

THESE

En vue de l'obtention du : **DOCTORAT**

Centre de Recherche : Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable
Structure de Recherche : Laboratoire Géosciences Eau et Environnement LGEE)
Discipline : Sciences de la Terre
Spécialité : Sciences de l'Eau, modélisation climatologique et hydrologique

Présentée et soutenue le 28/11/2020 par :

Khalid BARKOUKI

Analyse spatio-temporelle des pluies instantanées dans le contexte marocain pour des besoins des études hydrologiques : Application à la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia

JURY

Saida NIAZI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Présidente
Ilias KACIMI	PES, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Directeur de Thèse
Najat SERHIR	PES, Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca	Rapporteur/Examineur
Mohammed ACHAB	PES, Institut Scientifique, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Tarik BAHAI	PH, Faculté des Sciences, Université Mohammed V, Rabat	Rapporteur/Examineur
Gil MAHE	Directeur de recherche, Institut de Recherche pour le Développement /Hydrosciences, Université de Montpellier	Rapporteur/Examineur
Yves TRAMBLAY	Chargé de Recherche, Institut de Recherche pour le Développement/Hydrosciences, Université de Montpellier	Examineur
Mohamed HILALI	PH, Facultés des Sciences et Techniques, Université Moulay Ismail, Errachidia	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Les travaux réalisés dans le cadre de la présente thèse ont permis la publication de deux articles scientifiques dans un journal indexé Scopus en plus d'un troisième article en cours de publication. Deux communications ont été également réalisées, la première au niveau nationale et la deuxième dans une conférence internationale. Cette dernière a été distinguée en recevant le prix de la meilleure communication. Les références des articles et des communications sont présentées ci-après alors que les articles complets sont consignés en annexe.

Articles:

- 1) Barkouki, Kh., I. Kacimi, et N. Serhir, « Storm properties : literature review », IJSTR, 8, December 2019, 1299-1302.
- 2) Barkouki, Kh., I. Kacimi, N. Serhir, A. Zerouali, et MA. Ezzaouini, « Storms properties at bouregreg and chaouia region in Morocco », IJSTR, 9, January 2010, 2018-26

Communications:

- 1) Barkouki, Kh., et Ilias Kacimi. 2018. « Analyse des pluies instantanées au niveau de Bouregreg et la Chaouia au Maroc ». In 2nd Edition of the Doctoral Seminar of Earth Sciences. Rabat, Maroc.
- 2) Barkouki, Kh., I. Kacimi, N. Serhir, et A. Ezzahoum. 2018. « Analysis of instant rainfall at Bouregreg and Chaouia region in Morocco ». In 16th Plinius Conference on Mediterranean Risks. Vol.9. Montpellier, France.

إهداء

الحمد لله صاحب الفضل والنعم وشاحذ القلوب والمهم وله الشكر على
ما أسبغ به وأتم، والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى سراج أهل العلم
وأولي النهى. الحمد لله الذي أعانني على إنهاء هذا البحث المتواضع،
والذي أهديه

إلى أرواح أجدادي علال وفصومة وإبراهيم وفاصمة فجزاهم الله عني خيرا،
إلى أبي محمد الحكيم الذي حباب إلي لصرق العلم ورغبني فيه فهو لي
نعم الأب والمربي والصاحب،

إلى ينبوع العطاء والسعادة أُمي فصومة الصبية الحنونة،
إلى صهري يوسف وزينة فمعهما ازددت تعلقا بالعلم وهما لي بمثابة
الأب والأم،

إلى زوجتي الغالية فتحة، سندي وعضدي في الحياة فمعها يطلو المسير
وبعد عمها يلين العسير،

إلى أبنائي عبد الرحمان الفطن ومحمد أمين الحليم وسارة المنارة،
إلى أخواتي البنات نعيمة وسهام وأمال وهند فمعهن شققت الصريق
واجتنت كل ما يشني ويعيق،

إلى عائلة بركوكي قاصبة فقد بذروا في قلبي حب العلم والعمل دون
ذكر ما كان منهم من الفضل والنعم،

إلى عائلة الغوال أصل أُمي، فمنهم تعلمت التواضع للأنام وأن أدلج للعلم
والناس نيام،

إلى أهل أكَفَاي دون استثناء فما زال سلامهم ودعائهم يبلغني صباح مساء،
إلى كل أساتذتي ومعلمي الكرام، فهم من خير الخلق وخير ما يكون به
الختام.

AVANT-PROPOS

Je tiens tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant, qui m'a donné la patience et l'enthousiasme d'accomplir ce travail.

Je remercie le Doyen de la Faculté des Sciences de Rabat et le Directeur du Centre d'Etudes Doctorales de m'avoir donné l'opportunité de poursuivre mes études à cette Faculté. Je les remercie aussi pour toutes les facilités et les formations suivies qui ont été de grande utilité pour moi lors de la préparation de cette thèse.

Ce travail a été réalisé dans le centre de l'Eau, Ressources Naturelles, Environnement et Développement Durable et précisément dans le laboratoire Géosciences, Eau et Environnement sous la direction du Pr. **Ilias KACIMI**. Il a été appuyé par l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (ABHBC) à travers la mise à disposition de la base de données nécessaire pour l'atteinte des objectifs attendus.

Je remercie **Mme. Souad HAJJAJI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et la responsable du Centre de Recherche « CERNE2D », d'avoir accepté ma demande d'intégrer son centre de recherche.

Je suis extrêmement reconnaissant à mon directeur de thèse **Mr. Ilias KACIMI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat et chef de département des Sciences de la Terre, d'avoir accepté de diriger cette thèse. Les conseils et les orientations du Pr. **Ilias KACIMI** étaient très précieux et m'ont permis de s'intégrer dans le domaine de la recherche scientifique. Je le remercie infiniment pour le temps qu'a accordé pour corriger et améliorer mon manuscrit et ainsi pour sa sympathie et ses qualités scientifiques et humaines inédites.

Nos vifs remerciements vont à **Mme. Saida NIAZI**, Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat. Je la remercie pour l'intérêt qu'elle a porté à ma recherche, d'avoir présidé le jury de ma soutenance et examiné mon travail et de l'enrichir par ses remarques et propositions.

Spéciaux remerciements et reconnaissance vont à **Mme. Najat SERHIR**, Professeur à l'Ecole Hassania des Travaux Publics. Grâce à sa recommandation, j'ai pu participer au « 16th Plinius Conference on Mediterranean Risks » organisée à Montpellier en France en octobre 2018 où j'ai pu avoir le prix de la meilleure communication. Je n'oublierai jamais cet évènement scientifique qui m'a permis un échange très bénéfique avec des chercheurs de l'Europe, de l'Afrique du Nord et du Proche-Orient. Je la remercie également en tant que rapporteur externe et d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Je remercie vivement **Mr. Mohammed ACHAB**, Professeur à l'Institut Scientifique de Rabat et rapporteur interne de mon travail de thèse, d'avoir enrichi ma thèse par ses remarques et recommandations extrêmement importantes.

Je remercie sincèrement **Mr. Tarik BAHAJ**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences de Rabat et rapporteur interne de ma thèse, d'avoir accepté d'examiner mon travail et de l'avoir enrichi par ses conseils et commentaires.

Je remercie très vivement **Mr. Gil MAHE**, Directeur de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement en France et rapporteur externe de mon travail, pour l'intérêt qu'il a porté à ma recherche en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par ses remarques et propositions.

Vifs remerciements vont à **Mr. Yves TRAMBLAY**, Chargé de recherche à l'Institut de Recherche pour le Développement en France, pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail en acceptant de faire partie des membres de jury de ma thèse et ainsi d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier chaleureusement **Mr. Mohamed HILALI**, Professeur Habilité à la Faculté des Sciences et Techniques d'Errachidia, d'avoir accepté de faire partie des membres de jury et d'examiner mon travail.

Je remercie le personnel de l'ABHBC pour leurs aides précieuses dans le processus de collecte des données, étape très importante dans ce travail. Ma gratitude va tout particulièrement à Mr le Directeur Abdelaziz ZEROUALI, Mr Mohammed Abdellah EZZAOUINI, Mr Ayoub NAFII et Mlle Ilham RADOUANE.

Mes remerciements vont à tous mes amis : Hassan, Ismail, Narjiss, Oussama et Khadija qu'étaient toujours là pour discuter, conseiller et partager leur retour d'expérience, je les remercie infiniment pour l'encouragement.

Je remercie aussi mes collègues Rajae, Hajar, Samira, Reda et Aimane pour leur soutien et le temps alloué de relecture et correction de mes articles en anglais. Ils ont toujours répondu présent malgré leurs préoccupations professionnelles.

Finalement, je remercie ma famille, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de cet humble travail.

RESUME

Cette recherche concerne le traitement des pluies instantanées dans la zone d'action de l'ABHBC (20.470 km²). Ce territoire a été choisi comme une zone pilote dans le contexte marocain. Les données utilisées sont les pluies instantanées de 25 pluviomètres automatiques couvrant la période 2009-2016. Les propriétés des pluies instantanées ont été analysées en se basant sur les caractéristiques des averses retenues selon la durée minimale entre les averses (MIET), les lames d'eau et les durées des averses ainsi que leurs quartiles. Une analyse de la répartition spatiale des résultats obtenus a été également effectuée. Ce travail constitue une première dans l'analyse des pluies instantanées dans le contexte marocain et montre l'importance du MIET dans le choix des averses. Après une revue de littérature des hyétogrammes synthétiques de pluie de projet, le choix a statué sur le développement des courbes de Huff adaptées au contexte local. La modélisation hydrologique de 80% de la zone a permis de proposer la distribution de type Chicago, pour le calcul des débits de pointe. Les deux distributions de Huff4 (90%) (0-12h et +12h) doivent être utilisées pour la vérification des dimensions adoptées pour les ouvrages hydrauliques et pour la délimitation de la zone d'aléa inondation.

Mots-clefs (5): Pluie instantanée, hyétogramme synthétique, pluie de projet, courbes de Huff, modélisation hydrologique.

ABSTRACT

This research concerns the treatment of instantaneous rainfall in area monitored by the HBABC (20.470 km²). This territory has been chosen as a pilot zone in the Moroccan context. The data used is the instantaneous rainfall from 25 automatic rain gauges covering the period 2009-2016. The properties of the instantaneous rainfall were analyzed based on the characteristics of the storms selected according to the Minimum Inter-Events Time (MIET), the storms depth, the storm durations and their quartiles. An analysis of the spatial distribution of the results obtained was also carried out. This work constitutes a first in the analysis of instantaneous rainfall in the Moroccan context and shows the importance of the MIET in the choice of storms. After a literature review of synthetic design storm hyetograph, the choice was made on the development of Huff curves adapted to the local context. The hydrological modeling of 80% of the area made it possible to propose the Chicago type distribution for the calculation of peak flows. The two Huff4 (90%) distributions (0-12h and +12h) should be used to verify the dimensions adopted for the hydraulic structures and for the delimitation of the flood hazard area.

Key Words (5): Instantaneous rainfall, synthetic hyetograph, design rainfall, Huff curves, hydrological modeling.

ملخص

يتعلق هذا البحث بمعالجة الأمطار اللحظية بمنطقة نفوذ وكالة الحوض المائي لأبي رقراق والشاوية (20.470 كلم²) والتي تم اختيارها كم منطقة نموذجية داخل السياق المغربي. وتتكون البيانات المستخدمة من الأمطار اللحظية لخمسة وعشرين مقياس أمطار أوتوماتيكي تغطي الفترة 2009-2016. وقد تم تحليل خصائص الأمطار اللحظية بناءً على الزخات المطرية المعتمدة وفقاً للحد الأدنى للمدة بين الزخات ومقدارها ومدتها وكذلك الأرباع الخاصة بها. كما تم إجراء تحليل التوزيع الجغرافي للنتائج المحصل عليها. ويعتبر هذا البحث الأول من نوعه في تحليل الأمطار اللحظية على المستوى المغربي ويظهر أهمية المدة بين الزخات في اختيار الزخات المعتمدة. وبعد مراجعة الأدبيات الخاصة بالتوزيع الزمني الموجز للزخات المطرية والخاصة بتقدير صبيب المشروع، وقع الاختيار على تطوير منحنيات هوف وتكييفها مع السياق المحلي. وقد أتاحت النمذجة الهيدرولوجية لثمانين بالمائة من منطقة البحث اقتراح توزيع من نوع شيكاغو لحساب تدفقات الذروة. كما بينت ضرورة استخدام توزيعي هوف لمنحنى احتمال تسعين بالمائة، والخاصين بزخات مدتها أقل من 12 ساعة وأكثر من 12 ساعة، للتحقق من الأبعاد المعتمدة للمنشآت الهيدروليكية ولتحديد منطقة خطر الفيضان.

❏ **كلمات مفتاحية :** الأمطار اللحظية، التوزيع الزمني الموجز للزخات المطرية، أمطار التصميم، منحنى هوف، النمذجة الهيدرولوجية.

SOMMAIRE

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	2
AVANT-PROPOS.....	4
RESUME	7
ABSTRACT	7
ملخص.....	8
SOMMAIRE.....	9
LISTE DES TABLEAUX	12
LISTE DES FIGURES	14
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	19
INTRODUCTION	20
CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	25
I.1. GENERALITES SUR LE CONTEXTE CLIMATIQUE AU MAROC.....	26
I.1.1. Climat au Maroc	26
I.1.2. Ressources en eaux de surface	27
I.1.3. Problématique d'inondation	29
I.1.4. Aperçu sur les changements climatiques au Maroc	34
I.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	35
I.2.1. Localisation géographique.....	35
I.2.2. Situation administrative	36
I.2.3. Réseau hydrographique	37
I.2.4. Topographie.....	39
I.2.5. Géologie.....	40
I.2.6. Occupation du sol	44
I.2.7. Aptitude des sols au ruissellement.....	45
I.2.8. Coefficient d'indexation des sols « Curve Number ».....	46
I.2.9. Précipitations.....	54
I.3. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS.....	54
I.3.1. Paramètres morphométriques généraux	54
I.3.2. Temps de concentration.....	56
I.4. CONCLUSION	58

CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES DES PLUIES INSTANTANÉES.....	59
II.1. INTRODUCTION.....	60
II.2. REVUE DE LITTÉRATURE	61
II.2.1. Introduction.....	61
II.2.2. Définition d'une averse.....	61
II.2.3. Critères de sélection et de classification des averses	63
II.2.3.1. Durée minimale entre les averses (MIET)	63
II.2.3.2. Lame d'eau des averses	65
II.2.3.3. Durée des averses	66
II.2.3.4. Quartiles	66
II.2.4. Conclusion	68
II.3. CARACTERISTIQUES DES AVERSES DANS LA ZONE D'ACTION DE L'ABHBC.....	69
II.3.1. Introduction.....	69
II.3.2. Collecte et contrôle de la qualité des données pluviométriques.....	69
II.3.2.1. Collecte et élaboration d'une base de données.....	69
II.3.2.2. Contrôle de la qualité des pluies instantanées.....	72
II.3.3. Critères de sélection et de classification des averses	81
II.3.4. Résultats et discussion.....	83
II.3.4.1. Durées des averses.....	83
II.3.4.2. Lames d'eau des averses	92
II.3.4.3. Classement des averses par quartiles	93
II.3.4.4. Répartition saisonnière des averses	95
II.3.4.5. Conclusion	96
II.4. CONCLUSION GENERALE	98
CHAPITRE III. DÉVELOPPEMENT D'UNE PLUIE DE PROJET SYNTHÉTIQUE	
ADAPTEES A LA ZONE DE L'ABHBC	99
III.1. INTRODUCTION	100
III.2. REVUE DE LITTÉRATURE.....	100
III.2.1. Méthode Huff.....	101
III.2.2. Méthode SCS	104
III.2.3. Méthode des blocs	107
III.2.4. Méthode Chicago	108
III.2.5. La méthode rectangulaire.....	111

III.2.6. La méthode simple triangle	112
III.2.7. La méthode double triangle.....	113
III.2.8. Conclusions.....	114
III.3. DEVELOPPEMENT DES COURBES DE HUFF	116
III.3.1. Matériels et méthodes.....	116
III.3.2. Résultats.....	119
III.3.2.1. Courbes de Huff correspondant aux différents groupes de quartiles pour un MIET de 6h....	119
III.3.2.2. Courbes de Huff correspondant aux groupes de quartiles pour des MIET différents	121
III.3.2.3. Courbes de Huff correspondant aux différents groupes de quartiles et de durées pour un MIET de 6h.....	122
III.3.2.4. Courbes de Huff par saisons pour un MIET de 6h.....	124
III.4. DISCUSSIONS	126
III.5. CONCLUSION	128
CHAPITRE IV. IMPACT DES COURBES DE HUFF DEVELOPPEES SUR LES DEBITS DE PROJET	130
VI.1. INTRODUCTION	131
VI.2. MODELISATION HYDROLOGIQUE	131
VI.2.1. Description du logiciel utilisé	131
VI.2.1.1. Présentation générale.....	131
VI.2.1.2. Fonction de production	132
VI.2.1.3. Fonction de transformation	133
VI.2.2. Données pluviométriques	134
VI.2.3. Résultats.....	136
VI.3. CONCLUSION.....	145
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	146
BIBLIOGRAPHIE	151
ANNEXES	162

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Superficies des bassins versants des principaux cours d'eau des bassins côtiers	37
Tableau 2: Superficies des bassins versants des principaux cours d'eau du bassin de la Chaouia.....	38
Tableau 3: Occupation du sol dans les grandes entités de bassins.....	44
Tableau 4: Etat d'humidité du sol selon le cumul des pluies journalières des 5 derniers jours.....	46
Tableau 5: Agrégation des types d'occupation du sol dans la Zone d'action de l'ABHBC.....	49
Tableau 6: Analyse générale de la variation du CNI et CNII en fonction du CNIII.....	51
Tableau 7: Formules de calcul de temps de concentration	57
Tableau 8: Données des pluies journalières collectées au niveau de la zone d'étude (Source : ABHBC)	70
Tableau 9: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour - Poste de Rabat (1960-2006).....	71
Tableau 10: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour -Poste de Casablanca (1960-2013).....	72
Tableau 11: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour - Poste de Nouacer (1970-2013)	72
Tableau 12: Résultats de l'analyse des pluies -poste Bge SMBA	74
Tableau 13: Synthèse du contrôle de la qualité des pluies instantanées collectées	77
Tableau 14: Répartition des averses retenues par groupes de durées selon les différents MIET (Barkouki et al., 2020)	84
Tableau 15: Lames d'eau moyenne des averses par groupes de durées selon les différents MIET (Barkouki et al., 2020)	92
Tableau 16: Pourcentage des quartiles en fonction du MIET (Barkouki et al., 2020)	95
Tableau 17: Répartition saisonnière des averses (Barkouki et al., 2020)	95
Tableau 18: Analyse matricielle pour l'élaboration des courbes de Huff.....	118
Tableau 19: Répartition des averses par groupes de quartiles et de durées (MIET=6h).....	123
Tableau 20: Données des pluies instantanées collectées au niveau de la zone d'étude (Source : ABHBC)	164
Tableau 21: Résultats de l'analyse des pluies -Poste Aguibat Ezziar.....	166
Tableau 22: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ain Louddah.....	168
Tableau 23: Résultats de l'analyse des pluies -poste Cheikh Reguigu	170
Tableau 24: Résultats de l'analyse des pluies -poste Feddan Taba.....	171
Tableau 25: Résultats de l'analyse des pluies -poste Lalla Chafia	174
Tableau 26: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ouljet Habboub.....	176

Tableau 27: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ras El Fathia	177
Tableau 28: Comparaison des P_j et des P_i - poste Ras El Fathia (Evénement de fin novembre 2010).....	180
Tableau 29: Résultats de l'analyse des pluies - poste Roumani.....	180
Tableau 30: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Amar	182
Tableau 31: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Jabeur.....	184
Tableau 32: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Mohamed Cherif.....	186
Tableau 33: Résultats de l'analyse des pluies - poste Skhirat.....	187
Tableau 34: Résultats de l'analyse des pluies - poste Tamdrost (après avoir écarté les événements cités ci-après).....	189
Tableau 35: Résultats de l'analyse des pluies - poste Tsalat	191
Tableau 36: Résultats de l'analyse des pluies - poste Melilla	193
Tableau 37: Résultats de l'analyse des pluies - poste Mohammedia.....	194
Tableau 38: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Oued Bouskoura	195
Tableau 39: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Oued Merzeg	195
Tableau 40: Résultats de l'analyse des pluies - poste Oulad Mhamed	197
Tableau 41: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Tighaza.....	198
Tableau 42: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Aricha.....	199
Tableau 43: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Zamrine.....	200
Tableau 44: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Zamrine.....	201
Tableau 45: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage El Himmer.....	202
Tableau 46: Résultats de l'analyse des pluies - poste barrage Mazer.....	203
Tableau 47: Résultats de l'analyse des pluies - poste El Gara	205
Tableau 48: Caractéristiques des bassins versants étudiés.....	211
Tableau 49: Temps de concentration des bassins versants étudiés.....	217

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc calculée sur la période 1971-2000	27
Figure 2: Évolution des apports en eau de surface par bassin hydraulique en milliards de m ³ entre 1940 et 2016	28
Figure 3: Répartition des apports d'eau de surface par bassins hydrauliques au Maroc	28
Figure 4: Zones inondées dans la plaine du Gharb lors de la crue de Mars 2010- Image satellitaire du 10/03/2010	31
Figure 5: Localisation de la zone d'étude.....	35
Figure 6: Découpage administratif de la zone d'étude.....	36
Figure 7: Principaux cours d'eau du réseau hydrographique de la zone d'action de l'ABHBC	38
Figure 8: Modèle numérique de terrain de la zone d'action de l'ABHBC.....	40
Figure 9: Carte géologie au 1/500.000 de la zone d'action de l'ABHBC	43
Figure 10: Occupation du sol dans la zone d'action de l'ABHBC	44
Figure 11: Répartition des classes de ruissellement des sols au niveau de la zone d'action de l'ABHBC.....	46
Figure 12: Carte d'occupation du sol abrégée au niveau de la zone d'action de l'ABHBC.....	50
Figure 13: Outil SARA (Spatial Analysis of surface Runoff in ArcGis).....	50
Figure 14: Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité III)	52
Figure 15: Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité II)	53
Figure 16 : Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité I).....	53
Figure 17: Isohyètes des pluies moyennes annuelles sur la zone d'action de l'ABHBC pour la période de 1972-2017	54
Figure 18: Limites des bassins versants délimités au niveau de la zone d'étude	56
Figure 19 : Séparation des averses selon le MIET (Ev : événement pluvieux, Di : durée entre deux événements successifs)	63
Figure 20: Séparation des averses selon le critère de lame d'eau minimale (Pseuil)	65
Figure 21: Averses de différents quartiles.....	67
Figure 22: Localisation des 27 pluviomètres automatiques, sources des données de pluies instantanées collectées auprès de l'ABHBC	70
Figure 23 : Pluies instantanées – pluviomètre automatique Barrage SMBA	73
Figure 24: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Barrage SMBA.....	74
Figure 25 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Barrage SMBA	75
Figure 26: Vue sur un script développé	82
Figure 27: Partie du script permettant l'extraction des averses	82
Figure 28: Processus d'analyse des pluies instantanées.....	83

Figure 29: Nombre des averses retenues en fonction du MIET'	84
Figure 30: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=24h	86
Figure 31: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=12h	87
Figure 32: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=6h	88
Figure 33: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET= 2 h	89
Figure 34: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=1h	90
Figure 35: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=0.5h	91
Figure 36: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=24h	93
Figure 37: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=2h	93
Les averses retenues ont été classées en fonction de leurs quartiles. Les figures suivantes 38présentent deux exemples (MIET=24h et MIET=2h) des averses adimensionnelles classées	93
Figure 39: Classification des averses selon leurs quartiles (MIET=24h)	94
Figure 40: Classification des averses selon leurs quartiles (MIET=2h)	94
Figure 41: Répartition mensuelle des averses (nombre d'averses par mois)	96
Figure 42: Principales conclusions de l'analyse des pluies instantanées dans la zone d'action de l'ABHBC	97
Figure 43: Distribution de type Huff correspondant aux quatre quartiles (Huff, 1990) (a, b, c, et d correspondent respectivement au 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles)	103
Figure 44: Distribution adimensionnelle de pluie de 24 heures de type SCS	105
Figure 45: Limites géographiques approximatives des zones adaptées pour les quatre distributions de type SCS	106
Figure 46: Démarche d'élaboration d'un hyétogramme à blocs alternés	107
Figure 47: Distributions de la pluie de 24 heures de type Chicago correspondant à des courbes IDF de Casablanca, Nouacer et Rabat	109
Figure 48: Distributions de la pluie de 24 heures de type Chicago correspondant à des courbes IDF de Casablanca, Nouacer et Rabat (Zoom)	110
Figure 49: Paramètres d'un hyétogramme rectangulaire	111
Figure 50: Paramètres d'un hyétogramme triangulaire	112
Figure 51: Hyétogramme double triangle proposé par Desbordes	114
Figure 52 : Hyétogramme double triangle simplifié	114
Figure 53: Processus d'élaboration des courbes de Huff	119
Figure 54: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour un MIET de 6h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles (Huff-Illinois: Courbes développées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA)	121

Figure 55: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour des MIET différents : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles (IEx indique la courbe correspondant au MIET de x heures).....	122
Figure 56: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour les différents groupes de durées avec un MIET de 6 h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles (Les enveloppes des courbes de probabilité de 10%, 50% et 90 % sont respectivement en couleur vert, bleu et rouge).....	124
Figure 57: Pourcentage des groupes de quartiles associés aux quatre saisons.....	125
Figure 58: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour les quatre saisons avec un MIET de 6 h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles	126
Figure 59: Courbes de Huff développées pour les groupes de durées retenus (0-12h et +12h) avec un MIET de 6h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1 ^{ier} , 2 ^{ième} , 3 ^{ième} et 4 ^{ième} quartiles.....	127
Figure 60: Isohyètes des pluies de 24 heures maximales annuelles d'une période de retour centennale sur la zone d'action de l'ABHBC	135
Figure 61: Architecture du modèle hydrologique élaboré sous le logiciel HEC-HMS	137
Figure 62: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff ((a), (b) et (c)correspondent respectivement aux courbes de Huff de probabilité de 10%, 50% et 90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité III).....	140
Figure 63: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile e de probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité III)	140
Figure 64: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff ((a), (b) et (c)correspondent respectivement aux courbes de Huff de probabilité de 10%, 50% et 90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité III).....	143
Figure 65: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité III)	143
Figure 66: Analyse graphique des données pluviométriques -Poste Aguibat Ezziar.....	166
Figure 67 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Aguibat Ezziar.....	167
Figure 68: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ain Louddah.....	168
Figure 69 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Ain Louddah.....	169
Figure 70: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Cheikh Reguigu	170
Figure 71 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Cheikh Reguigu.....	171
Figure 72: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Feddan Taba	171
Figure 73 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Feddan Taba.....	172
Figure 74 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Feddan Taba	173
Figure 75: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Lalla Chafia	174
Figure 76 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Lalla Chafia	175

Figure 77 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Lalla Chafia	175
Figure 78: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ouljet Habboub	176
Figure 79 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Ouljet Habboub	177
Figure 80: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ras El Fathia.....	177
Figure 81 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Ras El Fathia	178
Figure 82 : Pluies instantanées (événement du fin Novembre 2010) –pluviomètre automatique Ras El Fathia (en rouge)	178
Figure 83 : Pluies instantanées (événement du 17 Mai 2011) - pluviomètre automatique Ras El Fathia.....	179
Figure 84: analyse graphique des données pluviométriques -poste Roumani	180
Figure 85 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Roumani.....	181
Figure 86: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Amar	182
Figure 87 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Amar	183
Figure 88: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Jabeur.....	184
Figure 89 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Jabeur.....	185
Figure 90: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Mohamed Cherif.....	185
Figure 91 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Mohamed Cherif.....	186
Figure 92: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Skhirat.....	187
Figure 93 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Skhirat	188
Figure 94: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Tamdrost (après avoir écarté les événements cités ci-après)	189
Figure 95 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tamdrost	190
Figure 96: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Tsalat	191
Figure 97 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tsalat	192
Figure 98: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Melilla	192
Figure 99 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Melilla	193
Figure 100 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Mohammedia	194
Figure 101 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oued Bouskoura.....	195
Figure 102 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oued Merzeg	196
Figure 103: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Oulad Mhamed	196
Figure 104 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oulad Mhamed.....	197
Figure 105 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tighaza.....	198
Figure 106 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Aricha	199
Figure 107 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Zamrine.....	200
Figure 108 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Hessar.....	201
Figure 109 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage El Himmer.....	202
Figure 110: Analyse graphique des données pluviométriques - poste barrage Mazer.....	203
Figure 111 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Mazer.....	204

Figure 112: Analyse graphique des données pluviométriques - poste El Gara.....	205
Figure 113 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique El Gara.....	206
Figure 114: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=12h.....	208
Figure 115: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=6h.....	208
Figure 116: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=1h.....	208
Figure 117: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=0.5h.....	209
Figure 118: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II).....	225
Figure 119: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II).....	225
Figure 120: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II).....	226
Figure 121: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité II).....	226
Figure 122: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II).....	227
Figure 123: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II).....	227
Figure 124: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II).....	228
Figure 125: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité II).....	228
Figure 126: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I).....	229
Figure 127: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I).....	229
Figure 128: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I).....	230
Figure 129: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité I).....	230
Figure 130: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I).....	231
Figure 131: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I).....	231
Figure 132: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I).....	232
Figure 133: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4 ^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité I).....	232

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ABHBC	: Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia
ABHS	: Agence du bassin hydraulique de Sebou
AMC	: Condition d'humidité de sol (Antecedent Moisture Condition)
ASCE	: American Society of Civil Engineers
ASTER	: Radiomètre spatial avancé à émission et réflexion thermiques (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)
CN	: Coefficient d'indexation des sols (Curve Number)
CRTS	: Centre Royal de Télédétection Spéciale
DMN	: Direction de la Météorologie Nationale
DRPE	: Direction de la Recherche et de la Planification de l'Eau
GDEM	: Carte d'élévation numérique globale (Global Digital Elevation Map)
HEC	: Centre de modélisation hydrologique aux USA (Hydrologic Engineering Center)
HMS	: Système de modélisation hydrologique (Hydrologic Modeling System)
IDF	: Intensité-Durée-Fréquence
IQR	: Intervalle interquartile (Interquartile Range)
ISWS	: Service des études sur l'eau de l'État de l'Illinois (Illinois State Water Survey)
METI	: Ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie (Ministry of Economy, Trade and Industry)
MIET	: Durée minimale entre les averses (Minimum Inter-Event Time)
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
NASA	: Administration Nationale de l'Espace et de l'Aéronautique aux USA (National Aeronautics and Space Administration)
NGA	: Agence Nationale de Renseignement Géospatial aux USA (National Geospatial-Intelligence Agency)
NGM	: Niveau Général du Maroc
NOAA	: Administration nationale océanique et atmosphérique aux USA (National Oceanic and Atmospheric Administration in USA)
NRCS	: Service de conservation des ressources naturelles aux USA (Natural Resources Conservation Service), anciennement appelé SCS
ONCF	: Office National des Chemins de Fer
ORMVAG	: Office Régional de Mise en Valeur Agricole du Gharb
PNI	: Plan National de protection contre les Inondations
SARA	: Spatial Analysis of surface Runoff in ArcGis
SCS	: Service de Conservation de Sol aux USA (Soil Conservation Service)
SMBA	: Sidi Mohamed Ben Abdellah
SRTM	: Mission de la navette de topographie radar (Shuttle Radar Topography Mission)
USA	: Etats Unies d'Amériques
USACE	: Corps des ingénieurs de l'armée aux USA (United States Army Corps of Engineers)
USDA	: Département de l'agriculture aux USA (United States Department of Agriculture)
USSCS	: Service de Conservation de Sol aux USA (United States Soil Conservation Service)

INTRODUCTION

Tout projet de protection contre les inondations, d'aménagement des ouvrages hydrauliques au niveau des cours d'eau ou d'évacuation des eaux pluviales se base généralement sur la pluie comme intrant déterminant. Le type et le détail de l'information concernant cet intrant varie d'un projet à un autre en fonction des données de base disponibles, de type d'aménagement envisagé, de la taille du bassin versant concerné, des méthodes de calcul hydrologique utilisées, du calcul hydraulique prévu (régime permanent ou transitoire) et de la précision recherchée.

Un nombre important des études hydrologiques, dans le contexte rural ou périurbain, qui se font dans le contexte marocain se base principalement sur :

- L'information ponctuelle des pluies journalières disponibles, qui se caractérisent en général par des séries d'observations relativement longues ;
- Les données de débits journaliers maxima annuels et/ou des débits instantanés maxima annuels, dont la longueur des séries est généralement moins importante et qui, surtout, sont estimés avec une précision relativement faible compte tenu de l'absence de jaugeages en très hautes eaux au droit de la plupart des stations hydrométriques.

Dans le contexte marocain, la plupart des méthodes de calcul hydrologique d'assainissement ou des crues se basent sur l'information de pluie comme intrant climatologique principal voire parfois unique. En effet, la précipitation est mesurée en de nombreux points du territoire depuis assez longtemps, alors que les mesures de débits sont beaucoup plus éparses et plus récentes, donc quelques fois absentes au droit du site visé et même sur l'ensemble du bassin versant concerné.

Ainsi, plusieurs études hydrologiques utilisées en assainissement pluvial ou dans les études des crues s'appuient sur des modèles Pluie-Débit pour générer des hydrogrammes de débits synthétiques. Des hypothèses sont alors prises pour le type d'hyétochrome de la pluie de projet adoptée (Huff, SCS, Chicago, double triangle, etc.). Les durées des hyétochromes adoptés sont généralement de 4h, dans l'urbain, et 24 h pour les bassins versants ruraux ou périurbains.

Ces choix sont justifiés parfois par la taille du bassin versant, le temps de concentration et par le niveau de sécurité requis pour l'ouvrage considéré. Ces choix impactent fortement les résultats de dimensionnement notamment quand il s'agit d'ouvrages de rétention. Ces

hypothèses sont rarement justifiées ou confrontées aux caractéristiques des pluies instantanées observées dans le contexte marocain.

En outre, quelles que soient la qualité et la densité du réseau de stations pluviométriques disponibles, plusieurs questions se posent au concepteur lors de développement des modèles Pluie-Débit destinés aux études des crues ou d'assainissement des eaux pluviales. On cite à titre d'exemple :

- Comment déjà sélectionner les averses permettant une analyse représentative des pluies instantanées dans une zone ?
- Qui sont les durées des averses historiquement observées et leurs lames d'eau maximales tenant compte des pluies instantanées enregistrées au niveau des pluviomètres automatiques existants ? Et est-ce que les durées des averses observées sont relativement homogènes ?
- Comment passer des pluies instantanées, mesurées en un nombre limité de stations, aux valeurs de mêmes durées et mêmes périodes de retour aux autres postes où n'existent que des mesures journalières ?
- Quel type d'hyétochrome synthétique adopter pour les études hydrologiques ? et comment adapter les hyétochromes synthétiques développés dans certains pays du monde à notre contexte marocain ?

Ces quelques exemples de questionnement mettent en évidence les difficultés d'appréhension des précipitations et de leurs répartitions tant spatiales que temporelles. Le passage des précipitations aux écoulements générées pose aussi des questions encore plus sensibles et délicates. Dès lors, une analyse détaillée des pluies instantanées s'impose pour connaître leurs caractéristiques réelles, permettra d'orienter et de contribuer aux choix des hypothèses reflétant la réalité des hyétochromes observés.

Dans ce sens, plusieurs pays dans le monde sont largement avancés sur l'analyse des pluies instantanées en s'appuyant sur des bases de données souvent largement plus étendues que celles disponibles au Maroc (Arnell et Melin, 1984; Rivard, 1996; Asquith et al., 2004; Williams-Sether et al., 2004; Azli et Rao, 2010; Dolšak et al., 2016). En se référant à ces expériences et à plusieurs recherches menées partout dans le monde, nous veillons à étendre certaines analyses au contexte marocain.

Les travaux de cette thèse concernent la zone d'action de l'Agence du Bassin Hydraulique du Bouregreg et de la Chaouia (ABHBC) retenue comme une zone pilote dans le contexte marocain. Ce choix est justifié par l'importance économique et administrative qui constitue cette zone dans le tissu national, par la croissance rapide des enjeux liés à l'aléa inondation dans la zone, et par la disponibilité des séries des pluies instantanées provenant d'un réseau de télémesure récent dont la mise en place a débuté dans l'année 2008.

Ainsi, le premier objectif de la thèse s'intéresse à une compréhension des distributions temporelles des pluies instantanées au niveau de la zone d'étude. Cette étape est complètement différente aux analyses standards qui se font au Maroc et qui se limitent à l'élaboration des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) correspondant aux pluies instantanées. Cette analyse concerne la durée des averses observées, leurs lames d'eau, leurs quartiles ainsi que la répartition saisonnière des averses. Malgré le nombre limité des points de mesures existants, la répartition spatiale de certains paramètres est également analysée. Les averses analysées sont sélectionnées selon des critères bien spécifiées à travers une revue de littérature concernant des recherches similaires.

Le deuxième objectif de la thèse vise le développement d'une pluie de projet synthétique adaptée à la zone d'étude. Ainsi, une revue de littérature est nécessaire afin de connaître les pluies de projet synthétiques les plus utilisées dans le monde, de comprendre leurs origines et de s'arrêter sur les retours d'expérience relatives à leur mise en application. Ce travail permet de statuer sur la pluie synthétique à adapter à la zone d'étude et par la suite l'élaboration d'un processus à suivre pour le développement d'une pluie de projet synthétique local. Le développement d'une pluie synthétique se base bien évidemment sur les conclusions tirées à partir de l'analyse des pluies instantanées et principalement des critères cités dans le paragraphe précédent. Des discussions et conclusions sont dressées afin d'orienter l'utilisation de la pluie synthétique développée.

Le troisième objectif concerne la mise en application de la pluie de projet synthétique développée à travers l'élaboration d'un modèle hydrologique des principaux bassins versant dans la zone d'étude. Ce modèle permet d'analyser l'impact sur les débits de pointe en comparaison avec les pluies synthétiques les plus utilisées dans la zone.

Cette thèse contribue au développement des méthodes scientifiques adaptées au contexte climatique Marocain et aux données disponibles à ce jour, pour contribuer au mieux au bon dimensionnement des différents ouvrages hydrauliques capables de répondre à la demande

grandissante d'assainissement pluvial, de protection contre les inondations ou d'aménagement des ouvrages hydrauliques au niveau des cours d'eau.

Dés lors, la thèse est scindée en 4 chapitres principaux permettant de répondre aux objectifs présentés dans les paragraphes suivants et de détailler les travaux réalisés. Ces chapitres sont les suivants :

- Le chapitre 1 est une étude bibliographique présentant un bref descriptif du contexte climatique au Maroc : la problématique d'inondation avec l'historique des événements marquants, vécus pendant les deux dernières décennies (2000-2020), et un aperçu sur les changements climatiques en relation avec les précipitations. Il décrit également la zone d'étude en termes de localisation géographique, de situation administrative, d'état du réseau hydrographie des grands bassins versants, de la géologie des zones homogènes, d'occupation des sols, d'aptitude des sols au ruissellement, de la répartition spatiale des pluies annuelles et de caractéristiques des bassins versants identifiés.
- Le chapitre 2 est dédié à une analyse des caractéristiques des pluies instantanées enregistrées dans la zone d'étude à travers les averses enregistrées. Ce chapitre est entamé par une revue de littérature des principaux critères permettant la sélection et la classification des averses. Il porte aussi sur la présentation des données de pluie instantanées disponibles et le contrôle de leur qualité ainsi que l'exploitation des conclusions de la revue de littérature pour caractériser les pluies instantanées retenues.
- Le chapitre 3 est consacré au développement d'une pluie de projet synthétique adaptée à la zone d'étude. Une revue de littérature a permis de comprendre les méthodes les plus utilisées pour la génération des pluies synthétiques et de statuer sur la méthode de Huff pour adaptation à la zone d'étude. En se basant sur les résultats du chapitre 2, un processus d'élaboration de ces courbes a été adopté en permettant leur développement local.
- Le chapitre 4 constitue une mise en application des pluies synthétiques de Huff développées, dans le chapitre 3, à travers un modèle hydrologique couvrant les grands bassins versants et les zones connues par leur problématique d'inondation dans la zone d'étude. Les résultats provenant de ces courbes ont été également comparées avec ceux d'autres cas de pluies synthétiques utilisées dans le contexte marocain.

CHAPITRE I. CONTEXTE GENERAL ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1. GENERALITES SUR LE CONTEXTE CLIMATIQUE AU MAROC

I.1.1. Climat au Maroc

Le Maroc est caractérisé par un climat très différent selon les régions. En effet, les zones littorales bénéficient d'un climat tempéré, alors que le climat est désertique dans le Sud et l'est du pays. Le climat marocain comporte également beaucoup de nuances: méditerranéen au Nord, océanique à l'Ouest, continental à l'intérieur des terres et saharien au Sud (Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2016).

Cette position météorologique combinée à son extension latitudinale et sa diversité géographique lui confèrent un climat allant progressivement du type semi-humide au Nord à aride puis désertique au Sud, une pluviométrie modeste ne dépassant pas 400 mm en total annuel dans la plupart des cas, avec une fourchette de variations allant de moins de 100 mm (au Sud) à 600 mm (au Nord). Les pluies annuelles dans l'extrême Nord et les hautes montagnes atteignent ou dépassent même les 800 mm. La forte variabilité spatiale est une caractéristique des précipitations au Maroc avec un gradient prononcé du Nord vers le Sud et le Sud-est (DRPE, 2018). La saison pluvieuse s'étend généralement de septembre à avril alors que les mois d'été sont secs avec une pluviométrie faible et à caractère orageux en général, pouvant engendrer des pluies parfois très fortes en des intervalles de temps relativement courts (Driouech, 2010).

La configuration du relief marque fortement le climat du Maroc : pluviométrie erratique, vagues de froid et de chaleur avec des sécheresses imprévisibles de plus en plus fréquentes, autant d'éléments qui se répercutent sur la vie économique et sociale du pays. Le pays présente de vastes régions arides et semi-arides caractérisées par de fréquentes crises climatiques induisant un écosystème fragile (Ministère Délégué Chargé de l'Environnement, 2009).

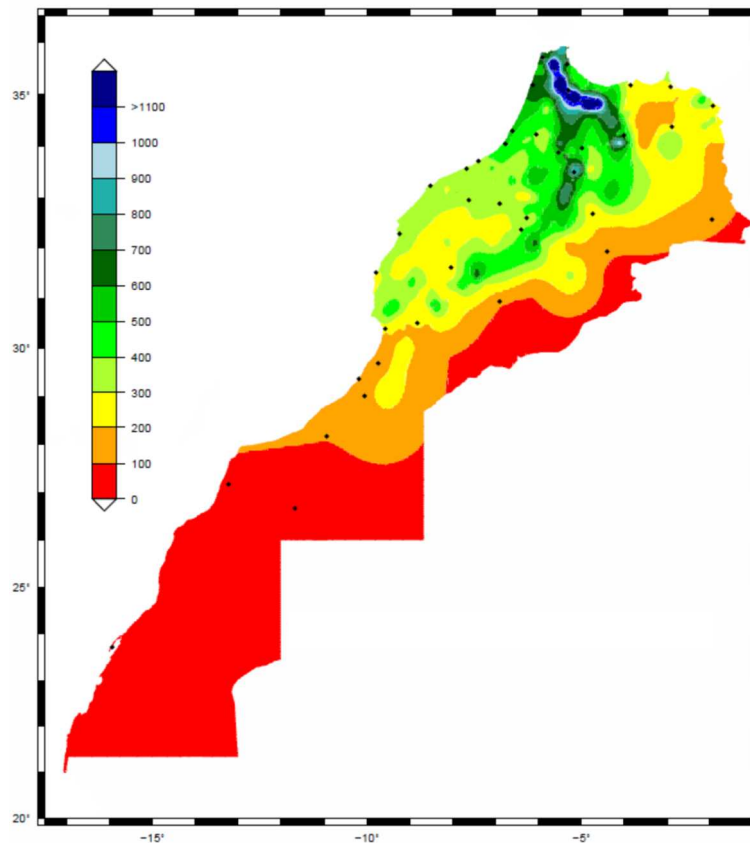


Figure 1: Pluviométrie annuelle moyenne au Maroc calculée sur la période 1971-2000 (Driouech, 2010)

I.1.2. Ressources en eaux de surface

Au Maroc, les écoulements superficiels sont tributaires des précipitations. Les crues, généralement violentes et rapides, constituent l'essentiel des apports des cours d'eau. En moyenne, elles sont enregistrées sur les périodes de 10 à 20 jours pour les bassins du Sud et de 20 à 30 jours pour les bassins Nord (Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat, 2013).

Le potentiel des ressources en eau des principales branches régularisées et modélisées pour évaluer les bilans hydrauliques, est évalué, en moyenne, à environ 15 milliards de m³ (DRPE, 2019).

La grande disparité régionale des précipitations induit également une grande variabilité spatiale des écoulements d'eau de surface (Figure 2). Les écoulements de surface sont caractérisés par une très grande variabilité annuelle et interannuelle marquée par l'alternance de séquences humides et sèches, avec quelques pics exceptionnellement humides et secs (Bouaicha et Benabdelfadel, 2010).

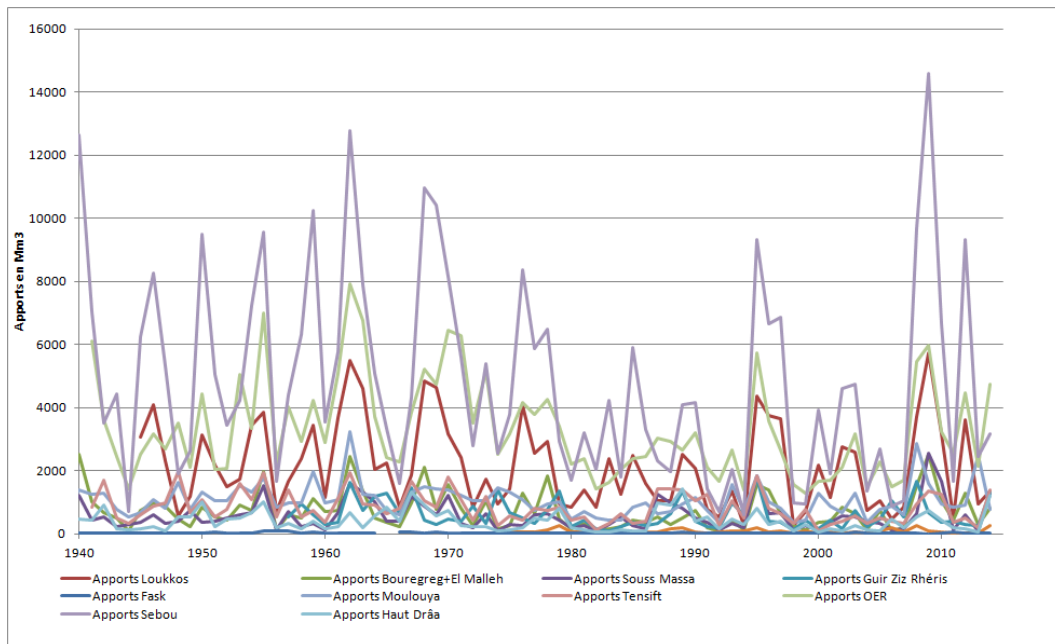


Figure 2: Évolution des apports en eau de surface par bassin hydraulique en milliards de m^3 entre 1940 et 2016 (DRPE, 2019)

La forte disparité spatiale des précipitations fait que les apports de surface des bassins subissent une grande variabilité spatiale. Les apports varient de quelques centaines de Mm^3 au niveau des bassins arides (bassins de Guelmim et Sakia El Hamra Oued Dahab) à des milliards de m^3 au niveau des bassins les plus arrosés au Nord et au centre (bassin de Sebou, bassins Loukkos et Tangérois). Ces bassins dont la superficie ne représente que 8% de la superficie globale contribue avec un volume d'environ 45% des apports moyens. La Figure 3 représente la répartition des eaux de surface par bassin hydraulique au Maroc.

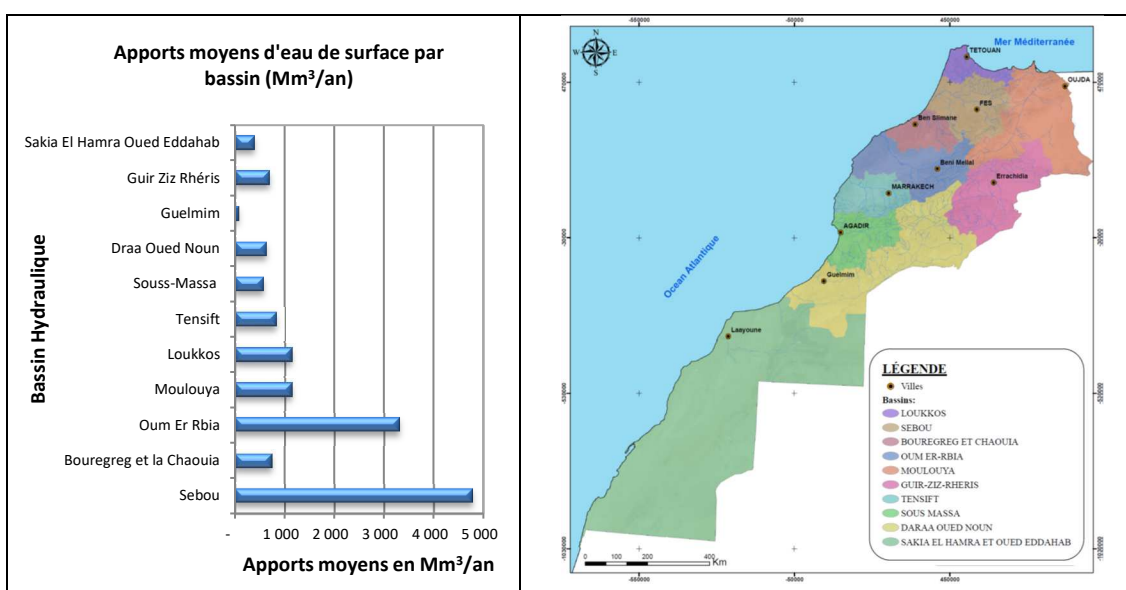


Figure 3: Répartition des apports d'eau de surface par bassins hydrauliques au Maroc (DRPE, 2019)

I.1.3. Problématique d'inondation

A l'instar de plusieurs pays du pourtour méditerranéen, le Maroc est soumis fréquemment à des événements pluvieux forts engendrant des crues importantes qui touchent plusieurs zones du territoire national et provoquent souvent des dégâts importants. Les pertes concernent les vies humaines, les habitats, les terrains agricoles, les infrastructures et sont plus ressenties pendant les dernières années. Ceci est justifié à la fois par l'augmentation de l'occurrence de forts orages localisés causant des crues rapides et violentes et par l'occupation des sols vulnérables aux inondations selon le Conseil Supérieure de l'Eau et du Climat (2013).

Les statistiques, entre 1960-2015, montrent que les inondations constituent la principale catastrophe d'origine naturelle au Maroc tenant compte du nombre des événements enregistrés et la population totale affectée. En effet, 70 % des événements vécu au niveau national sont les inondations qui ont le plus affecté de personnes (OCDE, 2016).

Selon le premier Plan National de protection contre les Inondations (PNI), 50 communes ou sites parmi 391 investigués, ont été retenus comme présentant des risques humains, et économiques forts importants (DRPE, 2013).

Les paragraphes suivants dressent une liste des principales inondations historiques vécues à partir de l'années 2000 au Maroc :

- En Novembre 2002 : Cet événement a touché d'importants centres urbains notamment les villes de Mohammedia (Photo 1), Casablanca, Berrechid, Settat et l'aéroport Mohammed V. La période de retour de la crue ayant inondé la ville de Mohammedia a été estimée à 65 ans en amont du barrage El Mellah (Banque Mondiale, 2011).



Photo 1 : Inondations de novembre 2002 à la ville de Mohammedia (DRPE, 2013)

- En Novembre 2003 : les inondations ont concerné principalement les villes de Khénifra, Nador, Zaio, Al Hociema où des dégâts matériels (maisons et infrastructures détruites) ont été recensés. A Bni Boufrah dans la province d'Al Hociema, des pertes humaines ont été enregistrées (DRPE, 2013).
- En Août 2006 : Les fortes pluies dans la vallée de l'Ourika, à la région de Marrakech, ont causé de dégâts matériels (une centaine de véhicules hors d'usage, des dizaines d'habitations inondées, des routes endommagées sur plusieurs dizaines de kilomètres...) et des pertes humaines.
- En Octobre 2008 : Cet événement a particulièrement touché le Nord du pays, avec notamment le Tangérois (avec un record de 176 millimètres de pluie) et le bassin de la Moulouya avec tout particulièrement la région de Nador (Photo 2). Des débits dépassant 2000 et 5000 m³/s ont été observés respectivement sur les oueds Kert et Moulouya. Plusieurs dizaines de victimes ont été déplorés à travers le pays.



Photo 2 : Photos des inondations d'octobre 2008 à Nador (DRPE, 2013)

- En Février 2009 : Des débordements importants ont provoqué l'interruption des activités économiques et la détérioration des infrastructures dans la plaine du Gharb. Les dégâts estimés dépassent le milliard de Dirhams de dommages (OCDE, 2016).
- En Janvier à Mars 2010 : Lors de la crue qui a touché principalement la plaine du Gharb (Figure 4), environ 170 douars ont été touchés par inondations et 23 000 personnes ont été évacuées. L'impact sur la production agricole était énorme, les volumes débordés ont été très importants et ont occasionné l'inondation de 135 000 hectares environ (ORMVAG, 2013). La circulation, au niveau plusieurs routes, a été perturbée. Les voies traversées par les couloirs d'inondations ont été complètement submergées. La voie d'ONCF liant Sidi Yahia à Belkciri, qui était en cours de construction, a été fortement endommagée (Photo 3).



Photo 3 : Inondations de Mars 2010 dans la plaine du Gharb

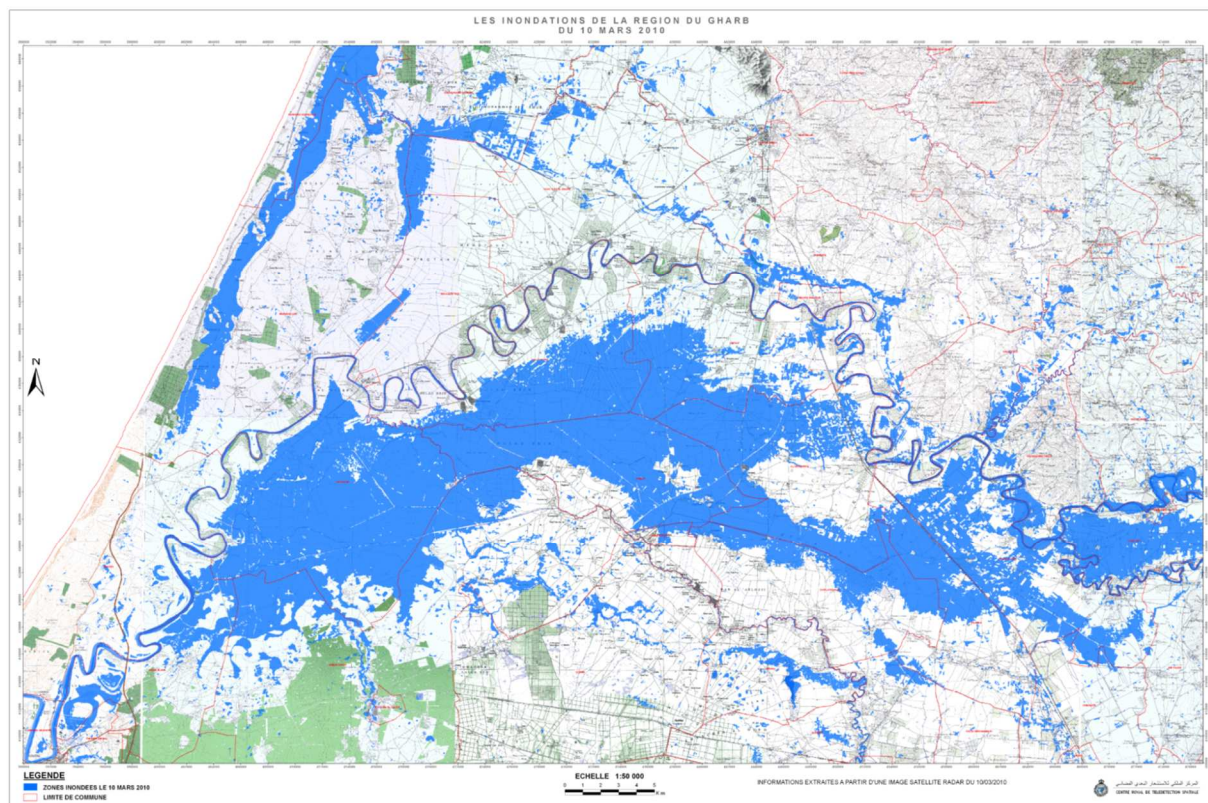


Figure 4: Zones inondées dans la plaine du Gharb lors de la crue de Mars 2010- Image satellitaire du 10/03/2010 (ABHS, 2010)

- En Novembre 2010 : Des fortes pluies se sont abattues sur plusieurs régions au Maroc (Casablanca, Rabat, Salé, Khénifra, Ouarzazate, Al Hoceima...). En plus des pertes humaines (plus de 35 morts), ces précipitations ont également causé d'importants dégâts matériels. Au niveau de la ville de Casablanca, plusieurs infrastructures de base qui traversent l'oued Bouskoura et les habitations avoisinantes ont été touchées (Photo 4). Aussi, certains quartiers au niveau de la ville ont été complètement inondés.



Photo 4 : Inondations de novembre 2010 à Casablanca

- En Août 2011 : Des pluies torrentielles se sont abattues le mercredi 25 Août 2011 sur la ville de Khénifra, des crues dévastatrices ont généré des dégâts importants dont une centaine de maisons endommagées (DRPE, 2013).
- En Novembre 2014 : Les inondations ont touché de larges secteurs du Sud marocain. Des précipitations exceptionnelles ont été enregistrées dans la province de Guelmim (Photo 5). Les débits observés étaient généralement supérieurs à la crue centennale. Les crues de novembre 2014 ont engendré des dégâts très importants témoignant d'un sinistre ayant touché presque toute la Province de Guelmim. Les dégâts humains ont été chiffrés à 27 morts et de grands dégâts matériels constatés dans les différents bassins versants, dont notamment les coupures de circulation, suite aux fortes dégradations du réseau routier et ouvrages de franchissement, paralysant les habitants pendant plusieurs jours sur plusieurs axes routiers (DRPE, 2015) .



Photo 5 : Inondations de novembre 2014 à Guelmim

- En Février 2017 : Des averses orageuses localement fortes se sont abattues sur les provinces de Rabat, Skhirat-Témara, Salé, Kénitra, Casablanca, Mohammedia, Sidi Bernoussi, Nouacer, Benslimane, Larache, Sidi Kacem, Sidi Slimane. La pluviométrie enregistrée à la station de Rabat-Salé a atteint la valeur record de 119 mm en 24h, la période de retour de cet événement est proche à la centennale. Ces pluies à caractère

exceptionnel, ont provoqué la submersion de la double voie de la route nationale n°6 dans le sens de Rabat-Meknès (Photo 6), accès principal à la ville de Rabat. Ces fortes précipitations ont généré des importants débordements au niveau des villes de Rabat et Salé.



Photo 6 : Inondations de février 2017 à Rabat et Salé

Cette liste n'a pas la prétention d'être pleinement exhaustive mais a pour objectif de mettre en lumière la répétition des phénomènes de crues pendant les deux dernières décennies et la prise en compte croissante que cette problématique doit impliquer.

L'examen des causes des inondations observées au Maroc a permis de déceler plusieurs facteurs voire des problématiques aggravants et amplifiants le risque d'inondation. La liste suivante résume les facteurs, sans qu'elle soit exhaustive, qui sont principalement selon le Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat (2013) :

- Le développement non contrôlé de l'urbanisation en zone inondable ;
- Le manque d'entretien des cours d'eau et des ouvrages hydrauliques existants, l'insuffisance de la capacité de transit des ouvrages de franchissement des cours d'eau et la couverture ou l'enterrement des cours d'eau notamment à la traversée des zones urbaines ;
- La non-différenciation des apports de bassins versants extérieurs et de l'assainissement pluvial ;
- La faiblesse du réseau de mesure pluvio-hydrométrique qui ne permet pas une bonne compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants notamment au moment des crues ainsi que la déficience de certains réseaux de télémessure intégrés existants ;
- L'insuffisance de la couverture des radars météorologiques de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) ainsi que la qualité et l'exactitude des informations

météorologiques produites par la DMN laissant le pays dépendant d'un réseau mondial ;

- Le manque de capacité en matière d'alerte et précisément les réseaux de prévision des crues en temps réel ainsi que l'intégration des données radars météorologiques dans les modèles hydrologiques ;
- Les politiques publiques mises en application demeurent insuffisantes en ce qui concerne la prévention et la résilience.

I.1.4. Aperçu sur les changements climatiques au Maroc

L'analyse de l'impact des projections des changements climatiques sur la pluviométrie dans plusieurs bassins hydrauliques marocains montre une majorité de tendances à la baisse des cumuls pluviométriques annuels au niveau de la quasi-totalité des bassins. Ces tendances ne sont, cependant, pas toutes significatives. Des hausses ont aussi été relevées mais non significatives, et concernent souvent les courtes périodes durant lesquelles les données sont incomplètes. En outre, les stations situées au Sud du pays montrent des tendances de signes variables. Sans grande surprise, les tendances de températures confirment l'évolution vers le réchauffement (DRPE, 2019).

En générale, les changements futurs de précipitations annuelles montrent des réductions au niveau de la moitié Nord du pays. Ces baisses vont de -10% à -20% pour le milieu du siècle. La moitié Sud du pays aurait aussi un climat moins humide en fin de siècle mais avec des réductions ne dépassant pas 10% (DRPE, 2018). D'ailleurs, les apports moyens enregistrés au niveau national durant la période 1981-2015 montrent globalement une baisse de l'ordre de 35.4% par rapport à ceux observé durant la période 1940-1980, soit deux fois le déficit pluviométrique (DRPE, 2019).

Des changements dans les aspects extrêmes de précipitations ont été aussi relevés notamment à travers une certaine accentuation de la sévérité de la sécheresse et une augmentation de sa persistance temporelle (hausse du nombre maximale de jours consécutifs secs) (Driouech, 2010; DRPE, 2018). Les études des extrêmes de précipitations dans le contexte marocain ne sont pas nombreuses comparativement à celles des températures et des précipitations moyennes vu probablement le manque ou la non accessibilité aux données à des échelles temporelles fines (DRPE, 2018).

I.2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Pour une bonne compréhension de la zone d'étude, plusieurs documents ont été consultés. Il s'agit principalement des articles et des études réalisées, au niveau national et dans la zone d'étude, par des institutions de recherche scientifique ou par plusieurs administrations ou établissements publics intervenant dans la zone. Ces documents ont été de grande utilité pour l'élaboration du présent chapitre.

I.2.1. Localisation géographique

L'aire de l'étude est la zone d'action de l'Agence du Bassin du Bouregreg et de la Chaouia (ABHBC), située au centre-Ouest du Maroc. Elle comprend les deux capitales administrative et économique du Maroc. C'est une zone qui connaît une importante dynamique urbaine et concentre la grande partie des activités économiques. Outre les capitales Rabat et Casablanca, les principales agglomérations sont : Salé, Témara, Ben Slimane, Settât, Ben Ahmed, Berrechid et Mohammedia. La Figure 5 présente la carte de situation géographique ainsi que les principales villes et unités hydrographiques dans la zone d'étude (ABHBC, 2006).

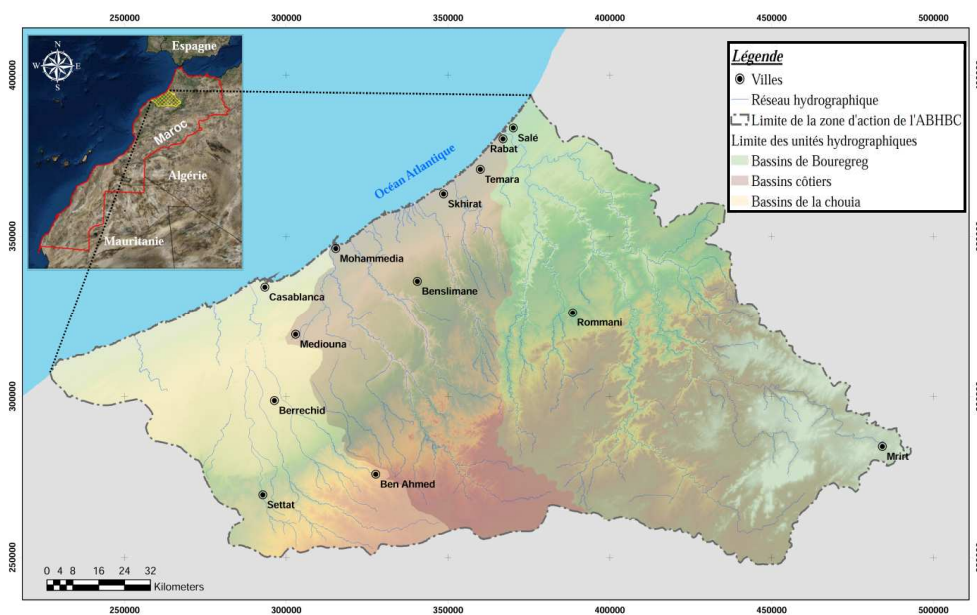


Figure 5: Localisation de la zone d'étude

Il s'agit principalement des unités hydrographiques suivantes :

- Le bassin versant de l'oued Bouregreg (10 210 km²) qui est le plus important sous bassin de la zone d'étude ;
- Les bassins côtiers atlantiques entre le bassin versant de l'oued Bouregreg et les oueds du plateau Settât-Ben Ahmed (5 415 km²), dont les principaux cours d'eau sont :

Yquem, Cherrat, Nfifekh et El Malleh. Ils se jettent, directement, dans l'océan atlantique entre Rabat et Casablanca ;

- Les bassins endoréiques de la Chaouia (4 845 km²).

I.2.2. Situation administrative

Selon le découpage administratif mentionné sur la Figure 6, la zone d'action de l'ABHBC concerne 5 régions :

- La région du Grand Casablanca, avec les préfectures d'arrondissement de Casablanca et les provinces de Mohammedia, Nouaceur et Mediouna ;
- La région de Rabat-Salé, Zemmour, Zaers, avec les provinces de : Rabat, Salé, Skhirate Témara et Khemisset ;
- La région de Chaouia Ouardigha, avec les provinces de Benslimane, Settat, Berrechid, et Khouribga ;
- La région de Doukkala Abda avec une partie de la province d'El Jadida ;
- La région de Meknès Tafilalet avec une partie de la province de Khénifra.

Elle s'étend sur une superficie totale de 20 470 km², soit près de 2.8% du territoire marocain, répartie sur les Wilayas de Casablanca, Rabat-Salé et Settat ainsi que les provinces de Benslimane, El Jadida, Khouribga, Khénifra, Khémisset et Berrechid. La Figure 6 présente le découpage administratif de la zone d'action de l'ABHBC.

