déterminées par lecture de l'abaque, présenté au chapitre 1, et non par calcul.

Cet abaque permet donc d'évaluer la capacité spécifique de stockage « ha » (mm) d'un bassin de retenue en fonction de la hauteur équivalent « q ». Nous appliquons cette méthode à la région pluviométrique II qui comprend la ville de Lyon.

A noter cependant que sur cet abaque il n'est pas possible par lecture de déterminer la capacité spécifique de stockage pour les périodes de retour 1an et 5 ans, car seules les

courbes, traduisant la capacité de stockage en fonction de la hauteur équivalent « q », de périodes de retour de 2ans ; 4ans ; 10ans et 20 ans sont représentées. Nous avons donc, connaissant la hauteur stockée pour une période de retour de 10ans, utilisé les coefficients donnés dans l'Instruction Technique de 77 pour le calcul de ces hauteurs de stockage. Nous utilisons à cet effet les formules suivantes :

Pour la période de retour 1an : $\boxed{ha\ (1\,an\ ) = ha\ (10\ ans\ ) * 0.45}$ (éq. 37)

Pour la période de retour 5ans : $\boxed{ha\ (5\,ans\ ) = ha\ (10\ ans\ ) * 0.8}$ (éq. 38)

Le volume de stockage, est quant à lui, déterminé par la même formule que dans la méthode des pluies à savoir :

$$V = 10 * ha * Sa \qquad \text{(éq. 39)}$$

L'ensemble des résultats obtenus pour les 36 essais est présenté dans le tableau 17 :

N° Essais	1an	2ans	5ans	10ans
	Volumes de stockage (m^3)			
1	0,5	0,7	1	1,2
2	0,8	1,13	1,5	1,9
3	1,2	1,6	2	2,6
4	1,4	1,962	2,6	3,2
5	3,6	4,7	6,4	8,0
6	6,4	8,5	11,4	14,3
7	17,9	24,4	31,8	39,8
8	18,8	25,9	33,5	41,9
9	32,4	43,2	57,6	72
10	73,8	99	131,2	164
11	95,8	128,8	170,2	212,8
12				
13	410,4	552	729,6	912
14	1102,5	1520	1960	2450
15	1033,2	1393	1836,8	2296
16	1611,9	2196	2865,6	3582
17	2686,5	3660	4776	5970
18	4162,5	5675	7400	9250
19	5748,75	7770	10220	12775
20	7249,5	9810	12888	16110
21	3618	4770	6432	8040
22	6412,5	8550	11400	14250
23	17262	24430	30688	38360
24	18832,5	25920	33480	41850
25	9045	11850	16080	20100
26	16031,3	21250	28500	35625
27	43233,8	61075	76860	96075
28	47081,3	64800	83700	104625
29	16200	21600	28800	36000
30	36787,5	49750	65400	81750
31	53235	91350	94640	118300
32				
33	40770	54600	72480	90600
34	106875	150500	190000	237500
35	103320	170800	183680	229600
36	161190	219600	286560	358200

Tableau 17 : Volumes de stockage avec la méthode des Abaques pour différentes périodes de retour pour les 36 essais dans la région pluviométrique II.

Remarques :

Nous n'avons pu déterminer pour certains essais (les essais N°12 et N°32) les volumes de stockage compte tenu des limites de validité de la méthode. En effet, par lecture de l'abaque, les hauteurs spécifiques de stockage et par conséquent des volumes de stockage ne peuvent être estimés que pour des hauteurs équivalentes « q » comprises entre 0,5 et 10 mm/h.

3.5) Comparaison des résultats de volumes de stockage entre les méthodes de Gumbel et des Abaques

3.5.1) Calcul des écarts

Les résultats obtenus sur le calcul des écarts de volumes de stockage entre ces deux méthodes sont présentés dans le tableau 18 :

N° Essais	1an	2ans	5ans	10ans
	Ecarts (%) des volumes de stockage			
1	-37,5	-38,8	-38,2	-33,8
2	-38,9	-40,3	-39,6	-35,3
3	-39,2	-39,3	-39,8	-35,5
4	-40	-40,9	-40,5	-36,3
5	-39,9	-42,3	-39,8	-35,4
6	-41,9	-43,6	-41,9	-37,7
7	-22,9	-22,9	-22,9	-17,2
8	-32,6	-32,4	-33,1	-28,3
9	-31	-34,3	-33,7	-29,4
10	-35,2	-37,9	-37,7	-33,7
11	-54	-55	-54,4	-51,2
12				
13	-36,9	-39,6	-39,8	-35,9
14	-29,9	-29,6	-30,4	-25,5
15	-36,1	-38,5	-38,7	-34,7
16	-37,3	-38	-38,1	-33,8
17	-33,5	-35,3	-36,2	-32,1
18	-36,6	-38,1	-38,8	-34,7
19	-36,8	-38,6	-38,7	-34,6
20	-37,9	-39,5	-39,5	-35,4
21	-32,1	-36,8	-36	-32
22	-38,2	-40,9	-40,2	-36,3
23	-23,7	-21,4	-24,4	-19,1
24	-28,7	-29,5	-30,9	-26,3
25	-28,9	-35,2	-34,5	-30,7
26	-36,8	-40,3	-39,6	-35,7
27	-22,8	-20,8	-23,9	-18,5
28	-27,2	-28,4	-30	-25,4
29	34,5	3,2	-6,9	-5,5
30	-1	-15,7	-21,8	-19,2
31	-47,9	-35,2	-48,8	-45,3
32				
33	-18,3	-28	-31	-28,1
34	-28,5	-27,6	-30,5	-25,8
35	-18,9	-10,9	-30,4	-27,2
36	-34,8	-36,3	-36,9	-32,7

Tableau 18 : Ecarts (%) de volumes de stockage entre les méthodes des Abaques et de Gumbel.

3.5.2) Analyse des écarts

Nous allons analyser à travers une représentation graphique (fig. 64 à 68), l'évolution de ces écarts pour différentes périodes de retour.

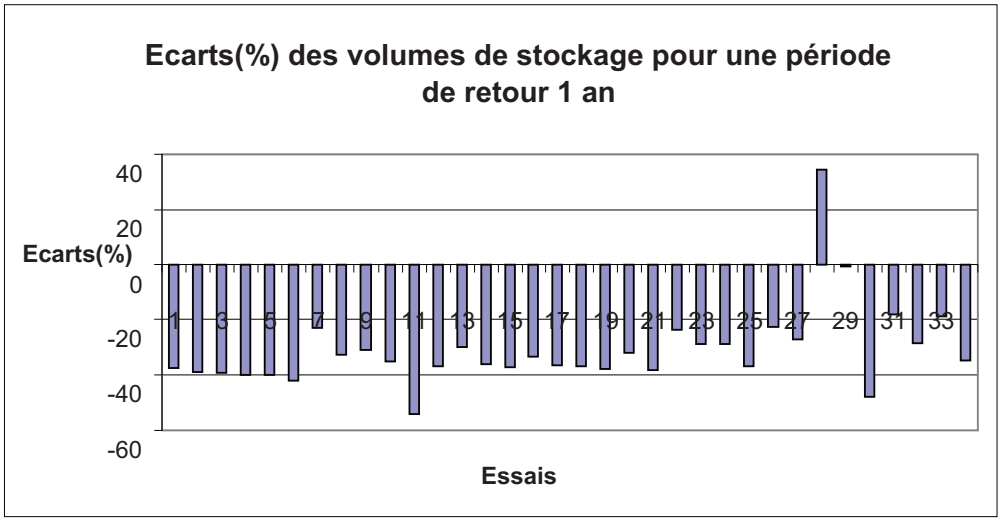


Figure 64: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 1an entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Figure 64, nous obtenons une moyenne des écarts de –30,9 et un écart-type de 14,9

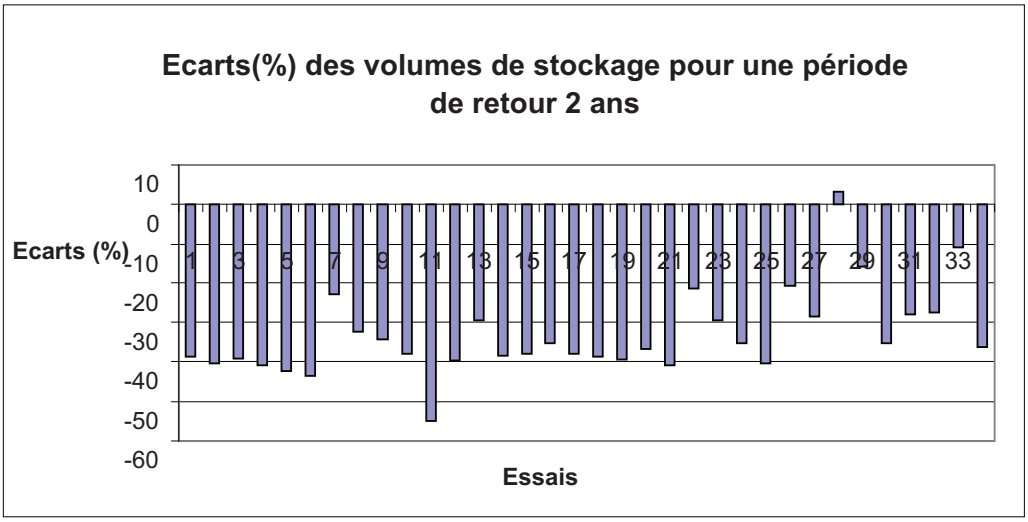


Figure 65: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 2ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Figure 65, nous obtenons une moyenne des écarts de –33,2 et un écart-type de 10,8.

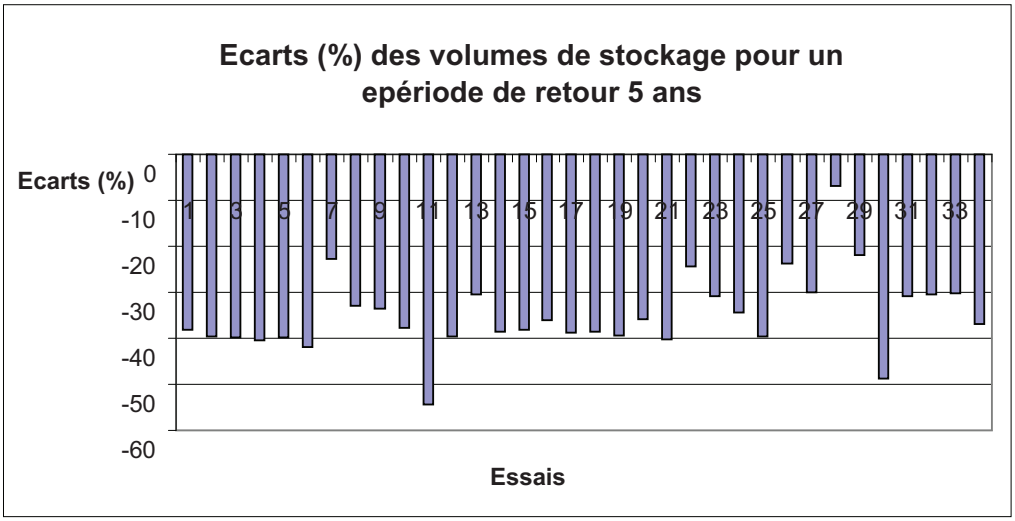


Figure 66: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 5ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Figure 66, nous obtenons une moyenne des écarts de –34,9 et un écart-type de 8,4.

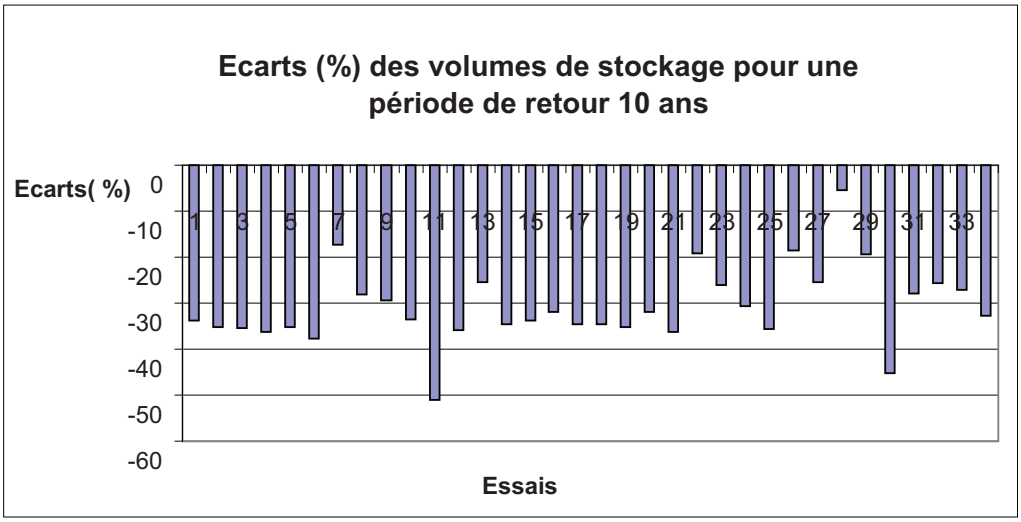


Figure 67: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 10ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Figure 67, nous obtenons une moyenne des écarts de –30,8 et un écart-type de 8,4.

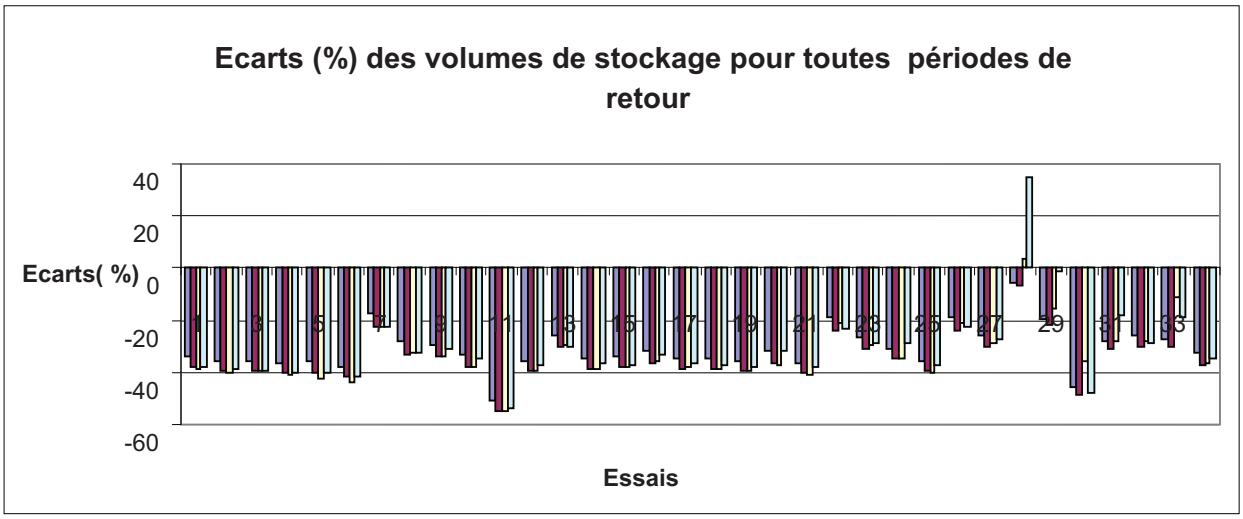


Figure 68: Ecarts (%) des volumes de stockage pour l'ensemble des essais toutes périodes de retour confondues entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Figure 68, nous obtenons une moyenne des écarts de –32 et un écart-type de 10.

Les figures précédentes montrent que :

Dans la grande majorité des cas étudiés les résultats témoignent d'un sousdimensionnement par la méthode des abaques, excepté aux périodes de retour de 1 an et 2 ans où la méthode des Abaques surdimensionne l'ouvrage de l'essai 28.

Les moyennes des écarts obtenues pour chaque période de retour concordent avec l'estimation du [CERTU, 2003] qui stipule que la méthode des abaques conduit à un sous-dimensionnement des ouvrages de l'ordre de -30%.

Quelle que soit la taille (grand ou petit) du bassin versant ou de l'ordre de grandeur du débit de fuite (fort ou faible), les écarts obtenus entre les méthodes des abaques et de Gumbel sont de façon globale dans les mêmes proportions et ce quelle que soit la période de retour considérée. Aussi, la méthode des abaques ne semble sensible ni à la taille du bassin versant ni à l'ordre de grandeur du débit de fuite.

Nous allons à présent établir une régression linéaire de ces écarts afin d'étudier la corrélation des résultats obtenus.

3.5.3) Corrélation des résultats

Les figures 69 à 72 montrent les résultats de corrélation obtenus.

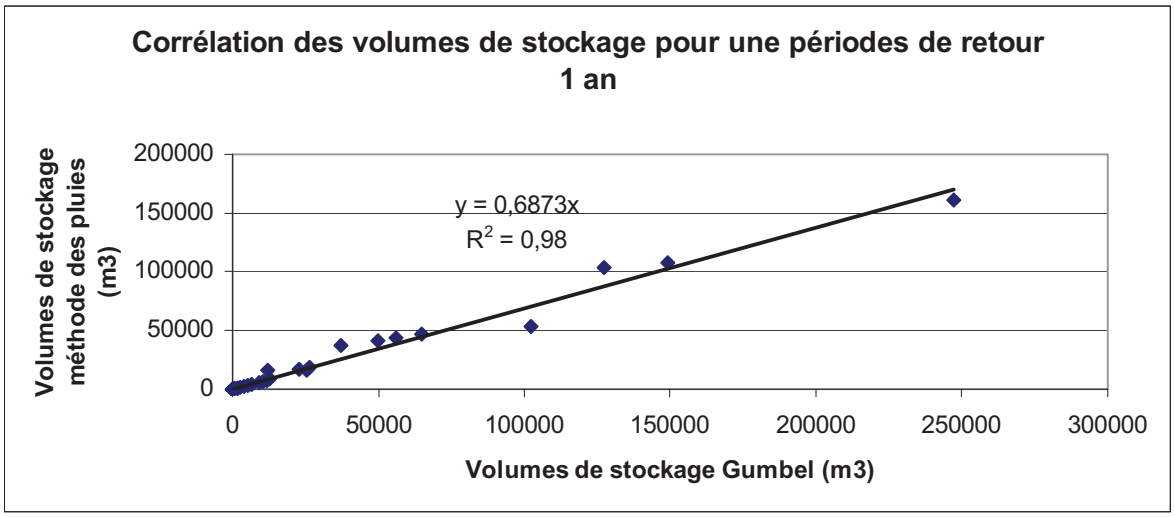


Figure 69: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1an entre les méthodes des abaques et Gumbel.

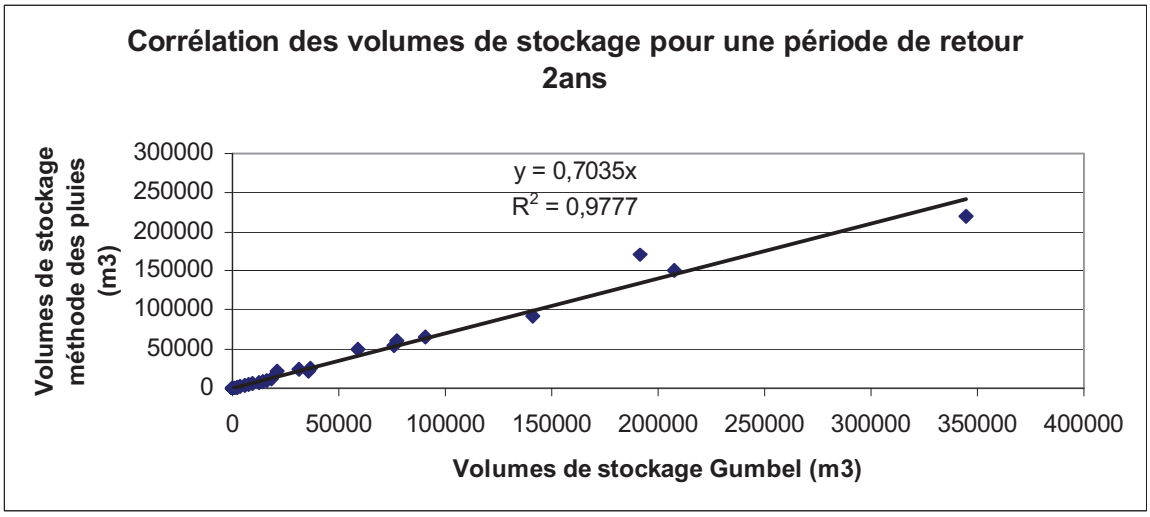


Figure 70: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

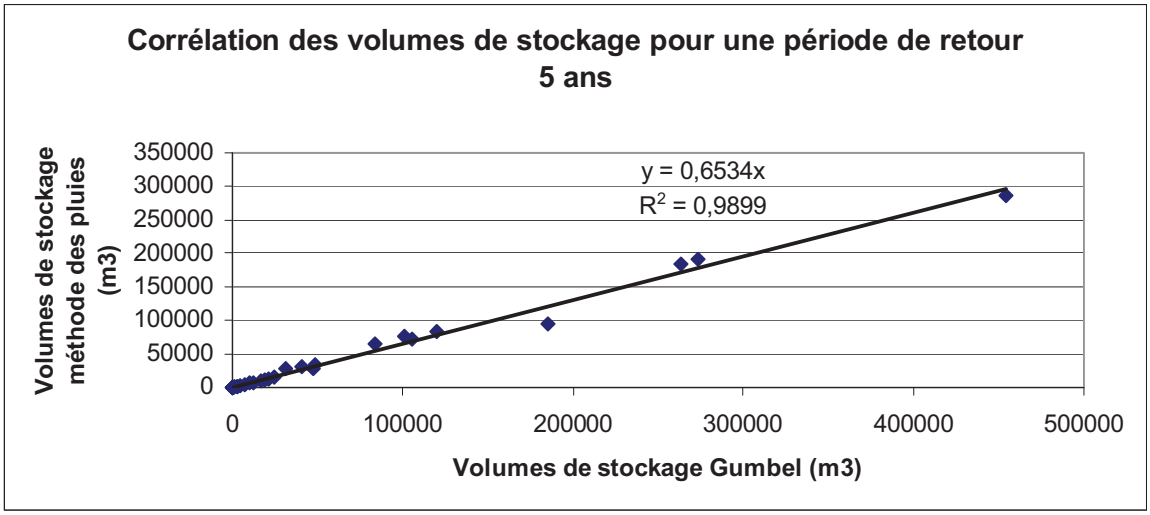


Figure 71: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

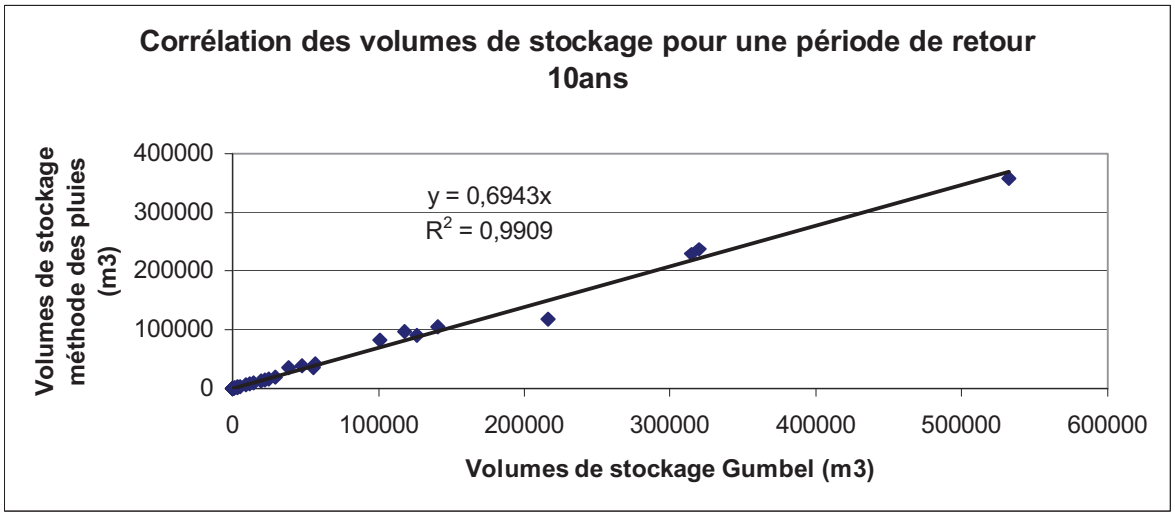


Figure 72: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre les méthodes des abaques et Gumbel.

Ces figures montrent des nuages de points qui se concentrent tout autour de la droite de régression affine. Ceci confirme une bonne corrélation, au regard des coefficients de corrélation R^2, des résultats obtenus précédemment entre la méthode des Abaques et la méthode de Gumbel.

Les pentes de la régression linéaire sont faibles ce qui confirme les écarts de l'ordre de -30% que nous avons obtenus aux différentes périodes de retour.

3.6) Conclusion

Les résultats d'analyse des écarts entre les méthodes des pluies et Gumbel ont révélé que la méthode des pluies a tendance à surdimensionner les ouvrages et que la moyenne générale des écarts toute période de retour confondue reste modeste (11%). En revanche, l'écart-type de 17 montre une grande dispersion des écarts. En effet, dans certains cas, les écarts peuvent atteindre les 100%.

Quant aux résultats d'analyse des écarts entre les méthodes d'Abaques et Gumbel, nous observons les écarts de l'ordre de -32% avec un écart-type de 10. La méthode des abaques telle qu'elle est présentée dans l'Instruction Technique 77 aura donc tendance à sousdimensionner les ouvrages.

Par ailleurs, quelle que soit la taille du bassin versant ou de l'ordre de grandeur du débit de fuite, les écarts obtenus entre les méthodes des abaques et de Gumbel sont de façon globale dans les mêmes proportions et ce quelle que soit la période de retour considérée excepté pour l'essai 28. Aussi, la méthode des abaques ne semble sensible ni à la taille du bassin versant ni à l'ordre de grandeur du débit de fuite.

Ainsi, nous disposons d'une méthode très irrégulière dans ces surdimensionnements et une autre nettement sousdimensionnante mais régulière dans ses erreurs et possédant une exception notable. Notre ambition est donc de mettre au point une nouvelle méthode permettant de remplacer ces deux méthodes et possédant les qualités suivantes : un surdimensionnement ou sousdimensionnement moyen proche de 0 et un surdimensionnement ou sousdimensionnement maximal de l'ordre de 10% quelle que soit le cas étudié (aucune exception n'est tolérée).

Chapitre 4 : Proposition d'un nouvel outil de dimensionnement des ouvrages de stockage

4.1) Introduction

Le présent chapitre a pour objectif de présenter toute la démarche aboutissant à l'élaboration d'une nouvelle méthode de dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales.

Nous cherchons dans un premier temps, par simulation, le type de morphologie de la pluie de projet adapté à notre étude car nous envisageons d'utiliser le concept de pluie de projet pour dimensionner les ouvrages.

Dans un deuxième temps, nous cherchons par réalisation d'essais à construire un modèle qui relie la durée de la pluie de projet retenue aux caractéristiques de l'ouvrage de stockage et du bassin versant.

Enfin, dans un troisième temps, nous analysons les résultats d'essais afin de retenir le meilleur modèle.

Les résultats obtenus avec la loi de Gumbel au chapitre 3 nous serviront de référence pour les simulations que nous allons maintenant mener.

4.2) Choix du type de pluies de projet

Les pluies de projet ou pluies synthétiques sont en générale utilisées pour le dimensionnement des collecteurs, [CERTU, 2003]**.** Pour ce qui est de leur utilisation en matière de dimensionnement des bassins de retenue, [N. Peyron *& al,* 2005] ; [Xia Z, 2005] ont montré leurs limites quant à l'estimation des débits et des volumes de stockage, notamment pour les modèles double triangle de Desbordes et de Chocat.

Dans ce chapitre, nous cherchons à définir la pluie de projet en termes de forme, durée, intensité maximale et hauteur qui serait adaptée à notre problématique.

Ainsi, la construction des pluies de projet de morphologie type rectangle et simple triangle passe par l'analyse statistique de leurs éléments caractéristiques car l'objectif recherché est d'associer un risque à une pluie donnée.

Les valeurs de l'intensité, la durée et la période de retour de la pluie sont reliées par la formule de Montana dont les coefficients ont été calculés au paragraphe 2.2.2.4.

L'objectif dans ce paragraphe est de déterminer des volumes de stockage à partir de ces pluies de projet utilisées en entrée de nos modèles de réservoir. Le principe consiste à trouver les durées de pluies de projet pour lesquelles les volumes de stockage obtenus seront juste supérieurs aux volumes de Gumbel calculés au paragraphe 3.1.3.

Nous effectuons ces calculs de volumes de stockage sur les essais que ceux utilisés lors des calculs des volumes de stockage avec la loi de Gumbel. Ils sont au nombre de 36.

4.2.1) Simulation avec une pluie de projet rectangle

Nous avons décrit cette pluie de projet au chapitre 1. Pour rappel, il s'agit d'une forme d'hyétogramme défini sur une durée t avec une intensité i constante.

Les résultats de simulation que nous obtenons montrent que nous n'avons pas atteint notre objectif. En effet, sur les 36 essais sur lesquels nous avons effectué les calculs de volumes de stockage, 12 n'ont pas permis de déterminer une durée appropriée, c'est-à-dire que la pluie de projet rectangle, quelle que soit sa durée, ne permet pas de calculer pour ces 12 essais des volumes de stockage qui seraient juste supérieurs à ceux de la loi de Gumbel. En voici trois exemples (tab. 19, 20 et 21) :

Période retour	1an	2ans	5ans	10ans
Durée D de la pluie (mm)	270	354	414	474
V_s de la pluie de projet (m^3)	12179,7	17077,3	22412,2	26737,1
V_s de Gumbel (m^3)	12729,5	18284,6	24534,4	28993,9

Tableau 19 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°25.

Au tableau 19, quelle que soit la période de retour considérée, les volumes de stockage obtenus restent inférieurs à ceux de la loi de Gumbel, quelle que soit la durée de pluie. Ici la durée et le volume stocké de la pluie projet indiqués correspondent à la durée pour laquelle nous obtenons le volume de stockage le plus grand.

Période retour	1an	2ans	5ans	10ans
Durée D de la pluie (mm)	252	420	564	600
V_s de la pluie de projet (m^3)	25435,3	35669,2	45863,1	54067,3
V_s de Gumbel (m^3)	25361,8	35618,3	47157,5	55391,1

Tableau 20 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°26.

Au tableau 20, les volumes de stockage obtenus restent inférieurs à ceux de la loi de Gumbel pour les périodes de retour 5 et 10 ans quelle que soit la durée de pluie de projet. Pour ces deux périodes de retour, la durée et le volume stocké de la pluie projet indiqués correspondent à la durée pour laquelle nous obtenons le volume de stockage le plus grand.

Période retour	1an	2ans	5ans	10ans
Durée D de la pluie (mm)	282	396	534	600
V_s de la pluie de projet (m^3)	56006,7	77431,4	101319,6	117463,4
V_s de Gumbel (m^3)	55986	77134,8	100928,5	117906,1

Tableau 21 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°27.

Au tableau 21, les volumes de stockage obtenus restent inférieurs à ceux de la loi deGumbel pour une période de retour 10ans quelle que soit la durée de la pluie de projet. Pour cette période de retour, la durée et le volume stocké de la pluie projet indiqués correspondent à la durée pour laquelle nous obtenons le volume de stockage le plus grand.

Le tableau 22 reprend l'ensemble de nos résultats.

Au vu des résultats, la morphologie rectangle est abandonnée.

N° des essais	Périodes de retour				Objectif atteint
	1an	2ans	5ans	10ans	
1	240	348	480	558	oui
2	234	336	474	540	oui
3	228	336	468	534	oui
4	228	336	468	534	oui
5	**240**	**318**	**378**	**438**	**non**
6	246	318	**540**	**600**	**non**
7	276	390	522	600	Oui
8	258	372	504	582	Oui
9	**156**	**210**	**252**	**288**	**non**
10	264	372	510	588	Oui
11	228	330	468	528	Oui
12	282	378	534	**600**	**non**
13	228	342	498	558	Oui
14	264	378	510	588	Oui
15	210	312	444	510	Oui
16	246	354	486	558	Oui
17	258	366	498	570	Oui
18	246	354	492	558	Oui
19	240	348	480	552	Oui
20	234	342	480	546	Oui
21	**264**	**354**	**366**	**462**	**non**
22	252	330	**558**	**600**	**non**
23	282	396	528	**600**	**Non**
24	246	354	492	564	Oui
25	**270**	**354**	**414**	**474**	**non**
26	252	420	**564**	**600**	**non**
27	282	396	534	**600**	**non**
28	276	384	522	594	Oui
29	**228**	**294**	**336**	**372**	**non**
30	252	360	498	570	Oui
31	246	354	492	564	Oui
32	288	396	534	**600**	**non**
33	252	366	510	576	Oui
34	264	372	504	582	Oui
35	258	366	504	564	Oui
36	252	360	498	570	Oui

Tableau 22 : Résultats de recherche des durées de pluie pour une pluie rectangle sur l'ensemble des 36 essais.

4.2.2) Simulation avec une pluie de projet simple triangle

Nous avons présenté cette pluie de projet au chapitre 1. Il s'agit d'une forme de hyétogramme défini par deux paramètres : la durée totale t de la pluie et son intensité maximale i.

A titre de comparaison, nous présentons ci-après, tout d'abord les résultats obtenus sur les mêmes essais qu'au paragraphe 4.2.1 (tab. 23, 24 et 25), ensuite nous présentons l'ensemble des résultats des 36 essais (tab. 26).

Période retour	**1an**	**2ans**	**5ans**	**10ans**
Durée D de la pluie (mm)	160	234	312	348
V_s de la pluie de projet (m^3)	**12819,3**	**18319, 8**	**24566,1**	**29007**
V_s de Gumbel (m^3)	12729,5	18284,6	24534,4	28993,9

Tableau 23 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°25.

Période retour	**1an**	**2ans**	**5ans**	**10ans**
Durée D de la pluie (mm)	174	252	348	396
V_s de la pluie de projet (m^3)	**25410**	**35689,5**	**47274,9**	**55509**
V_s de Gumbel (m^3)	25361,8	35618,3	47157,5	55391,1

Tableau 24 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°26.

Période retour	**1an**	**2ans**	**5ans**	**10ans**
Durée D de la pluie (mm)	276	384	516	594
V_s de la pluie de projet (m^3)	**56038,1**	**77247,2**	**101061**	**118188,1**
V_s de Gumbel (m^3)	55986	77134,8	100928,5	117906,1

Tableau 25 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°27.