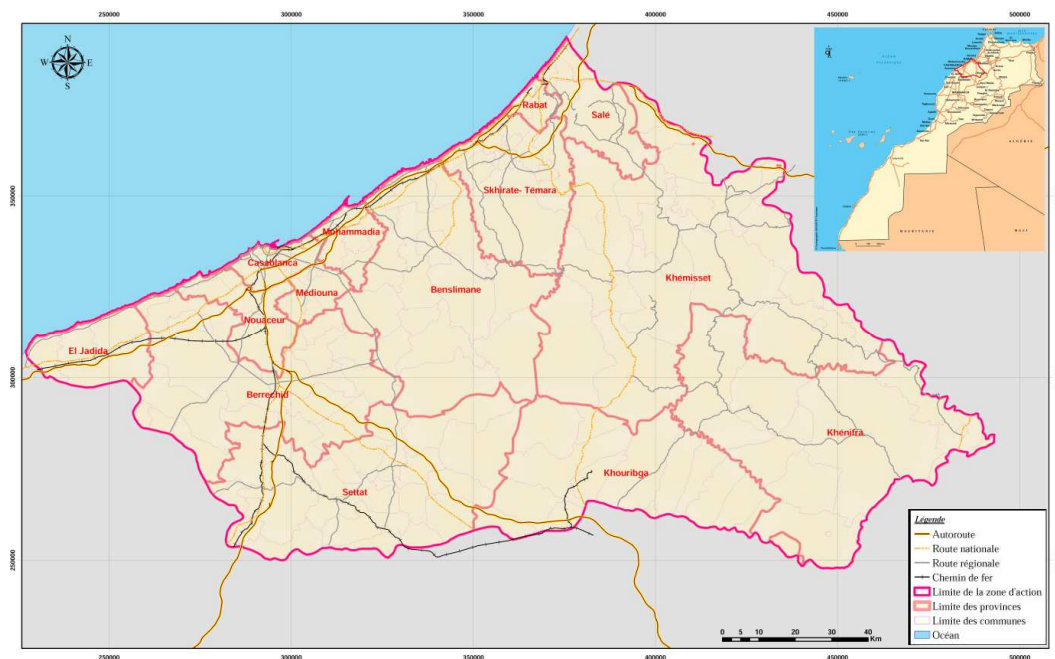


Figure 6: Découpage administratif de la zone d'étude

I.2.3. Réseau hydrographique

La zone d'action de l'ABHBC, se divise en trois grandes unités hydrographiques qui sont :

- Le bassin du Bouregreg

Le bassin versant du Bouregreg est formé par deux Oueds principaux : l'Oued Bouregreg avec un bassin versant de 4 199 km² et l'Oued Grou avec un bassin versant de 5 617 km². Le barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah (SMBA) se situe au niveau de leur confluence à environ 20 km de l'embouchure atlantique. Ses principaux cours d'eau sont :

- o L'Oued Bouregreg : il présente une longueur de 239 km entre l'amont du bassin et le barrage SMBA. Ses principaux affluents sont le Boulahmayel (avec un bassin versant de 1 052 km²) et le Kiksou (avec un bassin versant de 1 112 km²) dans la partie amont du bassin et l'oued Tabahart (avec un bassin versant de 1 070 km²).
- o L'Oued Grou : il présente un linéaire de 280 km entre l'amont du bassin et la confluence avec l'Oued Bouregreg. Son principal affluent est l'Oued Korifla (avec un bassin versant de 1 834 km²). L'Oued Korifla a une longueur de 124 km entre l'amont du bassin et la confluence avec l'Oued Grou. Son principal affluent est l'Oued Mechraa (avec un bassin versant de 835 km²).
- o L'Oued Akrach : il conflue avec le Bouregreg à l'aval du barrage SMBA, à moins de 20 km de l'embouchure atlantique et draine un bassin versant de 157 km².

- Les bassins côtiers

Ils comprennent un ensemble de cours d'eau, dont les plus importants sont les bassins des cours d'eau Yquem, Cherrat, El Malleh, Nfifekh, Bouskoura et Merzeg. Les superficies de ces bassins versants sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1: Superficies des bassins versants des principaux cours d'eau des bassins côtiers

Oued	Point de délimitation	Surface du BV (km ²)
Yquem	Station Cheikh Reguig	417
Cherrat	Station Skhirate	540
Nfifekh	Station Feddan Taba	656
El Malleh	Barrage El Malleh aval	2035
Merzeg	Embouchure	376
Bouskoura (*)	Départ du SCO	208
Howera	Embouchure	559

(*) : L'oued Bouskoura est un cours d'eau endoréique ; un super-collecteur (SCO) a été aménagé pour l'évacuation de ces crues directement vers l'océan atlantique.

- Les bassins de la Chaouia

Cet ensemble regroupe :

- o Les bassins des oueds : Zririf, Al Fayda, Chouiref et Ayyada qui dominant la province de Mediouna (partie Nord de la plaine) ;
- o Les bassins des oueds El Himer, Mazer, Tamdrost, Touijine et Bou Moussa qui dominant la plaine de la Chaouia. Les superficies de ces bassins versants sont récapitulées dans le Tableau 2.

Tableau 2: Superficies des bassins versants des principaux cours d'eau du bassin de la Chaouia

Oued	Point de délimitation	Surface du BV (km ²)
Chouiref	Sortie des reliefs	120.5
Ayyada	Sortie des reliefs	105
Zririf	Sortie des reliefs	32
Fayda	Sortie des reliefs	62
El Himmer	Barrage El Himmer	188
Mazer	Barrage Mazer	181
Tamdrost	Barrage Kodiat El Guarn	216
Tamdrost	Barrage Tamdrost	366

La Figure 7 présente les principaux cours d'eau constituant le réseau hydrographique de la zone d'action de l'ABHBC.

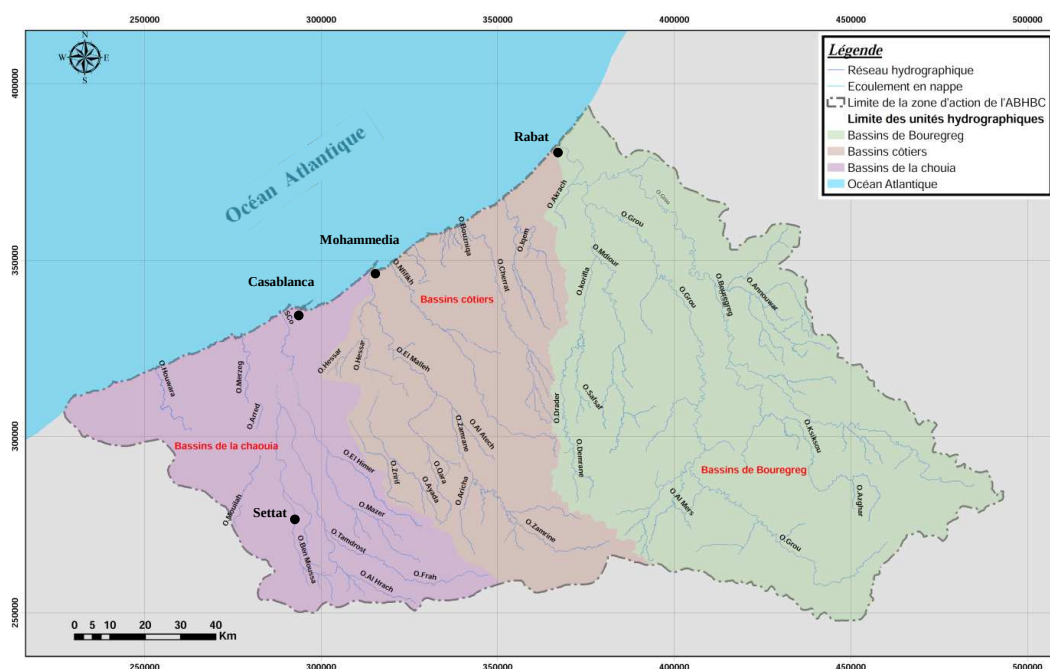


Figure 7: Principaux cours d'eau du réseau hydrographique de la zone d'action de l'ABHBC

I.2.4. Topographie

La zone d'étude dispose d'un cadre géographique et topographique très varié, composé principalement de cinq ensembles naturels :

- Les montagnes du moyen Atlas ;
- Le plateau d'Oulmès Zaêrs ;
- Le plateau des phosphates ;
- Les bassins côtiers ;
- La plaine de la Chouia.

Les caractéristiques des cinq zones peuvent révéler que la zone de montagne qui s'étend sur le haut Bouregreg, se présente sous forme d'un ensemble de collines et de montagnes qui jalonnent le causse moyen Atlasique depuis la région d'El Hajeb jusqu'au plateau des phosphates au Sud. Cette zone se caractérise par les plus hautes altitudes dans la zone d'action de l'ABHBC et qui atteignent plus que 1600 mNGM au Sud de Aguelmous (Fadil, 2013). Quant aux plateaux d'Oulmès-Zaêrs, ils s'étendent sur le moyen Bouregreg et constituent la jonction entre la zone de montagne et la zone côtière. Un réseau de vallées profondes y'a entaillé (Bounouira, 2012).

Dans la partie Sud-Ouest de la zone d'étude, le plateau des phosphates couvre le couloir Settât-Khouribga-Oued Zem. C'est un ensemble de plateaux étagés légèrement inclinés vers le Nord, il concerne les bassins versants situés en amont de la plaine de la Chaouia dont les altitudes varient généralement de 450 à 850 mNGM (Archambault et al., 1975). Alors qu'entre le plateau des phosphates au Sud-Est et l'Atlantique à l'Ouest, se présente comme une région à topographie basse, dont l'altitude varie de zéro mNGM au niveau de la mer à près de 400 à 450 mNGM au pied des premiers contreforts du plateau de Settât. La topographie est plane et tabulaire légèrement vallonnée. La monotonie plane du paysage est rompue vers le Nord de la zone par les vallées évasées des oueds Tamdrost et El Himer, qui prennent naissance sur ce plateau et qui débouchent dans la plaine endoréique de Berrechid (basse Chaouia) où ils se perdent. Au niveau du bassin versant de l'oued Merzeg, au Sud-Ouest de l'ABHBC, la faible pente des terrains a favorisé la formation des dépressions naturelles contribuant au laminage des ruissellements naturels (Ruhard, 1975a).

Enfin, les bassins côtiers constituent la jonction entre les plateaux de Zemmour-Zaêrs et la plaine de la Chaouia. Ils se présentent sous forme de plateaux légèrement inclinés vers le

Nord. Et dans sa partie Sud, cet ensemble couvre des terrains colineaux. La topographie plane ondulée de cette zone est rompue par les vallées encaissées des oueds côtiers (Cherrat, Ykem, Nfifekh et Malleh) (ORSTOM, 1982).

Le Modèle Numérique de Terrain issu de la mission Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution de 30 m environ est présenté dans la Figure 8. Il reflète les caractéristiques topographiques des cinq ensembles naturels précités.

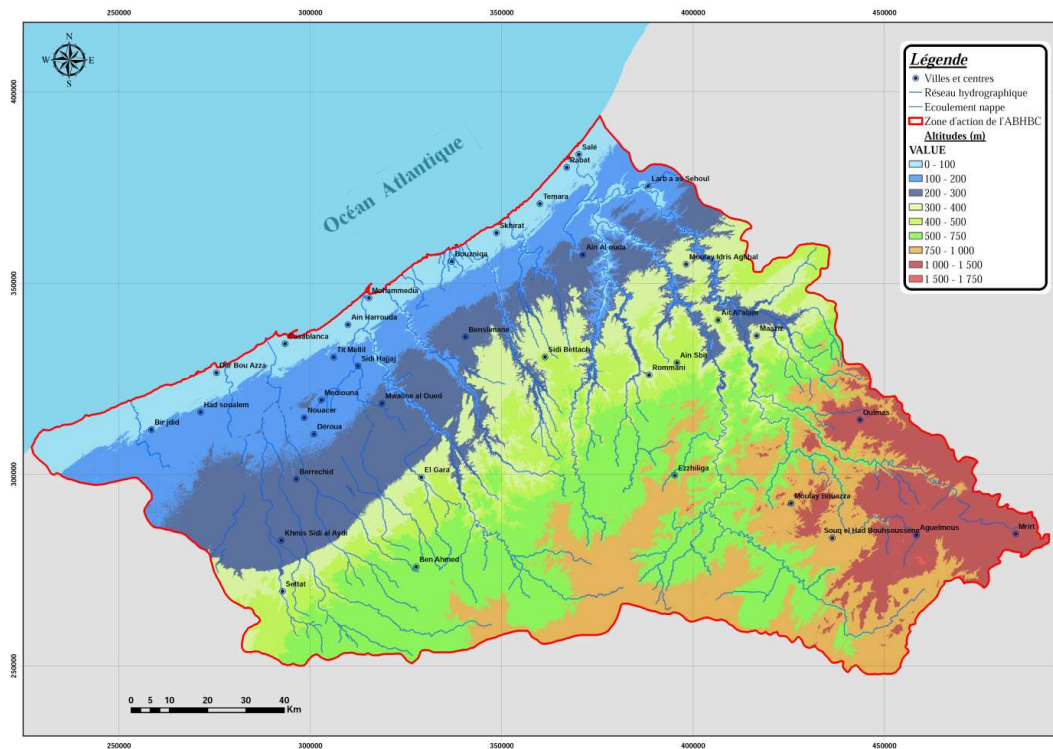


Figure 8: Modèle numérique de terrain de la zone d'action de l'ABHBC

I.2.5. Géologie

Les caractéristiques géologiques relatives aux reliefs de la zone d'action de l'ABHBC peuvent être subdivisées en quatre zones homogènes (Figure 9) :

a. La zone côtière

La zone côtière qui occupe une bande parallèle à la côte, large de 10 à 30 km (Combe et al., 1975), correspondant à un ensemble de bas plateaux inclinés vers l'Océan (Amraoui, 1999). Elle s'étend de Salé jusqu'aux environs d'Azemmour, au Sud-Ouest de Bir Jdid, sur une longueur d'environ 200 km. Cette zone côtière est constituée de dunes consolidées qui ne

dépassent pas 200 m d'altitude prenant l'aspect de collines allongées parallèlement au rivage. Les dunes sont constituées de formations gréseuses et sableuses plio-quaternaires de quelques dizaines de mètres d'épaisseur reposant sur un substratum imperméable (schistes primaires ou marnes miocènes) (Combe *et al.*, 1975; Amraoui, 1999; Najib, 2014). Ces formations sont absentes entre l'oued Ykem et Nfifekh où affleurent des schistes et quartzites primaires (El Hassani, 1994).

b. Zone de la basse Chaouia

Cette zone correspond à une plaine intercalée entre la zone côtière au Nord et le plateau de la haute Chaouia au Sud. La transition avec la haute Chaouia est brutale et matérialisée par une flexure sub-verticale de plus de 100 m de dénivelée alors que celle avec la zone côtière est douce et peu remarquable (ABHBC, 2017). Cette zone constitue presque une continuité de la zone côtière vers l'intérieure du pays. Elle constitue la continuité des plaines atlantiques des Abdas et des Doukkalas. Depuis le Pliocène, la plaine de Berrechid constituait un bassin subsidient qui a été comblé par des formations marines et continentales du Quaternaire (Ruhard, 1975b).

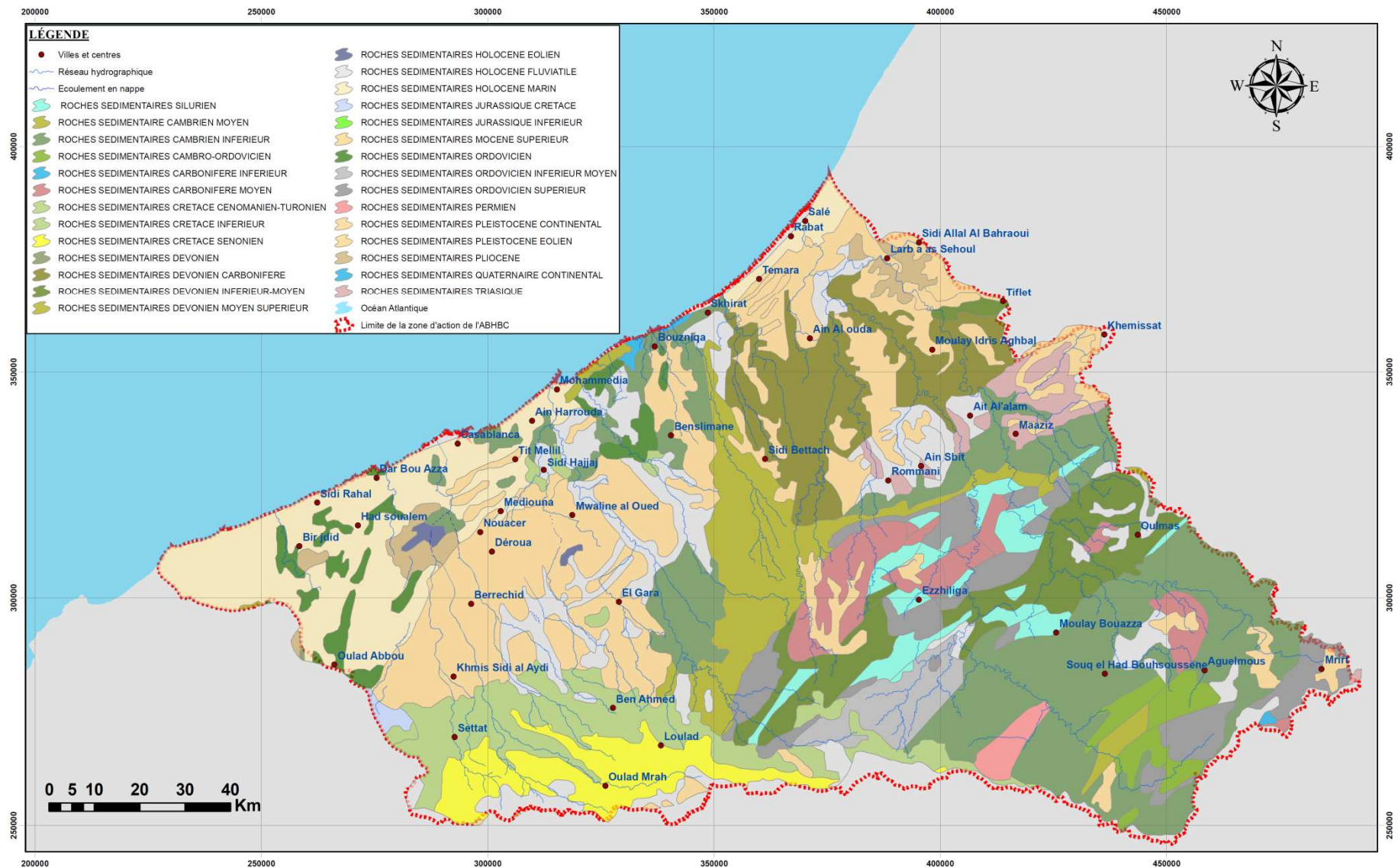
c. Zone du plateau de Settât Ben Ahmed (haute Chaouia)

Cette zone correspond au prolongement vers le Nord du Plateau des phosphates. Elle occupe la partie Sud-Ouest de la zone d'étude. A l'Est, elle est dominée par le massif central. Vers le Nord-Ouest, elle surplombe la plaine de Berrechid (basse Chaouia), dont elle est séparée par une flexure de 100 à 200 m de dénivelée (ABHBC, 2019). Les formations géologiques sont dominées par des calcaires et marno-calcaires à stratification horizontale du Crétacé : Cénomaniens et Sénoniens (El Gasmi *et al.*, 2014). Le Cénomaniens est constitué par une série de sables, grès tendres et argiles sableuses surmontés par des bancs calcaires dolomitiques résistants. Le Sénonien, se présentant sous forme de marnes et de marnes calcaires. Le Cénomaniens et le Sénonien sont séparés par une bande filiforme, large d'une centaine de mètres, du Turonien qui serpente ce plateau bien marquée dans le paysage par l'affleurement d'une dalle karstifiée calcaire-dolomitique (Bouqdaoui *et al.*, 2008; ABHBC, 2017).

d. Zone du Massif Central

Le massif central constitue un haut pays, dont l'altitude s'élève progressivement en allant vers l'intérieur du pays et dépasse 1000 m sur les hauts reliefs d'Oulmès, seulement le bassin

versant du Bouregreg occupe dans sa globalité environ 90% du massif central marocain (Bounouira, 2012). Les terrains paléozoïques forment l'essentiel du socle du Massif central (Pique, 1994). C'est un ancien plateau qui a été fortement entaillé par l'érosion depuis la fin du Primaire, après l'Orogenèse hercynienne. De profondes vallées étroites se sont individualisées. Les formations géologiques y sont formées essentiellement de schistes, grès et quartzites primaires (Ordovicien, Silurien, Dévonien et Carbonifère) (Zahraoui, 1994; ABHBC, 2006 ; Fadil, 2013). Les grès et quartzites très résistants constituent des crêtes rocheuses bien dégagées dans le paysage, alors que les schistes, très vulnérables à l'érosion, sont fortement disséqués par le réseau hydrographique. Les vallées sont très encaissées avec des terrasses très étroites. Des granites et des roches métamorphiques y affleurent essentiellement au niveau des massifs au Sud de Romani et à l'Ouest d'Oulmès. Des calcaires, d'âge essentiellement Dévonien, apparaissent dans des secteurs localisés de faible importance. Les dépôts quaternaires sont très limités en raison de l'étroitesse des vallées (ABHBC, 2019).



I.2.6. Occupation du sol

Les données d'occupation du sol qui couvre la totalité de la zone d'étude ont été collectée auprès de l'ABHBC en 2017. Ces données ont été préparées par le Centre Royal de Télédétection Spatiale (CRTS). La Figure 10 présente la carte élaborée à partir de ces données.

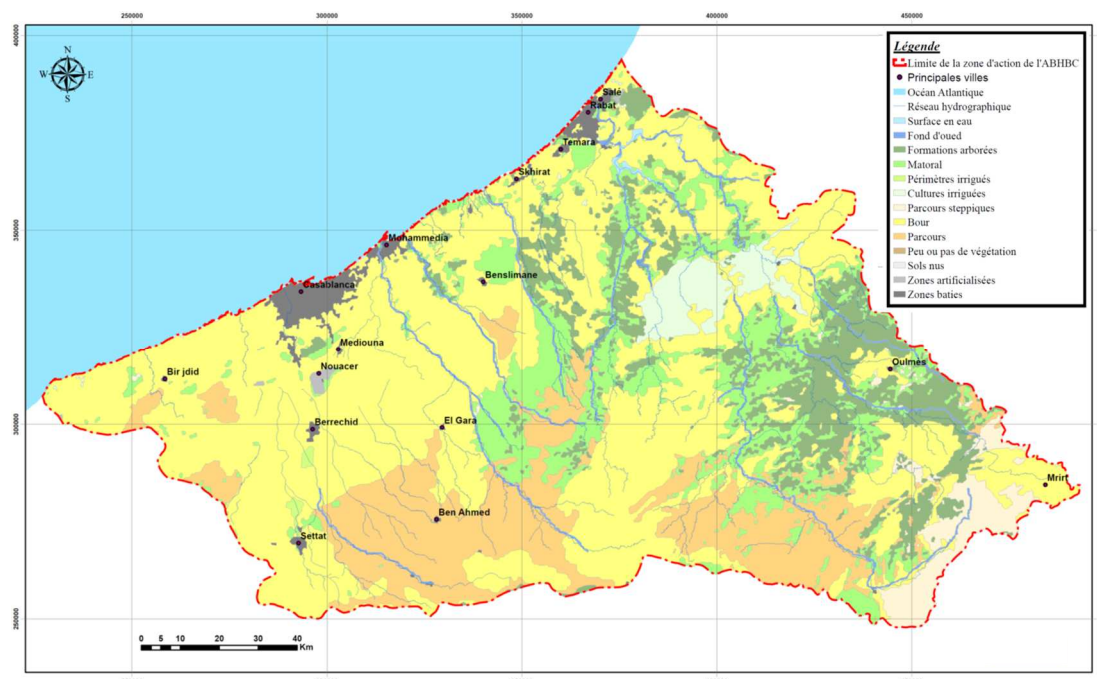


Figure 10: Occupation du sol dans la zone d'action de l'ABHBC (ABHBC, 2017)

Le tableau 3 synthétise la répartition d'occupation du sol pour les trois grandes entités de bassins dans la zone d'action de l'ABHBC.

Tableau 3: Occupation du sol dans les grandes entités de bassins

	Bassin Bouregreg		Bassin Chaouia		Bassins Côtiers	
	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Superficie (km ²)	Superficie (%)	Superficie (km ²)	Superficie (%)
Zones bâties	39	0%	246	5%	84	2%
Périmètres irrigués	513	5%	32	1%	5	0%
Formations arborées	1 820	18%	22	0%	316	6%
Bour	3 751	38%	3 210	68%	3 252	59%
Parcours	1 744	18%	1 097	23%	975	18%
Matorral	1 774	18%	110	2%	806	15%
Fond d'oued	221	2%	20	0%	112	2%

Il apparait que 56% du bassin de Bouregreg est occupé par du Bour et des parcours, le reste est partagé principalement entre les matorrals (des buissons et des broussailles) et les formations arborées. Une dominance des cultures en Bour (68%) est constatée au niveau du bassin de la Chaouia le reste est essentiellement constitué des parcours (23%). Pour les bassins côtiers, le sol est majoritairement occupé par du Bour (59%), des parcours (18%) et du matorral (15%).

I.2.7. Aptitude des sols au ruissellement

Pour l'élaboration d'une carte de classification des sols selon leur aptitude au ruissèlement, un travail a été réalisé par NOVEC pour le compte de l'ABHBC (ABHBC, 2017). Il s'agit d'une confrontation des cartes géologiques au 1/500.000 qui couvrent la totalité de la zone d'étude avec les cartes pédologiques disponibles au niveau du bassin versant de l'oued El Malleh et la partie Nord de la zone d'action de l'ABHBC ainsi qu'une partie du bassin versant de l'oued Merzeg. La carte résultante représentée sur la Figure 11 classe les sols en quatre groupes :

- Groupe A : il regroupe les sols ayant un taux d'infiltration élevé et donc un potentiel de ruissellement faible ;
- Groupe B : il concerne les sols sableux moins profonds, moyennement chargés en lœss et argiles qui se caractérisent par des infiltrations importantes à moyennes au moins en surface ;
- Groupe C : il s'agit des sols peu profonds à prépondérance argileuse ayant un taux d'infiltration faible ;
- Groupe D : il regroupe les sols ayant un taux d'infiltration très faible et donc un potentiel de ruissellement très élevés comme le cas des sols très argileux.

Il en ressort alors qu'au niveau du grand bassin de Bouregreg, le sol est majoritairement de classe D notamment dans la zone amont des bassins versants situés au Sud-est de la zone d'étude. Il est constitué par des schistes imperméables. Donc, en raison des fortes pentes qui dominent cette partie, le ruissellement sera très prononcé. Au niveau d bassin El Malleh, particulièrement sur la partie côtière, domine les formations de classe B, le reste est constitué principalement par un sol de classe D. Alors qu'au niveau des bassins de la haute Chaouia, le sol est essentiellement de classe C à B constitué principalement des vertisols moyennement imperméables (classe C) et des sols calcimagnésiques à texture équilibrée sur encroustement et croute calcaire (classe B) ; vu les faibles pentes qui dominent cette zone, l'eau tend à stagner

et avoir un écoulement en nappe qui favorise l'infiltration. Au niveau du bassin endoréique côtier, la classe dominante est constituée par des grès dunaires tersialitiques (classe B) dont le ruissellement est faible (sol infiltrant). La Figure 11 illustre la répartition des classes des sols proposées.

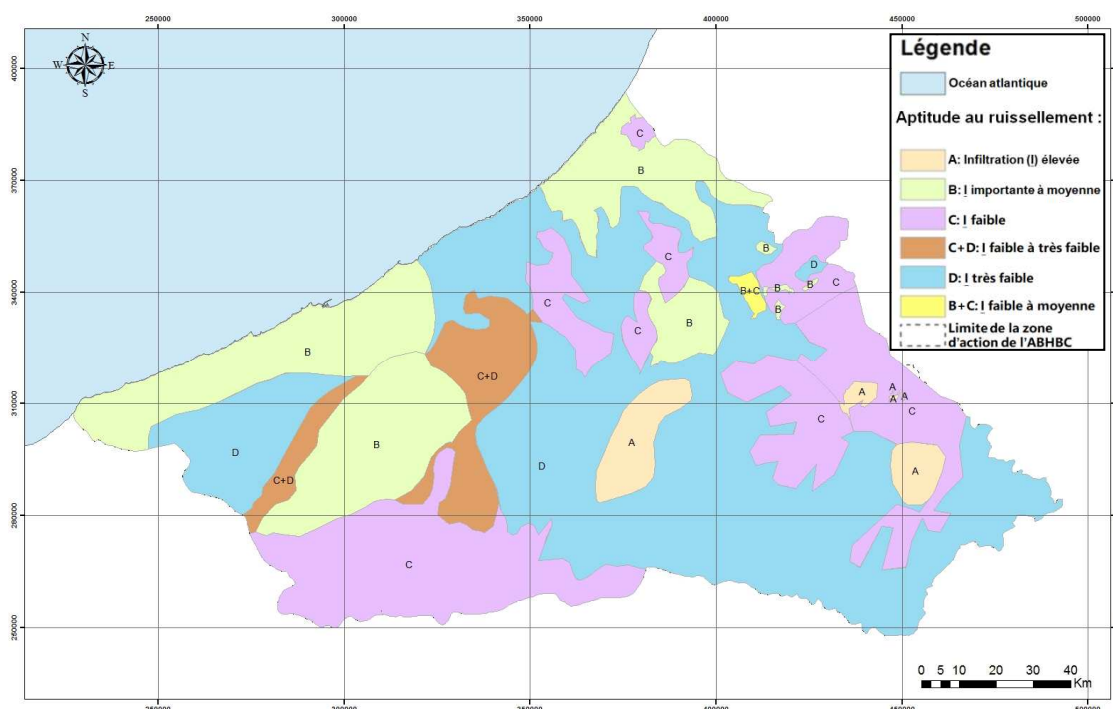


Figure 11: Répartition des classes de ruissellement des sols au niveau de la zone d'action de l'ABHBC (ABHBC, 2017)

I.2.8. Coefficient d'indexation des sols « Curve Number »

Le coefficient d'indexation ou le Curve Number (CN) des sols est très utilisé pour représenter les caractéristiques, des bassins versants, influençant les ruissellements de surface (Kent, 1973). Le CN d'un bassin versant dépend de l'état d'humidité du sol. Le tableau suivant présente l'état initial d'humidité du sol selon le cumul des pluies journalières des 5 derniers jours (Chow *et al.*, 1988) :

Tableau 4: Etat d'humidité du sol selon le cumul des pluies journalières des 5 derniers jours

Classe d'humidité antérieure	Pluie Totale des 5 derniers jours (mm)	
	Saison Dormante*	Saison de croissance*
I	Moins de 12.7 mm	Moins de 35.6 mm
II	Entre 12.7 et 28 mm	Entre 36 et 53.4 mm
III	Plus de 28 mm	Plus de 53.4 mm

*La saison de croissance correspond à la période de croissance des plantes et la saison dormante correspond à la période de maturité des plantes.

La prise en compte des pluies antécédentes, pour la même pluie, permet de déterminer sa classe d'humidité antérieure. Les CN pour une condition initiale d'humidité différente sont liée par les relations suivantes (Chow *et al.*, 1988) :

$$N(I) = \frac{4.2 \times N(II)}{10 - 0.058 \times N(II)} \quad (1.1) \quad \text{Et} \quad N(III) = \frac{23 \times N(II)}{10 + 0.13 \times N(II)} \quad (1.2)$$

Condition (I) : saturation initiale faible – sol sec ;

Condition (II) : saturation initiale moyenne – sol moyennement humide ;

Condition (III) : sol quasi saturé.

Pour des buts de la simplification, plusieurs documents ont été élaboré et permettre de déterminer le CN à partir de 3 facteurs majeurs qui sont (USSCS, 1986; ASCE, 1996; Westphal, 2004):

- La pédologie du sol ;
- L'occupation du sol, leur condition hydrologique pour l'infiltration et le mode de culture ;
- Les conditions d'humidité (Antecedent Moisture Condition « AMC »).

La pédologie

Pour l'estimation du CN, la pédologie permet de répartir le sol en 4 groupes majeurs (A,B,C et D) selon leurs aptitudes aux ruissellements (USSCS, 1986):

- Groupe A : (faible potentiel de ruissellement) : ce sont des sols présentant un taux d'infiltration élevé même lorsqu'ils sont bien mouillés. Il s'agit principalement de sables et de graviers profonds et bien drainés. Ces sols ont un taux élevé de transmission de l'eau.
- Groupe B : il s'agit des sols à taux d'infiltration modéré lorsqu'ils sont bien mouillés. Il s'agit principalement de sols modérément profonds à profonds, modérément bien drainés à bien drainés avec des textures modérément fines à modérément grossières. Ces sols ont un taux modéré de transmission de l'eau.

- Groupe C : il concerne des sols à faible taux d'infiltration lorsqu'ils sont bien mouillés. Il s'agit principalement de sols dont la couche empêche la descente de l'eau ou de sols de texture modérément fine à fine. Ces sols ont un faible taux de transmission de l'eau.
- Groupe D : (potentiel de ruissellement élevé) : Sols à très faible taux d'infiltration lorsqu'ils sont bien mouillés. Il s'agit principalement de sols argileux à fort potentiel de gonflement, de sols ayant une nappe phréatique élevée permanente, de sols ayant une couche d'argile ou de glaise à la surface ou près de la surface, et de sols peu profonds sur des matériaux presque imperméables. Ces sols ont un taux de transmission de l'eau très lent.

La disponibilité des cartes de classification de sol selon les quatre groupes (Figure 11) et d'occupation de sol dans la zone, nous a permis d'élaborer des cartes de CN pour différentes conditions d'humidité en utilisant un outil SIG.

L'occupation de sol

L'occupation de sol est répartie aussi selon des catégories majeures dans des tableaux qui tiennent compte du type d'occupation de sol, de la condition hydrologique de ce type d'occupation qui est généralement désignée comme (bon, moyen, faible), et aussi le mode de culture de l'occupation en question (USSCS, 1986).

En se basant sur la carte d'occupation de sol disponible (Figure 10) et afin de préparer les classes d'occupation pour l'intégration dans le modèle de calcul du Curve Number, un processus de regroupement de classes a été réalisé afin d'éviter des grands écarts de résultats entre des classes plus ou moins homogènes (Figure 12). Le tableau suivant récapitule le résultat du travail d'agrégation réalisé.

Ainsi, la zone d'action est majoritairement couverte par des zones de types Bour ou parcours (69%) suivi par les zones arborées et les zones couvertes par des formations de type matorral (~24%), les autres types d'occupations présente un très faible taux de couverture avec un taux d'occupations inférieurs à (2%).

Tableau 5: Agrégation des types d'occupation du sol dans la Zone d'action de l'ABHBC

Type d'Occupation	Superficie (Km ²)	Superficie (%)	Type d'occupation regroupée	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
Surface en eau	24.70	0.12%	Surface d'eau	378.27	1.87%
Fond d'oued	353.57	1.75%			
Formations arborées	2157.24	10.67%	Forêts	4847.46	23.98%
Matoral	2690.22	13.31%			
Périmètres irrigués	29.94	0.15%	Cultures	549.92	2.72%
Cultures irriguées	519.98	2.57%			
Parcours steppiques	581.23	2.87%	Bour ou parcours	14029.35	69.39%
Bour	10212.72	50.52%			
Parcours	3235.41	16.00%			
Peu ou pas de végétation	5.34	0.03%	Sol nu	13.09	0.06%
Sols nus	7.75	0.04%			
Zones artificialisées	30.35	0.15%	Zone bâti	398.64	1.97%
Zones bâties	368.29	1.82%			

La disponibilité de la carte de classification de sol selon les quatre groupes (Figure 11) et l'élaboration de la carte d'occupation de sol dans la zone, nous a permis d'élaborer des cartes de CN pour différentes conditions d'humidité en utilisant un outil SIG (Figure 13) (Hernández-Guzmán et Ruiz-Luna, 2013).

Cet outil peut être utilisé pour déterminer le CN dans un bassin versant. Il procède au calcul du CN à partir des résultats de post-traitement des couches d'occupation de sol et de pédologie. Cet outil contient aussi un tableau qui peut être modifié par l'utilisateur et constitue une référence des CN lors du traitement numérique, l'avantage du choix de cet outil c'est la mise en place d'un algorithme permettant d'obtenir le CNI (Figure 16) et le CNIII (Figure 14) automatiquement à partir de la carte du CNII (Figure 15).

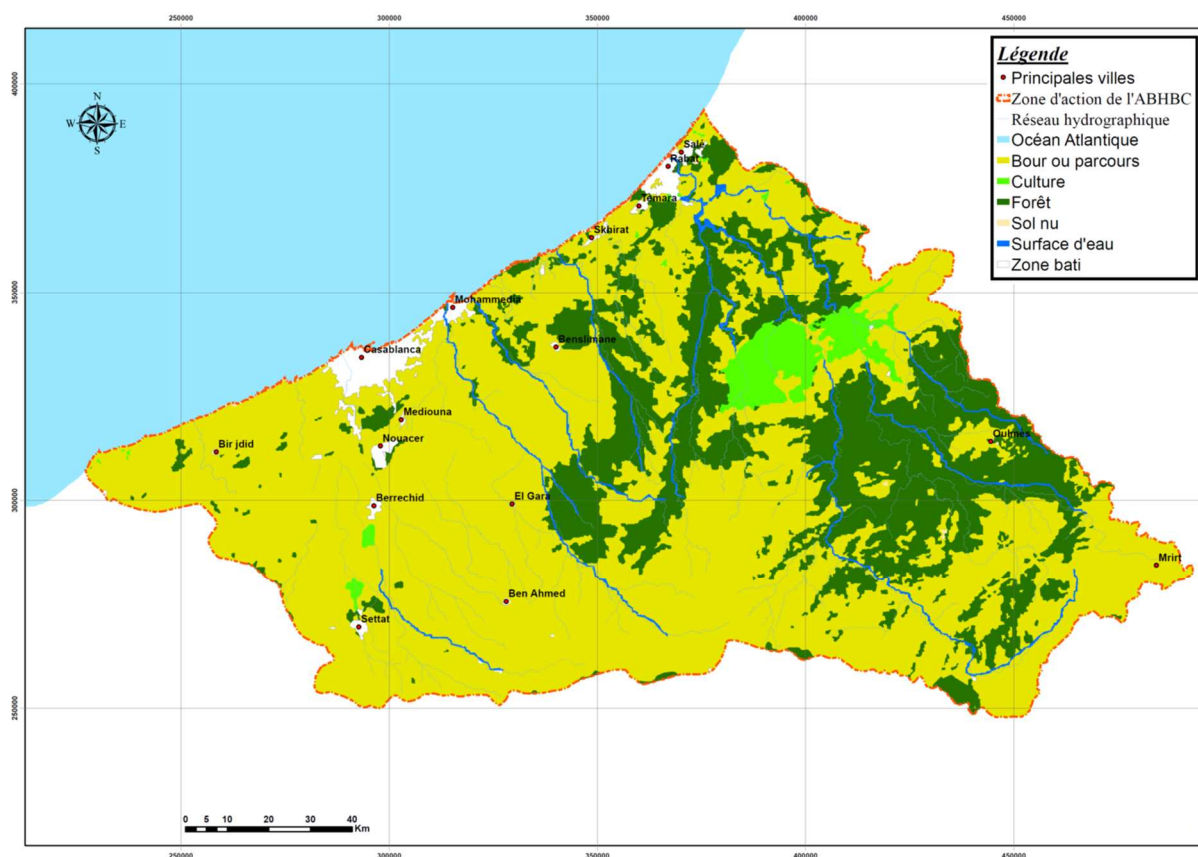


Figure 12: Carte d'occupation du sol abrégée au niveau de la zone d'action de l'ABHBC

Figure 13: Outil SARA (Spatial Analysis of surface Runoff in ArcGis)

L'analyse des cartes des CN élaborées, et correspondant aux trois conditions d'humidité, permet de tirer les conclusions suivantes :

- Bassins Chaouia et Chaouia côtière : les CNIII des sous bassins varient de 78 à 90,6 avec une moyenne de 83,3, une médiane de 82,8 et un écart type de 5 environ. Les CN dans ces bassins sont généralement moins importants par rapport aux autres bassins présentés ci-après.

Le passage au CNII et CNI engendre une diminution respectivement de -17% et -40% par rapport au CNIII moyenne. Cette diminution est la plus importante dans les quatre grands bassins analysés dans ce paragraphe.

L'analyse des équations (1.1) et (1.2) permet de justifier ce constat. En effet, pour des CNIII supérieurs à 70, les écarts entre le CNII et le CNI d'une part et le CNIII d'autre part deviennent plus importants en diminuant le CNIII. La même chose est constatée par rapport aux pourcentages des écarts de CNII et CNI par rapport à CNIII (Tableau 6).

Tableau 6: Analyse générale de la variation du CNI et CNII en fonction du CNIII

CNI	CNII	CNIII	CNI-CNIII	CNII-CNIII	Ecart de CNI par rapport CNIII (%)	Ecart de CNII par rapport CNIII (%)
15,4	30,3	50,0	-34,6	-19,7	-69%	-39%
18,2	34,7	55,0	-36,8	-20,3	-67%	-37%
21,5	39,5	60,0	-38,5	-20,5	-64%	-34%
25,3	44,7	65,0	-39,7	-20,3	-61%	-31%
29,9	50,4	70,0	-40,1	-19,6	-57%	-28%
35,4	56,6	75,0	-39,6	-18,4	-53%	-25%
42,2	63,5	80,0	-37,8	-16,5	-47%	-21%
50,9	71,1	85,0	-34,1	-13,9	-40%	-16%
62,2	79,6	90,0	-27,8	-10,4	-31%	-12%
77,6	89,2	95,0	-17,4	-5,8	-18%	-6%

- Bassin El Malleh : les CNIII varient de 78 à 90,7 avec une moyenne de 87,7, une médiane de 88,6 et un écart type de 2,9. Autrement dit, la majorité des CN sont proches ou supérieure à la moyenne et que les CN au niveau des bassins versants de l'oued El Malleh dispose d'une aptitude au ruissellement supérieure à ceux de la Choauia ou la Chouia côtière.

Le passage au CNII et CNI engendre une diminution respectivement de -13% et -34% par rapport au CNIII moyenne.

- Bassin Bouskoura : les CNIII varient de 78,5 à 90,9 avec une moyenne de 84,2, une médiane de 85,4 et un écart type de 4,3. Ainsi, l'aptitude au ruissellement de ces bassins versants est relativement comparable à celle de la Chouia et la Chaouia côtière.

Le passage au CNII et CN1 engendre une diminution respectivement de -16% et -38% par rapport au CNIII moyenne.

- Bassin Bouregreg et bassins côtiers : les CNIII des sous bassins varient de 76,8 à 90 avec une moyenne de 86,5, une médiane de 87,6 et un écart type de 3,6. Dès lors, l'aptitude au ruissellement dans ces bassins versants est nettement inférieure aux bassins de l'oued El Malleh et supérieure aux bassins de la Chaouia et la Chaouia côtière ainsi que le bassin de Bouskoura.

Le passage au CNII et CN1 engendre une diminution respectivement de -14% et -35% par rapport au CNIII moyenne.

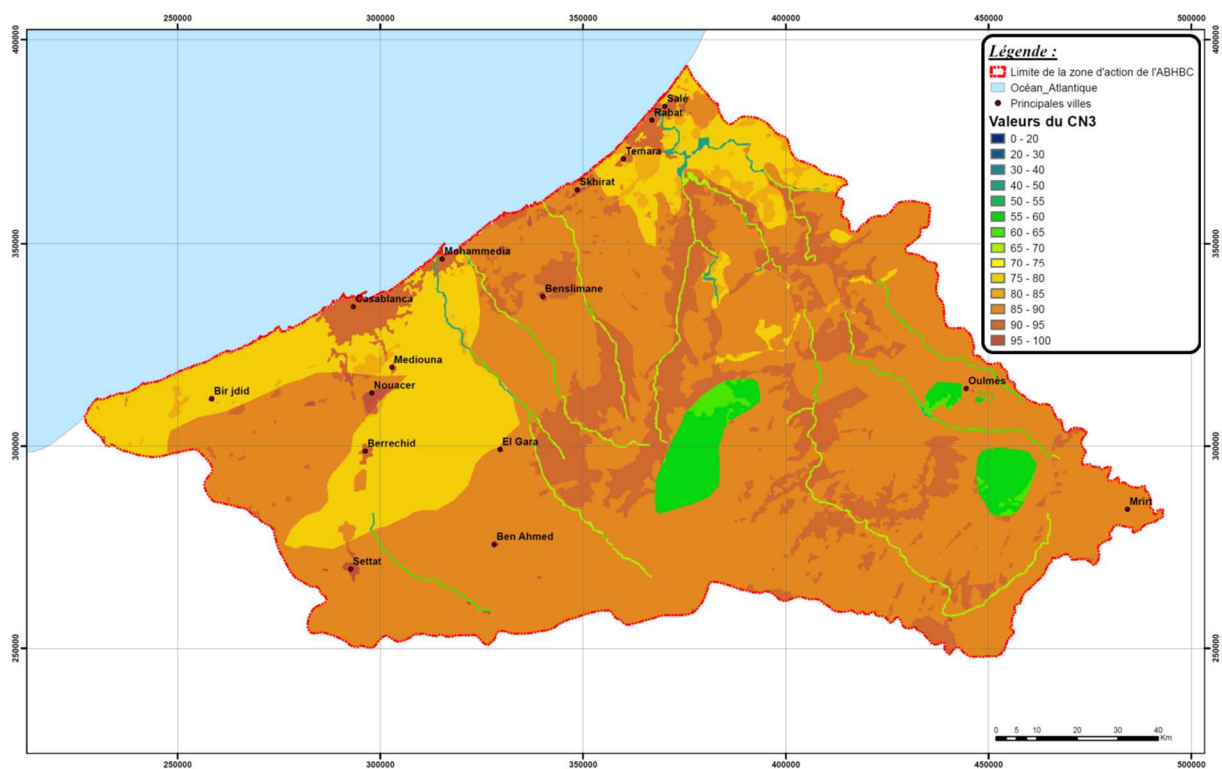


Figure 14: Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité III)

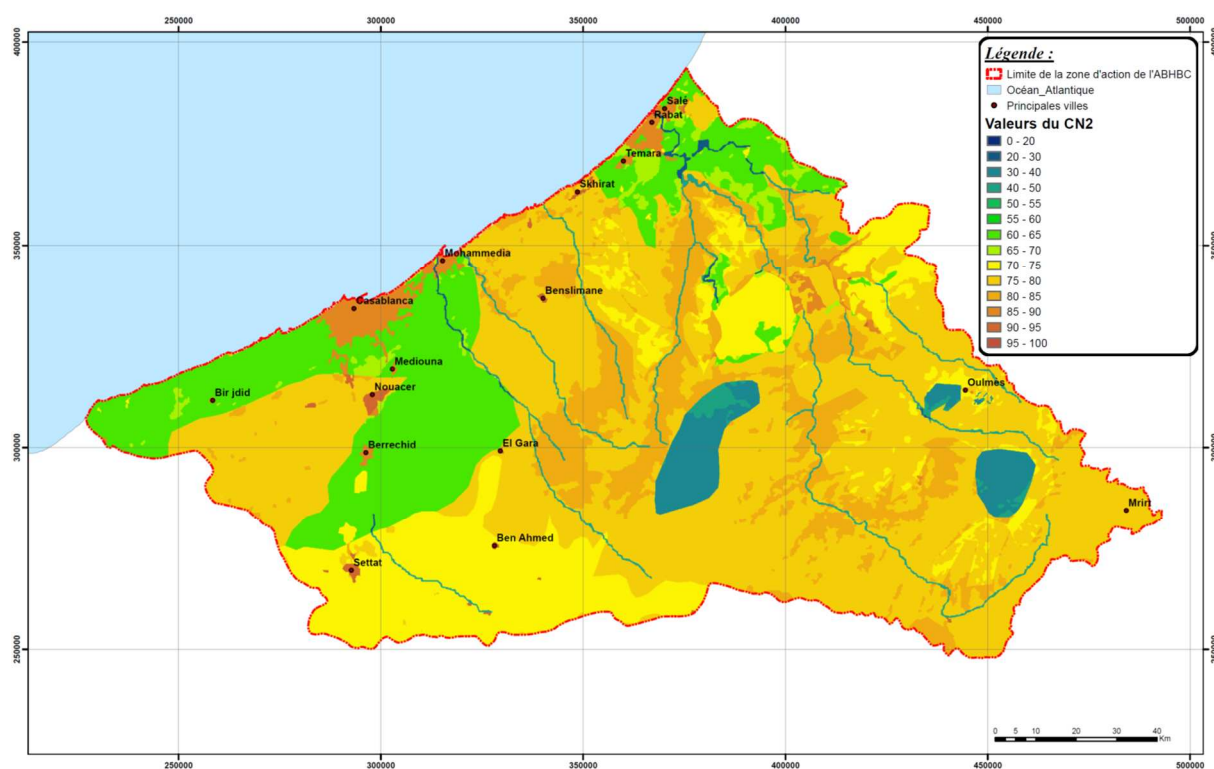


Figure 15: Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité II)

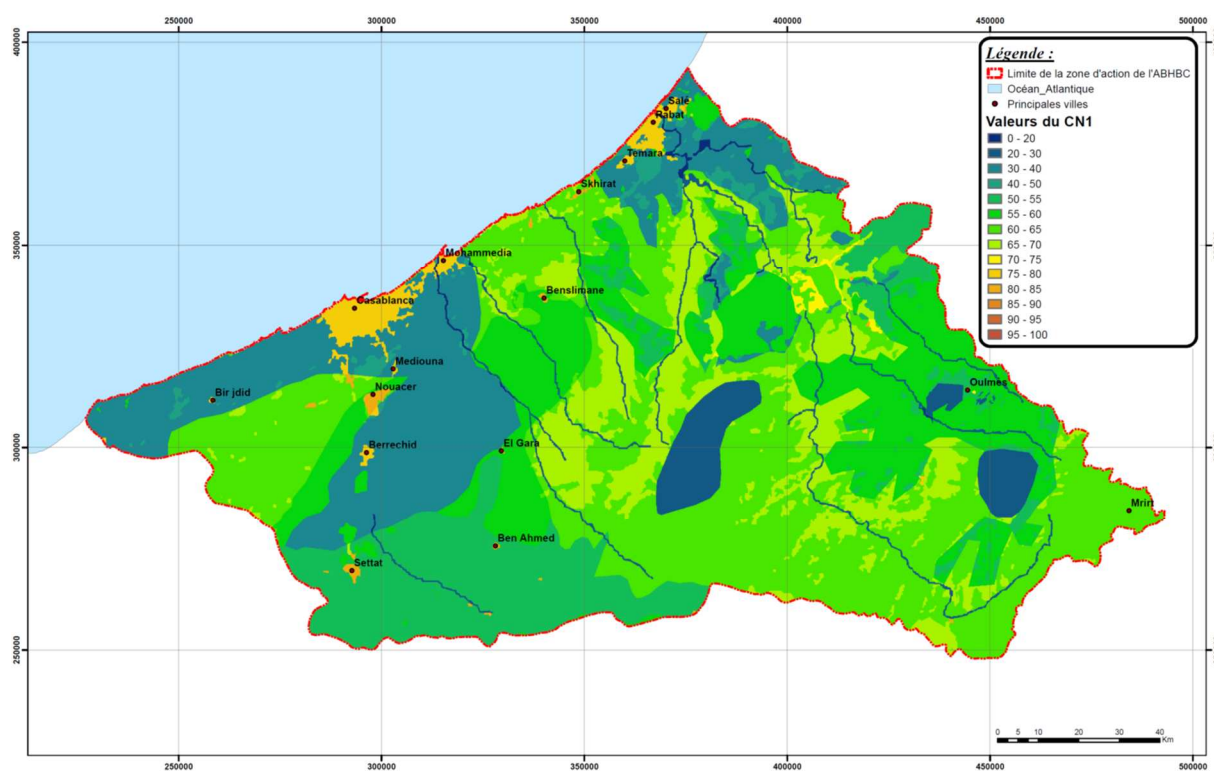


Figure 16 : Spatialisation du CN dans la zone d'action de l'ABHBC (Condition d'humidité I)

I.2.9. Précipitations

La zone d'étude est généralement soumise à un climat continental, à influence océanique. Elle se caractérise par un climat semi-aride à aride. Comme le montre La Figure 17, les pluies moyennes annuelles diminuent généralement avec l'altitude, selon un gradient faible, en allant du Nord vers le Sud et de la zone côtière vers l'intérieur du pays. Dans la zone montagneuse située au Nord-Est, les pluies annuelles augmentent en fonction de l'altitude. Les pluies annuelles varient généralement de 300 mm à 400 mm au Sud et de 500 mm à 550 mm au Nord.

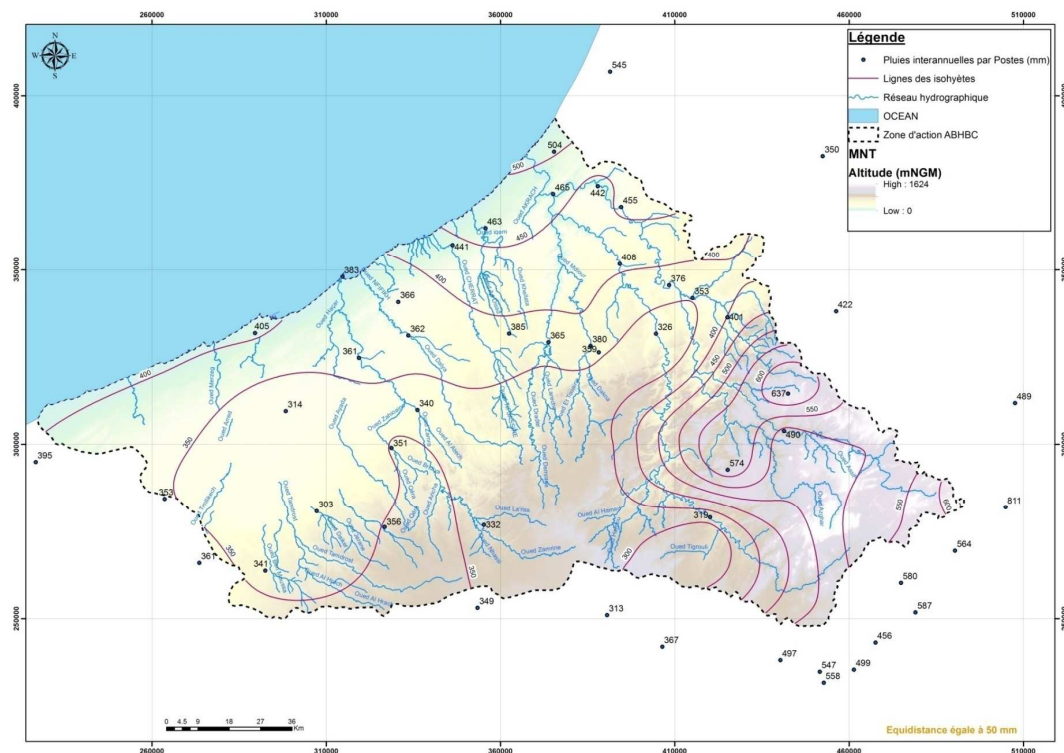


Figure 17: Isohyètes des pluies moyennes annuelles sur la zone d'action de l'ABHBC pour la période de 1972-2017 (ABHBC, 2019)

I.3. CARACTERISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

I.3.1. Paramètres morphométriques généraux

Les paramètres morphométriques d'un bassin versant ou les paramètres physiques sont très importants pour le calcul des paramètres hydrologiques comme le temps de concentration et le Lag Time et par la suite pour l'évaluation de la génération des ruissellements générant les débits de pointe et les volumes correspondant à une pluie brute donnée. La détermination de

ces paramètres se base sur les données topographiques couvrant les bassins versants objet d'étude. Ainsi, plusieurs sources de données ont été utilisées. Il s'agit principalement du :

- Modèle Numérique de Terrain (MNT) issu de « Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) » : la résolution spatiale du modèle utilisé est de 30 m approximativement couvrant toute la zone d'étude. Il s'agit d'un projet conjoint de la « National Aeronautics and Space Administration (NASA) », la « National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) » et les agences spatiales allemande et italienne. L'objectif était d'acquérir un modèle numérique d'élévation de toutes les terres situées entre les latitudes 60N et 56S, soit environ 80 % de la surface terrestre. En raison de sa résolution uniforme et de sa précision sur la plus grande partie de la surface terrestre, ce MNT a été utilisé dans divers domaines de recherche et a permis d'obtenir de nombreux résultats scientifiques importants. (Yang et al., 2011; Kim et al., 2020)
- Modèle Numérique de Terrain de « ASTER Global Digital Elevation Map (GDEM) » : Ce modèle a également une résolution approximative de 30 m. Le projet ASTER est une initiative conjointe du ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie (METI) et la NASA. Ce projet ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) a publié le premier modèle numérique d'élévation à haute résolution spatiale (GDEM) couvrant toute la surface terrestre de la Terre avec une précision verticale d'environ 10 m. (Abrams et al., 2020)
- Cartes topographiques à des échelles de 1/25.000^{ième} et 1/50.000^{ième} disponibles au niveau de la zone.

La délimitation des bassins versants a concerné les grands cours d'eau et les affluents connus au niveau de la zone d'action de l'ABHBC. En outre, nous avons pris en compte également les points connus par leur problématique d'inondation en se basant sur les études réalisées dans la zone. Ce travail a permis de délimiter des petits, des moyens et des grands bassins versants dont le nombre est de 178 (Figure 18).

Lors de délimitation des bassins versants, la comparaison des résultats des données SRTM et GDEM avec les cartes topographiques à grandes échelles (1/25.000^{ième} et 1/50.000^{ième}) montre que les données satellitaires donnent généralement des bons résultats. Les exceptions notées ont été validées à travers une analyse des images satellitaires disponibles sur Google Earth.

Ainsi, les principales caractéristiques morphométriques extraites des bassins versants sont comme suit :

- Bassin Bouregreg et bassins côtiers : les surfaces des bassins versants élémentaires sont les plus importantes et varient de 113,9 Km² à 1153,7 Km². La pente moyenne des plus longs talwegs est de 0,74 %.
- Bassin El Malleh : les surfaces des bassins versants varient de 12,3 Km² à 313,7 Km² et la pente moyenne des plus longs talwegs est de 0,9 % ;
- Bassins Chaouia et Chaouia côtière : les surfaces des bassins versants élémentaires identifiés dans cette zone sont inférieures à 243,25 Km² avec des pentes moyennes généralement inférieures à 1 % au niveau des plus longs talwegs et qui atteignent jusqu'à 4 % en amont et deviennent très faibles dans la plaine et le couloir côtier ;
- Bassin Bouskoura : les surfaces des bassins versants sont inférieures à 49,5 Km² avec des pentes moyennes des plus longs talwegs variant de 0,2% à 1,1% ;

Le tableau récapitulant les principales caractéristiques des bassins versants identifiés est consigné en Annexe 4.

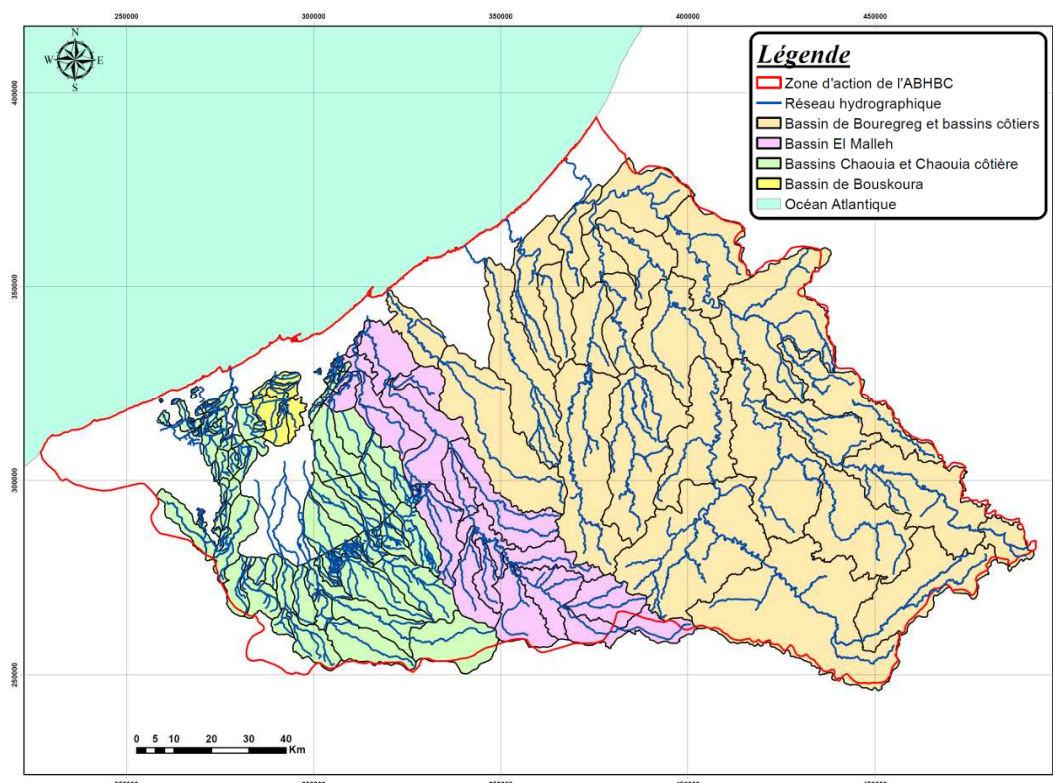


Figure 18: Limites des bassins versants délimités au niveau de la zone d'étude

I.3.2. Temps de concentration

Le temps de concentration (t_c) est le temps nécessaire au ruissellement pour se déplacer du point hydrauliquement le plus éloigné du bassin versant jusqu'à l'exutoire (USDA-NRCS,

2010). Le temps de concentration varie en fonction de la pente et des caractéristiques du bassin versant et de cheminement d'écoulement. Il n'est généralement appliqué qu'au ruissellement de surface et peut être estimé à l'aide de nombreuses formules. Le Tableau 7 présente les formules les plus utilisées dans le contexte marocain. Sinon, plus qu'une cinquantaine de formules sont présentées dans la littérature. Les temps de concentration calculés à l'aide de ces formules sont présentés en Annexe 5.

Tableau 7: Formules de calcul de temps de concentration

Formule	Equation	Paramètres	Références
Kirpich (1940)	$t_c = 0.019472 \times L^{0.77} \times P^{-0.385}$ (1.3)	L : Longueur du plus grand thalweg en m ; H : Dénivelée totale en m.	Chow <i>et al.</i> , 1988; Mata-Lima <i>et al.</i> , 2007
Ven Te Chow (1988)	$t_c = 60 \times 0.1602 \times L^{0.64} \times P^{0.32}$ (1.4)	L : Longueur du plus grand thalweg en km ; P : Pente en m/m.	(De Almeida <i>et al.</i> , 2014 Kaufmann de Almeida <i>et al.</i> , 2017; Nagy <i>et al.</i> , 2017; Azizian, 2018)
U.S. Corps (1977)	$t_c = 60 \times 0.191 \times L^{0.76} \times P^{0.19}$ (1.5)	L : Longueur du plus grand thalweg en km ; P : Pente en m/m.	(De Almeida <i>et al.</i> , 2014; Kaufmann de Almeida <i>et al.</i> , 2017; Azizian, 2018)
Californienne (1942)	$t_c = 0.019494 \times L^{0.77} \times P^{-0.385}$ (1.6)	L : Longueur du plus grand thalweg en m ; P : Pente en m/m.	(Chow <i>et al.</i> , 1988)
Turraza	$t_c = 60 \times 0.108 \times \frac{(AL)^{1/3}}{P^{1/2}}$ (1.7)	A : Superficie du bassin versant en km ² ; L : Longueur du plus grand thalweg en km ; P : Pente en m/m.	(M.Yacoubi <i>et al.</i> , 1996)
Ventura (1905)	$t_c = 76.32 \times \frac{A^{1/2}}{P^{1/2}}$ (1.8)	A : Superficie du bassin versant en km ² ; L : Longueur du plus grand thalweg en km ; P : Pente en %.	(M.Yacoubi <i>et al.</i> , 1996; Ravazzani <i>et al.</i> , 2019)
Giandotti (1934)	$t_c = 60 \times \left(\frac{(4 \times A^{1/2}) + (1.5 \times L)}{0.8 \times (h - h_o)^{1/2}} \right)$ (1.9)	A : Superficie du bassin versant en km ² ; L : Longueur du plus grand thalweg en km ; h : Altitude moyenne du bassin en m ; h _o : Altitude à l'exutoire du bassin en m.	(Sharifi et Hosseini, 2011)

L'analyse des résultats de calcul montre que les formules de Kirpich et Californienne donnent des valeurs similaires et qui sont comparables à celles calculées par les formules de Ven Te Chow et US Corps. Les formules de Turraza, Ventura et Giandotti constituent la fourchette supérieure. Une analyse des hydrogrammes de crues au niveau de 7 stations hydrométriques dans la zone d'action de l'ABHBC a montré que les formules de Kirpich et Californienne donnent des temps de concentrations très proches à ceux calculés à partir des temps de montée des hydrogrammes observés (ABHBC, 2017).

I.4. CONCLUSION

Le Maroc se caractérise par une forte disparité spatiale des précipitations avec un gradient prononcé du Nord vers le Sud et le Sud-est. Les écoulements de surface sont connus par une très grande variabilité annuelle et interannuelle marquée par l'alternance de séquences humides et sèches avec une contribution importante des crues dans les apports des eaux de surface.

Le Maroc a toujours connu des inondations et des événements pluvieux importants. Néanmoins, l'augmentation de l'occurrence des événements forts et violents a été bien soulevée pendant les deux dernières décennies voire un peu avant.

Tenant compte de la nouvelle loi 36-15 sur l'eau, et en plus des actions de protection contre les inondations, les agences de bassins hydrauliques sont sensées entreprendre, en partenariat avec les administrations, les établissements publics et les collectivités territoriales, la réalisation des actions nécessaires à la prévention contre les inondations.

C'est dans ce cadre que l'ABHBC se lance depuis 2017 dans la mise en place, dans sa zone d'action, de la première plateforme, de prévisions des crues en temps réel, à l'échelle nationale ainsi que le lancement du premier plan de prévention contre les inondations couvrant 6 préfectures et provinces. Ainsi, une bonne compréhension des pluies instantanées contribuera forcément à un dimensionnement meilleur des ouvrages de protection contre les inondations et permettra également une amélioration des modèles hydrologiques faisant partie du développement des plans de préventions contre les inondations objet du présent mémoire.

Les chapitres suivants présentent la zone d'action de l'ABHBC, choisi comme bassin hydraulique pilote pour notre sujet de recherche.

CHAPITRE II. CARACTERISTIQUES DES PLUIES INSTANTANEEES

II.1. INTRODUCTION

L'analyse des caractéristiques des pluies instantanées est très importante dans les études climatiques et hydrologiques. En effet, l'hyétogramme des pluies instantanées est cruciale dans la gestion des eaux pluviales des bassins versant (Pan et al., 2017). Il constitue une entrée très importantes des modèles hydrologiques (Awadallah et al., 2017). L'analyse des pluies instantanées peut être également utilisée dans les études d'érosion du sol (Haile et al., 2011; Chen et al., 2015).

Pour analyser les caractéristiques des pluies instantanées, l'analyse des événements pluvieux est un moyen pratique communément utilisé (G.Brown et al., 1985).

L'analyse des références bibliographiques montre différentes définitions d'une averse. Ces définitions dépendent généralement des données disponibles utilisées, des objectifs des études réalisées et du temps alloué au traitement des données. Par ailleurs, en hydrologie, la pluie est représentée généralement par un hyétogramme, qui est la distribution temporelle des précipitations enregistrées en un point ou une zone pendant une durée de précipitation.