N° des essais	Périodes de retour				Objectif atteint
	1an	2ans	5ans	10ans	
1	234	336	462	534	Oui
2	222	324	450	516	Oui
3	216	318	444	510	Oui
4	216	318	438	504	Oui
5	180	270	390	420	Oui
6	186	276	384	426	Oui
7	288	384	516	594	Oui
8	252	360	492	570	Oui
9	138	198	270	288	Oui
10	192	276	378	432	Oui
11	240	348	474	552	Oui
12	282	390	528	606	Oui
13	186	264	366	414	Oui
14	258	366	498	576	Oui
15	198	282	384	444	Oui
16	234	336	462	534	Oui
17	240	336	456	528	Oui
18	222	318	438	504	Oui
19	216	312	432	492	Oui
20	216	306	426	592	Oui
21	162	234	318	354	Oui
22	180	252	354	402	Oui
23	276	384	516	594	Oui
24	264	366	492	564	Oui
25	162	234	312	348	Oui
26	174	252	348	396	Oui
27	276	384	516	594	Oui
28	264	372	492	564	Oui
29	162	234	288	306	Oui
30	228	318	414	462	Oui
31	240	342	468	546	Oui
32	282	390	528	606	Oui
33	210	294	384	432	Oui
34	252	360	486	558	Oui
35	222	312	408	462	Oui
36	234	336	456	528	Oui

Tableau 26 : Résultats de recherche des durées de pluie pour une pluie simple triangle sur l'ensemble des 36 essais.

Au regard des résultats obtenus, nous retenons la pluie de projet simple triangle.

4.3) Relation entre la durée totale de pluie et les caractéristiques du bassin versant

4.3.1) Introduction

Nous avons expliqué au chapitre 2 lors de la définition du plan d'expériences que nous recherchons une relation entre la durée totale de la pluie de projet et les caractéristiques du bassin versant et de l'ouvrage.

Nous utilisons, pour cette étude, le modèle de régression linéaire multiple qui permet d'établir une relation entre une variable dépendante D (durée de pluie de projet) et un ensemble de variables explicatives (S, C, M, I, Qad, T). Le modèle s'écrit comme suit :

$$D = \beta_o + \beta_1 S + \beta_2 C + \beta_3 I + \beta_4 M + \beta_5 Qad + \beta_6 T \qquad \text{(éq. 40)}$$

avec β_i coefficients des variables explicatives.

S : surface du bassin versant (ha),

C : coefficient de ruissellement (%),

I : pente du bassin versant (%),

M : allongement

Qad : débit spécifique admissible à l'exutoire du bassin versant (l/s/ha).

La détermination de cette équation revient à calculer les coefficients β_i des variables explicatives. L'écriture générale du modèle mathématique comprend 7 paramètres (ou coefficients β_i) qui définissent 7 équations. Il s'agit donc d'une résolution matricielle de 7 équations à 7 inconnues :

$$n\beta_o + \beta_1\sum S_i + \beta_2\sum C_i + \beta_3\sum i_i + \beta_4\sum M_i + \beta_5\sum Qad_i + \beta_6\sum T_i = \sum D_i$$

$$\beta_0\sum S_i + \beta_1\sum S_i^2 + \beta_2\sum SiC_i + \beta_3\sum S_iI_i + \beta_4\sum S_iM_i + \beta_5\sum S_iQad_i + \beta_6\sum SiT_i = \sum S_iD_i$$

$$\beta_0\sum C_i + \beta_1\sum S_iC_i + \beta_2\sum C_i^2 + \beta_3\sum C_iI_i + \beta_4\sum C_iM_i + \beta_5\sum C_iQad_i + \beta_6\sum CiT_i = \sum C_iD_i$$

$$\beta_0\sum I_i + \beta_1\sum S_iI_i + \beta_2\sum C_iI_i + \beta_3\sum I_i^2 + \beta_4\sum I_iM_i + \beta_5\sum I_iQad_i + \beta_6\sum I_iT_i = \sum I_iD_i$$

$$\beta_0\sum M_i + \beta_1\sum S_iM_i + \beta_2\sum C_iM_i + \beta_3\sum I_iM_i + \beta_4\sum M_i^2 + \beta_5\sum M_iQad_i + \beta_6\sum M_iT_i = \sum M_iD_i$$

$$\beta_0\sum Qf_i + \beta_1\sum S_iQf_i + \beta_2\sum C_iQf_i + \beta_3\sum I_iQf_i + \beta_4\sum M_iQf_i + \beta_5\sum Qad_i^2 + \beta_6\sum T_iQad_i = \sum Qad_iD_i$$

$$\beta_0\sum T_i + \beta_1\sum S_iT_i + \beta_2\sum C_iT_i + \beta_3\sum I_iT_i + \beta_4\sum M_iT_i + \beta_5\sum Qad_iT_i + \beta_6\sum T_i^2 = \sum T_iD_i$$

4.3.2) Estimation des coefficients du modèle

A partir des 36 essais définis au chapitre 2, nous établissons un modèle qui relie la durée de pluie de projet simple triangle aux variables explicatives, présentées au paragraphe 4.3.1, par la méthode des « *moindres carrés* ».

Nous obtenons ce modèle par réalisation d'essais dont la matrice est présentée ci-après. Pour l'ensemble des périodes de retour au nombre de 4 (1an, 2ans, 5ans, 10ans) nous obtenons une matrice d'essais constituée de 144 essais (36*4) (tab.27):

Variables explicatives	S	C	M	Qad	I
Les essais					
1	0,01	30	1	1	1‰
2	0,01	50	2	2	5‰
3	0,01	70	3	3	1%
4	0,01	90	4	4	2%
5	0,1	30	2	3	2%
6	0,1	50	1	4	2%
7	0,1	70	4	1	5‰
8	0,1	90	3	2	1‰
9	1	30	3	4	5‰
10	1	50	4	3	1‰
11	1	70	1	2	2%
12	1	90	2	1	1%
13	10	30	4	2	1%
14	10	50	3	1	2%
15	10	70	2	4	1‰
16	10	90	1	3	5‰
17	50	30	1	1	1‰
18	50	50	2	2	5‰
18	50	70	3	3	1%
20	50	90	4	4	2%
21	100	30	2	3	2%
22	100	50	1	4	2%
23	100	70	4	1	5‰
24	100	90	3	2	1‰
25	250	30	3	4	5‰
26	250	50	4	3	1‰
27	250	70	1	2	2%
28	250	90	2	1	1%
29	500	30	4	2	1%
30	500	50	3	1	2%
31	500	70	2	4	1‰
32	500	90	1	3	5‰
33	1000	30	1	1	1‰
34	1000	50	2	2	5‰
35	1000	70	3	3	1%
36	1000	90	4	4	2%

Tableau 27 : Planification des essais à réaliser. Seuls 36 essais sur 144 sont présentés. L'ensemble des essais se trouve en annexe D.

La résolution matricielle donne les résultats suivants (tab. 28) :

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6
2 39,74	-0,008	1,63	-75,11	0,001	-38,5	27,4

Tableau 28 : Résultats de la résolution matricielle.

et le modèle obtenu est :

$$D = 239, 74 + 0,008S + 1,63C - 75,11I - 0,001M - 38,5Qad + 27,4T \qquad \text{(éq. 41)}$$

La régression affine que nous obtenons entre les durées simulées et les durées calculées est la suivante :

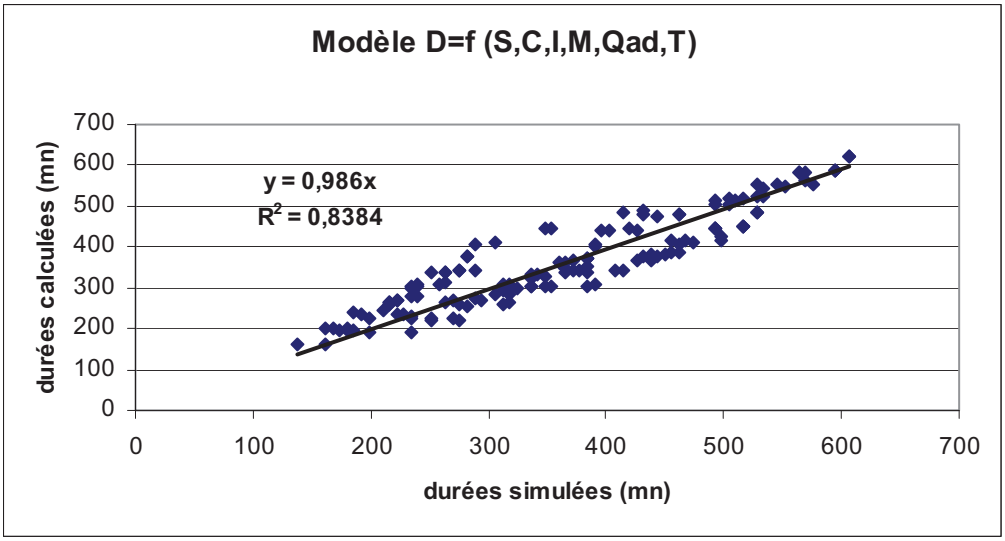


Figure 73: Régression affine des durées de pluies.

La figure 73 montre un bel ajustement des durées de pluies simulées et calculées au regard du coefficient de corrélation $R^2 = 0,8384$ et de la pente $y = 0,986x$.

4.4) Analyse des résultats d'essais

L'analyse des résultats d'essais consiste à ajuster le modèle de régression obtenu précédemment afin de hiérarchiser les variables explicatives selon leur influence sur la durée de pluie. Le but étant ici d'établir le meilleur sous-modèle par élimination des variables

explicatives qui auront très peu d'influence sur la durée de pluie.

4.4.1) Recherche du meilleur sous-modèle

4.4.1.1) Analyse de la variance du modèle

Nous cherchons ici à expliquer si les variations de la durée de pluie sont causées par les variations des variables explicatives (variation expliquée par la régression) ou par les fluctuations aléatoires dues à la dispersion de la durée de pluie (variation résiduelle).

Pour l'analyse de cette variance nous avons construit un tableau dit « d'analyse de variance » et qui va nous permettre de tester quelle source de variation est significative.

Le tableau 29 présente les deux sources de variations possibles de la durée de pluie, la variation expliquée par la régression et la variation résiduelle. Pour chacune de ces variations nous calculons les carrés moyens dus à la régression et les carrés moyens résiduels et nous déduisons la variance des résidus s^2, l'écart – type des résidus s, le paramètre F de Fisher-Snedecor ainsi que le coefficient de détermination R^2. Ce coefficient de détermination est d'autant plus important qu'il traduit le pourcentage de variabilité des durées pluvieuses expliqué par les variables explicatives.

Source de variation	**Somme des carrés**	**Degrés de liberté**	**Carrés moyens**	**Rapport F**
Expliquée par la régression	1813460	6	302243,3	**139,3**
Résiduelle	297292,1	137	2170	
Total	2110752	143	14760,5	
Résidus s^2	2170			
Ecart-type s	46,6			
Coefficient R^2	**0,86**			

Tableau 29 : Analyse de variance de la régression multiple pour un total de 144 essais.

86% de la variabilité de la durée de pluie est expliquée par les variables explicatives.

Nous avons calculé le paramètre F pour une probabilité de 5% (la valeur 139,3 de la variable

F de Fischer-Snedecor a une probabilité de 5% d'être dépassée), probabilité généralement choisie, [Baillargeon, 2003] **;** [Benoist, 1994]. Nous cherchons à présent à définir la qualité de la régression c'est-à-dire à conclure si oui ou non elle est significative dans son ensemble. Nous réalisons pour cela le test de Fisher-Snedecor encore appelé le test de signification.

4.4.1.2) Test de Fisher-Snedecor

Sous l'hypothèse H_o : $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = \beta_5 = \beta_6 = 0$, nous concluons que les variables explicatives ne sont pas influentes sur la durée de pluie.
Sous l'hypothèse H_1 : Au moins un des βj est différent de 0.

Nous rejetons H_o si $F > F_{0,05\ ;\ k\ ;\ n-k-1}$ avec k nombre de variables explicatives et n la taille de nombre d'essais.

En appliquant ce qui précède, nous obtenons par lecture de la table de la Loi de Fisher-Snedecor (voir annexe F) $F_{0,05\ ;\ 6\ ;\ 137} = 2{,}17$. Or dans notre tableau 32 d'analyse de variance $F = 139{,}28$ donc $F > F_{0,05\ ;\ 6\ ;\ 137}$ par conséquent nous rejetons H_o et retenons H_1.

Compte tenu de ce résultat, nous concluons que la contribution de l'ensemble des variables explicatives, pour expliquer les fluctuations de la durée de pluie, est significative au seuil de 5 %. Cependant, lorsque nous déclarons que la régression est significative dans son ensemble, ceci ne veut pas nécessairement dire que toutes les variables explicatives dans l'équation de régression ont un apport significatif. Il nous faut donc déterminer si la contribution marginale de chaque variable explicative est significative. Ce test consiste à examiner l'influence de chaque variable explicative dans l'explication de la variabilité de la durée de pluie.

Ce test qui permet donc de juger de la pertinence de chaque variable explicative est le test *t* de *Studen*t.

4.4.1.3) Test du t de Student

Ici, nous voulons tester si la contribution marginale de chaque variable explicative est significative dans le modèle (éq. 41) au seuil de signification de 5%.

Il s'agit alors de tester les hypothèses suivantes

$H_o : \beta_j = 0, \qquad j = 1,2,\ldots k. \qquad H_1 : \beta_j \neq 0$

Nous rejetons H_o si $t > t_{0,05/2\ ;\ n-k-1}$ ou si $t < -t_{0,05/2\ ;\ n-k-1,}$ soit $t > t_{0,025\ ;\ 137}$ ou $t < -\ t_{0,025\ ;\ 137.}$
Si nous rejetons H_o, la contribution marginale de la variable explicative x_i est significative au seuil de 5%.

En appliquant ce qui précède, nous obtenons par lecture de la table de la Loi du t de Student (voir annexe G) $t > 2,258$ ou $t < -2,258$. Toute variable explicative qui satisfait à ce test a donc une contribution significative.

Variables explicatives	Coefficients régression β_j	Erreurs-types s (β_j)	t de Student	Critère de décision rejeter H_0 **si t>2,258 ou t<-2,258**	**Résultats**
S	0,008	0,01	0,6	t< 2,258	**NS**
C	1,6	0,2	9,4	t> 2,258	**S**
I	- 75,1	546,3	-0,1	t> -2,258	**NS**
M	- 0,0002	0,001	-0,2	t> -2,258	**NS**
Qad	- 38,5	3,5	-11,1	t<-2,258	**S**
T	27,4	1,1	24,7	t>2,258	**S**

Tableau 30 : Résultats du test du t de Student.

avec NS : non significatif
S : significatif

Le test de contribution marginale révèle (tab. 30) que l'apport des variables explicatives S, I et M est non significatif.

4.4.2) Optimisation du sous-modèle

Nous sommes arrivés à la conclusion que les variables explicatives, surface S, pente I et l'allongement M du bassin versant, n'ont pas un apport significatif dans l'explication des fluctuations des durées pluvieuses. Aussi devrions-nous pouvoir les éliminer du modèle.

Seules les variables explicatives, Coefficient de ruissellement C, Débit de fuite Qad et Période de retour, ont un apport significatif.

Si nous éliminons les variables S, I, M nous obtenons le sous modèle D = f (C, Qad, T) dont nous devons réestimer les coefficients.

4.4.2.1) Optimisation du sous-modèle D = f (C, Qad, T)

Nous obtenons le système d'équations suivant :

$$n\,\beta o + \beta 1 \sum Ci + \beta 2 \sum Qad + \beta 3 \sum Ti = \sum Di$$
$$\beta 0 \sum Ci + \beta 1 \sum Ci^2 + \beta 2 \sum CiQad + \beta 3 \sum CiTi = \sum CiDi$$
$$\beta 0 \sum Qad + \beta 1 \sum CiQadi + \beta 2 \sum Qadi^2 + \beta 3 \sum TiQad = \sum QadiDi$$
$$\beta 0 \sum Ti + \beta 1 \sum CiTi + \beta 2 \sum QadiTi + \beta 3 \sum Ti^2 = \sum TiDi$$

Nous résolvons ce système en considérant la matrice d'essais suivante (tab.27):

Variables explicatives	C	Qad	T
Les essais			
1	30	1	1
2	50	2	1
3	70	3	1
4	90	4	1
5	30	3	1
6	50	4	1
7	70	1	1
8	90	2	1
9	30	4	1
10	50	3	1
11	70	2	1
12	90	1	1
13	30	2	1
14	50	1	1
15	70	4	1
16	90	3	1
17	30	1	1
18	50	2	1
18	70	3	1
20	90	4	1
21	30	3	1
22	50	4	1
23	70	1	1
24	90	2	1
25	30	4	1
26	50	3	1
27	70	2	1
28	90	1	1
29	30	2	1
30	50	1	1
31	70	4	1
32	90	3	1
33	30	1	1
34	50	2	1
35	70	3	1
36	90	4	1

Tableau 31 : Planification des essais à réaliser pour la construction du modèle D = f (C, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont présentés. L'ensemble des essais se trouve en annexe H.

La résolution matricielle donne les résultats suivants (tab. 32) :

β_0	β_1	β_2	β_3
239,5	1,6	-38,4	27,4

Tableau 32 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D=f(C, Qad, T)

et le modèle obtenu est :

$$D = 239,5 + 1,6C - 38,4Qad + 27,4T \qquad \text{(éq. 42)}$$

Nous obtenons la régression affine suivante (fig.74) :

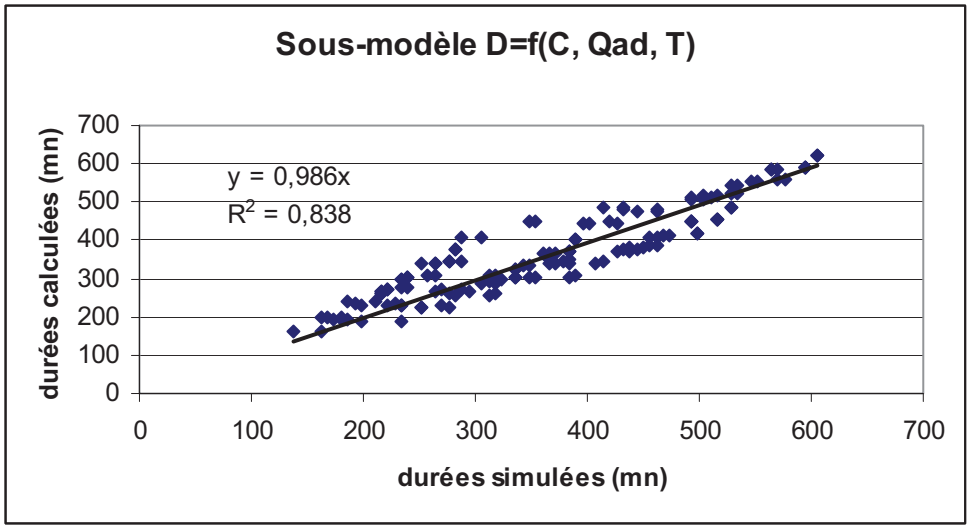


Figure 74: Régression affine du sous –modèle D = f (C, Qad, T)

La régression affine du sous-modèle D = f (C, Qad, T) est satisfaisante. Nous allons néanmoins réestimer les paramètres du sous-modèle en ajoutant une à une des variables explicatives I, M et S afin de mieux apprécier l'influence de chacune des ces variables dans un sous-modèle.

4.4.2.2) Optimisation du sous-modèle D = f (C, I, Qad, T)

Si nous ajoutons la variable I au sous-modèle D=f(C, Qad, T), nous obtenons le sous-modèle D = f (C, I, Qad, T)**.** Le système d'équations est, quant à lui, constitué des équations

suivantes :

$$n\,\beta o + \beta 1 \sum Ci + \beta 2 \sum Ii + \beta 3 \sum Qad + \beta 4 \sum Ti = \sum Di$$

$$\beta 0 \sum Ci + \beta 1 \sum Ci^2 + \beta 2 \sum IiCi + \beta 3 \sum CiQad + \beta 4 \sum CiTi = \sum CiDi$$

$$\beta 0 \sum Ii + \beta 1 \sum IiCi + \beta 2 \sum Ii^2 + \beta 3 \sum IiQad + \beta 3 \sum IiTi = \sum IiDi$$

$$\beta 0 \sum Qad + \beta 1 \sum CiQadi + \beta 2 \sum IiQad + \beta 3 \sum Qadi^2 + \beta 3 \sum TiQad = \sum QadiDi$$

$$\beta 0 \sum Ti + \beta 1 \sum CiTi + \beta 2 \sum IiTi + \beta 3 \sum QadiTi + \beta 4 \sum Ti^2 = \sum TiDi$$

Nous résolvons ce système en considérant la matrice d'essais suivante (tab. 33):

Variables explicatives	C	I	Qad	T
Les essais				
1	30	1‰	1	1
2	50	5‰	2	1
3	70	1%	3	1
4	90	2%	4	1
5	30	2%	3	1
6	50	2%	4	1
7	70	5‰	1	1
8	90	1‰	2	1
9	30	5‰	4	1
10	50	1‰	3	1
11	70	2%	2	1
12	90	1%	1	1
13	30	1%	2	1
14	50	2%	1	1
15	70	1‰	4	1
16	90	5‰	3	1
17	30	1‰	1	1
18	50	5‰	2	1
18	70	1%	3	1
20	90	2%	4	1
21	30	2%	3	1
22	50	2%	4	1
23	70	5‰	1	1
24	90	1‰	2	1
25	30	5‰	4	1
26	50	1‰	3	1
27	70	2%	2	1
28	90	1%	1	1
29	30	1%	2	1
30	50	2%	1	1
31	70	1‰	4	1
32	90	5‰	3	1
33	30	1‰	1	1
34	50	5‰	2	1
35	70	1%	3	1
36	90	2%	4	1

Tableau 33 : Planification des essais à réaliser pour le construction du sous-modèle D = f (C, I, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés.

La résolution matricielle donne les résultats suivants (tab. 34):

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
240,2	1,6	-69,5	-38,4	27,4

Tableau 34 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D=f(C, I, Qad, T)

et le modèle obtenu est :

$$D = 240,2 + 1,6C - 69,5I - 38,4Qad + 27,4T \qquad \text{(éq. 43)}$$

Nous obtenons la régression affine suivante (fig. 75):

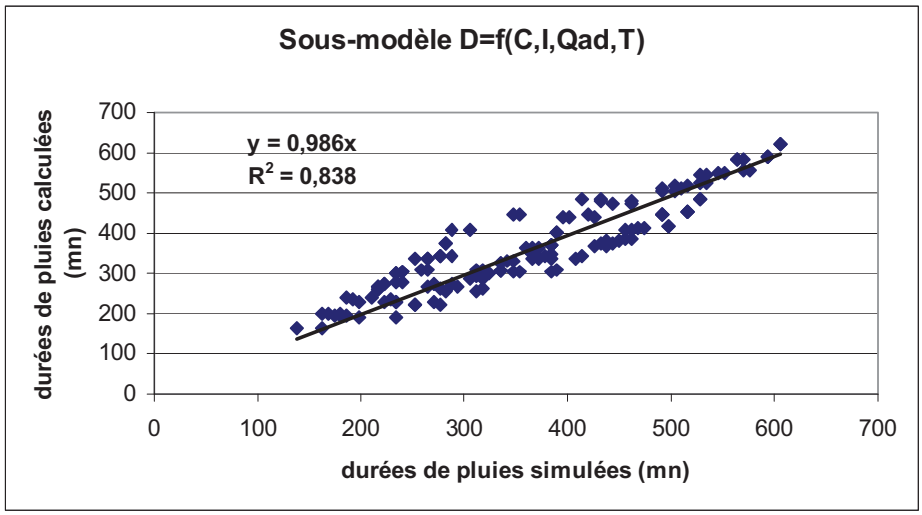


Figure 75: Régression affine du sous- modèle D=f (C, I, Qad, T)

4.4.2.3) Optimisation du sous-modèle D = f (C, M, Qad, T)

Si nous ajoutons maintenant la variable M aux autres variables C, Qad et T, nous obtenons le modèle D=f (C, M, Qad, T) et le système d'équations suivant :

$n\beta o + \beta 1 \sum Ci + \beta 2 \sum Mi + \beta 3 \sum Qadi + \beta 4 \sum Ti = \sum Di$

$\beta 0 \sum Ci + \beta 1 \sum Ci^2 + \beta 2 \sum MiCi + \beta 3 \sum CiQadi + \beta 4 \sum CiTi = \sum CiDi$

$\beta 0 \sum Mi + \beta 1 \sum MiCi + \beta 2 \sum Mi^2 + \beta 3 \sum MiQadi + \beta 3 \sum MiTi = \sum MiDi$

$\beta 0 \sum Qadi + \beta 1 \sum CiQadi + \beta 2 \sum MiQadi + \beta 3 \sum Qadi^2 + \beta 3 \sum TiQadi = \sum QadiDi$

$\beta 0 \sum Ti + \beta 1 \sum CiTi + \beta 2 \sum MiTi + \beta 3 \sum QadiTi + \beta 4 \sum Ti^2 = \sum TiDi$

Nous résolvons ce système en utilisant la matrice d'essais suivante (tab. 35):

Variables explicatives	C	M	Qad	T
Les essais				
1	30	1	1	1
2	50	2	2	1
3	70	3	3	1
4	90	4	4	1
5	30	2	3	1
6	50	1	4	1
7	70	4	1	1
8	90	3	2	1
9	30	3	4	1
10	50	4	3	1
11	70	1	2	1
12	90	2	1	1
13	30	4	2	1
14	50	3	1	1
15	70	2	4	1
16	90	1	3	1
17	30	1	1	1
18	50	2	2	1
18	70	3	3	1
20	90	4	4	1
21	30	2	3	1
22	50	1	4	1
23	70	4	1	1
24	90	3	2	1
25	30	3	4	1
26	50	4	3	1
27	70	1	2	1
28	90	2	1	1
29	30	4	2	1
30	50	3	1	1
31	70	2	4	1
32	90	1	3	1
33	30	1	1	1
34	50	2	2	1
35	70	3	3	1
36	90	4	4	1

Tableau 35 : Planification des essais à réaliser pour la construction du sous-modèle D = f (C, M, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés.

La résolution matricielle donne les résultats suivants (tab.36):

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
210,4	2,1	0,001	-37,6	27,4

Tableau 36 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D =f(C, M,Qad, T)

Et le modèle s'écrit :

$$D= 210,4 + 2,1C + 0,001M - 37,6Qad + 27,4T \qquad \text{(éq. 44)}$$

Nous obtenons la régression affine suivante (fig. 76):

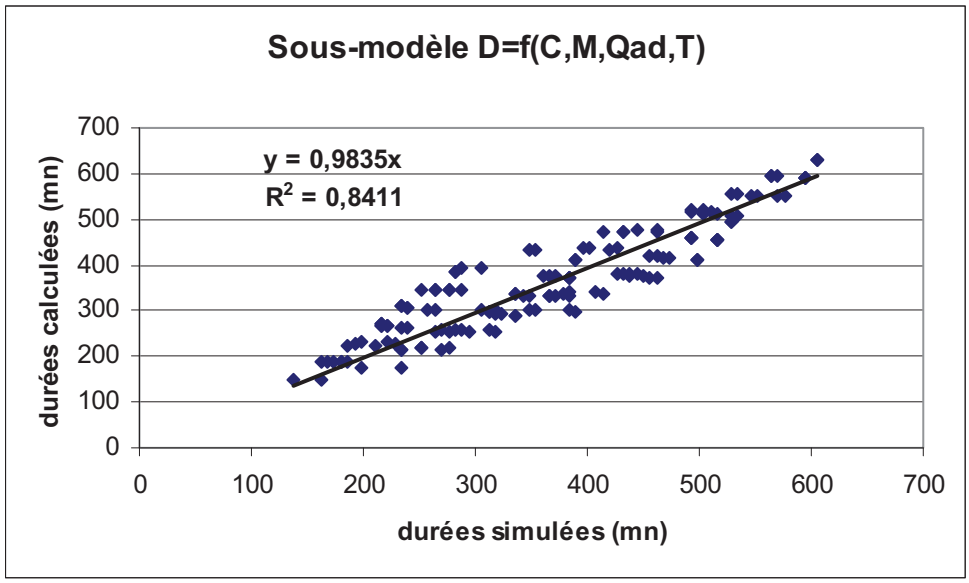


Figure 76: Régression affine du sous-modèle D= f (C, M, Qad, T)

4.4.2.4) Optimisation du sous-modèle D = f (S, C, Qad, T)

Si nous ajoutons enfin la variable S aux autres variables C, Qad et T, nous obtenons le modèle D=f (S, C, Qad, T) et le système d'équations suivant :

$n\beta o + \beta 1\sum Si + \beta 2\sum Ci + \beta 3\sum Qadi + \beta 4\sum Ti = \sum \mathbf{yi}$

$\beta 0\sum Si + \beta 1\sum Si^2 + \beta 2\sum SiCi + \beta 3\sum SiQadi + \beta 4\sum SiTi = \sum \mathbf{Siyi}$

$\beta 0\sum Ci + \beta 1\sum SiCi + \beta 2\sum Ci^2 + \beta 3 \sum CiQadi + \beta 3\sum CiTi = \sum \mathbf{Ciyi}$

$\beta 0\sum Qadi + \beta 1\sum SiQadi + \beta 2\sum CiQadi + \beta 3 \sum Qadi^2 + \beta 3\sum TiQadi = \sum \mathbf{Qfiyi}$

$\beta 0\sum Ti + \beta 1\sum SiTi + \beta 2\sum CiTi + \beta 3\sum QadiTi + \beta 4\sum Ti^2 = \sum \mathbf{Tiyi}$

Nous résolvons ce système en utilisant la matrice d'essais suivante (tab. 37):

Variables explicatives	S	C	Qad	T
Les essais				
1	0,01	30	1	1
2	0,01	50	2	1
3	0,01	70	3	1
4	0,01	90	4	1
5	0,1	30	3	1
6	0,1	50	4	1
7	0,1	70	1	1
8	0,1	90	2	1
9	1	30	4	1
10	1	50	3	1
11	1	70	2	1
12	1	90	1	1
13	10	30	2	1
14	10	50	1	1
15	10	70	4	1
16	10	90	3	1
17	50	30	1	1
18	50	50	2	1
18	50	70	3	1
20	50	90	4	1
21	100	30	3	1
22	100	50	4	1
23	100	70	1	1
24	100	90	2	1
25	250	30	4	1
26	250	50	3	1
27	250	70	2	1
28	250	90	1	1
29	500	30	2	1
30	500	50	1	1
31	500	70	4	1
32	500	90	3	1
33	1000	30	1	1
34	1000	50	2	1
35	1000	70	3	1
36	1000	90	4	1

Tableau 37 : Planification des essais à réaliser pour la construction du modèle D = f (S, C, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés.

La résolution matricielle donne les résultats suivants (tab. 38)

β_0	β_1	β_2	β_3	β_4
238,3	0,006	1,6	-38,4	27,4

Tableau 38 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D= f(S, C, Qad, T)

Et le modèle s'écrit :

$$D = 238,3 + 0,006S + 1,6C - 38,4Qad + 27,4T \quad \text{(éq. 45)}$$

Nous obtenons la régression affine suivante (fig. 77):

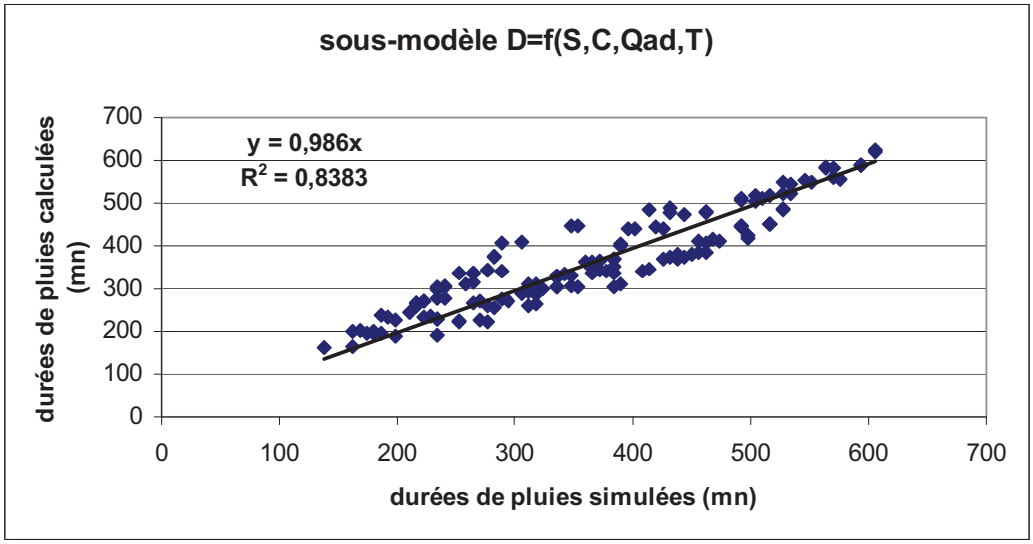


Figure 77: Régression affine du sous-modèle D=f (S, C, Qad, T)

4.4.2.5) Choix final du modèle

De l'ensemble de ces résultats, nous relevons les points suivants :

Le test de contribution marginale effectué sur chaque variable explicative a révélé que les variables explicatives M, I et S avaient les plus faibles contributions et que par conséquent elles pouvaient vraisemblablement être éliminées du modèle. La ré-estimation des paramètres (coefficients β_i) avec les variables explicatives restantes (C, Qad et T) donne de bons résultats. En effet, le sous-modèle D = f (C, Qad, T) donne $R^2 = 0,838$ et y = 0,986x pour la régression affine entre les valeurs de durée estimées et calculées.

Les sous-modèles D = f (C, I, Qad, T), D = f (C, M, Qad, T) et D = f (S, C, Qad, T) donnent également de bons résultats, respectivement R^2 = 0,838 et y = 0,986x, R^2 = 0,8411 et y = 0,9835x, R^2 = 0,8383 et y = 0,986x.

Cependant, l'ajout de I dans le sous-modèle D =f(C, Qad, T) ne dégrade ni n'amélioration les résultats du sous-modèle alors que l'ajout de M et S apporte très peu d'amélioration du sous-modèle D =f(C, Qad, T). Aussi, les valeurs des paramètres de décision (R^2 et y) sont toutes très proches voire identiques. Par conséquent, nous retenons le sous-modèle D=f (C, Qad, T) car il présente moins de variables à renseigner.

4.5) Comparaison des résultats entre la méthode de Gumbel et la Nouvelle méthode

4.5.1) Calcul des écarts

Nous calculons ici les écarts relatifs de volumes entre ces deux méthodes. Ces écarts sont estimés en pourcentage (%) en utilisant l'équation suivante :

$$Ecart = 100* (V_N - V_P)/ V_P \quad \text{(éq. 46)}$$

avec V_N : Volume de stockage (m^3) déterminé par la nouvelle méthode,

V_P : Volume de stockage (m^3) déterminé par la méthode de Gumbel.

Nous présentons ci-après successivement les résultats des volumes de stockage calculés avec la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel, puis les écarts résultants (tab. 39 et 40).

N° essai	1an	2ans	5ans	10ans	1an	2ans	5ans	10ans
	Volumes de stockage (m^3) Nlle méthode				Volumes de stockage (m^3) Gumbel			
1	1	1,2	1,5	1,8	0,9	1,2	1,6	1,8
2	1,5	1,9	2,4	2,9	1,4	1,9	2,5	2,9
3	2	2,6	3,3	4	1,9	2,6	3,4	4
4	2,6	3,2	4,1	5,1	2,4	3,3	4,3	5,1
5	6,1	8	10,4	12,5	6	8,2	10,7	12,4
6	11,2	14,5	18,9	23	11	15,1	19,6	22,9
7	25,4	31,4	39,4	48	23,2	31,7	41,2	48
8	31,1	38,6	48,5	59	27,9	38,3	50	58,4
9	48,8	65,4	87	104	47	65,8	86,9	102
10	121,5	156,8	205,5	254,2	113,8	159,4	210,6	247,2
11	226,1	282,7	357,9	437,1	208,3	286	373,4	435,8
12	344,2	423,8	527,4	639	306,5	417,6	542,5	631,6
13	707,8	917,5	1200,8	1478,1	650,8	914,4	1210,9	1422,5
14	1689,4	2102	2660,3	3259,5	1573,6	2159,1	2817,7	3287,7
15	1701,6	2196,9	2889,8	3590,3	1616,1	2265,5	2996,2	3517,6
16	2807,1	3522,7	4472,7	5463,6	2569,7	3540,4	4632,5	5411,7
17	4303,9	5468,1	7081,5	8792,8	4038,2	5659,9	7484,5	8786,4
18	7083	8993,3	11602,5	14313,3	6565,9	9162,6	12084	14168,5
18	9794,9	12440,2	16045,8	19766,3	9089,3	12655,4	16667,5	19530,3
20	12516,8	15889,1	20487,3	25211,3	11673,3	16202,1	21297,4	24933
21	5653,1	7521,9	10028,5	12270,2	5325	7546,7	10046,3	11829,8
22	10748	14005,5	18531,2	22817,5	10382,3	14471,5	19072,1	22354,8
23	24755,9	30738,7	38744,5	47404,3	22614	31080,8	40606,4	47403,3
24	29338,2	36842,1	46842,3	57556	26426,2	36783,5	48436,1	56750,6
25	13527	18182,9	24537	30291,4	12729,5	18284,6	24534,4	28993,9
26	26300,7	34450,7	45854,9	56727,1	25361,9	35618,3	47157,5	55391,1
27	61199,1	76138,5	96160,7	117867,7	55986	77134,8	100928,5	117906,1
28	71652	90328,2	115322,5	142198,4	64673,2	90513,9	119586,1	140330,2
29	12068,2	19218	30395,2	41188,4	12048,8	20938,9	30940,78	38077,49
30	38073,69	53843,78	77380,40	102897,06	37150,24	59023,19	83631,6	101190,5
31	111637	139855,7	177683,7	217560,8	102101,4	141055,7	184881,7	216153
32	169978,1	209714,6	261619,4	317666,2	151180,1	206630,1	269014,8	313528,4
33	53512,8	73274	101696,8	131369,8	49882,9	75858,9	105083,6	125936,3
34	162645	203745	259943,1	320628,2	149507,7	207824,8	273435,1	320250,2
35	129992,3	176737,5	245739,2	319317,2	127444,9	191582,1	263740,3	315227,6
36	271520,9	342878,1	438892,7	539645	247286,5	344691,6	454278,2	532472

Tableau 39 : Résultats de volumes de stockage obtenus avec la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

N° Essais	1an	2ans	5ans	10ans
	Calcul des écarts (%)			
1	6,4	-2,9	-5,2	-0,4
2	6,8	-2,1	-4,4	0,3
3	6,4	-2,3	-4,3	0,4
4	5,7	-2,7	-4,4	0,3
5	2	-2,5	-2,5	0,7
6	1,4	-4,2	-3,9	0,7
7	9,5	-0,9	-4,5	-0,2
8	11,2	0,7	-3	1,1
9	3,8	-0,5	0,2	2
10	6,8	-1,6	-2,4	2,8
11	8,6	-1,2	-4,2	0,3
12	12,3	1,5	-2,8	1,2
13	8,8	0,3	-0,8	3,9
14	7,4	-2,6	-5,6	-0,9
15	5,3	-3	-3,6	2,1
16	9,2	-0,5	-3,5	1
17	6,6	-3,4	-5,4	0,1
18	7,9	-1,9	-4	1
19	7,8	-1,7	-3,7	1,2
20	7,2	-1,9	-3,8	1,1
21	6,2	-0,3	-0,2	3,7
22	3,5	-3,2	-2,8	2,1
23	9,5	-1,1	-4,6	0,00
24	11	0,2	-3,3	1,4
25	6,3	-0,6	0,0	4,5
26	3,7	-3,3	-2,8	2,4
27	9,3	-1,3	-4,7	-0,00
28	10,8	-0,2	-3,6	1,3
29	0,2	-8,2	-1,8	8,2
30	2,5	-8,8	-7,5	1,7
31	9,3	-0,9	-3,9	0,7
32	12,4	1,5	-2,8	1,3
33	7,3	-3,4	-3,2	4,3
34	8,8	-2	-4,9	0,1
35	2	-7,8	-6,8	1,3
36	9,8	-0,5	-3,4	1,4

Tableau 40 : Ecarts (%) de volumes entre la nouvelle méthode et celle de Gumbel.

4.5.2) Analyse des écarts

Nous nous basons sur les figures 78 à 82 pour mener notre analyse.

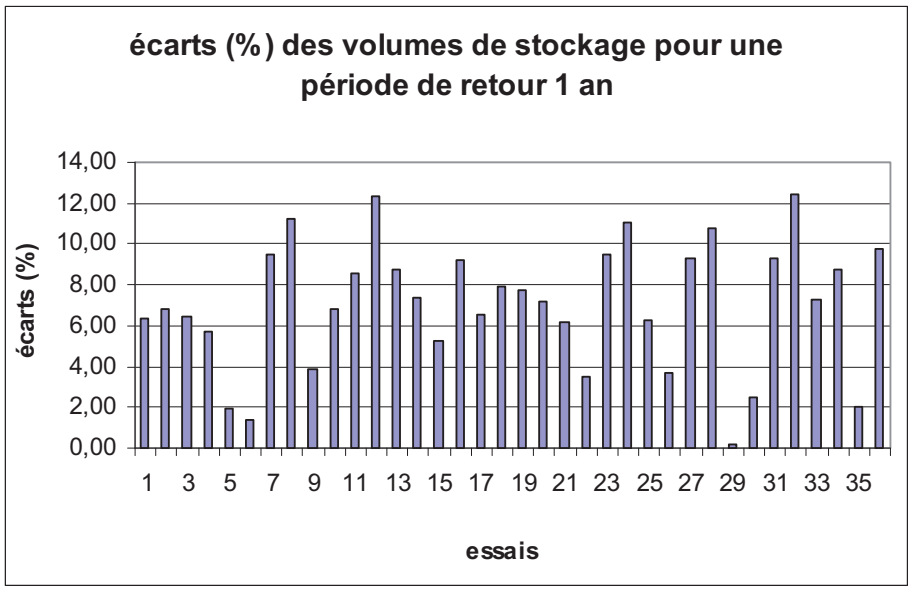


Figure 78: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Pour la période de retour 1 an, nous obtenons une moyenne des écarts de 7% et un écart-type de 3.

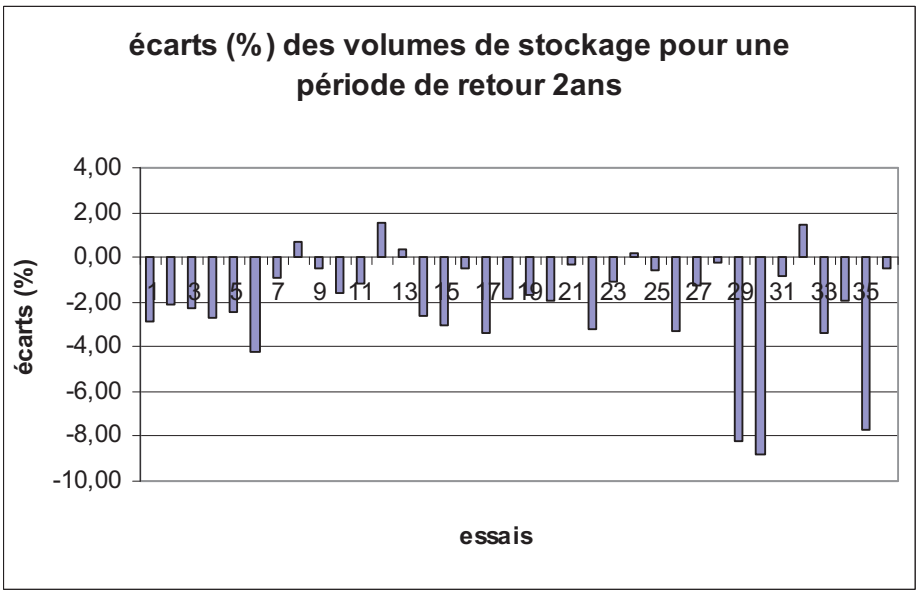


Figure 79: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Pour la période de retour 2 ans, nous obtenons une moyenne des écarts de -2% et un écart-type de 2.

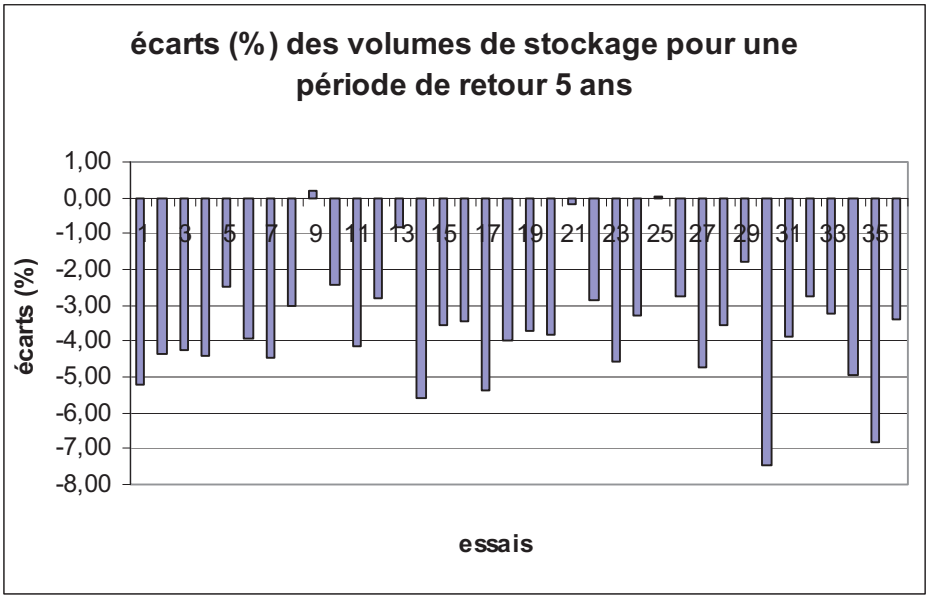


Figure 80: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Pour la période de retour 5 ans, nous obtenons une moyenne des écarts de –3% et un écart-type de 1,7.

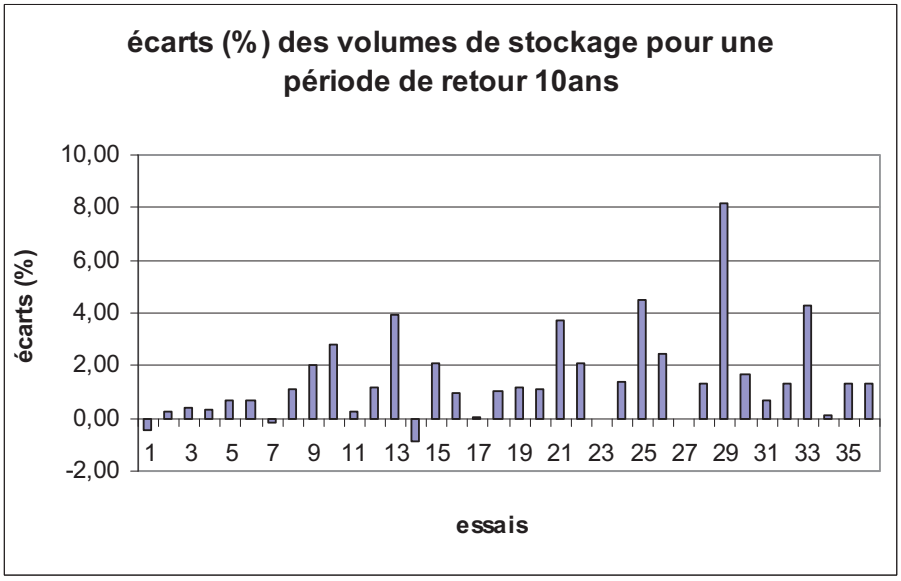


Figure 81: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 10 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Pour la période de retour 10 ans, nous obtenons une moyenne des écarts de 1,5% et un écart-type de 1,7%.

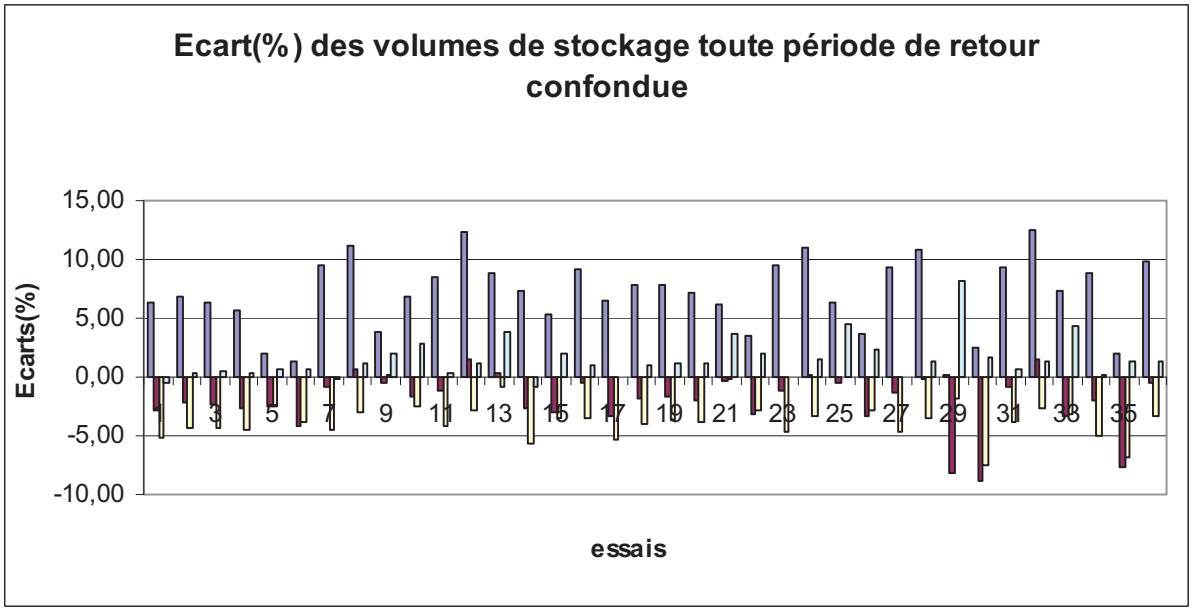


Figure 82: Ecarts (%) des volumes de stockage toutes périodes de retour confondues entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Toutes ces figures montrent que :

Pour les périodes de retour de 1 an et 10 ans, la nouvelle méthode surdimensionne (écarts positifs) les ouvrages, par rapport à la méthode de Gumbel, dans une proportion maximale respective de 12% et 8%. Les écarts moyens des volumes de stockage aux périodes de retour 1an et 10 ans sont faibles avec respectivement une moyenne de 7% et 1,5%.

Pour les périodes de retour de 2ans et 5 ans, la nouvelle méthode sousdimensionne (écarts négatifs maximum <-8%) les ouvrages, par rapport à la méthode de Gumbel. Les écarts moyens sont également de faibles écarts avec une moyenne respective de -2% et –3%.

Au regard de ces faibles écarts obtenus entre la nouvelle méthode et celle de Gumbel dans un sens comme dans un autre (surdimensionnement et sousdimensionnement), nous concluons que cette Nouvelle méthode répond à notre cahier des charges défini au paragraphe 3.6 pour dimensionner des ouvrages de stockage quelque soit la période de retour considérée.

4.5.3) Corrélation des résultats

Les figures 83 à 86 montrent les résultats de corrélation des volumes de stockage que nous avons obtenus :

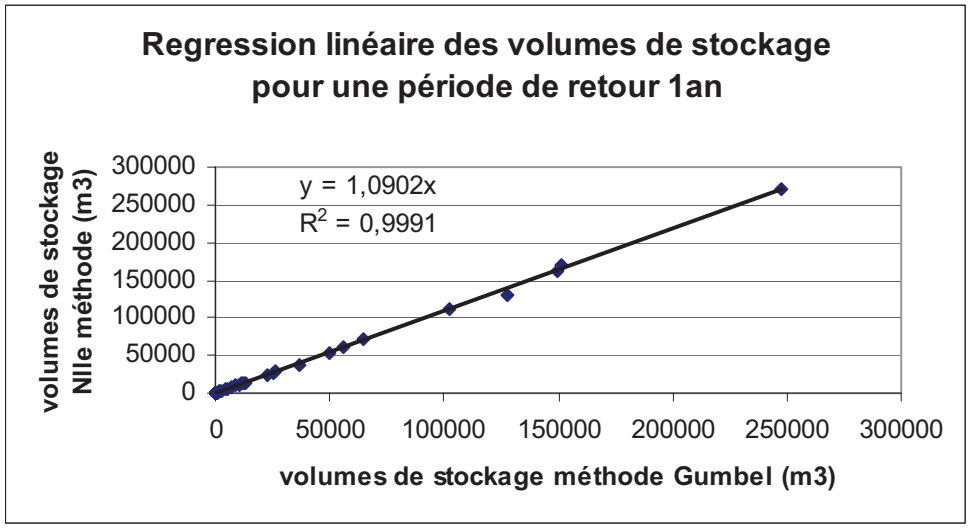


Figure 83: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

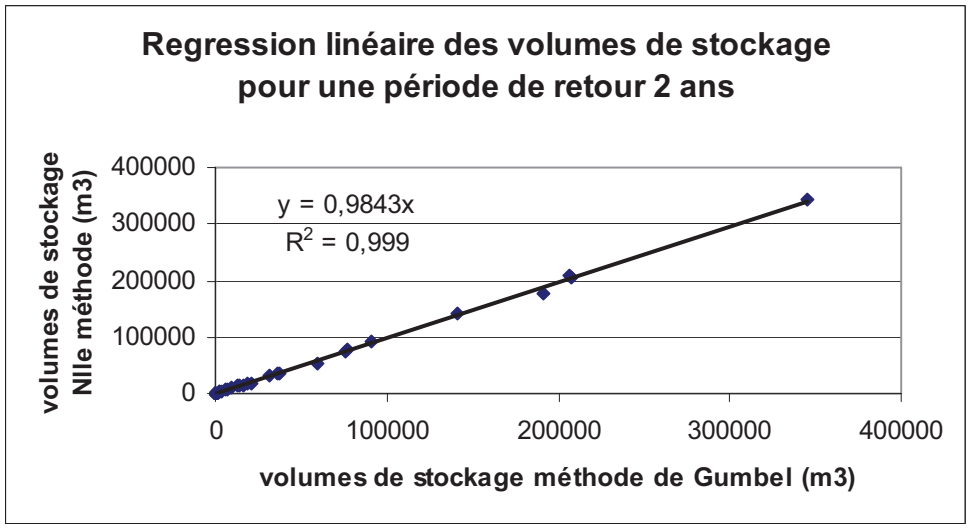


Figure 84: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

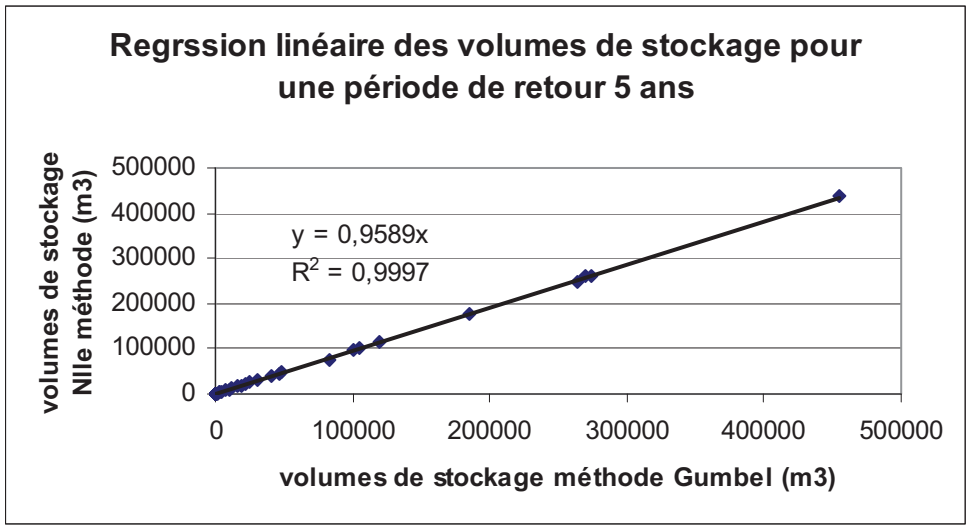


Figure 85 : Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

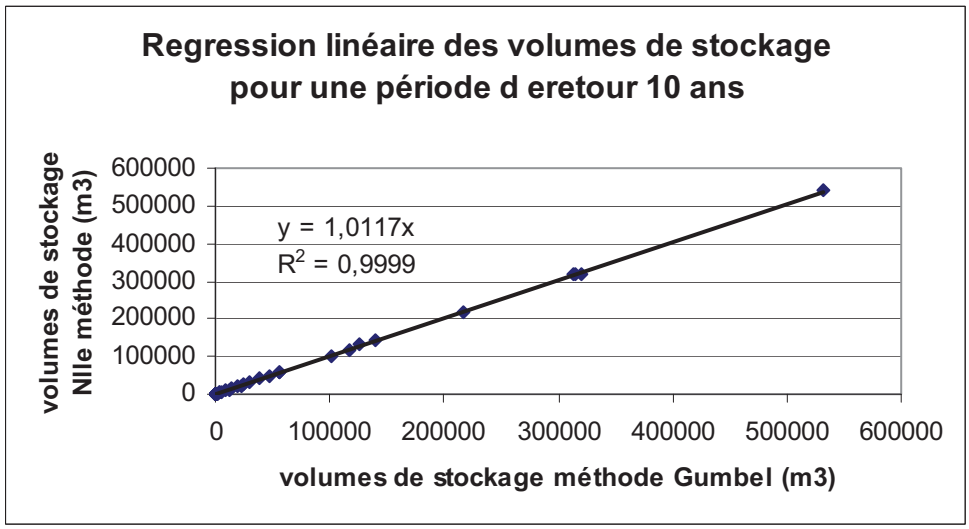


Figure 86 : Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.

Ces figures montrent des droites de régression très proches de la bissectrice. Ceci confirme les résultats obtenus précédemment notamment pour les écarts observés, jugés très faibles, entre la méthode de Gumbel et la Nouvelle méthode. De plus, les coefficients de corrélation sont tous très proches de la valeur 1 témoignant d'une très bonne corrélation des résultats obtenus pour ces deux méthodes.

4.6) Conclusion

Nous avons tout d'abord rechercher la morphologie de la pluie de projet qui se prête à notre étude de dimensionnement. Les morphologies rectangle et simple triangle ont été étudiées et au regard des résultats que nous avons obtenus, nous avons retenu la morphologie simple triangle.

Ensuite, nous avons conçu un modèle qui relie la durée de la pluie de projet simple triangle aux caractéristiques du bassin versant et de l'ouvrage de rétention. Les résultats de cette étude de conception du modèle ont montré que les variables explicatives M, I et S avaient les plus faibles contributions sur les fluctuations de la durée de pluie que par conséquent elles pouvaient être éliminées du modèle. Cependant, la ré-estimation des coefficients β_i avec les seules variables explicatives restantes (C, Qad et T) ne garantit pas nécessairement de bons résultats. Alors, nous avons mené une étude de comparaison de modèles qui nous a conduit à retenir le modèle D = f (C, Qad, T) à 3 variables plutôt que les modèles à 4 variables, pour ses résultats et pour son nombre inférieur de variables à renseigner lors de son utilisation.

Par la suite, la comparaison des résultats obtenus (volumes de stockage) d'une part avec la nouvelle méthode et d'autre part avec la méthode de Gumbel a révélé de faibles écarts. La nouvelle méthode surdimensionne les ouvrages pour les périodes de retour de 1 an (Emax=12%, Emoy=7%) et 10 ans (Emax=8%, Emoy=1,5%). Elle sousdimensionne les ouvrages pour les périodes de retour de 2 ans (Emax=8%, Emoy=2%) et 5 ans (Emax=7%, Emoy=3%). Au regard des faibles écarts observés, la nouvelle méthode paraît être en adéquation avec notre cahier des charges (cf. 3.6) pour un outil de dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales.

Ce nouvel outil de dimensionnement apporte ainsi des éléments de réponse aux difficultés rencontrées par les professionnels d'hydrologie urbaine (collectivités et bureaux d'études…) quant à la mise en application du Guide « *La ville et son assainissement : principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau »* du [CERTU, 2003].

Aussi, l'outil de dimensionnement que nous avons conçu présente la particularité d'être accessible (simple et utilisable par un grand nombre) et robuste.

Chapitre 5 : Test de la Nouvelle Méthode sur des bassins en série et parallèles

L'objet de ce chapitre est de vérifier avec une étude synthétique comportant des ouvrages en série et en parallèle le bien fondé de la nouvelle méthode.

5.1) Description de l'étude test

Nous appliquons notre Nouvelle Méthode de dimensionnement sur un système d'assainissement comportant 6 bassins versants (BV) élémentaires et 5 bassins de retenue. Ces éléments sont assemblés selon de schéma de la figure 87. Les caractéristiques de chaque élément sont décrites dans le tableau 41.

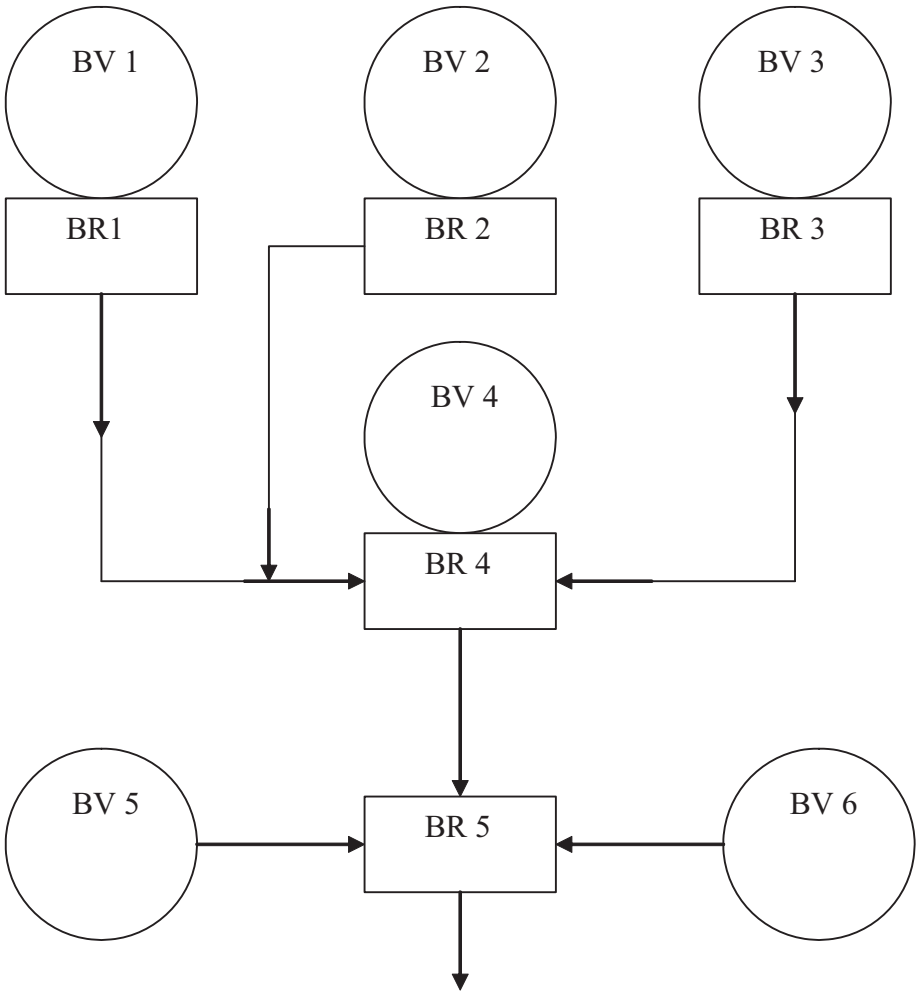


Figure 87: Schéma du système d'assainissement

BV	S (ha)	C (%)	I (mm)	L (m)	K (mn)	Qad(l/s/ha)
BV1	0,01	70	0.01	42,4	1,8	
BV2	10	30	0.01	1788,9	24,8	
BV3	50	50	0.005	2000	26,6	
BV4	100	50	0.01	1414,2	16, 3	
BV5	250	90	0.001	6708,2	76,7	
BV6	500	60	0.01	6324,6	29,3	
BR1						3
BR2						2
BR3						2
BR4						4
BR5						2

Tableau 41 : Caractérisation des bassins versants et des bassins de retenue

Nous considérons que les bassins de retenue seront dimensionnés pour les BR1, BR2, BR3 avec une période de retour T = 5ans et pour les BR4 et BR5 avec une période de retour T = 10ans.

Pour le calcul du volume de stockage Vs des bassins de retenue, nous utiliserons les mêmes modèles que dans les chapitres précédents (cf . 2.3.1 pour les bassins versants et 2.3.2 pour les bassins de retenue). Les transports en conduite seront négligés.

5.2) Calcul des volumes de stockage en utilisant la loi de Gumbel

Nous retenons comme au chapitre 3, les 30 volumes de stockage les plus importants, pour chaque bassin de retenue, obtenus par simulation à partir des hyétogrammes de la station de mesure de Gerland. Afin d'attribuer une période de retour à ces volumes de stockage (5ans et 10 ans pour le présent test), nous utilisons la distribution statistique de Gumbel à celle empirique de Hazen (cf. 2.2.3.4). Nous appliquons cette démarche sur chaque ouvrage à dimensionner.

5.2.1) Calcul du volume de stockage Vs_1 sur le BR1

Le tableau 42 présente les trente volumes de stockage retenus ainsi que les périodes de retour et fréquences associées. Dans la dernière colonne figurent les volumes correspondant à l'ajustement statistique de la loi de Gumbel.

Série de 30 Vs_{max} m^3	Rang	Période retour T	Fréquence F	-ln(-ln(F))	Vs Gumbel en m^3
5,0	1	32	0,9	4,1	4,9
4,3	2	10,7	0,9	3	4
3,7	3	6,4	0,9	2,4	3,6
3,6	4	4,6	0,8	2,1	3,3
3,3	5	3,6	0,8	1,8	3,1
3,2	6	2,9	0,8	1,6	2,9
3	7	2,5	0,7	1,4	2,8
2,8	8	2,1	0,7	1,3	2,7
2,7	9	1,9	0,7	1,1	2,6
2,6	10	1,7	0,6	0,9	2,4
2	11	1,5	0,6	0,8	2,4
1,7	12	1,4	0,6	0,7	2,3
1,6	13	1,3	0,5	0,6	2,2
1,6	14	1,2	0,5	0,5	2,1
1,6	15	1,1	0,5	0,4	2
1,6	16	1	0,4	0,3	1,9
1,6	17	1	0,4	0,2	1,9
1,6	18	0,9	0,4	0,1	1,8
1,5	19	0,9	0,3	0,04	1,7
1,5	20	0,8	0,3	-0,1	1,6
1,5	21	0,8	0,3	-0,1	1,6
1,5	22	0,7	0,2	-0,2	1,5
1,4	23	0,7	0,2	-0,3	1,4
1,4	24	0,7	0,2	-0,4	1,4
1,4	25	0,7	0,1	-0,5	1,3
1,4	26	0,6	0,1	-0,6	1,2
1,3	27	0,6	0,1	-0,7	1,1
1,3	28	0,6	0,1	-0,9	1
1,3	29	0,6	0,1	-1,1	0,8
1,3	30	0,5	0,02	-1,4	0,6

Tableau 42 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR1.

La figure 88 représente l'ajustement statistique de la loi de Gumbel et le tableau 43 les paramètres d'ajustement ainsi que le volume de stockage retenu Vs_1 pour le bassin de retenue BR1.

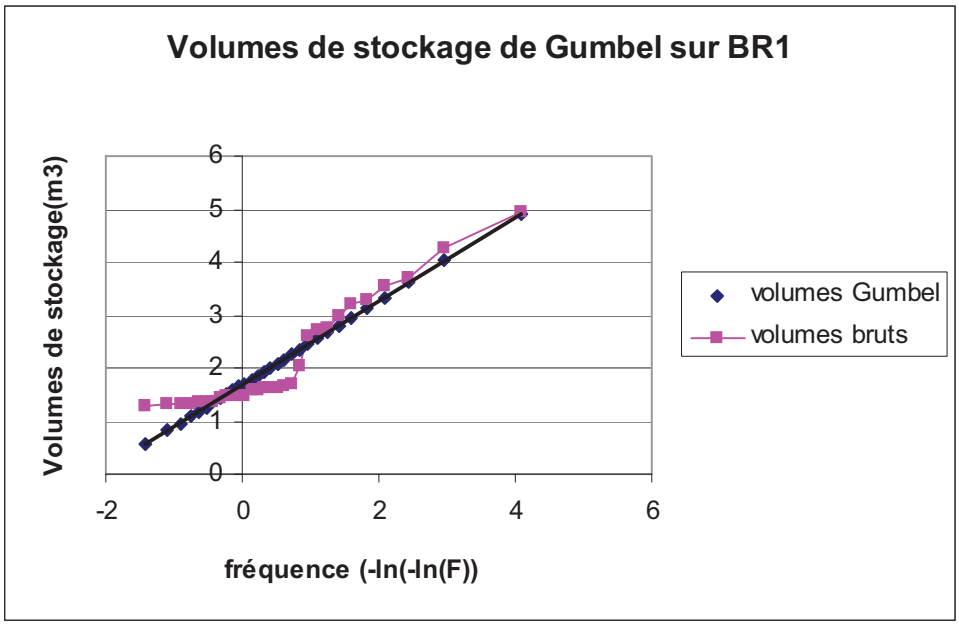


Figure 88: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR1.