Ainsi, et avant d'analyser les pluies instantanées dans la zone objet d'étude, il est pertinent de définir les différents éléments permettant la séparation des averses. Il s'agit de déterminer les paramètres largement utilisés dans le monde en se référant aux publications en relation avec le sujet de recherche. Néanmoins, le choix des différents paramètres n'est pas dicté toujours par des critères préalablement figés mais dépend également des bonnes pratiques de gestion (Asquith *et al.*, 2006). En effet, l'analyse du fonctionnement d'un ouvrage hydraulique par exemple ne se base pas uniquement sur les caractéristiques des averses mais également sur celles l'ouvrage. Par exemple, pour un bassin de rétention, il y a la capacité de laminage, le temps de vidange, etc.

II.2. REVUE DE LITTÉRATURE

II.2.1. Introduction

Avant d'entamer l'analyse des propriétés des averse, il est important de définir la notion d'une averse et les critères de base de sélection et de classification.

En effet, une averse est représentée par un hyétogramme qui est la distribution temporelle des précipitations enregistrées dans un point ou une zone au moment d'une précipitation. L'analyse des caractéristiques statistiques des hyétogrammes observés permettent une bonne compréhension des distributions temporelles des pluies (Asquith, 2003).

Ce chapitre définit en détail la notion d'une averse ainsi que les critères de sélection et de classification des averse. Ce travail a été établi à travers une revue de littérature détaillée.

II.2.2. Définition d'une averse

La définition d'une averse est un prérequis avant de se lancer dans l'analyse des pluies instantanées (Yen et Chow, 1983). Les principales définitions adoptées par les chercheurs sont les suivantes :

1- Une averse est une pluie continue qui peut contenir des périodes sèches dont la durée est inférieure à une durée spécifiée (G.Brown et al., 1985; Huff, 1990). Cette définition est très pratique et la plus adoptée dans les recherches analysant les averse comme le cas pour l'élaboration des pluies de projet adimensionnelles de type Huff.

2- Une averse est une pluie définie à partir d'une durée minimale séparant deux pluies successives ayant une corrélation non significative (Güntner et al., 2001). La durée minimale peut être établie à travers une analyse de l'autocorrélation des données pluviométriques (Ceresetti, 2011). Néanmoins, il est difficile d'identifier les averse indépendantes pour des précipitations de plusieurs épisodes successives (Joo et al., 2014). Cette indépendance peut être liée à la réaction du bassin versant étudié. Deux averse sont donc indépendantes si les effets de la première s'arrêtent avant le début de la deuxième (Bertrand- Krajewski, 2007). L'application de cette définition nécessite une confrontation approfondie des données pluviométriques et hydrométriques dans la zone étudiée.

3- Une averse est une pluie d'une hauteur de précipitation dépassant un seuil donné dans un laps de temps déterminé (J. Keifer et Chu, 1958). Elle pourra concerner une partie d'un événement pluvieux continu. C'est le principe adopté dans l'élaboration des averses selon la méthode de Chicago. L'utilisation de cette définition mène à l'adoption de certaines averses tronquées.

4- Une averse est une pluie qui provient de même groupe de nuage qui se déplace comme une seule unité même s'il y'a des périodes sèches. Physiquement, cette définition est la plus souhaitable (Yen et Chow, 1983). Néanmoins, elle est difficile à mettre en œuvre voire impossible en cas de manque de certaines données spatialisées.

5- Une averse est une pluie continue dont la définition dépend du pas de temps (Δt) d'enregistrement des précipitations. Ainsi, s'il y'a un arrêt des précipitations pendant une durée inférieure à Δt , les deux épisodes de précipitations successives sont considérées comme une seule averse (Yen et Chow, 1983). Cette définition est de moins en moins utilisée grâce au pas de temps fins des pluviomètres automatiques modernes.

Ces définitions ont été classées en partant des plus utilisées aux moins utilisées dans les études et les recherches en relation avec le traitement des pluies instantanées. Les averses pluvieuses définies ne correspondent pas forcément à une réalité météorologique et contiennent une part d'arbitraire. La définition des événements pluvieux doit prendre en considération les besoins d'utilisation des données traitées (Guo et Adams, 1998; Bertrand-Krajewski, 2007).

Dans les paragraphes suivants, on adopte la première définition qui est très pratique en détaillant les différents paramètres permettant sa bonne application. Ce choix est justifié aussi par :

- Les données de base disponibles qui sont des pluies instantanées enregistrées, avec un pas de temps de 5 minutes, au niveau des pluviomètres automatiques ;
- L'un des objectifs de nos travaux de recherche qui concerne l'élaboration des pluies de projet synthétiques adaptées au contexte marocain.

II.2.3. Critères de sélection et de classification des averses

Avant d'entamer l'analyse des propriétés des averses, il est important de définir et préciser les critères de sélection des averses.

En effet, selon divers chercheurs (Asquith et al., 2006; S. Wu et al., 2006; Haile et al., 2011), l'extraction des averses et leur classification se basent principalement sur :

- La durée minimale entre les averses (Minimum Inter-Event Time (MIET)) ou la période sèche (sans pluie) ;
- La lame d'eau minimale de la pluie ou de l'averse ;
- La durée de l'averse ;
- Les quartiles d'une averse.

Ces critères sont expliqués ci-dessous à partir d'une revue de littérature.

II.2.3.1. Durée minimale entre les averses (MIET)

Les enregistrements des précipitations décrivent des séquences pluvieuses et d'autres sèches (sans précipitation). L'augmentation de la durée de la période sèche permet de différencier entre des averses distinctes selon une durée minimale spécifique (Asquith et al., 2006). Il s'agit de la durée minimale entre les averses (Figure 19).

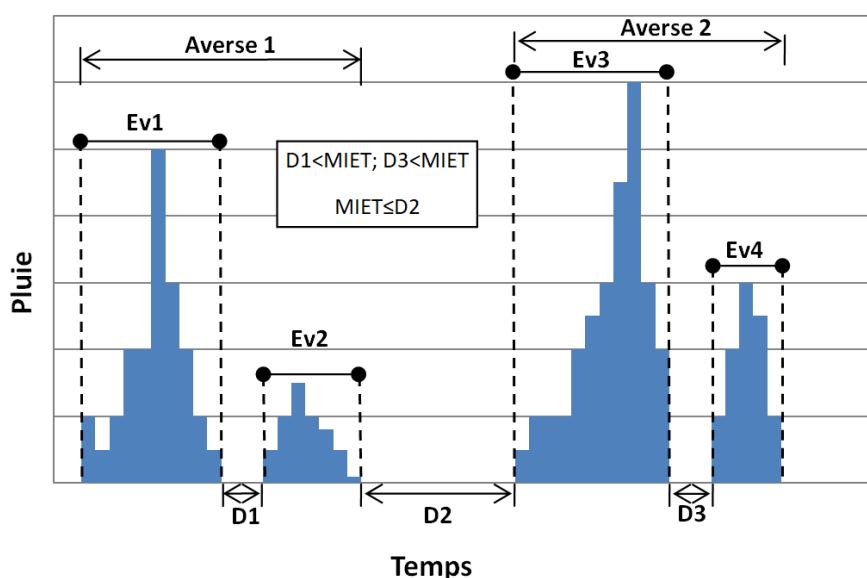


Figure 19 : Séparation des averses selon le MIET (Ev : événement pluvieux, Di : durée entre deux événements successifs)

La définition de la durée minimale entre les averses constitue une étape très importante pour l'identification des averses. Si cette dernière est erronée, elle mettra en question les résultats statistiques obtenus et les analyses effectuées (Joo et al., 2014).

Certaines recherches ont choisi une durée minimale fixe entre les averses. Des valeurs de 2 heures (S. J. Wu et al., 2006; Powell et al., 2007), 6 heures (Huff, 1990; Guo et Adams, 1998; Terranova et Gariano, 2014), 24 heures (Vandenberghe et al., 2010) ont été adoptées par certains chercheurs. Autres valeurs peuvent être découvertes dans la littérature (Dolšak et al., 2016). Alors que des valeurs entre 1 h et 6 h sont recommandées pour des zones urbaines (Joo et al., 2014).

La durée minimale entre les averses peut dépendre des critères de conception. Une durée supérieures ou égale au temps de concentration du bassins versants étudiés peut être adoptée (Asquith et al., 2006; Vandenberghe et al., 2010). Le choix d'une durée longue s'avère intéressant pour identifier les averses indépendantes. Néanmoins, il provoquera la prise en compte des longs épisodes secs en biaisant les durées et les intensités moyennes des averses (Gaál et al., 2014). En essayant de déterminer la valeur minimale la plus appropriée entre les averses, trois méthodes ont été citées dans la littérature et qui sont :

- 1- L'analyse de l'auto-corrélation des averses (Gaál et al., 2014) ;
- 2- L'utilisation de la variation du nombre annuel moyen d'événements pluvieux en fonction de la durée minimale choisie entre les averses (Molina-Sanchis et al., 2016);
- 3- L'utilisation du coefficient de variation des durées minimales choisie entre les averses (Restrepo, 1982).

Ces trois méthodes ont été utilisées à Seoul (Korea) et donnent une large variation de la durée minimale entre les averses allant de 5 h à 20 h (Joo et al., 2014). Le choix de la durée minimale entre les averses est régi également par les objectifs d'applications des résultats obtenus (Guo et Adams, 1998). Ainsi, plusieurs durées minimales entre les averses peuvent être examinées pour offrir plus de flexibilité d'application des résultats obtenus (Asquith et al., 2006).

II.2.3.2. *Lame d'eau des averses*

Pour une lame d'eau minimale spécifiée Pseuil (Figure 20), le nombre des averses retenues d'une durée donnée dépend de la durée minimale adoptée entre les averses (Xie et Nearing, 2016).

Un nombre important des études relatives à l'élaboration des averses de conception notamment de type Huff, adoptent un Pseuil minimal de 12.7 mm (0.5 inch) (Huff, 1990; Bonta, 2004; Terranova et Gariano, 2014; Dolšak et al., 2016; Xie et Nearing, 2016) voire 25 mm (Asquith, 2003; Azli et Rao, 2010; Natale et al., 2014). Ces choix similaires permet, en cas de besoin, une comparaison des différentes courbes élaborées partout dans le monde (Dolšak et al., 2016). Certains ont utilisé des seuils plus petits allant jusqu'à 1mm (Guo et Adams, 1998). En outre, le seuil de 12,7 mm est adopté également dans des recherches concernant l'indice d'érosion du sol. Ce choix est justifié parfois par le gain de temps lors de traitement des données (Xie et al., 2002).

Les averses sont également retenues s'il arrivent à produire un ruissellement au niveau du bassin versant (El- Sayed, 2016). Ainsi, le seuil de sélection peut dépendre des conditions de ruissellement des bassins versants étudiés. Le seuil de 10 mm a été également proposé pour éviter les erreurs de mesures correspondants à de faibles précipitations (Li et al., 2010).

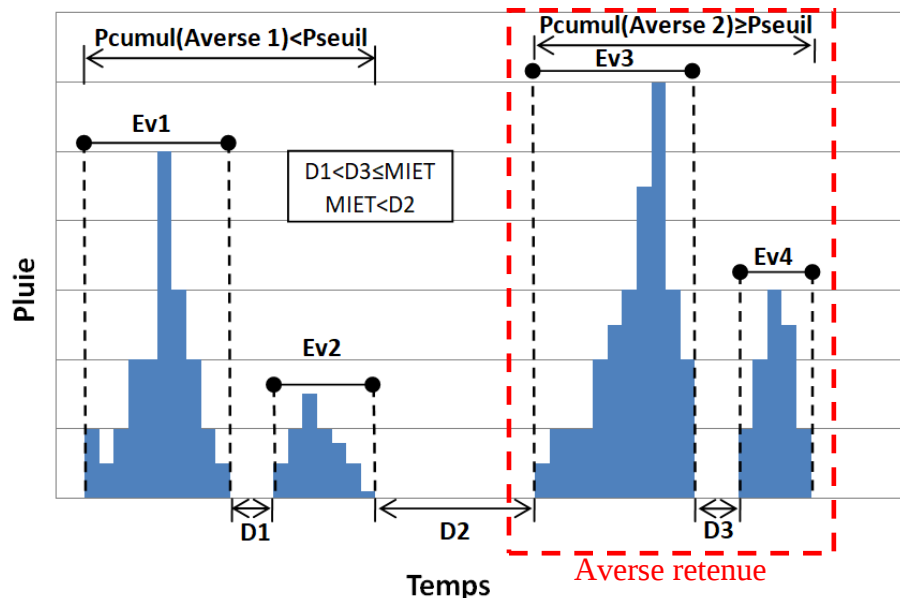


Figure 20: Séparation des averses selon le critère de lame d'eau minimale (Pseuil)

II.2.3.3. Durée des averses

Lors de son analyse des pluies instantanées au Sud-Ouest des Etats Unies, NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration in USA) a traité des averses de durée de 6, 12, 24 et 96 heures (Guo, 2009). Des groupes de durée similaires ont été adoptés par autres auteurs (Sharafati et Zahabiyoun, 2013).

Dans le domaine urbain, les hydrologues s'intéressent généralement aux averses de durée inférieure à 6 h (Marsalek et Watt, 1984; Sighomnou et Desbordes, 1988). Des durées plus petites de 2 h (Awadallah et al., 2017), 3 h (Nur Syereena et al., 2015), 4 h (Powell et al., 2007) et 5 h ont été également adoptées dans certaines recherches pour des besoins de drainage des eaux pluviales (Yen et Chow, 1983). En plus, des durées de 1 h (Pan et al., 2017), 18 h (El- Sayed, 2016), 48 h (Rostami et Rostami, 2014; Xie et Nearing, 2016) et 72 h (Williams-Sether et al., 2004) ont été utilisées dans certaines recherches notamment pour l'élaboration des distributions synthétiques de pluie de conception.

Pour des besoins de modélisation hydrologique, l'analyse des averses dépend également du temps de concentration (t_c) des bassins versants. Les durées retenues par de nombreux chercheurs varient entre t_c et $2t_c$ (Marsalek et Watt, 1984; Al-Rawas et al., 2012; Hassini et Guo, 2017).

La durée des averses traitées est parfois arbitraire ou se base sur des choix faits dans des études similaires réalisées (T.Tyrrell et R.Hasfurth, 1983; Haile et al., 2011).

II.2.3.4. Quartiles

Les pluies sont généralement caractérisées par leurs durées et lame d'eau totales des précipitations. Sachant que le moment de la pointe des précipitations est important (Pan et al., 2017), ces deux paramètres ne sont pas suffisants pour comparer deux averses différentes. Par contre, l'utilisation des hyétogrammes adimensionnels permet de supprimer les deux paramètres précités (durée totale et lame d'eau totale) et de garder la distribution temporelle de l'événement pluvieux (Nur Syereena et al., 2015). Ainsi, il devient possible de comparer deux événements différents (Huff, 1990).

L'hyétogramme adimensionnel se calcule à partir de la précipitation cumulative d'un événement pluvieux en permettant sa classification selon des quartiles (premier (Q1), deuxième (Q2), troisième (Q3), quatrième (Q4), voir la Figure 21) (Williams-Sether et al.,

2004). Certains auteurs ont choisi le classement des averses en 8 groupes au lieu de 4 (Powell et al., 2007). Il s'agit de classer l'averse généralement en quatre groupes selon le quart qui reçoit le maximum de précipitations (Huff, 1990; Vandenberghe et al., 2010). Ainsi, une averse appartient au groupe des premiers quartiles (Q1) si sa plus grande précipitation est enregistrée au cours de son premier quart (Sharafati et Zahabiyoun, 2013). Le choix entre les courbes de conception issues des averses des différents quartiles peut être laissé au concepteur ((Powell et al., 2007), (Back, 2011)).

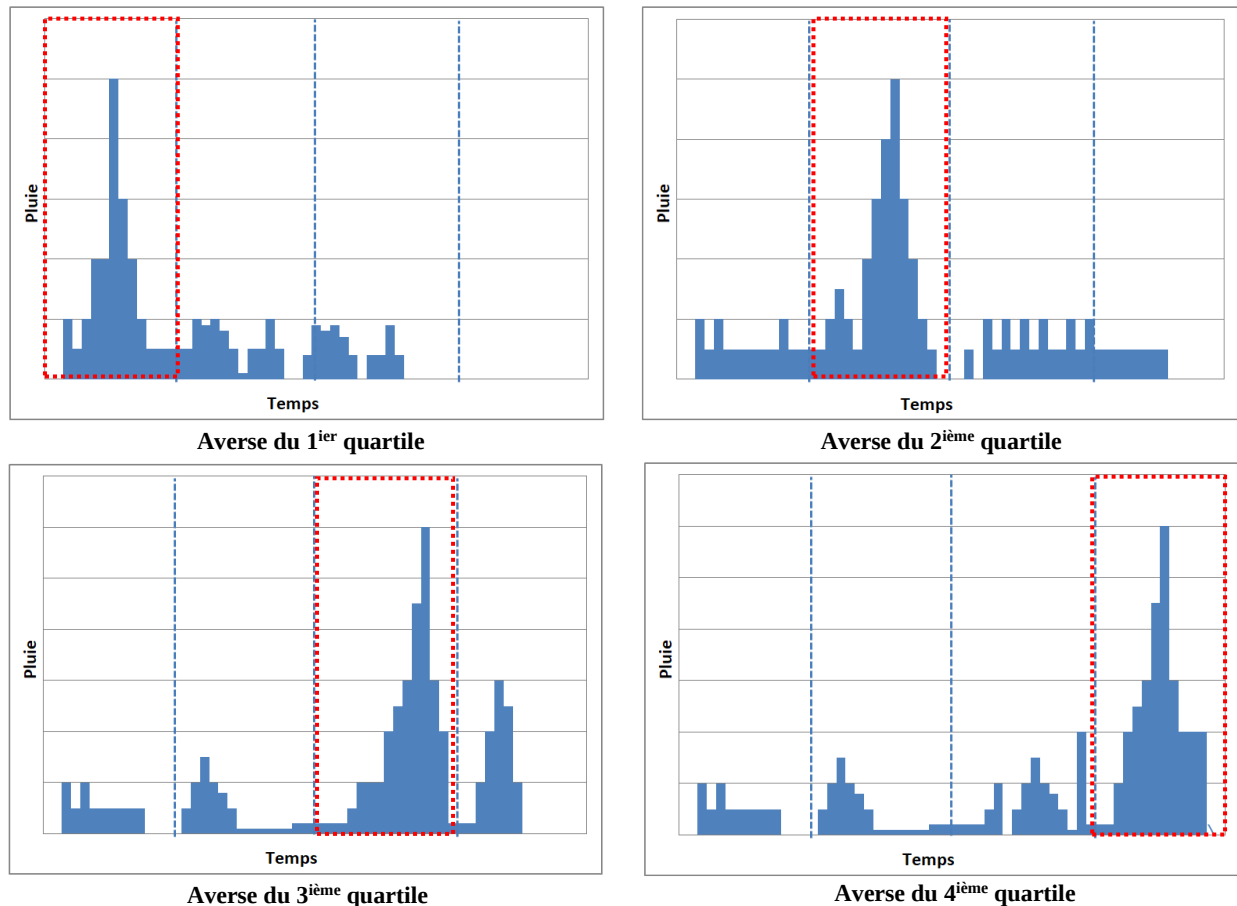


Figure 21: Averses de différents quartiles

La forme adimensionnelle de chaque averse est calculée avec les équations suivantes (Xie et Nearing, 2016) :

$$d_t = \frac{P_t}{P} \quad (2.1) \quad ; \quad D_t = \frac{T_t}{T} \quad (2.2)$$

Avec :

T et P sont la durée totale et la pluie totale de l'averse ;

T_t et P_t sont les cumuls de la durée et des pluies et de l'averse à un instant « t » ;

d_t et D_t sont la pluie et la durée adimensionnelles de l'averses à un instant « t » et varient entre 0 et 1.

II.2.4. Conclusion

L'analyse des averses est très connue dans les études hydrologiques, les études d'érosion du sol et les études climatologiques. La définition des averses à utiliser et des critères nécessaires à leur sélection est une étape primordiale.

Ainsi, les critères adoptés pour la sélection et la classification des averses sont généralement :

- 1- La durée minimale entre les averses (MIET): C'est un critère important dans la sélection des averses. Son choix peut être effectué sur la base des caractéristiques intrinsèques des précipitations ou selon les objectifs des études. Le choix de plusieurs valeurs de MIET offre une flexibilité d'application des résultats obtenus.
- 2- La lame d'eau minimale de l'averse (Pseuil) : une connaissance des caractéristiques des bassins versants étudiés permettra un bon choix du seuil à adopter. Le choix peut dépendre aussi des données des pluies instantanées disponibles (longueur des séries, qualité des enregistrements, etc.).
- 3- La durée de l'averse : Les valeurs retenues varient entre le contexte urbain et le contexte rural et peuvent être liées aussi au temps de concentration des bassins versants étudiés. La durée des averses retenues dépend également des conditions de fonctionnement hydraulique des ouvrages. Le choix de plusieurs durées offre une flexibilité d'utilisation des résultats obtenus.
- 4- Les quartiles d'une averse : Elles permettent la comparaison des averses de lames d'eau et de durées totales différentes. La classification des averses adimensionnelles peut être utilisée pour l'élaboration des pluies de projet synthétique.

La définition et le choix des averses à analyser doivent être effectués tenant compte des objectifs prédéfinis, des données disponibles et du temps alloué au traitement des données.

II.3. CARACTERISTIQUES DES AVERSES DANS LA ZONE D'ACTION DE L'ABHBC

II.3.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comprendre les caractéristiques des précipitations instantanées dans la zone d'étude. Ce travail est le premier du genre dans le contexte marocain, compte tenu de l'approche suivie, de l'analyse effectuée, de la taille des données instantanées utilisées et des résultats obtenus.

L'analyse des pluies instantanées est procédée à travers une analyse des averses enregistrées au niveau de la zone d'étude. Les critères de sélection et de classification des averses sont issus de la revue de littérature présentée dans le chapitre précédent.

Un effort louable a été dédié à la collecte et à l'analyse des données afin d'assurer une bonne base de leur traitement. Ce dernier a été automatisé à travers l'élaboration des scripts sous le Rstudio afin de faciliter le travail itératif. En effet, Rstudio est une plateforme largement utilisée pour l'analyse, le traitement statistique et la visualisation de données volumineuses.

Le travail présenté dans ce chapitre a permis d'arriver à des conclusions très importantes permettant une meilleure compréhension des pluies instantanées dans la zone d'étude.

II.3.2. Collecte et contrôle de la qualité des données pluviométriques

II.3.2.1. Collecte et élaboration d'une base de données

Les données utilisées dans cette recherche ont été collectées auprès de l'ABHBC. Il s'agit principalement des données pluviométriques à pas de temps journalier et instantanée. Les courbes Intensité-durée-Fréquence (IDF) ont été tirées à partir de certaines études réalisées dans la zone. Ces données sont présentées en détail dans les paragraphes suivants.

II.3.2.1.1. Pluies instantanées

Les pluies instantanées collectées se composent des pluies instantanées de 27 pluviomètres automatiques installés dans la zone d'action de l'ABHBC et dont la majorité a été mise en service en 2009. Le pas de temps des enregistrements est de 5 minutes. Ces postes sont

répartis dans la zone d'étude (Figure 22) et les pluies disponibles s'étalent sur des durées allant de 2 ans à 7 ans avec une durée moyenne de 6 ans.

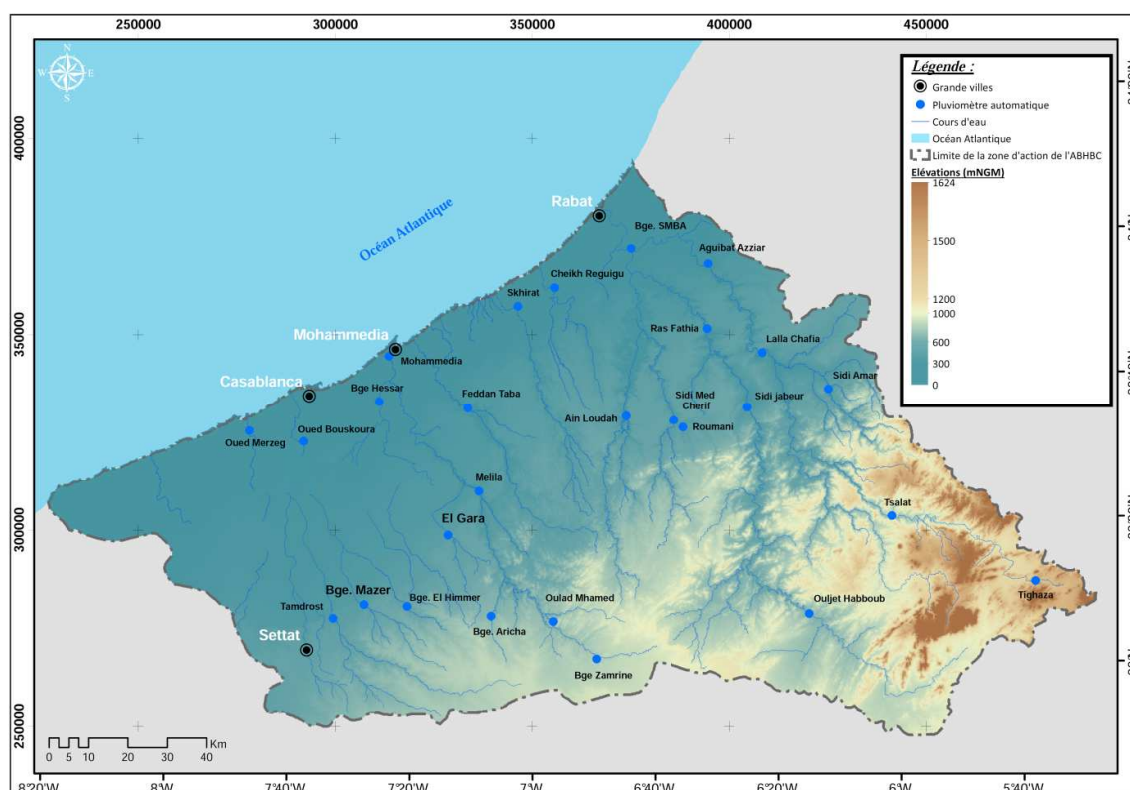


Figure 22: Localisation des 27 pluviomètres automatiques, sources des données de pluies instantanées collectées auprès de l'ABHBC

Les informations relatives aux 27 pluviomètres sont consignées en Annexe 1. Pour faciliter l'exploitation des pluies instantanées, une base de données a été créée sous le logiciel HEC DSS-Vue.

II.3.2.1.2. Pluies journalières

Au niveau de certains postes des pluviomètres automatiques, l'ABHBC dispose également des données des pluies journalières des pluviomètres installées à partir de 1968. Ces données ont été confrontées aux enregistrements des pluies instantanées du même poste pour vérifier la qualité de ces derniers.

Tableau 8: Données des pluies journalières collectées au niveau de la zone d'étude (Source : ABHBC)

Numéro*	Poste	Situation Pj		L** (ans)
		Date début	Date fin	
1	Aguibat Ezziar	25/03/1977	31/01/2017	40
2	Ain Loudah	01/10/1972	31/01/2017	45

Numéro*	Poste	Situation Pj		L** (ans)
		Date début	Date fin	
3	Bge SMBA	07/11/1984	31/01/2017	33
4	Cheikh Reguig	01/09/1977	31/01/2017	40
5	Feddane Taba	15/02/1977	31/01/2017	40
6	Lalla Chafia	01/09/1980	31/01/2017	37
7	Ouljet Habboub	01/11/1972	31/01/2017	45
8	Ras El Fathia	25/03/1977	31/01/2017	40
9	Roumani	01/01/1975	31/01/2017	42
10	Sidi Amar	12/10/1977	31/12/2016	39
11	Sidi Jabeur	17/12/1971	31/01/2017	46
12	Sidi Md Cherif	01/11/1972	31/01/2017	45
13	Skhirate	01/09/1968	31/01/2017	49
14	Tamdrost	01/09/1974	31/01/2017	43
15	Tsalat	01/03/1977	31/01/2017	40
16	Melilla 1	01/12/2002	31/01/2017	15
20	Oulad Mhamed	27/12/2002	31/01/2017	15
26	Bge Mazer	01/09/1974	31/01/2017	43
27	El Gara	01/09/2006	31/01/2017	11

* : Il s'agit des mêmes numéros adoptés dans le Tableau 20 ;

L** : longueur de la série des pluies journalières (ans).

II.3.2.1.3. Courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF)

Pour s'assurer de certains enregistrements douteux des pluies instantanées, les courbes Intensité-durée-fréquence (IDF) disponibles dans les villes de Rabat, Casablanca et Nouacer (au Sud de Casablanca) ont été aussi utilisées. Ces courbes IDF ont été élaborées par la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et couvrent respectivement les périodes 1960-2006, 1960-2013 et 1970-2013.

Les tableaux suivants récapitulent les pluies, correspondant aux différentes durées et occurrences, calculées à partir des trois courbes IDF.

Tableau 9: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour - Poste de Rabat (1960-2006)

Durée (min) T (ans)	1440	720	360	240	60	30	15	5
2	46,0	35,8	27,9	24,1	14,6	11,3	8,8	5,9
5	68,3	53,1	41,3	35,6	21,5	16,8	13,0	8,7
10	82,4	64,1	49,9	43,1	26,1	20,3	15,8	10,6
20	95,8	74,6	58,1	50,2	30,4	23,7	18,4	12,4
50	114,0	88,8	69,1	59,7	36,2	28,2	21,9	14,8
100	126,7	98,7	76,9	66,5	40,4	31,4	24,5	16,5

Tableau 10: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour -Poste de Casablanca (1960-2013)

Durée (min) T (ans)	1440	720	360	240	60	30	15	5
2	38,4	30,1	23,6	20,4	12,5	9,8	7,7	5,2
5	55,5	43,2	33,6	29,0	17,6	13,7	10,7	7,2
10	66,0	51,4	40,0	34,5	20,9	16,3	12,6	8,5
20	79,5	61,8	48,1	41,5	25,1	19,5	15,2	10,2
50	89,2	69,4	53,9	46,6	28,1	21,9	17,0	11,4
100	98,9	76,9	59,8	51,6	31,2	24,3	18,9	12,7

Tableau 11: Pluies correspondantes aux différentes durées et périodes de retour - Poste de Nouacer (1970-2013)

Durée (min) T (ans)	1440	720	360	240	60	30	15	5
2	32,0	25,2	19,9	17,3	10,7	8,5	6,7	4,6
5	47,0	36,7	28,7	24,8	15,1	11,8	9,2	6,2
10	56,4	43,9	34,2	29,6	18,0	14,0	10,9	7,3
20	68,0	52,9	41,2	35,6	21,5	16,7	13,0	8,8
50	76,6	59,6	46,3	40,0	24,2	18,8	14,6	9,8
100	85,3	66,3	51,5	44,4	26,8	20,8	16,2	10,9

II.3.2.2. Contrôle de la qualité des pluies instantanées

L'utilisation des pluviomètres nécessite une surveillance périodique et un entretien régulier pour avoir des enregistrements de bonne qualité. Lors de l'utilisation des données enregistrées, la détection des anomalies de mesure peuvent être effectuées à travers une comparaison des enregistrements des stations voisines, ce constat justifie la mise en place d'un contrôle de qualité des données (Roux (1996) et Legorgeu (2013).

Ainsi, avant d'utiliser les données disponibles, il est recommandé de vérifier leur fiabilité selon Ceressetti (2011). En effet, le contrôle de la qualité des pluies instantanées consiste à faire :

- Une confrontation des cumuls des pluies instantanées et des pluies journalières (Gwenaëlle Le Bloa, 2014) disponibles au niveau du même poste: il s'agit de comparer les cumuls des pluies instantanées et les pluies journalières. En cas d'existence d'un écart important, le pourcentage des données manquantes est analysé au niveau des pluies instantanées ou bien une vérification des écarts détectés est effectuée avec un pas de temps journalier ;

- Une comparaison des pluies instantanées avec les intensités fortes issues des courbes IDF disponibles dans la zone (Legorgeu, 2013) : Tout enregistrement dépassant un seuil donné a été vérifié (10 mm comme pluies centennale en 5min). Cette démarche est très utile au niveau des postes où nous disposons uniquement des pluies instantanées ;
- Une comparaison de certains événements pluvieux douteux avec les enregistrements des pluies instantanées au niveau des postes les plus proches.

Après la confrontation des données disponibles, les enregistrements erronés doivent être rejetés.

A titre d'exemple, la Figure 23 présente les pluies instantanées disponibles au niveau du pluviomètre automatique du barrage SMBA.

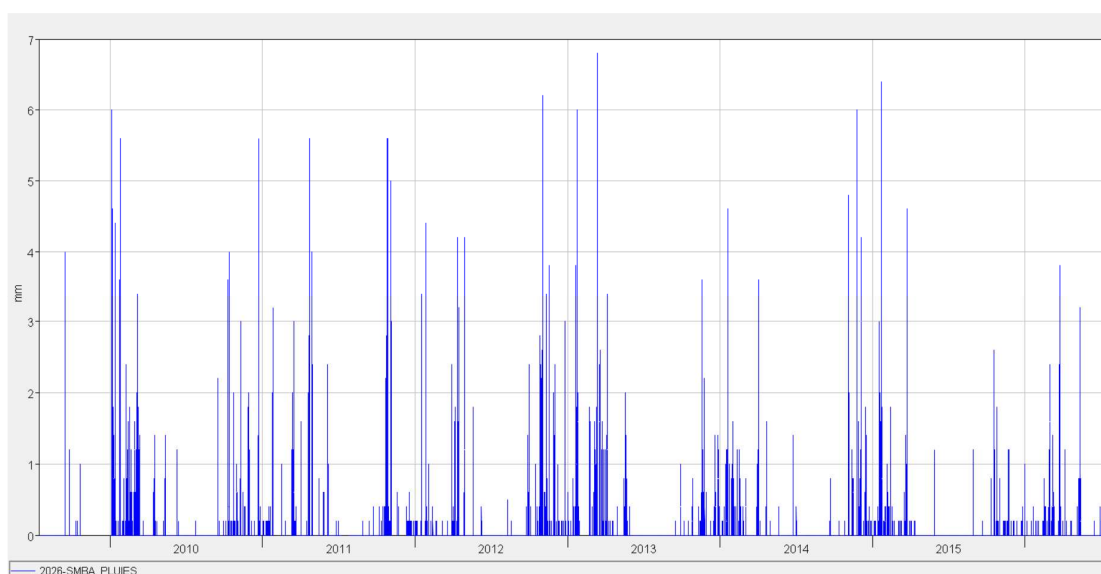


Figure 23 : Pluies instantanées – pluviomètre automatique Barrage SMBA

La confrontation des cumuls des pluies instantanées ($P_j(P_i)$) et des pluies journalières ($P_j(P_j)$) à un pas journalier (Figure 24 et Tableau 12) a permis de conclure que :

- Le pourcentage des pluies instantanées enregistrées varie entre 60% et 95% ;
- L'analyse des données pluviométriques a permis de conclure que l'écart maximal observé entre les données instantanées et journalières est de l'ordre de 35% pendant la période 2012/2014 ;

- Les années 2014 et 2015 présentent une parfaite compatibilité entre les données instantanées et journalières ;
- Les valeurs des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.

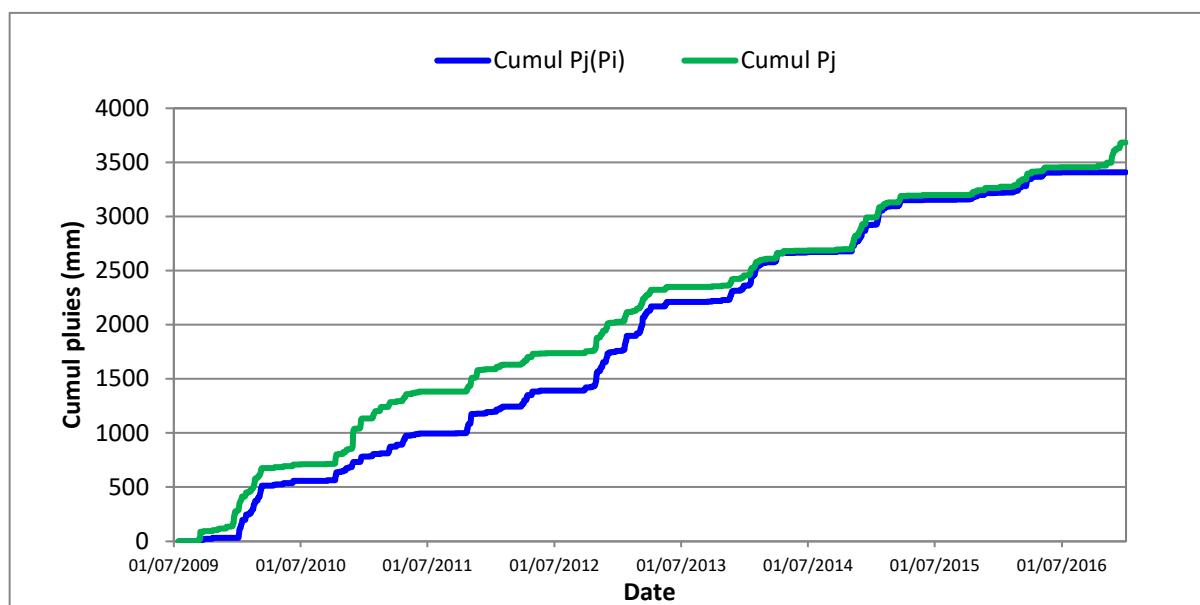


Figure 24: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Barrage SMBA

Tableau 12: Résultats de l'analyse des pluies -poste Bge SMBA

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	557.00	710.40	0.78	76%
2010-2011	437.80	671.00	0.65	59%
2011-2012	396.90	354.00	1.12	86%
2012-2013	819.60	613.80	1.34	92%
2013-2014	458.60	337.00	1.36	96%
2014-2015	485.80	512.40	0.95	93%
2015-2016	252.20	255.70	0.99	76%

On note que :

- P.Annuelle (Pi) : La pluie annuelle calculée à partir des pluies instantanées disponibles au niveau du pluviomètre automatique ;
- P.Annuelle (Pj) : La pluie annuelle calculée à partir des pluies journalières disponibles au niveau du pluviomètre situé au même poste que le pluviomètre automatique ;
- Ratio : C'est le rapport (P.Annuelle (Pi) / P.Annuelle (Pj)) ;

- % données P_i disponibles : Le pourcentage annuel des pluies instantanées disponibles (enregistrées) au niveau du pluviomètre automatique.

La correction des pluies instantanées, de la période 2012/2014, par un coefficient de 1/1,35 permet d'avoir une très bonne concordance entre les cumuls des pluies instantanées corrigées (Cumul $P_{jc}(P_i)$) et les pluies journalières (Cumul P_j) comme le montre le graphe suivant.

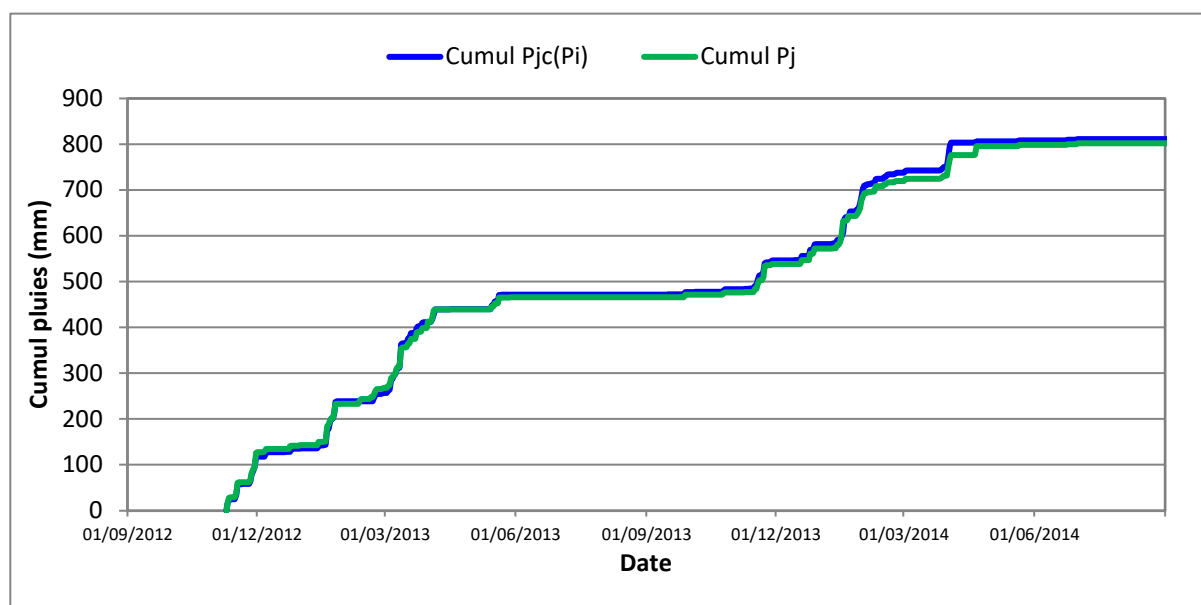


Figure 25 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Barrage SMBA

Ceci peut être donc expliqué par un éventuel problème d'étalonnage du pluviomètre automatique. Ainsi, la pluie adimensionnelle instantanée peut être adoptée dans notre recherche.

Ainsi, les analyses effectuées au niveau de tous les postes sont récapitulées sur le Tableau 13.

Les principaux résultats qui se dégagent des analyses des données disponibles montrent que :

- Les enregistrements des pluies instantanées au niveau des postes Bge SMBA, Feddan Taba et Lalla Chafia ont été corrigées pour certaines périodes en se référant aux pluies journalières enregistrées dans les mêmes postes ;
- Certains événements douteux ont été écartés après une confrontation des pluies instantanées et journalières et une comparaison avec les enregistrements instantanées au niveau des postes proches. Il s'agit des postes Ain Loudah, Ras El Fathia, Tamdrost, Barrage Hassar et Barrage El Himmer ;

- Les enregistrements des pluies instantanées au niveau de deux postes Barrage Mazer et El Gara ont été écartés à cause des grands écarts et des incohérences constatés avec les pluies journalières.

L'Annexe 2 présente en détail l'ensemble des analyses procédées avec des graphes illustratifs et des tableaux récapitulatifs des éléments contrôlés.

Pour une analyse des pluies instantanées à petite ou moyenne échelles comme le cas de notre zone d'étude, les auteurs ont la coutume de ne pas s'intéresser à une analyse régionale pour répartir les stations de mesure des pluies instantanées en des groupes homogènes. Cette démarche est justifiée par les courtes durées d'enregistrement et le nombre limité des stations de mesure des pluies instantanées. Dès lors, Asquith et ses collègues (2005) ont choisi d'inclure des informations spatiales supplémentaires au détriment de l'augmentation de la variabilité entre les stations en raison de l'inclusion des stations avec une courte longueur d'enregistrement.

Tableau 13: Synthèse du contrôle de la qualité des pluies instantanées collectées

Poste	Période		Principales remarques	Conclusions
	Début	Fin		
Aguibat Ezziar	Juillet 2009	Juillet 2016	- Un manque de données est noté sur 2 années 2012/13 et 2013/14 ; - En moyenne, le pourcentage des données disponibles est de 60% sur les autres années ; - Les pluies instantanées enregistrées suivent la même tendance que les pluies journalières enregistrées dans le même poste.	- Pluies instantanées retenues.
Ain Loudah	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 51% ; - Certaines valeurs enregistrées dépassent les valeurs fortes dans la zone.	- Les valeurs douteuses ont été écartées après une comparaison avec les pluies journalières enregistrées ; - Pluies instantanées retenues.
Barrage SMBA	Juillet 2009	Juillet 2016	- Le niveau de disponibilité des données est relativement bon : le pourcentage des données instantanées disponibles varie entre 60% et 95% ; - L'écart maximal observé entre les données instantanées et journalières est de l'ordre de 35% pendant la période 2012/2014.	- Les pluies enregistrées pendant la période 2012/14 ont été corrigées en tenant compte des pluies journalières enregistrées dans le même poste ; - Pluies instantanées retenues.
Cheikh Reguigu	Juillet 2009	Juillet 2016	- Un manque important des enregistrements est noté : aucun enregistrement instantané pour l'année 2012/13 ; - La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 24% ; - Les valeurs des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les pluies journalières enregistrées dans le même poste.	- Pluies instantanées retenues.
Feddan Taba	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 84% ; - Les écarts observés entre les données instantanées et journalières sont de l'ordre de 50%.	- Les pluies enregistrées pendant la période 2012/14 ont été corrigées en se basant sur les pluies journalières du même poste ; - Pluies instantanées retenues.
Lalla Chafia	Juillet 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 85% ; - Les écarts observés entre les données instantanées et journalières varient entre 56% et 37%.	- Les pluies instantanées ont été corrigées en tenant compte des pluies journalières enregistrées dans le même poste ; - Pluies instantanées retenues.
Ouljet Habboub	Mars 2012	Juin 2016	- Un manque important d'enregistrement instantané est noté : 61%. - On note généralement une amélioration progressive dans le fonctionnement du pluviomètre automatique ; - Les valeurs des pluies instantanées et journalières du même poste sont compatibles.	- Pluies instantanées retenues.

Poste	Période		Principales remarques	Conclusions
	Début	Fin		
Ras El Fathia	Août 2009	Juillet 2016	- Le pourcentage des données instantanées disponible varie entre 30% (année 2014/15) et 90% pour la période 2011/13. Mais globalement, un bon pourcentage des données est disponible (72%) ; - Les écarts observés entre les données instantanées et journalières varient entre +60% et -10% ; - Certains événements pluvieux sont douteux en comparaison avec les pluies instantanées des pluviomètres les plus proches.	- Les valeurs douteuses ont été écartées après une comparaison avec les pluies journalières enregistrées et les pluies instantanées au niveau des postes voisins ; - Pluies instantanées retenues.
Roumani	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 87% ; - Globalement le poste présente une bonne compatibilité entre les données des Pi et des Pj.	- Pluies instantanées retenues.
Sidi Amar	Août 2009	Mai 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 71% ; - Le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées et journalières.	- Pluies instantanées retenues.
Sidi Jabeur	Juillet 2009	Juillet 2016	- Le niveau de disponibilité des pluies instantanées enregistrées est moyen (56%) ; - L'écart entre les données instantanées et journalières est compatible avec le pourcentage des enregistrements instantanés disponibles.	- Pluies instantanées retenues.
Sidi Mohamed Cherif	Juillet 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 74% ; - Globalement, le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et les pluies journalières au niveau des périodes communes.	- Pluies instantanées retenues.
Skhirat	Juin 2009	Juillet 2016	- Le pourcentage des données disponibles est assez bon : Il dépasse 60% sauf pour l'année 2012/13 où on a seulement 40% des données disponibles ; - Globalement, le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et les pluies journalières.	- Pluies instantanées retenues.
Tamdrost	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 78% ; - Certains événements pluvieux sont douteux en comparaison avec les pluies journalières enregistrées au niveau du même poste ; - Globalement, on note une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et les pluies journalières.	- Les événements douteux ont été écartés ; - Pluies instantanées retenues.
Tsalat	Juin 2009	Juillet 2016	- Un manque important des enregistrements Pi est noté : le pourcentage de données disponibles varie entre 20% et 85% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.	- Pluies instantanées retenues.

Poste	Période		Principales remarques	Conclusions
	Début	Fin		
Melila1	Juillet 2014	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 85% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.	- Pluies instantanées retenues.
Mohammedia	Juin 2009	Mai 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 86% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca.	- Pluies instantanées retenues.
Oued Bouskoura	Sept 2014	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 80% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Pluies instantanées retenues.
Oued Merzeg	Oct 2014	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 76% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Pluies instantanées retenues.
Oulad Mhamed	Juin 2009	Juillet 2016	- Globalement, on a un bon pourcentage des données disponibles qui dépasse 75%, à l'exception de l'année 2013/14 où on a un manque évalué à 70% ; - En tenant compte du pourcentage des données instantanées disponibles, les pluies instantanées et les pluies journalières sont compatibles.	- Pluies instantanées retenues.
Tighaza	Oct 2014	Juillet 2016	- Le pourcentage moyen des données instantanées disponibles est faible (13.3%) ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Rabat.	- Pluies instantanées retenues.
Barrage Aricha	Juin 2009	Janvier 2014	- Le pourcentage moyen des données instantanées disponibles est de 84% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Pluies instantanées retenues.
Barrage Zamrine	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 74% ; - Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Pluies instantanées retenues.
Barrage Hassar	Juin 2009	Juillet 2016	- La moyenne du pourcentage des données disponibles est de 80% ; - Certaines valeurs enregistrées dépassent les valeurs fortes dans la zone. - En générale, les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Les valeurs douteuses ont été écartées après une comparaison avec les pluies journalières et les pluies instantanées au niveau des postes voisins ; - Pluies instantanées retenues.

Poste	Période		Principales remarques	Conclusions
	Début	Fin		
Barrage El Himmer	Juin 2009	Juin 2015	- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie de 70% à 91% pour la période 2009/15 avec une moyenne de 81%. - Certaines valeurs enregistrées dépassent les valeurs enregistrées dans des postes proches. - En générale, les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.	- Les valeurs douteuses ont été écartées ; - Pluies instantanées retenues.
Barrage Mazer	Juin 2009	Juillet 2016	- A l'exception de l'année 2013/14, la moyenne du pourcentage des données disponibles est de 80% ; - Plusieurs valeurs des pluies instantanées enregistrées en 2015 dépassent largement les valeurs fortes dans la zone ; - Une incohérence est constatée entre le pourcentage des données disponibles et le rapport entre les données instantanées et journalières.	- Pluies instantanées écartées.
El Gara	Juin 2009	Oct 2014	- Une incohérence est constatée entre le pourcentage des données disponibles et le rapport entre les données instantanées et journalières. - Un éventuel dysfonctionnement du pluviomètre automatique est noté sur quelques périodes (Novembre 2010 et Octobre-Novembre 2012). Il se traduit par l'important écart entre les données Pi et Pj quoique les données soient disponibles lors des événements pluvieux.	- Pluies instantanées écartées.

II.3.3. Critères de sélection et de classification des averses

Pour l'extraction des averses, les critères utilisés sont :

1- Le seuil de la lame d'eau de la pluie ou la pluie minimale d'une averse : L'analyse des courbes IDF disponibles dans la zone montre que les pluies centennales de 60 min et 240 min sont de 12.6 mm et 20.6 mm respectivement. Ainsi, le seuil de 12.7 mm, généralement utilisés dans des études similaires au niveau international, peut être adopté. En outre, et tenant compte que les séries des pluies instantanées disponibles ne sont pas très longues, le même seuil est adopté pour les différents groupes de durées définies ci-après.

2- La période sèche (sans pluie) ou la durée minimale entre les averses (MIET) : Pour donner plus de flexibilité à l'analyse et à l'utilisation des résultats obtenus, l'analyse des caractéristiques des averses pour plusieurs valeurs de durée minimale entre les averses est effectuée. Ainsi les MIET utilisés sont 0.5 h, 1 h, 2 h, 6 h, 12 h et 24 h.

3- La classification des averses selon des groupes de durée : dans le contexte marocain, les distributions temporelles des précipitations utilisées sont généralement de 4 h et 24 h. Afin d'analyser les caractéristiques des pluies instantanées pour plusieurs intervalles de durées, les averses retenues ont été réparties selon les classes 0 h à 4h, 4 h à 6 h, 6 h à 12 h, 12 h à 24 h et plus que 24 h.

4- La classification des averses selon des groupes de quartiles : Les averses ont été classées selon les quartiles 0 à 25% (Q1), 25 à 50% (Q2), 50 à 75% (Q3), 75 à 100% (Q4).

Pour l'automatisation du traitement des pluies instantanées, et précisément la classification des averses et l'analyse des résultats obtenus, des scripts ont été développés sous Rstudio en permettant un gain de temps très important. En effet, après les étapes de collecte et du contrôle qualité des données, il devient possible de traiter une dizaine de millions des lignes de pluies instantanées en quelques minutes. Pour arriver à ce résultat, plusieurs révisions et adaptations des scripts ont été réalisées ainsi que l'intégration de certaines packages disponibles sur le net notamment Readxl, Chron et Padr.

Les figures suivantes présentent des extraits des scripts développés.

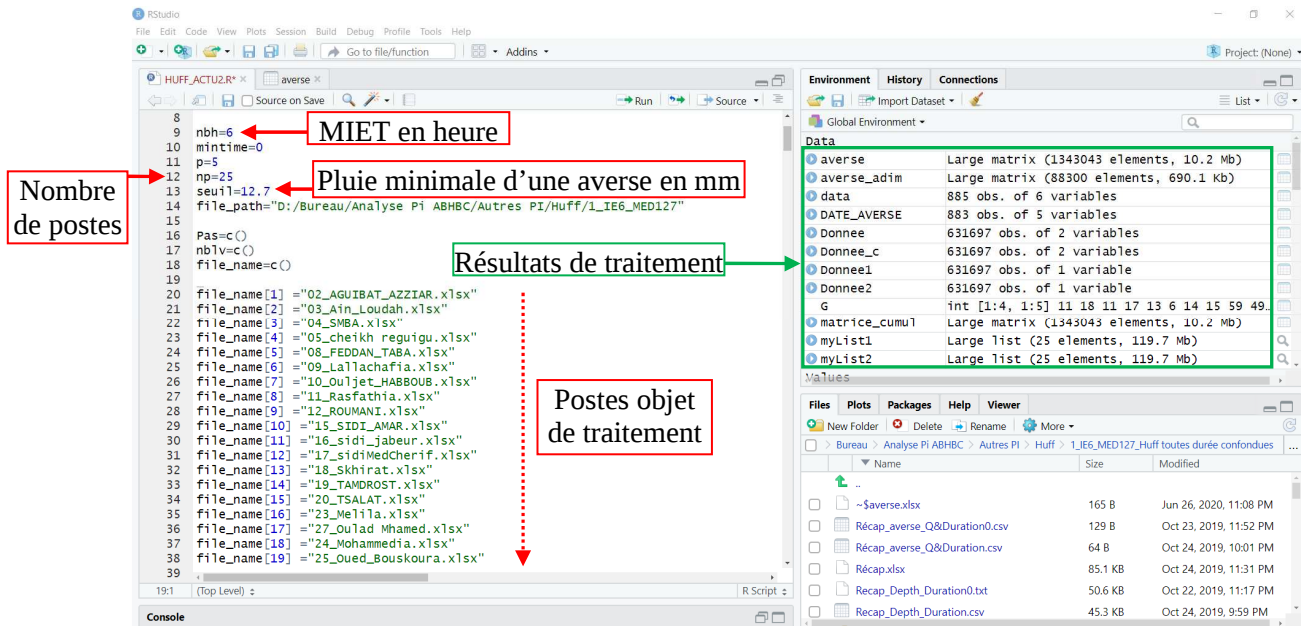


Figure 26: Vue sur un script développé

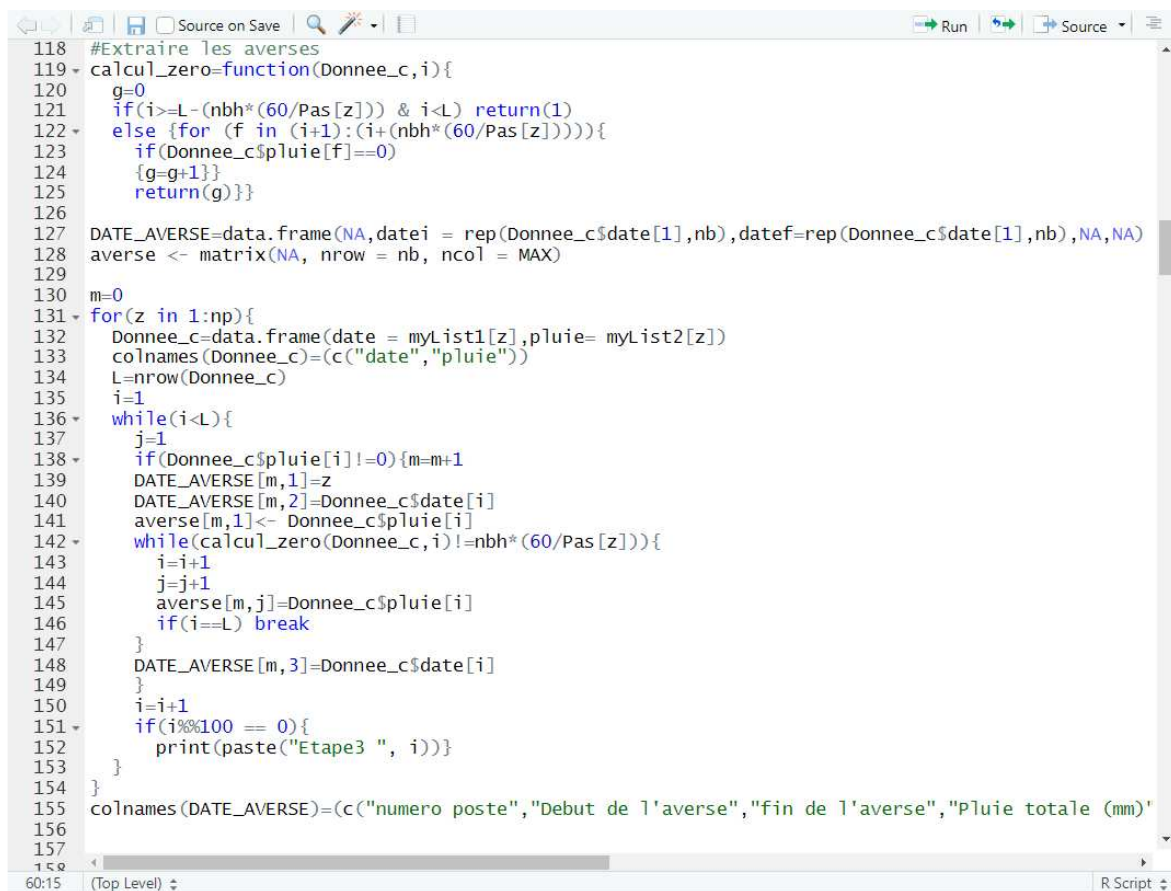


Figure 27: Partie du script permettant l'extraction des averses

La Figure 28 présente le processus global adopté pour le traitement des pluies instantanées.

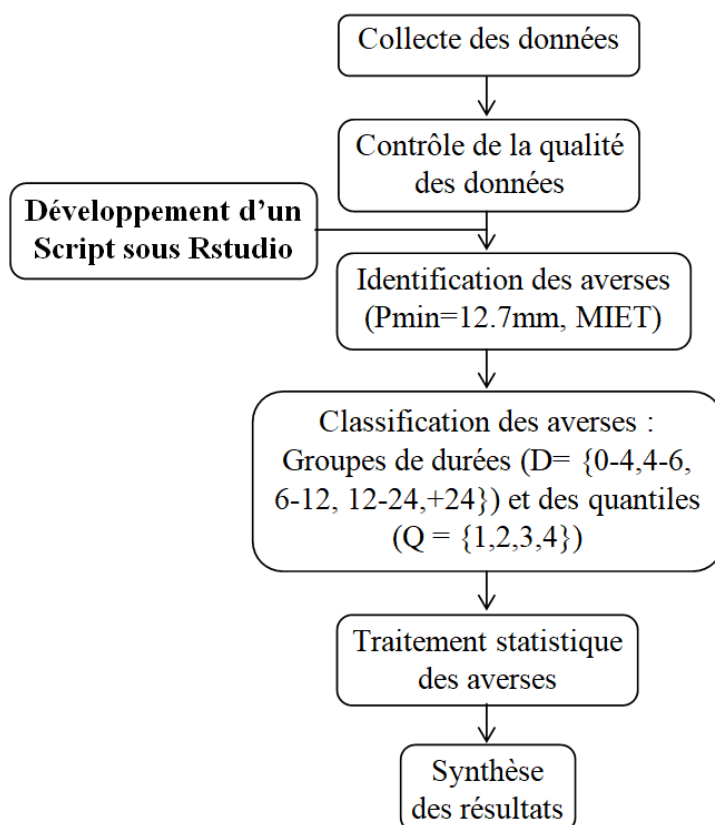


Figure 28: Processus d'analyse des pluies instantanées (Barkouki et Kacimi, 2018)

II.3.4. Résultats et discussion

Lors du traitement des données, une attention particulière a été accordée à la durée minimale entre les averses. Les résultats suivants montreront son impact sur les caractéristiques des averses retenues. De même, tenant compte du nombre important des tableaux, des graphes et des cartes élaborées à partir des données analysées, les paragraphes suivants présentent uniquement les éléments nécessaires récapitulant les résultats obtenus. Les autres graphes sont consignés en annexe.

II.3.4.1. Durées des averses

Avant de passer à l'analyse des caractéristiques des averses, il faut tout d'abord les extraire. En se basant sur un seuil de pluie cumulée de 12.7 mm et un MIET variable, le Tableau 14 récapitule le nombre des averses retenues par groupes de durées.

Tableau 14: Répartition des averses retenues par groupes de durées selon les différents MIET (Barkouki et al., 2020)

MIET (h)	0-4h	4h-6h	6h-12h	12h-24	+ 24h	Total
24	10	7	55	123	693	888
12	29	20	99	243	535	926
6	56	46	185	358	238	883
2	143	100	302	120	17	682
1	198	123	155	28	7	511
0.5	231	89	56	9	3	388

L'analyse du Tableau 14 montre que :

- Le MIET a un grand impact sur la répartition des averses retenues par groupes de durées. En effet, pour le groupe 0-4h, le pourcentage des averses est inversement proportionnel au MIET. En augmentant le MIET, le pourcentage des averses diminue d'une manière exponentielle. Par contre, pour les averses d'une durée supérieure à 24 h, l'augmentation du MIET provoque une augmentation du pourcentage des averses retenues ;
- Les averses du groupe 4h-6h, 6h-12h et 12h-24h, le pourcentage maximal des averses correspond respectivement à des MIET de 1 h, 2 h et 6 h respectivement ;
- Le total des averses retenues augmente en fonction du MIET avec une tendance logarithmique comme le montre la Figure 29.

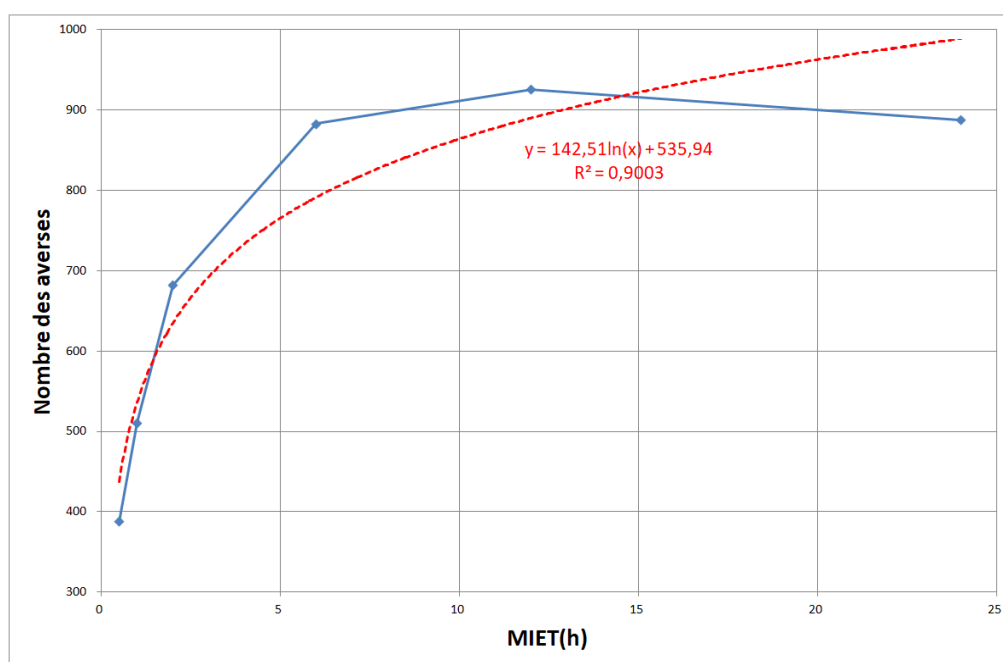


Figure 29: Nombre des averses retenues en fonction du MIET (Barkouki et al., 2020)

Pour faciliter l'analyse de classification des averse par poste pluviométrique, en tenant compte de leurs répartitions spatiales, les résultats ont été présentés sous format de cartes allant de la Figure 30 à la Figure 35.

En présentant le pourcentage des groupes de durées pour chaque poste pour le même MIET, on constate généralement la même tendance des statistiques au niveau des différents postes.

Par exemple, pour un MIET de 24 h, la majorité des averse retenues au niveau de tous les postes ont une durée supérieure à 24 h. La même chose pour un MIET de 2 h, les averse retenues ont généralement des durées de 6 h-12 h puis de 12 h-24 h.

L'analyse de la répartition spatiale des groupes des durées d'averse montre l'existence d'une tendance régionale à l'exception du poste de Tighza. En effet, le pourcentage moyen des données instantanées disponibles au niveau dudit poste est de 13% pendant 2 ans. Ainsi, les statistiques au niveau de ce poste ne sont pas représentatives.