Moyenne μ (x)	Ecart-type σ(x)	S	Xo	Vs_1
2,1	1	0,8	1,7	**3,4**

Tableau 43 : Calcul du volume de stockage Vs_1 sur BR1 avec la méthode de Gumbel.

5.2.2) Calcul du volume de stockage Vs_2 sur le BR2

Le tableau 44 présente les trente volumes de stockage retenus ainsi que les périodes de retour et fréquences associées. Dans la dernière colonne figurent les volumes correspondant à l'ajustement statistique de la loi de Gumbel.

Série de 30 Vs_{max} m^3	Rang	Période retour T	Fréquence F	-ln(-ln(F))	Vs Gumbel en m^3
1837,3	1	32	0,9	4,1	1769
1615,1	2	10,7	0,9	3	1441,9
1353, 3	3	6,4	0,9	2,4	1287
1281,7	4	4,6	0,8	2,1	1183
1094,6	5	3,6	0,8	1,8	1103,8
990,8	6	2,9	0,8	1,6	1039,3
955,7	7	2,5	0,7	1,4	984,5
942,8	8	2,1	0,7	1,3	936,4
917,9	9	1,9	0,7	1,1	893,4
910,8	10	1,7	0,6	1	854,2
726,7	11	1,5	0,6	0,8	818,1
616,5	12	1,4	0,6	0,7	784,3
593,6	13	1,3	0,5	0,6	752,4
580,3	14	1,2	0,5	0,5	722
577	15	1,1	0,5	0,4	692,8
574,2	16	1	0,4	0,3	664,6
545,5	17	1	0,4	0,2	637,1
527,8	18	0,9	0,4	0,1	610,2
506,4	19	0,9	0,3	0,04	583,5
493,7	20	0,8	0,3	-0,1	556,9
479	21	0,8	0,3	-0,1	530,2
476,9	22	0,7	0,2	-0,2	503,2
473,3	23	0,7	0,2	-0,3	475,4
473,2	24	0,7	0,2	-0,4	446,6
472,1	25	0,7	0,1	-0,5	416,2
447,9	26	0,6	0,1	-0,6	383,4
445,7	27	0,6	0,1	-0,8	347
439,2	28	0,5	0,08	-0,9	304,3
431	29	0,5	0,05	-1,1	249,5
429,7	30	0,5	0,02	-1,4	157,9

Tableau 44 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR2.

La figure 89 représente l'ajustement statistique de la loi de Gumbel et le tableau 45 les paramètres d'ajustement ainsi que le volume de stockage retenu Vs_2 pour le bassin de retenue BR2.

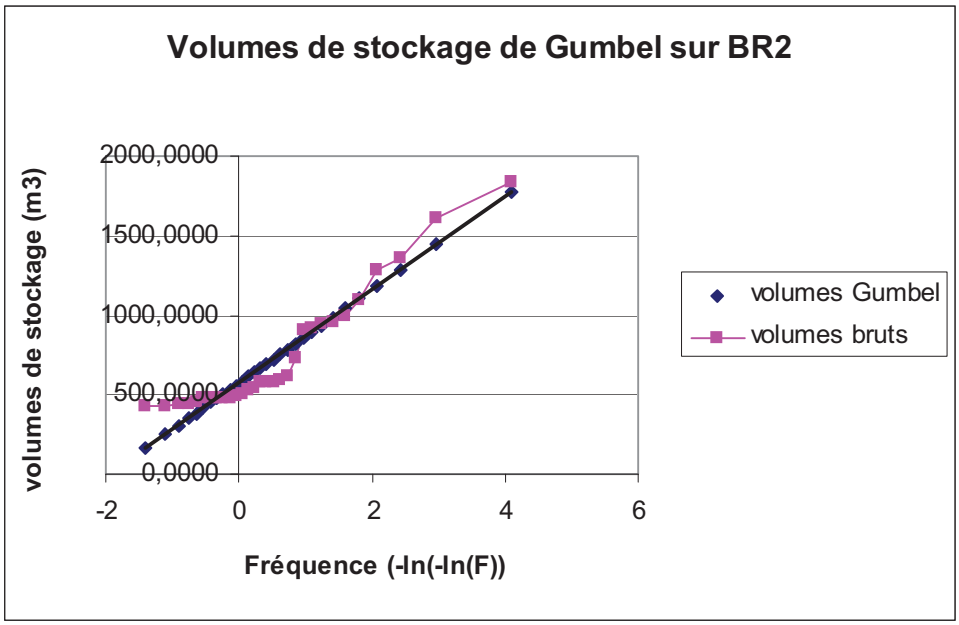


Figure 89: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR2.

Moyenne μ (x)	Ecart-type σ(x)	S	xo	Vs_2
740,3	375,9	293,2	571,2	**1210,9**

Tableau 45 : Calcul du volume de stockage Vs_2 sur BR2 avec la méthode de Gumbel

5.2.3) Calcul du volume de stockage Vs_3 sur le BR3

Le tableau 46 présente les trente volumes de stockage retenus ainsi que les périodes de retour et fréquences associées. Dans la dernière colonne figurent les volumes correspondant à l'ajustement statistique de la loi de Gumbel.

Série de 30 Vs_{max} m^3	Rang	Période retour T	Fréquence F	-ln(-ln(F))	Vs Gumbel en m^3
17662,3	1	32	0,9	4,1	17582,5
15196,4	2	10,7	0,9	3	14360
13000,1	3	6,4	0,9	2,4	12833,6
12914,2	4	4,6	0,8	2,1	11809,2
11615,6	5	3,6	0,8	1,8	11029,2
11326,3	6	2,9	0,8	1,6	10393,2
10859,6	7	2,5	0,7	1,4	9853,6
9605,4	8	2,1	0,7	1,3	9379,8
9422	9	1,9	0,7	1,1	8956
9284,4	10	1,7	0,6	0,9	8570,1
7022,1	11	1,5	0,6	0,8	8213,7
5815,4	12	1,4	0,6	0,7	7880,7
5810,6	13	1,3	0,5	0,6	7566,4
5758,4	14	1,2	0,5	0,5	7267,2
5654,3	15	1,1	0,5	0,4	6979,9
5592,2	16	1	0,4	0,3	6702
5442,8	17	1	0,4	0,2	6431,2
5233,8	18	0,9	0,4	0,1	6165,5
5227,7	19	0,9	0,3	0,04	5902,7
5047,7	20	0,8	0,3	-0,1	5640,9
4964	21	0,8	0,3	-0,1	5377,9
4879,9	22	0,7	0,2	-0,2	5111,3
4771	23	0,7	0,2	-0,3	4838
4682,7	24	0,7	0,2	-0,4	4554,2
4666,3	25	0,7	0,1	-0,5	4254,8
4540,3	26	0,6	0,1	-0,6	3931,9
4435,7	27	0,6	0,1	-0,8	3572,6
4363,4	28	0,6	0,08	-0,9	3152,4
4344,4	29	0,6	0,05	-1,1	2612,4
4297,6	30	0,5	0,02	-1,4	1710,1

Tableau 46 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR3.

La figure 90 représente l'ajustement statistique de la loi de Gumbel et le tableau 47 les paramètres d'ajustement ainsi que le volume de stockage retenu Vs_3 pour le bassin de retenue BR3.

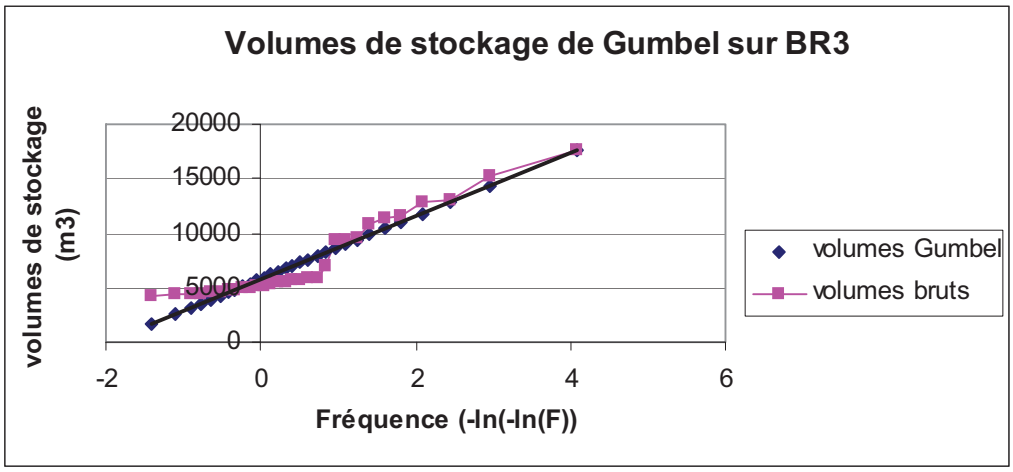


Figure 90: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR3.

Moyenne μ (x)	Ecart-type σ(x)	S	xo	Vs_3
7447,9	3702,9	2888,2	5781,4	**12084**

Tableau 47 : Calcul du volume de stockage Vs_3 sur BR3 avec la méthode de Gumbel.

5.2.4) Calcul du volume de stockage Vs_4 sur le BR4

Le tableau 48 présente les trente volumes de stockage retenus ainsi que les périodes de retour et fréquences associées. Dans la dernière colonne figurent les volumes correspondant à l'ajustement statistique de la loi de Gumbel.

Série de 30 Vs_{max} m^3	Rang	Période retour T	Fréquence F	-ln(-ln(F))	Vs Gumbel en m^3
24460	1	32	0,9	4,1	24468,4
22488,7	2	10,7	0,9	3	19973,2
20292,1	3	6,4	0,9	2,4	17844
19889,7	4	4,6	0,8	2,1	16415,1
13788,6	5	3,6	0,8	1,8	15327
13744,6	6	2,9	0,8	1,6	14440,4
12879,9	7	2,5	0,7	1,4	13686,5
11885	8	2,1	0,7	1,3	13026,2
11632,4	9	1,9	0,7	1,1	12435,1
10515,4	10	1,7	0,6	1	11896,8
9905	11	1,5	0,6	0,8	11399,6
9414,6	12	1,4	0,6	0,7	10935,1
9129,8	13	1,3	0,6	0,6	10496,7
9073,7	14	1,2	0,5	0,5	10079,3
8552,4	15	1,1	0,5	0,4	9678,6
7844,9	16	1	0,4	0,3	9290,9
7628	17	1	0,4	0,2	8913,2
7612,6	18	0,9	0,4	0,1	8542,5
7575,9	19	0,9	0,3	0,04	8174
7492	20	0,8	0,3	-0,1	7810,8
7226	21	0,8	0,3	-0,1	7443,9
7068	22	0,7	0,2	-0,2	7072
6985,3	23	0,7	0,2	-0,3	6690,7
6780,3	24	0,7	0,2	-0,4	6294,9
6554,4	25	0,7	0,1	-0,5	5877,3
6502,5	26	0,6	0,1	-0,6	5426,9
6330,3	27	0,6	0,1	-0,8	4925,7
6051,6	28	0,6	0,08	-0,9	4339,5
5587,9	29	0,6	0,05	-1,1	3586,3
5049,9	30	0,5	0,02	-1,4	2327,6

Tableau 48 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR4.

La figure 91 représente l'ajustement statistique de la loi de Gumbel et le tableau 49 les paramètres d'ajustement ainsi que le volume de stockage retenu Vs_4 pour le bassin de retenue BR4.

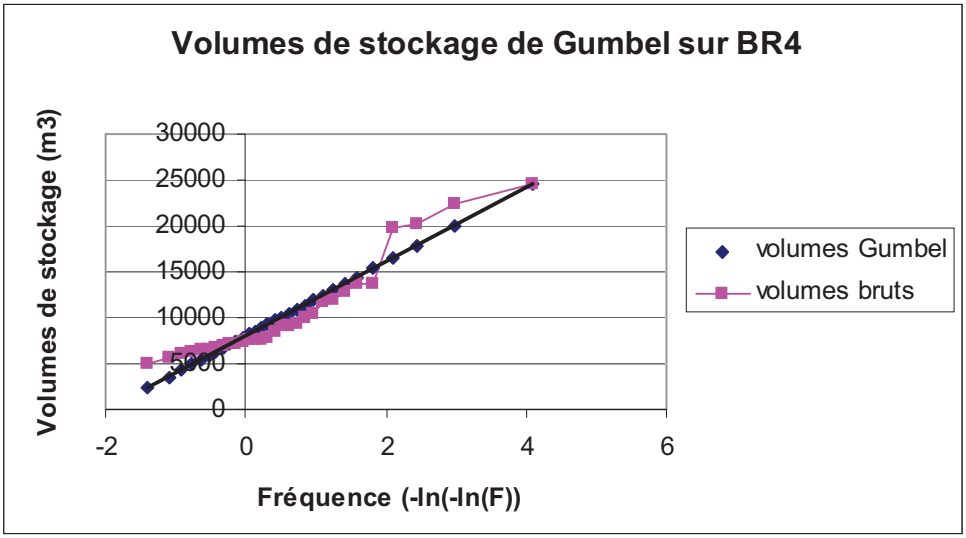


Figure 91: Evolution des volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR4.

Moyenne μ (x)	Ecart-type σ(x)	s	Xo	Vs_4
10331,3	5165,2	4028,9	8006,7	**19706,2**

Tableau 49 : Calcul du volume de stockage Vs_4 sur BR4 avec la méthode de Gumbel.

5.2.5) Calcul du volume de stockage Vs_5 sur le BR5

Le tableau 50 présente les trente volumes de stockage retenus ainsi que les périodes de retour et fréquences associées. Dans la dernière colonne figurent les volumes correspondant à l'ajustement statistique de la loi de Gumbel.

Série de 30 Vs_{max} m^3	Rang	Période retour T	Fréquence F	-ln(-ln(F))	Vs Gumbel en m^3
393517,2	1	32	0,9	4,1	402567,3
335447,4	2	10,7	0,9	3	328758,6
332312,3	3	6,4	0,9	2,4	293799
285374,3	4	4,6	0,8	2,1	270337,3
275427,3	5	3,6	0,8	1,8	252470,7
271195,1	6	2,9	0,8	1,6	237913,1
236636,4	7	2,5	0,7	1,4	225535,1
215649,7	8	2,1	0,7	1,3	214694,2
214466,5	9	1,9	0,7	1,1	204988,5
205514,4	10	1,7	0,6	1	196149
153360,2	11	1,5	0,6	0,8	187985,8
144030,3	12	1,4	0,6	0,7	180358,8
135560,5	13	1,3	0,5	0,6	173160,9
132514,6	14	1,2	0,5	0,5	166307,1
128022	15	1,1	0,5	0,4	159727,5
126461,3	16	1	0,4	0,3	153362,9
123676,3	17	1	0,4	0,2	147161,2
122619	18	0,9	0,4	0,1	141074,3
122187,9	19	0,9	0,3	0,04	135056,1
119281,2	20	0,8	0,3	-0,1	129060,1
114056,7	21	0,8	0,3	-0,1	123036,4
111972	22	0,7	0,2	-0,2	116928,7
111880,9	23	0,7	0,2	-0,3	110669,2
107027,2	24	0,7	0,2	-0,4	104170,6
106123,3	25	0,7	0,1	-0,5	97313
102642,2	26	0,6	0,1	-0,6	89917,3
100261	27	0,6	0,12	-0,8	81687,9
97212,7	28	0,6	0,08	-0,9	72063,2
96235,8	29	0,6	0,05	-1,1	59696
92705,2	30	0,5	0,02	-1,4	39029,2

Tableau 50 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR5.

La figure 92 représente l'ajustement statistique de la loi de Gumbel et le tableau 51 les paramètres d'ajustement ainsi que le volume de stockage retenu Vs_5 pour le bassin de retenue BR5.

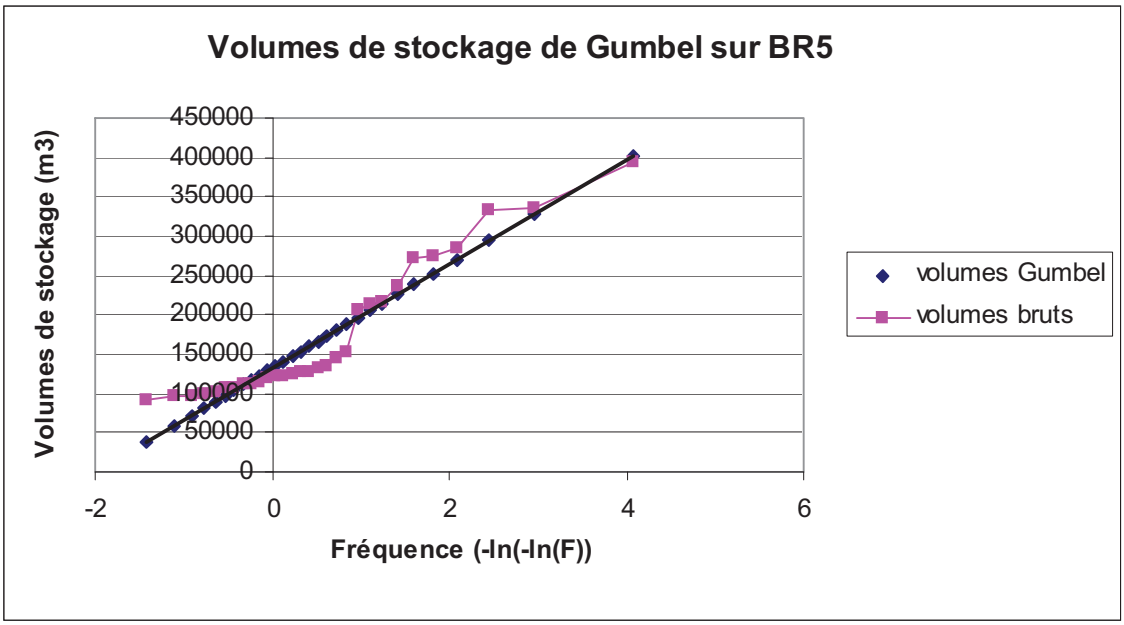


Figure 92: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR5.

Moyenne μ (x)	Ecart-type σ(x)	S	Xo	Vs_5
170445,7	84809,3	66151,3	132276,4	**324374**

Tableau 51 : Calcul du volume de stockage Vs_5 sur BR5 avec la méthode de Gumbel 1.

5.3) Calcul des volumes de stockage en utilisant la nouvelle méthode

Pour le calcul des volumes de stockage par la nouvelle méthode, nous procédons de la manière suivante :

- calcul de la durée de la pluie projet par l'équation 42 (D=239,5+1,6C–38,5Qad+27,4T) (cf. 4.2.2.1) ;
- calcul de l'intensité maximale de la pluie de projet par l'équation 13 ($i=120*a*D^b$)(cf. 1.3.4.2.3) ;
- calcul du hyétogramme de la pluie de projet ;
- calcul des hydrogrammes à l'exutoire des bassins versants ;
- calcul des volumes des ouvrages de rétention.

5.3.1) Calcul du volume de stockage Vs_1 sur le BR1

Pour le BR1, le coefficient de ruissellement C est de 70%, la période de retour T est de 5 ans et le débit admissible Qad est de 3 l/s/ha.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 376 mn et une intensité maximale de 17,83 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 93), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR1 (fig. 94), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR1 (fig. 94) et en retenons le volume maximal.

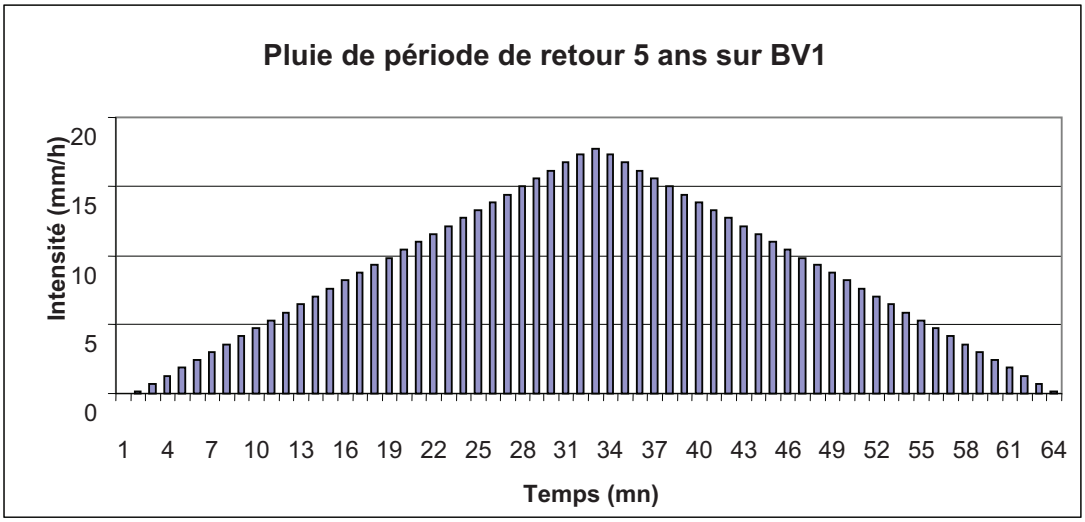


Figure 93 : Hyétogramme de période de retour 5ans projeté sur BV1

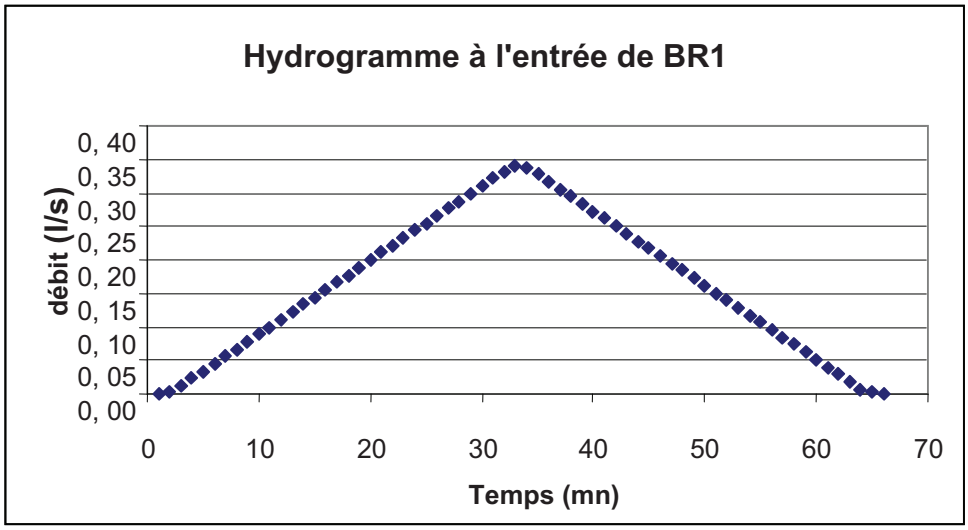


Figure 94: Hydrogramme à l'entrée de BR1.

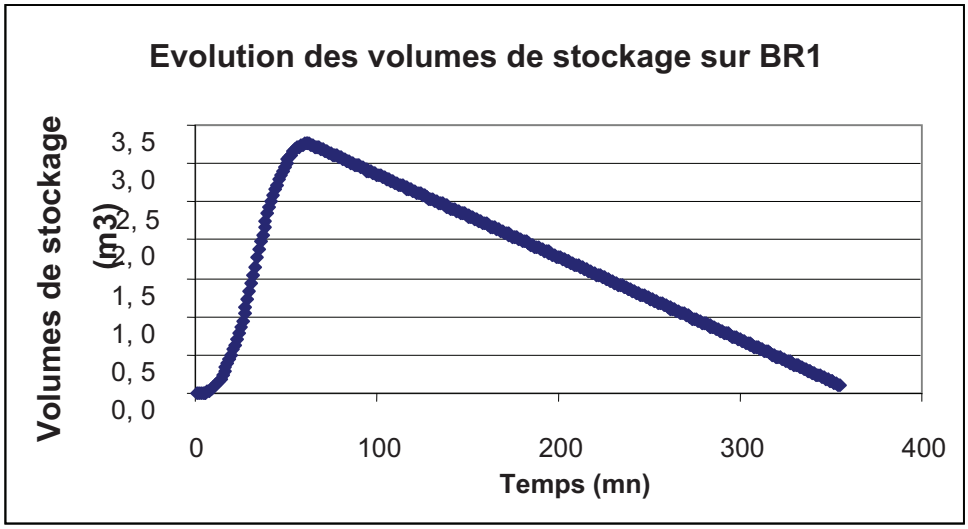


Figure 95 : Evolution des volumes de stockage sur BR1

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 52.

BR 1	
a	5,2
b	-0,6
T (ans)	5
C (%)	70
Qad (l/s/ha)	3
D (mn)	376
Imax (mm/h)	17,8
Vs_1 (m^3)	**3,3**

Tableau 52 : Volume de stockage Vs_1 calculé sur BR1 avec la Nouvelle méthode.

5.3.2) Calcul du volume de stockage Vs_2 sur le BR 2

Pour le BR2, le coefficient de ruissellement C est de 30%, la période de retour T est de 5 ans et le débit admissible Qad est de 2 l/s/ha.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 349 mn et une intensité maximale de 18,64 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 96), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR2 (fig. 97), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR2 (fig. 98) et en retenons le volume maximal.

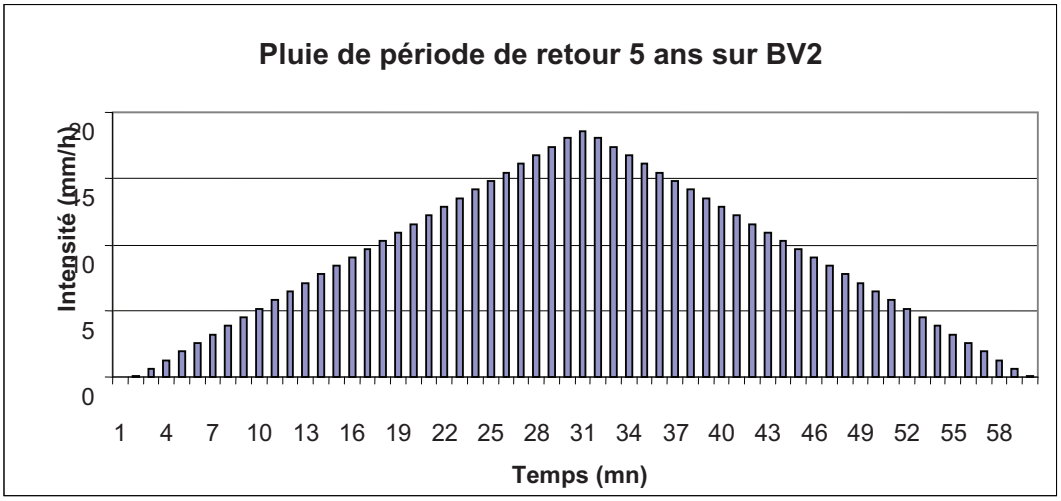


Figure 96 : Hyétogramme de période de retour 5 ans projeté sur BV2.

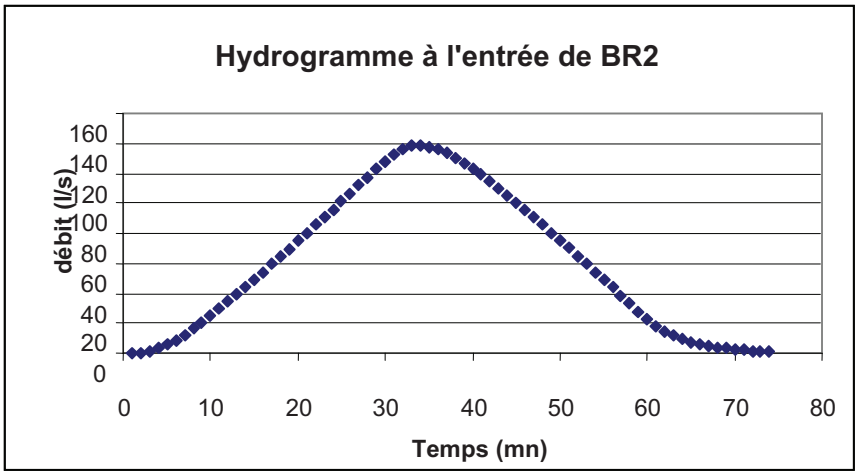


Figure 97 : Hydrogramme à l'entrée de BR2.

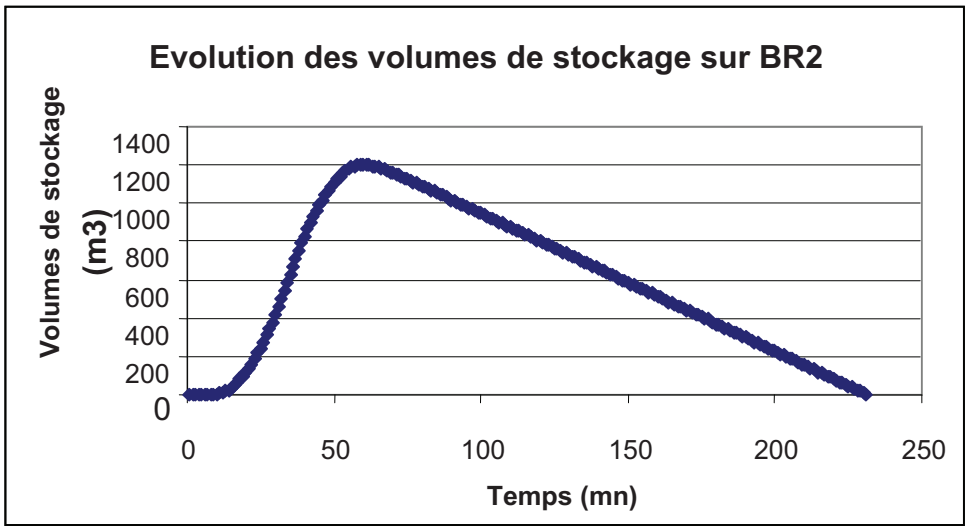


Figure 98 : Evolution des volumes de stockage sur BR2.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 53.

BR 2	
a	5,2
b	-0,6
T (ans)	5
C (%)	30
Qad (l/s/ha)	2
D (mn)	349
Imax (mm/h)	18,6
Vs_2 (m^3)	**1200,8**

Tableau 53 : Volume de stockage Vs_2 calculé sur BR2 avec la Nouvelle méthode.

5.3.3) Calcul du volume de stockage Vs_3 sur le BR 3

Pour le BR3, le coefficient de ruissellement C est de 50%, la période de retour T est de 5 ans et le débit admissible Qad est de 2 l/s/ha.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 382 mn et une intensité maximale de 17,66 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 99), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR3 (fig. 100), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR3 (fig. 101) et en retenons le volume maximal.

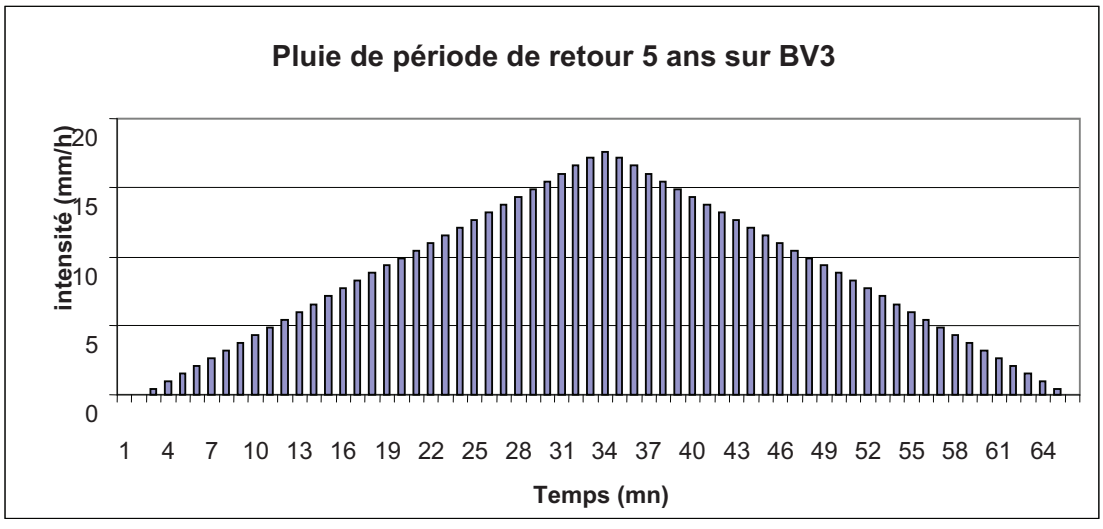


Figure 99 : Hyétogramme de période de retour 5 ans projeté sur BV3.

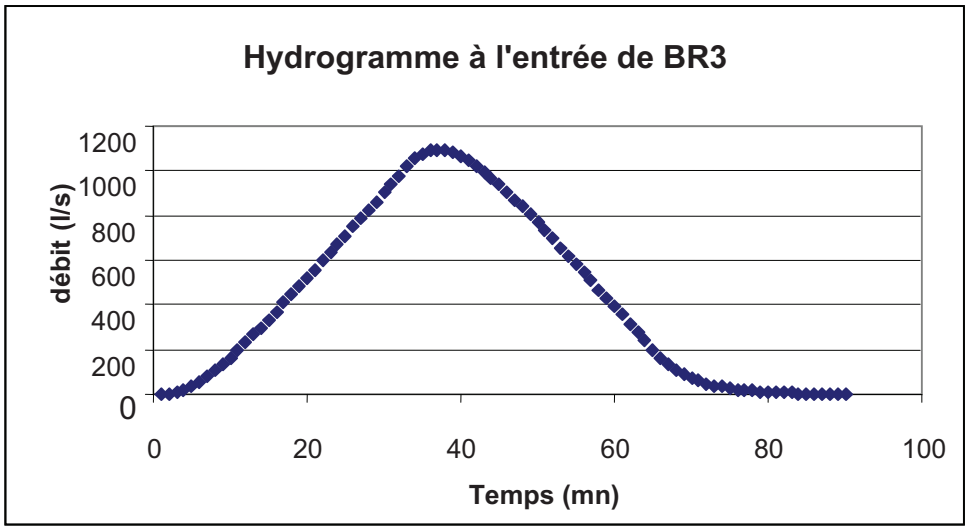


Figure 100: Hydrogramme à l'entrée de BR3.

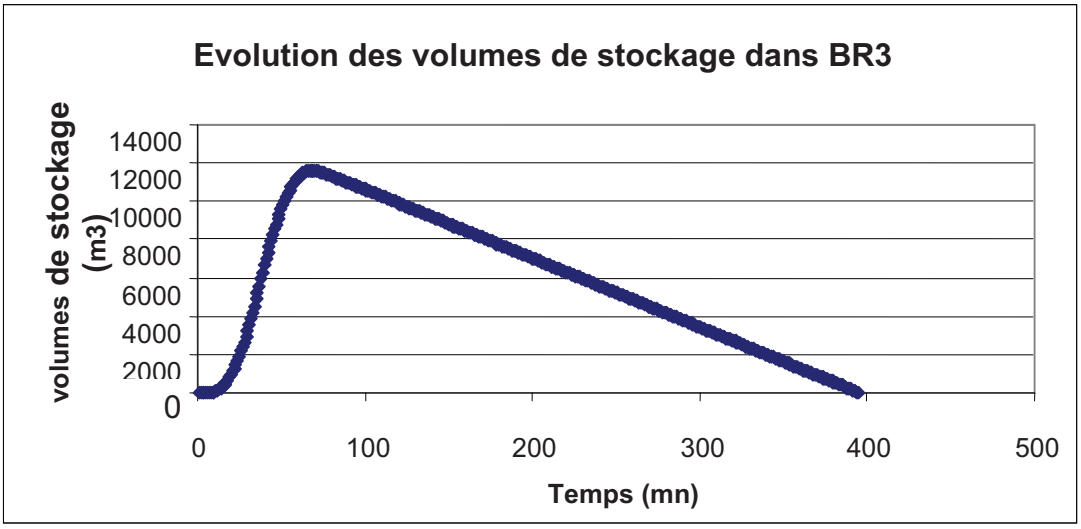


Figure 101 : Evolution des volumes de stockage sur BR3.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 54.

BR 3	
a	5,2
b	-0,6
T (ans)	5
C (%)	50
Qad (l/s/ha)	2
D (mn)	382
Imax (mm/h)	17,7
Vs_3 (m^3)	**11602.5**

Tableau 54 : Volume de stockage Vs_3 calculé sur BR3 avec la Nouvelle méthode.

5.3.4) Calcul du volume de stockage Vs_4 sur BR 4

Pour ce calcul, nous essaierons deux approches différentes:

- approche 1 : l'ensemble des BV en amont du BR 4 (BV1+BV2+BV3+BV4) est pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet ;
- approche 2 : seul le coefficient de ruissellement du BV4 est pris en compte pour le calcul de la durée de la pluie de projet.

5.3.4.1) Approche 1

Nous considérons que l'ensemble des BV en amont du BR 4 (BV1+BV2+BV3+BV4) est pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet. Nous déterminons ainsi la surface équivalente S_{eq} des BV ainsi que le coefficient de ruissellement équivalent C_{eq}

(BV_1 à $_3$) // BV_4 = BV_{4bis} (assemblage en parallèle)

$S_{4eq} = S_{BV1} + S_{BV2} + S_{BV3} + S_{BV4}$
$S_{4eq} = 0{,}01ha + 10ha + 50ha + 100ha$
$S_{4eq} = 160, 01$ ha

$C_{4eq} = \Sigma (S_i * C_i) / \Sigma S_i$
$C_{4eq} = (0{,}01*0{,}7+10*0{,}3+50*0{,}5+100*0{,}5)/160{,}01$
$C_{4eq} = 0.49$

$Qf_{eq} = Qad_4 * (S_{BV1} + S_{BV2} + S_{BV3} + S_{BV4}) – (Qad_1 * S_{BV1} – Qad_2 * S_{BV2} - Qad_3 * S_{BV3})$
$Qf_{4eq} = 4 * (0, 01+10+50+100) – 0, 03 - 20 – 100$
$Qf_{4eq} = 520, 01$ l/s

Pour le BR4, le coefficient de ruissellement C est alors de 49%, la période de retour T est de 10 ans et le débit de fuite admissible Qf_{4eq} est de 520,01 l/s.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 440 mn et une intensité maximale de 17,87 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 102), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR4 (fig. 103), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR4 (fig. 104) et en retenons le volume maximal.

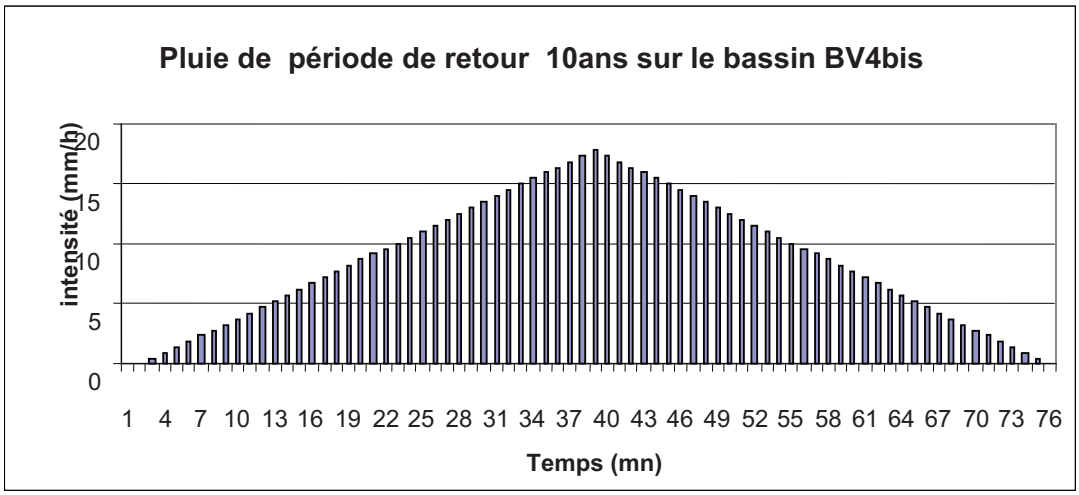


Figure 102: Hyétogramme de période de retour10 ans projeté sur BV4bis.

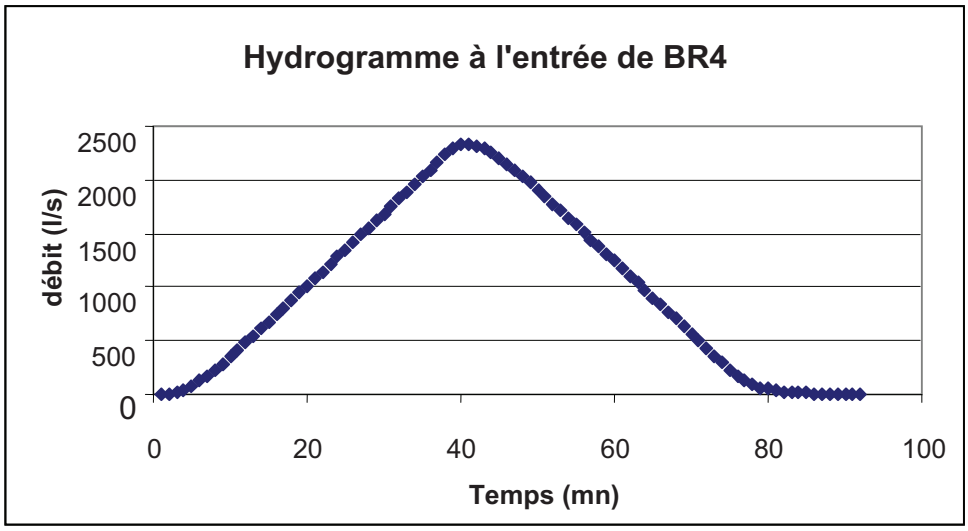


Figure 103 : Hydrogramme à l'entrée de BR4.

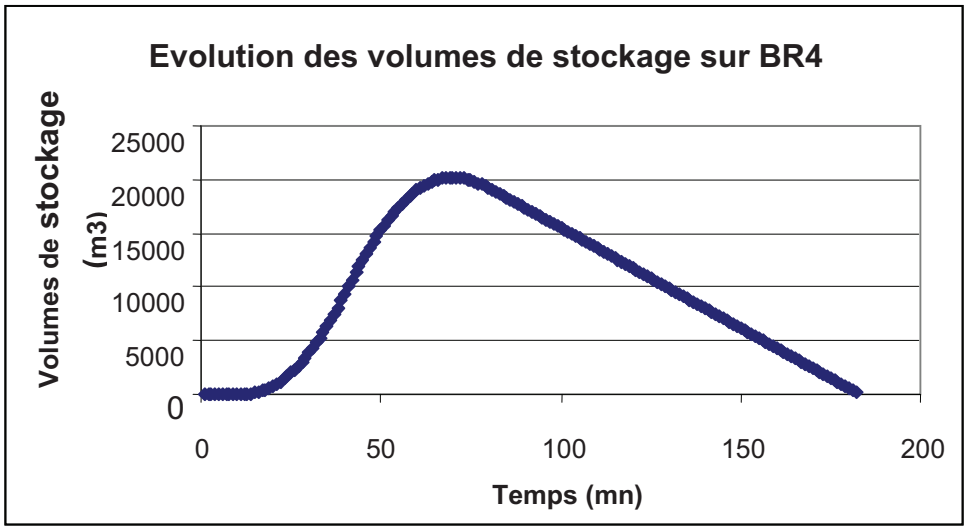


Figure 104: Evolution des volumes de stockage sur BR4 dans l'approche 1.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 55.

BR4	
a	5,8
b	-0,6
T (ans)	10
C (%)	49
Qf_{4eq} (l/s)	520,01
D (mn)	440
Imax (mm/h)	17,9
Vs_4 (m^3)	**20213**

Tableau 55 : Volume de stockage Vs_4 calculé sur BR4 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 1.

5.3.4.2) Approche 2

Nous considérons que seul le coefficient de ruissellement du BV4 est pris en compte pour le calcul de la durée de la pluie de projet. Nous déterminons alors le débit de fuite équivalent Qf_{4eq} sortant du BR4 régulé par les débits de fuite des BR1, BR2 et BR3.

$Qf_{eq} = Qad_4 * (S_{BV1} + S_{BV2} + S_{BV3} + S_{BV4}) – (Qad_1 * S_{BV1} – Qad_2 * S_{BV2} - Qad_3 * S_{BV3})$

$Qf_{4eq} = 4 * (0, 01+10+50+100) – 0, 03 - 20 – 100$

Qf_{4eq} = 520, 01 l/s

Pour le BR4, le coefficient de ruissellement C est donc de 50%, la période de retour T est de 10 ans et le débit de fuite admissible Qf_{4eq} est de 520,01 l/s.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 442 mn et une intensité maximale de 17,82 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 105), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR4 (fig. 106), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR4 (fig. 107) et en retenons le volume maximal.

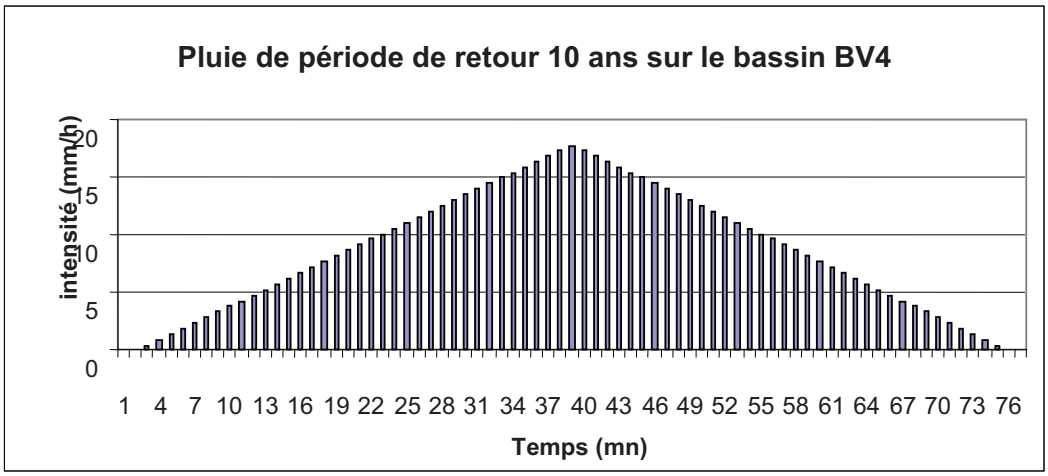


Figure 105: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV4.

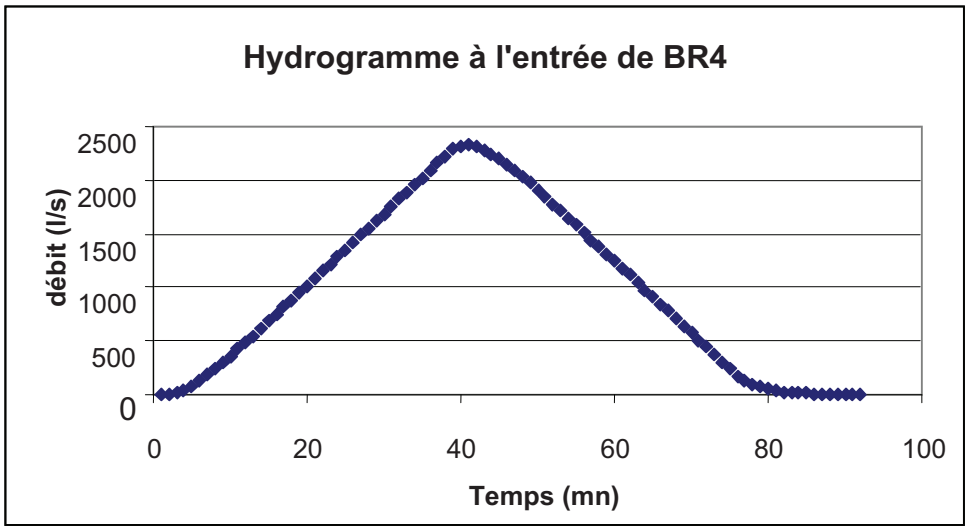


Figure 106: Hyétogramme à l'entrée de BR4.

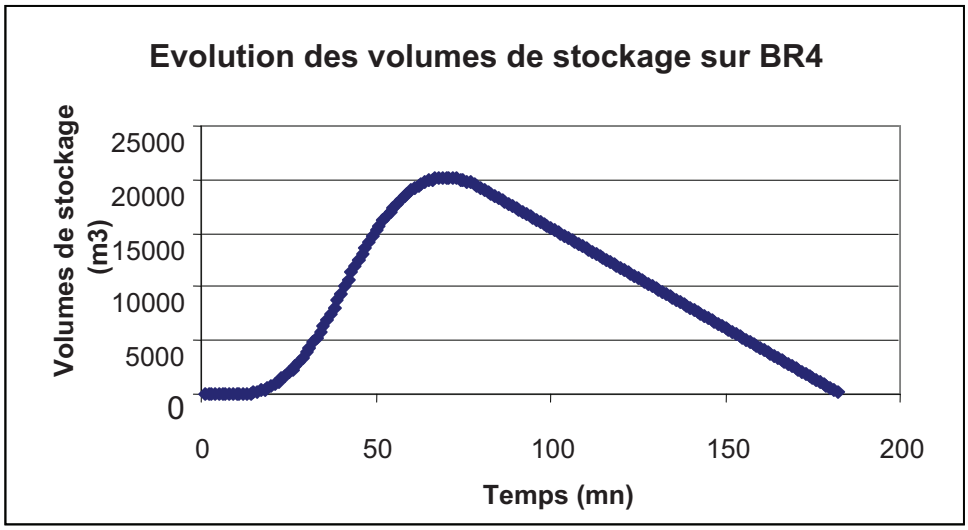


Figure 107: Evolutions des volumes de stockage sur BR4 dans l'approche2.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 56.

BR4	
a	5,8
b	-0,6
T (ans)	10
C (%)	50
Qf_{4eq} (l/s)	520,01
D (mn)	442
Imax (mm/h)	17,8
Vs_4 (m^3)	**20221.3**

Tableau 56 : Volume de stockage Vs_4 calculé sur BR4 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 2.

5.3.5) Calcul du volume de stockage Vs_5 sur le BR 5

Pour ce calcul, nous essaierons trois approches différentes:

- approche 1 : l'ensemble des BV en amont du BR 4 (BV1+BV2+BV3+BV4) est pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet ;
- approche 2 : les coefficients de ruissellement des BV5 et BV6 sont pris en compte directement pour le calcul des durées de deux pluies de projet ;
- approche 3 : seuls les coefficients de ruissellement des BV5 et BV6 sont pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet.

5.3.5.1) Approche 1

Nous considérons que l'ensemble des BV en amont du BR 4 (BV1+BV2+BV3+BV4) est pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet. Nous déterminons ainsi la surface équivalente S_{5eq} des BV ainsi que le coefficient de ruissellement équivalent C_{5eq} et le débit de fuite équivalent Qf_{5eq} sortant du BR5 régulé par le débit de fuite de BR4. Nous effectuons les calculs suivants :

BV_{4bis}+ BV_5 +BV_6 = BV_{5bis} assemblage en série

$S_{5eq} = S_{BV5} + S_{BV6} + S_{BV4bis}$

$S_{5eq} = 250ha + 500ha + 160,01ha$

S_{5eq} = 910, 01ha

$C_{5eq} = (\Sigma S_i * C_i) / \Sigma S_i$

$C_{5eq} = (250*0,9+500*0,6+160,01*0,49) / 910,01$

C_{5eq} = 0,66

$Qf_{5eq} = Qad_5 * (S_{BV5} + S_{BV6} + S_{BV4bis}) - Qf_{4eq}$

$Qf_{5eq} = 2* (250 + 500 + 160,01) - 520, 02$

Qf_{5eq} = 1300,01 l/s

Pour le BR5, le coefficient de ruissellement C est donc de 66%, la période de retour T est de 10 ans et le débit de fuite admissible Qf_{5eq} est de 1300,01 l/s.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 545 minutes (mn) et une intensité maximale de 15,69 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 108), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR5 (fig. 109), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR5 (fig. 110) et en retenons le volume maximal.

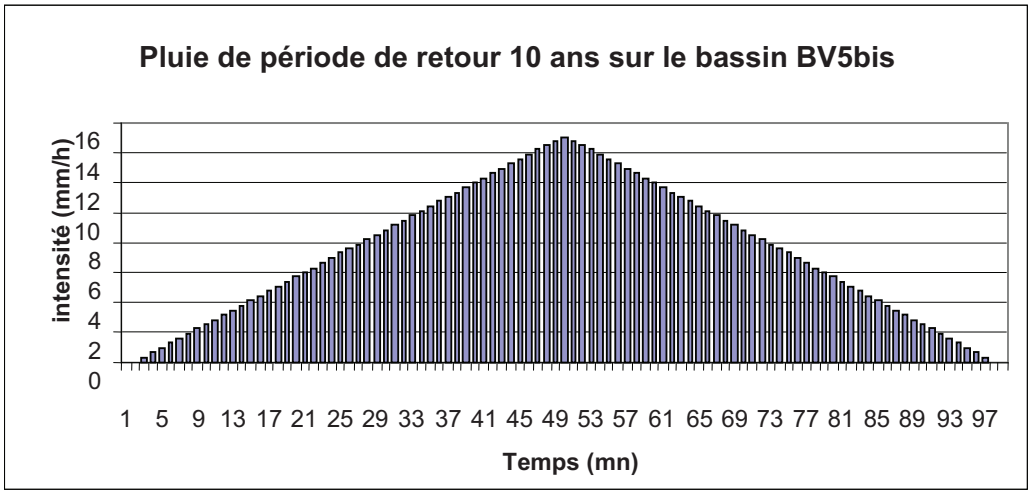


Figure 108*: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV5bis.*

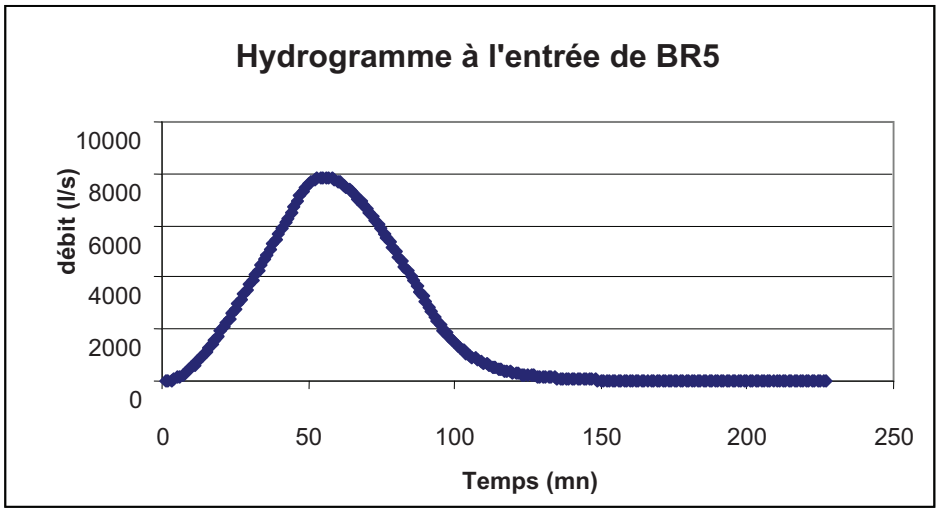


Figure 109: Hyétogramme à l'entrée de BR5 dans l'approche1.

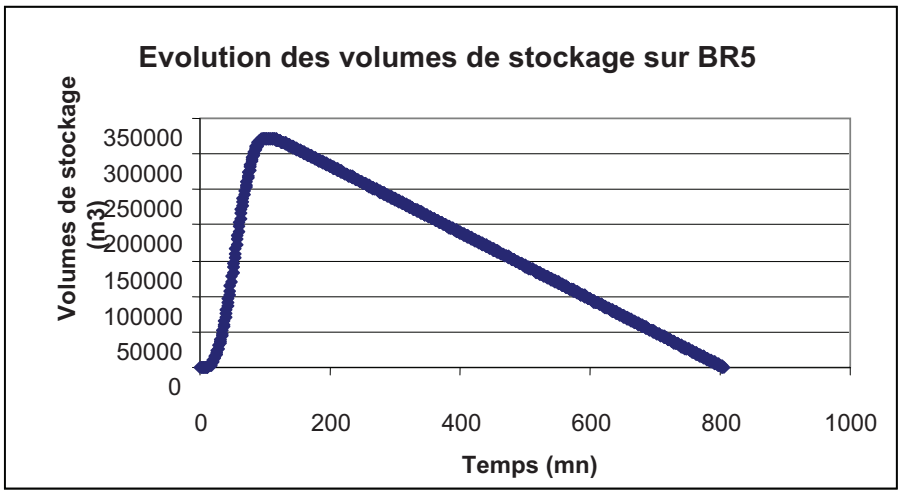


Figure 110: Evolution des volumes de stockage sur BR5 dans l'approche 1.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 57.

BR5	
a	5,8
b	-0,6
T (ans)	10
C (%)	83
Qf_{5eq} (l/s)	1300,01
D (mn)	545
Imax (mm/h)	15,7
Vs_5 (m^3)	**322518,4**

Tableau 57 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 1

5.3.5.2) Approche 2

Dans cette approche, nous projetons des pluies différentes sur les BV5 et BV6, ainsi les coefficients de ruissellement des BV5 et BV6 sont pris en compte directement pour le calcul des durées de deux pluies de projet. Le débit de fuite équivalent Qf_{5eq} sortant du BR5 sera régulé par le débit de fuite de BR4. Nous effectuons les calculs suivants :

S_{BV5} = 250 ha

C_{BV5}= 0,9

S_{BV6} = 500 ha

C_{BV6}= 0,6

$Qf_{5eq} = Qad_5 * (S_{BV5} + S_{BV6} + S_{BV4bis}) – Qf_{4eq}$

Qf_{5eq} = 2* **(**250 + 500 + 160, 01) - 520, 02

Qf_{5eq} = 1300, 01 l/s

Pour le BV5, le coefficient de ruissellement C est donc de 90%. Pour le BV6, le coefficient de ruissellement C est donc de 60%. La période de retour T est de 10 ans. Le débit de fuite admissible de BR5 Qf_{5eq} est de 1300,01 l/s.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 584 mn et une intensité maximale de 15,05 mm/h pour le BV5. Nous obtenons une durée de pluie de projet de 535 mn et une intensité maximale de 15,87 mm/h pour le BV6. A partir de ces données, nous construisons les hyétogrammes correspondants (fig. 111 et 113), modélisons le ruissellement sur les bassins versants pour obtenir les hydrogrammes à l'entrée de BR5 (fig. 112 et 114), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR5 (fig. 115) et en retenons le volume maximal.

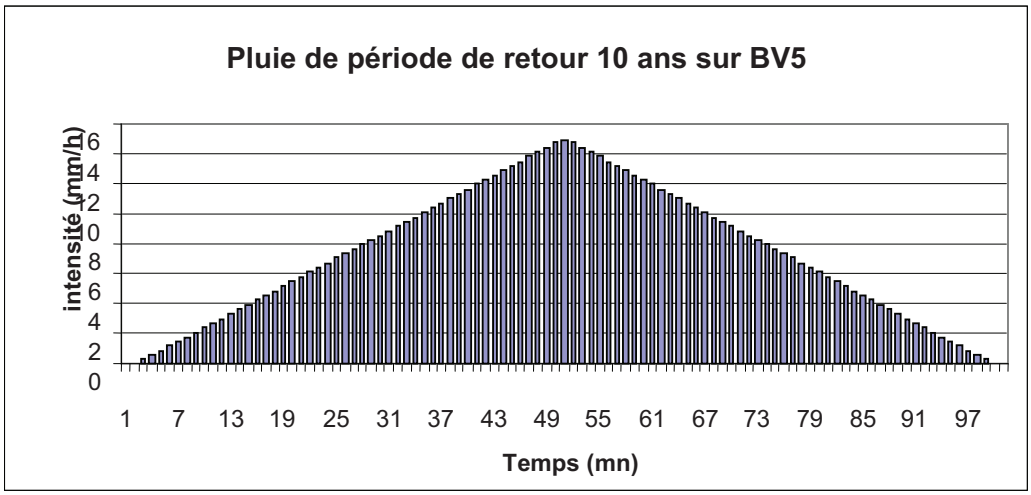


Figure 111: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV5.

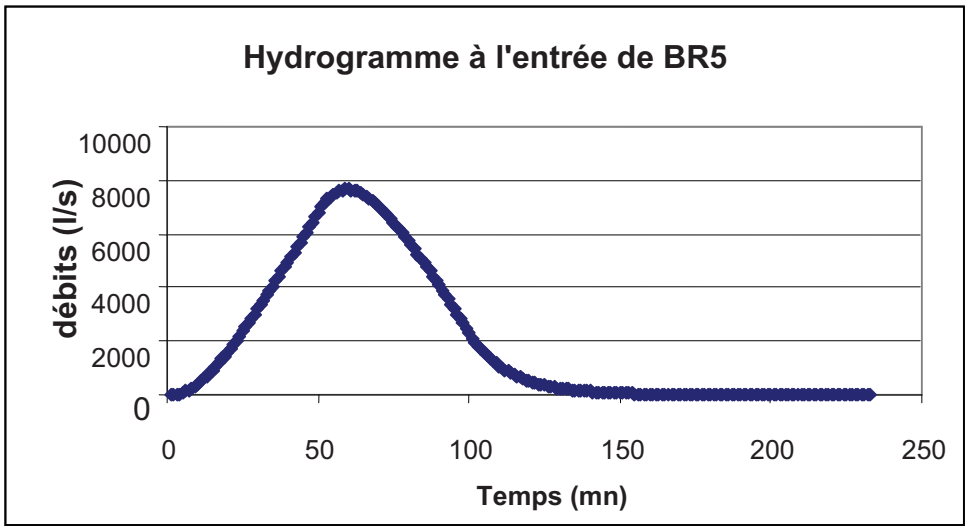


Figure 112 : Hydrogramme à l'entrée de BR5 et issu de BV5.

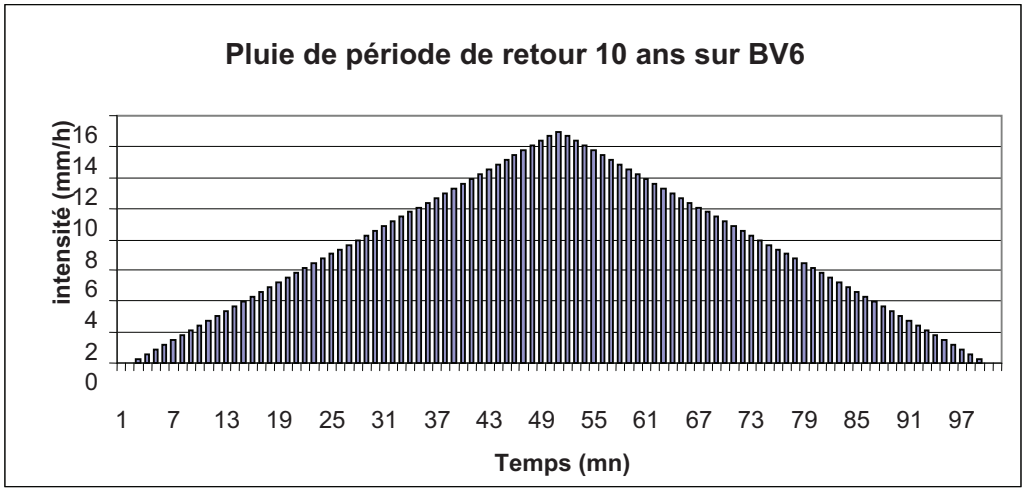


Figure 113: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV6.

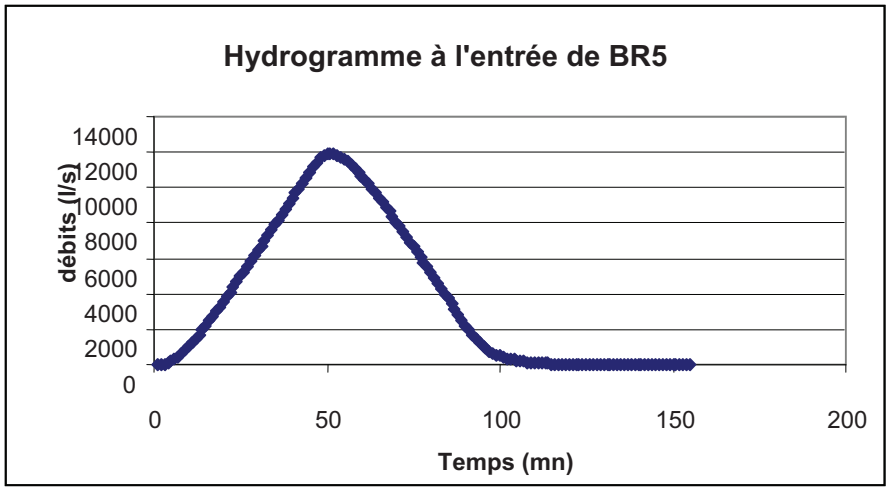


Figure 114: Hydrogramme à l'entrée de BR5 et issu de BV6.

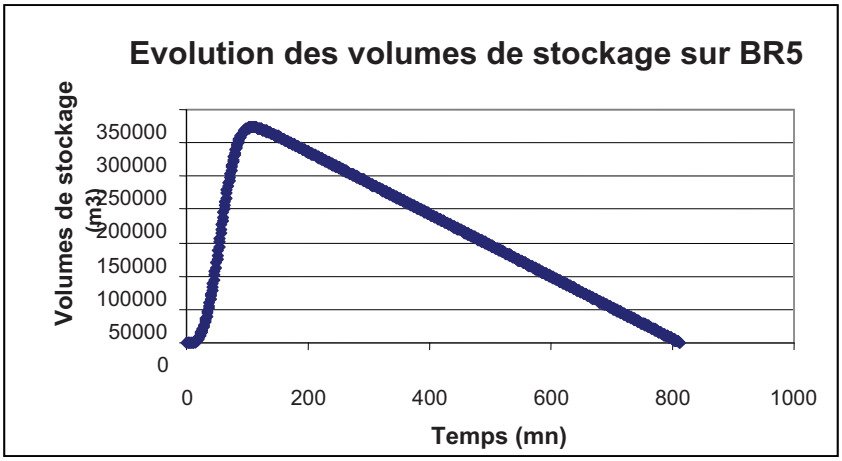


Figure 115: Evolution des volumes de stockage sur BR5 dans l'approche 2.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 58.

BR5	
a	5,8
b	-0,6
C_{BV5} (%)	90
C_{BV6} (%)	60
T (ans)	10
Qf_{5eq} (l/s)	1300
D_{BV5} (mn)	584
D_{BV6} (mn)	535
$Imax_{BV5}$ (mm/h)	15,1
$Imax_{BV6}$ (mm/h)	15,9
Vs_5 (m^3)	**323407,2**

Tableau 58 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 2.

5.3.5.3) Approche 3

Ici, nous projetons une pluie unique sur les BV5 et BV6. Seuls les coefficients de ruissellement des BV5 et BV6 sont pris en compte pour l'établissement du coefficient de ruissellement nécessaire au calcul de la durée de la pluie de projet. Nous déterminons ainsi la surface équivalente S_{5eq} des BV ainsi que le coefficient de ruissellement équivalent C_{5eq} et le débit de fuite équivalent Qf_{5eq} sortant du BR5 régulé par le débit de fuite de BR4. Nous effectuons les calculs suivants :

$\underline{BV_6 + BV_5 = BV'}$

$S_{5eq} = S_{BV5} + S_{BV6}$

$S_{5eq} = 250ha + 500ha$

$S_{5eq} = 750$ ha

$C_{5eq} = (\Sigma S_i * C_i) / \Sigma S_i$

$C_{5eq} = (250*0,9+500*0,6) / 750$

$C_{5eq} = 0,7$

$Qf_{5eq} = Qad_5 * (S_{BV5} + S_{BV6} + S_{BV4bis}) - Qf_{4eq}$

$Qf_{5eq} = 2* (250 + 500 + 160, 01) - 520, 02$

$Qf_{5eq} = 1300, 01$ l/s

Pour le BR5, le coefficient de ruissellement C est donc de 70%, la période de retour T est de 10 ans et le débit de fuite admissible Qf_{5eq} est de 1300,01 l/s.

Nous obtenons une durée de pluie de projet de 551 mn et une intensité maximale de 15,58 mm/h. A partir de ces données, nous construisons le hyétogramme (fig. 116), modélisons le ruissellement sur le bassin versant pour obtenir l'hydrogramme à l'entrée de BR5 (fig. 117), calculons l'évolution des volumes stockés dans le BR5 (fig. 118) et en retenons le volume maximal.