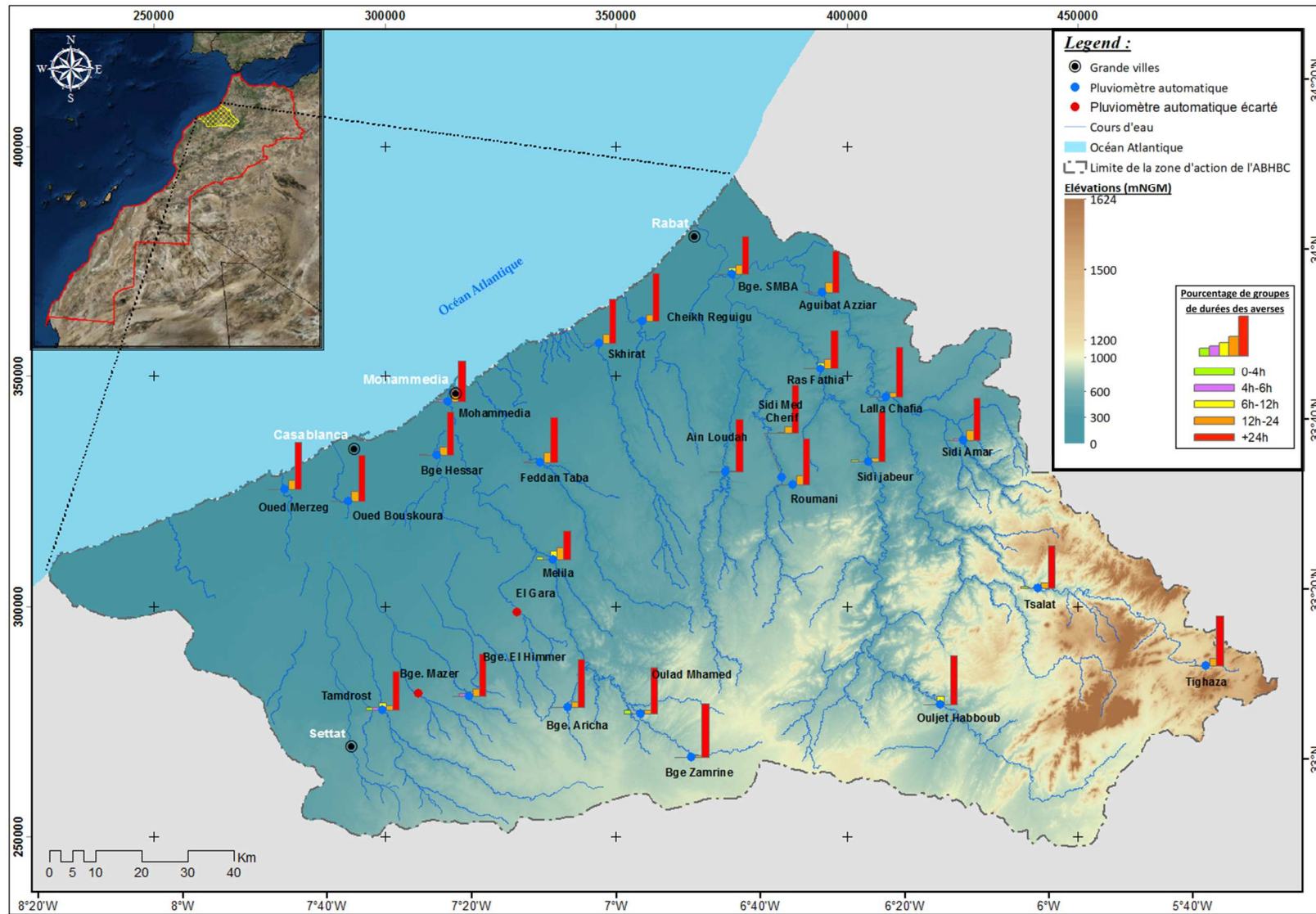


Figure 30: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=24h (Barkouki et al., 2020)

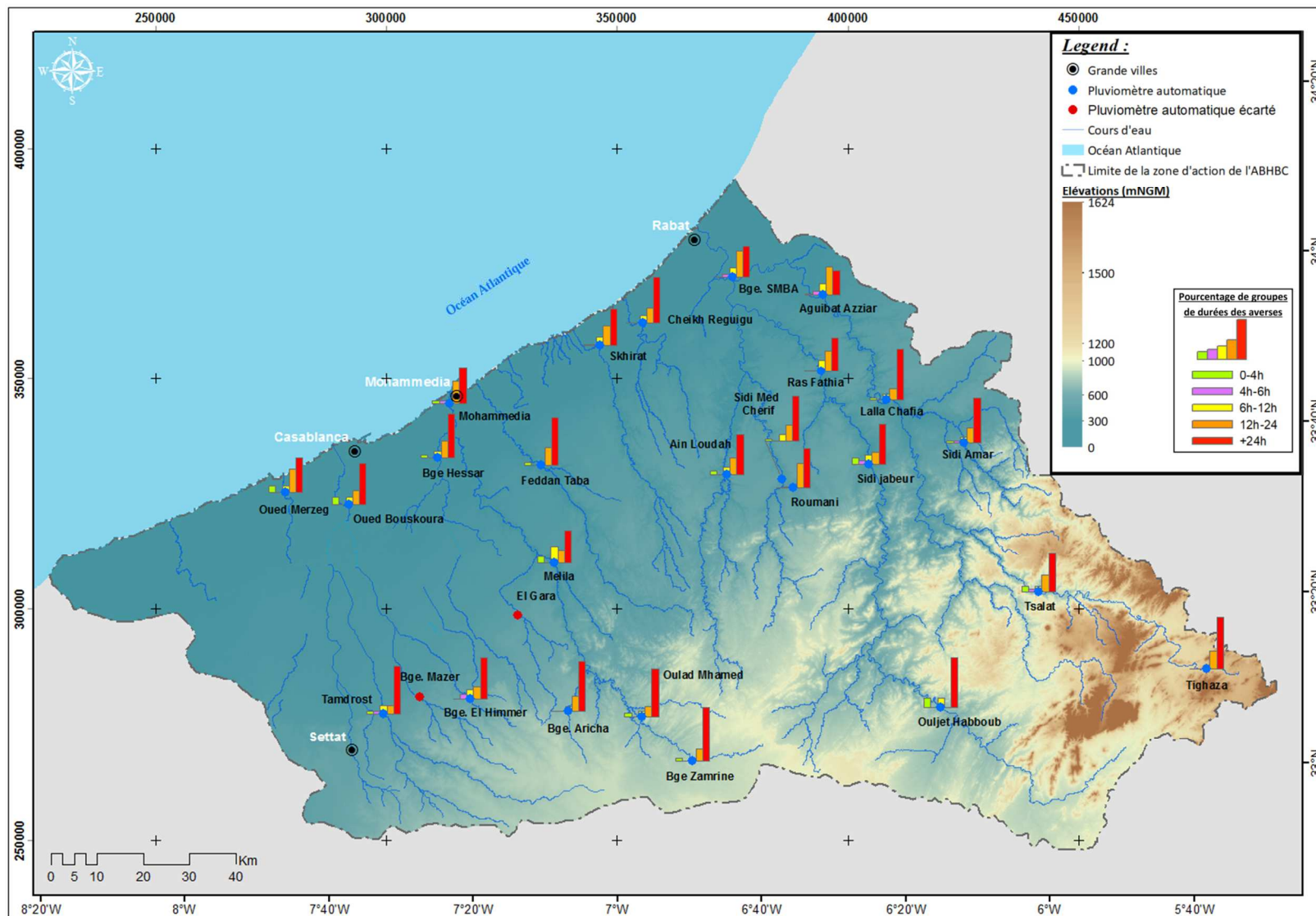


Figure 31: Classification des averse retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=12h (Barkouki et al., 2020)

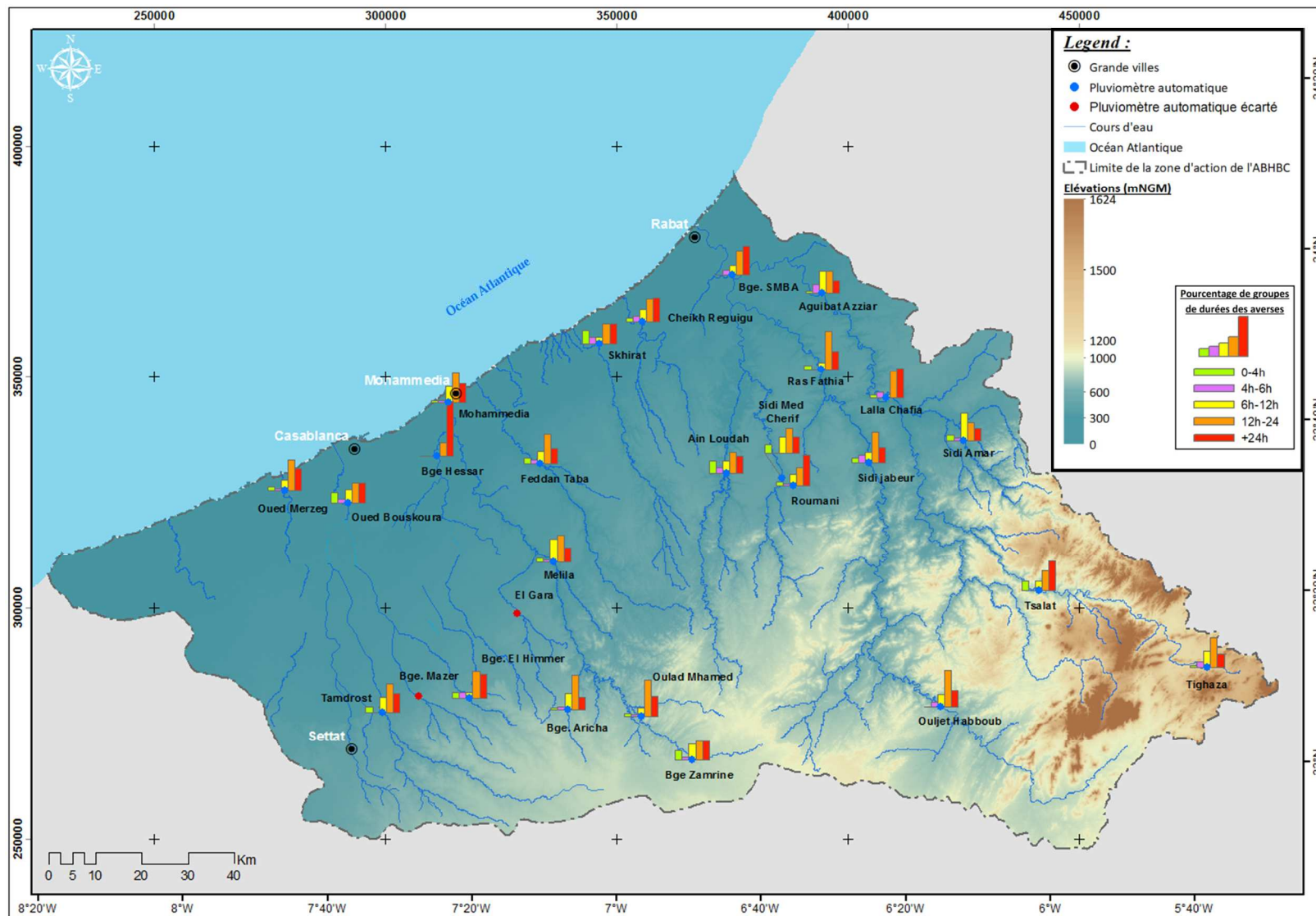


Figure 32: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=6h (Barkouki et al., 2020)

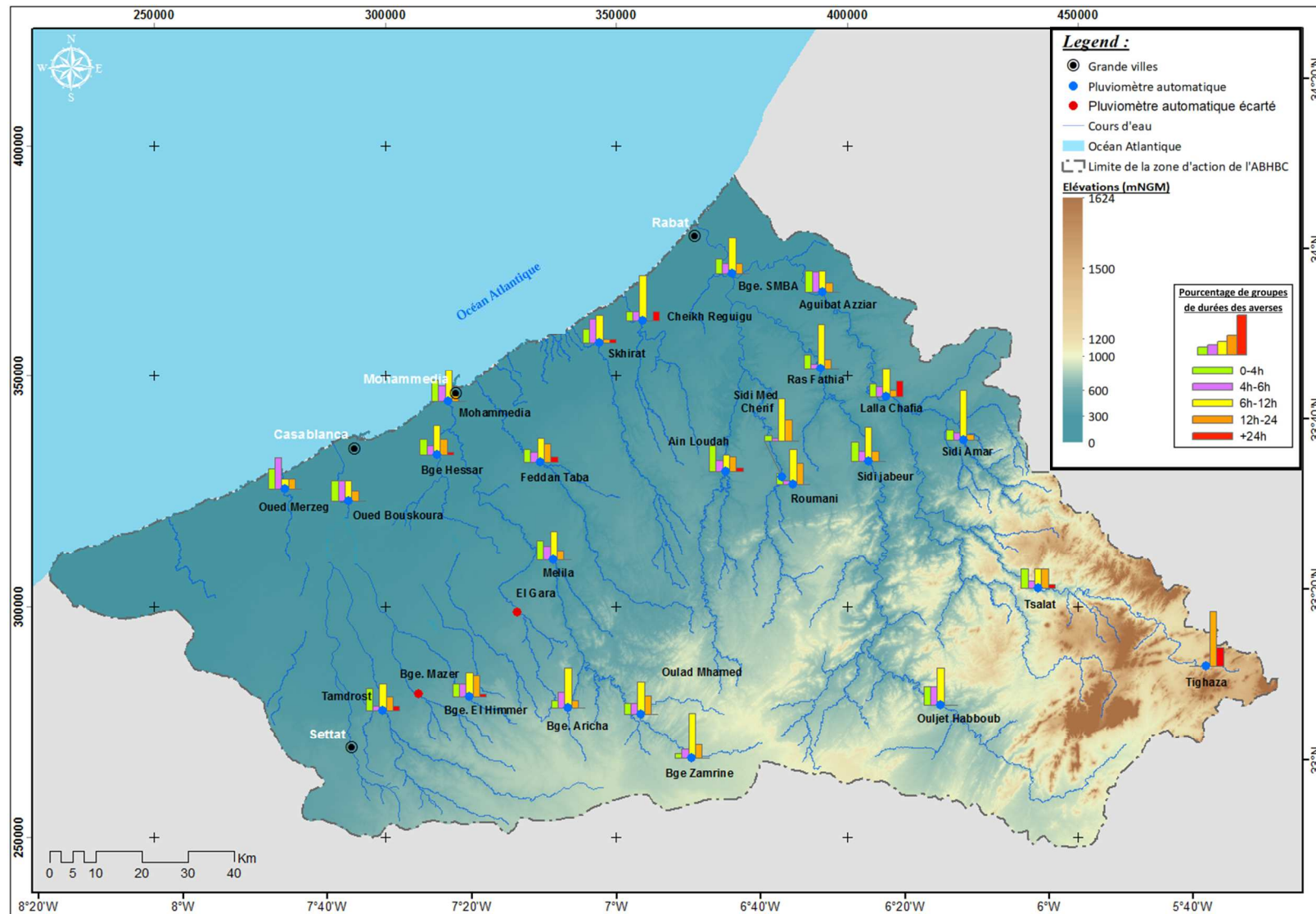


Figure 33: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET= 2 h (Barkouki et al., 2020)

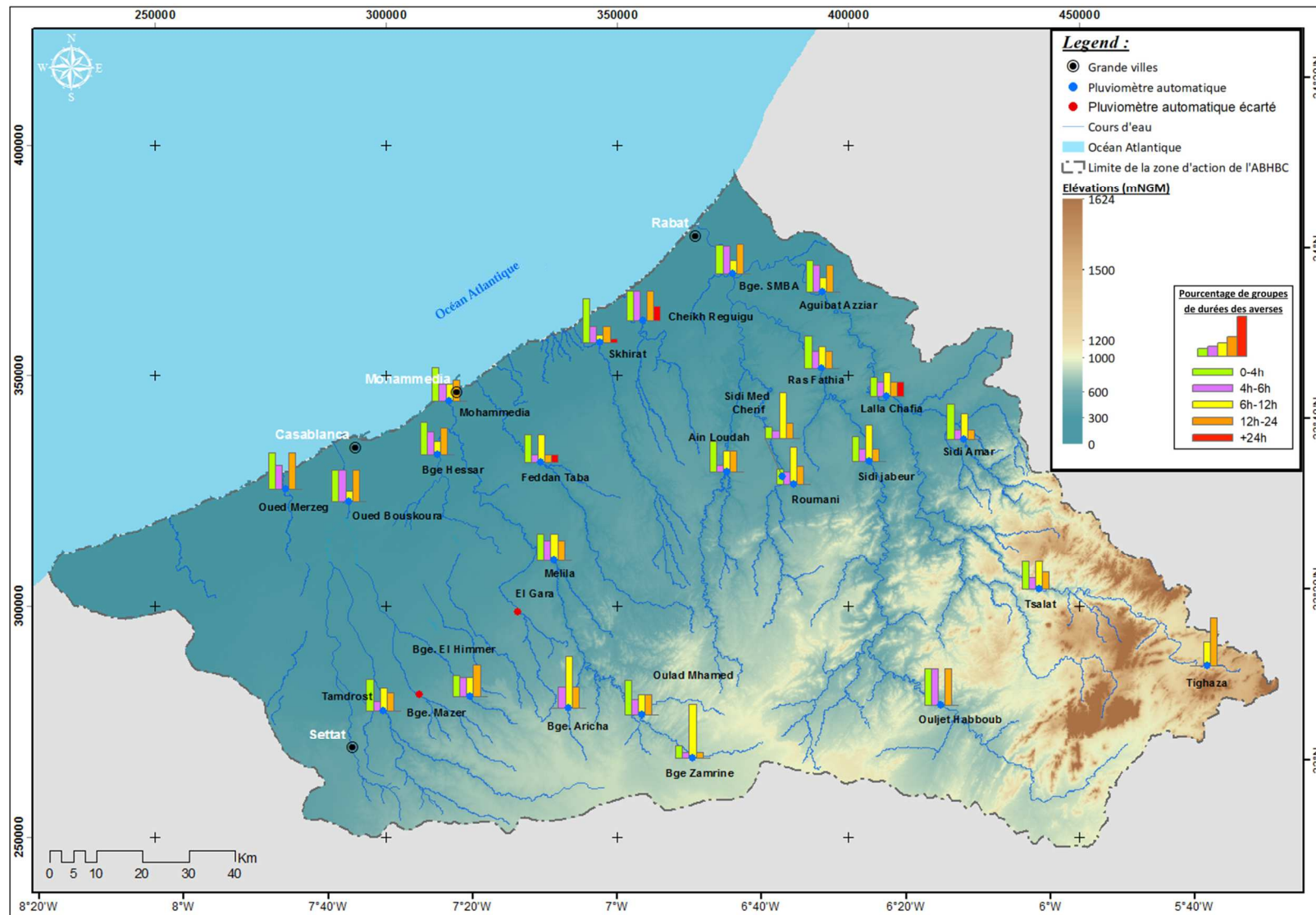


Figure 34: Classification des averse retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=1h (Barkouki et al., 2020)

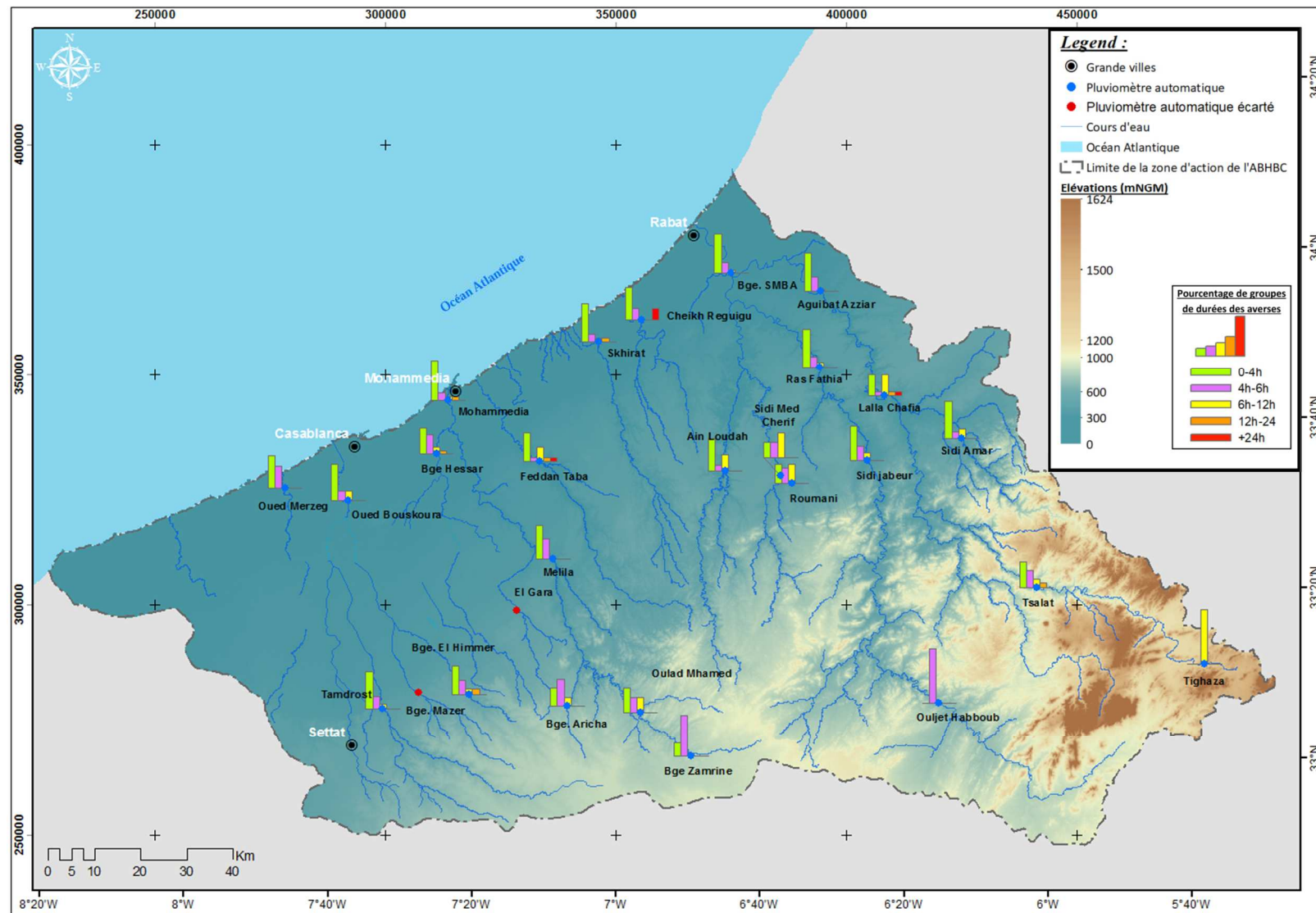


Figure 35: Classification des averses retenues au niveau de chaque poste pluviométrique selon leurs durée - MIET=0.5h (Barkouki et al., 2020)

II.3.4.2. Lames d'eau des averses

L'analyse des lames d'eau des averses retenues a été faite pour les différentes valeurs du MIET et selon les groupes des durées adoptées. Le Tableau 15 récapitule les résultats obtenus.

En variant le MIET, la variation des lames d'eau moyennes dans le même groupe de durée reste faible. Pour le même MIET, la lame d'eau moyenne des averses augmente généralement avec l'augmentation des durées des averses. Cette augmentation devient importante au niveau du groupe de durée supérieure à 24 h.

Pour les valeurs (1) jusqu'à (5) (Tableau 15), les moyennes obtenues restent indicatives tenant compte du nombre limité des averses retenues (Tableau 14).

Tableau 15: Lames d'eau moyenne des averses par groupes de durées selon les différents MIET (Barkouki et al., 2020)

MIET (h)	0-4h	4h-6h	6h-12h	12h-24	+ 24h
24	19.6	23.0	23.8	21.2	34.2
12	20.6	20.2	19.8	21.2	30.9
6	18.7	18.7	19.3	21.5	32.2
2	17.7	19.2	19.9	26.0	74.6 ⁽¹⁾
1	18.3	19.0	20.7	48.4 ⁽²⁾	103.9 ⁽³⁾
0.5	18.4	20.1	23.5	78.5 ⁽⁴⁾	67.2 ⁽⁵⁾

Pour évaluer la variabilité spatiale des lames d'eau retenues, une analyse a été faite sur la base des boîtes à moustaches. Ainsi, les bords inférieure et supérieure de la boîte représentent les quartiles de 25% et 75% au niveau de chaque poste. La ligne horizontale à l'intérieur de la boîte représente la médiane. Tandis que les lignes horizontales supérieure et inférieure situées en dehors de la boîte représentent respectivement 25% moins 1,5 IQR et le quartile 75% plus 1,5 IQR. IQR est l'intervalle interquartile correspondant au quartile à 75% moins le quartile à 25% (Haile et al., 2011). La largeur des boîtes est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'observation par groupe.

L'analyse des lames d'eau des averses retenues au niveau des différents postes montre un comportement régional. En effet, pour un MIET de 24h par exemple (Figure 36), les médianes des lames d'eau varient entre 19 mm et 33 mm avec une moyenne de 25mm. Les lames d'eau des averses ont une distribution asymétrique par rapport à la médiane. En effet,

les lames d'eau supérieures à la médiane sont réparties sur une plage plus large que les lames d'eau des averses inférieures à la médiane.

L'analyse des résultats correspondant à un MIET de 2h (Figure 37) et aux autres MIET (Annexe 3) confirme les mêmes conclusions tirées pour un MIET de 24h.

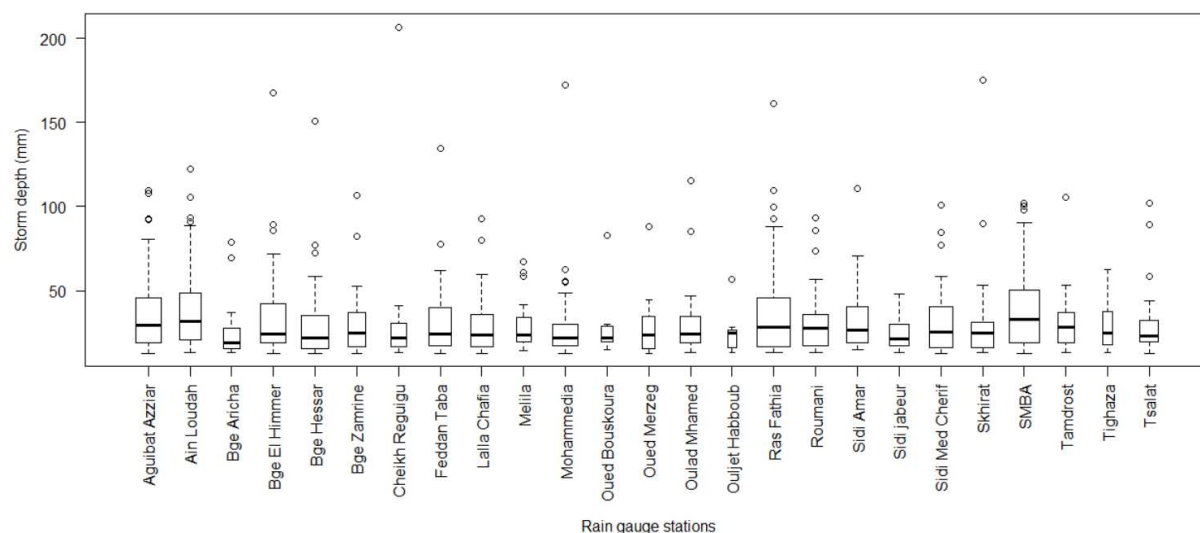


Figure 36: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=24h (Barkouki et al., 2020)

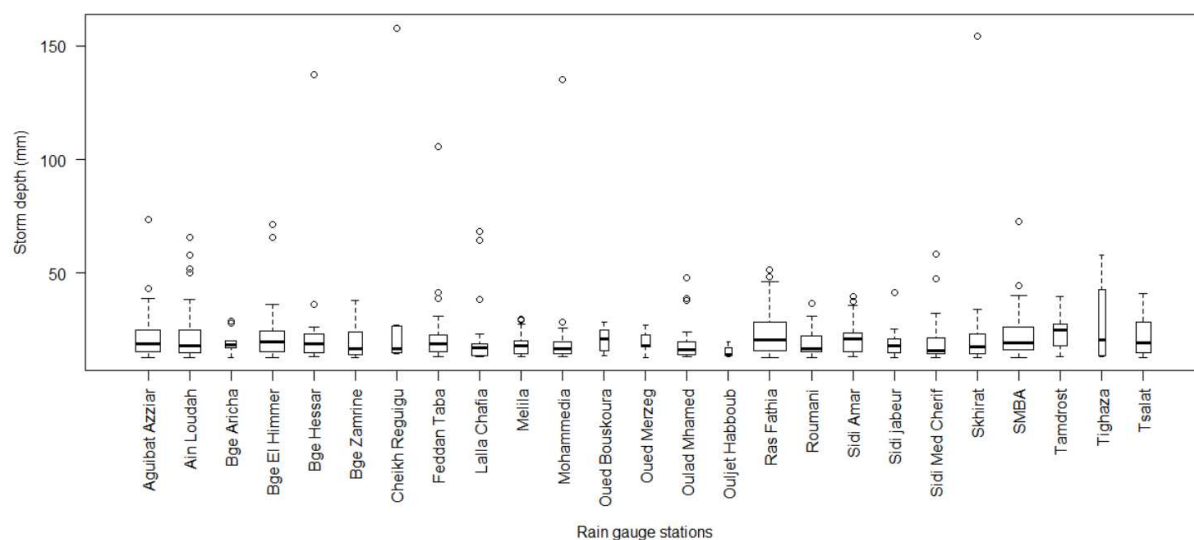


Figure 37: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=2h (Barkouki et al., 2020)

II.3.4.3. Classement des averses par quartiles

Les averses retenues ont été classées en fonction de leurs quartiles. Les figures suivantes 38 présentent deux exemples (MIET=24h et MIET=2h) des averses adimensionnelles classées.

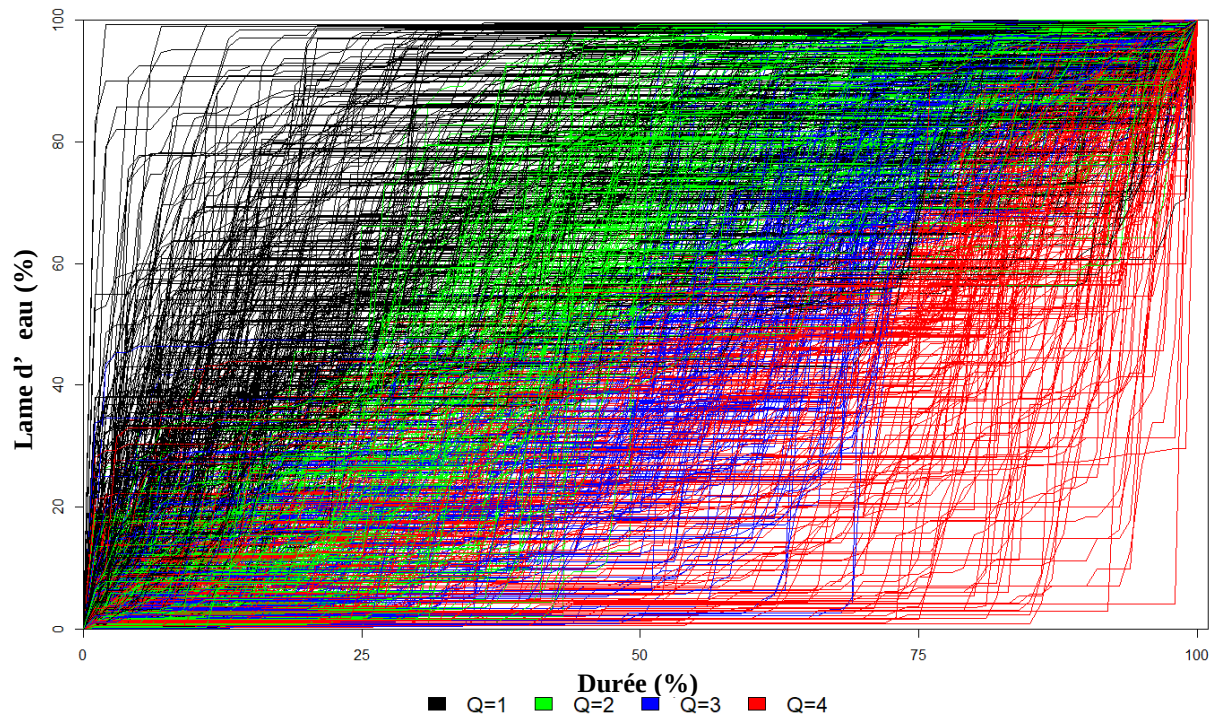


Figure 39: Classification des averse selon leurs quartiles (MIET=24h) (Barkouki et al., 2018)

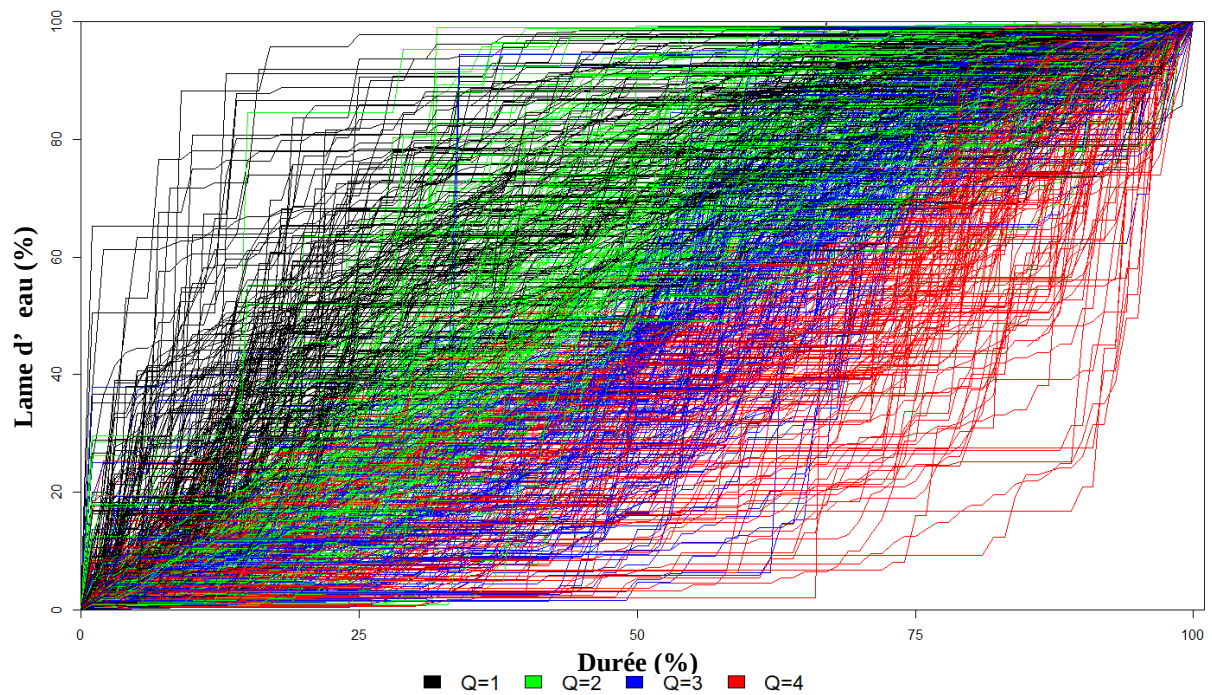


Figure 40: Classification des averse selon leurs quartiles (MIET=2h)

L'analyse des averse classées montre que le pourcentage des quartiles est légèrement impacté par la variation du MIET. Ainsi, en moyen 32%, 25%, 21% et 22% des averse classées appartiennent respectivement aux quartiles 1, 2, 3 et 4. Les résultats détaillés correspondants à chaque MIET sont résumés dans le Tableau 16.

Tableau 16: Pourcentage des quartiles en fonction du MIET (Barkouki et al., 2020)

MIET (h)	Q=1	Q=2	Q=3	Q=4
24	37%	21%	18%	24%
12	35%	24%	18%	22%
6	33%	26%	21%	20%
2	28%	24%	26%	22%
1	34%	24%	17%	25%
0.5	26%	32%	25%	18%
Min	26%	21%	17%	18%
Max	37%	32%	26%	25%
Moyenne	32%	25%	21%	22%
Ecart type	0.04	0.04	0.03	0.03

II.3.4.4. Répartition saisonnière des averses

Les averses retenues sont réparties principalement entre trois saisons : le printemps, l'automne et l'hiver. Cette conclusion est valable pour les différentes valeurs du MIET utilisées.

Tableau 17: Répartition saisonnière des averses (Barkouki et al., 2020)

MIET (h) \ Saison	24	12	6	2	1	0.5
Printemps	31%	30%	27%	25%	24%	23%
Été	2%	1%	1%	2%	2%	2%
Automne	33%	33%	37%	41%	46%	52%
Hiver	34%	36%	34%	32%	28%	23%

On note également que le nombre d'averses retenues par saison est proportionnel au MIET. Autrement dit, la diminution du MIET rend le nombre d'averses retenues plus petit. En effet, la diminution du MIET engendre une division des averses de longues durées en des averses de petites durées. Ainsi, certaines averses deviennent au-dessous du seuil de 12.7 mm et sont par la suite écartées. En descendant à une échelle mensuelle, la majorité des averses sont enregistrées entre le mois d'octobre et le mois d'avril. Elles constituent 90% de l'ensemble des averses retenues (Figure 41).

La confrontation du Tableau 14 et de la Figure 41 montre que les averses les plus courtes sont concentrées en mois de Novembre. Par contre, les averses de Janvier, Février et Mars sont plutôt de longues durées.

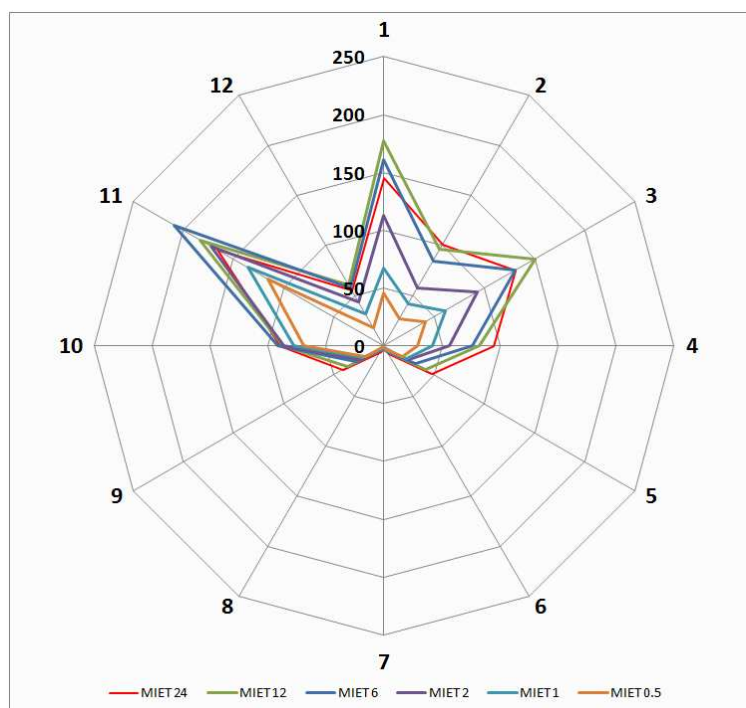


Figure 41: Répartition mensuelle des averses (nombre d'averses par mois) (Barkouki et al., 2020)

II.3.4.5. Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'analyser et de comprendre les caractéristiques des averses dans la zone d'action de l'ABHBC en se basant sur une base de données des pluies instantanées. Il s'agit de 25 pluviomètres automatiques installés à partir de 2009. Les séries utilisées couvrent des périodes variant de 2 ans à 7 ans avec une durée moyenne de 6 ans.

Des conclusions importantes ont été tirées permettant de mieux comprendre la pluie instantanée dans la zone d'étude. Les résultats obtenus montrent que :

- 1- Le nombre des averses extraites augmente d'une manière logarithmique en fonction du MIET : une équation a été proposée pour estimer le nombre des averses en fonction du MIET utilisé ;
- 2- La diminution du MIET favorise la sélection des averses à courtes durées ;
- 3- L'analyse spatiale des groupes des durées des averses sélectionnées montre une tendance homogène au niveau des différents postes utilisés. En outre, une homogénéité spatiale a été également constatée au niveau des lames d'eau des averses sélectionnées pour les différents MIET utilisés ;

4- En variant le MIET, la variation des lames d'eau moyennes des averses dans les mêmes groupes de durée reste faible ;

5- La classification des averses selon leurs quartiles est presque indépendante du MIET utilisé : En moyen, 57 % des averses sélectionnées sont du 1^{ier} et 2^{ème} quartiles. Alors que 43 % restant est répartie entre le 3^{ème} et le 4^{ème} quartile ;

6- 90% des averses sélectionnées sont réparties entre les mois d'octobre et le mois d'avril. Les averses les plus courtes sont concentrées en mois de Novembre. Par contre, les averses de Janvier, Février et Mars sont plutôt de longues durées.

Ainsi, tenant compte de l'impact du MIET sur certains résultats obtenus, on conclut que le choix du MIET doit prendre en considération les objectifs d'utilisation des averses sélectionnées. La Figure 42 récapitule les principales conclusions issues de l'analyse des pluies instantanées dans la zone d'étude.

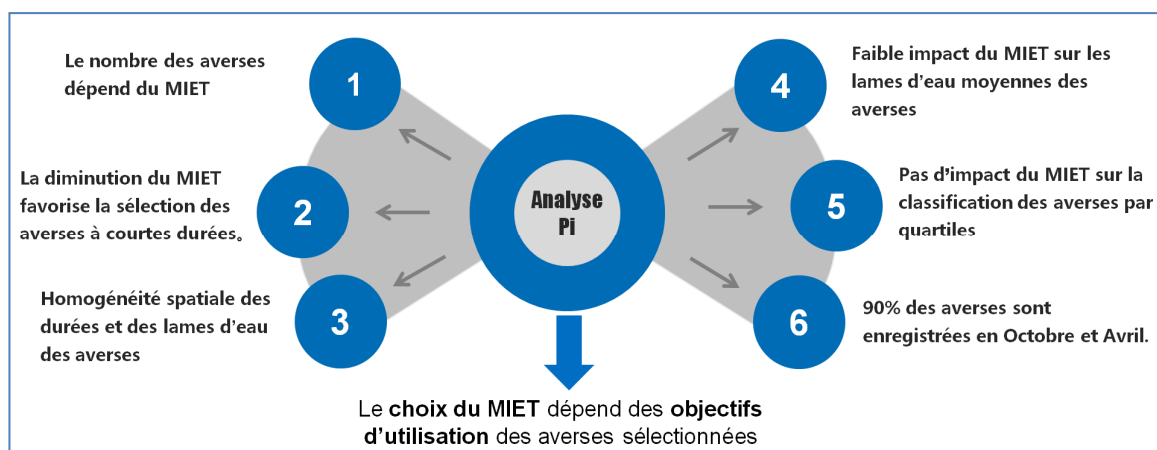


Figure 42: Principales conclusions de l'analyse des pluies instantanées dans la zone d'action de l'ABHBC

Les données extraites peuvent être utilisées pour l'élaboration des pluies de projet synthétiques adaptées à la zone d'étude. L'élaboration de ces dernières doit prendre en considération les caractéristiques des averses extraites notamment l'impact du MIET sur les résultats obtenus.

II.4. CONCLUSION GENERALE

Dans la présente partie du rapport, une analyse des propriétés des pluies instantanées a été effectuée en se basant sur une analyse des averses. Pour statuer sur les éléments nécessaires dans l'analyse des propriétés des averses, une revue de littératures a été détaillée pour les différents paramètres utilisés. Plusieurs études réalisées en Amérique du Nord et en Amérique du Sud, en Asie, en Europe et en Afrique ont été consultées.

En se basant sur plusieurs valeurs des durées minimales entre les averses (MIET), l'analyse des caractéristiques des averses a concerné les durées et les lames d'eau des averses ainsi qu'une classification des averses selon leurs quartiles. Une confrontation des résultats obtenus avec la répartition spatiale des pluviomètres a été également effectuée.

La base de données utilisée se constitue principalement des pluies instantanées disponibles au niveau de 25 pluviomètres automatiques couvrant la période 2009-2016. Ces données ont été confrontées à la base de données des pluies journalières disponibles au niveau de chaque poste ainsi que les courbes IDF disponibles dans la zone. Ce qui a permis de déceler certaines données incorrectes des pluies instantanées qui ont été écartées.

Les analyses réalisées constituent une première dans l'analyse des pluies instantanées dans le contexte marocain et ont permis de comprendre plusieurs caractéristiques des pluies instantanées dans la zone d'étude. Elles montrent aussi l'impact du MIET sur les caractéristiques temporelles et spatiales des averses sélectionnées.

Ce travail a permis par la suite de développer des pluies de projet synthétiques spécifiques à la zone d'étude.

**CHAPITRE III.
DÉVELOPPEMENT D'UNE PLUIE DE
PROJET SYNTHETIQUE ADAPTEES A
LA ZONE DE L'ABHBC**

III.1. INTRODUCTION

Dans le cadre de la conception des ouvrages de protection contre les inondations ou des réseaux d'assainissement des eaux pluviales ou généralement des études de l'hydraulique urbaine ou fluvial, la littérature ressort que les études de modélisation hydrologique des crues se basent sur des hyétogrammes synthétiques de pluie de projet (Pan *et al.*, 2017). C'est ce qu'on appelle aussi la distribution temporelle adimensionnelle des pluies instantanées (Na et Yoo, 2018). Ces dernières sont nécessaires même en cas de disponibilité des courbes Intensité-Durée-Fréquence.

Les hyétogrammes synthétiques de la pluie de projet adoptés au Maroc sont généralement de type SCS (Khaddor et al., 2016), Chicago (Elhassnaoui et al., 2019), double triangle (Bennani Baiti et al., 2017) et Huff (ABHBC, 2018) avec une durée totale allant de 4 h à 24 h aussi bien dans le contexte urbain que rural. Ces choix n'ont jamais été confrontés à une analyse détaillée des averses mesurées à l'échelle des différentes régions marocaines malgré le grand contraste entre les régions du pays au niveau des conditions climatiques, pluviométriques et topographiques.

Ce chapitre a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ce choix et particulièrement dans le bassin de l'ABHBC.

III.2. REVUE DE LITTERATURE

La pluie de projet ou de conception est une pluie fictive définie comme un hyétogramme synthétique et statistiquement équivalente aux pluies réelles même s'il n'est jamais observée. La période de retour de l'hyétogramme est celle de la pluie totale adoptée correspondant à la durée de l'hyétogramme (Hemain, 1986).

La spécification d'un hyétogramme de pluie de projet ou de conception est un problème classique en hydrologie et la plupart des méthodes utilisées peuvent être classées en quatre classes :

- 1- L'utilisation d'une pluie adimensionnelle extraite à partir des enregistrements des pluies instantanées (Veneziano et Villani, 1999) : les méthodes les plus utilisées et les

plus connues sont principalement les courbes de Huff, les courbes SCS (Soil Conservation Service) (Prodanovic et Simonovic, 2004; Ellouze et al., 2009; Awadallah et al., 2017). Néanmoins, la plupart des études dans le monde utilisent les courbes développées aux Etats Unies d'Amérique. Les courbes développées dans des contextes locaux ne sont pas assez nombreux (Bonta, 2004) ;

2- L'exploitation de l'ensemble des informations des courbes IDF par la méthode des blocs alternés (Chow et al., 1988) ou par la méthode de Chicago (S. J. Wu et al., 2006) ;

3- L'utilisation d'une distribution adimensionnelle synthétique de type rectangulaire, triangulaire ou double triangle alimentée par une lame d'eau maximale à partir des courbes IDF pour une durée totale définie préalablement ou à partir d'une analyse statistique des pluies journalières maximale (Awadallah et al., 2017) ;

4- La réalisation de simulations basées sur des modèles stochastiques : l'utilisation des modèles stochastique demande un effort important pour le paramétrage des données locales, ce qui les rend difficiles à utiliser dans la pratique pour la conception standard (S. J. Wu et al., 2006).

Les trois premières classes sont les plus utilisées (Veneziano et Villani, 1999).

Dans ce chapitre, nous présentons une revue de littérature des trois premières classes en s'intéressant aux origines des méthodes utilisées, à leur théorie de base et certains retours d'expériences de leur mise en application.

III.2.1. Méthode Huff

L'approche probabiliste adoptée par Huff est parmi les plus utilisées aux Etats Unis d'Amérique pour la génération des hyétogrammes synthétiques de pluie (Guha et al., 2013). En outre, les recherches réalisées par Huff (1967 à 1990) sont probablement les plus citées et les plus connues (Asquith et al., 2005).

Huff a élaboré des courbes des hyétogrammes synthétiques de pluie à partir des pluies instantanées enregistrées en constituant l'une des premières recherches ayant adopté cette approche (Rivard, 1996). Ces courbes ont été utilisées partout dans le monde pour le calcul

hydrologique des crues de projet dans des bassins versants et sont connues sous le nom de « courbes de Huff » (Bonta et Rao, 1987).

Ces courbes se caractérisent par leur flexibilité, c'est-à-dire, elles reflètent la grande variation des intensités des averses observées en décrivant les caractéristiques non uniformes des précipitations. En effet, leurs distributions temporelles ont été élaborées selon des critères objectifs, et elles se rapprochent davantage de la variabilité temporelle naturelle des précipitations en raison de leur nature aux pics multiples. Par conséquent, elles méritent d'être étudiées davantage en tant que averses de conception. (Bonta et Rao, 1988)

Cette méthode développée dans l'Etat d'Illinois (Figure 45) par l'Illinois State Water Survey (ISWS) est présentée par Huff en 1967 (Bonta, 2004). Elle a été utilisée initialement pour une caractérisation temporelle des précipitations dans une zone et elle a été étendue pour l'élaboration des hyétoigrammes synthétiques de pluie (Azli et Rao, 2010). L'approche utilisée pour le développement des courbes de Huff n'a pas été documenté en détail dans la littérature (Bonta, 2004) et l'algorithme exacte utilisée par Huff pour la classification des averses n'a pas été aussi fourni (Asquith et al., 2005).

Néanmoins, des recherches élaborées à l'Etat de Texas aux Etats Unies d'Amérique ont permis de reprendre en détail la démarche adoptée pour l'élaboration des courbes de Huff notamment en 2002 (Al-Asaadi, 2002; Asquith et al., 2005).

Huff a élaboré les distributions temporelles synthétiques adimensionnelles des averses en se basant sur les pluies instantanées enregistrées pendant 11 ans (1955-1966). Il s'agit de 49 pluviomètres installés dans l'Etat d'Illinois sur une surface de 644 Km². Le nombre des averses extraites à partir des pluies instantanées utilisées est de 261 (Terstriep et Stall, 1974; El- Sayed, 2016).

Les courbes développées sont présentées selon des familles de courbes dérivées à partir des groupes d'averses classées en première, deuxième, troisième ou quatrième quartile, selon le quartile où le plus grand pourcentage de pluie de l'averse est survenu (Asquith et al., 2005).

La Figure 43 présente des courbes de Huff élaborées dans l'Etat d'Illinois aux Etats Unies d'Amérique. Ces courbes ont été lissées pour refléter la distribution moyenne des précipitations dans le temps (Huff, 1990).

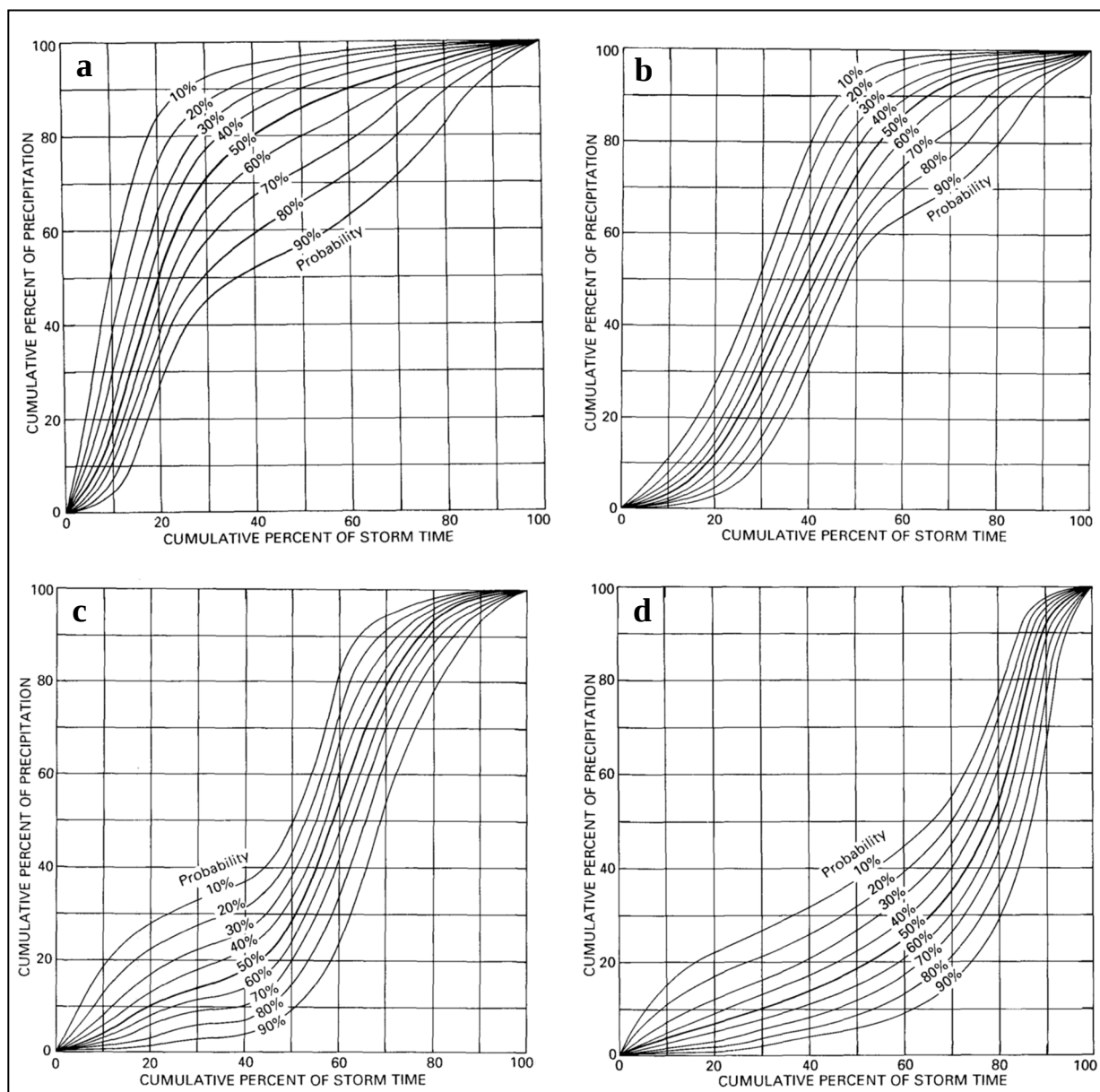


Figure 43: Distribution de type Huff correspondant aux quatre quartiles (Huff, 1990) (a, b, c, et d correspondent respectivement au 1^{ier}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles)

Autres auteurs ont choisi de présenter des courbes non lissées (Al-Asaadi, 2002; Bonta, 2004; Asquith et al., 2005; Back, 2011; Joo et al., 2014). En effet, le lissage ne se fait pas généralement par des algorithmes curvilinéaires sophistiquées (Asquith et al., 2006) et parfois peut se limiter à un lissage manuel (Bonta et Rao, 1987) ce qui peut réduire le nombre des points des courbes en impactant leurs variabilités (Asquith et al., 2005; S. J. Wu et al., 2006) et par la suite en influençant les débits issus des modèles hydrologiques qui se base sur ces courbes (Prodanovic et Simonovic, 2004). L'élaboration des courbes de Huff non lissées

contribue à leur analyse et à une bonne compréhension des pluies instantanées (Xie et Nearing, 2016).

Les courbes de distributions adimensionnelles de pluie sont fournies pour des probabilités allant de 10% à 90% avec un incrément de 10%. Bien que la courbe médiane soit la courbe la plus représentative et la plus recommandée en application (Terstriep et Stall, 1974; Huff, 1990; Dick et Ghavasieh, 2015), les autres permettent aux utilisateurs de déterminer les relations d'écoulement des bassins pour différents types de distributions qui se produisent dans la nature pour chacun des quatre types d'averses de base (groupes de quartiles). Les courbes de 10% et 90% devraient être très utiles pour estimer les ruissellements dans les cas de distributions temporelles les plus extrêmes (Huff, 1990). Certains auteurs indiquent que les courbes de probabilité de 10 % correspondent à des orages violents alors que celles de 90% représentent des pluies plus régulières à normales (Jaton, 1988).

On note que la courbe à une probabilité de 50 % représente les précipitations cumulées qui devraient être dépassées (au-dessus de la courbe de 50%), dans environ la moitié des averses (Chow et al., 1988). La courbe à probabilité de 90 % peut être interprétée comme une distribution des averses qui est supérieure ou égale au moins à 10 % des averses, inversement à la courbe de probabilité de 10 % (Chow et al., 1988; Bonta, 2004).

Pour l'élaboration des courbes de Huff, un échantillon de 90-140 averses est considéré comme suffisant pour développer des courbes stables, autrement dit, des courbes qui ne changent pas beaucoup avec l'ajout des averses supplémentaires (Bonta et Shahalam, 2003; Bonta, 2004).

III.2.2. Méthode SCS

Le SCS (Soil Conservation Service), qui s'appelle actuellement le NRCS (Natural Resources Conservation Service), a développé un modèle d'hyétogrammes en 1972 (Al-Rawas et Valeo, 2009). Cette méthode fournit des hyétogrammes sans dimension classés en quatre types (I, IA, II et III) qui dépendent des régions spécifiques aux États-Unis d'Amérique. Les figures suivantes présentent les quatre distributions et leurs territoires d'application aux États Unies d'Amériques (Kent, 1973).

Les types I et IA représentent le climat maritime du pacifique avec des hivers humides et des étés secs. Le Type III représente les zones côtières du Golfe du Mexique et de l'Atlantique où les tempêtes tropicales apportent de grandes quantités de pluie sur 24 heures. Le type II représente le reste du pays (USSCS, 1986).

La méthode SCS lie la courbe Intensité-Durée-Fréquence (IDF) et une méthode de "averse équilibrée" ou de "bloc alterné" (T.Tyrrell et R.Hasfurthur, 1983; Asquith et al., 2005; El-Sayed, 2016; Awadallah et al., 2017). En effet, les valeurs moyennes d'Intensité-Durée utilisées sont réarrangées pour former les distributions de type I et II. La distribution de type I est disposée de sorte que la plus grande profondeur de 30 minutes se produise à 10 heures environ de la période de 24 heures. La distribution de type II est organisée de la même manière mais la plus grande profondeur de 30 minutes se produit vers le milieu de la période de 24 heures (Kent, 1973). L'hyétogramme de type II et l'hyétogramme de type III sont de forme très similaire (Asquith, 2003). La sélection de la période d'intensité maximale pour les deux distributions (I et II) était fondée sur des considérations de conception plutôt que sur des facteurs météorologiques (Kent, 1973).

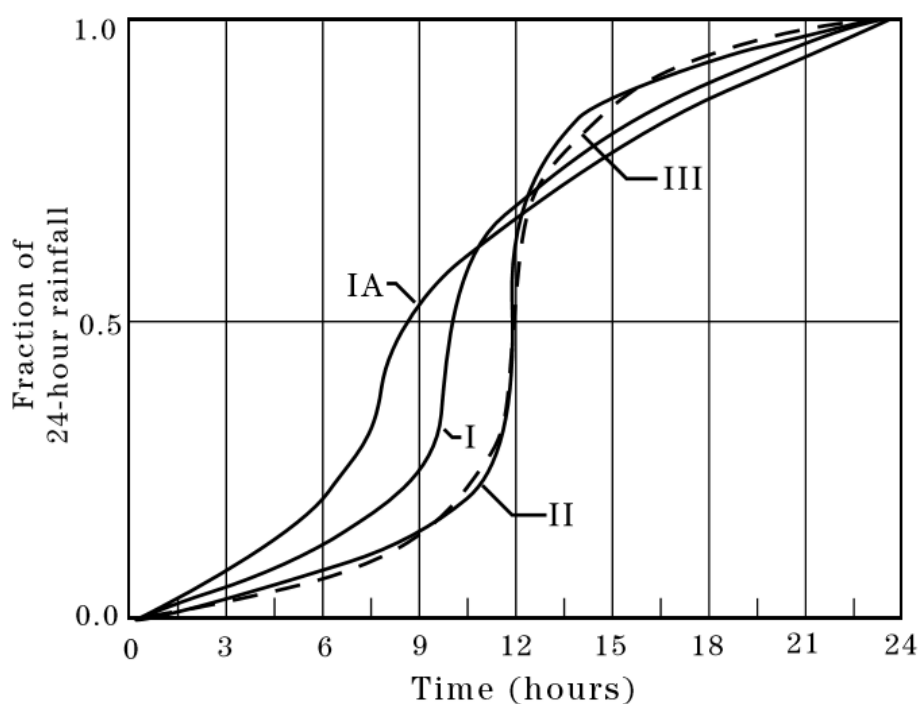


Figure 44: Distribution adimensionnelle de pluie de 24 heures de type SCS (USSCS 1986)

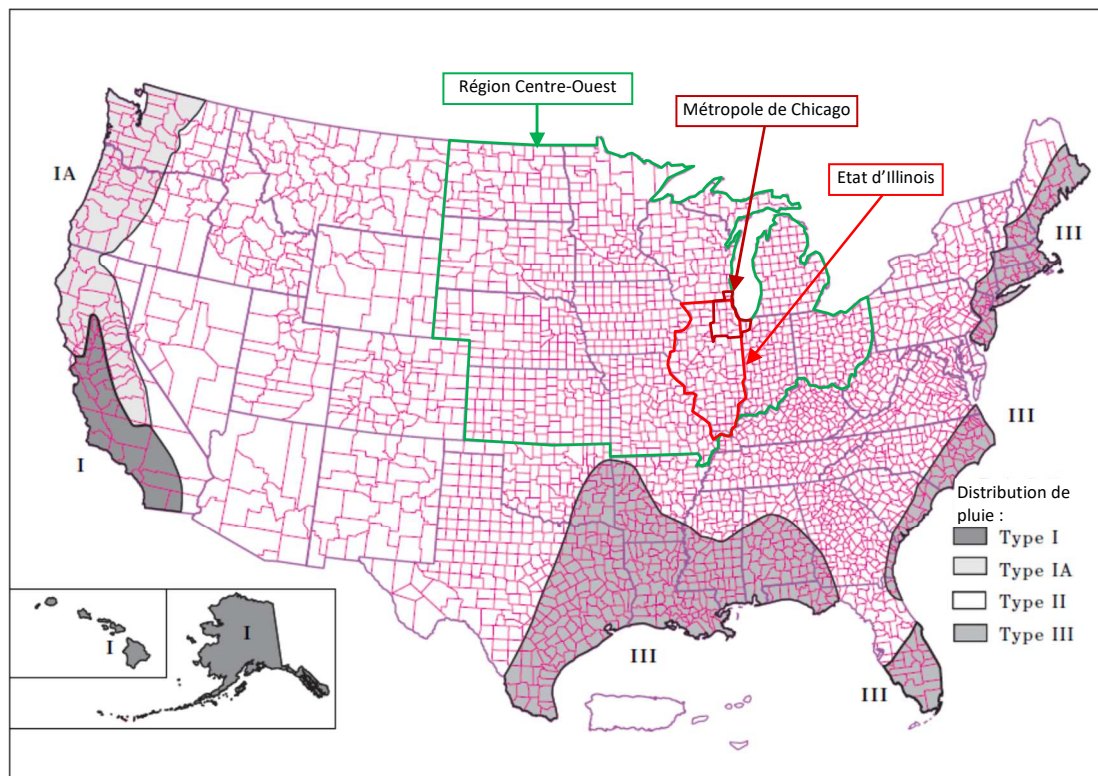


Figure 45: Limites géographiques approximatives des zones adaptées pour les quatre distributions de type SCS (Adapté du USSCS, 1986)

Notre analyse des courbes des quatre distributions de type SCS de durée 24 heure montre que :

- La pluie maximale est localisée à 9.9 h, 7.8 h, 11.9 h et 12 h respectivement pour les distributions I, IA, II et III.
- Le pourcentage de la pluie totale maximale correspondant à une durée de 10% (2.4 heures) est de 39.8%, 27.8%, 56.3%, 52.8% respectivement pour les distributions I, IA, II, III. Ainsi, l'utilisation des distributions II et III donnera les débits de pointe les plus importants et pourrait entraîner une surestimation des débits de pointe et par la suite le surdimensionnement des ouvrages hydraulique (Powell et al., 2007).

Pour ne pas se limiter à l'élaboration des courbes SCS de type II et III à partir des courbes IDF uniquement, des recherches récentes ont exploité les averses adimensionnelles observées. En effet, ces dernières sont réarrangées selon la méthode des blocs de sortes que les valeurs maximales adimensionnelles sont classées au milieu de la durée totale (El- Sayed, 2016; Awadallah et al., 2017). Ces choix sont justifiés par des considérations de conception et non pas par des critères météorologiques.

III.2.3. Méthode des blocs

La méthode la plus connue est celle des blocs alternés. Cette méthode permet de d'élaborer la distribution temporelle des précipitations (hyétogramme de conception) en se basant sur les courbes IDF. Après avoir divisé la durée totale de la pluie de projet P_T par l'intervalle de temps Δt (incrément d'hyétogramme avec $P_T = n \cdot \Delta t$), les intensités des précipitations pour les durées des pluies Δt , $2\Delta t$, $3\Delta t$, ... sont calculées à partir des courbes IDF. En calculant le produit de l'intensité de la pluie et de la durée (c'est-à-dire la lame de la pluie) pour chaque durée de pluie, on peut obtenir la distribution cumulative des précipitations. Les données sur la lame d'eau des précipitations peuvent alors être obtenues sous la forme de la différence entre les profondeurs cumulées successives des précipitations. Après avoir localisé le pic de pluie au centre, la lame de la pluie la plus importante suivante est localisée alternativement à droite et à gauche du pic de pluie. (Chow et al., 1988; Sordo-ward et al., 2014; Na et Yoo, 2018).

Pour une durée de pluie de 24 heures par exemple à un pas de temps de 5 minutes, il y a 288 blocs. La Figure 46 présente la démarche d'élaboration d'un hyétogramme à blocs alternés.

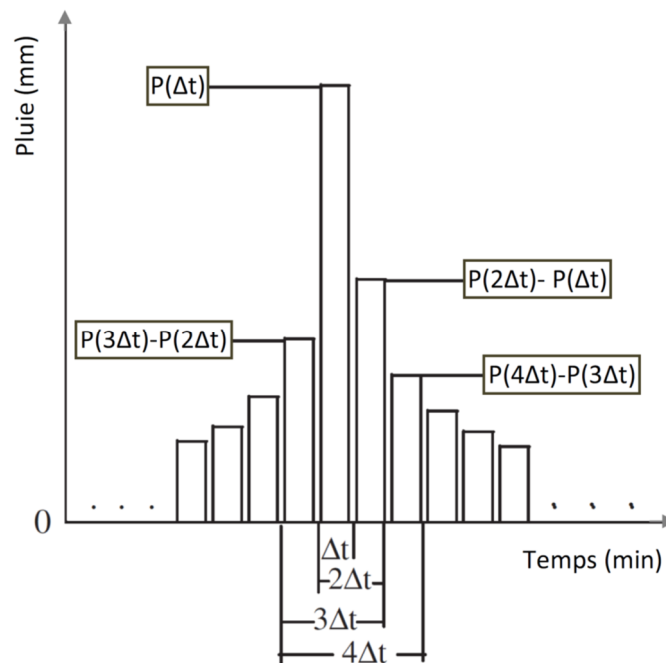


Figure 46: Démarche d'élaboration d'un hyétogramme à blocs alternés (adapté du Sordo-ward et al., 2014)

Autres méthodes des blocs sont citées dans la littérature. Il s'agit des blocs avancés et des blocs retardés. Pour les premiers, le bloc 1, disposant de la pluie maximale, est placé au début

de l'hyétogramme, et tous les autres sont placés séquentiellement à droite du bloc précédent. Pour les derniers, le bloc 1 est placé à la fin de l'hyétogramme, et tous les autres sont placés séquentiellement à gauche du bloc antérieur. (Chimene et Campos, 2020)

Les débits issus d'un hyétogramme des blocs retardés sont les plus importants, suivie par ceux des blocs alternés puis des blocs avancés (Chimene et Campos, 2020).

III.2.4. Méthode Chicago

Cette méthode développée à Chicago (Figure 45) a été proposée par Keifer et Chu en 1957 pour le dimensionnement des ouvrages d'assainissement des eaux pluviales urbains, elle a été utilisée au départ pour générer des hyétogrammes de durée de 3 h mais rien n'empêche son utilisation pour des durée plus importante (Prodanovic et Simonovic, 2004). La méthode établit deux équations analytiques pour l'intensité des précipitations dans le temps, une valable avant le pic et une autre valable après le pic, toutes deux déduites d'une expression analytique des courbes IDF, en conservant les mêmes volumes de toutes les intensités de précipitations (Silveira, 2016). La distribution temporelle de pluie de type Chicago a été largement utilisée dans la pratique canadienne parce qu'elle peut être facilement dérivée des courbes IDF (Marsalek et Watt, 1984).

Dans le contexte marocain, la formulation analytique des courbes IDF s'écrit généralement comme suit :

$$I = a(T) \times t^{-b(T)} \quad (3.1)$$

Avec :

t : Durée en min ;

$I(T)$: Intensité maximale moyenne sur la durée t et de période de retour T en mm/h ;

$a(T)$, $b(T)$: Paramètres de Montana correspondant à une période de retour T .

En tenant compte de cette formulation des courbes IDF, les équations proposées par Keifer et Chu (Chow et al., 1988), et adaptées à la formulation précitées des courbes IDF, sont les suivantes :

Avant le pic :

$$i(t_1, T) = a(T) \times (1 - b(T)) \times \left(\frac{t_1}{r}\right)^{-b(T)} \quad (3.2)$$

Après le pic :

$$i(t_2, T) = a(T) \times (1 - b(T)) \times \left(\frac{t_2}{1-r}\right)^{-b(T)} \quad (3.3)$$

Avec :

t_1 : la durée, en minute, mesurée avant et à partir du pic ;

t_2 : la durée, en minute, mesurée après et à partir du pic ;

r : le coefficient d'avancement de l'averse qui définit l'emplacement du pic de l'intensité par rapport à la durée totale de l'averse. Il s'agit du rapport du temps avant le pic d'intensité ($\max(t_1)$) sur la durée totale de l'averse ($\max(t_1) + \max(t_2)$). Il varie de 0 à 1.

La pluie maximale moyenne entre deux durées, par exemple t_1 et t'_1 , peut être calculée par la méthode des trapèzes. Les figures suivantes présentent la signification de (t_1 , t_2) et des courbes de pluies de 24 heures calculées dans la zone d'étude avec un $r=0.5$.

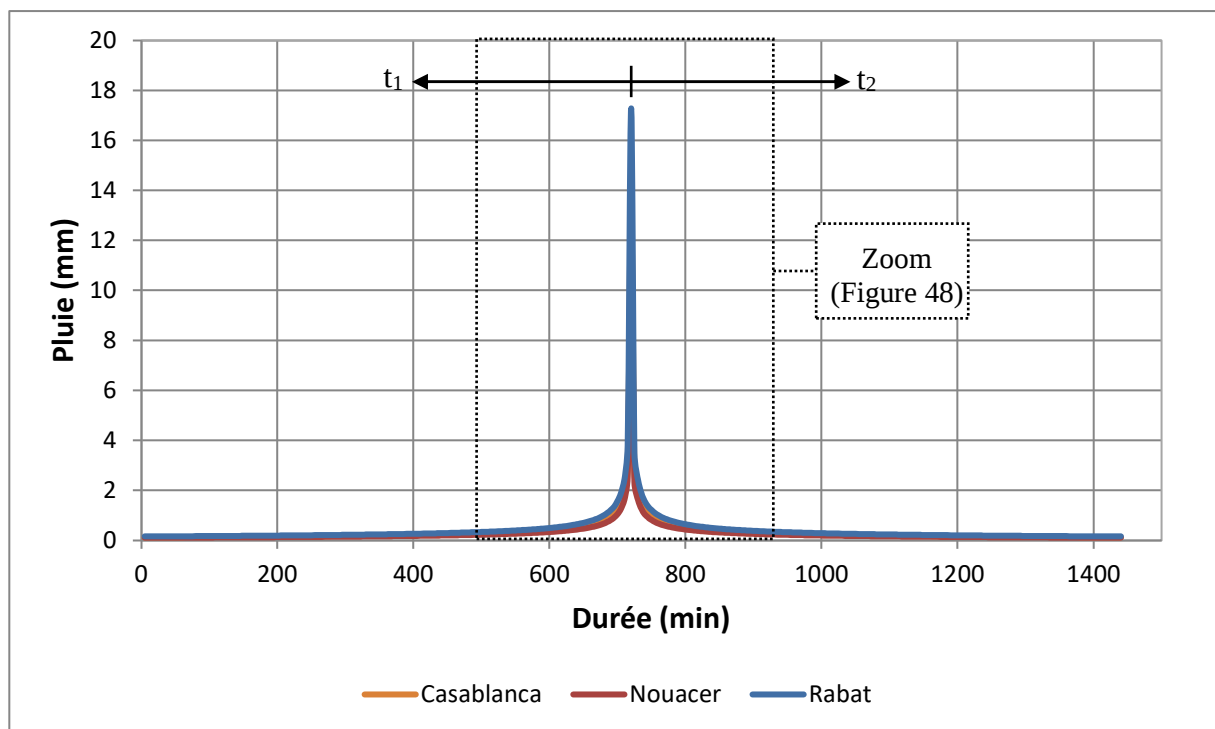


Figure 47: Distributions de la pluie de 24 heures de type Chicago correspondant à des courbes IDF de Casablanca, Nouacer et Rabat

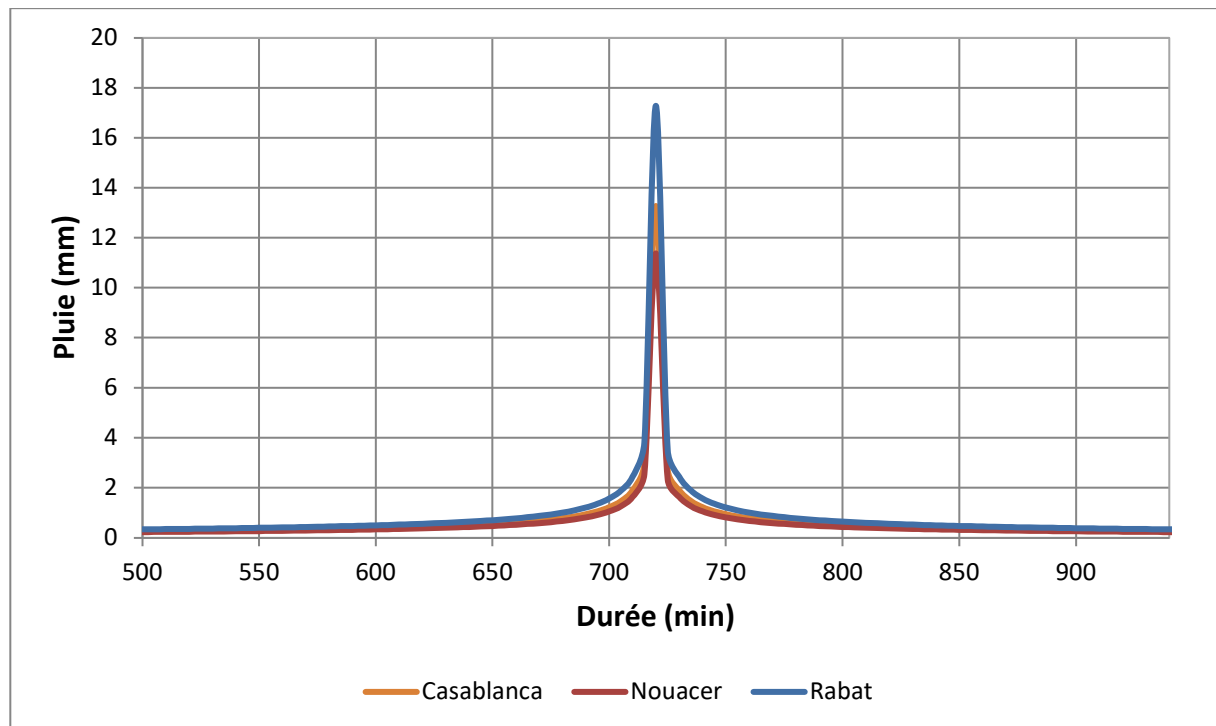


Figure 48: Distributions de la pluie de 24 heures de type Chicago correspondant à des courbes IDF de Casablanca, Nouacer et Rabat (Zoom)

La méthode de Chicago est très utilisée dans le monde entier, mais il convient de souligner qu'elle calcule un hyétogramme dont la distribution du temps dérive de l'expression analytique des courbes IDF sans aucun rapport avec des hyétogrammes réels observés (Hemain, 1986; Silveira, 2016).

En outre, si les coefficients de Montana relatifs aux courbes IDF correspondent à la même période de retour (T), l'utilisation de la méthode de Chicago conduit à une surestimation de la période de retour de l'hyétogramme de pluie ce qui pourrait générer une surestimation des débits de pointe correspondant (Hemain, 1986; Malik et James, 2007; Alfieri et al., 2008; Rosario Balbastre-Soldevila, 2019).

La méthode Chicago est très similaire à la méthode des blocs. La différence est que la méthode de Chicago permet de calculer une intensité continue dans le temps (Chow et al., 1988; Na et Yoo, 2018). Autrement dit, l'hyétogramme issu de la méthode des blocs coïncide avec celui de Chicago si son pas de temps est très petit.

III.2.5. La méthode rectangulaire

C'est la distribution temporelle la plus simple. Elle s'agit de la distribution uniforme (Figure 49). Elle a été utilisée en conjonction avec la méthode Rationnelle sans faire appel au terme de la distribution temporelle (Marsalek et Watt, 1984; Prodanovic et Simonovic, 2004 ;Rosario Balbastre-Soldevila, 2019). Tenant compte de sa simplicité, cette distribution est très utilisée et très adoptée dans le dimensionnement du réseau d'assainissement (Hemain, 1986 ; Alfieri et al., 2008; Wartalska et al., 2020). L'hyétoگرامme est défini par sa durée D et son intensité moyenne i_D . La durée adoptée généralement égale au temps de concentration (Marsalek et Watt, 1984).

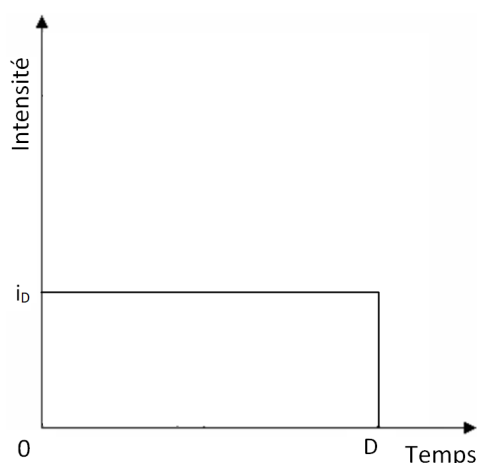


Figure 49: Paramètres d'un hyétoگرامme rectangulaire

En se basant uniquement sur les courbes IDF pour le calcul de i_D , cette méthode ignore les caractéristiques réelles des pluies instantanées. Le débit de pointe correspondant à cet hyétoگرامme correspond à la fin de l'averse synthétique (Rosario Balbastre-Soldevila, 2019). L'utilisation de cet hyétoگرامme provoquera une sous-estimation des volumes ruisselles et des débits de pointe (Prodanovic et Simonovic, 2004; Alfieri *et al.*, 2008; Bezak *et al.*, 2018; Petroselli et Petroselli, 2019).

Parmi les limites d'utilisation d'hyétoگرامme uniforme on cite (Marsalek et Watt, 1984 ;Hemain, 1986) :

- Le choix limité de méthodes de calcul (plus ou moins la méthode Rationnelle et la méthode de Caquot) ;
- La dépendance de l'intensité moyenne proposée par rapport au temps de concentration.

III.2.6. La méthode simple triangle

Yen et Chow ont proposé, en 1977, un modèle de distribution temporelle de forme triangulaire. Pour une pluie totale P_t (mm) et de durée T (h), la distribution temporelle de la précipitation (hyétogramme) se présente sous la forme d'un triangle de surface P_t (mm) et de hauteur $h = 2 P_t / T$ (mm/h). L'heure de pointe des précipitations peut varier, ce qui est quantifié par le coefficient d'avancement de l'averse « r ». Il s'agit du même coefficient d'avancement de l'averse défini pour la méthode de Chicago. Si $r < 0,5$, l'événement pluvieux est appelé un type avancé, et si $r > 0,5$, un type retardé. (Watt et al., 1986; Na et Yoo, 2018)

Yen et Chow se sont basés sur une analyse des averses réelles pour déterminer les caractéristiques de la forme triangulaire proposée (Watt et al., 1986). Le nombre des averses analysées par Yen et Chow est de 9869 (Chow et al., 1988). Ce type d'hyétogramme a été développé au départ pour la conception d'un système de drainage de surface totale de 25,9 Km² (Asquith, 2003). En 2003, des recherches ont travaillé sur l'adaptation de l'hyétogramme triangulaire à l'aire de l'Etat de Texas pour l'étude hydrologique des petits bassins versants (Asquith et al., 2003).

Pour développer un hyétogramme triangulaire, il faut définir les paramètres t_a , t_b pour chaque classe de h et qui sont respectivement, le temps de montée, le temps de descente et l'intensité maximale moyenne de l'hyétogramme à travers une analyse des pluies instantanées enregistrées (Asquith et al., 2003; Ellouze et al., 2009). La figure suivante présente les trois paramètres précités :

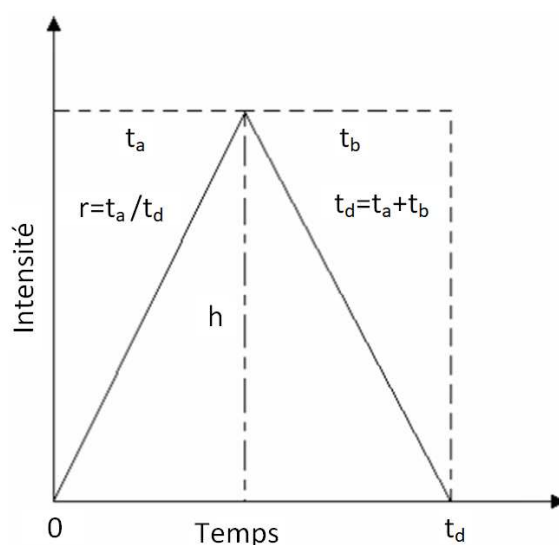


Figure 50: Paramètres d'un hyétogramme triangulaire (adapté du Ellouze et al., 2009)

L'utilisation d'un hétéogramme de forme triangulaire est un compromis entre la précision de calcul et l'aspect pratique résidant dans la simplicité de mise en application de la méthode (Asquith, 2003). Les débits de pointe issus de l'utilisation d'un hétéogramme triangulaire sont moins que ceux provenant de l'utilisation des distributions de type SCS (Asquith et al., 2003). Ce type d'hétéogramme n'a pas de base conceptuelle solide permettant de représenter la variabilité naturelle des estimations de débit basées sur la pluie (Veneziano et Villani, 1999).

III.2.7. La méthode double triangle

La méthode proposée par Desbordes et Raous en 1976 est basée sur l'étude de la sensibilité d'un modèle de transformation pluie-débit aux caractéristiques des averses, les premiers travaux ont été réalisés en France. Il convenait alors de rechercher les caractéristiques de la pluie dont les variations influent de façon significative sur l'hydrogramme de ruissellement, et de ne s'en tenir qu'à celles-ci. (Desbordes et Raous, 1976; Bonta et Rao, 1988; Sighomnou et Desbordes, 1988).

Ce type d'hétéogramme a été développé dans le cas de l'hydrologie des petits bassins versants urbains, pour définir la « pluie de projet » par une forme très simple réduite aux éléments suivants (Desbordes et Raous, 1976; Chocat et al., 1981) :

- Une durée maximale de 4 heures et l'intensité moyenne sur cette durée ($i(4h)$) permettant de tenir compte du volume de la pluie totale ;
- Une période de pluie intense de durée 15 minutes à 1 h au sein de la période de 4 heures et l'intensité moyenne ($i(15\text{min à }1h)$) sur cette période de pluie intense correspondant à la pointe de débit;
- La position de la période de pluie intense (θ_p), au sein de la pluie en 4 heures ;
- Une forme triangulaire pouvant être discrétisée à un pas de temps de 5 minutes.

La Figure 51 présente les éléments permettant la mise en application d'un hétéogramme double triangle proposé par Desbordes.

Afin de simplifier le calcul, l'hétéogramme double triangle circulant sur plusieurs ouvrages est légèrement différent que la forme proposée par Desbordes comme le montre la Figure 52 (Hemain, 1986; Roux, 1996).

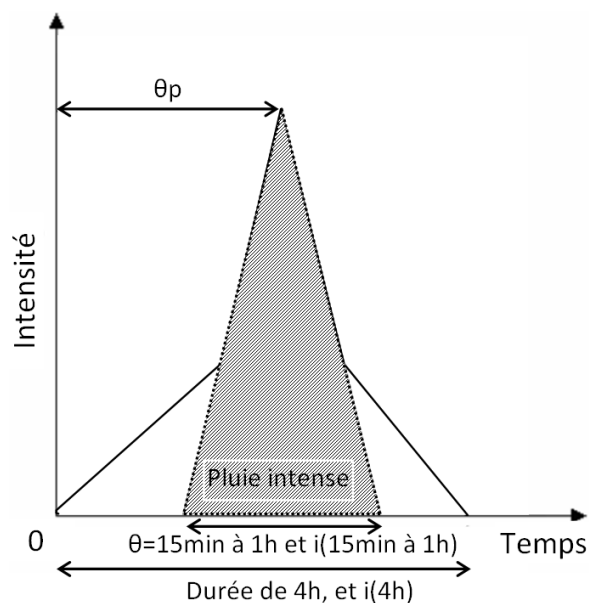


Figure 51: Hyétogramme double triangle proposé par Desbordes (adapté du Ellouze et al., 2009)

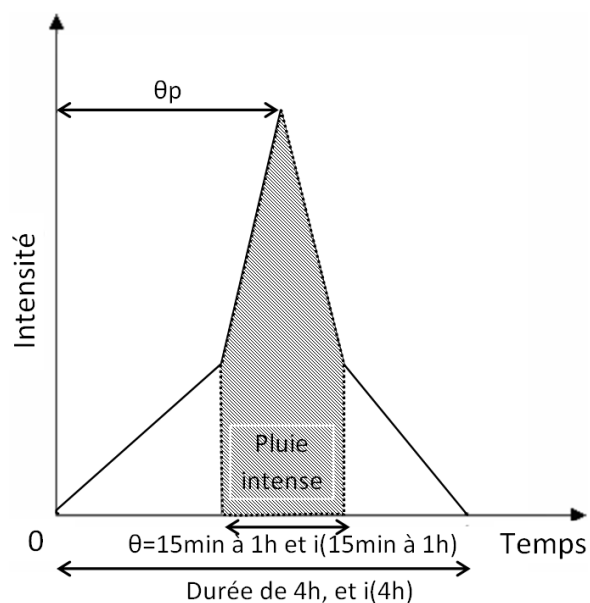


Figure 52 : Hyétogramme double triangle simplifié (adapté du Hemain, 1986)

Cette méthode est moins flexible en comparaison avec la méthode de Huff mais plus flexible en comparaison avec la méthode du simple triangle (Bonta et Rao, 1988). Elle a été utilisée surtout en Europe et en Afrique (Desbordes et Raous, 1976; Sighomnou et Desbordes, 1988).

III.2.8. Conclusions

L'utilisation des averses de conception ou des averses synthétique est une pratique courante dans le monde entier. Les chercheurs ont travaillé pendant plusieurs décennies à résoudre divers problèmes d'ingénierie hydrologique de manière directe en relation avec cette entrée principale des modèles hydrologiques. Ces averses synthétiques représentent une synthèse simplifiée qui peut se baser parfois sur des statistiques appropriées des historiques des pluies horaires ou instantanées et sont donc d'une utilité maximale pour résoudre les problèmes de calcul hydrologique relatif à la conception des infrastructures et des ouvrages hydrauliques.

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour décrire mathématiquement la distribution temporelle des précipitations ou de leurs intensités. La revue bibliographique présentée dans ce chapitre a permis de s'arrêter sur l'origine des méthodes les plus utilisées, leurs limites d'utilisation et leurs fondements théoriques et pratiques ainsi que le retour d'expérience des différentes méthodes présentées.

Cette revue bibliographique a montré que les méthodes des blocs et Chicago se base plutôt sur des critères de conception et sont loin de refléter la réalité de la nature et que les distributions de types SCS ne sont qu'une application de la méthode des blocs dans le contexte américain. Pour la méthode de Huff, elle permet une bonne représentativité des pluies instantanées tenant compte de la flexibilité des courbes proposées et l'approche de leur élaboration en comparaison avec la méthode rectangulaire, la méthode simple triangle et la méthode double triangle.

Ainsi, le chapitre suivant présente le développement des courbes de Huff adaptées à la zone d'action de l'ABHBC. Elles sont développées pour la première fois dans le contexte marocain et permettront une meilleure compréhension de la distribution temporelle des averses dans la zone d'étude.

III.3. DEVELOPPEMENT DES COURBES DE HUFF

III.3.1. Matériels et méthodes

L'élaboration des courbes de Huff commence tout d'abord par l'extraction des averses selon des critères bien spécifiés. Cette étape est la plus importante pour le développement de n'importe quel type de pluie de projet synthétique et a été développée en détail dans le deuxième chapitre du rapport.

L'extraction des averses a nécessité l'analyse de plusieurs documents traitant les courbes de Huff. En général, quatre critères principaux sont utilisés pour l'extraction et le classement des averses : La durée minimale entre les averses (MIET), la lame d'eau, la durée et finalement le quartile de l'averse. Ces critères sont présentés comme suit :

- 1- La durée minimale entre les averses (MIET) : La plupart des recherches relatives au développement des courbes de Huff ont utilisé une durée de 6 h qui a été adoptée au départ par Huff (Barkouki et al., 2019). Asquith (2005) a expliqué que ce dernier a adopté cette durée arbitrairement sans faire une analyse de sensibilité des résultats obtenus par rapport à ce paramètre.
- 2- La lame d'eau de l'averse : Huff a utilisé un seuil de 12.7 mm avec l'enregistrement de plus de 25.4 mm au moins dans un poste pluviométrique dans la zone d'étude. Le choix du seuil à adopter dépend également de la longueur des données instantanées disponibles (Barkouki et al., 2019).
- 3- La Durée de l'averse : les averses retenues sont classées selon leurs durées. En effet, les averses de durée proches sont classées dans le même groupe de durée selon leur format adimensionnel (Barkouki et al., 2019).
- 4- Le Quartile de l'averse: Les averses sont donc classées selon les quartiles Q1 (0 à 25%), Q2 (25 à 50%), Q3 (50 à 75%), Q4 (75 à 100%) (Barkouki et al., 2019).

Pour le développement des courbes de Huff, plusieurs recherches se sont limitées à une classification des averses selon leurs quartiles sans tenir compte de la durée des averses sélectionnées (Huff, 1967; Huff, 1979; Bonta et Rao, 1987; Huff, 1990; Vandenberghe et al., 2010; Azli et Rao, 2010 ; Back et al., 2011). D'autres recherches se sont intéressées au

développement des courbes de Huff pour chaque groupe de durée (Al-Asaadi, 2002; Back, 2011, Xie et Nearing, 2016).

Dans ce travail de recherche, nous avons développé les courbes de Huff en procédant par les choix cités ci-dessous, selon chacun des critères précédents :

- 1- Par rapport au MIET : nous avons adopté, dans une première étape, une durée de 6 h comme MIET. Puis nous avons utilisé, dans une deuxième étape, des MIET différentes de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h et 24 h et nous avons examiné leur impact sur les courbes de Huff.
- 2- Par rapport à la lame d'eau de l'averse : tenant compte que les séries instantanées disponibles dans la zone d'étude couvrent une période moyenne de 6 ans et que le nombre de postes de mesure est relativement faible par rapport à la superficie totale de la zone, nous adoptons un seuil de 12.7 mm au niveau de tous les postes.
- 3- Concernant la durée de l'averse : les averses sélectionnées dans la zone sont classées selon des groupes de 0-4h, 4h-6h, 6h-12h, 12h-24h et les averses de durées supérieures à 24h (+24 h). Nous avons développé les courbes sans tenir compte des groupes de durée. Par la suite, nous avons analysé l'impact des durées des averses sur la forme des courbes de Huff.
- 4- Par rapport aux quartiles, Les averses sont classées selon les quartiles Q1, Q2, Q3 et Q4.

Ainsi, en se basant sur le format adimensionnel des averses sélectionnées, nous avons élaboré les courbes de Huff pour chaque groupe de durée et pour chaque groupe de quartile. La démarche suivie est résumée comme suit :

- Rassembler les averses adimensionnelles du même groupes de quartiles et de durées dans la même matrice en classant les averses en lignes (j : nombre des averses) sachant que le nombre de colonnes (n) dépend du pas de temps adimensionnel adopté.
- Pour des raisons pratiques, les courbes de Huff sont discrétisées selon un pas de 5% en discrétisant les averses à 20 intervalles de temps identiques (Al-Asaadi, 2002; Vandenberghe et al., 2010).
- Trier chaque colonne du haut en bas, de la plus grande à la plus petite valeur : La probabilité de dépassement correspondant à chaque valeur dans la colonne a été

calculée par rapport aux autres valeurs de la même colonne (Bonta, 2004; Dolšak et al., 2016).

On note que la probabilité d'occurrence a été calculée en adoptant une loi linéaire. Sinon, plus qu'une dizaine de formule sont proposées dans la littérature (Lubes et Masson, 1992).

- Interpoler les courbes correspondantes à des probabilités de 10%, 50% (médian) et 90% : il s'agit des courbes de Huff (Al-Asaadi, 2002; Bonta, 2004; Dolšak et al., 2016).

Tableau 18: Analyse matricielle pour l'élaboration des courbes de Huff

Storm N°5	S1,1	S1,2	S1,3	..	..	S1,n-1	S1,n
	S2,1	S2,2	S2,3	..	..	S2,n-1	S2,n
	S3,1	S3,2	S3,3	..	..	S3,n-1	S3,n
	S4,1	S4,2	S4,3	..	..	S4,n-1	S4,n
	S5,1	S5,2	S5,3	..	..	S5,n-1	S5,n
	S6,1	S6,2	S6,3	..	..	S6,n-1	S6,n
	..	..	..	..	..	..	..
	..	..	..	..	..	..	..
	Sj-1,1	Sj-1,2	Sj-1,3	..	..	Sj-1,n-1	Sj-1,n
	Sj,1	Sj,2	Sj,3	..	..	Sj,n-1	Sj,n

↓

S(1/j)%,1	S(1/j)%,2	S(1/j)%,3	..	..	S(1/j)%,n-1	S(1/j)%,n
..	..	..	..	..	..	..
S10%,1	S10%,2	S10%,3	..	..	S10%,n-1	S10%,n
..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..
S50%,1	S50%,2	S50%,3	..	..	S50%,n-1	S50%,n
..	..	..	..	..	..	..
..	..	..	..	..	..	..
S90%,1	S90%,2	S90%,3	..	..	S90%,n-1	S90%,n
..	..	..	..	..	..	..
S100%,1	S100%,2	S100%,3	..	..	S100%,n-1	S100%,n

Sj,3 : c'est le cumul adimensionnel de l'averse numéro « j » au pas du temps numéro « 3 » ;
 Sx%,2 : c'est le cumul adimensionnel, d'une averse, au pas numéro « 2 » et correspondant à une probabilité au dépassement de « x% ».

Pour l'automatisation du traitement des pluies instantanées, la classification des averses et la synthèse des résultats obtenus, des scripts ont été développés sous l'application Rstudio.

La Figure 53 présente l'organigramme qui décrit le processus adopté pour l'élaboration des courbes de Huff.

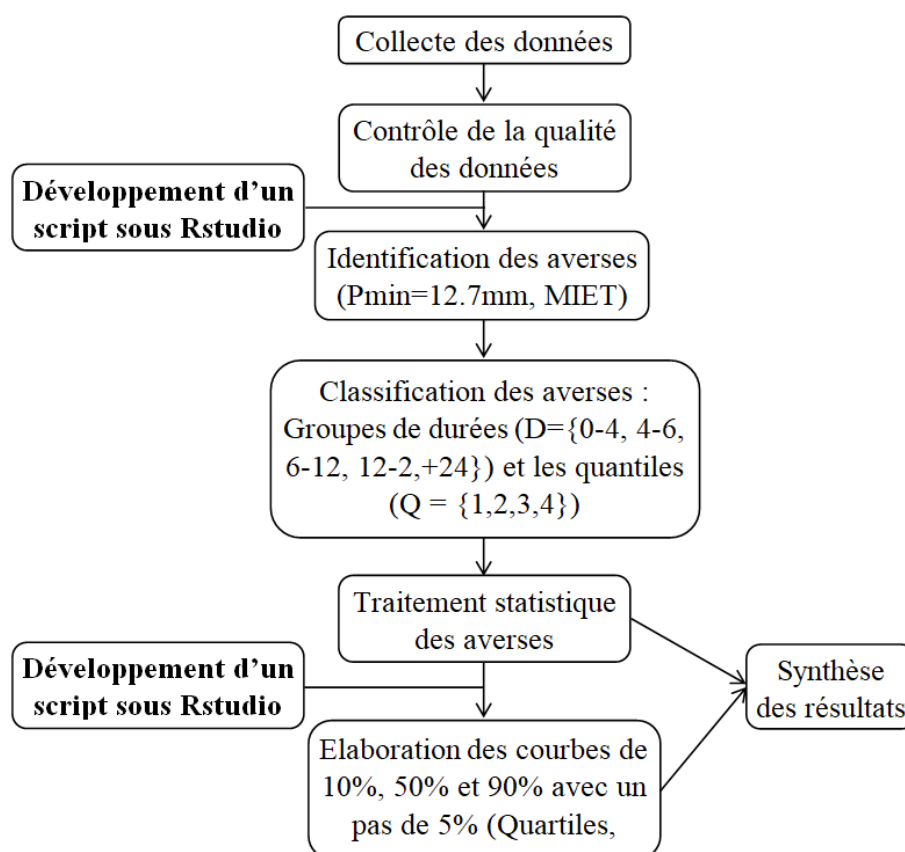


Figure 53: Processus d'élaboration des courbes de Huff

III.3.2. Résultats

III.3.2.1. Courbes de Huff correspondant aux différents groupes de quartiles pour un MIET de 6h

Les courbes de Huff ont été développées, dans un premier temps, en se basant sur les averses extraites à partir d'un MIET de 6 h en classant les averses uniquement selon leurs quartiles. Une comparaison de ces courbes avec celles développées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA a été faite dans la Figure 54.

Le développement des courbes de Huff se base sur les averses extraites répondant aux critères retenus. Le nombre des averses sélectionnées est de 883 (Tableau 14). La répartition des averses entre le 1^{ier}, le 2^{ième}, le 3^{ième} et le 4^{ième} quartile est respectivement de 33 %, 26 %, 21% et 20%.

A partir de notre analyse des courbes de Huff, on note que les pentes des segments des courbes adimensionnelles des averses reflètent les intensités des pluies qui peuvent être

générées à partir de ces courbes pour des pluies de projet et des durées similaires. L'analyse des courbes de Huff développées (Figure 54) dans la zone de l'étude montre que :

- Les intensités moyennes maximales sont plus importantes pour les courbes de probabilité de 10% et 90% en comparaison avec les courbes de 50% ;
- Les intensités moyennes maximales correspondent à la courbe de probabilité de 10% du 1^{ier} quartile puis la courbe de probabilité de 90% du 4^{ième} quartile ;
- Les courbes de probabilité de 10% et 90% se caractérisent par une concentration plus importante des précipitations dans le temps. Par exemple, pour la courbe du 1^{ier} quartile correspondant à une probabilité de 10%, 73% des lames d'eau des averses se produit au début de la courbe en moins de 20 % de la durée totale. La même chose est valable pour les courbes du 4^{ième} quartile correspondant à une probabilité de 90% dont 65.9% des lames d'eau parvient à la fin de l'averse en moins de 20 % de la durée totale.
- Pour les courbes de probabilité de 50%, les intensités moyennes maximales correspondent aux courbes du 1^{ier} et 4^{ième} quartiles (45 % de pluie en 20% de durée).

La comparaison visuelle des courbes de Huff développées dans la zone d'étude et celles élaborées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA montre que les courbes de probabilité de 50% sont pratiquement similaires pour le 2^{ième}, le 3^{ième} et le 4^{ième} quartile. Pour le 1^{ier} quartile, les intensités moyennes maximales des courbes de probabilité de 50% dans la zone d'étude sont relativement moins importantes que celle en Illinois.

En ce qui concerne les courbes de probabilité de 10% et 90%, elles sont généralement comparables. Pour les cas où les courbes, de notre zone et celle d'Illinois, s'éloignent, on note que les intensités moyennes maximales de notre zone sont supérieures pour les courbes de probabilité de 90% du 1^{ier} et 3^{ième} quartiles. Pour les courbes de probabilité de 10%, les intensités moyennes maximale de notre zone sont légèrement inférieures pour le 1^{ier} et le 2^{ième} quartiles et sont légèrement supérieures pour le 3^{ième} et le 4^{ième} quartiles en comparaison avec celle de l'Etat d'Illinois.

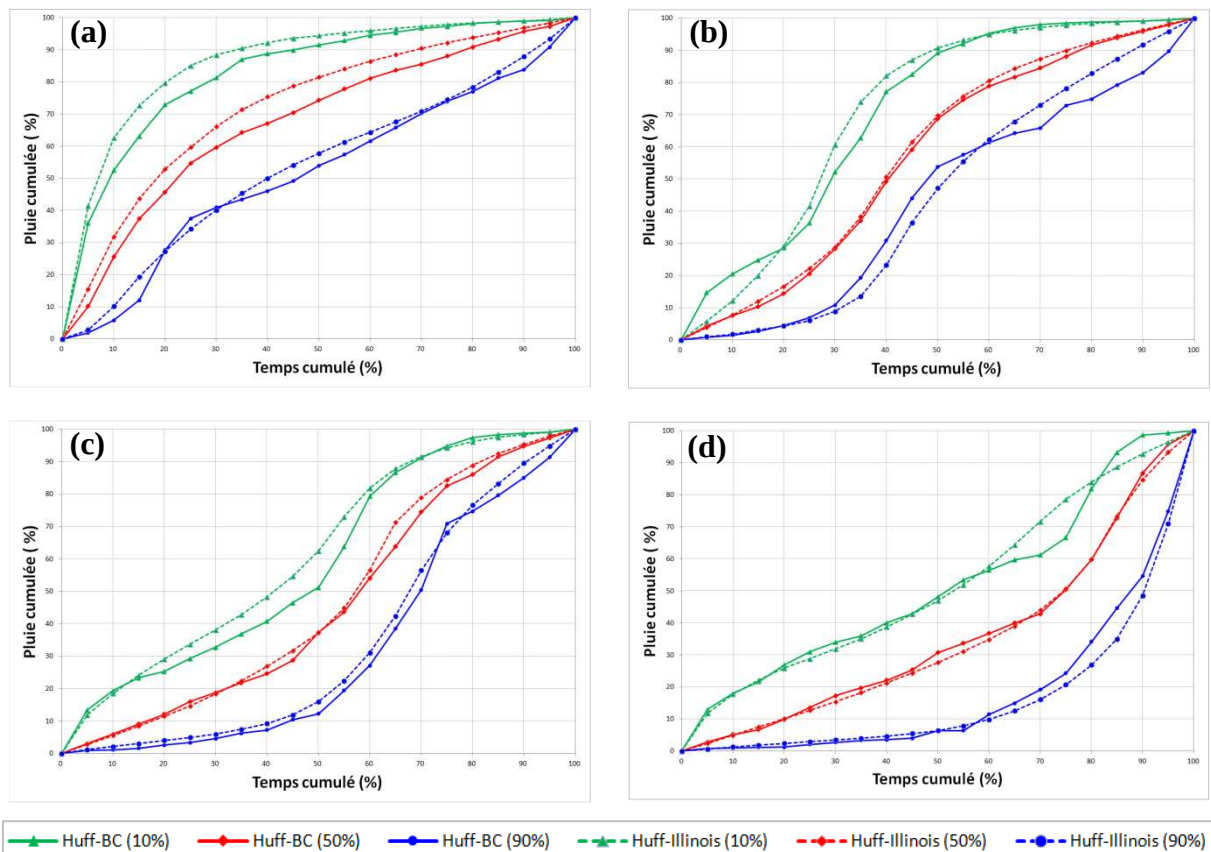


Figure 54: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour un MIET de 6h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1^{ier}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles (Huff-Illinois : Courbes développées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA)

III.3.2.2. Courbes de Huff correspondant aux groupes de quartiles pour des MIET différents

Dans le cadre de l'analyse de la sensibilité des courbes de Huff dans la zone étudiée par rapport au MIET de 6 h adopté, nous avons utilisé des valeurs différentes de MIET. Il s'agit de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h, 12 h et 24 h. La Figure 55 présente les courbes de Huff élaborées pour les différents MIET analysés. Il s'agit des courbes de probabilité de 10%, 50% (médian) et 90% correspondant aux quatre quartiles.

Les courbes développées sont majoritairement très proches notamment pour des MIET de 1 h, 2 h, 4 h, 6 h et 12 h. Une légère exception est notée pour un MIET de 24 h pour les courbes de probabilité de 10% et 90% respectivement du 1^{ier} (Q1 (10%)) et du 4^{ème} (Q4 (90%)) quartiles. On constate aussi que les courbes Q1 (10%) sont classées de la gauche à la droite du MIET le plus grand au MIET le plus petit. L'inverse est constaté pour les courbes Q4 (90%).

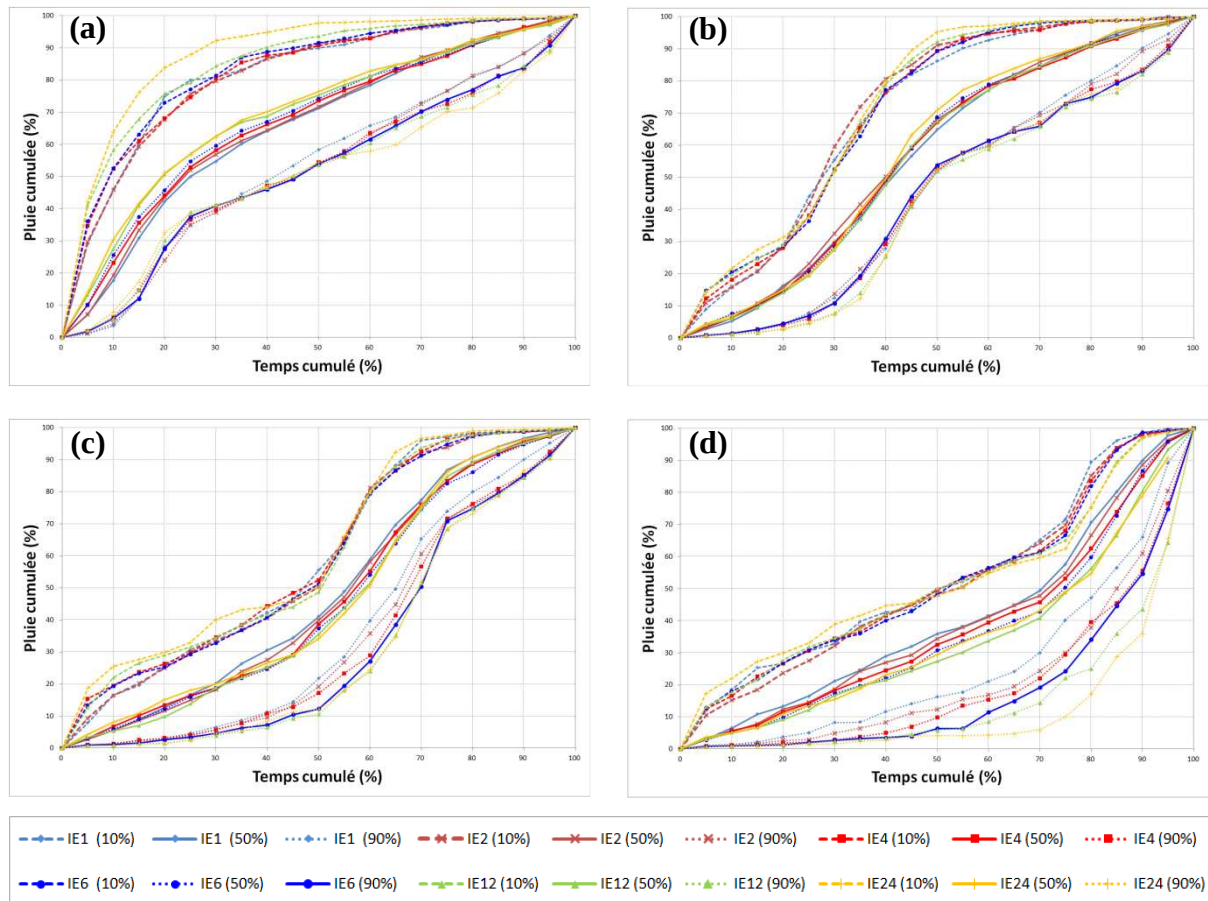


Figure 55: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour des MIET différents : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles (IE_x indique la courbe correspondant au MIET de *x* heures)

En fin on constate que les courbes correspondant à un MIET de 6 h passent presque au milieu du fuseau constitué par les courbes relatives aux différents MIET et pour les trois probabilités de 10 %, 50 % et 90 %.

III.3.2.3. Courbes de Huff correspondant aux différents groupes de quartiles et de durées pour un MIET de 6h

L'analyse des durées de 883 averses extraites (Tableau 14) montre que 40.4 % sont d'une durée de 12 h à 24 h, 26.7 % sont supérieures à 24 h, 21 % sont comprises entre 6h et 12 h et 11.9 % ont des durées inférieures à 6 h. Le Tableau 19 présente le nombre des averses par groupes de durées et de quartiles pour un MIET de 6h. Tenant compte du nombre des averses de durée inférieure à 6h qui est très limité, les groupes de 0-4h et 4h-6h ont été rassemblés dans le groupe 0-6h.

La Figure 56 présente les courbes de Huff élaborées pour les averses de différents groupes de quartiles et de durées pour un MIET de 6h. Il s'agit des courbes de probabilité de 10%, 50% (médian) et 90%.

Tableau 19: Répartition des averses par groupes de quartiles et de durées (MIET=6h)

Durée Quartile	0-4h	4h-6h	6h-12h	12h-24	+ 24h
Q1	11	13	59	122	82
Q2	18	6	49	93	64
Q3	11	14	35	82	46
Q4	17	15	42	60	44

L'analyse des courbes de Huff développées (Figure 56) montre que :

- L'examen visuel des enveloppes, tracées autour des courbes de Huff développées, montre que ces dernières suivent généralement des tendances comparables notamment pour le 2^{ième} et le 4^{ième} quartile, les enveloppes sont plus larges pour les courbes de probabilité de 10 % et 90 %.
- Les courbes de Huff correspondant à des durées inférieures à 6 h ont un écart plus grand par rapport aux autres courbes. Les courbes les plus proches à celle de durée inférieure à 6 h sont celles de durées 6h-12h. On note que les averses de durée 0-12h constituent 32.9 % de l'ensemble des averses retenues.
- L'analyse des intensités des différentes courbes montre que les courbes de probabilité de 10% et 90% disposent des intensités les plus importantes. En outre les averses de durée inférieures à 6h ont des intensités les plus fortes, associées à des précipitations plus importantes dans des durées courtes, suivies par les averses de durées 6h-12h.
- Les courbes de probabilité de 50% sont généralement très proches pour les groupes de durées supérieures à 6h pour les quatre groupes de quartiles. Les courbes correspondant au groupe de durée de 12h-24h sont généralement limitées par les courbes de durée de 6h-12h et +24 h ;
- Les courbes de probabilité de 90% sont très proches pour le groupe des averses du 2^{ième} quartile. Par contre, l'écart entre les courbes des différentes durées est plus significatif pour les autres quartiles ;
- En général, les courbes de probabilité de 10% se rapprochent en allant du 1^{ier} au 4^{ième} quartiles ;

- Pour les courbes de probabilité de 10% correspondant au 1^{er} quartile, plus que 80 % des lames d'eau des averses se produit au début des averses en moins de 40 % de la durée totale. A partir de 40% de la durée, les courbes des différentes durées sont presque linéaires, autrement dit, l'intensité devient constante. Le même constat est inversement valable pour les courbes de probabilité de 90 % correspondant au 4^{ème} quartile dont 80 % des lames d'eau est noté à la fin de l'averse en moins de 40 % de la durée totale. Ainsi, les intensités les plus importantes correspondent aux courbes de Huff de probabilité de 10 % et de 90 %.

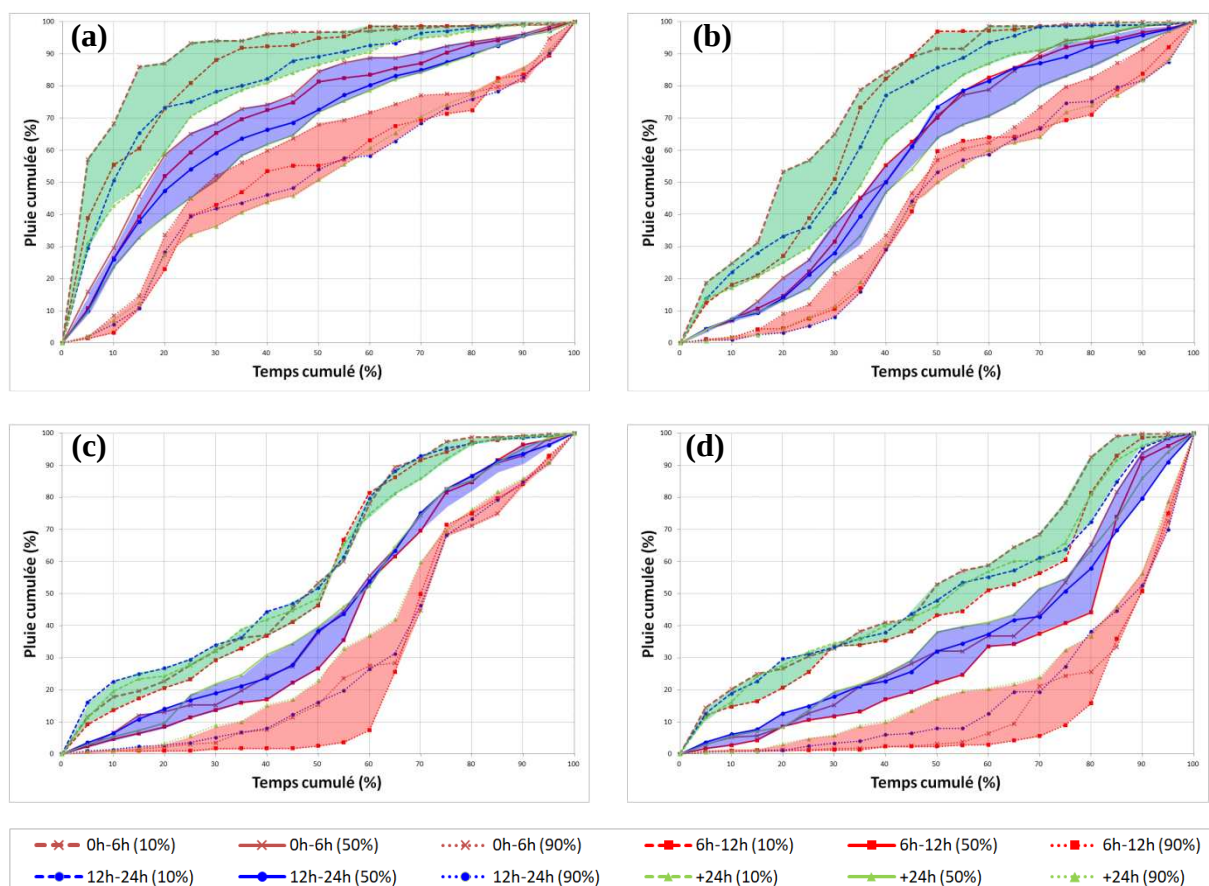


Figure 56: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour les différents groupes de durées avec un MIET de 6 h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles (Les enveloppes des courbes de probabilité de 10%, 50% et 90 % sont respectivement en couleur vert, bleu et rouge)

III.3.2.4. Courbes de Huff par saisons pour un MIET de 6h

L'analyse de 883 averses extraites montre que leur répartition selon les quatre saisons de l'automne, l'hiver, le printemps et l'été est respectivement de 37.2%, 34.5%, 27% et 1.3%. Ainsi, le nombre des averses sélectionnées pour l'été (12 averses) est très faible et ne permet

pas d'établir des courbes de Huff fiables pour les quatre quartiles. Les courbes de probabilité de 50% correspondant à la saison d'été sont présentées juste à titre indicatif.

La Figure 57 présente la répartition des averses par quartile selon les quatre saisons. A partir de l'analyse de cette figure, on note que le pourcentage des averses correspond au 1^{ier} quartile varie entre 31% et 35% pour les quatre saisons. Les averses du 1^{ier} et du 2^{ième} quartiles constituent entre 50% (Eté) et 63.5% (Hiver). La Figure 58 illustre les courbes de Huff développées pour les quatre saisons et correspondant aux quatre groupes de quartiles.

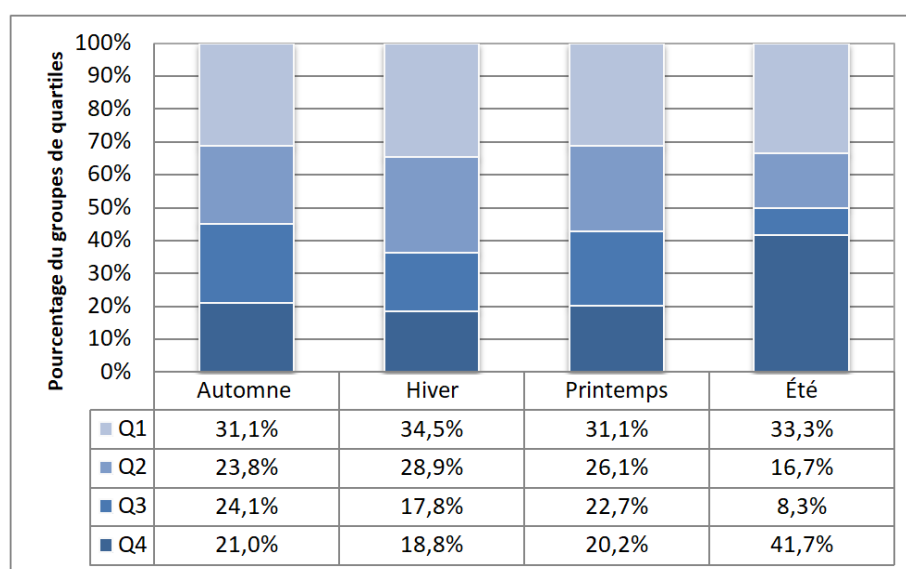


Figure 57: Pourcentage des groupes de quartiles associés aux quatre saisons

A travers l'analyse visuelle des courbes développées, on note les constats suivants :

- Les courbes de probabilité relatives à l'automne, l'hiver et au printemps sont généralement proches pour les quatre quartiles ;
- Les courbes de l'automne sont légèrement décalées à gauche pour le 1^{ier} quartile. Ce qui signifie que les pluies de projet générées à partir desdites courbes ont des cumuls plus rapides au début que dans la fin ;
- Les intensités moyennes maximales issues des courbes de l'automne sont généralement supérieures par rapport à celles de l'hiver et du printemps ;
- Les distributions temporelles d'été correspondant à une probabilité de 50% sont généralement proches à celles des autres saisons pour le 1^{ier}, le 2^{ième} et le 4^{ième} quartile. Par contre, celle du 3^{ième} quartile correspondant à une seule averse ne permet pas de tirer des conclusions.

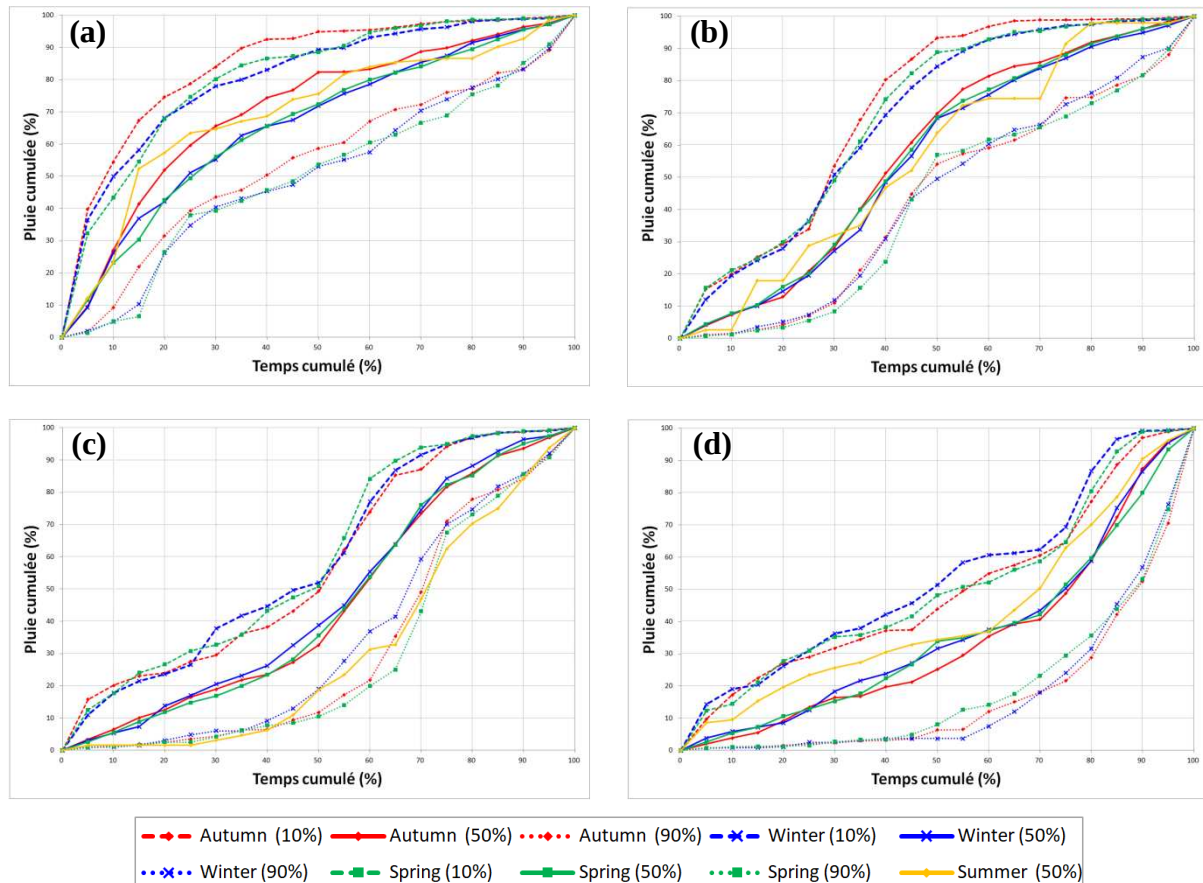


Figure 58: Courbes de Huff développées dans la zone d'action de l'ABHBC pour les quatre saisons avec un MIET de 6 h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1^{ier}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles

III.4. DISCUSSIONS

L'un des résultats surprenant de cette étude est la similarité entre les courbes de Huff de la zone d'étude et celles développées à l'Etat d'Illinois aux USA. Il s'agit des courbes correspondant à un MIET de 6 h en se basant sur les averses extraites toutes durées confondues. Ce résultat a été obtenu aussi dans certains pays du Sud-est de l'Asie (Azli et Rao, 2010). En effet, Azli et Rao (2010) ont comparé les courbes de Huff développées en Malaisie avec celles de la région Centre-Ouest du USA (Figure 45) en constatant une similarité entre les courbes des deux zones. Ils supposent que la similarité des courbes peut être justifiée par une similarité des climats dans les deux zones. Ce qui indique que les pluies instantanées peuvent avoir des caractéristiques similaires entre certaines ou des zones dans le monde malgré leur éloignement géographique. La compréhension de cette similarité nécessite une comparaison approfondie des précipitations et du climat en générale dans les zones de courbes similaires.

L'analyse des courbes de Huff développées pour différents groupes de durées montre un rapprochement des courbes de durée de 12h-24h et +24h. Les groupes de durées 0-6h et 6h-12h ont aussi un comportement relativement comparable. Ainsi, nous recommandons un développement des courbes de Huff pour deux groupes de durées : celles de 0-12h et +12h.

En ce qui concerne le choix du MIET pour la séparation des averses constituant la base de développement des courbes de Huff, cette recherche montre que les courbes de Huff sont relativement insensibles par rapport à un MIET allant de 1 h à 12 h. Pour un MIET de 24 h, les écarts par rapport aux autres courbes sont généralement faibles à l'exception des courbes Q1 (10%) et les Q4 (90%). Bonta et Rao indiquent que les courbes de Huff sont relativement insensible au MIET adopté (Bonta et Rao, 1987). D'autres recherches confirment ce constat mais uniquement pour des MIET de 3 h, 6 h, 9 h et 12 h (Xie et Nearing, 2016).

Ainsi, et pour faciliter le choix des courbes de Huff à utiliser par les concepteurs des ouvrages hydrauliques et pour les études hydrologiques en général, un MIET de 6 h pourra être adopté pour le développement des courbes de Huff dans notre zone. La Figure 59 présente les courbes de Huff correspondant à des groupes de durées de 0-12h et +12h pour les quatre groupes de quartiles.

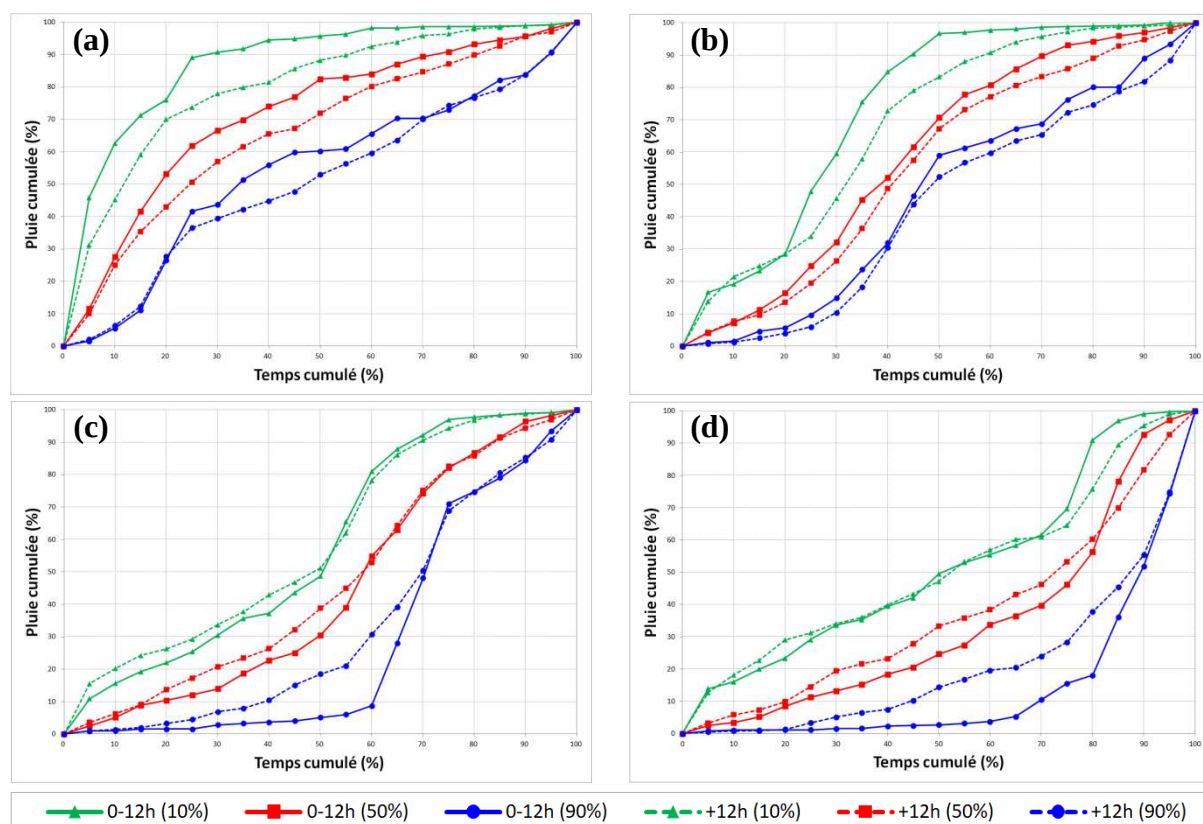


Figure 59: Courbes de Huff développées pour les groupes de durées retenus (0-12h et +12h) avec un MIET de 6h : (a), (b), (c) et (d) correspondent respectivement aux averses du 1^{er}, 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} quartiles

III.5. CONCLUSION

Les courbes de Huff dans la zone d'action de l'ABHBC ont été développées en s'appuyant sur une base de données des pluies instantanées. Il s'agit des pluies enregistrées dans 25 pluviomètres automatiques installés à partir de 2009. Les séries utilisées couvrent des périodes variant de 2 ans à 7 ans avec une durée moyenne de 6 ans et un pas de temps de 5 minutes.

L'analyse des courbes développées montre l'importance des informations, sur la quantité de pluie et son intensité, contenues dans les courbes de Huff et a permis une meilleure compréhension des pluies instantanées dans la zone d'étude. Ainsi, plusieurs conclusions peuvent être tirées et sont résumées ci-dessous :

- Sans tenir compte des groupes de durées, les courbes de Huff développées dans la zone d'étude pour un MIET de 6 h sont très similaires à celles élaborées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA. Ce résultat est surprenant ;
- L'analyse de l'impact des MIET sur les courbes de Huff montre que ces dernières sont relativement insensibles au MIET adopté et confirme les conclusions de certaines recherches réalisées dans d'autres pays du monde. Ainsi, un MIET de 6 h est adopté pour le développement des courbes de Huff dans la zone ;
- Les courbes de Huff relatives aux différentes saisons ont été comparées. Ce travail montre que ces courbes sont presque similaires pour les saisons d'automne, d'hiver et du printemps. Pour la saison d'été, il n'est pas possible de tirer des conclusions significatives tenant compte du nombre limité des averses disponibles pour cette saison ;
- L'analyse des courbes de Huff correspondant à plusieurs groupes de durées a mené à retenir deux groupes : ceux de 0-12h et +12h. Dès lors, les courbes de Huff retenues dans la zone d'étude correspondent à ces deux groupes de durées.

Tenant compte de l'importance des courbes de Huff dans les études hydrologiques, cette recherche, qui constitue une première du genre au Maroc, a permis le développement détaillé de ces courbes dans le contexte marocain. L'utilisation des courbes élaborées dépend des caractéristiques des bassins versant et des durées retenues pour les pluies de projet.

Ainsi, il est important d'analyser l'impact des différentes courbes développées sur les résultats des études hydrologiques et aussi de les comparer avec d'autres courbes utilisées dans le contexte marocain.

Compte tenu de la diversité orographique, pluviométrique et climatique qui constitue le Maroc, une généralisation de ce travail sur autres bassins serait certainement intéressante à réaliser.

CHAPITRE IV.
IMPACT DES COURBES DE HUFF
DEVELOPPEES SUR LES DEBITS DE
PROJET

VI.1. INTRODUCTION

Le travail réalisé dans le chapitre précédent a permis le développement de 24 courbes de Huff réparties sur 2 groupes de durée 0-12h et +12h. Néanmoins, le choix de la courbe à adopter ou à utiliser n'est pas encore atteint. Ainsi, l'objectif de ce chapitre est d'analyser l'impact des courbes de Huff développées dans la zone d'étude sur les débits de pointe issus des études hydrologiques. Cette analyse concerne également la courbe SCS Type II et la distribution de type Chicago, adaptée aux données régionales, qui sont très utilisées dans la zone.

Cette analyse est menée à travers un modèle hydrologique élaboré sous le logiciel HEC-HMS. En effet, cet outil gratuit est très utilisé dans le contexte marocain. Autres outils ont été utilisés pour préparer les données nécessaires au calcul hydrologique. Les paragraphes suivants présentent le travail réalisé et les conclusions retenues.

VI.2. MODELISATION HYDROLOGIQUE

VI.2.1. Description du logiciel utilisé

VI.2.1.1. Présentation générale

L'outil de modélisation utilisé est le logiciel américain HEC-HMS qui est conçu pour simuler les ruissellements et l'écoulement naturel en aval des bassins versants et dans les cours d'eau et peut être appliqué à un large éventail de zones géographiques et climatiques. Il permet de modéliser les grands bassins ainsi que les petits bassins. Un modèle de base sous HEC-HMS requiert deux principales composantes : les caractéristiques intrinsèques des bassins versant (Surfaces, CN et Lag) et les données de précipitation.

Ce logiciel est exploité pour monter un modèle global dans une grande partie de la zone d'action de l'ABHBC en se basant sur deux processus physiques : la production ou les pertes calculées à l'aide de la méthode SCS et la transformation Pluie-Débit à travers l'hydrogramme unitaire de type SCS.

Une présentation des processus physiques utilisés dans l'outil est décrite ci-dessous.

VI.2.1.2. Fonction de production

VI.2.1.2.1. Présentation de la méthode

La méthode de SCS-CN est choisie pour le calcul de ruissellement dans la zone d'étude. Cette méthode se base sur le coefficient d'indexation ou le « Curve Number » des sols du bassin versant (CN). Au départ, la méthode a été développée pour le calcul des ruissellements directs en surface des pluies d'orage des petits bassins versants agricoles aux États-Unis (Kent, 1973), mais très vite, elle a été adoptée pour plusieurs régions dans le monde. Les estimations et les prévisions de ruissellement ont été fortement améliorées, après son couplage avec des techniques de la télédétection et du SIG.

Le ruissellement, Pe , est donné par l'équation (Kent, 1973) :

$$Pe = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{pour } P > I_a \quad (4.1)$$

Où :

P : La pluie totale accumulée au temps t ; (en mm)

I_a : La perte initiale ; (en mm)

S : Le potentiel maximum de rétention. (en mm)

On a par ailleurs, en l'absence d'informations plus précises, la relation empirique suivante : $I_a = 0.2S$.

On obtient donc :

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (4.2)$$

Or le potentiel S et les caractéristiques du bassin versant sont reliés au CN par la relation suivante (Kent, 1973):

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (\text{mm}) \quad (4.3)$$

VI.2.1.3. Fonction de transformation

Les méthodes de transformation permettent de convertir l'excès pluviométrique en écoulement à l'exutoire du bassin versant. Il existe dans HEC-HMS six méthodes de transformation globale et une méthode de transformation spatialisée et maillée. La méthode utilisée dans ce travail est celle de « SCS Unit Hydrograph » basée sur un hydrogramme sans dimension.

Ce modèle se base sur l'hydrogramme unitaire normalisé, qui est la moyenne de nombreux hydrogrammes unitaires calculés pour un nombre important des bassins versants aux Etats Unies d'Amérique. Ce hydrogramme normalisé représente le débit d'écoulement, U_t , comme une fraction du débit maximal, U_p , et t_p , l'instant du pic. On a par ailleurs les relations empiriques suivantes (USACE, 2000) :

$$U_p = 2.08 \times \frac{S}{t_p} \quad (4.4)$$

$$t_p = \frac{\Delta t}{2} + 0.6 \times t_c \quad (4.5)$$

Avec :

Δt : La durée de l'excès de précipitation ;

t_c : Le temps de concentration du bassin ;

S : La surface du bassin versant.

D'une part, pour l'estimation du temps de concentration des bassins versants dans la zone d'étude, les formules de Kirpich et Californienne ont été utilisées comme indiqué dans le chapitre I.3.2.

D'autre part, on note que (Kent, 1973; USDA-NRCS, 2010) :

$$\text{Lag} = 0.6 \times t_c \quad (4.6)$$

En effet, après un épisode de pluie, Il y a un retard dans le temps, avant que l'hydrogramme de débit n'atteigne son pic maximum. Ce retard est une caractéristique du bassin versant

appelée "retard" ou « Lag time ». Ce Lag est défini comme le temps écoulé entre le centre de masse des précipitations excessives et le moment où l'hydrogramme atteint son maximum.

Ainsi, il suffit de connaître le temps de concentration pour remonter à t_p et U_p et d'obtenir ainsi l'hydrogramme unitaire désiré par simple multiplication de l'hydrogramme unitaire normalisé.

VI.2.2. Données pluviométriques

Le développement des courbes de Huff a mené à retenir deux groupes de durées de 0-12h et +12h. Dès lors, les simulations hydrologiques se sont basées sur une pluie de 24 h et une durée de 12 h de période de retour centennale pour analyser l'impact des courbes développées sur les débits de pointe dans la zone.

Pour le calcul des pluies de 24 h au niveau des bassins versants objet d'étude, nous nous référons à une carte élaborée en 2020 et concernant la distribution spatiale de la pluie de 24h de période de retour centennale dans la zone d'action de l'ABHBC (Figure 60).

Cette carte montre que les pluies de 24 heures maximales annuelles correspondant à une période de retour centennale ($P_{24h,max}(T100)$) augmentent en allant du Sud vers le Nord. Au niveau de la bande atlantique, les $P_{24h,max}(T100)$ sont plus importantes, où elles varient de 104 mm, à Casablanca, à 125 mm dans la ville de Rabat. Elles diminuent vers la zone continentale et varient entre 70 mm à 90 mm au Sud-Ouest, dans la bande Oued Tamdrost-Oued Bouskoura, et de 75 mm à 95 mm au Nord-Est entre Tsalat-Bge SMBA. Les $P_{24h,max}(T100)$ augmentent une autre fois dans la zone à relief située au Nord-Est en dépassant 95 mm.