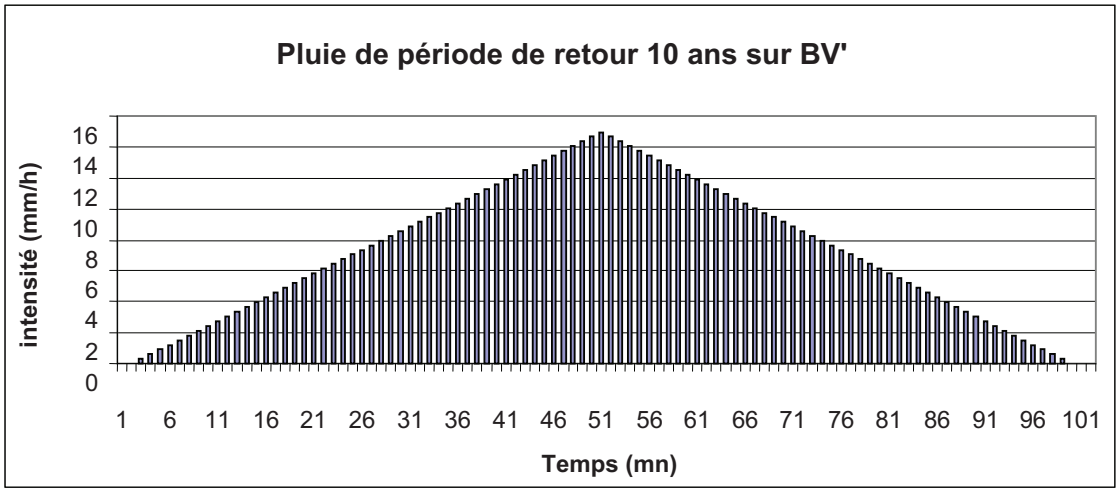


Figure 116: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV'.

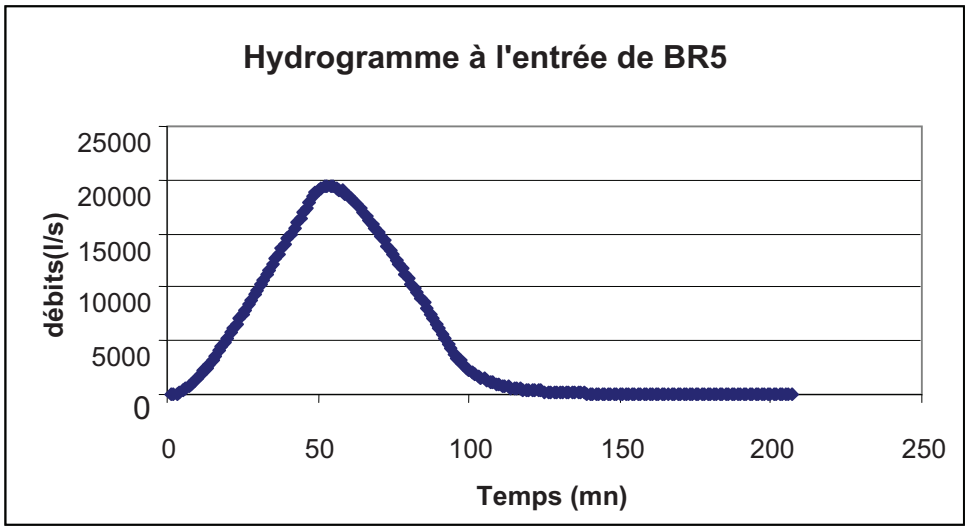


Figure 117: Hydrogramme à l'entrée de BR5 dans l'approche 3.

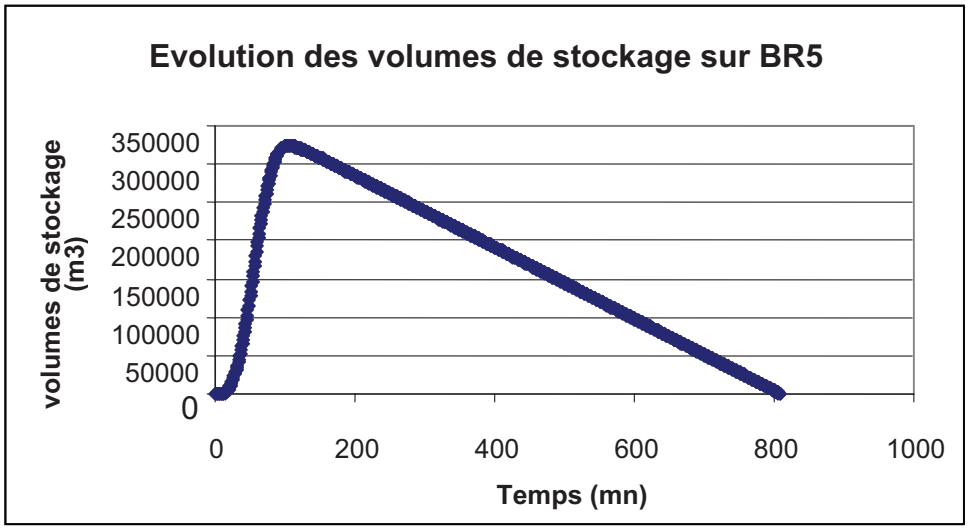


Figure 118: Evolution des volumes de stockage sur BR5.

L'ensemble des données et résultats est synthétisé dans le tableau 59.

BR 5	
a	5,8
b	-0,6
T (ans)	10
C (%)	70
Qf_{5eq} (l/s)	1300
D (mn)	551
Imax (mm/h)	15,6
Vs_5 (m^3)	**323804,8**

Tableau 59 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 3.

5.4) Calcul des écarts entre les deux méthodes

Le tableau 60 regroupe pour le réseau test l'ensemble des écarts obtenus pour les volumes de stockage.

N° BR	Gumbel (m3)	Nouvelle méthode (m3)	Ecart (%)
BR1	3,4	3,3	-2,9
BR2	1210,9	1200,8	-0,8
BR3	12084	11602,5	-4
BR4 approche 1	19706,2	20213	2,6
BR4 approche 2	19706,2	20221,3	2,6
BR5 approche 1	324374	322518,8	-0, 6
BR5 approche 2	324374	323407,2	-0,3
BR5 approche 3	324374	323804,8	-0,2

Tableau 60 : Tableau de synthèse et comparaison des résultats obtenus avec la nouvelle méthode et celle de Gumbel.

Aucun des écarts obtenus ne dépassent les 5% ce qui montre que la nouvelle méthode proposée est tout à fait capable de dimensionner un ensemble d'ouvrages de rétention disposés en série ou en parallèle.

Concernant les diverses approches testées pour le dimensionnement des BR4 et BR5, les écarts ne varient pas sensiblement d'une approche à l'autre. En revanche, la mise en œuvre de la première approche est nettement plus aisée. Il suffit de calculer le coefficient de ruissellement moyen de tous les bassins versants de l'ouvrage de rétention à dimensionner.

L’approche 2 pour le BR5 nécessite d’utiliser plusieurs pluies pour le même ouvrage, elle est donc la plus délicate à mettre en œuvre. Enfin les approches 2 pour le BR4 et 3 pour le BR5 n’utilisent qu’une seule pluie mais demandent de pouvoir différencier les bassins versants amont déjà régulés par un autre ouvrage de rétention de ceux qui ne le sont pas.

5.5) Conclusion

Le test effectué ne montre aucune anomalie quant à la nouvelle méthode de dimensionnement. Les écarts obtenus sont tout à fait conformes aux attentes.

Différentes approches ont été évaluées concernant la prise en compte des montages en série ou en parallèle. Toutes donnent de bons résultats. L’approche que nous retenons se fera donc plus sur un critère de facilité de mise en œuvre que de qualité des résultats. Par conséquent, l’approche, qui consiste à utiliser une seule pluie par ouvrage de retenue dont la durée sera calculée sur la base du coefficient de ruissellement moyen de tous les bassins versants en amont de l’ouvrage à dimensionner, sera privilégiée.

Conclusion Générale

Les méthodes de conception des systèmes d'assainissement avaient donné lieu à l'Instruction Technique de 1977 [Ministères, 1977]. En 1982, le contexte administratif avait connu une évolution majeure du fait de la décentralisation. En effet, cette loi de décentralisation confie désormais aux communes la pleine et entière responsabilité dans les domaines relevant de leurs compétences et notamment celui de l'assainissement. La circulaire de 1977 est de fait devenue caduque du seul fait des lois de décentralisation [CERTU, 2003].

Aussi, le [CERTU, 2003], dans son guide *« La ville et son assainissement : principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau »* suggère donc de concevoir différemment les réseaux d'assainissement et ouvrages spéciaux parmi lesquels les ouvrages de stockage des eaux pluviales. Mais l'application des recommandations de ce guide est jugée difficile par les praticiens [Chocat & *al*, 2006].

Au vu de ce qui précède, notre thèse a porté sur une analyse fréquentielle appliquée au dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales dans l'optique d'une mise en œuvre pertinente des recommandations du [CERTU, 2003].

Le premier objectif de notre travail était de choisir d'une part le type de données en entrée de nos modèles de simulation hydrologique (modèles de réservoir) et de définir le modèle fréquentiel qui décrivait le comportement statistique des phénomènes hydrologiques étudiés.
Le second objectif était de définir une méthode robuste et fiable capable de dimensionner les ouvrages de stockage et de retrouver les résultats de l'analyse fréquentielle précédente.

La première phase de notre travail consiste à un état des lieux sur les différents ouvrages de stockage et leurs méthodes de dimensionnement. Cet état des lieux a montré que si ces ouvrages revêtaient différents aspects, néanmoins ils remplissaient la même fonction principale (hydraulique) et qu'en revanche, leurs fonctions secondaires étaient différentes d'un ouvrage à un autre.

Quant à leurs méthodes de dimensionnement actuelles, l'étude bibliographique montre qu'elles sont soit faciles à mettre en œuvre mais très approximatives dans leurs résultats

(méthode des pluies, méthodes des abaques) soit rigoureuses (méthodes dynamiques) mais laborieuses car elles exigent de disposer d'un outil informatique sophistiqué et de compétences scientifiques affirmées. L'élaboration d'une nouvelle méthode qui soit à la fois robuste, performante et d'une utilisation aisée nous parait alors un objectif souhaitable.

La deuxième phase de notre travail s'articule autour de la méthodologie que nous avons mise en œuvre pour atteindre nos objectifs. Ainsi, nous avons choisi d'utiliser le concept de pluie de projet. La construction d'une pluie de projet exige de disposer de courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) dont la construction exige elle-même de disposer de données locales ou régionales.

Nous disposons de données pluviométriques de la Communauté Urbaine de Lyon, mesurées sur 16 années sur la station de GERLAND. A partir de ces données, nous avons conduit une analyse fréquentielle qui a reposé sur la définition et la mise en œuvre d'un modèle fréquentiel à savoir la loi de Gumbel, aptes à décrire les phénomènes extrêmes et avons obtenus les coefficients décrivant les courbes IDF.

La simulation hydrologique des bassins versants (calcul des débits à l'exutoire des bassins versants) et des ouvrages de stockage (calcul des volumes de stockage) par des modèles de réservoir a permis, par le biais d'une étude fréquentielle et sur la base de 16 ans de pluies historiques issues de la station de mesure de Gerland à Lyon (France), d'estimer les volumes de stockage de période de retour 1, 2, 5 et 10 ans pour 36 cas tests issus de la construction d'un plan d'expérience. Pour ce dernier, nous avons retenu, parmi les nombreux types de plans d'expériences proposés dans la littérature, le plan orthogonal pour ses propriétés dont la plus importante est l'indépendance des contributions des variables explicatives

L'utilisation du concept de pluie de pluie de projet pour le dimensionnement des ouvrages avait déjà était entreprise par bien d'autres tels [Peyron & *al*, 2005], [Einfalt & *al,* 1998], [Xia Z, 2005]. Ce dernier a montré que la pluie de projet double triangle était inappropriée au dimensionnement des bassins de retenue. Nous avons donc recherché d'autres morphologies de pluie de projet en commençant par les plus simples (rectangle et simple triangle) qui répondent à notre problématique.

Nous avons, pour chaque morphologie de pluie de projet utilisée et pour chacun des 36 cas

tests issus du plan d'expérience, cherché les durées de pluies de projet pour lesquelles les volumes de stockage calculés étaient égaux ou juste supérieurs aux volumes de stockage obtenus avec la loi de Gumbel prise comme méthode de référence. A l'issue de cette étude, nous avons retenu la pluie de projet simple triangle pour les résultats satisfaisants qu'elle offrait.

Dans une troisième phase, nous avons cherché à relier la durée D de cette pluie de projet aux caractéristiques des cas tests (la surface S du bassin versant, le coefficient du ruissellement C du bassin versant, la pente I du bassin versant, l'allongement M du bassin versant, le débit spécifique admissible Qad à l'exutoire du bassin versant, la période de retour de dysfonctionnement de l'ouvrage de stockage) et avons obtenu un modèle D = f (S, C, I, M, Qad, T).

L'analyse de variance, qui consiste à rechercher l'influence de chaque variable explicative sur la durée de pluie, permet d'éliminer les variables non influentes et de construire ainsi un sous-modèle constitué uniquement de variables explicatives influentes. Les résultats de cette analyse révèlent les contributions des variables explicatives M, I et S sont faibles et qu'en conséquence elles peuvent être éliminées. La ré-estimation des coefficients des variables explicatives restantes (C, Qad et T) nous a permis d'obtenir un modèle de type D = f(C, Qad, T). Nous avons ensuite mené une étude d'optimisation de ce dernier modèle en y introduisant une à une les variables M, I et S afin de vérifier si elle n'apportait pas quand même une certaine amélioration de ce dernier. A l'issue de cette étude d'optimisation, nous avons constaté que ces modèles n'étaient pas plus performants. En d'autres termes, l'ajout de M, I et S dans le modèle D = f(C, Qad, T), n'apporte pas une amélioration de ce sous-modèle. Aussi, nous l'avons retenu car il présente l'avantage d'avoir moins de variables à estimer.

Nous avons ensuite utilisé ce modèle pour calculer la durée de pluie de projet simple triangle nécessaire pour dimensionner les ouvrages de stockage du plan d'expériences. Les résultats des volumes de stockage obtenus avec le modèle D = f (C, Qad, T) montrent que notre étude permet de dimensionner de façon adéquate les ouvrages de stockage avec des écarts assez faibles par rapport à la méthode de référence de Gumbel. En effet, pour les périodes de retour de 1 an et 10 ans, la nouvelle méthode surdimensionne (écarts positifs) les ouvrages, par rapport à la loi de Gumbel, dans une proportion maximale respective de 12% et 8%. Les écarts moyens des volumes de stockage aux périodes de retour 1an et 10 ans sont faibles avec

respectivement une moyenne de 7% et 1,5%. Pour les périodes de retour de 2ans et 5 ans, la nouvelle méthode sousdimensionne (écarts négatifs maximum <-8%) les ouvrages, par rapport à la méthode de Gumbel. Les écarts moyens sont également de faibles écarts avec une moyenne respective de -2% et –3%.

Les résultats d'analyse des écarts entre les méthodes des pluies et Gumbel ont révélé que la méthode des pluies a tendance à surdimensionner les ouvrages avec une moyenne générale des écarts toute période de retour confondue somme toute modeste (11%) mais avec, dans certains cas, des écarts pouvant atteindre 100%. Les résultats d'analyse des écarts entre les méthodes d'Abaques telle qu'elle est définie dans l'Instruction Technique 77 et Gumbel donnent des écarts de l'ordre de -32% avec un écart-type de 10. La méthode des abaques a donc tendance à sousdimensionner les ouvrages.
Les résultats des volumes de stockage obtenus d'une part avec la méthode des pluies utilisant les données de la pluviométrie locale et d'autre part avec la méthode des abaques montrent que la méthode des pluies surdimensionne les ouvrages dans un rapport de 1 à 2 alors que la méthode des abaques sousdimensionne les ouvrages de l'ordre de -30%.

La quatrième phase de notre travail a consisté à tester notre modèle sur un système d'assainissement constitué de bassins en série et parallèle. Nous avons négligé les transports en conduites et avons testé différentes approches de calculs dont l'évaluation a été construite par comparaison des résultats obtenus avec ceux de Gumbel. Il ressort de ce test que notre outil de dimensionnement donne de bons résultats quelle que soit l'approche utilisée : "*seul le ou les bassin(s) directement drainé(s) par l'ouvrage et soumis à une même pluie participe(nt) au calcul de la durée de la pluie de projet*" ou "*l'ensemble des bassins à amont à l'ouvrage participe au calcul de la durée de la pluie de projet*" ou "*à chaque bassin directement drainé par l'ouvrage participe, est associée une pluie de projet*". Ces approches nous ont donc permis de constater la robustesse de notre outil de dimensionnement pour un site donné.

Notre travail apporte ainsi certaines réponses quant aux difficultés rencontrées par les maîtres d'œuvre et d'ouvrage dans l'application des recommandations du [CERTU, 2003] et dessine une première piste de solution quant au remplacement des méthodes des pluies et des volumes par l'élaboration d'une méthode de pré dimensionnement fiable (le dimensionnement réel serait idéalement construit sur la base de modèles complets hydrauliques et hydrologiques et de séries de pluies chronologiques avec prise en compte des périodes de temps sec).

Perspectives

Notre travail de recherche est une opportunité de plus offerte à la résolution de certaines questions liées au dimensionnement. Il a permis d'une part de montrer que les méthodes de dimensionnement actuelles pouvaient conduire à des sousdimensionnements ou surdimensionnements importants des ouvrages hydrauliques. D'autre part, il a montré que l'utilisation du concept de pluie de projet simple triangle dans l'étude du dimensionnement des ouvrages de stockage des eaux pluviales est pertinente puisque les écarts obtenus entre notre outil de dimensionnement et la méthode de référence de Gumbel sont faibles.

Bien que les résultats que nous avons obtenus dans notre travail de recherche soient intéressants, il reste qu'ils ne sont valables et pertinents que pour notre site d'étude (GERLAND-Lyon). Il est donc nécessaire de développer les perspectives suivantes :

- ✓ Nous avons considéré, dans notre étude, des ouvrages à débit de fuite unique et constant comme dans l'Instruction Technique 77. Or souvent le débit de fuite est variable (ajutage pas exemple) et les ouvrages peuvent comporter plusieurs exutoires. Il est donc nécessaire de mener une étude de dimensionnement sur des ouvrages à débits de fuite variables et multiples.

- ✓ L'acquisition d'un plus grand nombre de données pluviométriques sur une plus longue durée d'observation garantirait la représentativité de la pluie par rapport à la période de retour étudiée généralement prise à 10 ans ou 20 ans. Ainsi, pour une période de retour de 10 ans, il faudrait un minimum de 30 ans de données de pluies.

- ✓ Avant généralisation du modèle élaboré, il est nécessaire de vérifier son adéquation sur un certain nombre de sites au travers du territoire Français. En effet, rien ne permet d'affirmer que les valeurs des paramètres obtenues pour le modèle ne prennent pas implicitement en compte les caractéristiques de la pluviométrie locale.

- ✓ Nous avons utilisé comme référence les résultats obtenus pas la loi de Gumbel sur 16 ans de mesures pluviométriques. Mais les simulations que nous avons effectuées l'ont été en prenant chaque pluie sans considérer les périodes de temps sec (donc en prenant

l'hypothèse que l'ouvrage de rétention est vide au début de chaque pluie). Il conviendrait donc de vérifier le biais qui a été apporté par cette façon de faire.

Références bibliographiques

[AGENCE DE l'EAU Artois Picardie] : "Vers une nouvelle politique de l'aménagement urbain par temps de pluie", *pp1-55*.

[AIRES & al, 2003] : AIRES N., AHYERRE M., CHABANEL M., "Dimensionnement hydraulique d'ouvrages de dépollution : influence des modes de représentation de la pluie." *TSM N° 12 pp.9-19.*

[Annales du Bâtiment et des Travaux Publics, 1995] "Synthèse de trois années de progrès scientifiques et techniques dans la gestion urbaine des eaux pluviales" ; *Editions Eska, n°3, pp3-59.*

[BAILLARGEON, 2003] : **BAILLARGEON G., "**Statistique appliquée pour les sciences de la gestion et les sciences économiques." *Editions SMG, pp587 – 599*.

[BENOIST & al, 1994] : BENOIST D., TOURBIER Y., GERMAIN-TOURBIER S., "Plans d'expériences : Construction et Analyse."*Ed. Tec & Doc, 695 p*.

[BLANPAIN, 2005] : BLANPAIN O., "l'eau dans l'aménagement " *cours ; Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de Lille.*

[BLANPAIN, 2006] : **BLANPAIN O**.,"Gestion de l'eau en aménagement du territoire : Aspects réglementaires et opérationnels. Exemples de recherches opérationnelles en assainissement." *IAE Lille*.

[BOBEE & al, 1991]: BOBEE B; ASHKAR F., "The Gamma Family and Derived Distributions Applied in Hydrology." *Water Ressource Publications, Colorado, USA, 205pp*.

[BUISHAND, 1982]: **BUISHAND T.A.,** "Some methods for testing the homogeneity of rainfall records." *J. Hydrol., 58: pp11-27.*

[BUISHAND, 1984]: BUISHAND T.A., "Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series" *J. Hydrol., 73: 51-69.*

[CABANE, 2001] : CABANE P.," Incertitudes associées à l'estimation des rejets de temps de pluie des Réseaux d'assainissement unitaires." ; *Thèse de Doctorat, L'INSA de Lyon, 343p + Annexes*.

[CHASTAN & al, 1995] : CHASTAN B., GILARD O., GIVONE P., OBERLIN G., "La prise en compte du risque d'inondation." *Ingénieries – EAT, N°2- juin 1995 – pp13-20*.

[CHOCAT & al., 1981a] : CHOCAT B., THIBAULT S., BOUYAT M. ; " Etude comparative des résultats fournis par la méthode de Caquot et le modèle du réservoir linéaire**" ;** *TSM l'eau ; n°7 ; pp 417-424 ; juillet 1981***.**

[CHOCAT & al., 1981b] : CHOCAT B., SEGUIN D., THIBAULT S. ; " Hydrologie urbaine et assainissement pluvial**" ;** *cours polycopié INSA-GCU ; INSA ; Lyon ; 198p.*

[CHOCAT, 1997] : CHOCAT B., "Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement." *Tec & Doc. Lavoisier, Paris, 1124 p.*

[CHOCAT, 2003] : CHOCAT B., "Comment utiliser le Guide « La Ville et son Assainissement ?" *URGC, INSA de Lyon pp53.*

[CHOCAT & al, 2006] : CHOCAT B., BARDIN., "Développement d'outils d'aide à la conception des systèmes d'assainissement pluviaux." *Abondement Envar BQT, 92P*.

[CERTU, 2003] "La ville et son assainissement : principe, méthodes et outils pour une meilleure intégration du cycle de l'eau", *CD Rom*.

[C.E.T.E du Sud-Ouest] "Constitution et Instruction des dossiers d'autorisation et de déclaration à la loi sur l'eau." *Missions et Délégation Inter-Services de l'eau des départements 11- 30 – 34 - 48 – 66*, *Fascicule I*,

[C.E.T.E du Sud-Ouest] "Guide méthodologique pour la prise en compte des eaux pluviales dans les projets d'aménagements**"** *Missions et Délégation Inter-Services de l'eau des départements 11- 30 – 34 - 48 – 66, Fascicule II* ; pp1-26.

[C.E.T.E du Sud-Ouest] "Les solutions compensatoires en assainissement pluvial**"** *Missions et Délégation Inter-Services de l'eau des départements 11- 30 – 34 - 48 – 66 ; Fascicule III ; 22p+Annexes.*

[CURRY, L.Jr] "Relationship of Rational and Unit Graph Methods in Retention basin design."; *U.S. Army Engineer District, p33-40.*

[DEBO & al, 1995]: DEBO T.N., REESE A.J., "Municipal Stormwater Management." *second edition Lewis Publishers, p207-361 et p605-680.*

[DESBORDES, 1974] : DESBORDES M., " Réflexions sur les méthodes de calculs des réseaux urbains d'assainissement pluvial." ; *Thèse Docteur ingénieur ; Uiniversité des Sciences et Techniques du Languedoc ; Montpellier ; 171p ; 1974.*

[DESBORDES, 1985] : DESBORDES M., " Bilan des études et recherche sur la pollution du ruissellement pluvial urbain dans les pays de l'Europe de l'ouest et de l'Amérique du Nord." ; *LHM 1985*.

[DESBORDES, 1987] : DESBORDES M., " Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain." ; *thèse doct. Etat : UST Languedoc, 412p.*

Directive Européenne n° 91/271 du 21/05/91 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires.

Directive Cadre du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

[EINFALT & al, 1998] : EINFALT T., ARNBJERG-NIELSEN K., FANKHAUSER R., RAUCH W., SCHILLING W., Van-Than-Van NGUYEN V-T-V., DESPOTOVIC J., "Use of historical rainfall series for hydrological modelling – workshop summary." *Wat Sci Tech, Vol 37, No 11, pp 1-6.*

[ENGELAND & al, 2004]: ENGELAND K., HISDAL H., GRIGESSI A., "Practical Extreme Value Modelling of Hydrological Floods and Droughts: A Case Study." *Cemagref, Extremes 7; pp5-30.*

[GAUME & al, 2000] : GAUME E., RAKEM Y., "Dimensionnement et évaluation des performances des bassins de stockage-dépollution des rejets urbains de temps de pluie : Analyse des caractéristiques « dimensionnantes » des pluies à l'aide d'un modèle stochastique de pluie." ; *Hydratec-Cérève, pp 33.*

[GUMBEL, 1963]: GUMBEL E.J., "Statistical forecast of droughts." *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol. 8(1), pp 5-23.*

[HUBERT W.C & al, 1998]: HUBERT W.C., and DICKINSON R.E "Stormwater management model's manual"; *Version 4; EPA/600/3-88/001a; Environment protection Agency, Athens*.

[Institute of Hydrology, 1980] "Low Flow studies" *Institute of Hydrology,Wallingforrd; Oxon, Ox10 8BB. In four volumes.*

[KAKMIER, 1982] : KAKMIER L.J., "Statistiques de la gestion : théorie et problèmes." *Mc Graw-Hill, Editeurs.*

[LANG, 2000] : LANG M.,"Analyse probabiliste des crues pour la prévention du risque d'inondation." ; *document de présentation pour une demande d'habilitation à diriger des recherches ; Université J. Fourrier.*

[LOGANATHAN & al, 1986]: LOGANATHAN G.V., MATTEJAT P., KUO C.Y and DISKIN M.H., "Frequency Analysis of Low Flows: Hypothetical Distribution Methods and a Physically Based Approach."; *Nordic Hydrology, 17, pp 126-150.*

Loi de la Décentralisation du 2 mars 1982 relative aux droits et libertés des communes, des départements et des régions

Loi sur L'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992 garantissant en France la gestion équilibrée des ressources en eau et promulguée sous le gouvernement de Cresson.

[PILGRIM & al, 1975]: PILGRIM D.H., CORDERY I., "Rainfall Temporal Patterns for Design Floods." *Journal of the Hydraulics Division,* p81-95.

[MADSEN & al, 1998]: MADSEN H., MIKKELSEN P.S., ROSBJERG D., HARREMOES P., "Estimation of regional intensity – duration- frequency curves for extreme precipitation." *Wat. Sci. Tech, Vol 37, No 11, pp 29-36.*

[MARGOUM & al, 1994] : MARGOUM M., OBERLIN G., LANG M., WEINGARTNER R., "Estimation des crues rares et extrêmes : Principes du modèle Agregee" *Hydrol. Continent. Vol.9. n°1. 85 – 100p.*

[MEYLAN & al, 1999] : MEYLAN P ; MUSY A., "Hydrologie générale: Analyse fréquentielle." ; *cours ; EPFL ; 1999.*

[MIQUEL & al, 1984] : MIQUEL J ; CHAMBOLLE T ; BERNIER J .,"Guide pratique d'estimation des probabilités de crues." ; *Ed Eyrolles, 159 p.*

[Ministères, 1977] : Ministère de l'Intérieur ; Ministère de l'Equipement ; Ministère de l'Agriculture ; Ministère de la Santé ; Ministère de la Qualité de la Vie ; "Instruction technique relative à l'assainissement des agglomérations." ;139p.

[Mission Inter-Service de l'Eau, 2004]., "Dossiers d'autorisation et de déclaration au titre de la loi sur l'eau." ; *Fascicule II ; Juin 2004.*

[MOURA, 2008] : **MOURA P**., "Méthode d'évaluation des performances des systèmes d'infiltration des eaux de ruissellement en milieu urbain." ; *thèse INSA de Lyon* ; *361p.*

[MUSY, 2003] : MUSY A., "Cours Hydrologie générale**." ;** *Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement (HYDRAM) Institut des sciences et Technologies de l'Environnement (ISTE) Ecole Polytechnique Fédérale (EPFL).*

[NOUGIER, 1991] : NOUGIER J.P., "Méthodes de calcul numérique." *3e Ed Masson.*

[OUARDA & al, 1999]: OUARDA T.B.M.J., LANG M; BOBEE B; BERNIER J; BOIS P., "Analysis of regional flood models utilized in France and Quebec." *Revue des Sciences de l'Eau, Rev . Sci. Eau 12/1 (1999) 155- 182p.*

[PATUREL, 1991] : PATUREL J-E., "Etude des phénomènes pluvieux à une échelle fine d'espace – Contribution à l'analyse du risque en Hydrologie Urbaine." ; *thèse INSA de Lyon, 266p.*

[PETIT, 1999] : PETIT L., "Etude de la qualité des données, pour la représentation des réseaux techniques urbains. Application au réseau d'assainissement." ; *thèse de doctorant, l'Université d'Artois-Béthunes, 164p+Annexes.*

[POLARSKI, 1989]: **POLARSKI M.,**"Fitting distributions to annual minimum flows of different durations." *In: Roald; Norsdeth, K. Hassel, K. A. (eds.), FRIENDS in Hydrology, vol. 187. IAHS Publication, pp. 97-104*.

[PROTON, 2008] : PROTON A.,"Etude hydraulique des tranchées de rétention/infiltration." *thèse de doctorat, INSA de Lyon, 290P.*

[REMENIERAS, 1976] : REMENIERAS G., "L'hydrologie de l'ingénieur." *Ed Eyrolles p98-163.*

[ROUX, 1996] : **ROUX C.,** "Analyse des précipitations en hydrologie urbaine exemple Seine Saint Dénis." ; *Thèse de doctorant ; l'ENPC, 291p*.

[SCHILLING, 1991]: SCHILLING W., "Rainfall data for urban hydrology: what do we need?" *Atmospheric Research, 27, PP 5-21.*

[SEMSAR, 1995] : SEMSAR YAZDI A.A., "Mise au point d'une méthodologie d'évaluation et de comparaison des modèles de simulation hydraulique des réseaux d'assainissement" *Thèse de doctorant, INSA de Lyon, 258p*.

[Séminaire interdisciplinaire, 2007] "Les scènes locales du risque : Gestion du risque d'inondation, démarches de hiérarchisation des risques et stratégies d'actions de prévention." ; *Université des Sciences et Technologies de lille, 25 Octobre 2007.*

[Service Technique des Bases Aériennes, 2000] "Eau et Aéroport : Conception et dimensionnement des réseaux de drainage des aérodromes." pp 57.

[Service Technique de l'Urbanisme, 1983] "Guide de construction des pluies de projet." *Rapport L.H.M. 97 p+Annexes*.

[STU, 1994] "Guide technique des bassins de retenue des eaux pluviales." *Ed. Tec & Doc, 271p*.

[TASSIN & al, 2004] : TASSIN B., MOUCHEL J-M., AIRES N., "Analyse à postériori de la conception et de l'entretien des bassins de retenue d'eau pluviale dans la région Ile-de-France" *Novatech, 2004, CD Rom.*

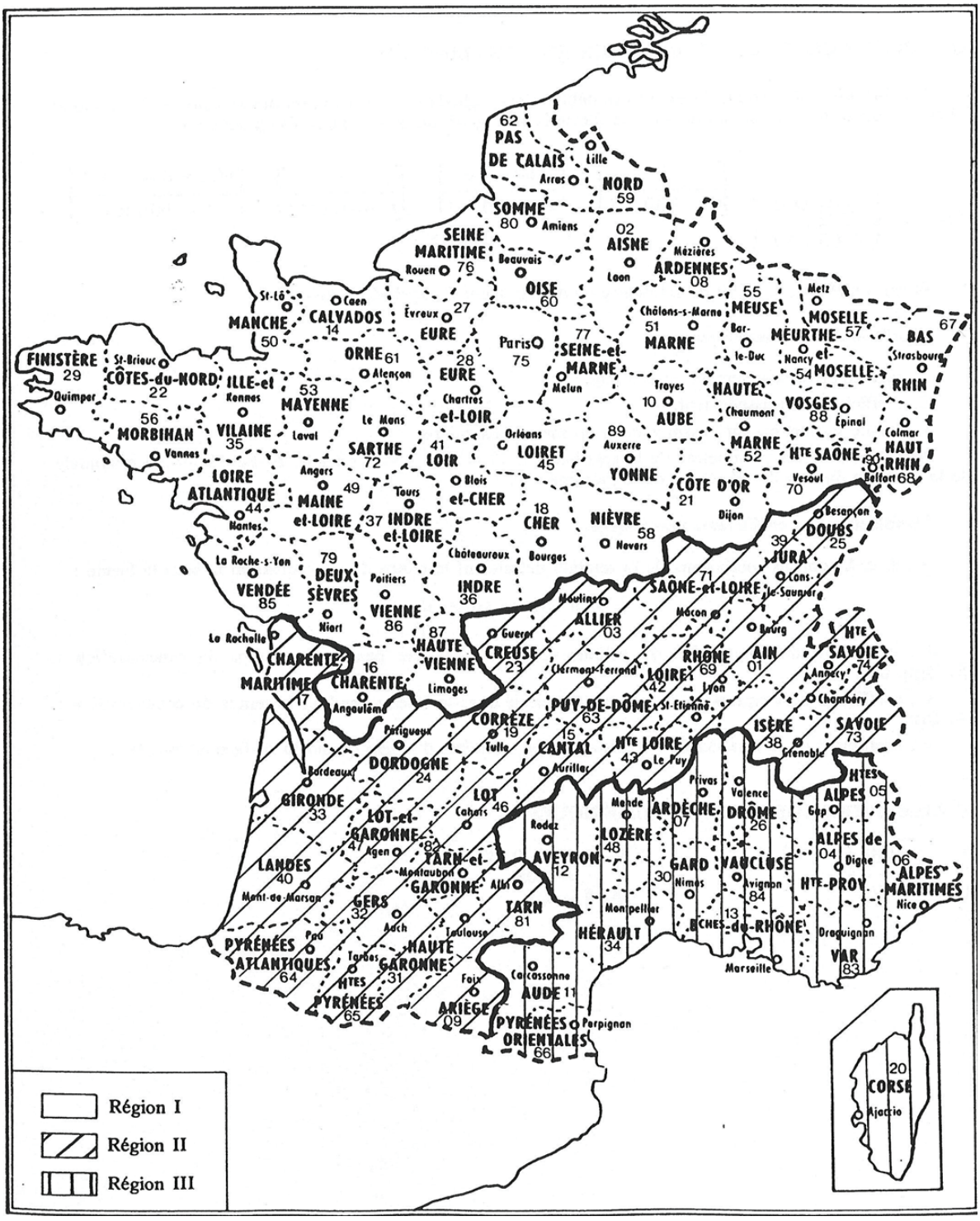
[VALACHE, 1999] : VALACHE M., "Entreprise et risques de crues à Paris et en Petite Couronne." ; *Rapport de la Commission de l'Aménagement Régional, de l'Environnement du Tourisme et des Transports ; pp 64+ Annexes*.