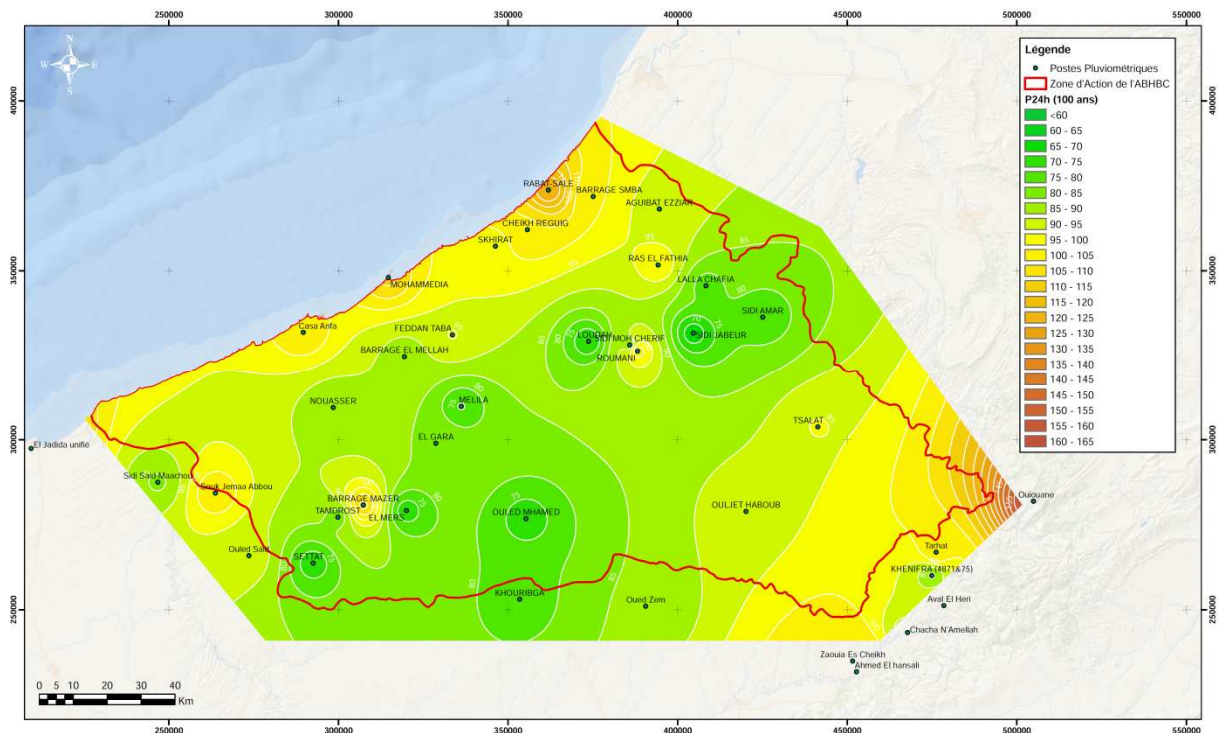


Figure 60: Isohyètes des pluies de 24 heures maximales annuelles d'une période de retour centennale sur la zone d'action de l'ABHBC (ABHBC, 2020)

Le calcul de la pluie centennale de 12 h ($P_{12h,max}(T100)$) se base sur les courbes IDF des villes de Rabat, Casablanca et Nouacer (Tableau 9, Tableau 10 et Tableau 11). La moyenne des $P_{12h,max}(T100)$ des trois postes est retenue. Une valeur moyenne de 80 mm est adoptée pour les simulations hydrologiques. Cette pluie est généralisée sur tous les bassins versants étudiés.

VI.2.3. Résultats

L'élaboration du modèle HEC-HMS a été entamée par la configuration de l'architecture du modèle. Il s'agit d'intégrer les bassins versants présentés dans le chapitre I.3 et leur assemblage tenant compte du fonctionnement hydraulique des cours d'eau correspondant. La Figure 61 présente l'architecture globale du modèle hydrologique élaboré.

Plusieurs simulations ont été analysées pour pouvoir estimer l'impact des différentes courbes de Huff développées dans la zone d'étude sur les débits de pointe calculés. Cette analyse a concerné également la distribution de type Chicago élaborée à partir des courbes IDF disponibles dans la zone d'étude. Les distributions temporelles utilisées sont les suivantes :

- Cas 1 : Il comprend une pluie centennale de durées de 24 h. Les distributions temporelles utilisées sont les suivantes :
 - o Les 12 courbes de Huff développées dans la zone d'étude et relatives à une pluie de durée supérieure à 12 heures ;
 - o La courbe SCS Type II tenant compte que cette distribution est la plus utilisée pour les études hydrologiques dans la zone d'étude et même dans le contexte marocain ;
 - o La distribution temporelle élaborée pour une durée de 24 h selon la méthode de type Chicago avec un $r=0.5$.
- Cas 2 : Il concerne la pluie centennale d'une durée de 12 h. Les distributions temporelles utilisées sont comme suit :
 - o Les 12 courbes de Huff développées dans la zone d'étude et relatives à une pluie de durée inférieure de 12 heures ;
 - o La courbe SCS Type II de durée de 12 h : Cette distribution est extraite à partir de la distribution de 24 h (Figure 44) en adoptant la distribution temporelle entre 6 h et 18 h (Yu *et al.*, 1984). Cette approche peut être justifiée par l'origine des hyétogrammes de type SCS provenant de la méthode des blocs ;
 - o La distribution temporelle élaborée selon la méthode de type Chicago avec un $r=0.5$.

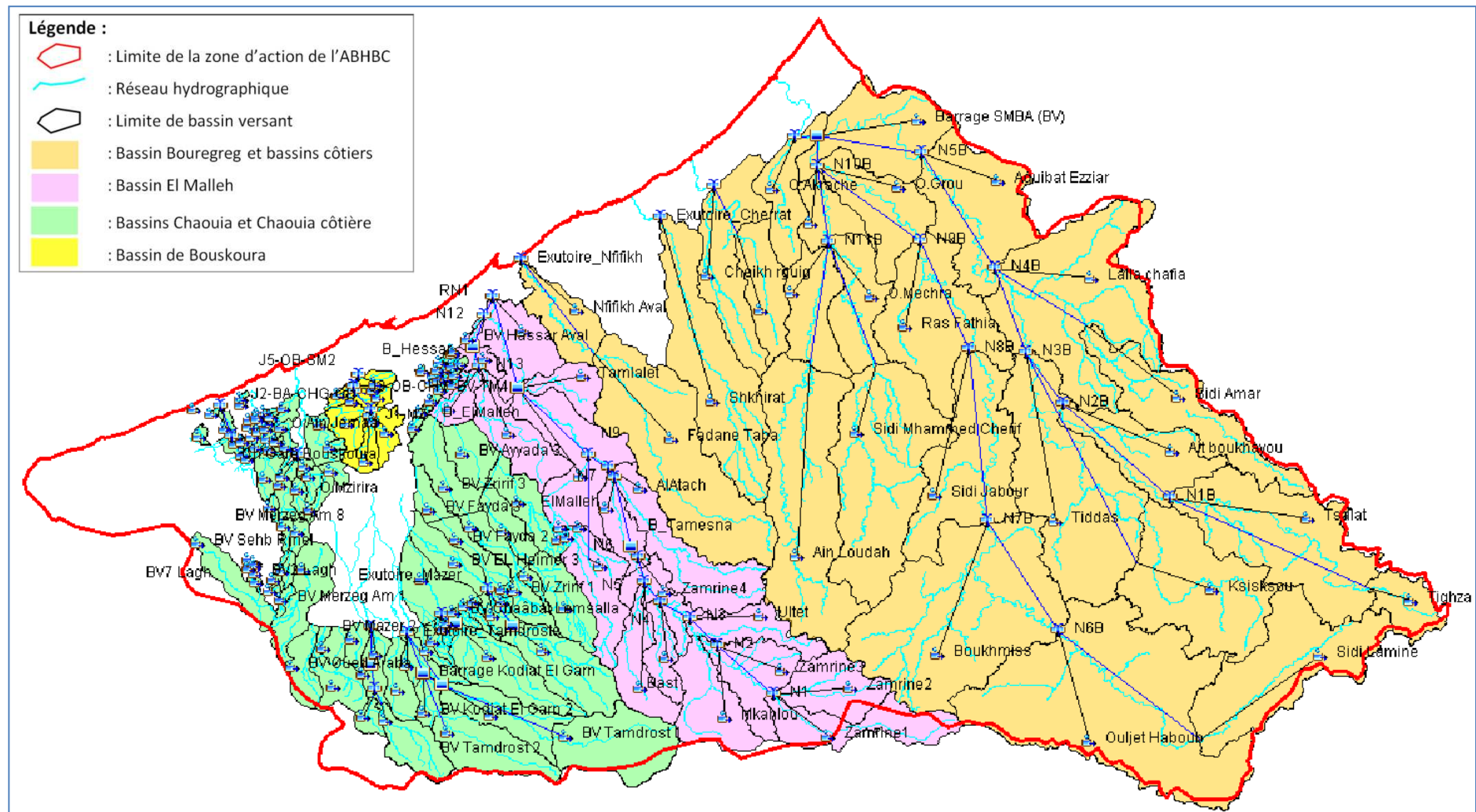


Figure 61: Architecture du modèle hydrologique élaboré sous le logiciel HEC-HMS

On note que la forme adimensionnelle de la distribution temporelle de type Chicago dépend uniquement du coefficient « b » de Montana (§III.2.4). Pour une période de retour centennale, ce coefficient, correspondant aux courbes IDF disponibles dans la zone d'étude, varie entre 0.636 et 0.64. Ainsi, une valeur de 0.64 peut être adoptée.

Pour pouvoir comparer les débits de pointe provenant des différentes distributions temporelles de pluie, les débits de pointe issus de la distribution SCS Type II sont considérés comme des débits de référence tenant compte que cette méthode est la plus utilisée dans la zone d'étude. Ainsi, les écarts sont calculés par rapport à cette méthode. Les simulations ont été effectuées pour les trois conditions d'humidité I, II et III présentées dans le chapitre I.2.8.

La comparaison des résultats de calcul concerne les bassins versants qui ne sont pas impactés par le laminage au niveau des barrages existants. Sinon, les débits en aval de ces derniers dépendent également de leurs modes de gestion.

Le nombre des bassins versants modélisés est 178 et leur assemblage selon le fonctionnement hydraulique des cours d'eau a permis d'avoir 218 nœuds de calcul au total avec des superficies variant de 0.2 Km² à 9 585 Km². Ce dernier représente le bassin versant global en amont du barrage Sidi Mohamed Ben Abdellah. Les paragraphes suivants résument les résultats des simulations pour les deux cas.

- Cas 1

Les figures suivantes présentent la variation des écarts entre les débits calculés, à travers les distributions de Huff développées dans la zone d'étude et celle de type Chicago d'une part et la distribution SCS type II d'autre part, en fonction des surfaces des bassins versants étudiés. Il s'agit des résultats correspondant à la condition d'humidité III. Pour les conditions II et I, les résultats sont consignés en Annexe 6.

Comme déjà précité, la pluie adoptée dans ce cas est de période de retour centennale et de durées de 24 h. L'analyse des résultats obtenus pour la condition d'humidité III (Figure 62) permet de tirer les 5 constats suivants :

- 1- Les écarts, entre les débits de pointe issus de la distribution SCS Type II et les autres distributions simulées, ont une tendance de diminuer en fonction de la surface du bassin versant avec une corrélation logarithmique. Les écarts deviennent très

faibles pour des grandes superficies des bassins versants et sont inférieures à 10% et 25% respectivement pour des surfaces supérieures à 9 000 Km² et 3 000 Km².

2- Les écarts entre les débits de pointe correspondants aux courbes de Huff de la même probabilité augmentent en allant d'une probabilité de 10% à 90%. En effet, les nuages de points sont plus dispersés dans la Figure 62 (c) que dans la Figure 62 (b) ou la Figure 62 (a). Autrement dit, l'intervalle de variation des débits de probabilité de 90% est le plus large suivi par celui des courbes de probabilité de 50% puis 10%.

3- Pour les courbes de Huff du même groupe de probabilité de 50% et 90%, les débits de pointe générés ont une tendance d'augmenter en allant du 1^{ier} quartile au 4^{ième} quartile. Les écarts les moins importants correspondent aux courbes du 3^{ième} et 4^{ième} quartiles. Pour le groupe de courbes de probabilité de 10%, les débits maximaux correspondent au 2^{ième} quartile suivis par ceux calculés à partir du 3^{ième} et du 1^{ier} quartiles et enfin le 4^{ième} quartile.

4- A l'exception de la distribution Huff 4 (90%), les débits provenant de la distribution SCS type II sont supérieurs à ceux calculés à partir de toutes les distributions de courbes de Huff développées dans la zone d'étude.

5- A l'exception de la distribution de Huff du 4^{ième} quartile et de probabilité de 90% (Huff 4 (90%)), les débits correspondants à la distribution de type Chicago ($r=0.5$) présentent les écarts les moins importants. Les écarts maximaux sont inférieurs à 30%. Pour des surfaces supérieures à 30 Km², la distribution Huff 4 (90%) donne généralement des débits supérieurs à ceux de la distribution de type Chicago avec des écarts de $\pm 25\%$ par rapport aux débits calculés à partir de la distribution SCS type II. Pour des surfaces inférieures à 30 Km², les débits issus de Huff 4 (90%) varient autour de ceux calculés à partir de la distribution de type Chicago.

La confrontation des résultats montre une bonne corrélation entre les débits de pointe provenant des deux distributions, Chicago et Huff 4 (90%), et que cette dernière donne généralement des débits supérieurs surtout pour des surfaces de bassins versants supérieures à 100 Km² (Figure 63).

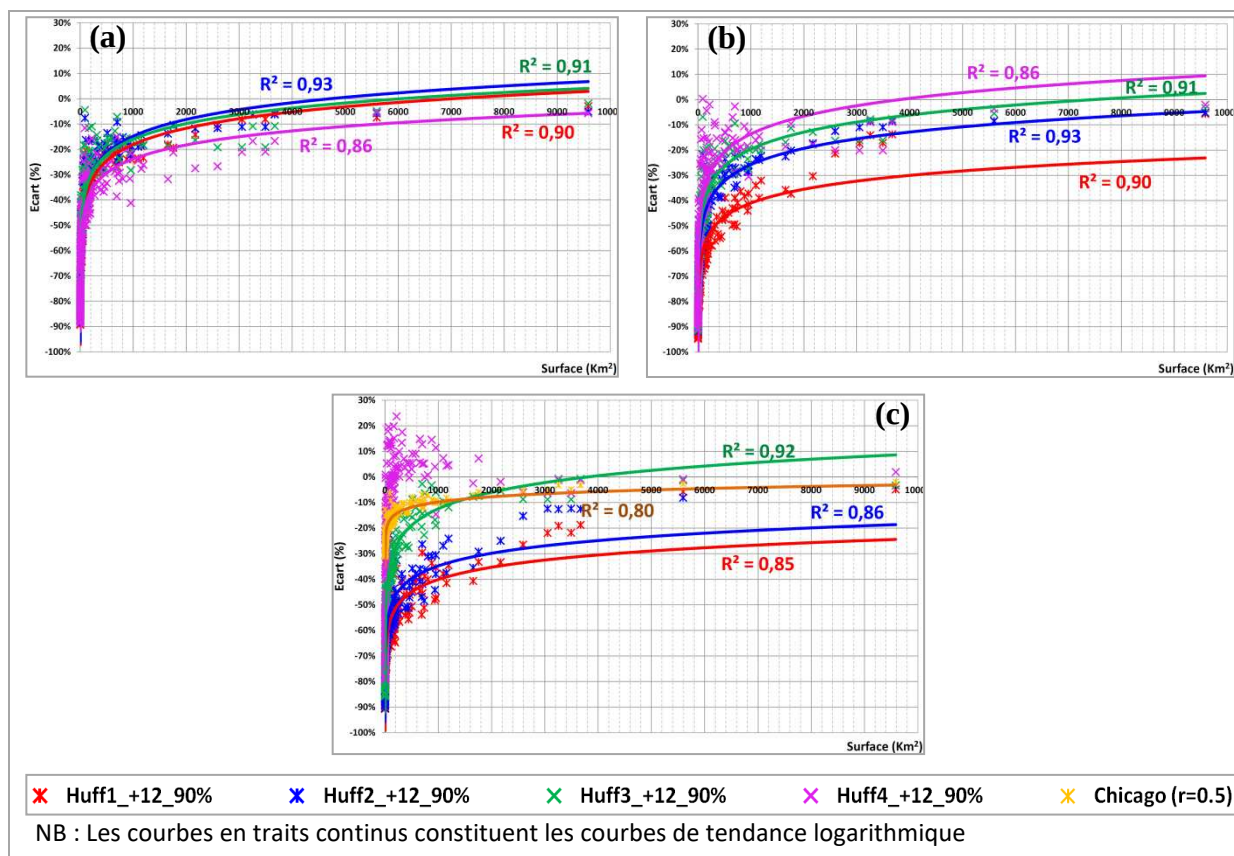


Figure 62: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff ((a), (b) et (c) correspondent respectivement aux courbes de Huff de probabilité de 10%, 50% et 90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité III)

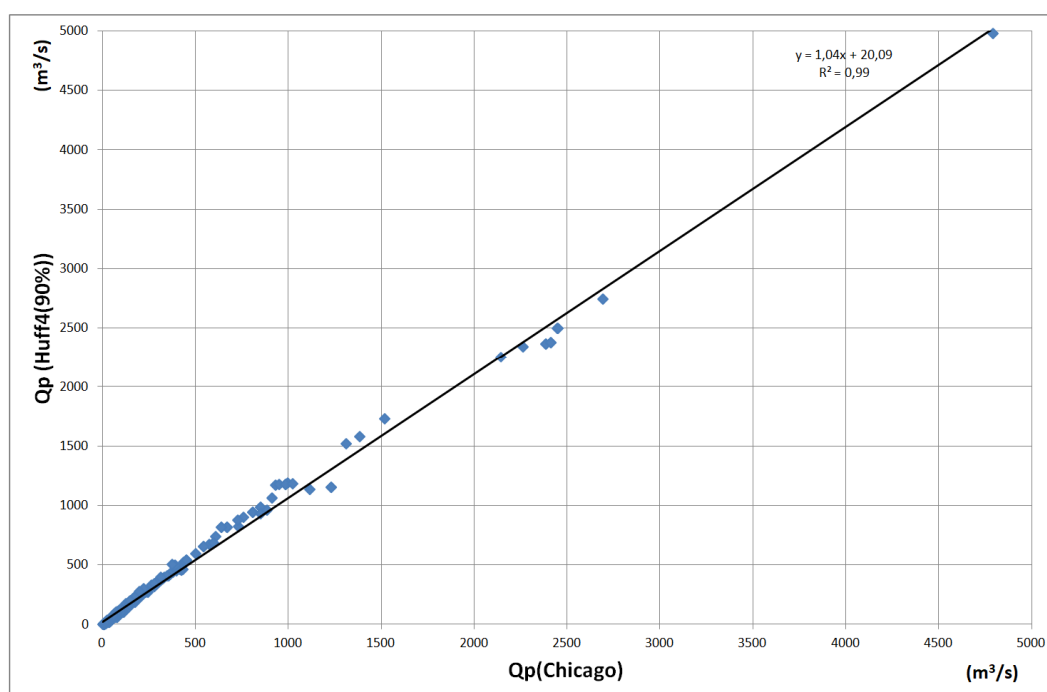


Figure 63: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ième} quartile e de probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité III)

Pour les conditions d'humidité II et I, les conclusions correspondantes aux 5 constats précités, un par un, sont comme suit :

- 1- Les écarts, entre les débits de pointe issus de la distribution SCS Type II et les autres distributions simulées, ont une tendance de diminuer en fonction de la surface du bassin versant mais la corrélation logarithmique ne devient plus représentative pour les résultats de plusieurs courbes de Huff.
- 2- Ce constat reste aussi valable. En effet, l'intervalle de variation des débits de probabilité de 90% est le plus large suivi par celui des courbes de probabilité de 50% puis 10%.
- 3- Pour les courbes de Huff du même groupe de probabilité de 10%, 50% et 90%, les débits de pointe générés ont une tendance d'augmenter en allant du 1^{ier} quartile au 4^{ième} quartile.
- 4- En diminuant le CN plusieurs courbes de Huff donnent des débits de pointe supérieurs à ceux calculés par la distribution SCS de type II.
- 5- Pour les courbes de Huff de probabilité de 90%, les débits correspondants à la distribution de type Chicago constituent un fuseau central par rapport aux débits provenant des courbes de Huff et sont généralement dépassé par les débits de pointe des courbes Huff 3 (90%) et Huff 4 (90%). Les résultats de ce dernier forment la borne supérieure des débits calculés.

Ainsi, pour une pluie de projet de 24 heures, nous proposons d'adopter la distribution de type Chicago pour le calcul des débits de pointe pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. En outre, la distribution Huff 4 (90%) doit être utilisée pour la vérification du bon fonctionnement des dimensions adoptées pour les ouvrages et leur ajustement en cas de besoin. Les débits calculés à partir de la distribution Huff 4 (90%) peuvent être aussi utilisés comme éléments de base pour l'identification de la zone d'aléa inondation.

- Cas 2 :

Les figures suivantes présentent la variation des écarts entre les débits calculés, à travers les distributions de Huff développées dans la zone d'étude et celle de type Chicago d'une part et la distribution SCS type II d'autre part, en fonction des surfaces des bassins versants étudiés. Il s'agit des résultats correspondant à la condition d'humidité III. Pour les conditions II et I, les résultats sont consignés en Annexe 6.

Comme déjà précité, la pluie adoptée dans ce cas est de période de retour centennale et de durées de 12 h. Les résultats de simulation sont très similaires à ceux relatifs aux distributions temporelles de pluie de 24 h. L'analyse des résultats obtenus pour la condition d'humidité III permet de tirer les 5 constats suivants :

- 1- Les écarts, entre les débits de pointe issus de la distribution SCS Type II et les autres distributions simulées, ont une tendance de diminuer en fonction de la surface du bassin versant avec une corrélation généralement logarithmique. Les écarts deviennent très faibles pour des grandes superficies des bassins versants et sont inférieures à 10% et 25% respectivement pour des surfaces supérieures à 9 000 Km² et 1 500 Km².
- 2- Les écarts entre les débits de pointe correspondants aux courbes de Huff de la même probabilité augmentent en allant d'une probabilité de 10% à 90%. En effet, les nuages de points sont plus dispersés dans la Figure 64 (c) que dans la Figure 64 (b) ou la Figure 64 (a).
- 3- Pour les courbes de Huff du même groupe de probabilité de 50% et 90%, les débits de pointe générés ont une tendance d'augmenter en allant du 1^{ier} quartile au 4^{ième} quartile. Les écarts les moins importants correspondent aux courbes du 3^{ième} et 4^{ième} quartiles. Pour le groupe de courbes de probabilité de 10%, les débits maximaux correspondent au 2^{ième} quartile suivis par ceux calculés à partir du 3^{ième} et du 1^{ier} quartiles et enfin le 4^{ième} quartile.
- 4- A l'exception de la distribution Huff 4 (90%), les débits provenant de la distribution SCS type II sont supérieurs à ceux calculés à partir de toutes les distributions de courbes de Huff développées dans la zone d'étude.
- 5- A l'exception de la distribution de Huff du 4^{ième} quartile et de probabilité de 90% (Huff 4 (90%)), les débits correspondants à la distribution de type Chicago ($r=0.5$) présentent les écarts les moins importants. Les écarts maximaux sont inférieurs à 30%. Pour des surfaces supérieures à 30 Km², la distribution Huff 4 (90%) donne généralement des débits supérieurs à ceux de la distribution de type Chicago avec des écarts de $\pm 25\%$ par rapport aux débits calculés à partir de la distribution SCS type II. Pour des surfaces inférieures à 30 Km², les débits issus de Huff 4 (90%) sont généralement supérieurs à ceux calculés à partir de la distribution de type Chicago.

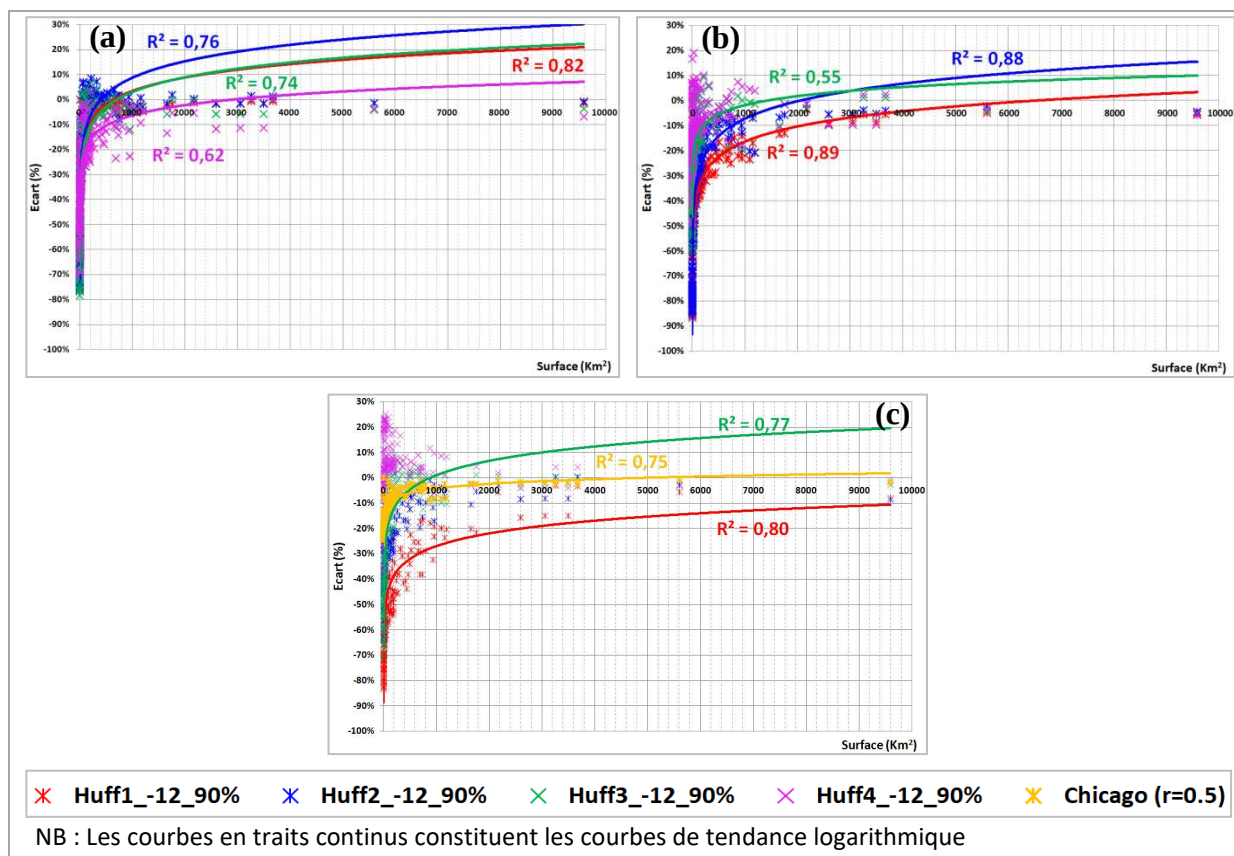


Figure 64: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff ((a), (b) et (c) correspondent respectivement aux courbes de Huff de probabilité de 10%, 50% et 90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité III)

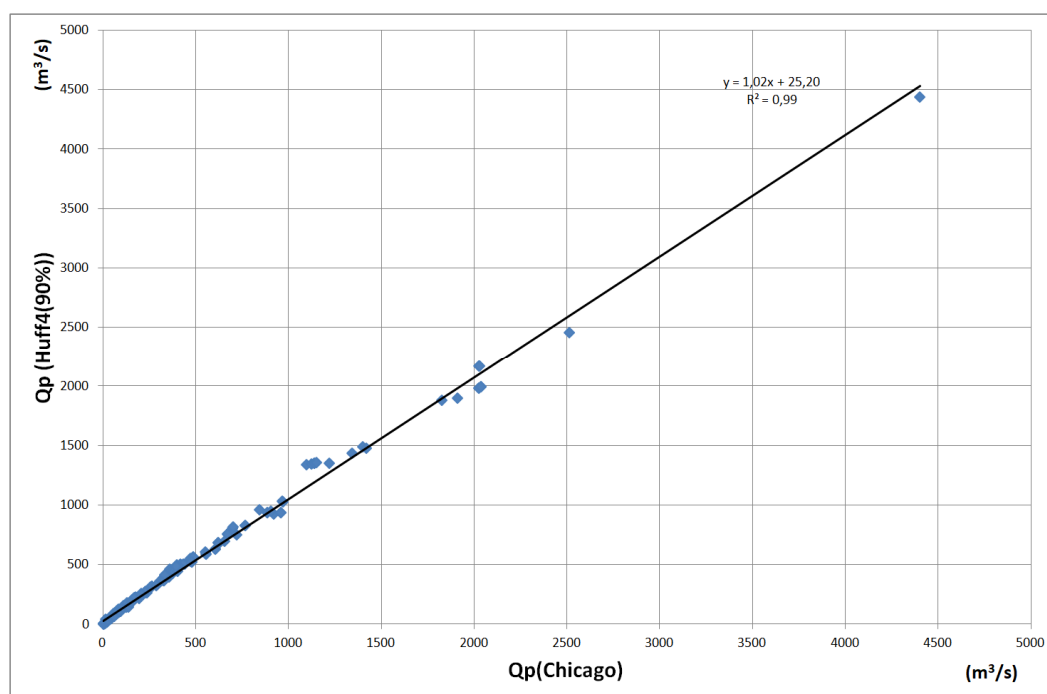


Figure 65: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ème} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité III)

L'analyse des résultats de simulation (Figure 65) montre une bonne corrélation entre les débits de pointe provenant des deux distributions, Huff 4 (90%) et Chicago ($r=0.5$), et que la distribution Huff 4 (90%) donne généralement des débits supérieurs surtout pour des surfaces de bassins versants supérieures à 2 Km².

Pour les conditions d'humidité II et I, les différences notées pour les 5 constats pour une pluie de 24 h restent généralement valables pour une pluie de 12 h.

Ainsi, pour une pluie de projet de 12 h, nous proposons d'adopter la distribution de type Chicago pour le calcul des débits de pointe pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques. En outre, la distribution Huff 4 (90%) doit être utilisée pour la vérification du bon fonctionnement des dimensions adoptées pour les ouvrages et leur ajustement en cas de besoin.

VI.3. CONCLUSION

Pour analyser l'apport des courbes de Huff développées dans les études hydrologiques au niveau de la zone d'étude et précisément sur les débits de pointe des crues de projet, un modèle hydrologique global a été élaboré sous le logiciel HEC-HMS en utilisant la méthode SCS. Ce modèle couvre 80% de la zone d'étude et intéresse les bassins versants les plus importants ou connaissant une problématique d'inondation. La surface des bassins versants étudiées varie de 0.2 Km² à 9 585 Km².

Les simulations hydrologiques ont concerné les deux groupes de durée des courbes de Huff développées et ont été faites pour des pluies centennales de 24 h et 12 h. Les résultats obtenus ont été comparés aux débits de pointe calculés à partir des distributions temporelles de Chicago et du SCS type II à l'aide du même modèle hydrologique.

Ainsi, 28 distributions synthétiques ont été utilisées. Il s'agit de 12 courbes de Huff relatives à une pluie supérieure à 12 h, 12 courbes de Huff relatives à une pluie inférieure à 12 h, la distribution de Chicago pour des durées de 24 h et 12 h et la distribution SCS de type II pour des durées de 24 h et 12 h.

La comparaison des résultats de simulations pour les deux durées adoptées, 12h et 24h, des pluies centennales permet de proposer la distribution de type Chicago, développées à partir des courbes IDF de la zone, pour le calcul des débits de pointe. En outre, l'une des deux distributions Huff 4 (90%), 0-12h ou +12h, doit être utilisée selon la durée de pluie retenue, pour la vérification du bon fonctionnement des dimensions adoptées pour les ouvrages et leur réajustement en cas de besoin. Les débits calculés à partir de la distribution Huff 4 (90%) peuvent être aussi utilisés comme éléments de base pour l'identification de la zone d'aléa inondation.

L'utilisation des deux distributions contribuera à l'élaboration des études hydrologiques adaptées à la zone d'étude en prenant en considération les caractéristiques des pluies instantanées enregistrées dans la zone.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Pendant les deux dernières décennies, une augmentation de l'occurrence des événements forts et violents a été bien soulevée au Maroc. Ainsi, un effort considérable a été orienté vers la construction des ouvrages hydrauliques de protection contre les inondations ou d'assainissement des eaux pluviales. Le dimensionnement de ces ouvrages se base principalement sur les données pluviométriques et/ou hydrométriques comme intrant principal.

Dans ce contexte, l'objectif principal de la thèse était de contribuer à la compréhension des pluies instantanées dans le contexte marocain. La zone d'action de l'ABHBC a été choisie comme une zone pilote.

Le travail dans cette thèse a été scindé en trois principaux objectifs :

- Contribuer à une compréhension des caractéristiques des distributions temporelles des pluies instantanées au niveau de la zone d'étude ;
- Développer une pluie de projet synthétique adaptée à la zone ;
- Analyser l'impact de la pluie de projet synthétique développée sur les débits de pointe calculés au niveau des bassins versants.

Les paragraphes suivants récapitulent les conclusions correspondant à chaque objectif.

Tout d'abord, le premier objectif de ce travail a été entamé par une revue bibliographique en relation avec l'analyse des caractéristiques des pluies instantanées. Elle a permis de retenir le traitement des averses comme élément de base pour analyser les pluies instantanées. La sélection des averses a été limitée en 4 critères. Il s'agit du MIET, de la lame d'eau minimale de l'averse, de la durée de l'averse et des quartiles d'une averse.

Une base de données provenant de 25 pluviomètres automatiques installés à partir de 2009 a été constituée. Les séries des pluies instantanées utilisées couvrent des périodes variant de 2 ans à 7 ans avec une durée moyenne de 6 ans. Ces données ont été contrôlées à travers une confrontation avec les pluies journalières disponibles au niveau de 19 pluviomètres et avec les courbes IDF des postes de Rabat, Casablanca et Nouacer. Ce contrôle a conduit à l'écartement des enregistrements instantanés au niveau de deux postes, de corriger les données des pluies instantanées de 3 postes et d'écarter certains événements douteux.

Lors de traitement des pluies instantanées, il a été constaté l'importance du MIET dans l'extraction des averses. En effet, le nombre des averses sélectionnées et leurs durées sont liés au MIET utilisé. Par contre, les lames d'eau moyennes des averses dans les mêmes groupes de durée et les statistiques de classification des averses selon leurs quartiles sont presque

indépendantes du MIET. Une homogénéité régionale a été notée pour les groupes des durées et des lames d'eau des averses sélectionnées. En moyen, 57% des averses sélectionnées sont du 1^{ier} et 2^{ième} quartiles. Alors que 43 % restant est répartie entre le 3^{ième} et le 4^{ième} quartile. En outre, 90% des averses sélectionnées sont réparties entre les mois d'octobre et le mois d'avril. Les averses les plus courtes sont concentrées en mois de novembre. Par contre, les averses de janvier, février et mars sont plutôt de longues durées.

Ensuite, le deuxième objectif de la thèse a été initié par une revue de littérature qui a permis d'analyser en détail les distributions temporelles des précipitations les plus utilisées dans le monde et de s'arrêter sur leurs origines, leurs limites d'utilisation et leurs fondements théoriques et pratique ainsi que le retour d'expérience des différentes méthodes présentées. Cette revue a montré que les méthodes des blocs et Chicago ont le même principe, se basent plutôt sur des critères de conception et sont loin de refléter la réalité de la nature et que les distributions de type SCS ne sont qu'une application de la méthode des blocs. L'importance de ces méthodes réside dans la simplicité de leur élaboration. Par contre, la méthode de Huff permet une bonne représentativité des pluies instantanées tenant compte de la flexibilité des courbes proposées et l'approche de leur élaboration en comparaison avec la méthode rectangulaire et les méthodes simple triangle et double triangle. Dès lors, l'approche de Huff a été adoptée pour le développement des distributions temporelles synthétique des averses dans la zone d'étude en constituant une première du genre au Maroc.

Le développement des courbes de Huff et les traitements statistiques correspondants ont été réalisés sous l'application Rstudio en permettant un gain de temps important. Ce travail a montré que les courbes de Huff sont relativement insensibles au MIET adopté et confirme les conclusions de certaines recherches réalisées dans d'autres pays du monde. Un MIET de 6 h a été adopté pour pouvoir comparer les résultats obtenus aux autres travaux réalisés ailleurs. Ainsi, les courbes développées dans la zone d'étude pour un MIET de 6h sont très similaires à celles élaborées par Huff dans l'Etat d'Illinois aux USA. Ce résultat est surprenant. L'analyse saisonnière des courbes développées a montré que pour les saisons d'automne, d'hiver et de printemps, les courbes de Huff correspondantes sont presque similaires. Pour la saison d'été, il n'est pas possible de tirer des conclusions significatives tenant compte du nombre limité des averses disponibles pour cette saison. L'analyse des courbes de Huff correspondant à plusieurs groupes de durées a mené à retenir deux groupes : ceux de 0-12h et +12h. L'analyse des courbes développées a permis une meilleure compréhension des pluies instantanées dans la zone d'étude.

Enfin, le troisième objectif de la thèse a été concrétisé à travers un modèle hydrologique global qui a été élaboré sous le logiciel HEC-HMS en utilisant la méthode SCS. Ce modèle couvre 80% de la zone d'étude avec des surfaces des bassins versants étudiées variant de 0.2 Km² à 9 585 Km². Les simulations hydrologiques ont concerné les deux groupes de durée des courbes de Huff développées et ont été faites pour des pluies centennales de 24 h et 12 h avec une comparaison avec les distributions temporelles de Chicago et du SCS type II à l'aide du même modèle hydrologique.

La comparaison des résultats de simulations pour les deux durées adoptées, 12 h et 24 h des pluies centennales, permet de proposer la distribution de type Chicago, développées à partir des courbes IDF de la zone, pour le calcul des débits de pointe. En outre, les deux distributions Huff 4 (90%), correspondant au groupe de durée 0-12h et +12h, doivent être utilisées, selon la durée de pluie adoptée, pour la vérification du bon fonctionnement des dimensions adoptées pour les ouvrages et leur ajustement en cas de besoin. Ces distributions peuvent être également utilisées pour l'étude d'aléa inondation dans la zone d'étude. L'utilisation des deux distributions contribuera à l'élaboration des études hydrologiques adaptées en prenant en considération les caractéristiques des pluies instantanées enregistrées dans la zone.

Compte tenu de la diversité orographique, pluviométrique et climatique connues au Maroc, une généralisation de ce travail sur d'autres bassins serait intéressante à réaliser. Un travail similaire ne peut pas être réalisé sans l'existence d'une base de données des pluies instantanées. L'utilisation d'un langage de programmation comme le R ou Python permettra de faciliter le traitement en traitant une dizaine de millions des informations pluviométriques en quelques minutes.

Le travail réalisé dans cette thèse pourrait être approfondi et développé dans les travaux futurs à travers le traitement des axes suivants :

- La distribution spatiale des précipitations est un aspect essentiel de la variabilité des précipitations, car elle est la composante la plus efficace de la régionalisation des conditions climatiques et de formation des précipitations. L'analyse spatiale des pluies instantanées pourrait être mieux approfondie en cas de disponibilité des données Radar couvrant la zone d'étude. En effet, l'information de la pluie distribuée à partir des images Radar permettra de mieux analyser et comprendre la répartition spatiale des averses. Cette analyse pourrait être détaillée à travers une analyse d'autocréation

spatiale en utilisant l'Indice de MORAN ou le coefficient de GEARY ou autres méthodes d'analyse spatiale.

- Tenant compte que le réseau de mesure des pluies instantanées, au niveau des zones d'action de plusieurs Agences de Bassins Hydrauliques, n'est pas assez développée et que la répartition spatiale n'est pas toujours suffisante, il serait intéressant d'analyser l'apport des données satellitaires disponibles avec un pas de temps horaires dans le développement des courbes de Huff et en général des distributions temporelles synthétiques des pluies. Les courbes développées dans cette thèse permettent à la zone d'action de l'ABHBC de constituer une zone pilote afin de pouvoir comparer les résultats provenant des données satellitaires avec les courbes développées sur la base des pluviomètres automatiques implantés dans la zone. En outre, la base de données instantanées disponibles faciliterait la calibration des données satellitaires et permettrait d'analyser l'impact de la calibration sur les pluies synthétiques développées.
- En plus de l'utilisation du logiciel HEC-HMS, qui est utilisé généralement dans le contexte rural ou périurbain, autres logiciels et méthodes adaptés aux études hydrologiques urbaines peuvent être utilisés. Un tel travail permettrait d'avoir une vision multimodèle et de mieux cerner l'impact des courbes développées sur les débits de projet dans le contexte urbain. En outre, les aménagements hydrauliques urbains ne se composent pas uniquement des ouvrages d'évacuation mais aussi des ouvrages de rétention. Dès lors, l'analyse des réactions de plusieurs bassins de rétention, vis-à-vis de distributions synthétiques développées, serait de grandes utilités. La ville de Casablanca constituerait un bon exemple à traiter tenant compte de l'existence d'une centaine de bassins de rétention aménagés dans la ville.

Le travail sur les axes précités demande une base de données très importante et qui ne peut être livrée que par des organismes spécifiques. Ce qui nécessite la mise en place des partenariats avec les différentes parties prenantes afin de faciliter l'échange et l'accès aux données disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- ABHBC. 2006. « Étude du plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau du bassin de Bouregreg et de la Chaouia ».
- ABHBC. 2017. « Etude de mise en place et de développement de modèles de prévision des crues, d'outils de gestion des ressources en eau et d'assistance à l'utilisation des modèles ».
- ABHBC. 2018. « Étude de protection contre les inondations de l'Oued Bouskoura partie amont ». Casablanca.
- ABHBC. 2019. « Etude d'actualisation du plan Directeur d'Aménagement Intégré des Ressources en Eau du Bassin Hydraulique de Bouregreg et de la Chaouia, Mission 1 ».
- ABHBC. 2020. « Etude d'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation au niveau des villes de Médiouna, Nouacer, Mohammedia, Berrechid et de Settat, Mission 1 ».
- ABHS. 2010. « Etude du schéma directeur de la protection de la plaine du Gharb contre les inondations ».
- Abrams, Michael, Robert Crippen, et Hiroyuki Fujisada. 2020. « ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) and ASTER Global Water Body Dataset (ASTWBD) ». *remote sensing* 12 (1156): 1-12. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/7/1156>.
- Al-Asaadi, Rawaa. 2002. « Hyetograph estimation for the state of Texas ». Texas Tech University. <https://www.researchgate.net/publication/34024817>.
- Al-Rawas, Ghazi Ali, et Caterina Valeo. 2009. « Characteristics of rainstorm temporal distributions in arid mountainous and coastal regions ». *Journal of Hydrology* 376 (1-2): 318-26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.07.044>.
- Al-Rawas, Ghazi, Caterina Valeo, Bernhard Kohl, et Robert Kirnbauer. 2012. « Rainstorm characteristics in Oman and Austria ». In 12th Congress Interpraevent, 15-24. Grenoble/France. http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2012_1_15.pdf.
- Alfieri, Lorenzo, Francesco Laio, et Pierluigi Claps. 2008. « A simulation experiment for optimal design hyetograph selection ». *Hydrological Processes* 22 (November 2008): 813-20. <https://doi.org/10.1002/hyp>.
- Almeida, Isabel Kaufmann De, Aleska Kaufmann Almeida, Jamil Alexandre Ayach Anache, Jorge Luiz Steffen, et Teodorico Alves Sobrinho. 2014. « Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: A review ». *Geociencias* 33 (4): 661-71. <https://www.researchgate.net/publication/281033683>.
- Amraoui, Fouad. 1999. « Etude hydrochimique des nappes de Témara et de la Chaouia côtière (Meseta marocaine) ». *Bulletin de l'Institut Scientifique de Rabat* 22: 71-80.
- Archambault, Christian, Michel Combe, et Jean-Paul Ruhard. 1975. « Le plateau des phosphates ». In *Ressources en Eau du Maroc*, Tome 2, 237-59.
- Arnell, Viktor, et Henriette Melin. 1984. « Rainfall Data for the Design of Sewer Pipe Systems. » Chalmers University of Technology. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179510/local_179510.pdf.
- ASCE. 1996. *Hydrology Handbook*. Second Edi. <https://doi.org/10.1061/9780784401385>.
- Asquith, William H. 2003. « Modeling of Runoff-Producing Rainfall Hyetographs in Texas Using L-Moment Statistics ». <https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/439>.

- Asquith, William H., Johnathan R Bumgarner, et Lynne S Fahlquist. 2003. « A triangular model of dimensionless runoff producing rainfall hyetographs in Texas ». *Journal of The American Water Resources Association*, 911-21. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2003.tb04415.x>.
- Asquith, William H., Meghan C. Roussel, Theodore G. Cleveland, Xing Fang, et David B. Thompson. 2006. « Statistical Characteristics of Storm Interevent Time, Depth, and Duration for Eastern New Mexico, Oklahoma, and Texas ». Texas Department of Transportation, Journal paper 1725. <https://pubs.usgs.gov/pp/pp1725/pdf/pp1725.pdf>.
- Asquith, William H., Meghan C. Roussel, David B. Thompson, Theodore G. Cleveland, et Xing Fang. 2005. « Summary of dimensionless Texas hyetographs and distribution of storm depth developed for Texas Department of Transportation Research Project ». Texas Department of Transportation. Vol. 0–4. Texas. <https://www.researchgate.net/publication/272023730>.
- Asquith, William H., David.B Thompson, Theodore G. Cleveland, et Xing Fang. 2004. « Synthesis of Rainfall and Runoff Data Used for Texas Department of Transportation Research Projects ». USGS. Vol. 1035.
- Awadallah, Ayman Georges, Abdelrahman Younis Elsayed, et Ahmed Mohammed Abdelbaky. 2017. « Development of design storm hyetographs in hyper-arid and arid regions : case study of Sultanate of Oman ». *Arabian Journal of Geosciences* 10 (20): 9. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-3240-5>.
- Azizian, Asghar. 2018. « Uncertainty Analysis of Time of Concentration Equations based on First-Order-Analysis (FOA) Method ». *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 11 (1): 327-41. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.327.341>.
- Azli, M., et A. Ramachandra Rao. 2010. « Development of Huff curves for Peninsular Malaysia ». *Journal of Hydrology* 388 (1-2): 77-84. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.04.030>.
- Back, A J, J L R Oliveira, et A Henn. 2011. « Time distribution of heavy rainfalls in Florianópolis-SC , Brazil ». In 12th International Conference on Urban Drainage, 8. Porto Alegre/Brazil. <http://andorinha.epagri.sc.gov.br/consultaweb/site/busca?b=pc&id=81236&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22HENN,A.%22&qFacets=autoria:%22HENN,A.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>.
- Back, Álvaro José. 2011. « Time distribution of heavy rainfall events in Urussanga, Santa Catarina State, Brazil ». *Acta Scientiarum - Agronomy* 33 (4): 583-88. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v33i4.6664>.
- Banque Mondiale. 2011. « Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord ». <https://www.preventionweb.net/publications/view/21069>.
- Barkouki, Kh., I. Kacimi, et N. Serhir. 2019. « Storm properties : literature review ». *IJSTR* 8 (12): 1299-1302. <http://www.ijstr.org/final-print/dec2019/Storm-Properties-Literature-Review.pdf>.
- Barkouki, Kh., I. Kacimi, N. Serhir, et A. Ezzahoum. 2018. « Analysis of instant rainfall at bouregreg and chaouia region in morocco ». In 16th Plinius Conference on Mediterranean Risks. Vol. 9. Montpellier, France. <https://meetingorganizer.copernicus.org/Plinius16/Plinius16-4.pdf>.

- Barkouki, Kh., I. Kacimi, N. Serhir, A. Zerouali, et MA. Ezzaouini. 2020. « Storms properties at bouregreg and chaouia region in Morocco ». *IJSTR* 9 (1): 2018-26. https://www.academia.edu/41744275/Storms_Properties_At_Bouregreg_And_Chaouia_Region_In_Morocco.
- Barkouki, Kh., et Ilias Kacimi. 2018. « Analyse des pluies instantanées au niveau de Bouregreg et la Chaouia au Maroc ». In 2nd Edition of the Doctoral Seminar of Earth Sciences. Rabat, Maroc.
- Bennani Baiti, Hicham, Ahmed Bouziane, Driss Ouazar, et Moulay Driss Hasnaoui. 2017. « Storm Water Management Model Sensitivity to Different Design Storm Types and Parameters: The Case of Tangier Experimental Basin, Morocco ». *JSWSM* 1: 130-42. <https://doi.org/10.5147/jswsn.v0i0.145>.
- Bertrand- Krajewski, Jean-Luc. 2007. « Cours d'Hydrologie Urbaine: La pluie ». INSA de Lyon. <https://docplayer.fr/16641448-Urgc-hydrologie-urbaine-cours-d-hydrologie-urbaine-partie-2-la-pluie-jean-luc-bertrand-krajewski.html>.
- Bezak, N., M. Šraj, S. Rusjan, et M. Mikoš. 2018. « Impact of the rainfall duration and temporal rainfall distribution defined using the Huff curves on the hydraulic flood modelling results ». *Geosciences (Switzerland)* 8 (2). <https://doi.org/10.3390/geosciences8020069>.
- Bonta, J. V., et A. Shahalam. 2003. « Cumulative storm rainfall distributions: Comparison of Huff curves ». *Journal of Hydrology New Zealand*. <https://doi.org/10.2307/43944860>.
- Bonta, James V. 2004. « Development and utility of Huff curves for disaggregating precipitation amounts ». *Applied Engineering in Agriculture* 20 (5): 641-53. <https://naldc.nal.usda.gov/download/10017/PDF>.
- Bonta, James V., et A. Ramachandra Rao. 1987. « Factors Affecting Development of Huff Curves ». *ASAE* 30 (6): 1689-93. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US8833420>.
- Bonta, James V., et A. Ramachandra Rao. 1988. « Comparison of Four Design-Storm Hyetographs ». *ASAE* 31 (1): 102-6. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=30673&t=3&redir=&redirType=>.
- Bouaicha, Redouane, et Abdelhamid Benabdelfadel. 2010. « Variabilité et gestion des eaux de surface au Maroc ». *Sécheresse* 21 (4): 325-26. <https://doi.org/10.1684/sec.2010.0272>.
- Bounouira, Hamid. 2012. « Etude des qualités chimiques et géochimiques du bassin versant de Bouregreg ». Université Ibn Tofail.
- Bouqdaoui, Karima El, Mostafa Aachib, Mohammed Blaghen, et Sanaa Kholtei. 2008. « Modélisation de l'écoulement de la nappe de Berrechid (Maroc) ». *La Houille Blanche* 2 (Avril): 69-75. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1051/lhb:2008019> LA.
- Ceresetti, Davide. 2011. « Structure spatio-temporelle des fortes précipitations : application à la région Cévennes Vivarais ». Université de Grenoble. <http://hydrologie.org/THE/CERESETTI.pdf>.
- Chen, Zhihe, Lei Yin, Xiaohong Chen, et Zhihua Zhu. 2015. « Research on the characteristics of urban rainstorm pattern in the humid area of Southern China : a case study » 4386 (February): 4370-86. <https://doi.org/10.1002/joc.4294>.
- Chimene, Catine António, et José Nilson B Campos. 2020. « The design flood under two approaches : synthetic storm hyetograph and observed storm hyetograph ». *Journal of Applied Water Engineering and Research* 8 (3): 13. <https://doi.org/10.1080/23249676.2020.1787242>.

- Chocat, Bernard, Serge Thibault, et Monique Zimmermann. 1981. « Étude comparative des résultats fournis par la méthode de CAQUOT et le modèle du réservoir linéaire ». *Techniques et Sciences Municipales - L'Eau* 7: 417-23. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00704185/document>.
- Chow, Ven Te, David R Maidment, et Larry W Mays. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Publishing Company. http://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf.
- Combe, Michel, Michel Ferré, et Jean-Pierre Thauvin. 1975. « Meseta centrale et meseta côtière, plaines et bassins du Maroc atlantique ». In *Ressources en Eau du Maroc*, Tome 2, édité par des Mines et de la Marine Marchande Direction des Mines, de la Géologie et de l'Energie, Ministère du Commerce, de l'Industrie, Service Gé, 147-74. Rabat.
- Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat. 2013. « Plan National de l'Eau, version finale ». Rabat. https://www.academia.edu/44691348/Plan_National_de_lEau.
- Desbordes, M, et P Raous. 1976. « Un exemple de l'intérêt des études de sensibilité des modèles hydrologiques ». *Houille Blanche*, n° 1: 37-43. <https://www.shf-lhb.org/articles/lhb/pdf/1977/01/lhb1976004.pdf>.
- Dick, Wes, et Ahmadreza Ghavasieh. 2015. « A 24-h design storm for the Fort McMurray region ». *Revue canadienne de génie civil* 755 (July): 747-55. <https://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cjce-2015-0034#.X2980ndFx6w>.
- Dolšák, Domen, Nejc Bezak, et Mojca Šraj. 2016. « Temporal characteristics of rainfall events under three climate types in Slovenia ». *Journal of Hydrology* 541 (November): 1395-1405. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169416305376>.
- Driouech, Fatima. 2010. « Distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique: descente d'échelle et incertitudes ». Université de Toulouse. <https://oatao.univ-toulouse.fr/7237/>.
- DRPE. 2013. « Etude d'actualisation du plan national de protection contre les inondations ».
- DRPE. 2015. « Diagnostic de la situation existante et enquête de crues, événement de novembre 2014, Province de Guelmim ».
- DRPE. 2018. « Changement climatique et ressources en eau au Maroc ».
- DRPE. 2019. « Etude pour l'établissement des bilans hydrauliques et des schémas d'aménagements à l'échelle nationale ».
- El- Sayed, Eman Ahmed Hassan. 2016. « Development of synthetic rainfall distribution curves for Sinai area ». *Ain Shams Engineering Journal*, 9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447917300114>.
- Elhassnaoui, Ismail, Zineb Moumen, Issam Serrari, Ahmed Bouziane, Driss Ouazar, et Moulay Idriss Hasnaoui. 2019. « Generation of synthetic design storm hyetograph and hydrologic modeling under HEC HMS for Ziz watershed ». *IJITEE* 8 (10): 3308-19. <https://doi.org/10.35940/ijitee.J1214.0881019>.
- Ellouze, Manel, Habib Abida, et Riadh Safi. 2009. « A triangular model for the generation of synthetic hyetographs ». *Hydrological Sciences Journal* 54 (2): 287-99. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1623/hysj.54.2.287>.
- Fadil, Abdelhamid. 2013. « SIG et télédétection couplés à la modélisation: Nouvelle approche pour l'étude des bassins versants. Application au bassin versant de Bouregreg (Maroc) ». Université Hassan II.

- G.Brown, Barbara, Richard W.Katz, et Allan H.Murphy. 1985. « Exploratory analysis of precipitations events with implications for stochastic modeling ». *American Meteorological Society* 24: 11. <https://journals.ametsoc.org/jamc/article/24/1/57/352794/>.
- Gaál, L, P Molnar, et J Szolgay. 2014. « Selection of intense rainfall events based on intensity thresholds and lightning data in Switzerland ». *Hydrology and Earth System Sciences* 18: 1561-73. <https://doi.org/10.5194/hess-18-1561-2014>.
- Gasmi, El Houssine El, Bouabid El Mansouri, et Mohammed Tammal. 2014. « Les écoulements superficiels dans le plateau de Settat-Ban Ahmed et la plaine de Berrechid : Hydrographie Endoréique ». *IJISR* 9 (1): 40-53. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.678.2935&rep=rep1&type=pdf>.
- Guha, Nilabja, Ishani Roy, et Anindya Roy. 2013. « Bayesian estimation of Huff curves ». *Electronic Journal of Statistics* 7 (1): 2794-2821. <https://doi.org/10.1214/13-EJS862>.
- Güntner, A., J. Olsson, A. Calver, et B. Gannon. 2001. « Cascade-based disaggregation of continuous rainfall time series: the influence of climate ». *Hydrology and Earth System Sciences* 5 (2): 145-64. <https://doi.org/10.5194/hess-5-145-2001>.
- Guo, James C. Y. 2009. « Conservative design rainfall curve ». *Journal of Hydrologic Engineering* 14 (5): 5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000013](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000013).
- Guo, Yiping, et Barry J Adams. 1998. « Hydrologic analysis of urban catchments with event-based probabilistic models volume ». *Water Resources Research* 34 (12): 3421-31. <http://dx.doi.org/10.1029/98WR02449>.
- Gwenaëlle Le Bloa. 2014. « Les données de précipitations à Météo-France ». In *Séminaire IRSTEA*, 31.
- Haile, A. T., T. H M Rientjes, E. Habib, V. Jetten, et M. Gebremichael. 2011. « Rain event properties at the source of the Blue Nile River ». *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (3): 1023-34. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1023-2011>.
- Hassani, Ahmed El. 1994. « Tectonique de la Meseta nord occidentale ». *Bulletin de l'Institut Scientifique de Rabat* 18: 107-24.
- Hassini, Sonia, et Yiping Guo. 2017. « Derived Flood Frequency Distributions Considering Individual Event Hydrograph Shapes ». *Journal of Hydrology* 547 (February): 296-308. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.003>.
- Hemain, Jean-Claude. 1986. « Guide de construction et d'utilisation des pluies de projet ». Montpellier: Service Technique de l'Urbanisme, Division des Equipements Urbains, Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports.
- Hernández-Guzmán, Rafael, et Arturo Ruiz-Luna. 2013. « SARA - An enhanced curve number-based tool for estimating direct runoff ». *Journal of Hydroinformatics* 15 (3): 881-87. <https://doi.org/10.2166/hydro.2013.145>.
- Huff, Floyd A. 1967. « Time Distribution Rainfall in Heavy Storms ». *Water Resources Research* 3 (4): 1007-19. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>.
- Huff, Floyd A. 1979. « Hydrometeorological characteristics of severe rainstorms in Illinois ». Urbana. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR003i004p01007>.
- Huff, Floyd A. 1990. « Time Distributions of Heavy Rainstorms in Illinois ». Vol. Circular 1. Champaign. <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/C/ISWSC-173.pdf>.

- J. Keifer, Clint, et Henry Hsien Chu. 1958. « Synthetic Storm Pattern for Drainage Design ». *Journal of the Hydraulics Division* 84 (1): 1558-49/1558-57. <https://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0010917>.
- Jaton, Jean-François. 1988. « Modélisation des relations pluies-débit: étude de la pluie de projet ». Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, institue de Génie Rural. Lausanne. http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/index.php?lvl=author_see&id=7121.
- Joo, Jingul, Jungho Lee, Joong Hoon Kim, Hwandon Jun, et Deokjun Jo. 2014. « Inter-event time definition setting procedure for urban drainage systems ». *Water (Switzerland)* 6 (1): 45-58. <https://doi.org/10.3390/w6010045>.
- Kaufmann de Almeida, Isabel, Aleska Kaufmann Almeida, Sandra Garcia Gabas, et Teodorico Alves Sobrinho. 2017. « Performance of methods for estimating the time of concentration in a watershed of a tropical region ». *Hydrological Sciences Journal* 62 (14): 2406-14. <https://doi.org/10.1080/02626667.2017.1384549>.
- Kent, K.M. 1973. « A method for estimating volume and rate of runoff in small watersheds ». SCS TP-149. <https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/TRsTPs/TP149.pdf>.
- Khaddor, I, M Achab, et A Hafidi Alaoui. 2016. « Hydrological simulation (rainfall-runoff) of kalaya watershed (tangier, morocco) using geo-spatial tools ». *Journal of Water Sciences & Environment Technologies* 2508 (August): 9250. <https://www.researchgate.net/publication/305317578>.
- Kim, Dong Eon, Shie Yui Liong, Philippe Gourbesville, Ludovic Andres, et Jiandong Liu. 2020. « Simple-Yet-Effective SRTM DEM improvement scheme for dense urban cities using ANN and remote sensing data: Application to flood modeling ». *Water (Switzerland)* 12 (3): 1-14. <https://doi.org/10.3390/w12030816>.
- Legorgeu, Carole. 2013. « Amélioration des estimations quantitatives des précipitations à hautes résolutions ». Université Clermont II - Blaise Pascal. http://www.obs.univ-bpclermont.fr/atmos/fr/Theses/Th_Legorgeu.pdf.
- Li, Ming, Quanxi Shao, et Luigi Renzullo. 2010. « Estimation and spatial interpolation of rainfall intensity distribution from the effective rate of precipitation ». *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 24 (1): 117-30. <https://doi.org/10.1007/s00477-009-0305-3>.
- Lubes, H, et J.M Masson. 1992. « Étude d'évaluation de logiciels d'ajustements de lois statistiques sur des variables hydrologiques ». Laboratoire d'Hydrologie et Modélisation, Université Montpellier II & Laboratoire d'Hydrologie ORSTOM Montpellier. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-08/35135.pdf.
- M. Yacoubi, Z. Chahine, et A. Aggad. 1996. « Le temps de concentration des petits bassins versants ruraux ». *Revue marocaine du génie civil* 62 (Mars): 6. <http://archives.cnd.hcp.ma/uploads/news/019107.pdf>.
- Malik, Umar, et William James. 2007. « Reliability of Design Storms used to Size Urban Stormwater System Elements ». *Journal of Water Management Modeling*, 309-26. <https://doi.org/10.14796/JWMM.R227-16>.
- Marsalek, J., et W. E. Watt. 1984. « Design storms for urban drainage design ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 11 (3): 574-84. <https://doi.org/10.1139/l84-075>.
- Mata-Lima, Herlander, Hugo Vargas, Julia Carvalho, Marcia Gonçalves, Hugo Caetano, Andreia Marques, et Cristina Raminhos. 2007. « Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso ». *Rem: Revista Escola de Minas* 60 (3): 525-36. <https://doi.org/10.1590/s0370-44672007000300014>.

- Ministère Délégué Chargé de l'Environnement. 2009. « Plan National de lutte contre le réchauffement climatique, Seconde Communication Nationale ».
- Ministère Délégué Chargé de l'Environnement. 2016. « Troisième communication nationale du Maroc à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques ».
- Molina-Sanchis, Isabel, Roberto Lázaro, Eva Arnau-rosalén, et Adolfo Calvo-cases. 2016. « Rainfall timing and runoff : The influence of the criterion for rain event separation ». *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 64 (3): 226-36. <https://doi.org/10.1515/johh-2016-0024>.
- Na, Wooyoung, et Chulsang Yoo. 2018. « Evaluation of rainfall temporal distribution models with annual maximum rainfall events in Seoul, Korea ». *Water (Switzerland)* 10 (10). <https://doi.org/10.3390/w10101468>.
- Nagy, E. D., P. Torma, et K. Bene. 2017. « Comparing Methods for Computing the Time of Concentration in a Medium-Sized Hungarian Catchment ». *Slovak Journal of Civil Engineering* 24 (4): 8-14. <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0017>.
- Najib, Saliha. 2014. « Etude de l'évolution de la salinisation de l'aquifère de la Chaouia côtière (Azemmour-Bir Jdid, Maroc): climatologie, hydrogéologie, hydrochimie et tomographie électrique ». Université Chouaïb Doukkali, Faculté des Sciences, El Jadida. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01356917>.
- Natale, Luigi, N T Kottegoda, L Natale, et E Raiteri. 2014. « Monte Carlo Simulation of rainfall hyetographs for analysis and design Monte Carlo Simulation of rainfall hyetographs for analysis and design ». *Journal of Hydrology* 519 (November): 11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.06.041>.
- Nur Syereena, Nojumuddin, Yusof Fadhilah, et Yusop Zulkifli. 2015. « Identification of Rainfall Patterns in Johor ». *Applied Mathematical Sciences* 9 (38): 1869-88. <https://www.researchgate.net/publication/281962285>.
- OCDE. 2016. « Étude de l'OCDE sur la gestion des risques au Maroc ». Édité par Paris OCDE. OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264267145-fr>.
- ORMVAG. 2013. « Etude de faisabilité de l'aménagement hydro-agricole de la Zone Centrale (ZC) de la troisième tranche d'irrigation (TTI) du Gharb et de sécurisation de l'alimentation en eau d'irrigation des secteurs équipés Beht 3 et Beht 4 ».
- ORSTOM. 1982. « Etude hydrologique des oueds côtiers de la Meseta atlantique marocaine ». https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers17-01/33719.pdf.
- Pan, Cuilin, Xianwei Wang, Lin Liu, Huabing Huang, et Dashan Wang. 2017. « Improvement to the huff curve for design storms and urban flooding simulations in Guangzhou, China ». *Water (Switzerland)* 9 (6): 1-18. <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/6/411>.
- Petroselli, Andrea, et Andrea Petroselli. 2019. « Comparison of methodologies for design peak discharge estimation in selected catchments of Bosnia and Herzegovina ». *Grđevinar* 71 (9): 729-38. <https://doi.org/10.14256/JCE.2611.2019>.
- Pique, Alain. 1994. « Introduction historique et structurale (le Massif central marocain et la Meseta orientale) ». *Bulletin de l'Institut Scientifique de Rabat* 18: 1-2.
- Powell, David N, Abdul A Khan, Nadim M Aziz, et John P Raiford. 2007. « Dimensionless Rainfall Patterns for South Carolina ». *Journal of Hydrologic Engineering* 12 (1): 4. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2007\)12:1\(130\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:1(130)).

- Prodanovic, Predrag, et Slobodan P. Simonovic. 2004. « Generation of Synthetic Design Storms for the Upper Thames River Basin CFCAS project: Assessment of Water Resources Risk and Vulnerability to Changing Climatic Conditions ». The University of Western Ontario. <https://www.eng.uwo.ca/research/iclr/fids/publications/cfcas-climate/reports/Report V.pdf>.
- Ravazzani, Giovanni, Laura Boscarello, Alessio Cislighi, et Marco Mancini. 2019. « Review of Time-of-Concentration Equations and a New Proposal in Italy ». *Journal of Hydrologic Engineering* 24 (10): 1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001818](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001818).
- Restrepo, Pedro J. 1982. « Identification of Independent Rainstorms ». *Journal of hydrology* 55 (1-4): 303-19. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90136-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90136-6).
- Rivard, Gilles. 1996. « Design storm events for urban drainage based on historical rainfall data: A conceptual framework for a logical approach ». *Journal of Water Management Modeling* 191 (13): 187-99. <https://doi.org/10.14796/JWMM.R191-12>.
- Rosario Balbastre-Soldevila, Rafael García-Bartual and Ignacio Andrés-Doménech. 2019. « A Comparison of Design Storms for Urban Drainage System Applications ». *Water (Switzerland)* 11 (4): 15. <https://doi.org/10.3390/w11040757>.
- Rostami, Noredin, et Fatemeh Rostami. 2014. « Derivation of rainfall temporal patterns using Monte Carlo simulation technique (case study: Karaj dam watershed, Iran) ». *Research in Civil and Environmental Engineering* 2 (4): 172-80. <https://www.researchgate.net/publication/292616648>.
- Roux, Christian. 1996. « Analyse des précipitation en hydrologie urbaine. Exemple de la Seine-Saint-Denis ». Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-00529474>.
- Ruhard, Jean-Paul. 1975a. « Chaouia et Plaine de Berrechid ». In *Ressources en Eau du Maroc*, Tome 2, édité par des Mines et de la Marine Marchande Direction des Mines, de la Géologie et de l'Energie, Ministère du Commerce, de l'Industrie, Service Gé, 188-225. Rabat.
- Ruhard, Jean-Paul. 1975b. « La plaine de Berrechid et la basse Chaouia entre Casablanca et Mohammedia ». In *Ressources en Eau du Maroc*, Tome 2, édité par Maroc Direction des Mines, de la Géologie et de l'Energie, Ministère du Commerce, de l'Industrie, des Mines et de la Marine Marchande, SG, 185-221. Rabat.
- Sharafati, A., et B. Zahabiyoun. 2013. « Stochastic generation of storm pattern ». *Life Science Journal* 10 (1): 1575-83. <https://www.researchgate.net/publication/286732709>.
- Sharifi, Soroosh, et Seyed Mahmood Hosseini. 2011. « Methodology for identifying the best equations for estimating the time of concentration of watersheds in a particular region ». *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137 (11): 712-19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000373](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000373).
- Sighomnou, Daniel, et Michel Desbordes. 1988. « Recherche d'un modèle de pluie adapté aux précipitations de la zone tropicale africaine ». *Hydrologie Continentale* 3 (2): 131-39. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:26518>.
- Silveira, André Luiz Lopes da. 2016. « Cumulative equations for continuous time Chicago hyetograph method ». *Brazilian Journal of Water Resources* 21 (3): 646-51. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011615094>.

- Sordo-ward, Álvaro, Paola Bianucci, D Ph, Luis Garrote, et Alfredo Granados. 2014. « How Safe is Hydrologic Infrastructure Design ? Analysis of Factors Affecting Extreme Flood Estimation ». *Journal of Hydrologic Engineering* 19 (12): 12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000981](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000981).
- T.Tyrrell, Patrick, et Victor R.Hasfurthur. 1983. « Design Rainfall Distributions for the State of Wyoming ». U. S. Department of the Interior. <http://library.wrds.uwyo.edu/wrp/83-08/83-08.html>.
- Terranova, O.G., et S.L. Gariano. 2014. « Rainstorms able to induce flash floods in a Mediterranean-climate region (Calabria, southern Italy) ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14 (9): 12. <https://nhess.copernicus.org/articles/14/2423/2014/>.
- Terstriep, Michael L, et John B Stall. 1974. « The Illinois Urban Drainage Area Simulator, ILLUDAS ». Illinois State Water Survey. <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/B/ISWSB-58.pdf>.
- USACE. 2000. *Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual*.
- USDA-NRCS. 2010. « Chapter 15: Time of Concentration ». In *National Engineering Handbook*, 1-29. <https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=27002.wba>.
- USSCS. 1986. « Urban Hydrology for Small Watersheds TR-55 ». USDA, NRCS. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf.
- Vandenberghe, S, N.E.C Verhoest, E Buyse, et B De Baets. 2010. « A stochastic design rainfall generator based on copulas and mass curves ». *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (12): 2429-42. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2429-2010>.
- Veneziano, Daniele, et Paolo Villani. 1999. « Best linear unbiased design hyetograph ». *Water Resources Research* 35 (9): 2725-38. <https://doi.org/10.1029/1999WR900156>.
- Wartalska, Katarzyna, Bartosz Kaźmierczak, Monika Nowakowska, et Andrzej Kotowski. 2020. « Analysis of Hyetographs for Drainage System Modeling ». *Water (Switzerland)* 12 (1): 21. <https://doi.org/10.3390/w12010149>.
- Watt, W.E, K.C.A Chow, W.D Hogg, et K.W Lathem. 1986. « A 1-h urban design storm for Canada ». *Canadian Journal of Civil Engineering* 13 (3): 293-300. <https://doi.org/10.1139/l86-041>.
- Westphal, Jerome A. 2004. « Chapter 4: Hydrology for drainage system design and analysis ». In *Stormwater collection systems design handbook*, 44. http://portal.unimap.edu.my/portal/page/portal30/Lecture_Notes/KEJURUTERAAN_BIOPROSES/Semester_2_Sidang_Akademik_20092010_BIOSYSTEM_ENGINEERING_PROGRAMME/ERT246_HYDROLOGY_AND_WATER_RESOURCES_ENGINEERING/Chap_4_hydrology.pdf.
- Williams-Sether, Tara, William H. Asquith, David B. Thompson, Theodore G. Cleveland, et Xing Fang. 2004. « Empirical, Dimensionless, Cumulative- Rainfall Hyetographs Developed From 1959-86 Storm Data for Selected Small Watersheds in Texas ». USGS. Vol. 5075. <https://pubs.usgs.gov/sir/2004/5075/pdf/sir2004-5075.pdf>.
- Wu, Shiang-jen, Jinn-Chuang Yang, et Yeou-Koung Tung. 2006. « Stochastic generation of hourly rainstorm events ». *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* · 21: 18. <https://doi.org/10.1007/s00477-006-0056-3>.

- Wu, Shiang Jen, Jinn Chuang Yang, et Yeou Koung Tung. 2006. « Identification and stochastic generation of representative rainfall temporal patterns in Hong Kong territory ». *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 20 (3): 171-83. <https://doi.org/10.1007/s00477-005-0245-5>.
- Xie, Y, B Liu, et M A Nearing. 2002. « Practical thresholds for separating erosive and non-erosive storms ». *American Society of Agricultural Engineers* 45 (6): 1843-47. <https://pubag.nal.usda.gov/download/7025/PDF>.
- Xie, Y, et M A Nearing. 2016. « Intra-storm temporal patterns of rainfall in china using huff curves ». *ASABE* 59 (6): 1619-32. <https://doi.org/10.13031/trans.59.11010>.
- Yang, Liping, Xingmin Meng, et Xiaoqiang Zhang. 2011. « SRTM DEM and its application advances ». *International Journal of Remote Sensing* 32 (14): 3875-96. <https://doi.org/10.1080/01431161003786016>.
- Yen, BC, et VT Chow. 1983. « Local Design Storm - Methodology and analysis. Report ». FHWA. Vol. VII. Washington, DC, USA. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/41864>.
- Yu, Shaw L, A Hamilton, Charles E Kent, et G Mcgee. 1984. « Temporal distribution of rainfall in Virginia ». *Virginia Highway & Transportation Research Council*. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/19096>.
- Zahraoui, Mohamed. 1994. « Le Dévonien inférieur et moyen ». *Bulletin de l'Institut Scientifique de Rabat* 18: 43-56.

ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1: Pluies instantanées disponibles dans la zone d'étude.....	164
Annexe 2: Détail du contrôle de la qualité des pluies instantanées.....	165
Annexe 3: Analyse de lame d'eau moyenne par poste relatives aux averses retenues.....	207
Annexe 4: Caractéristiques des bassins versants étudiés	210
Annexe 5: Temps de concentration des bassins versant étudiés.....	216
Annexe 6: Résultats de simulations hydrologiques pour les conditions d'humidité II et I	224
Annexe 7: Articles scientifiques publiés.....	233

Annexe 1: Pluies instantanées disponibles dans la zone d'étude

Tableau 20: Données des pluies instantanées collectées au niveau de la zone d'étude (Source : ABHBC)

Numéro	Poste	Elévation (mNGM)	Longitude (degrés, minutes et seconds)	Latitude (degrés, minutes et seconds)	Situation Pi		I* (ans)
					Date début	date fin	
1	<u>Aguibat Ezziar</u>	130	6° 32' 25.30"	33° 54' 35.98"	21/07/2009	19/07/2016	7
2	<u>Ain Loudah</u>	273	6° 45' 35.95"	33° 33' 20.61"	27/06/2009	19/07/2016	7
3	<u>Bge SMBA</u>	15	6° 45' 6.08"	33° 56' 34.10"	14/07/2009	18/07/2016	7
4	<u>Cheikh Reguig</u>	61	6° 57' 35.80"	33° 51' 0.32"	11/07/2009	18/07/2016	7
5	<u>Feddan Taba</u>	120	7° 11' 34.19"	33° 34' 6.70"	05/06/2009	18/07/2016	7
6	<u>Lalla Chafia</u>	227	6° 23' 19.05"	33° 42' 22.37"	10/07/2009	18/07/2016	7
7	<u>Ouljet Habboub</u>	552	6° 15' 18.84"	33° 6' 21.54"	01/03/2012	19/06/2016	4
8	<u>Ras El Fathia</u>	161	6° 32' 28.40"	33° 45' 37.47"	04/08/2009	18/07/2016	7
9	<u>Roumani</u>	322	6° 36' 13.55"	33° 31' 55.60"	30/06/2009	18/07/2016	7
10	<u>Sidi Amar</u>	269	6° 12' 26.86"	33° 37' 22.81"	13/08/2009	25/05/2016	7
11	<u>Sidi Jabeur</u>	232	6° 25' 43.92"	33° 34' 48.22"	15/07/2009	18/07/2016	7
12	<u>Sidi Md Cherif</u>	299	6° 37' 47.97"	33° 32' 51.54"	10/07/2009	19/07/2016	7
13	<u>Skhirate</u>	85	7° 3' 37.82"	33° 48' 18.55"	27/06/2009	19/07/2016	7
14	<u>Tamdrost</u>	312	7° 32' 56.59"	33° 4' 42.59"	25/06/2009	19/07/2016	7
15	<u>Tsalat</u>	692	6° 1' 50.58"	33° 19' 57.63"	26/07/2009	19/07/2016	7
16	<u>Melilla 1</u>	198	7° 9' 31.86"	33° 22' 39.89"	16/07/2014	18/07/2016	2
17	Mohammedia	12	7° 24' 36.78"	33° 41' 6.69"	23/06/2009	04/06/2016	7
18	Oued Bouskoura	134	7° 38' 21.28"	33° 29' 6.71"	01/09/2014	18/07/2016	2
19	Oued Merzeg	55	7° 47' 16.59"	33° 30' 24.37"	14/10/2014	18/07/2016	2
20	<u>Oulad Mhamed</u>	575	6° 57' 0.07"	33° 4' 49.92"	09/06/2009	18/07/2016	7
21	Tighaza	1134	5° 38' 20.20"	33° 11' 2.35"	30/08/2014	16/06/2016	2
22	Bge Aricha	596	7° 7' 10.78"	33° 5' 25.45"	15/06/2009	21/01/2014	5
23	Bge Zamrine	708	6° 49' 49.65"	32° 59' 43.71"	05/06/2009	18/07/2016	7
24	Barrage Hassar	94	7° 26' 6.99"	33° 34' 47.79"	23/06/2009	18/07/2016	7
25	Barrage El Himmer	415	7° 20' 55.29"	33° 6' 33.86"	17/06/2009	20/06/2015	6
26	<u>Bge Mazer</u>	334	7° 27' 56.88"	33° 06' 41.77"	16/06/2009	19/07/2016	7
27	<u>El Gara</u>	328	7° 14' 24.99"	33° 16' 30.50"	08/06/2009	22/10/2014	5

Numéro	Poste	Elévation (mNGM)	Longitude (degrés, minutes et seconds)	Latitude (degrés, minutes et seconds)	Situation Pi		I* (ans)
					Date début	date fin	
I* (ans) longueur de la série des pluies instantanées (ans) ; <u>X</u> : Poste disposant également des enregistrements des pluies journalières (Tableau 8).							

Annexe 2: Détail du contrôle de la qualité des pluies instantanées

Cette annexe présente les analyses relatives au contrôle de la qualité des données collectées auprès de l'ABHBC. Elle synthétise les données utilisées et les principales conclusions retenues pour chacun des postes pluviométriques automatiques.

Les abréviations utilisées dans les paragraphes suivants sont récapitulées comme suit :

- Cumul Pj : Le cumul des pluies journalières ;
- Cumul Pj(Pi) : Le cumul des pluies journalières calculées à partir des cumuls des pluies instantanées ;
- Cumul Pjc(Pi) : Le cumul des pluies journalières calculées à partir des cumuls des pluies instantanées corrigées à l'aide d'un coefficient correcteur (voir les paragraphes suivants) ;
- P.Annuelle (Pj) : La pluie annuelle calculée à partir des pluies journalières disponibles au niveau du pluviomètre situé au même poste que le pluviomètre automatique ;
- P.Annuelle (Pi) : La pluie annuelle calculée à partir des pluies instantanées disponibles au niveau du pluviomètre automatique ;
- Ratio : c'est le rapport (P.Annuelle (Pi) / P.Annuelle (Pj)) ;
- % données Pi disponibles : Le pourcentage annuel des pluies instantanées disponibles (enregistrées) au niveau du pluviomètre automatique.

1- Poste Aguibat Ezziar

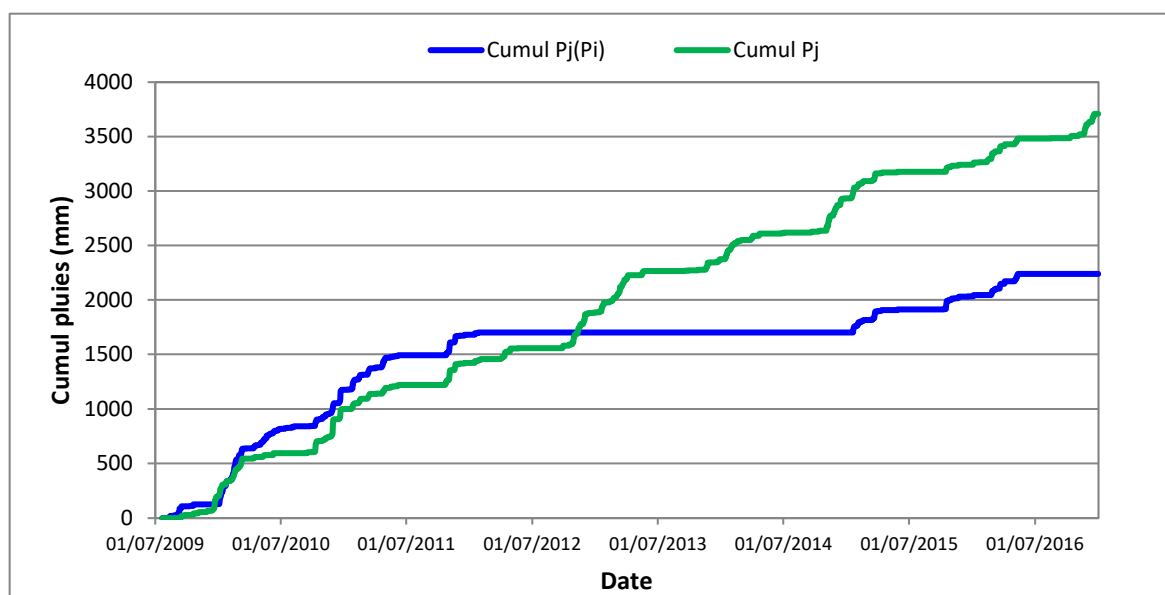


Figure 66: Analyse graphique des données pluviométriques -Poste Aguibat Ezziar

Tableau 21: Résultats de l'analyse des pluies -Poste Aguibat Ezziar

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	819.00	595.00	1.38	57%
2010-2011	649.80	623.20	1.04	73%
2011-2012	208.80	339.50	0.62	17%
2012-2013	0.00	707.50	0.00	0%
2013-2014	0.00	351.70	0.00	0%
2014-2015	213.20	558.40	0.38	61%
2015-2016	326.20	308.50	1.06	74%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Aguibat Ezziar.

Au niveau du pluviomètre automatique Aguibat Ezziar, il ressort de l'analyse globale des données pluviométriques instantanées collectées que :

- Les pluies instantanées enregistrées suivent la même tendance que les pluies journalières enregistrées dans le même poste ;

- Les années 2012/2013 et 2013/2014 sont marquées par un manque total des enregistrements Pi.
- Globalement, les écarts entre les données instantanées et les pluies journalières varient de 60% pour l'année 2014/15 à 4% pour l'an 2010/2011.
- Pour certaines années, un manque important des données instantanées est noté au niveau du poste Aguibat Ezziar. En effet :
 - o 17 % seulement des données sont disponibles pour l'année 2011/2012 ;
 - o Les enregistrements instantanés pour les années 2012/13 et 2013/14 sont complètement manquants.

Pour le reste de la période d'analyse environ 60% des données sont disponibles.

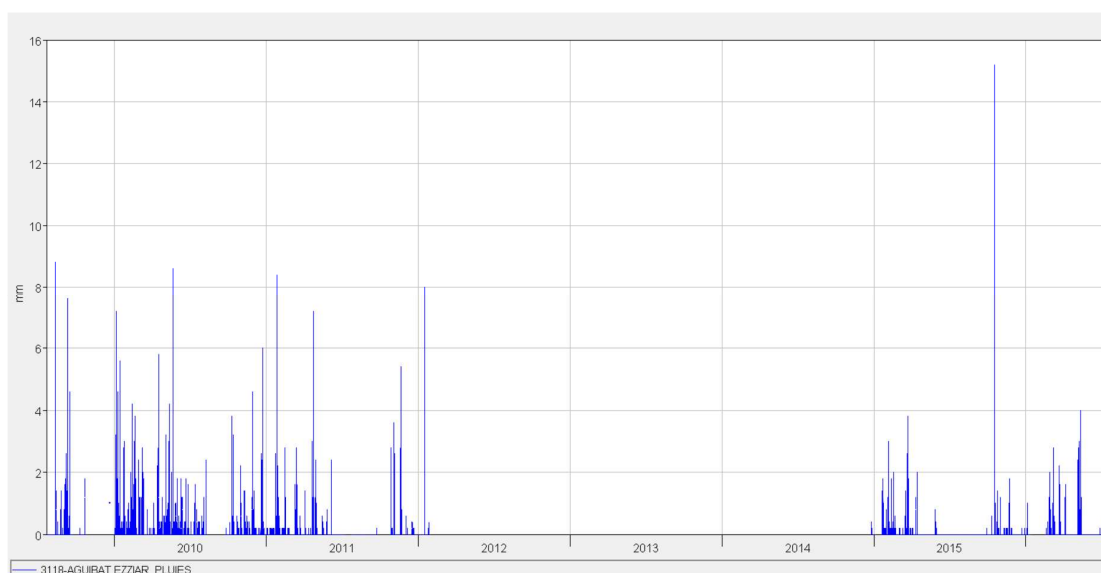


Figure 67 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Aguibat Ezziar

2- Poste Ain Louddah

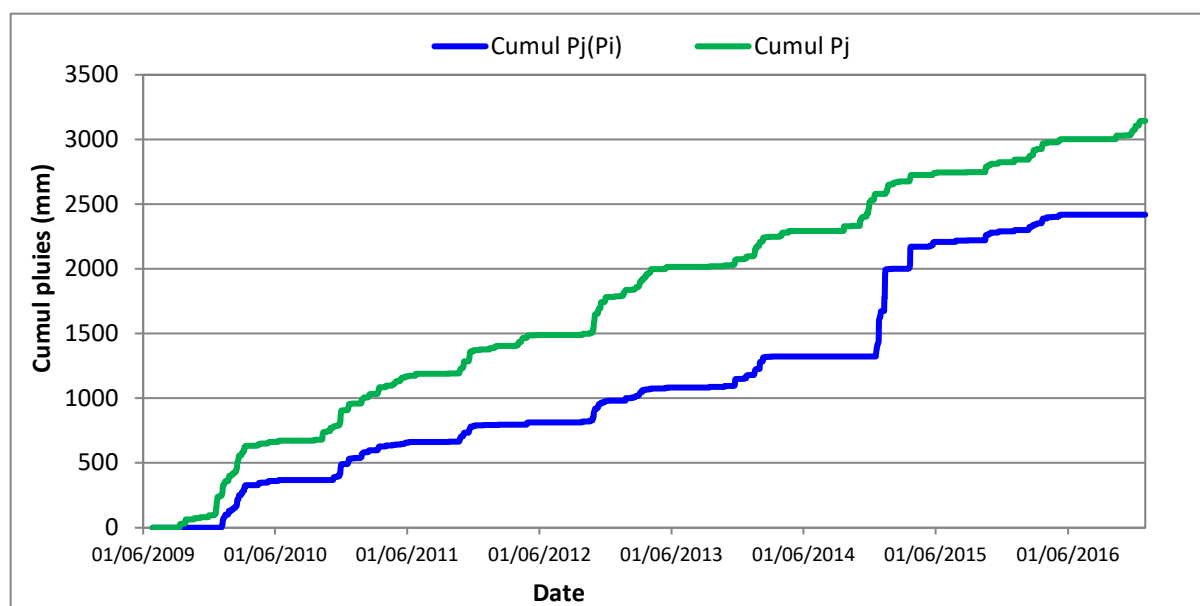


Figure 68: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ain Louddah

Tableau 22: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ain Louddah

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	367.20	671.80	0.55	69%
2010-2011	295.40	517.30	0.57	55%
2011-2012	149.60	298.50	0.50	46%
2012-2013	270.50	528.00	0.51	43%
2013-2014	239.80	275.30	0.87	9%
2014-2015	897.40	456.20	1.97	56%
2015-2016	200.00	254.20	0.79	80%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Ain Louddah.

Au niveau du poste Ain Louddah, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les observations suivantes :

- Le pourcentage des données disponibles est variable :
 - o 40% à 50% pour les années 2010/11, 2011/12, 2012/13 et 2014/15 ;

- o 10% pour l'année 2013/2014. Quoique cette année présente le manque de données le plus important, une bonne compatibilité des données instantanées et journalières est marquée, ceci est dû à la disponibilité des données lors des événements pluvieux ;
- o 80% pour l'année hydrologique 2015/2016.
- Certaines valeurs enregistrées dépassent les valeurs fortes dans la zone notamment aux mois de Janvier 2014, Décembre 2014, Janvier 2015 et Mars 2015. Elles présentent un écart important avec les pluies journalières enregistrées au niveau du même poste. Ainsi, ces valeurs ont été écartées.

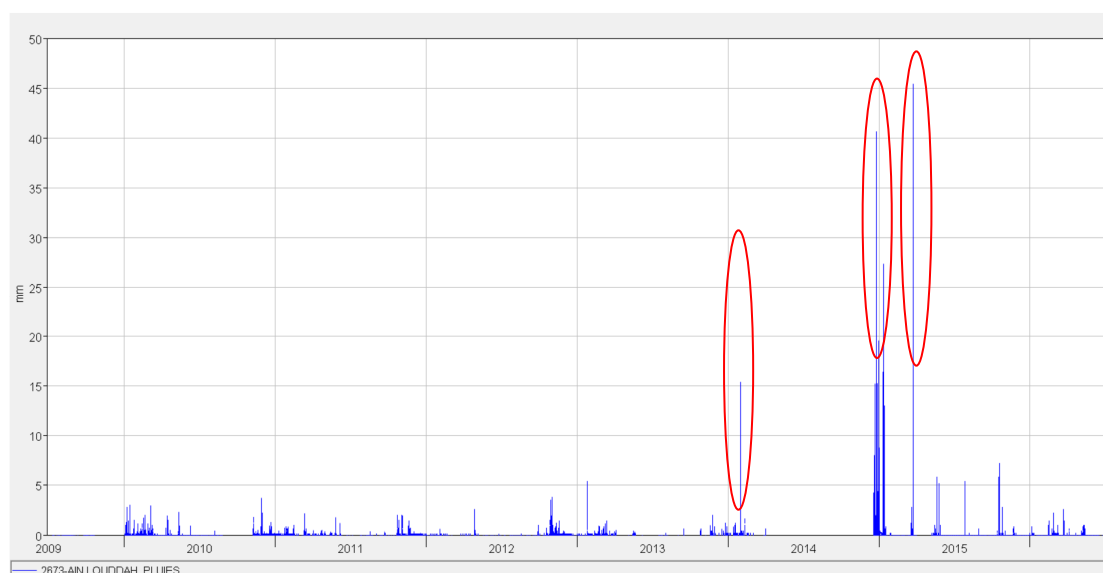


Figure 69 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Ain Louddah

3- Poste Cheikh Reguigu

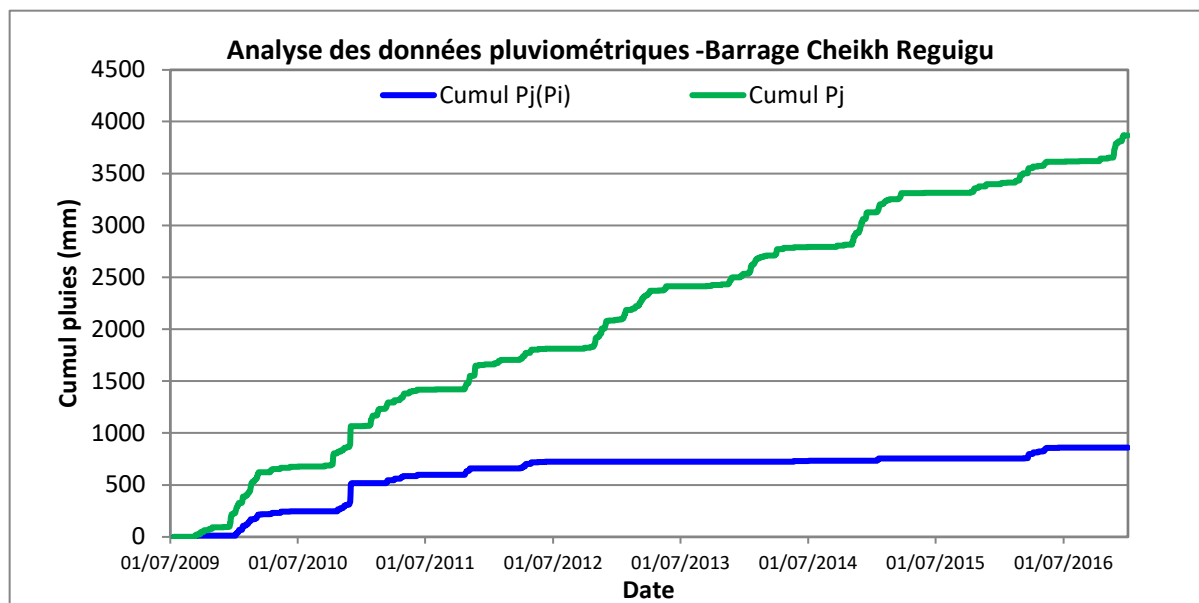


Figure 70: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Cheikh Reguigu

Tableau 23: Résultats de l'analyse des pluies -poste Cheikh Reguigu

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	246.20	677.60	0.36	38%
2010-2011	348.20	864.30	0.40	35%
2011-2012	125.60	391.40	0.32	31%
2012-2013	0.00	607.80	0.00	0%
2013-2014	10.20	378.80	0.03	25%
2014-2015	23.20	522.10	0.04	5%
2015-2016	104.80	305.00	0.34	33%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Cheikh Reguigu.

Les graphes et le tableau précédents montrent que :

- Le pourcentage des valeurs manquantes des enregistrements des pluies instantanés au niveau du poste Cheikh Reguigu est important, notamment à partir de novembre 2010. Elle varie entre 100% (2012/13) et 40% pour les années 2009/10, 2010/11 et 2015/16 ;
- Les valeurs des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.

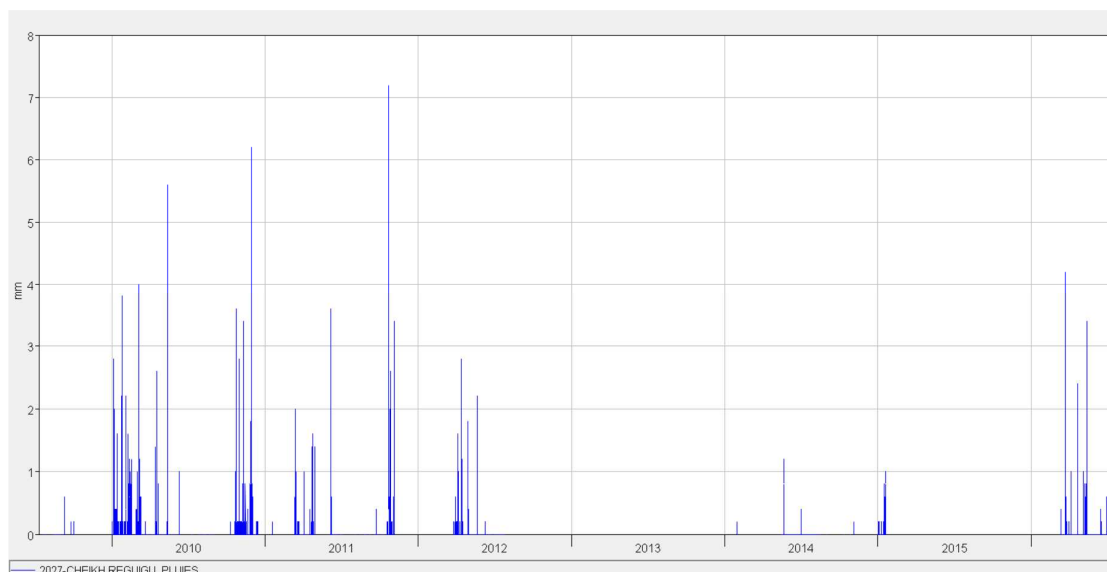


Figure 71 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Cheikh Reguigu

4- Poste Feddan Taba

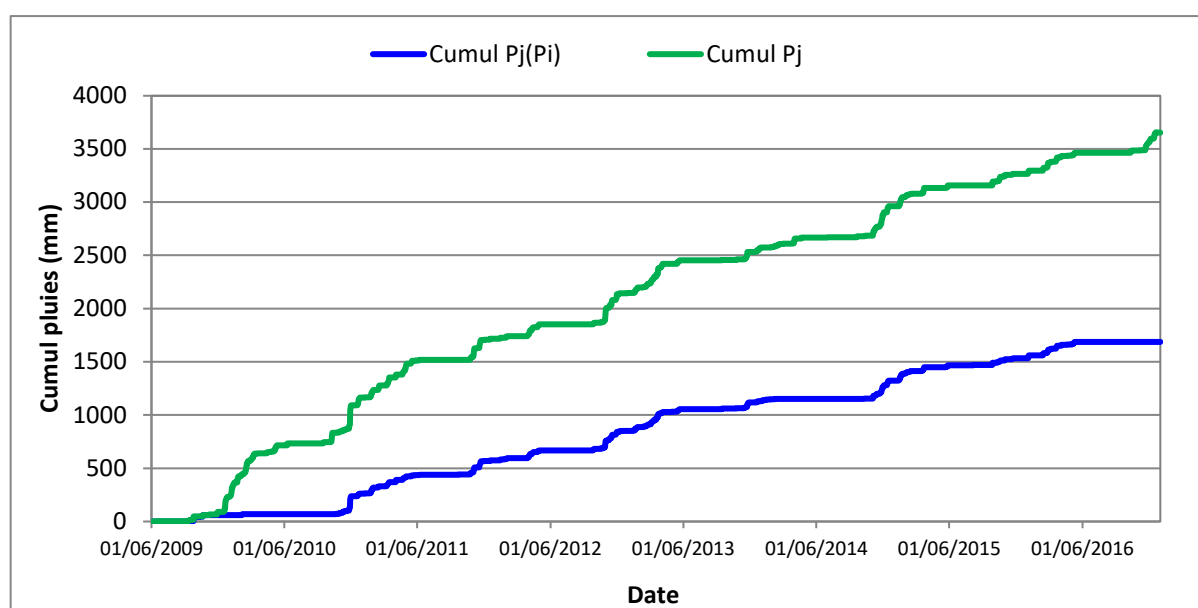


Figure 72: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Feddan Taba

Tableau 24: Résultats de l'analyse des pluies -poste Feddan Taba

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	68.20	680.40	0.10	76%
2010-2011	369.30	790.30	0.47	87%
2011-2012	228.00	333.90	0.68	95%
2012-2013	389.20	601.10	0.65	96%

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2013-2014	96.40	319.90	0.30	58%
2014-2015	316.60	489.00	0.65	84%
2015-2016	217.50	306.70	0.71	83%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Feddan Taba.

Au niveau du poste Feddan Taba, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les observations suivantes :

- Le pourcentage des données disponibles varie entre 58% et 96% à l'exception de l'année hydrologique 2009-2010 marquée par un manque important des enregistrements des pluies instantanées.
- Les écarts observés entre les données instantanées et journalières sont de l'ordre de 50%.

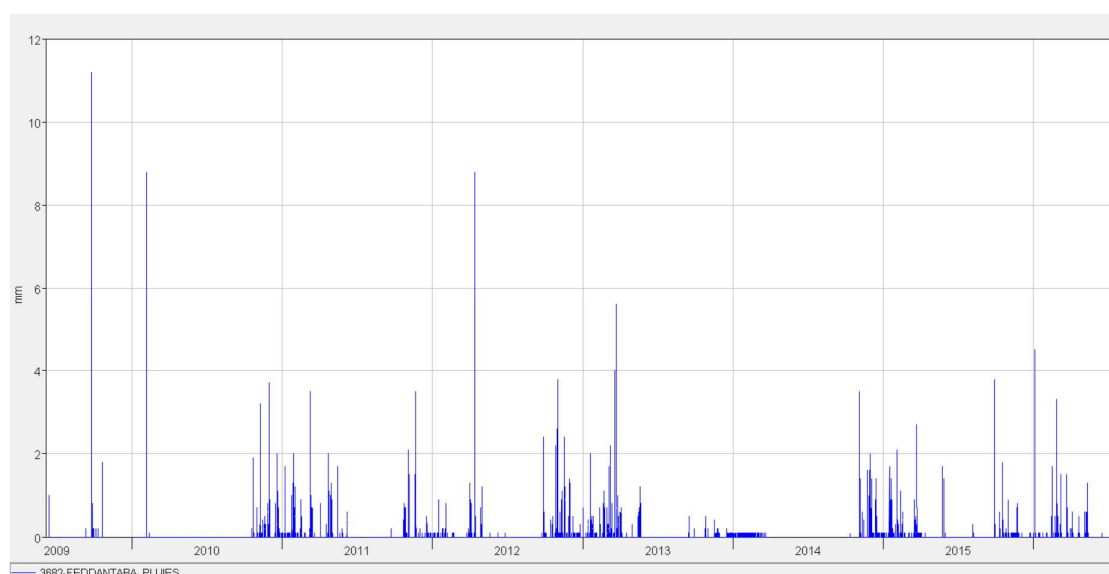


Figure 73 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Feddan Taba

Le ratio moyenne entre la pluie annuelle mesurée au niveau du pluviomètre (P. annuelle (Pj)) et celle enregistrée dans le pluviomètre automatique (P. annuelle (Pi)) est de l'ordre de 1.9. L'utilisation de ce dernier comme un coefficient correcteur des pluies journalières calculée à partir des pluies instantanées montre une bonne tendance entre les pluies journalières et instantanées (corrigée) du poste Feddan Taba comme le montre le graphe suivant.

Dès lors, les pluies instantanées du poste Feddan Taba peuvent être retenues afin de représenter la forme adimensionnelle des pluies au niveau du poste.

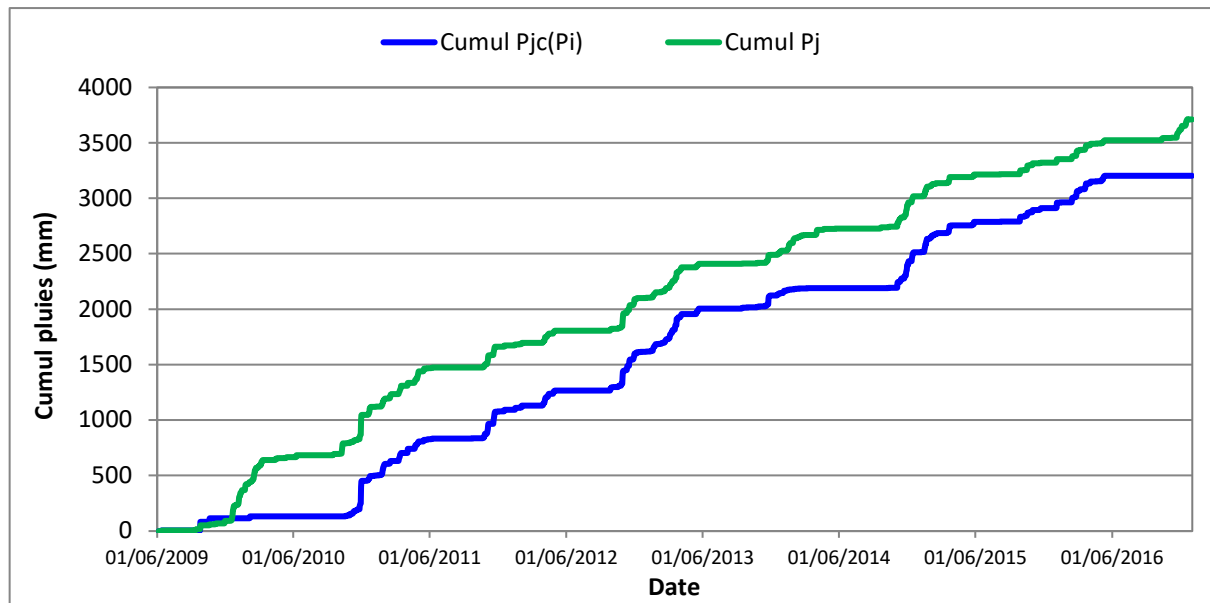


Figure 74 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Feddan Taba

5- Poste Lalla Chafia

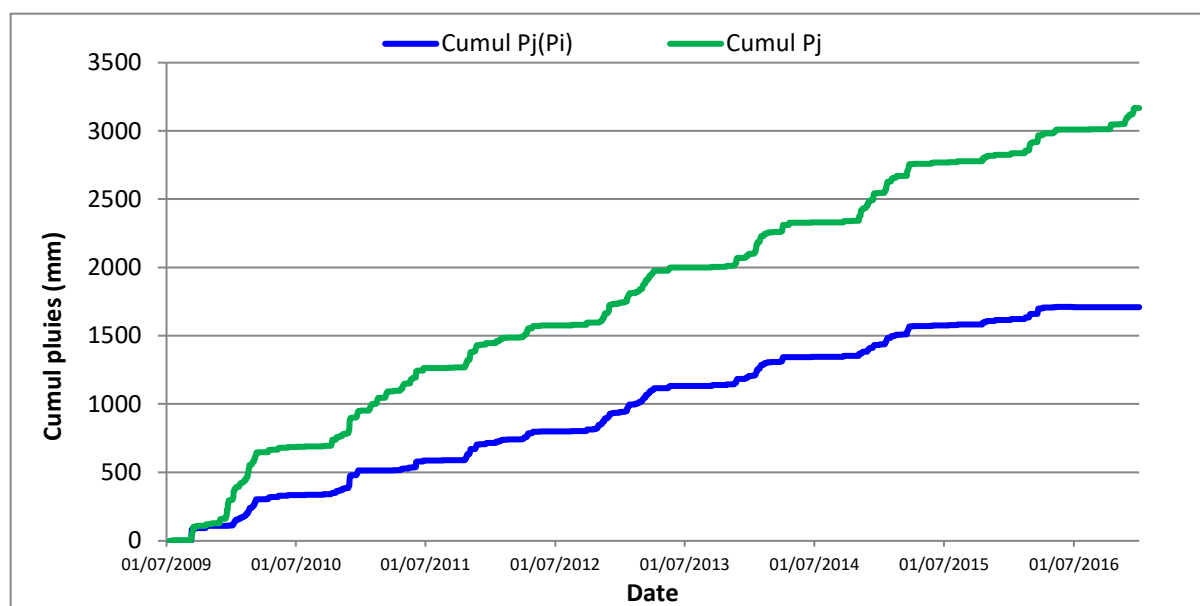


Figure 75: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Lalla Chafia

Tableau 25: Résultats de l'analyse des pluies -poste Lalla Chafia

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	334.70	689.80	0.49	67%
2010-2011	253.20	578.50	0.44	90%
2011-2012	214.60	315.80	0.68	91%
2012-2013	330.70	527.80	0.63	94%
2013-2014	212.10	331.60	0.64	94%
2014-2015	236.90	447.70	0.53	83%
2015-2016	128.30	234.60	0.55	78%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Lalla Chafia.

Au niveau du poste Lalla Chafia, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les remarques suivantes :

- Les écarts observés entre les données instantanées et journalières varient entre 56% et 37% ;
- Le pourcentage des données disponible est relativement important : entre 67% et 94%.

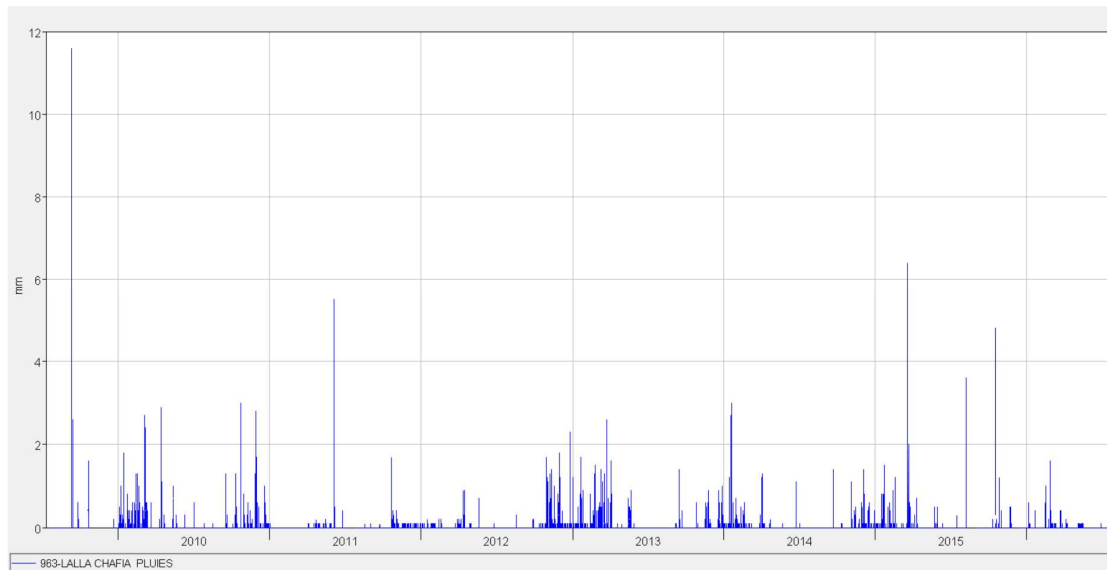


Figure 76 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Lalla Chafia

Globalement le poste présente une bonne tendance entre les données instantanées et journalières. Ce constat est appuyé par le graphe suivant représentant le cumul des pluies instantanées corrigées (coefficient correcteur =1.8) et le cumul des pluies journalières.

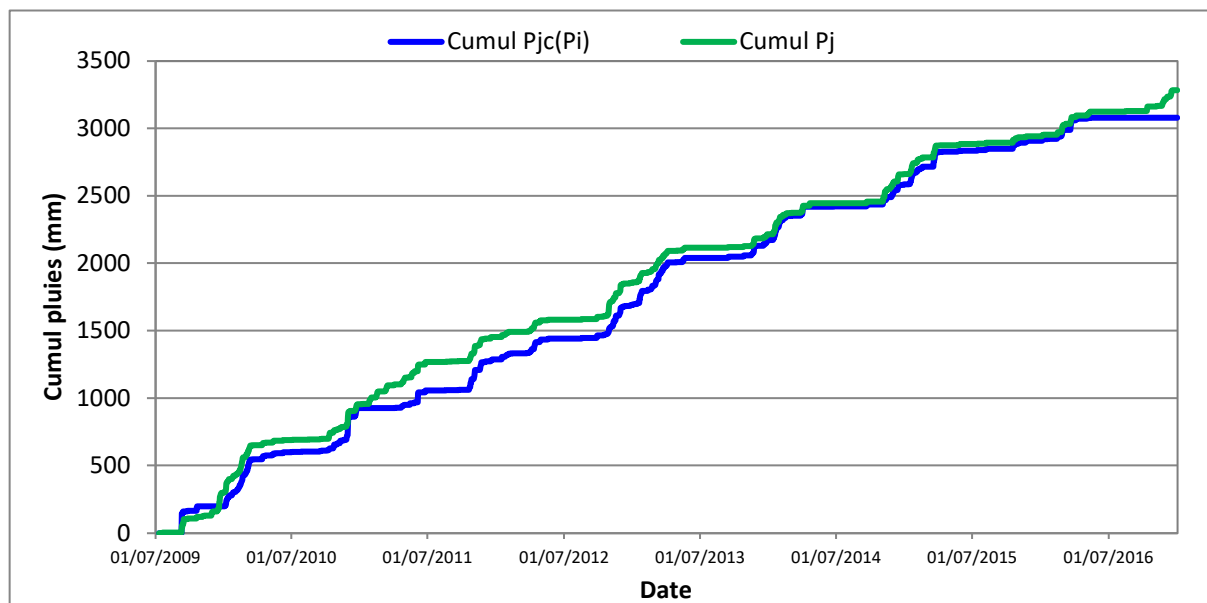


Figure 77 : Confrontation des pluies instantanées corrigées et des pluies journalières – pluviomètre automatique Lalla Chafia

6- Poste Ouljet Habboub

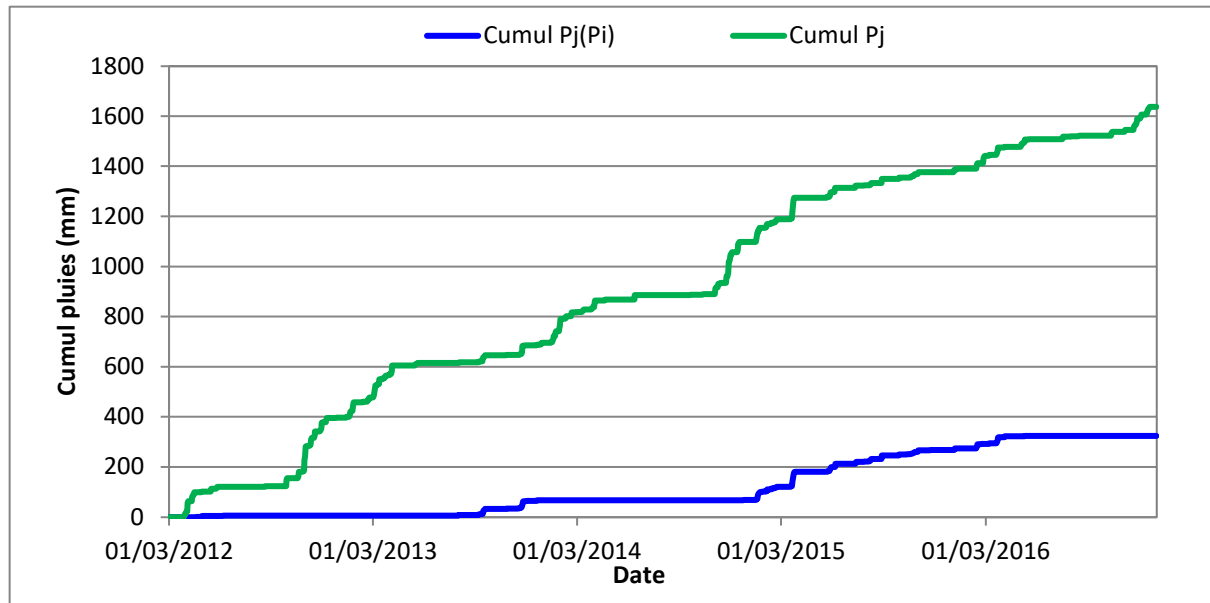


Figure 78: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ouljet Habboub

Tableau 26: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ouljet Habboub

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2011-2012	5.50	122.70	0.04	26%
2012-2013	2.80	494.50	0.01	16%
2013-2014	58.70	268.30	0.22	31%
2014-2015	179.30	464.50	0.39	54%
2015-2016	77.90	171.70	0.45	68%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Ouljet Habboub.

L'analyse effectuée ci-avant montre :

- Un manque important des enregistrements du pluviographe automatique Ouljet Habboub, notamment sur la période 2011-2014. Le taux de disponibilité des données varie entre 15% et 70% environ ;
- Une bonne tendance entre les pluies instantanées disponibles et les pluies journalières au niveau des périodes communes.

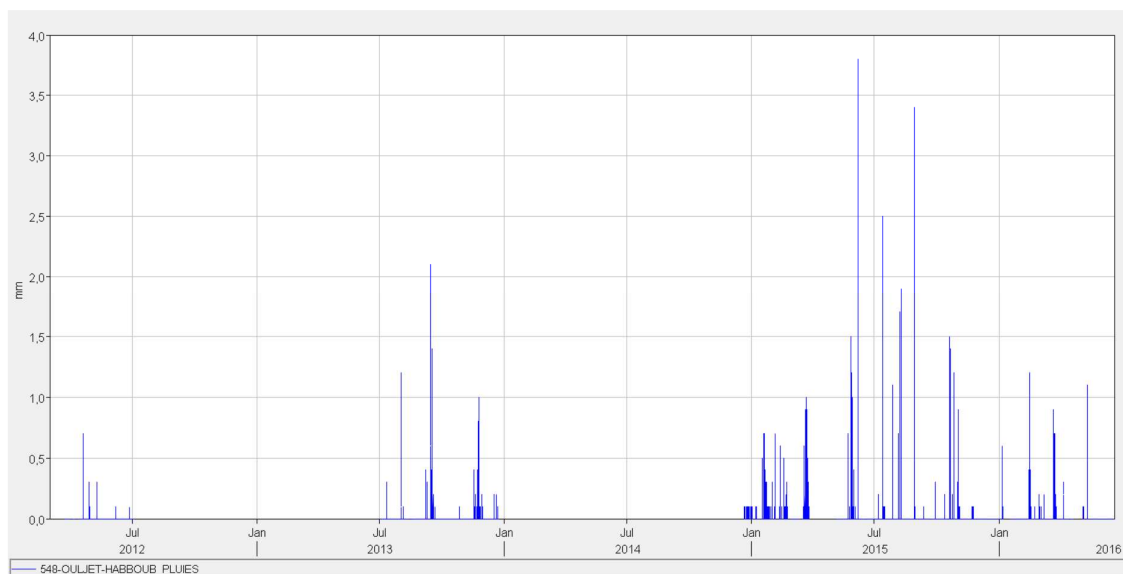


Figure 79 : Pluies instantanées – pluviomètre automatique Ouljet Habboub

7- Poste Ras El Fathia

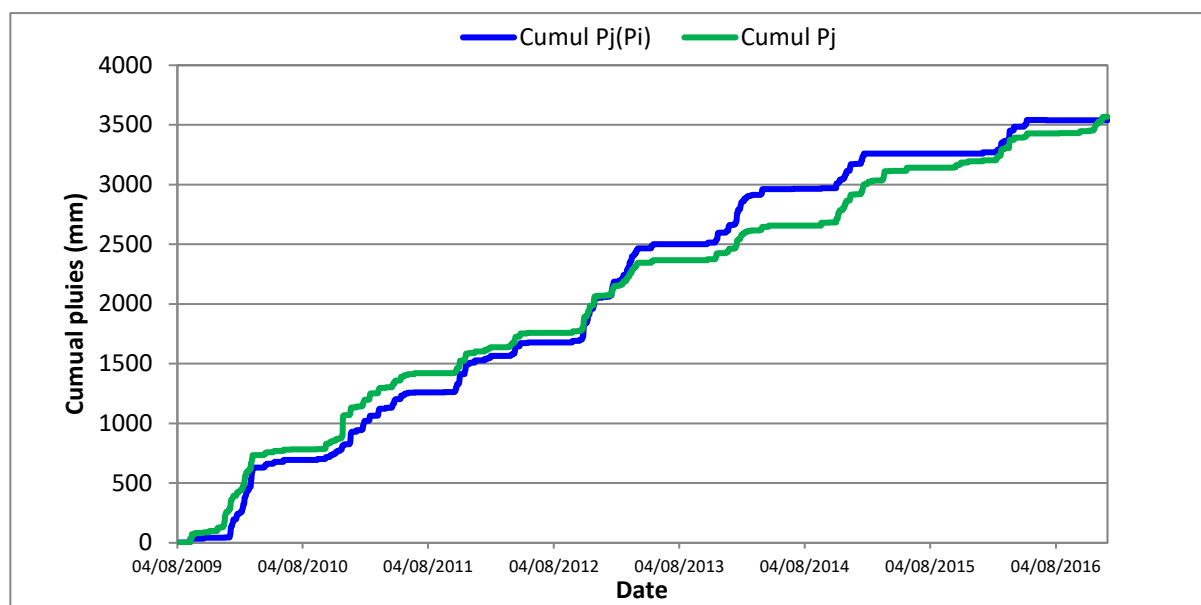


Figure 80: Analyse graphique des données pluviométriques -poste Ras El Fathia

Tableau 27: Résultats de l'analyse des pluies -poste Ras El Fathia

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	693.40	780.70	0.89	67%
2010-2011	693.40	639.90	0.89	85%
2011-2012	416.40	337.40	1.23	89%
2012-2013	824.20	608.20	1.36	92%

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2013-2014	462.80	289.70	1.60	82%
2014-2015	295.80	485.80	0.61	31%
2015-2016	282.00	288.50	0.98	50%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Ras El Fathia.

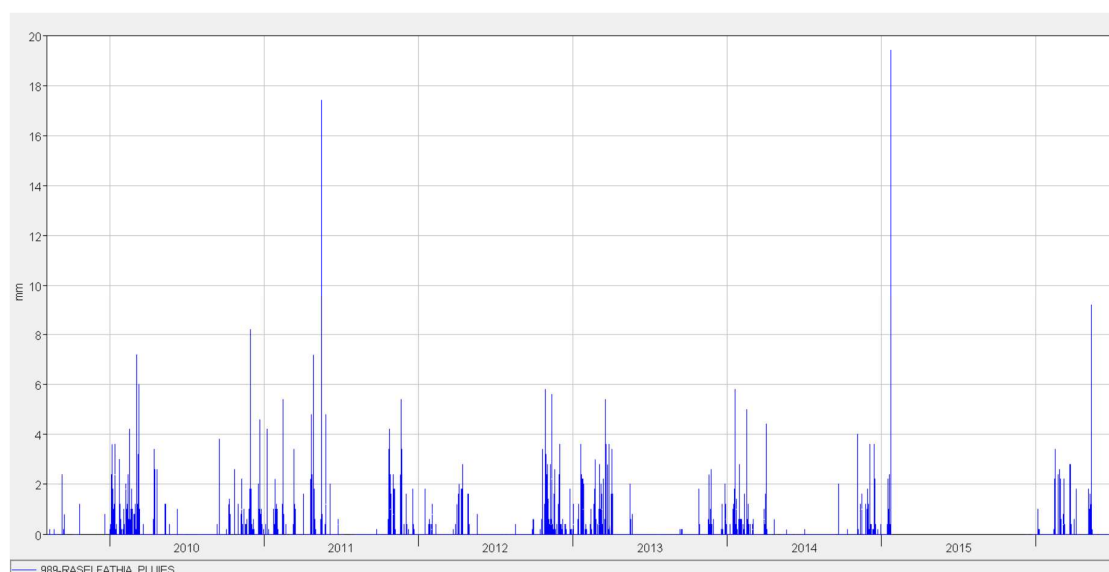


Figure 81 : Pluies instantanées –pluviomètre automatique Ras El Fathia

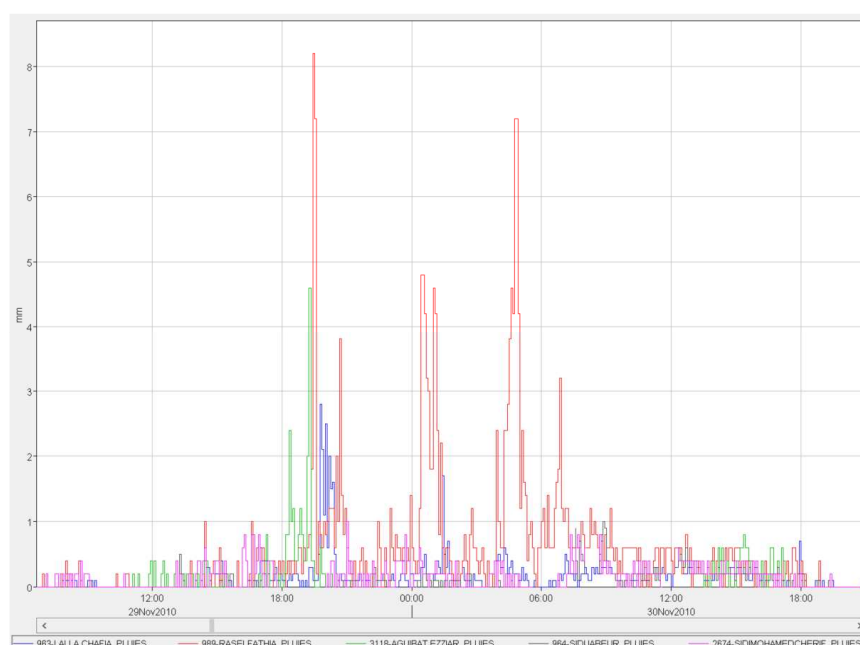


Figure 82 : Pluies instantanées (événement du fin Novembre 2010) –pluviomètre automatique Ras El Fathia (en rouge)

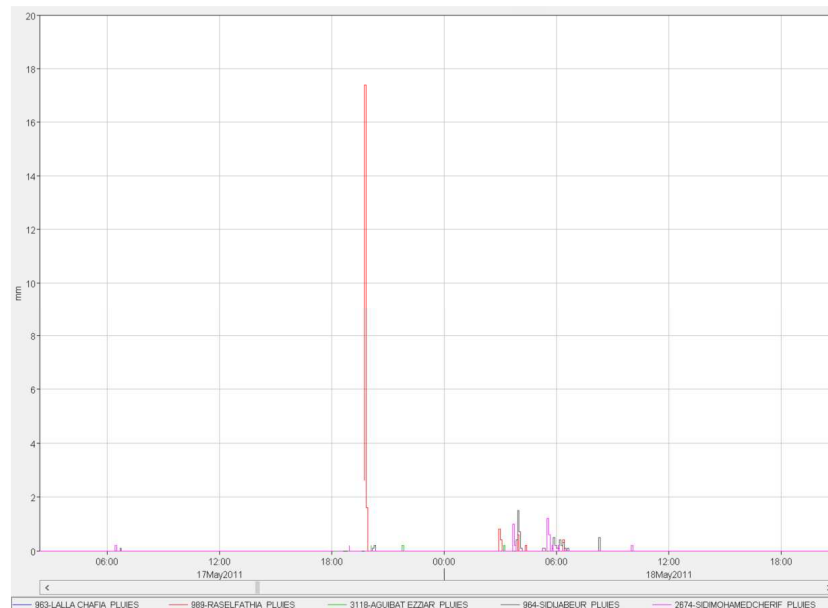


Figure 83 : Pluies instantanées (événement du 17 Mai 2011) - pluviomètre automatique Ras El Fathia

Au niveau du poste Ras El Fathia, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les remarques suivantes :

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone ;
- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie entre 30% (année 2014/15) et 90% pour la période 2011-2013 ;
- Les écarts observés entre les données instantanées et journalières varient entre +60% et -10%.
- Comme illustré dans le graphique ci-dessus, les cumuls instantanés dépassent les cumuls journaliers. Ceci peut être expliqué par des éventuels mouvements du l'auget basculeur par effet de vent ou un problème d'étalonnage ;
- Globalement le poste présente a une bonne compatibilité entre les données Pi et Pj et ce, pour la période 2009-2014 ;
- L'analyse de pluies instantanées montre que les enregistrements des événements du fin novembre 2010 et du 17 Mai 2011 sont douteux en comparaison avec les pluies instantanées des pluviomètres les plus proches.

En outre, pour l'événement du fin Novembre 2010, la comparaison des pluies instantanées et journalières au niveau du même poste montre un écart important comme le montre le tableau suivant :

Tableau 28: Comparaison des Pj et des Pi - poste Ras El Fathia (Evénement de fin novembre 2010)

Date	Pj (mm)	Cumul Pi en 24h (mm)
28/11/2010	3.8	5.8
29/11/2010	127.7	189
30/11/2010	36.9	58

Ainsi, les deux événements ont été écartés.

8- Poste Roumani

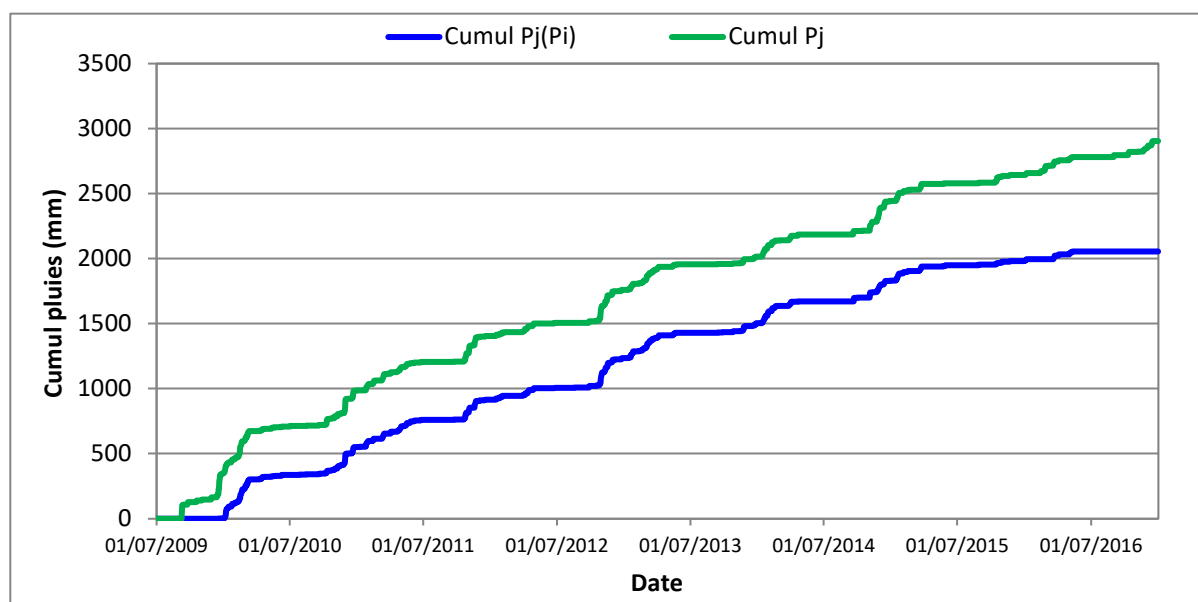


Figure 84: analyse graphique des données pluviométriques -poste Roumani

Tableau 29: Résultats de l'analyse des pluies - poste Roumani

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	339.40	714.40	0.48	74%
2010-2011	420.00	491.40	0.85	91%
2011-2012	247.40	299.10	0.83	92%
2012-2013	421.80	450.20	0.94	96%
2013-2014	242.40	230.20	1.05	97%

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2014-2015	282.80	399.10	0.71	92%
2015-2016	100.80	198.2	0.51	68%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Roumani.

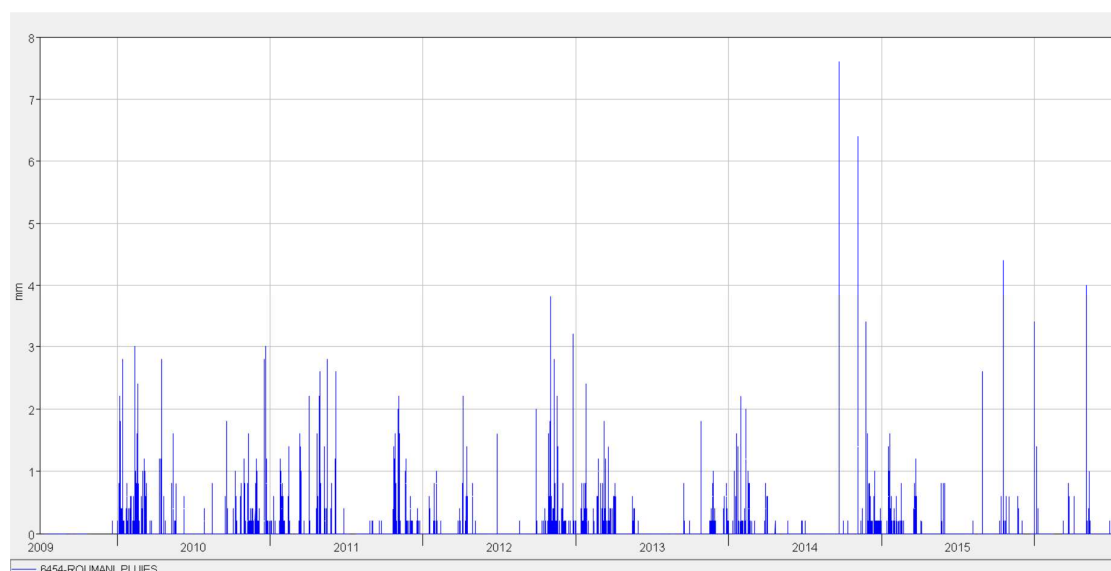


Figure 85 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Roumani

Au niveau du poste Roumani, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les remarques suivantes :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles est relativement bon. Il varie entre 74% et 97% ;
- Globalement le poste présente une bonne compatibilité entre les données des Pi et des Pj, et ce, pour les périodes communes entre les Pi et les Pj disponibles ;
- L'écart maximal entre les données instantanées et journalières a été enregistré lors de l'année 2009. Ceci résulte du manque des enregistrements des Pi ;
- Pour la période 2010-2015, l'écart entre les enregistrements instantanés et journaliers ne dépasse pas 32%, correspondant à l'année 2015-2016, qui peut être justifié par le manque de certains enregistrements des Pi.

9- Poste Sidi Amar

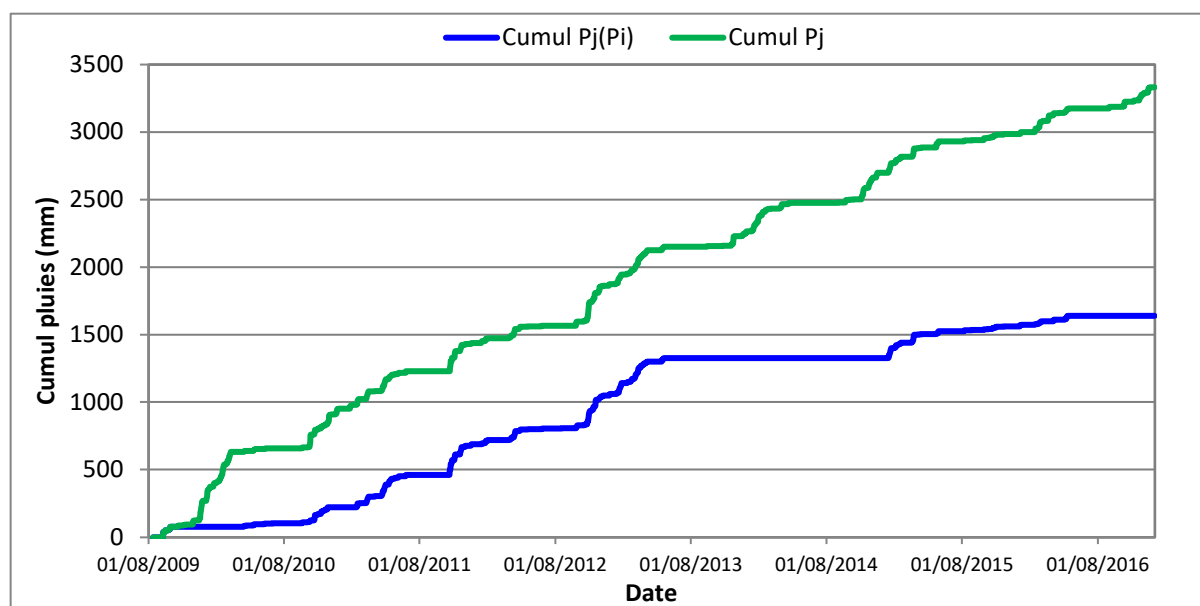


Figure 86: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Amar

Tableau 30: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Amar

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	103.40	657.70	0.16	52%
2010-2011	358.40	571.70	0.63	71%
2011-2012	343.90	335.70	1.02	95%
2012-2013	519.60	585.90	0.89	69%
2013-2014	0.00	325.00	0.00	0%
2014-2015	208.40	463.50	0.45	66%
2015-2016	106.40	235.70	0.45	70%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Sidi Amar.