[World Meteorological Organization, 1989] "Statistical Distributions for Flood Frequency Analysis.";*Operation hydrology report n°33, 73p+Appendix*.

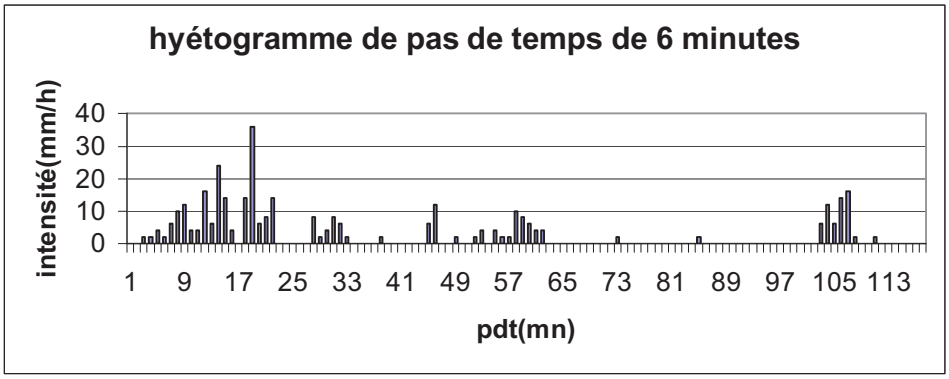
[XIA, 2005] : XIA Z., "Etude phénomélogique pour des méthodes de dimensionnement d'ouvrages d'assainissement en fonction du risque de dysfonctionnement hydraulique." ; *thèse de doctorant, l'Université de Lille1, 152p.*

[YEN, 1980]: YEN B., CHOW V.T., "Design hyetographs for small drainage structure." *ASCE Journal of the Hydraulics Dividion, 106 (HY6), 1055-1076.*

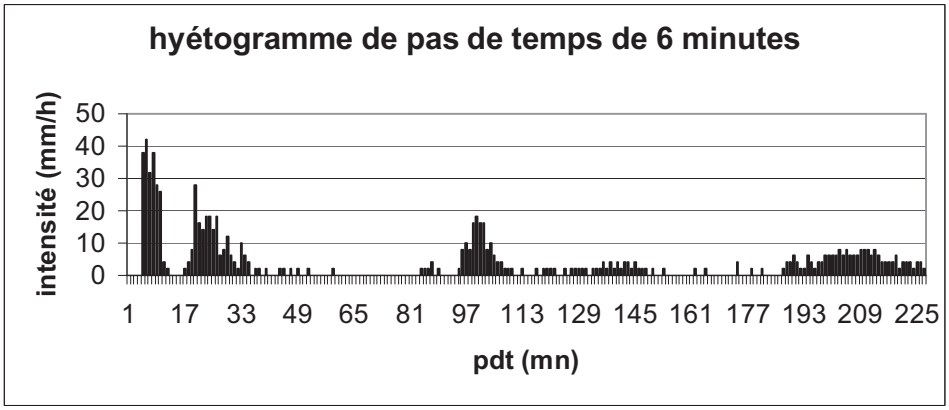
ANNEXE A – Délimitation des régions de pluviométrie homogène (source : Instruction technique de 1977)



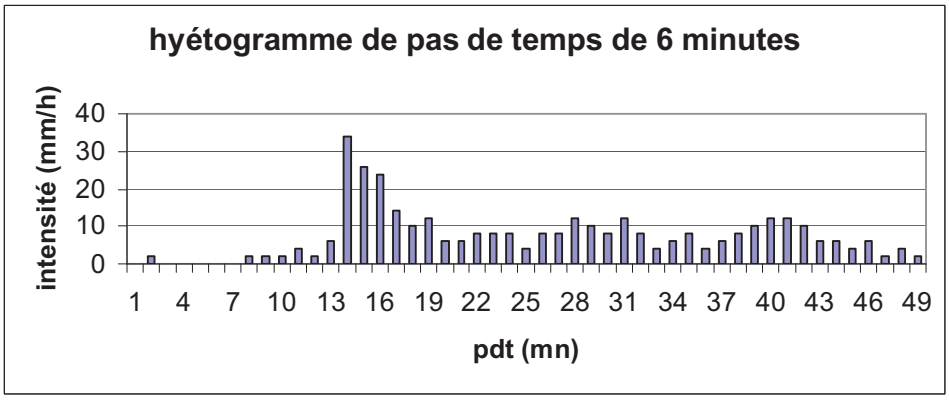
ANNEXE B – Présentation de quelques hyétogrammes remarquables



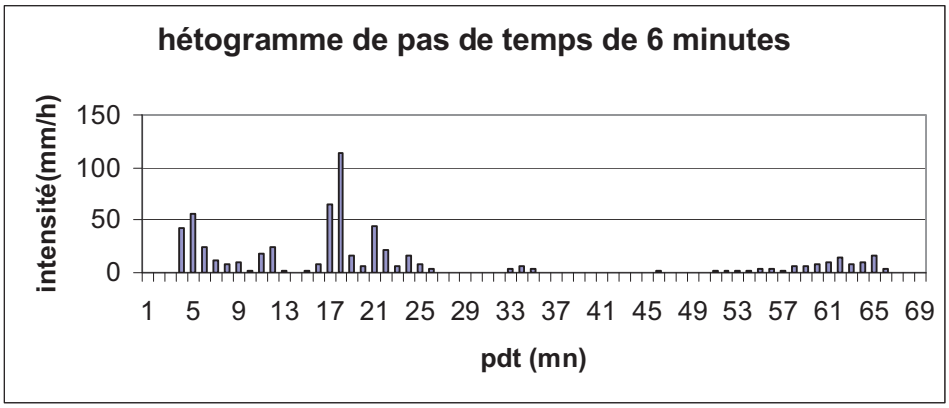
ANNEXE B.1 hyétogramme du 20/10/2001



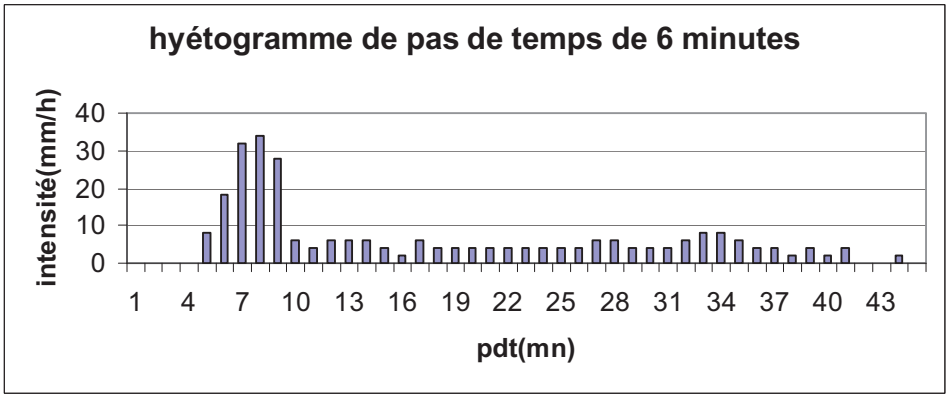
ANNEXE B.2 hyétogramme du 14/07/2001



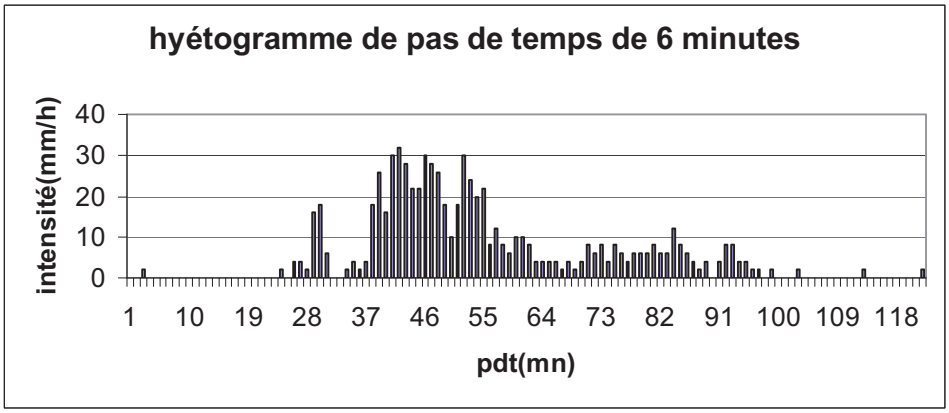
ANNEXE B.3 hyétogramme du 23/11/2000



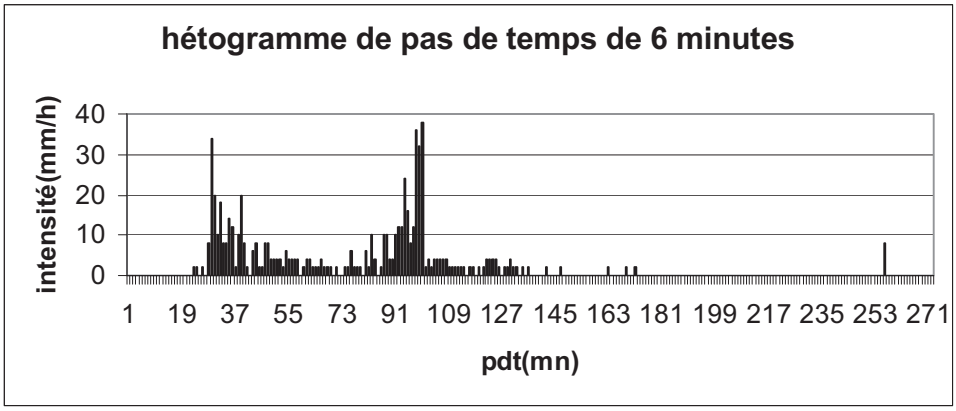
ANNEXE B.4 hyétogramme du 10/06/2000



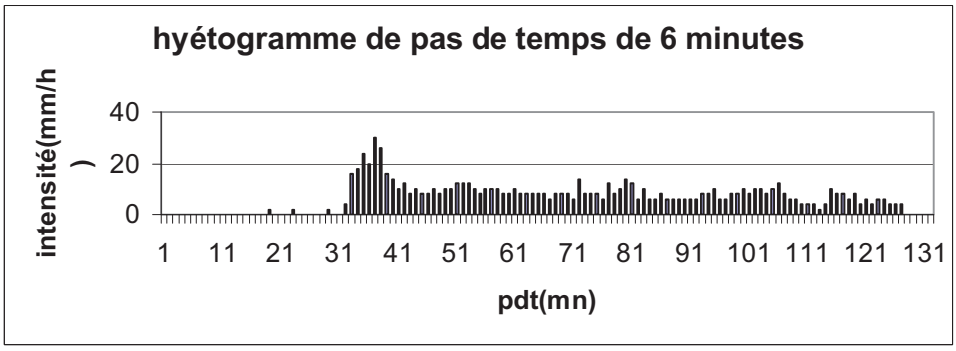
ANNEXE B.5 hyétogramme du 16/04/2000



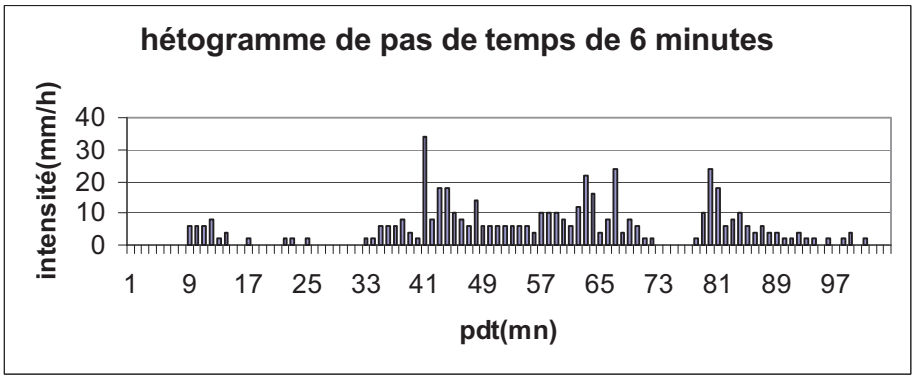
ANNEXE B.6 hyétogramme du 22/10/1999



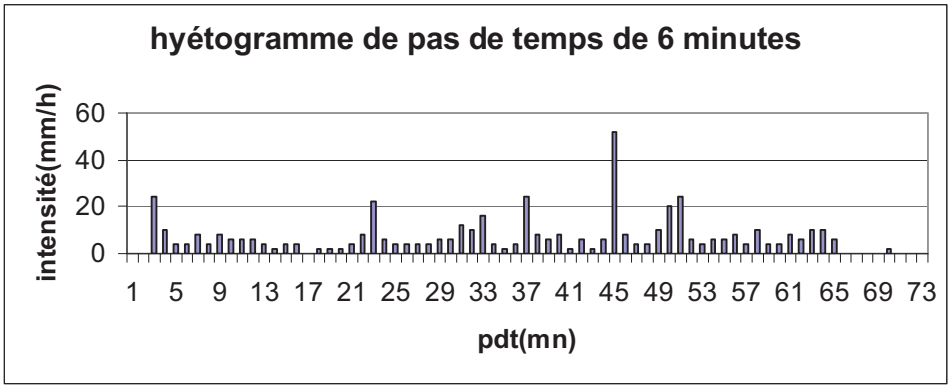
ANNEXE B.7 hyétogramme du 21/06/1997



ANNEXE B.8 hyétogramme du 12/11/1996



ANNEXE B.9 hyétogramme du 18/05/1996



ANNEXE B.10 hyétogramme du 22/09/1992

ANNEXE C - Présentation des simulations non réussies sous la pluie de projet rectangle

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	240	318	378	438
Volumes résultants	5,7	7,7	9,8	11,6
Volumes Gumbel Vi	6	8,2	10,7	12,4

Tableau C. 1 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°5.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	246	318	540	600
Volumes résultants	11,1	15,1	19,2	22,5
Volumes Gumbel Vi	11	15,1	19,6	22,9

Tableau B. 2 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°6.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	156	210	252	288
Volumes résultants	41,5	57,4	75,9	90,5
Volumes Gumbel Vi	47	65,8	86,9	102

Tableau C. 3 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°9.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	282	378	534	600
Volumes résultants	307,4	418,4	544,6	628,8
Volumes Gumbel Vi	306,5	417,5	542,5	631,6

Tableau C.4 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°12.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	264	354	366	462
Volumes résultants	5077,4	7234,8	9163,9	10916,7
Volumes Gumbel Vi	5325	7546,7	10046,3	11829,8

Tableau C. 5 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°21.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	252	330	558	600
Volumes résultants	10402,9	14472,4	18547,2	21840,4
Volumes Gumbel Vi	10382,3	14471,5	19072,1	22354,8

Tableau C. 6: Simulation non réussie sur le bassin versant N°22.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	282	396	528	600
Volumes résultants	22685,1	31254,5	40639,4	47266,8
Volumes Gumbel Vi	22614	31080,8	40606,4	47403,3

Tableau C. 7: Simulation non réussie sur le bassin versant N°23.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	270	354	414	474
Volumes résultants	12179,7	17077,3	22412,2	26737,1
Volumes Gumbel Vi	12729,5	18284,6	24534,4	28993,9

Tableau C.8 : Simulation non réussie sur le bassin versant N°25.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	252	420	564	600
Volumes résultants	25435,3	35669,2	45863,1	54067,3
Volumes Gumbel Vi	25361,8	35618,3	47157,5	55391,1

Tableau C. 9: Simulation non réussie sur le bassin versant N°26.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	282	396	534	600
Volumes résultants	56006,7	77431,4	101319,6	117463,4
Volumes Gumbel Vi	55986	77134,8	100928,5	117906,1

Tableau C. 10: Simulation non réussie sur le bassin versant N°27.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	228	294	336	372
Volumes résultants	9845	16886,6	25 249	32132,5
Volumes Gumbel Vi	12048,8	20938,9	30940,8	38077,5

Tableau C. 11: Simulation non réussie sur le bassin versant N°29.

Période de retour	1	2	5	10
Durée de pluie D en	288	396	534	600
Volumes résultants	152024,1	206818,4	269385,5	311494,6
Volumes Gumbel Vi	151180,1	206630,1	269014,8	313528,4

Tableau C. 12: **Simulation non réussie sur le bassin versant N°32.**

ANNEXE D – Présentation des 144 essais

Essais	Durées mesurées D_i(mn)	S_i(ha)	C_i(%)	I_i(m/m)	M_i(m)	Qad_i(l/s/h)	T_i(an)
1	234	0,01	30	0,001	1	1	1
2	222	0,01	50	0,005	2	2	1
3	216	0,01	70	0,01	3	3	1
4	216	0,01	90	0,02	4	4	1
5	180	0,1	30	0,02	2	3	1
6	186	0,1	50	0,01	1	4	1
7	288	0,1	70	0,005	4	1	1
8	252	0,1	90	0,001	3	2	1
9	138	1	30	0,005	3	4	1
10	192	1	50	0,001	4	3	1
11	240	1	70	0,02	1	2	1
12	282	1	90	0,01	2	1	1
13	186	10	30	0,01	4	2	1
14	258	10	50	0,02	3	1	1
15	198	10	70	0,001	2	4	1
16	234	10	90	0,005	1	3	1
17	240	50	30	0,001	1	1	1
18	222	50	50	0,005	2	2	1
19	216	50	70	0,01	3	3	1
20	216	50	90	0,02	4	4	1
21	162	100	30	0,02	2	3	1
22	180	100	50	0,01	1	4	1
23	276	100	70	0,005	4	1	1
24	264	100	90	0,001	3	2	1
25	168	250	30	0,02	3	3	1

26	174	250	50	0,01	4	4	1
27	276	250	70	0,005	1	1	1
28	264	250	90	0,001	2	2	1
29	162	500	30	0,005	4	4	1
30	228	500	50	0,001	3	3	1
31	240	500	70	0,02	2	2	1
32	282	500	90	0,01	1	1	1
33	210	1000	30	0,01	1	2	1
34	264	1000	50	0,02	2	1	1
35	222	1000	70	0,001	3	4	1
36	234	1000	90	0,005	4	3	1
37	336	0,01	30	0,001	1	1	2
38	324	0,01	50	0,005	2	2	2
39	318	0,01	70	0,01	3	3	2
40	318	0,01	90	0,02	4	4	2
41	270	0,1	30	0,02	2	3	2
42	276	0,1	50	0,01	1	4	2
43	384	0,1	70	0,005	4	1	2
44	360	0,1	90	0,001	3	2	2
45	198	1	30	0,005	3	4	2
46	276	1	50	0,001	4	3	2
47	348	1	70	0,02	1	2	2
48	390	1	90	0,01	2	1	2
49	264	10	30	0,01	4	2	2
50	366	10	50	0,02	3	1	2
51	282	10	70	0,001	2	4	2
52	336	10	90	0,005	1	3	2
53	336	50	30	0,001	1	1	2

54	318	50	50	0,005	2	2	2
55	312	50	70	0,01	3	3	2
56	306	50	90	0,02	4	4	2
57	234	100	30	0,02	2	3	2
58	252	100	50	0,01	1	4	2
59	384	100	70	0,005	4	1	2
60	366	100	90	0,001	3	2	2
61	234	250	30	0,02	3	3	2
62	252	250	50	0,01	4	4	2
63	384	250	70	0,005	1	1	2
64	372	250	90	0,001	2	2	2
65	234	500	30	0,005	4	4	2
66	318	500	50	0,001	3	3	2
67	342	500	70	0,02	2	2	2
68	390	500	90	0,01	1	1	2
69	294	1000	30	0,01	1	2	2
70	372	1000	50	0,02	2	1	2
71	312	1000	70	0,001	3	4	2
72	336	1000	90	0,005	4	3	2
73	462	0,01	30	0,001	1	1	5
74	450	0,01	50	0,005	2	2	5
75	444	0,01	70	0,01	3	3	5
76	438	0,01	90	0,02	4	4	5
77	390	0,1	30	0,02	2	3	5
78	384	0,1	50	0,01	1	4	5
79	516	0,1	70	0,005	4	1	5
80	492	0,1	90	0,001	3	2	5
81	270	1	30	0,005	3	4	5

82	378	1	50	0,001	4	3	5
83	474	1	70	0,02	1	2	5
84	528	1	90	0,01	2	1	5
85	366	10	30	0,01	4	2	5
86	498	10	50	0,02	3	1	5
87	384	10	70	0,001	2	4	5
88	462	10	90	0,005	1	3	5
89	456	50	30	0,001	1	1	5
90	438	50	50	0,005	2	2	5
91	432	50	70	0,01	3	3	5
92	426	50	90	0,02	4	4	5
93	318	100	30	0,02	2	3	5
94	354	100	50	0,01	1	4	5
95	516	100	70	0,005	4	1	5
96	492	100	90	0,001	3	2	5
97	312	250	30	0,02	3	3	5
98	348	250	50	0,01	4	4	5
99	516	250	70	0,005	1	1	5
100	492	250	90	0,001	2	2	5
101	288	500	30	0,005	4	4	5
102	414	500	50	0,001	3	3	5
103	468	500	70	0,02	2	2	5
104	528	500	90	0,01	1	1	5
105	384	1000	30	0,01	1	2	5
106	498	1000	50	0,02	2	1	5
107	408	1000	70	0,001	3	4	5
108	456	1000	90	0,005	4	3	5
109	534	0,01	30	0,001	1	1	10

110	516	0,01	50	0,005	2	2	10
111	510	0,01	70	0,01	3	3	10
112	504	0,01	90	0,02	4	4	10
113	420	0,1	30	0,02	2	3	10
114	426	0,1	50	0,01	1	4	10
115	594	0,1	70	0,005	4	1	10
116	570	0,1	90	0,001	3	2	10
117	288	1	30	0,005	3	4	10
118	432	1	50	0,001	4	3	10
119	552	1	70	0,02	1	2	10
120	606	1	90	0,01	2	1	10
121	414	10	30	0,01	4	2	10
122	576	10	50	0,02	3	1	10
123	444	10	70	0,001	2	4	10
124	534	10	90	0,005	1	3	10
125	528	50	30	0,001	1	1	10
126	504	50	50	0,005	2	2	10
127	492	50	70	0,01	3	3	10
128	492	50	90	0,02	4	4	10
129	354	100	30	0,02	2	3	10
130	402	100	50	0,01	1	4	10
131	594	100	70	0,005	4	1	10
132	564	100	90	0,001	3	2	10
133	348	250	30	0,02	3	3	10
134	396	250	50	0,01	4	4	10
135	594	250	70	0,005	1	1	10
136	564	250	90	0,001	2	2	10
137	306	500	30	0,005	4	4	10

138	462	500	50	0,001	3	3	10
139	546	500	70	0,02	2	2	10
140	606	500	90	0,01	1	1	10
141	432	1000	30	0,01	1	2	10
142	570	1000	50	0,02	2	1	10
143	462	1000	70	0,001	3	4	10
144	528	1000	90	0,005	4	3	10

ANNEXE E – Calculs de l'analyse de variance

E_{RES}	CE_{RES}	E_{Total}	CE_{Total}	E_{expl}	CE_{expl}	$(Si-\hat{s})^2$	$(Ci-\hat{c})^2$	$(Ii-\hat{i})^2$	$(Mi-m)^2$	$(Qad-\varphi)^2$	$(Ti-t)^2$
-43,51	1,9E+0	-131	1,7E+04	-87,49	7,7E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,3E+07	2,25	12,25
-49,35	2,4E+0	-143	2,0E+04	-93,65	8,8E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,3E+07	0,25	12,25
-49,11	2,4E+0	-149	2,2E+04	-99,89	1,0E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	0,25	12,25
-42,49	1,8E+0	-149	2,2E+04	-106,51	1,1E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,3E+07	2,25	12,25
-19,13	3,7E+0	-185	3,4E+04	-165,87	2,8E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,2E+07	0,25	12,25
-8,03	6,4E+0	-179	3,2E+04	-170,97	2,9E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	2,25	12,25
-54,40	3,0E+0	-77	5,9E+03	-22,60	5,1E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,2E+07	2,25	12,25
-84,85	7,2E+0	-113	1,3E+04	-28,15	7,9E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,2E+07	0,25	12,25
-23,73	5,6E+0	-227	5,2E+04	-203,27	4,1E+0	4,5E+0	900	1E-5	1,0E+07	2,25	12,25
-41,09	1,7E+0	-173	3,0E+04	-131,91	1,7E+0	4,5E+0	100	6E-5	9,2E+06	0,25	12,25
-62,82	3,9E+0	-125	1,6E+04	-62,18	3,9E+0	4,5E+0	100	1E-4	1,2E+07	0,25	12,25
-92,62	8,6E+0	-83	6,9E+03	9,62	9,3E+0	4,5E+0	900	1E-6	1,1E+07	2,25	12,25
-52,12	2,7E+0	-179	3,2E+04	-126,88	1,6E+0	4,1E+0	900	1E-6	3,3E+06	0,25	12,25
-50,53	2,6E+0	-107	1,1E+04	-56,47	3,2E+0	4,1E+0	100	1E-4	5,1E+06	2,25	12,25
-29,24	8,5E+0	-167	2,8E+04	-137,76	1,9E+0	4,1E+0	100	6E-5	7,3E+06	2,25	12,25
-64,10	4,1E+0	-131	1,7E+04	-66,90	4,5E+0	4,1E+0	900	1E-5	9,9E+06	0,25	12,25
-37,72	1,4E+0	-125	1,6E+04	-87,28	7,6E+0	2,6E+0	900	6E-5	6,7E+06	2,25	12,25
-49,38	2,4E+0	-143	2,0E+04	-93,62	8,8E+0	2,6E+0	100	1E-5	2,5E+06	0,25	12,25
-48,96	2,4E+0	-149	2,2E+04	-100,04	1,0E+0	2,6E+0	100	1E-6	3,5E+05	0,25	12,25
-42,17	1,8E+0	-149	2,2E+04	-106,83	1,1E+0	2,6E+0	900	1E-4	1,7E+05	2,25	12,25
-37,40	1,4E+0	-203	4,1E+04	-165,60	2,7E+0	1,3E+0	900	1E-4	5,8E+05	0,25	12,25
-14,55	2,1E+0	-185	3,4E+04	-170,45	2,9E+0	1,3E+0	100	1E-6	4,7E+06	2,25	12,25
-66,19	4,4E+0	-89	7,9E+03	-22,81	5,2E+0	1,3E+0	100	1E-5	4,3E+06	2,25	12,25
-72,88	5,3E+0	-101	1,0E+04	-28,12	7,9E+0	1,3E+0	900	6E-5	4,2E+05	0,25	12,25
-32,26	1,0E+0	-197	3,9E+04	-164,74	2,7E+0	1,4E+0	900	1E-4	7,7E+05	0,25	12,25
-21,55	4,6E+0	-191	3,6E+04	-169,45	2,9E+0	1,4E+0	100	1E-6	1,8E+06	2,25	12,25
-66,75	4,5E+0	-89	7,9E+03	-22,25	5,0E+0	1,4E+0	100	1E-5	2,9E+07	2,25	12,25
-73,59	5,4E+0	-101	1,0E+04	-27,41	7,5E+0	1,4E+0	900	6E-5	9,7E+06	0,25	12,25
-1,94	3,8E+0	-203	4,1E+04	-201,06	4,0E+0	8,3E+0	900	1E-5	3,5E+07	2,25	12,25
-6,75	4,6E+0	-137	1,9E+04	-130,25	1,7E+0	8,3E+0	100	6E-5	8,2E+07	0,25	12,25
-66,11	4,4E+0	-125	1,6E+04	-58,89	3,5E+0	8,3E+0	100	1E-4	1,8E+05	0,25	12,25

-95,37	9,1E+0	-83	6,9E+03	12,37	1,5E+0	8,3E+0	900	1E-6	7,5E+06	2,25	12,25
-32,84	1,1E+0	-155	2,4E+04	-122,16	1,5E+0	6,2E+0	900	1E-6	2,0E+08	0,25	12,25
-49,97	2,5E+0	-101	1,0E+04	-51,03	2,6E+0	6,2E+0	100	1E-4	9,7E+07	2,25	12,25
-11,39	1,3E+0	-143	2,0E+04	-131,61	1,7E+0	6,2E+0	100	6E-5	2,9E+07	2,25	12,25
-70,98	5,0E+0	-131	1,7E+04	-60,02	3,6E+0	6,2E+0	900	1E-5	7,7E+05	0,25	12,25
31,09	9,7E+0	-29	8,4E+02	-60,09	3,6E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,3E+07	2,25	6,25
25,26	6,4E+0	-41	1,7E+03	-66,26	4,4E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,3E+07	0,25	6,25
25,49	6,5E+0	-47	2,2E+03	-72,49	5,3E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	0,25	6,25
32,11	1,0E+0	-47	2,2E+03	-79,11	6,3E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,3E+07	2,25	6,25
43,47	1,9E+0	-95	9,0E+03	-138,47	1,9E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,2E+07	0,25	6,25
54,57	3,0E+0	-89	7,9E+03	-143,57	2,1E+0	4,5E+0	100	1,-6	1,3E+07	2,25	6,25
14,20	2,0E+0	19	3,6E+02	4,80	2,3E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,2E+07	2,25	6,25
-4,25	1,8E+0	-5	2,5E+01	-0,75	5,7E-01	4,5E+0	900	6E-5	1,2E+07	0,25	6,25
8,87	7,9E+0	-167	2,8E+04	-175,87	3,1E+0	4,5E+0	900	1E-5	1,0E+07	2,25	6,25
15,51	2,4E+0	-89	7,9E+03	-104,51	1,1E+0	4,5E+0	100	6E-5	9,2E+06	0,25	6,25
17,78	3,2E+0	-17	2,9E+02	-34,78	1,2E+0	4,5E+0	100	1E-4	1,2E+07	0,25	6,25
-12,02	1,4E+0	25	6,3E+02	37,02	1,4E+0	4,5E+0	900	1E-6	1,1E+07	2,25	6,25
-1,52	2,3E+0	-101	1,0E+04	-99,48	9,9E+0	4,1E+0	900	1E-6	3,3E+06	0,25	6,25
30,07	9,0E+0	1	1,0E+00	-29,07	8,5E+0	4,1E+0	100	1E-4	5,1E+06	2,25	6,25
27,36	7,5E+0	-83	6,9E+03	-110,36	1,2E+0	4,1E+0	100	6E-5	7,3E+06	2,25	6,25
10,50	1,1E+0	-29	8,4E+02	-39,50	1,6E+0	4,1E+0	900	1E-5	9,9E+06	0,25	6,25
30,89	9,5E+0	-29	8,4E+02	-59,89	3,6E+0	2,6E+0	900	6E-5	6,7E+06	2,25	6,25
19,23	3,7E+0	-47	2,2E+03	-66,23	4,4E+0	2,6E+0	100	1E-5	2,5E+06	0,25	6,25
19,64	3,9E+0	-53	2,8E+03	-72,64	5,3E+0	2,6E+0	100	1E-6	3,5E+05	0,25	6,25
20,43	4,2E+0	-59	3,5E+03	-79,43	6,3E+0	2,6E+0	900	1E-4	1,7E+05	2,25	6,25
7,20	5,2E+0	-131	1,7E+04	-138,20	1,9E+0	1,3E+0	900	1E-4	5,8E+05	0,25	6,25
30,05	9,0E+0	-113	1,3E+04	-143,05	2,0E+0	1,3E+0	100	1E-6	4,7E+06	2,25	6,25
14,42	2,1E+0	19	3,6E+02	4,58	2,1E+0	1,3E+0	100	1E-5	4,3E+06	2,25	6,25
1,72	3,0E+0	1	1,0E+00	-0,72	5,2E-01	1,3E+0	900	6E-5	4,2E+05	0,25	6,25
6,34	4,0E+0	-131	1,7E+04	-137,34	1,9E+0	1,4E+0	900	1E-4	7,7E+05	0,25	6,25
29,05	8,4E+0	-113	1,3E+04	-142,05	2,0E+0	1,4E+0	100	1E-6	1,8E+06	2,25	6,25
13,85	1,9E+0	19	3,6E+02	5,15	2,6E+0	1,4E+0	100	1E-5	2,9E+07	2,25	6,25
7,01	4,9E+0	7	-4,9E+01	-0,01	1,4E-04	1,4E+0	900	6E-5	9,7E+06	0,25	6,25
42,66	1,8E+0	-131	-1,8E+03	-173,66	3,0E+0	8,3E+0	900	1E-5	3,5E+07	2,25	6,25
55,85	3,1E+0	-47	-3,1E+03	-102,85	1,1E+0	8,3E+0	100	6E-5	8,2E+07	0,25	6,25

8,50	7,2E+0	-23	-7,2E+01	-31,50	9,9E+0	8,3E+0	100	1E-4	1,8E+05	0,25	6,25
-14,77	2,2E+0	25	-2,2E+02	39,77	1,6E+0	8,3E+0	900	1E-6	7,5E+06	2,25	6,25
23,77	5,6E+0	-71	-5,6E+02	-94,77	9,0E+0	6,2E+0	900	1E-6	2,0E+08	0,25	6,25
30,64	9,4E+0	7	-9,4E+02	-23,64	5,6E+0	6,2E+0	100	1E-4	9,7E+07	2,25	6,25
51,21	2,6E+0	-53	-2,6E+03	-104,21	1,1E+0	6,2E+0	100	6E-5	2,9E+07	2,25	6,25
3,63	1,3E+0	-29	-1,3E+01	-32,63	1,1E+0	6,2E+0	900	1E-5	7,7E+05	0,25	6,25
74,90	5,6E+0	97	-5,6E+03	22,10	4,9E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,3E+07	2,25	0,25
69,06	4,8E+0	85	-4,8E+03	15,94	2,5E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,3E+07	0,25	0,25
69,30	4,8E+0	79	-4,8E+03	9,70	9,4E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	0,25	0,25
69,91	4,9E+0	73	-4,9E+03	3,09	9,5E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,3E+07	2,25	0,25
81,28	6,6E+0	25	-6,6E+03	-56,28	3,2E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,2E+07	0,25	0,25
80,38	6,5E+0	19	-6,5E+03	-61,38	3,8E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	2,25	0,25
64,01	4,1E+0	151	-4,1E+03	86,99	7,6E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,2E+07	2,25	0,25
45,56	2,1E+0	127	-2,1E+03	81,44	6,6E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,2E+07	0,25	0,25
-1,32	1,8E+0	-95	-1,8E+00	-93,68	8,8E+0	4,5E+0	900	1E-5	1,0E+07	2,25	0,25
35,32	1,2E+0	13	-1,2E+03	-22,32	5,0E+0	4,5E+0	100	6E-5	9,2E+06	0,25	0,25
61,59	3,8E+0	109	-3,8E+03	47,41	2,2E+0	4,5E+0	100	1E-4	1,2E+07	0,25	0,25
43,78	1,9E+0	163	-1,9E+03	119,22	1,4E+0	4,5E+0	900	1E-6	1,1E+07	2,25	0,25
18,29	3,3E+0	1	-3,3E+02	-17,29	3,0E+0	4,1E+0	900	1E-6	3,3E+06	0,25	0,25
79,88	6,4E+0	133	-6,4E+03	53,12	2,8E+0	4,1E+0	100	1E-4	5,1E+06	2,25	0,25
47,17	2,2E+0	19	-2,2E+03	-28,17	7,9E+0	4,1E+0	100	6E-5	7,3E+06	2,25	0,25
54,31	2,9E+0	97	-2,9E+03	42,69	1,8E+0	4,1E+0	900	1E-5	9,9E+06	0,25	0,25
68,69	4,7E+0	91	-4,7E+03	22,31	5,0E+0	2,6E+0	900	6E-5	6,7E+06	2,25	0,25
57,03	3,3E+0	73	-3,3E+03	15,97	2,5E+0	2,6E+0	100	1E-5	2,5E+06	0,25	0,25
57,45	3,3E+0	67	-3,3E+03	9,55	9,1E+0	2,6E+0	100	1E-6	3,5E+05	0,25	0,25
58,24	3,4E+0	61	-3,4E+03	2,76	7,6E+0	2,6E+0	900	1E-4	1,7E+05	2,25	0,25
9,00	8,1E+0	-47	-8,1E+01	-56,00	3,1E+0	1,3E+0	900	1E-4	5,8E+05	0,25	0,25
49,86	2,5E+0	-11	-2,5E+03	-60,86	3,7E+0	1,3E+0	100	1E-6	4,7E+06	2,25	0,25
64,22	4,1E+0	151	-4,1E+03	86,78	7,5E+0	1,3E+0	100	1E-5	4,3E+06	2,25	0,25
45,53	2,1E+0	127	-2,1E+03	81,47	6,6E+0	1,3E+0	900	6E-5	4,2E+05	0,25	0,25
2,15	4,6E+0	-53	-4,6E+00	-55,15	3,0E+0	1,4E+0	900	1E-4	7,7E+05	0,25	0,25
42,85	1,8E+0	-17	-1,8E+03	-59,85	3,6E+0	1,4E+0	100	1E-6	1,8E+06	2,25	0,25
63,66	4,1E+0	151	-4,1E+03	87,34	7,6E+0	1,4E+0	100	1E-5	2,9E+07	2,25	0,25
44,82	2,0E+0	127	-2,0E+03	82,18	6,8E+0	1,4E+0	900	6E-5	9,7E+06	0,25	0,25
14,47	2,1E+0	-77	-2,1E+02	-91,47	8,4E+0	8,3E+0	900	1E-5	3,5E+07	2,25	0,25

69,65	4,9E+0	49	-4,9E+03	-20,65	4,3E+0	8,3E+0	100	6E-5	8,2E+07	0,25	0,25
52,30	2,7E+0	103	-2,7E+03	50,70	2,6E+0	8,3E+0	100	1E-4	1,8E+05	0,25	0,25
41,04	1,7E+0	163	-1,7E+03	121,96	1,5E+0	8,3E+0	900	1E-6	7,5E+06	2,25	0,25
31,57	1,0E+0	19	-1,0E+03	-12,57	1,6E+0	6,2E+0	900	1E-6	2,0E+08	0,25	0,25
74,44	5,5E+0	133	-5,5E+03	58,56	3,4E+0	6,2E+0	100	1E-4	9,7E+07	2,25	0,25
65,01	4,2E+0	43	-4,2E+03	-22,01	4,8E+0	6,2E+0	100	6E-5	2,9E+07	2,25	0,25
41,43	1,7E+0	91	-1,7E+03	49,57	2,5E+0	6,2E+0	900	1E-5	7,7E+05	0,25	0,25
9,91	9,8E+0	169	-9,8E+01	159,09	2,5E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,3E+07	2,25	30,25
-1,93	3,7E+0	151	-3,7E+00	152,93	2,3E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,3E+07	0,25	30,25
-1,69	2,9E+0	145	-2,9E+00	146,69	2,2E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	0,25	30,25
-1,08	1,2E+0	139	-1,2E+00	140,08	2,0E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,3E+07	2,25	30,25
-25,71	6,6E+0	55	-6,6E+02	80,71	6,5E+0	4,5E+0	900	1E-4	1,2E+07	0,25	30,25
-14,61	2,1E+0	61	-2,1E+02	75,61	5,7E+0	4,5E+0	100	1E-6	1,3E+07	2,25	30,25
5,02	2,5E+0	229	-2,5E+01	223,98	5,0E+0	4,5E+0	100	1E-5	1,2E+07	2,25	30,25
-13,43	1,8E+0	205	-1,8E+02	218,43	4,8E+0	4,5E+0	900	6E-5	1,2E+07	0,25	30,25

-13,43	1,8E+0	205	-	218,43	4,8E+0	4,5E+0	900	6,4E-05	1,2E+0	0,25	30,25
-	1,4E+0	-77	-	43,31	1,9E+0	4,5E+0	900	1,6E-05	1,0E+0	2,25	30,25
-47,67	2,3E+0	67	-	114,67	1,3E+0	4,5E+0	100	6,4E-05	9,2E+0	0,25	30,25
2,60	6,8E+0	187	-	184,40	3,4E+0	4,5E+0	100	1,2E-04	1,2E+0	0,25	30,25
-15,21	2,3E+0	241	-	256,21	6,6E+0	4,5E+0	900	1,0E-06	1,1E+0	2,25	30,25
-70,70	5,0E+0	49	-	119,70	1,4E+0	4,1E+0	900	1,0E-06	3,3E+0	0,25	30,25
20,89	4,4E+0	211	-	190,11	3,6E+0	4,1E+0	100	1,2E-04	5,1E+0	2,25	30,25
-29,82	8,9E+0	79	-	108,82	1,2E+0	4,1E+0	100	6,4E-05	7,3E+0	2,25	30,25
-10,68	1,1E+0	169	-	179,68	3,2E+0	4,1E+0	900	1,6E-05	9,9E+0	0,25	30,25
3,70	1,4E+0	163	-	159,30	2,5E+0	2,6E+0	900	6,4E-05	6,7E+0	2,25	30,25
-13,96	1,9E+0	139	-	152,96	2,3E+0	2,6E+0	100	1,6E-05	2,5E+0	0,25	30,25
-19,54	3,8E+0	127	-	146,54	2,1E+0	2,6E+0	100	1,0E-06	3,5E+0	0,25	30,25
-12,75	1,6E+0	127	-	139,75	2,0E+0	2,6E+0	900	1,2E-04	1,7E+0	2,25	30,25
-91,99	8,5E+0	-11	-	80,99	6,6E+0	1,3E+0	900	1,2E-04	5,8E+0	0,25	30,25
-39,13	1,5E+0	37	-	76,13	5,8E+0	1,3E+0	100	1,0E-06	4,7E+0	2,25	30,25
5,23	2,7E+0	229	-	223,77	5,0E+0	1,3E+0	100	1,6E-05	4,3E+0	2,25	30,25
-19,46	3,8E+0	199	-	218,46	4,8E+0	1,3E+0	900	6,4E-05	4,2E+0	0,25	30,25
-98,84	9,8E+0	-17	-	81,84	6,7E+0	1,4E+0	900	1,2E-04	7,7E+0	0,25	30,25
-46,13	2,1E+0	31	-	77,13	5,9E+0	1,4E+0	100	1,0E-06	1,8E+0	2,25	30,25

4,67	2,2E+0	229	-	224,33	5,0E+0	1,4E+0	100	1,6E-05	2,9E+0	2,25	30,25
-20,17	4,1E+0	199	-	219,17	4,8E+0	1,4E+0	900	6,4E-05	9,7E+0	0,25	30,25
-	1,1E+0	-59	-	45,52	2,1E+0	8,3E+0	900	1,6E-05	3,5E+0	2,25	30,25
-19,34	3,7E+0	97	-	116,34	1,4E+0	8,3E+0	100	6,4E-05	8,2E+0	0,25	30,25
-6,69	4,5E+0	181	-	187,69	3,5E+0	8,3E+0	100	1,2E-04	1,8E+0	0,25	30,25
-17,95	3,2E+0	241	-	258,95	6,7E+0	8,3E+0	900	1,0E-06	7,5E+0	2,25	30,25
-57,42	3,3E+0	67	-	124,42	1,5E+0	6,2E+0	900	1,0E-06	2,0E+0	0,25	30,25
9,45	8,9E+0	205	-	195,55	3,8E+0	6,2E+0	100	1,2E-04	9,7E+0	2,25	30,25
-17,98	3,2E+0	97	-	114,98	1,3E+0	6,2E+0	100	6,4E-05	2,9E+0	2,25	30,25
-23,56	5,5E+0	163	-	186,56	3,5E+0	6,2E+0	900	1,6E-05	7,7E+0	0,25	30,25
0,00	**3,0E+0**	**0**	**7,5E+0**	**0,00**	**1,8E+0**	**1,5E+0**	**72000**	**7,3E-03**	**2,7E+0**	**180**	**1764**
0,00	**2,1E+0**	**0**	**5,2E+0**	**0,00**	**1,3E+0**	**1,0E+0**	**500**	**5,1E-05**	**1,9E+0**	**1,25**	**12,25**

Somme

Moyenne

E_{RES} : Ecart résiduel ou inexpliqué par la régression.

CE_{RES} : Carré de l'écart résiduel.

E_{Tota} : Ecart total.

CE_{Total} : Carré de l'écart total.

E_{expl} : Ecart expliqué par la régression.

CE_{expl} : Carré de l'écart expliqué.

$\hat{\mathbf{s}} = \Sigma S_i$

$\hat{\mathbf{c}} = \Sigma C_i$

$\hat{\mathbf{i}} = \Sigma I_i$

$\mathbf{m} = \Sigma M_i$

$\boldsymbol{\varphi} = \Sigma Qad_i$

$\mathbf{t} = \Sigma T_i$

ANNEXE F – Table de Fisher- Snedecor

Valeurs limites de F en fonction des degrés de liberté du numérateur et du dénominateur.

V_1 : degré de liberté au numérateur
V_2 : degré de liberté au dénominateur

V_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20
V_2													
1	161	199,5	215,7	224,6	230,2	234	236,8	239	240,5	241,9	243,9	243,9	248
2	18,5	19	19,16	19,25	19,3	19,33	19,35	19,4	19,38	19,4	19,41	19,43	19,45
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	8,74	8,7	8,66
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6	5,96	5,91	5,86	5,8
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	4,68	4,62	4,56
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,1	4,06	4	3,94	3,87
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	4,73	3,68	3,64	3,57	3,51	3,44
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,5	3,44	3,39	3,35	3,28	3,22	3,15
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	3,07	3,01	2,94
10	4,96	4,1	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	2,91	2,85	2,77
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,2	3,09	3,01	2,95	2,9	2,85	2,79	2,72	2,65
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3	2,91	2,85	2,8	2,75	2,69	2,62	2,54
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	2,6	2,53	2,46
14	4,6	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,7	2,65	2,6	2,53	2,46	2,39
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,9	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	2,48	2,4	2,33
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	2,42	2,35	2,28
17	4,45	3,59	3,2	2,96	2,81	2,7	2,61	2,55	2,49	2,45	2,38	2,31	2,23
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	2,34	2,27	2,19
19	4,38	3,52	3,13	2,9	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	2,31	2,23	2,16
20	4,35	3,49	3,1	2,87	2,71	2,6	2,51	2,45	2,39	2,35	2,28	2,2	2,12
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	2,25	2,18	2,1
22	4,3	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,4	2,34	2,3	2,23	2,15	2,07
23	2,28	3,42	3,03	2,8	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	2,2	2,13	2,05
24	4,26	3,4	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,3	2,25	2,18	2,11	2,03
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,6	2,49	2,4	2,34	2,28	2,24	2,16	2,09	2,01
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	2,15	2,07	1,99
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,2	2,13	2,06	1,97

28	4,2	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	2,12	2,04	1,96
29	4,18	3,33	2,93	2,7	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	2,1	2,03	1,94
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	2,09	2,01	1,93
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	2	1,92	1,84
60	4	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,1	2,04	1,99	1,92	1,84	1,75
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	1,83	1,75	1,66
infini	3,84	3	2,6	2,37	2,21	2,1	2,01	1,94	1,88	1,83	1,75	1,67	1,57

http://www.educnet.education.fr/rnchimie

ANNEXE G – Table du t de Student

Valeurs limites de t en fonction des degrés de liberté (en ligne) et du seuil de probabilité (en colonne).

P	**0,5**	**0,4**	**0,3**	**0,2**	**0,1**	**0,05**	**0,025**	**0,01**	**0,001**
ddl									
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	25,452	63,657	636,619
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,205	9,925	31,599
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,177	5,841	12,924
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,495	4,604	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,163	4,032	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	2,969	3,707	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,841	3,499	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,752	3,355	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,685	3,250	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,634	3,169	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,593	3,106	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,560	3,055	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,533	3,012	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,510	2,977	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,490	2,947	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,473	2,921	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,458	2,898	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,445	2,878	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,433	2,861	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,423	2,845	3,850
21	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,414	2,831	3,819
22	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,405	2,819	3,792
23	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,398	2,807	3,768
24	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,391	2,797	3,745
25	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,385	2,787	3,725
26	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,379	2,779	3,707
27	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,373	2,771	3,690
28	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,368	2,763	3,674
29	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,364	2,756	3,659
30	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,360	2,750	3,646

31	0,682	0,853	1,054	1,309	1,696	2,040	2,356	2,744	3,633
40	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,329	2,704	3,551
50	0,679	0,849	1,047	1,299	1,676	2,009	2,311	2,678	3,496
60	0,679	0,848	1,045	1,296	1,671	2,000	2,299	2,660	3,460
70	0,678	0,847	1,044	1,294	1,667	1,994	2,291	2,648	3,435
80	0,678	0,846	1,043	1,292	1,664	1,990	2,284	2,639	3,416
90	0,677	0,846	1,042	1,291	1,662	1,987	2,280	2,632	3,402
100	0,677	0,845	1,042	1,290	1,660	1,984	2,276	2,626	3,390
120	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,270	2,617	3,373
200	0,676	0,843	1,039	1,286	1,653	1,972	2,258	2,601	3,340
500	0,675	0,842	1,038	1,283	1,648	1,965	2,248	2,586	3,310
1000	0,675	0,842	1,037	1,282	1,646	1,962	2,245	2,582	3,300
2000	0,675	0,842	1,037	1,282	1,646	1,961	2,243	2,578	3,295

http://www.ufrstaps.ups-tlse.fr/tp/fichier

ANNEXE H – Présentation des 144 essais du modèle D = f (C, Qad, T)

Durées mesurées Di	Ci	Qadi	Ti
234	30	1	1
222	50	2	1
216	70	3	1
216	90	4	1
180	30	3	1
186	50	4	1
288	70	1	1
252	90	2	1
138	30	4	1
192	50	3	1
240	70	2	1
282	90	1	1
186	30	2	1
258	50	1	1
198	70	4	1
234	90	3	1
240	30	1	1
222	50	2	1
216	70	3	1
216	90	4	1
162	30	3	1
180	50	4	1
276	70	1	1
264	90	2	1
168	30	3	1
174	50	4	1
276	70	1	1
264	90	2	1
162	30	4	1
228	50	3	1
240	70	2	1
282	90	1	1
210	30	2	1
264	50	1	1
222	70	4	1
234	90	3	1
336	30	1	2
324	50	2	2
318	70	3	2
318	90	4	2
270	30	3	2
276	50	4	2
384	70	1	2
360	90	2	2
198	30	4	2
276	50	3	2
348	70	2	2
390	90	1	2

264	30	2	2
366	50	1	2
282	70	4	2
336	90	3	2
336	30	1	2
318	50	2	2
312	70	3	2
306	90	4	2
234	30	3	2
252	50	4	2
384	70	1	2
366	90	2	2
234	30	3	2
252	50	4	2
384	70	1	2
372	90	2	2
234	30	4	2
318	50	3	2
342	70	2	2
390	90	1	2
294	30	2	2
372	50	1	2
312	70	4	2
336	90	3	2
462	30	1	5
450	50	2	5
444	70	3	5
438	90	4	5
390	30	3	5
384	50	4	5
516	70	1	5
492	90	2	5
270	30	4	5
378	50	3	5
474	70	2	5
528	90	1	5
366	30	2	5
498	50	1	5
384	70	4	5
462	90	3	5
456	30	1	5
438	50	2	5
432	70	3	5
426	90	4	5
318	30	3	5
354	50	4	5
516	70	1	5
492	90	2	5
312	30	3	5
348	50	4	5
516	70	1	5
492	90	2	5
288	30	4	5
414	50	3	5
468	70	2	5
528	90	1	5
384	30	2	5
498	50	1	5

	408	70	4	5
	456	90	3	5
	534	30	1	10
	516	50	2	10
	510	70	3	10
	504	90	4	10
	420	30	3	10
	426	50	4	10
	594	70	1	10
	570	90	2	10
	288	30	4	10
	432	50	3	10
	552	70	2	10
	606	90	1	10
	414	30	2	10
	576	50	1	10
	444	70	4	10
	534	90	3	10
	528	30	1	10
	504	50	2	10
	492	70	3	10
	492	90	4	10
	354	30	3	10
	402	50	4	10
	594	70	1	10
	564	90	2	10
	348	30	3	10
	396	50	4	10
	594	70	1	10
	564	90	2	10
	306	30	4	10
	462	50	3	10
	546	70	2	10
	606	90	1	10
	432	30	2	10
	570	50	1	10
	462	70	4	10
	528	90	3	10
SOMME	**52560**	**8640**	**360**	**648**
MOYENNE	**821,25**	**135**		**10,125**

ANNEXE I – Table des figures

Figure 1 :Bassin en eau régulant les écoulements d'un bassin versant de 2300ha. Profond d'un à deux mètres, il stocke près de 50000 m3. Il est utilisé pour la pêche (réserve écologique) et la promenade. Source CETE du Sud-Ouest. 14
Figure 2 : Bassin sec conciliant l'utile (recueil des eaux pluviales), l'utilitaire (jeux pour enfants) et l'agréable (espaces verts). Source : O.Norette/ Certu. 16
Figure 3 : Exemple de bassin enterré en cours de réalisation, [Grand Lyon, 2007]. 18
Figure 4 : Schéma type d'un bassin enterré caractérisé par son indice de vide, sa hauteur de marnage et ses dimensions qui définissent son volume utile, [Grand Lyon, 2007]. 18
Figure 5 : Exemple de combinaison des fonctions possibles. Les bassins enterrés sont alimentés par les eaux pluviales d'un réseau de type séparatif, ils peuvent ainsi remplir trois fonctions principales pouvant se combiner les unes avec les autres, [Grand Lyon, 2007]. 19
Figure 6 : Exemple d'évacuation régulée et d'évacuation déversoir distinctes avec régulation réalisée par un simple orifice, [Chocat B & al, 1997]. 21
Figure 7 : Exemple d'évacuation régulée par tubes percés d'orifices triangulaires, [Chocat B & al, 1997]. 21
Figure 8: Schéma de principe des constituants d'une toiture stockante, [Chocat B & al, 1997]. 22
Figure 9 : Chaussée réservoir sur le site d'un supermarché. L'eau s'infiltre par le matériau drainant de surface puis elle est stockée dans la structure réservoir pour enfin être restituée progressivement dans le réseau aval. Source CETE Sud-Ouest. 24
Figure 10 : Exemple d'évacuation répartie (infiltration) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est drainant. Il existe dans le corps de la structure un drain central vers une surverse de sécurité. 25
Figure 11: Exemple d'évacuation répartie (infiltration) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est étanche. Il existe dans le corps de la structure un drain central vers une surverse de sécurité. 25
Figure 12 : Exemple d'évacuation localisée (rétention) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est drainant. Il existe dans le corps de la structure un drain d'évacuation de vidange. 26
Figure 13 : Exemple d'évacuation localisée (rétention) pour une chaussée à structure réservoir dont le revêtement est étanche. Il existe dans le corps de la structure un drain d'évacuation de vidange. 26
Figure 14 : Puits d'infiltration associé à une chaussée réservoir, assurant le débit de fuite. Source CETE du Sud-Ouest. 29
Figure 15 : Exemple de puits. Source Adopta. 30
Figure 16 : Noue peu profonde avec des rives en pente douce. Sa fonction principale est le stockage des eaux pluviales. Le stockage et l'écoulement de l'eau se font à l'air libre, à l'intérieur de la noue. Source, CETE Sud-Ouest. 32
Figure 17 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation répartie (infiltration) pour des noues et des fossés. 33

Figure 18 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation répartie (infiltration) pour des noues et des fossés. 33
Figure 19 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation localisée (rétention) pour des noues et des fossés. 33
Figure 20 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation localisée (rétention) pour des noues et des fossés. 34
Figure 21 : La tranchée sert à retenir les eaux puis à les évacuer soit par infiltration, soit vers un exutoire (réseau, puits, etc.). Elle peut revêtir différents matériaux de surface (minéral ou végétal). Ici la tranchée est revêtue de galets. Source CETE Sud-Ouest. 37
Figure 22 : Exemple d'apport réparti (ruissellement) et d'évacuation répartie (infiltration) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration..... 37
Figure 23 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation répartie (infiltration) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration..... 38
Figure 24 : Exemple d'apport réparti (infiltration) et d'évacuation localisée (rétention) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration..... 38
Figure 25 : Exemple d'apport localisé (canalisation) et d'évacuation localisée (rétention) pour une tranchée de rétention et/ou d'infiltration..... 38
Figure 26 : Courbes Intensité-durée-fréquence, [Chocat B & al, 1997]..... 42
Figure 27: Courbes Hauteur-durée-fréquence, [Chocat B & al, 1997]..... 43
Figure 28 : Superposition de la courbe Hauteur-durée pour une fréquence choisie et de la courbe d'évacuation, [Chocat B & al, 1997]. 44
Figure 29 : Abaque de l'Instruction technique de 1977. 47
Figure 30 : Pluie de projet double triangle, [Chocat B & al, 1997]..... 55
Figure 31 : Volume de rétention pour la période de retour 1 an, [Xia Z, 2005]..... 56
Figure 32 : Volume de rétention pour la période de retour 2 ans, [Xia Z, 2005]. 56
Figure 33 : Volume de rétention pour la période de retour 5 ans, [Xia Z, 2005] 57
Figure 34 : Pluie de projet simple triangle 58
Figure 35 : Pluie de projet rectangle. 59
Figure 36: Hyétogramme du 23/11/2000 62
Figure 37 : Hyétogramme du 14/07/2001 63
Figure 38: Hyétogramme du 20/10/2001 63
Figure 39: Exemple de dépouillement d'un hyétogramme à origine fixe et à origine variable, Chocat et al, 1997. 65
Figure 40 : Ajustement de la loi de Gumbel par la méthode des moments pour un échantillon de taille 30..... 71
Figure 41 : Courbe IDF de période de retour 1 an. 72
Figure 42: Courbe IDF de période de retour 2 ans..... 73
Figure 43: Courbe IDF de période de retour 5 ans..... 73
Figure 44: Courbe IDF de période de retour 10 ans..... 73

Figure 45: schéma d'un réservoir 77
Figure 46 : Schéma 1 : Détermination du volume de stockage 78
Figure 47: Schéma 2 : Détermination de la durée de la pluie de projet correspondant au volume de stockage défini par le schéma 1. 78
Figure 48: Exemple d'un modèle inadéquat 86
Figure 49: Exemple de modèle adéquat. 87
Figure 50: Représentation graphique de la distribution des volumes de stockage calculés avec les modèles de réservoir pour l'essai n°21. 95
Figure 51: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 1 an pour l'essai n°21. 99
Figure 52: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 2 ans pour l'essai n°21. 99
Figure 53: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 5 ans pour l'essai n°21. 100
Figure 54: Exemple de courbes enveloppes donnant la hauteur maximale de stockage pour une période de retour de 10 ans pour l'essai n°21. 100
Figure 55 : Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 1 an entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 104
Figure 56: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 2 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 105
Figure 57: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 5 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 105
Figure 58: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour de 10 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 106
Figure 59: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai toutes périodes de retour confondues entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 106
Figure 60: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 107
Figure 61: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 108
Figure 62: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 108
Figure 63: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre la méthode des pluies et la loi de Gumbel. 109
Figure 64: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 1an entre les méthodes des abaques et Gumbel. 114
Figure 65: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 2ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 114

Figure 66: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 5ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 115
Figure 67: Ecarts (%) des volumes de stockage pour chaque essai pour une période de retour 10ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 115
Figure 68: Ecarts (%) des volumes de stockage pour l'ensemble des essais toutes périodes de retour confondues entre les méthodes des abaques et Gumbel. 116
Figure 69: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1an entre les méthodes des abaques et Gumbel. 117
Figure 70: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 117
Figure 71: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 118
Figure 72: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre les méthodes des abaques et Gumbel. 118
Figure 73: Régression affine des durées de pluies. 130
Figure 74: Régression affine du sous –modèle D = f (C, Qad, T) 136
Figure 75: Régression affine du sous- modèle D=f (C, I, Qad, T) 139
Figure 76: Régression affine du sous-modèle D= f (C, M, Qad, T) 141
Figure 77: Régression affine du sous-modèle D=f (S, C, Qad, T) 143
Figure 78: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 147
Figure 79: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 147
Figure 80: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 148
Figure 81: Ecarts (%) des volumes de stockage pour une période de retour 10 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 148
Figure 82: Ecarts (%) des volumes de stockage toutes périodes de retour confondues entre la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 149
Figure 83: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 1 an entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 150
Figure 84: Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 2 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 150
Figure 85 : Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 5 ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 151
Figure 86 : Corrélation des volumes de stockage pour une période de retour 10ans entre la nouvelle méthode et la méthode de Gumbel. 151
Figure 87: Schéma du système d'assainissement 153

Figure 88: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR1..... 156
Figure 89: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR2..... 158
Figure 90: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR3..... 160
Figure 91: Evolution des volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR4..... 162
Figure 92: Volumes de stockage de Gumbel en fonction de la fréquence de non-dépassement pour BR5..... 164
Figure 93 : Hyétogramme de période de retour 5ans projeté sur BV1..... 165
Figure 94: Hydrogramme à l'entrée de BR1..... 165
Figure 95 : Evolution des volumes de stockage sur BR1..... 166
Figure 96 : Hyétogramme de période de retour 5 ans projeté sur BV2..... 167
Figure 97 : Hydrogramme à l'entrée de BR2..... 167
Figure 98 : Evolution des volumes de stockage sur BR2..... 167
Figure 99 : Hyétogramme de période de retour 5 ans projeté sur BV3..... 168
Figure 100: Hydrogramme à l'entrée de BR3..... 169
Figure 101 : Evolution des volumes de stockage sur BR3..... 169
Figure 102: Hyétogramme de période de retour10 ans projeté sur BV4bis..... 171
Figure 103 : Hydrogramme à l'entrée de BR4..... 171
Figure 104: Evolution des volumes de stockage sur BR4 dans l'approche 1..... 171
Figure 105: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV4..... 173
Figure 106: Hyétogramme à l'entrée de BR4..... 173
Figure 107: Evolutions des volumes de stockage sur BR4 dans l'approche2..... 173
Figure 108*: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV5bis.*..... 175
Figure 109: Hyétogramme à l'entrée de BR5 dans l'approche1..... 176
Figure 110: Evolution des volumes de stockage sur BR5 dans l'approche 1..... 176
Figure 111: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV5..... 178
Figure 112 : Hydrogramme à l'entrée de BR5 et issu de BV5..... 178
Figure 113: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV6..... 178
Figure 114: Hydrogramme à l'entrée de BR5 et issu de BV6..... 179
Figure 115: Evolution des volumes de stockage sur BR5 dans l'approche 2..... 179
Figure 116: Hyétogramme de période de retour 10 ans projeté sur BV'..... 181
Figure 117: Hydrogramme à l'entrée de BR5 dans l'approche 3..... 181
Figure 118: Evolution des volumes de stockage sur BR5..... 181

ANNEXE J – Table des tableaux

Tableau 1: Seuils de sélection des intensités moyennes maximales retenus par Météo France pour différentes durées de cumul, [Chocat B & *al,* 1997]. 51
Tableau 2 : Coefficients de Montana pour les trois régions administratives françaises, Instruction Technique de 77 54
Tableau 3: Echantillon des 30 plus grandes intensités (mm/h) pour chaque durée de cumul. 67
Tableau 4: Mesure de la variabilité par le calcul du coefficient de variation Cv. 71
Tableau 5 : Calcul des intensités avec Gumbel aux différentes périodes de retour..... 72
Tableau 6: Coefficients de Montana de Gerland. 74
Tableau 7: Matrice du plan orthogonal de type $L_{16}4^5$ tirée des tables de base des plans orthogonaux déjà construits. Cette matrice possède le même nombre de configurations que celles que nous cherchons à établir. 83
Tableau 8: Discrétisation des caractéristiques des bassins versants et ouvrages de stockage. 84
Tableau 9 : Planification des essais à réaliser pour une période de retour T donnée. 85
Tableau 10 : Analyse de la variance pour un modèle de degré de liberté 6. 88
Tableau 11: Volumes à stocker calculés avec les modèles de réservoir pour l'essai n°21..... 93
Tableau 12 : Analyse fréquentielle des 30 plus forts volumes de stockage obtenus pour l'essai n°21. 94
Tableau 13 : Paramètres d'ajustement de Gumbel. 96
Tableau 14 : Volumes de stockage de Gumbel obtenus pour les 36 essais pour différentes périodes de retour. .. 97
Tableau 15 : Volumes de stockage avec la méthode des pluies pour différentes périodes de retour pour les 36 essais..... 101
Tableau 16 : Ecarts (%) de volumes de stockage entre la méthodes de pluies et la loi de Gumbel. 103
Tableau 17 : Volumes de stockage avec la méthode des Abaques pour différentes périodes de retour pour les 36 essais dans la région pluviométrique II..... 111
Tableau 18 : Ecarts (%) de volumes de stockage entre les méthodes des Abaques et de Gumbel. 113
Tableau 19 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°25. 122
Tableau 20 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°26. 122
Tableau 21 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet rectangle projetée sur l'essai n°27. 122
Tableau 22 : Résultats de recherche des durées de pluie pour une pluie rectangle sur l'ensemble des 36 essais.124
Tableau 23 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°25. 125
Tableau 24 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°26. 125
Tableau 25 : Recherche des durées de pluie pour une pluie de projet simple triangle projetée sur l'essai n°27. 125
Tableau 26 : Résultats de recherche des durées de pluie pour une pluie simple triangle sur l'ensemble des 36 essais..... 126
Tableau 27 : Planification des essais à réaliser. Seuls 36 essais sur 144 sont présentés. L'ensemble des essais se trouve en annexe D. 129
Tableau 28 : Résultats de la résolution matricielle..... 130

Tableau 29 : Analyse de variance de la régression multiple pour un total de 144 essais. 131
Tableau 30 : Résultats du test du t de Student..... 133
Tableau 31 : Planification des essais à réaliser pour la construction du modèle D = f (C, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont présentés. L'ensemble des essais se trouve en annexe H. 135
Tableau 32 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D=f(C, Qad, T)..... 136
Tableau 33 : Planification des essais à réaliser pour le construction du sous-modèle D = f (C, I, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés. 138
Tableau 34 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D=f(C, I, Qad, T) 139
Tableau 35 : Planification des essais à réaliser pour la construction du sous-modèle D = f (C, M, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés. 140
Tableau 36 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D =f(C,M,Qad, T) 141
Tableau 37 : Planification des essais à réaliser pour la construction du modèle D = f (S, C, Qad, T). Seuls 36 essais sur 144 sont représentés. 142
Tableau 38 : Résultats de la résolution matricielle pour le sous-modèle D= f(S, C, Qad, T)..... 143
Tableau 39 : Résultats de volumes de stockage obtenus avec la Nouvelle méthode et la méthode de Gumbel.. 145
Tableau 40 : Ecarts (%) de volumes entre la nouvelle méthode et celle de Gumbel..... 146
Tableau 41 : Caractérisation des bassins versants et des bassins de retenue..... 154
Tableau 42 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR1.. 155
Tableau 43 : Calcul du volume de stockage Vs_1 sur BR1 avec la méthode de Gumbel..... 156
Tableau 44 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR2.. 157
Tableau 45 : Calcul du volume de stockage Vs_2 sur BR2 avec la méthode de Gumbel..... 158
Tableau 46 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR3.. 159
Tableau 47 : Calcul du volume de stockage Vs_3 sur BR3 avec la méthode de Gumbel..... 160
Tableau 48 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR4.. 161
Tableau 49 : Calcul du volume de stockage Vs_4 sur BR4 avec la méthode de Gumbel..... 162
Tableau 50 : Analyse fréquentielle avec Gumbel de la série des 30 volumes de stockage maximum sur BR5.. 163
Tableau 51 : Calcul du volume de stockage Vs_5 sur BR5 avec la méthode de Gumbel 1..... 164
Tableau 52 : Volume de stockage Vs_1 calculé sur BR1 avec la Nouvelle méthode. 166
Tableau 53 : Volume de stockage Vs_2 calculé sur BR2 avec la Nouvelle méthode. 168
Tableau 54 : Volume de stockage Vs_3 calculé sur BR3 avec la Nouvelle méthode..... 169
Tableau 55 : Volume de stockage Vs_4 calculé sur BR4 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 1. 172
Tableau 56 : Volume de stockage Vs_4 calculé sur BR4 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 2. 174
Tableau 57 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 1 176
Tableau 58 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 2. 179
Tableau 59 : Volume de stockage Vs_5 calculé sur BR5 avec la Nouvelle méthode dans l'approche 3. 182
Tableau 60 : Tableau de synthèse et comparaison des résultats obtenus avec la nouvelle méthode et celle de Gumbel. 182