Au niveau du poste Sidi Amar, l'analyse des données pluviométriques a permis de conclure que :

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone ;

- A part l'année 2013/2014 où le pluviomètre automatique n'a pas fonctionné, globalement le pourcentage des données instantanées disponibles varie entre 52% et 95% ;
- Pour l'année hydrologique 2009-2010, l'écart entre les données instantanées et journalières est important (84%) compte tenu du pourcentage des enregistrements disponibles (50%). Ceci est expliqué par la concentration des manques d'enregistrement lors des périodes pluvieuses.
- Généralement, le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées et journalières avec un écart maximal annuel évalué à 37% pour la période 2010/2013 et correspondant à un pourcentage des données instantanées disponibles de 69%, ce qui justifie les écarts soulevés.

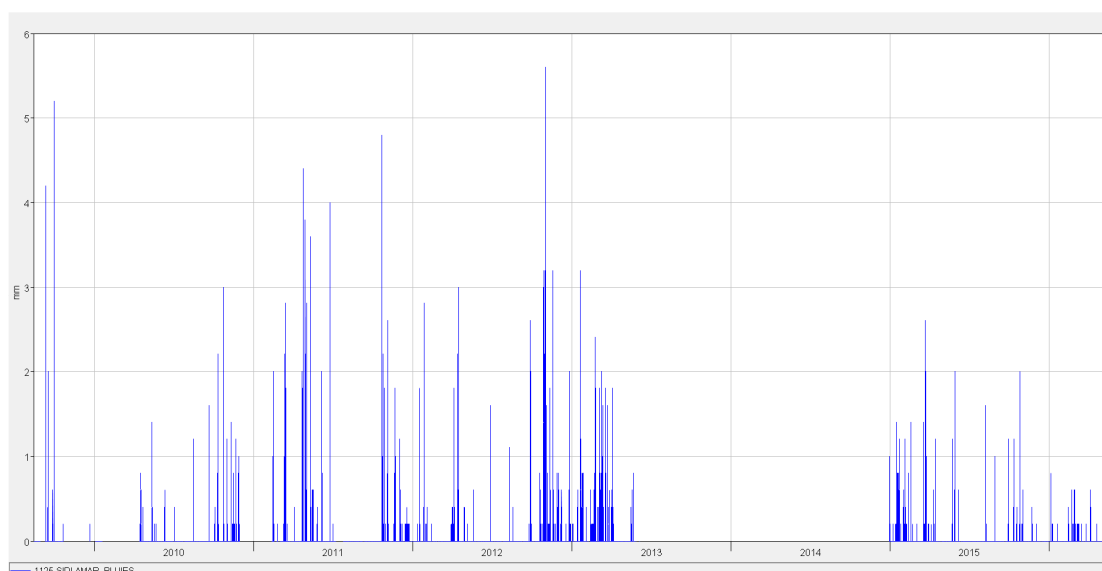


Figure 87 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Amar

10- Poste Sidi Jabeur

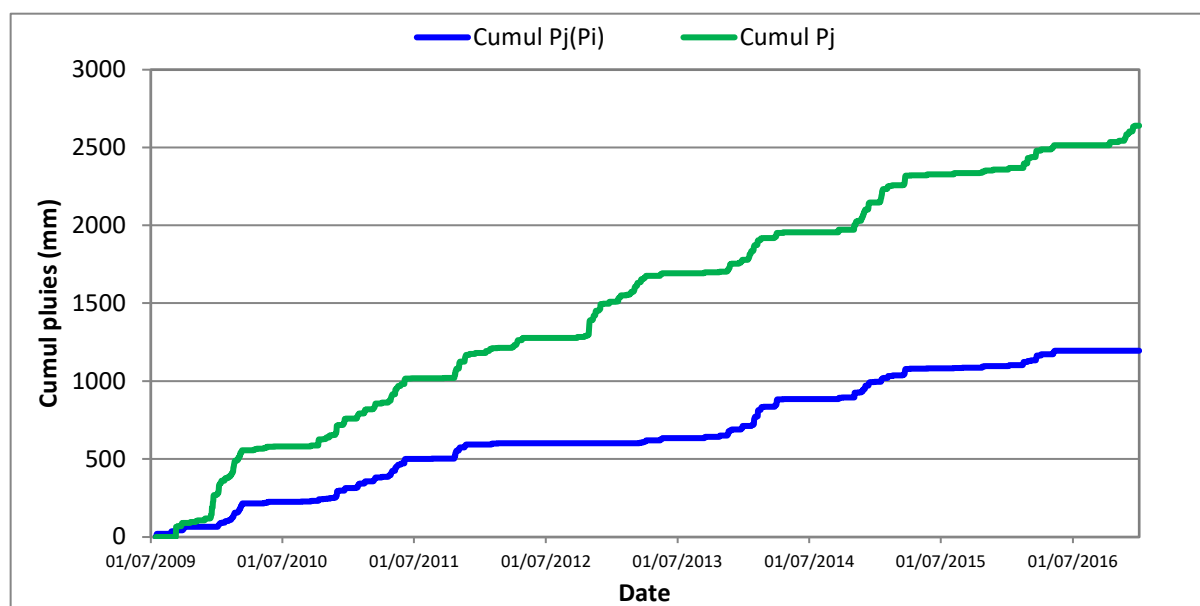


Figure 88: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Jabeur

Tableau 31: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Jabeur

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	190.80	580.80	0.33	52%
2010-2011	274.90	437.70	0.63	76%
2011-2012	98.20	259.30	0.38	39%
2012-2013	33.40	414.70	0.08	35%
2013-2014	250.60	262.30	0.96	67%
2014-2015	200.60	379.20	0.53	60%
2015-2016	109.80	180.20	0.61	62%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Sidi Jabeur.

Il en ressort de l'analyse des données ci-dessus que:

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone ;
- Le pourcentage des données instantanées disponibles est moyen, il varie entre 35% (année 2012/2013) et 75% (2010/2011) ;

- L'écart entre les données instantanées et journalières est compatible avec le pourcentage des enregistrements instantanés disponibles. Pour l'année hydrologique 2012-2013, l'écart important entre les données instantanées et journalières est justifié par le manque des données instantanées pendant toute la période Septembre-Février.

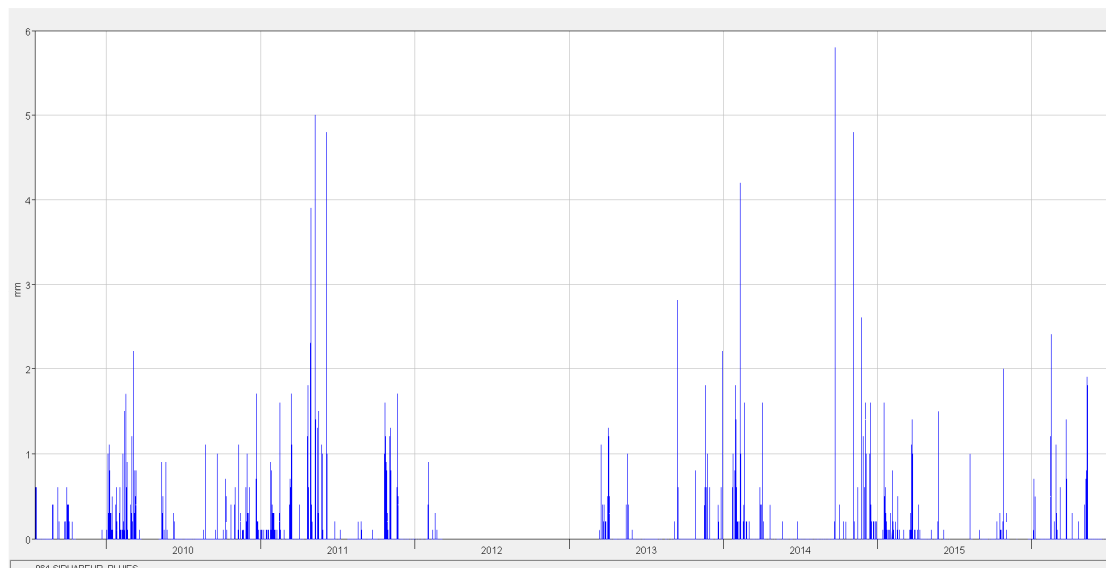


Figure 89 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Jabeur

11- Poste Sidi Mohamed Cherif

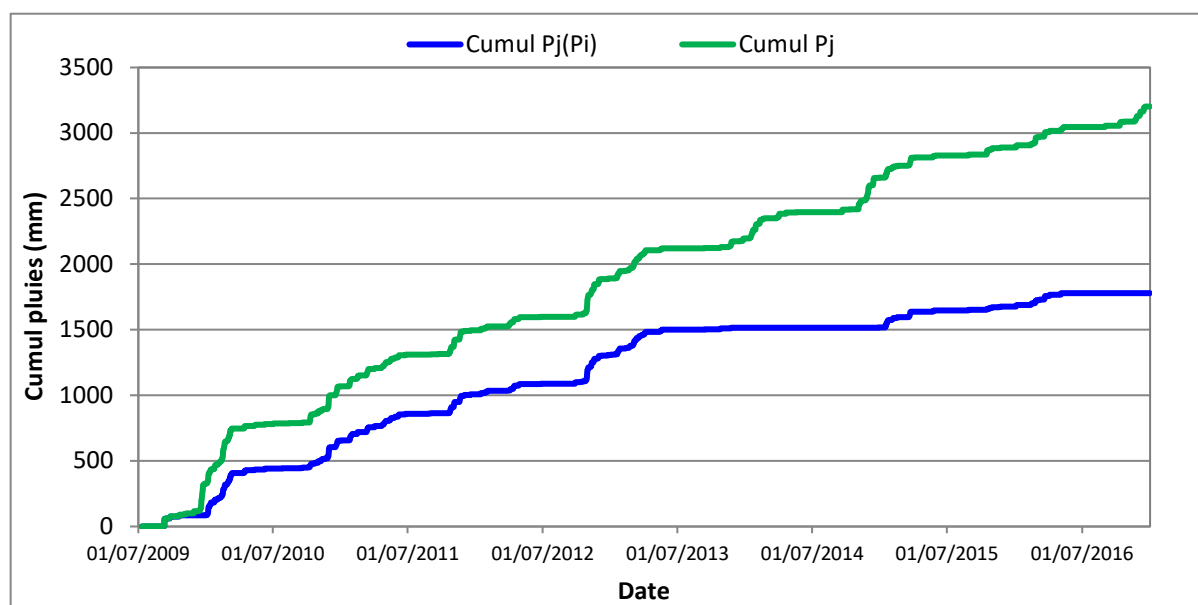


Figure 90: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Sidi Mohamed Cherif

Tableau 32: Résultats de l'analyse des pluies - poste Sidi Mohamed Cherif

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	443.60	785.70	0.56	75%
2010-2011	416.00	522.80	0.80	91%
2011-2012	227.40	289.10	0.79	92%
2012-2013	413.20	522.40	0.79	96%
2013-2014	14.40	274.90	0.05	22%
2014-2015	137.20	438.20	0.31	67%
2015-2016	127.40	211.90	0.60	78%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Sidi Mohamed Cherif.

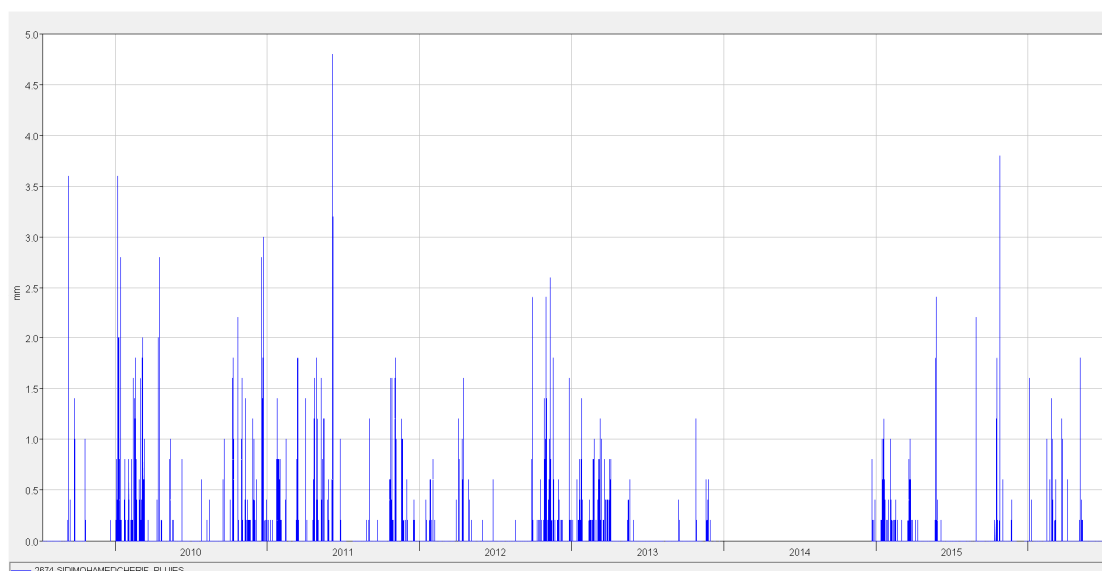


Figure 91 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Sidi Mohamed Cherif

Au niveau du poste Sidi Mohamed Cherif, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les conclusions suivantes:

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone ;
- A part l'année 2013/2014 qui présente un pourcentage de données disponibles assez faible (20%), le pourcentage des données disponibles varie entre 67% et 95%.

- La période 2010/2013 présente une bonne représentativité des données instantanées en comparaison avec les pluies journalières, avec un écart maximal de 20% sachant que les données manquantes varient de 4% à 9%. Pour les autres années, l'écart entre les pluies instantanées et journalières est justifié par le pourcentage important des données manquantes dont une grande partie concerne la période pluvieuse ;
- Globalement, le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et journalières.

12- Poste Skhirat

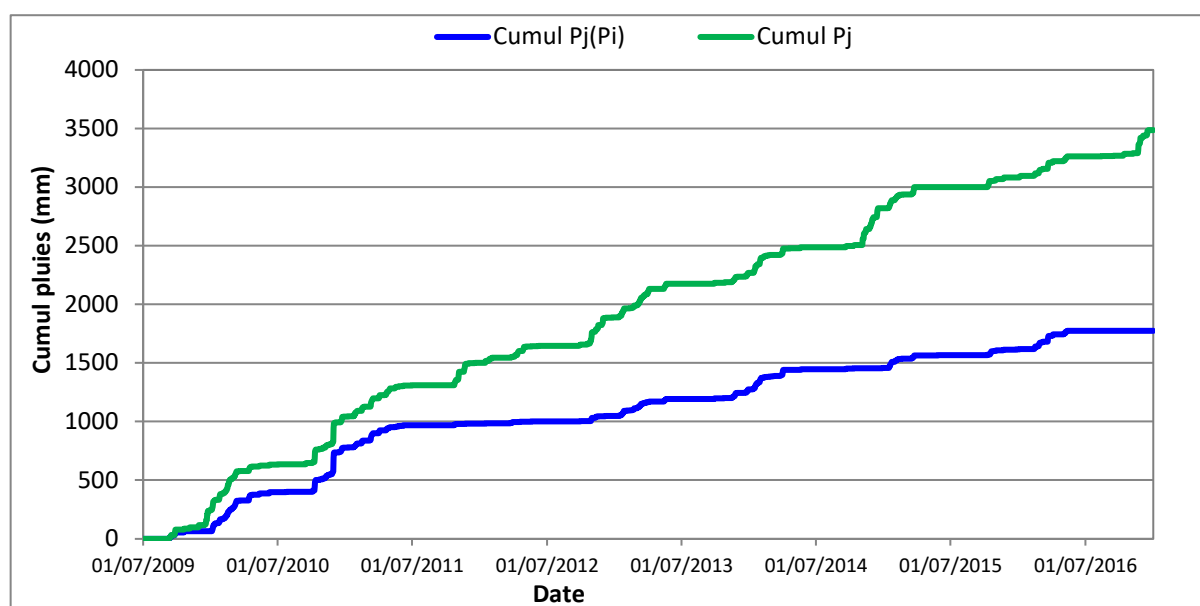


Figure 92: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Skhirat

Tableau 33: Résultats de l'analyse des pluies - poste Skhirat

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	398.20	635.20	0.63	71%
2010-2011	569.00	671.90	0.85	79%
2011-2012	32.80	336.40	0.10	61%
2012-2013	190.60	527.80	0.36	46%
2013-2014	254.80	313.40	0.81	70%
2014-2015	118.80	513.34	0.23	75%
2015-2016	211.00	264.60	0.80	72%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Skhirat.

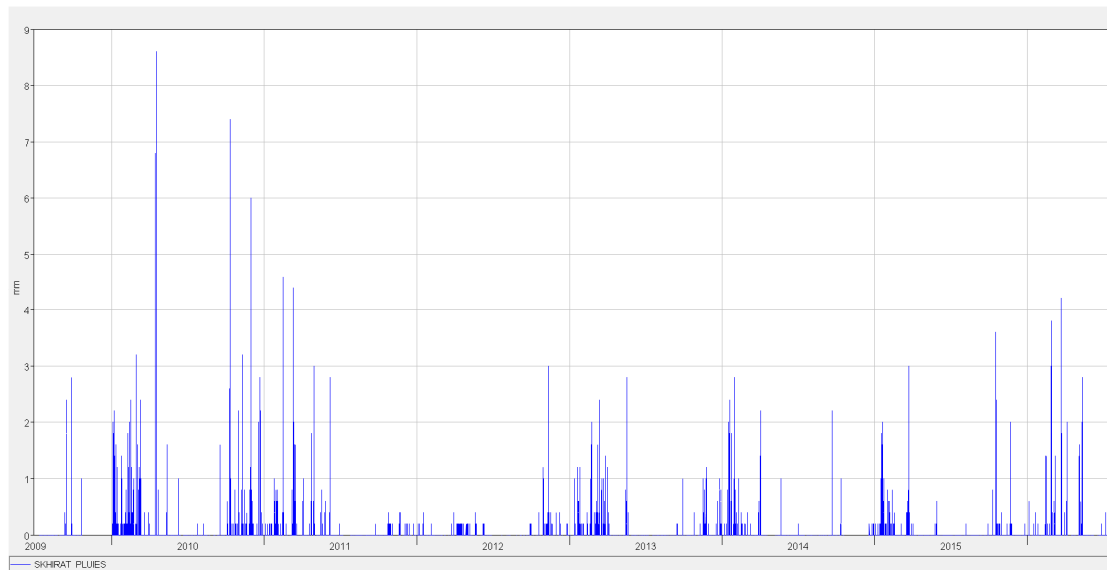


Figure 93 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Skhirat

Au niveau du poste Skhirat, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les constats suivants :

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone ;
- Pendant l'année 2011/2012 le pourcentage des données manquantes est évalué à 39% dont une grande partie concerne la période pluvieuse octobre-novembre et février-mars, d'où l'écart observé entre les données journalières et instantanées ;
- Pendant la période septembre-Décembre de l'année 2014, le pluviomètre automatique n'a probablement pas fonctionné. Cette période était, toutefois, marquée par une forte pluviosité d'où l'écart relevé entre les données journalières et instantanées ;
- Pour les autres années, les écarts entre les pluies instantanées et journalières est justifié par le pourcentage des données manquantes ;
- Globalement, le poste présente une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et journalières.

13- Poste Tamdrost

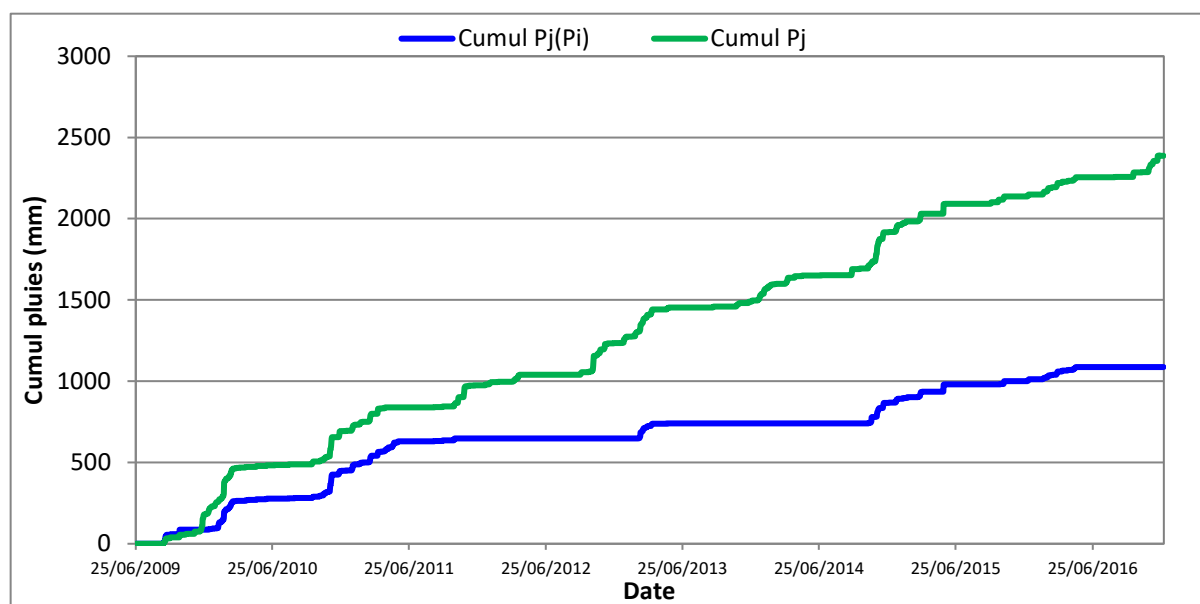


Tableau 34: Résultats de l'analyse des pluies - poste Tamdrost (après avoir écarté les événements cités ci-après)

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	280.70	488.10	0.58	77%
2010-2011	348.20	349.40	1.00	89%
2011-2012	19.20	201.50	0.10	95%
2012-2013	91.90	413.90	0.22	67%
2013-2014	0.00	198.90	0.00	48%
2014-2015	470.4	440.20	1.07	87%
2015-2016	106.40	164.20	0.65	86%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Tamdrost.

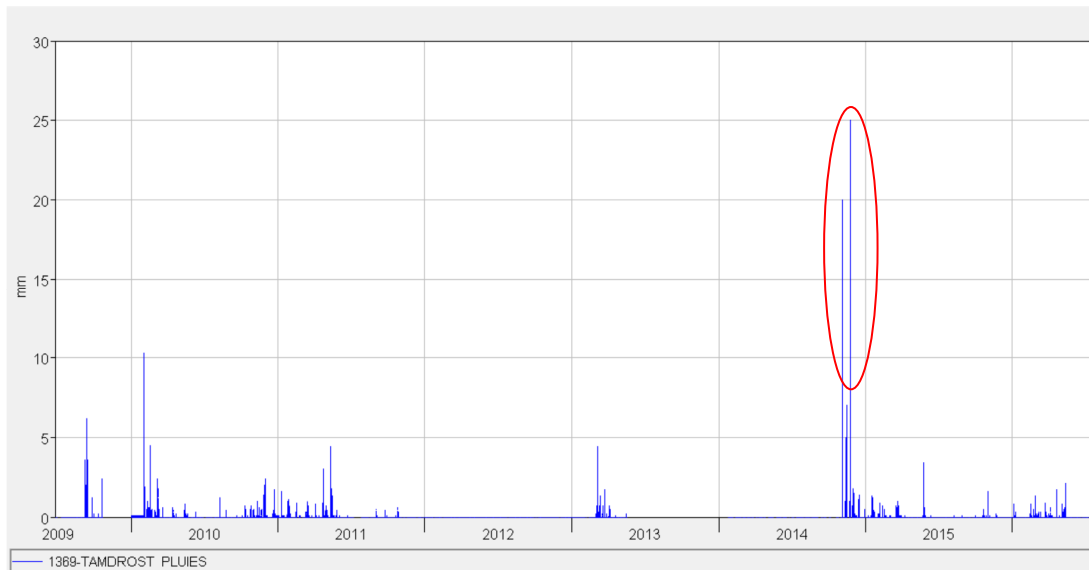


Figure 95 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tamdrost

Au niveau du poste Tamdrost, l'analyse des données pluviométriques a permis de conclure que :

- L'écart relevé entre les données instantanées et journalières 2009/2010 résulte d'un manque des enregistrements de pluies instantanées ;
- Pour l'année 2010/2011, on constate une bonne cohérence entre les pluies instantanées et journalières ;
- Lors des années hydrologiques 2011/2012 et 2012/2013, les écarts importants observés entre les données instantanées et journalières ne résultent pas d'un manque d'enregistrement. Donc on peut expliquer cette différence par un dysfonctionnement du pluviomètre automatique.
- L'année hydrologique 2013/2014 est marquée, quant à elle, par un manque important des enregistrements évalué à 52% ;
- En novembre 2014, les enregistrements instantanés présentent deux sauts importants de mesures. Les pluies journalières issues des enregistrements instantanés sont de 146 mm et 84 mm respectivement en 04/11/2014 et 24/11/2014, alors que les pluies journalières mesurées dans le même poste sont de 17.2 mm et 11.4 mm respectivement. Ainsi, ces deux événements ont été écartés ;
- Globalement, on note une bonne compatibilité entre les pluies instantanées disponibles et journalières.

14- Poste Tsalat

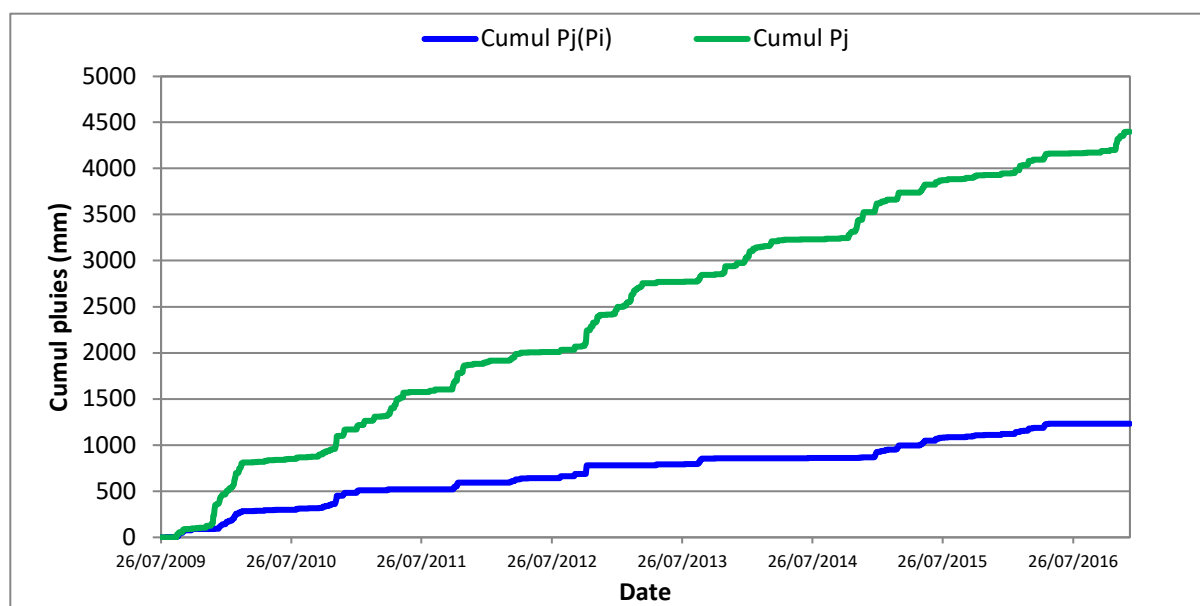


Figure 96: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Tsalat

Tableau 35: Résultats de l'analyse des pluies - poste Tsalat

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	310.10	868.70	0.36	42%
2010-2011	207.40	721.70	0.29	23%
2011-2012	141.70	441.40	0.32	42%
2012-2013	131.00	740.60	0.18	39%
2013-2014	67.60	459.00	0.15	20%
2014-2015	225.40	652.60	0.35	64%
2015-2016	148.30	284.50	0.52	85%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Tsalat.

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données disponibles varie de 20% et 42% sur la période allant de 2009/2010 et 2013/2014 et marque une amélioration sur les années 2014/2015 et 2015/2016 respectivement avec des pourcentages de 64% et 85%.

- Le poste Tsalat présente des manques importants d'enregistrements instantanés. Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont généralement compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.

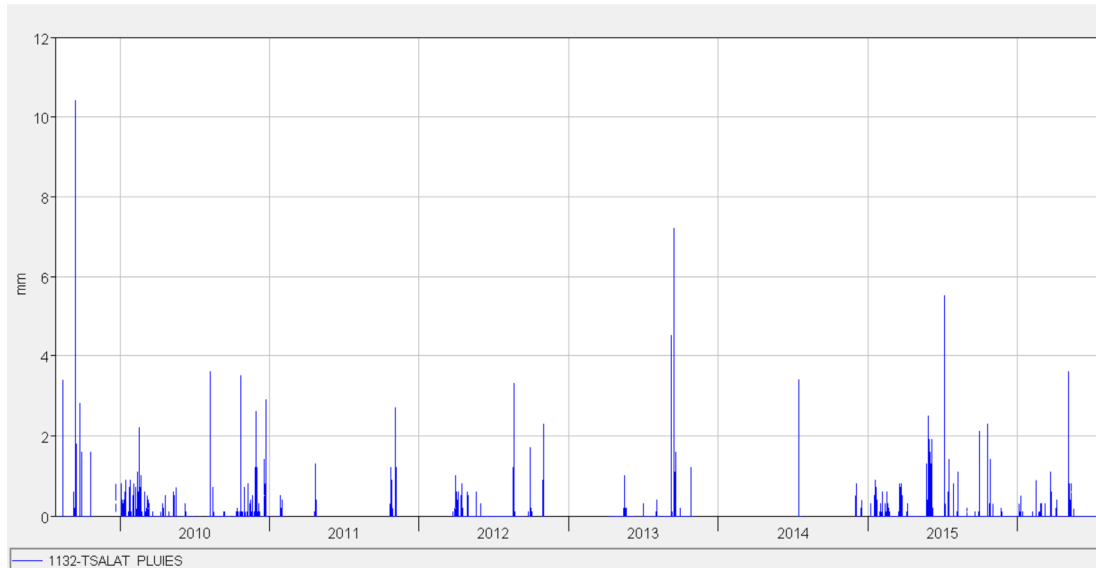


Figure 97 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tsalat

15- Poste Melilla

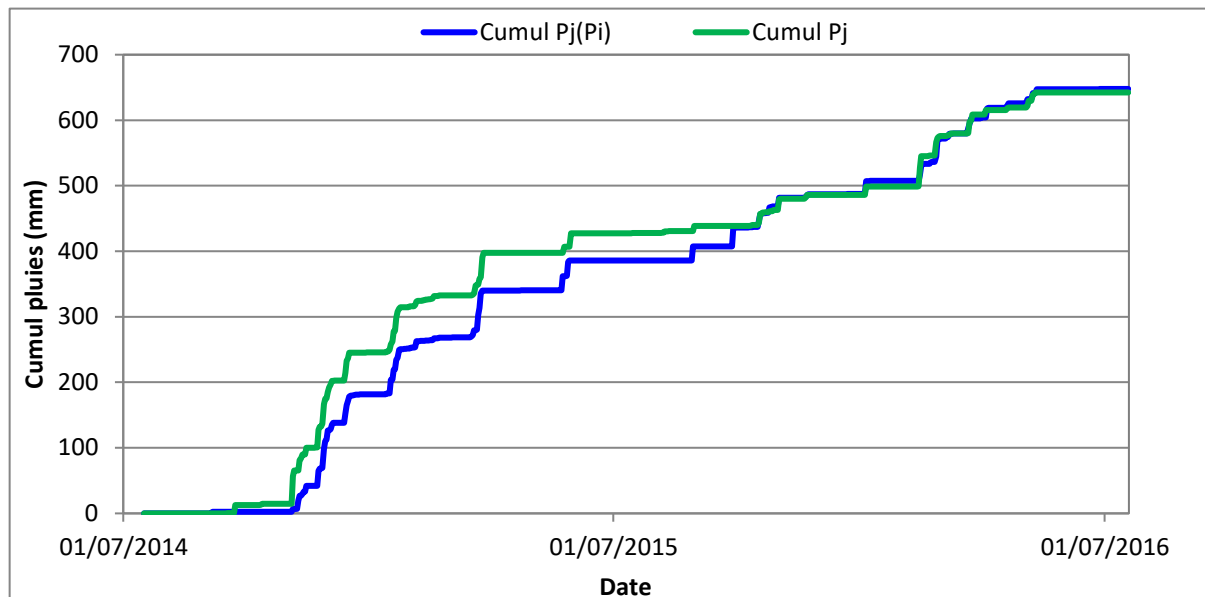


Figure 98: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Melilla

Tableau 36: Résultats de l'analyse des pluies - poste Melilla

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2014-2015	407.20	438.40	0.93	83%
2015-2016	240.60	204.20	1.18	87%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Melilla.

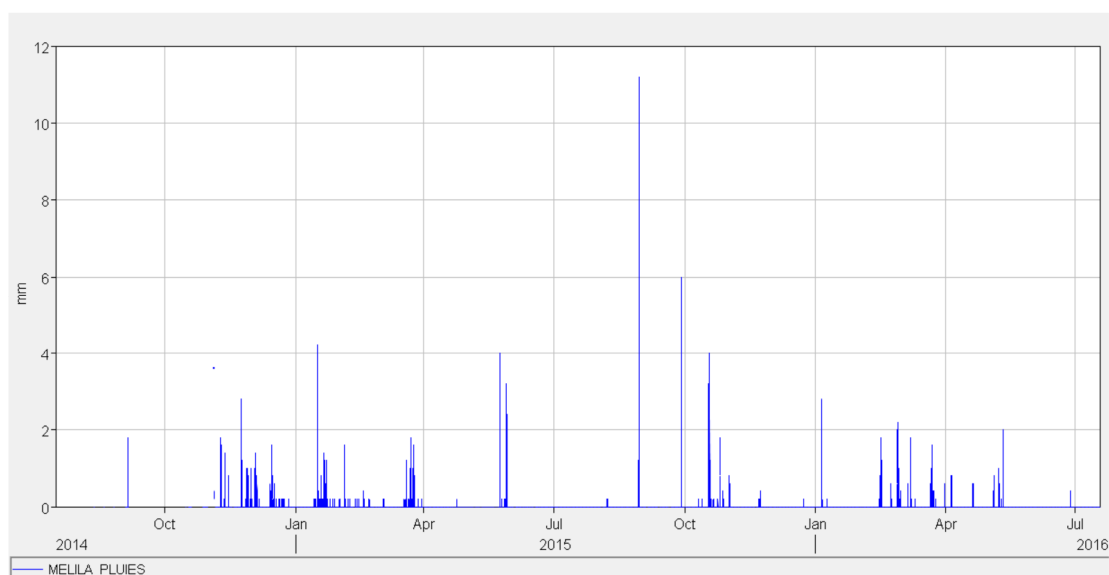


Figure 99 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Melilla

Au niveau du poste Melilla, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les constats suivants :

- Entre septembre 2014 et Août 2016, la confrontation des données instantanées et journalières montre un manque au niveau des pluies journalières ;
- Un manque important de données instantanées est noté entre les mois juillet et novembre 2014 ;
- Globalement, le niveau de disponibilité des données instantanées est bon : le pourcentage des données disponibles est de 85% ;
- A partir du mois octobre 2015, on a une bonne compatibilité entre les données journalières et instantanées ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.

16- Poste Mohammedia

Tableau 37: Résultats de l'analyse des pluies - poste Mohammedia

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données (Pi) disponibles
2009-2010	310	76%
2010-2011	532.4	87%
2011-2012	201.2	96%
2012-2013	241	97%
2013-2014	242.2	98%
2014-2015	309.6	75%
2015-2016	191.8	74%

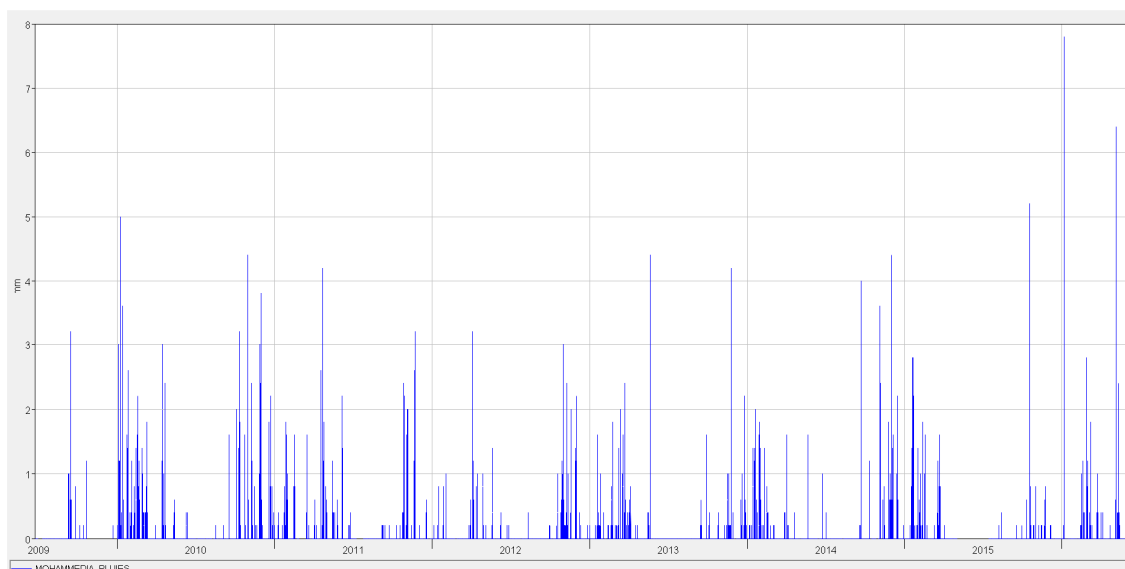


Figure 100 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Mohammedia

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie entre 74% et 98% pour la période 2009-2016 ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca.

17- Poste Oued Bouskoura

Tableau 38: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Oued Bouskoura

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données (Pi) disponibles
2014-2015	273.6	80.2%
2015-2016	171	79.8%

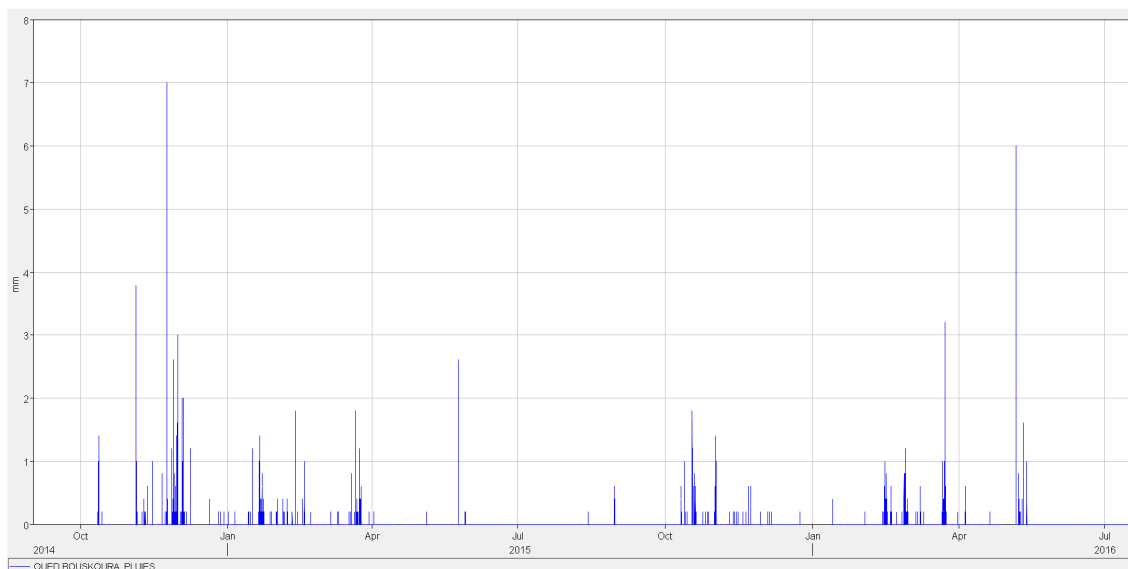


Figure 101 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oued Bouskoura

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles est de l'ordre de 80% pour la période 2014-2016 ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

18- Poste Oued Merzeg

Tableau 39: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Oued Merzeg

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2014-2015	324.4	79%
2015-2016	170.8	73%

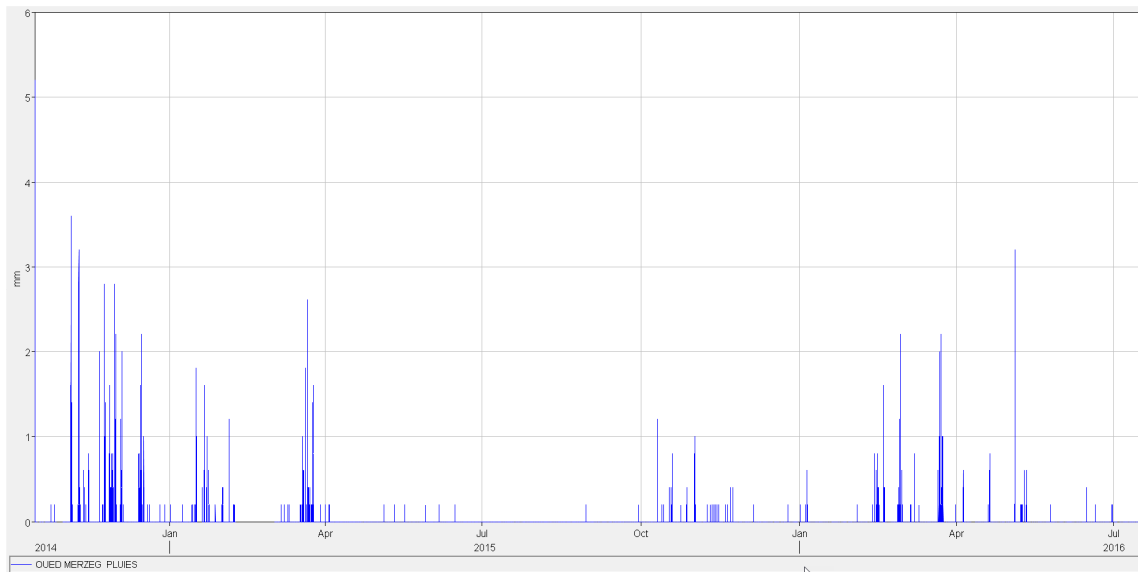


Figure 102 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oued Merzeg

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles est de l'ordre de 76% pour la période 2014-2016 ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

19- Poste Oulad Mhamed

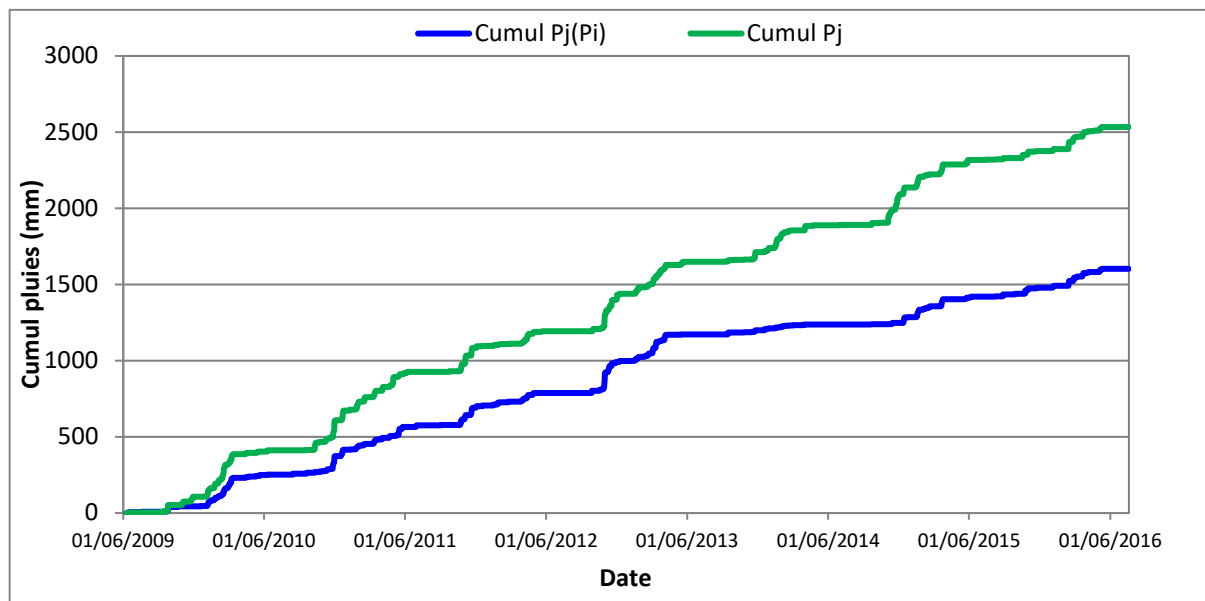


Figure 103: Analyse graphique des données pluviométriques - poste Oulad Mhamed

Tableau 40: Résultats de l'analyse des pluies - poste Oulad Mhamed

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	250.00	408.80	0.61	76%
2010-2011	318.80	513.60	0.62	86%
2011-2012	211.60	266.30	0.79	93%
2012-2013	385.40	457.70	0.84	75%
2013-2014	65.00	240.80	0.27	31%
2014-2015	197.40	438.40	0.45	80%
2015-2016	167.80	205.40	0.82	86%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Oulad Mhamed.

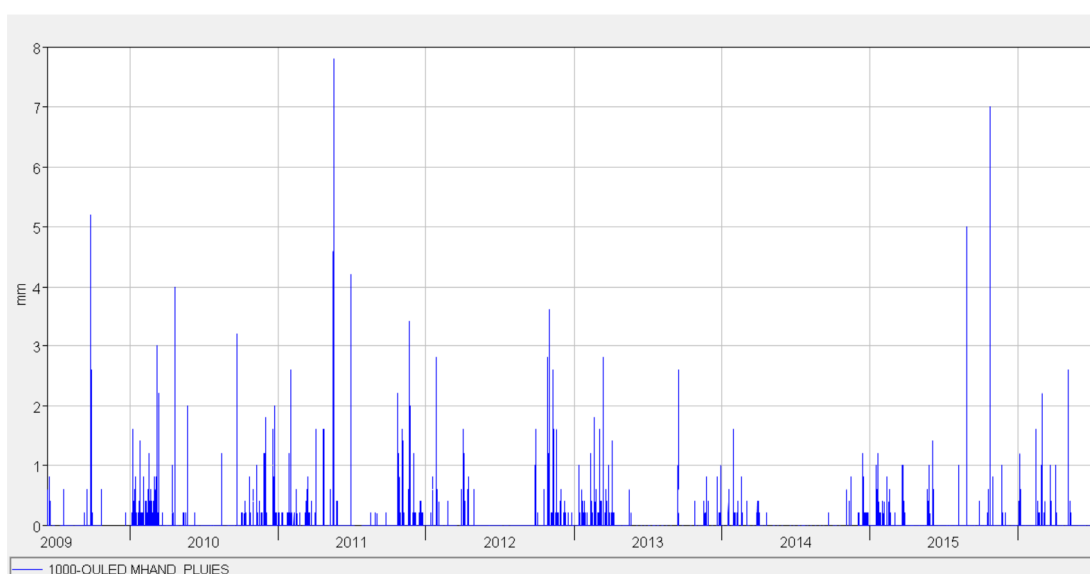


Figure 104 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Oulad Mhamed

Au niveau du poste Oulad Mhamed, l'analyse des données pluviométriques a permis de formuler les constats suivants :

- Le ratio de cumul annuel des pluies instantanées et des pluies journalières est compatible avec le pourcentage des données instantanées disponibles à l'exception de l'année 2014/2015 dont le pourcentage des données instantanées disponibles est de 80% alors que la ration correspondante est de 0.45. Cet écart est justifié par le manque des données instantanées pendant la période septembre-novembre ;

- L'année 2013/2014 est exceptionnelle en termes de disponibilité des données instantanées : le pourcentage des données disponibles est évalué à 30%;
- Le pourcentage des données instantanées disponibles en 2009/2010 est estimé à 76%. Le manque de données est noté entre octobre et décembre 2009. Ce qui se traduit par un ratio de 61% ;
- Globalement la moyenne du pourcentage des données disponibles est bonne. Il est de 75% ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes dans la zone.

20- Poste Tighaza

Tableau 41: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Tighaza

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2013-2014	71.5	11%
2014-2015	87.8	11%
2015-2016	136.8	18%

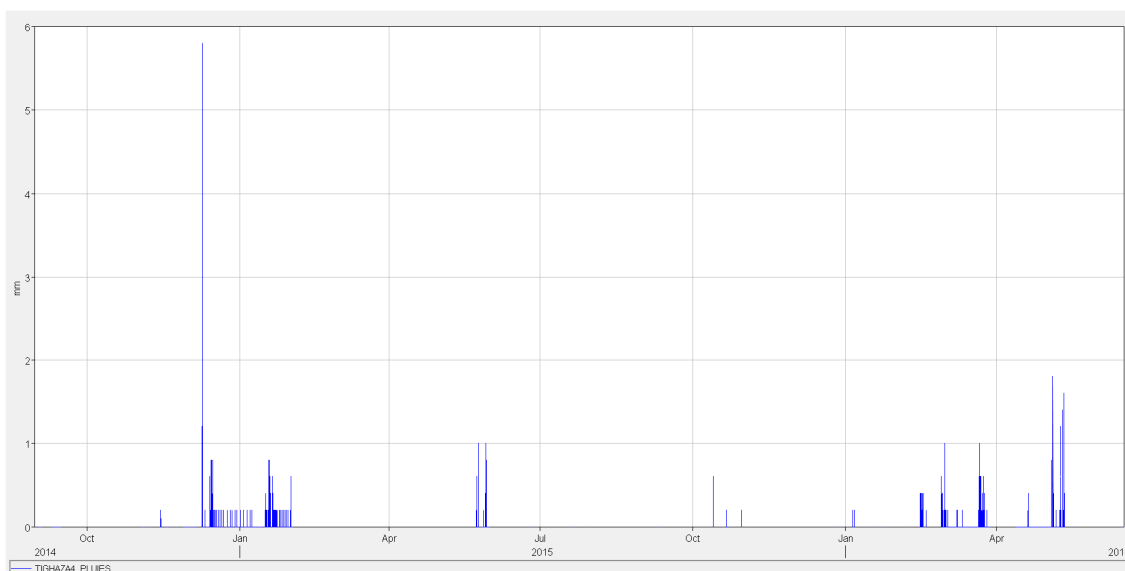


Figure 105 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Tighaza

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage moyen des données instantanées disponibles est faible et de l'ordre de 13.3% pour la période 2013-2016 ;

- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Rabat.

21- Poste Barrage Aricha

Tableau 42: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Aricha

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2009-2010	163.2	75%
2010-2011	222.4	83%
2011-2012	146.6	88%
2012-2013	269.4	89%
2013-2014	5.8	7%

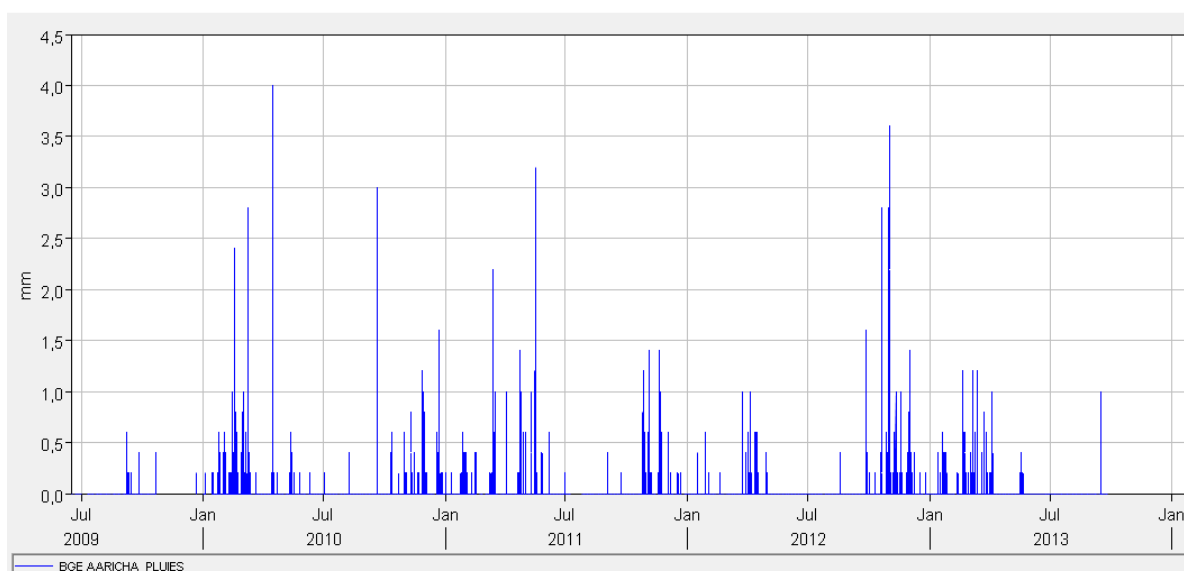


Figure 106 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Aricha

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie de 75% à 89% pour la période 2009-2013. Le pluviomètre n'a pas fonctionné entre 2014 et 2016 ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

22- Poste Barrage Zamrine

Tableau 43: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Zamrine

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2009-2010	224.4	75%
2010-2011	260.2	74%
2011-2012	154	88%
2012-2013	377	80%
2013-2014	63.4	40%
2014-2015	78.4	77%
2015-2016	100.2	83%

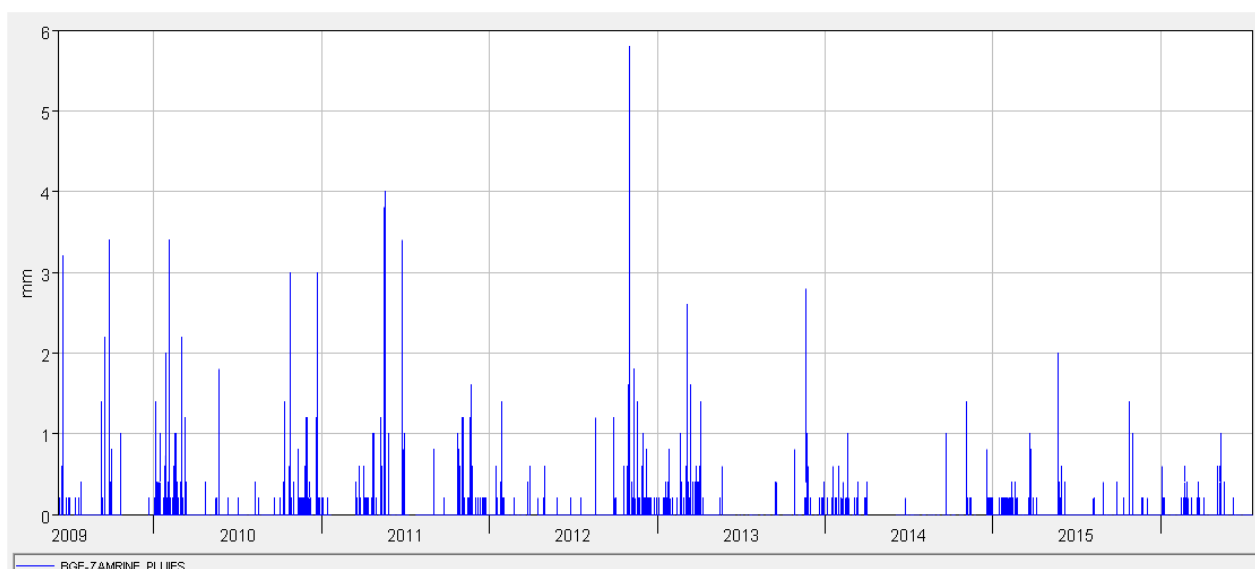


Figure 107 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Zamrine

L'analyse des données présentées ci-dessus montre que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie généralement de 74% à 89% à l'exception de l'année 2013-2014 où les données enregistrées constituent 40% ;
- Les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

23- Poste Barrage Hessar

Tableau 44: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage Zamrine

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2009-2010	311.4	76%
2010-2011	568	89%
2011-2012	178	89%
2012-2013	460	97%
2013-2014	235.4	57%
2014-2015	347.8	81%
2015-2016	134.2	72%

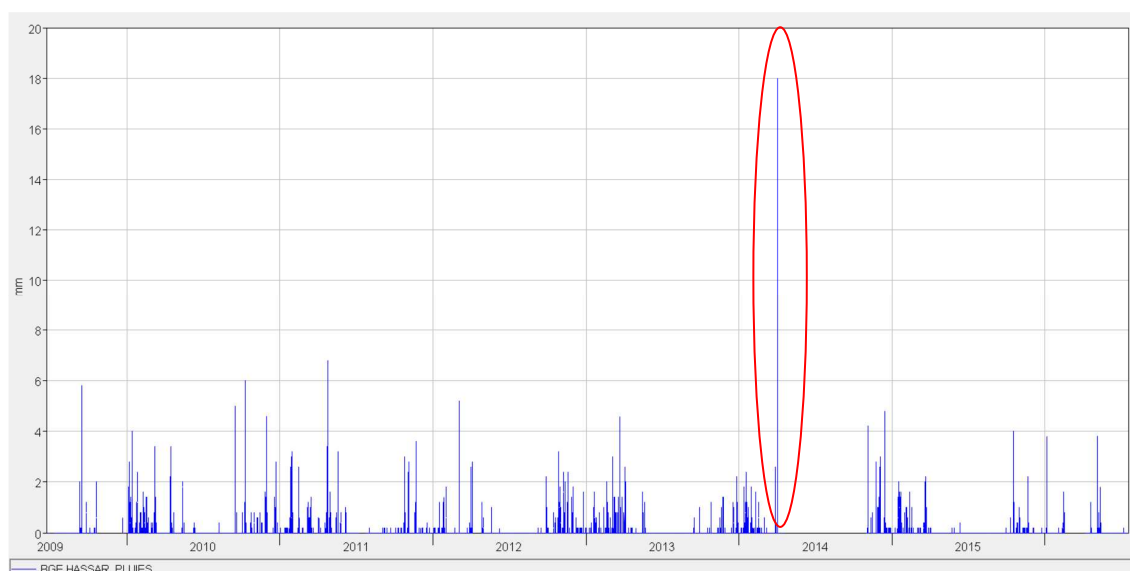


Figure 108 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage Hessar

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie de 57% à 97% pour la période 2009-2016 avec une moyenne 80% ;
- Le 2 avril 2014, les enregistrements instantanés présentent deux sauts de mesure successifs importants (18 mm en 5 min chacune). Les pluies journalières enregistrées dans la zone varient de 1 mm à 13 mm, l'analyse des pluies instantanées enregistrées dans la zone montre que les précipitations étaient régulièrement réparties dans le temps. Ainsi, ces deux événements ont été écartés ;

- En générale, les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

24- Poste Barrage El Himmer

Tableau 45: Résultats de l'analyse des pluies instantanées - poste Barrage El Himmer

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	% données Pi disponibles
2009-2010	274.7	76%
2010-2011	615.4	79%
2011-2012	322.6	91%
2012-2013	317.6	90%
2013-2014	244.2	79%
2014-2015	467.2	70%

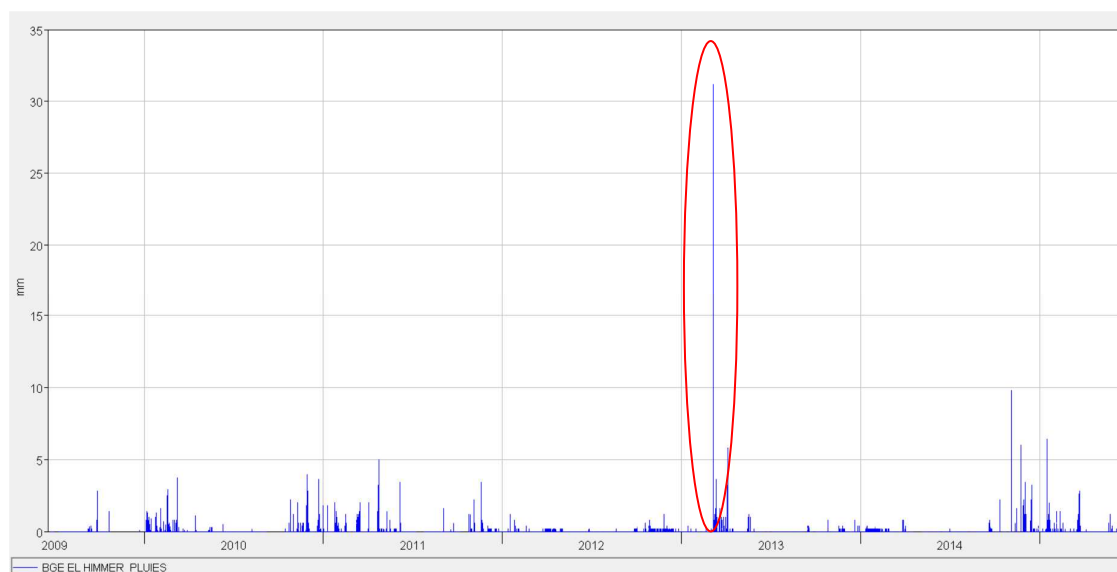


Figure 109 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Barrage El Himmer

On constate, d'après l'analyse ci-avant, que :

- Le pourcentage des données instantanées disponibles varie de 70% à 91% pour la période 2009-2015 avec une moyenne de 81% ;
- Le 6 Mars 2013, les enregistrements instantanés présentent un saut de mesure important (31.2mm en 5 min). Les pluies journalières enregistrées dans la zone varient

de 0.4 mm à 6.2 mm, en éliminant le saut précité, la pluie journalière calculée à partir des pluies instantanées est de 0.4 mm. Ainsi, ce saut d'événement a été écarté ;

- En générale, les valeurs maximales des pluies instantanées enregistrées sont compatibles avec les valeurs fortes calculées à partir des courbes IDF de Casablanca et Nouacer.

25- Poste Barrage Mazer

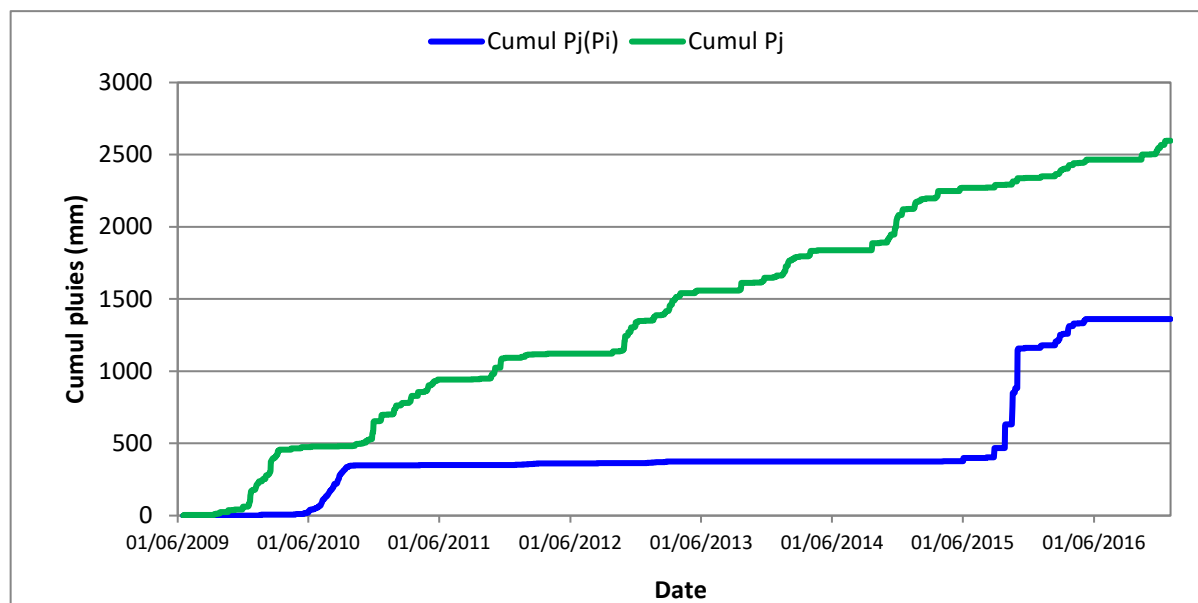


Figure 110: Analyse graphique des données pluviométriques - poste barrage Mazer

Tableau 46: Résultats de l'analyse des pluies - poste barrage Mazer

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	295.00	477.70	0.62	76%
2010-2011	54.70	460.30	0.12	89%
2011-2012	13.00	238.40	0.05	96%
2012-2013	11.30	442.10	0.03	47%
2013-2014	0.00	280.00	0.00	0%
2014-2015	94.00	451.20	0.21	38%
2015-2016	893.40	176.30	5.07	88%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique Mazer.

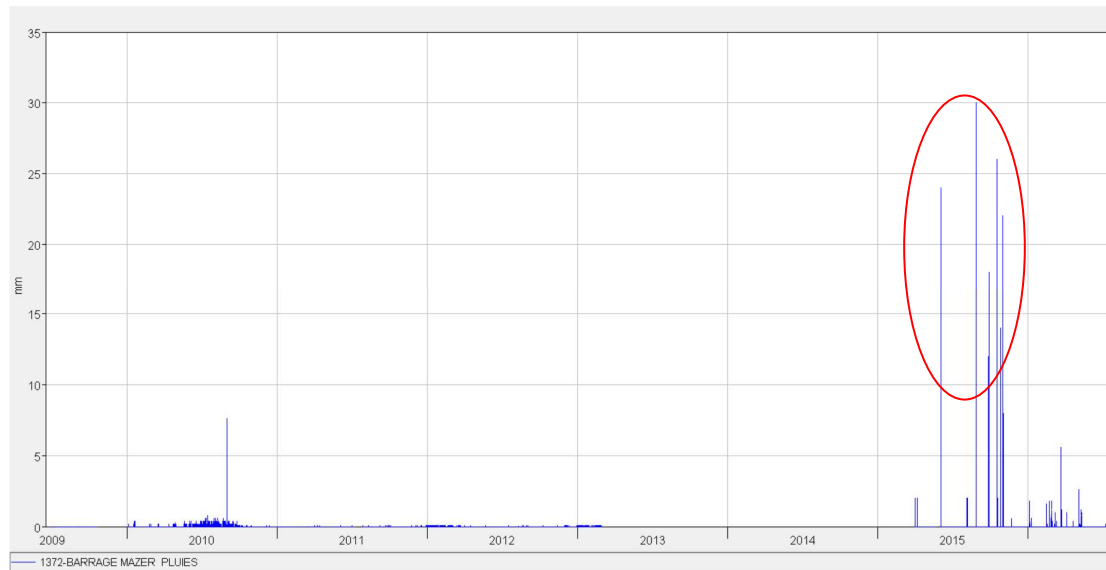


Figure 111 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique Mazer

L'analyse ci-dessus montre que :

- Le poste du barrage Mazer présente un écart important entre les enregistrements instantanés et les données journalières sur toute la période disponible.
- Le pluviomètre automatique a enregistré le 1/11/2015 un saut important avec une pluie mesurée évaluée à 264mm en moins de 24h. En outre, plusieurs valeurs enregistrées en 2015 dépassent largement les valeurs fortes dans la zone ;
- Pour le poste du barrage Mazer, on constate une incohérence entre le pourcentage des données disponibles et le rapport entre les données instantanées et journalières.

L'analyse des données a fait ressortir deux constats :

- o Lors de certaines périodes (entre décembre 2009 et janvier 2010) l'écart est dû à la concentration des données manquantes lors de la période pluvieuse ;
- o Pour d'autre cas (19 et 20 Novembre 2011 par exemple), on n'a pas décelé un manque important de données pourtant les enregistrements instantanés sont nuls ce qui peut être expliqué par une éventuelle défaillance au niveau du pluviomètre automatique.

Ainsi, les pluies instantanées enregistrées au niveau du pluviomètre automatique Mazer ont été écarté.

26- Poste El Gara

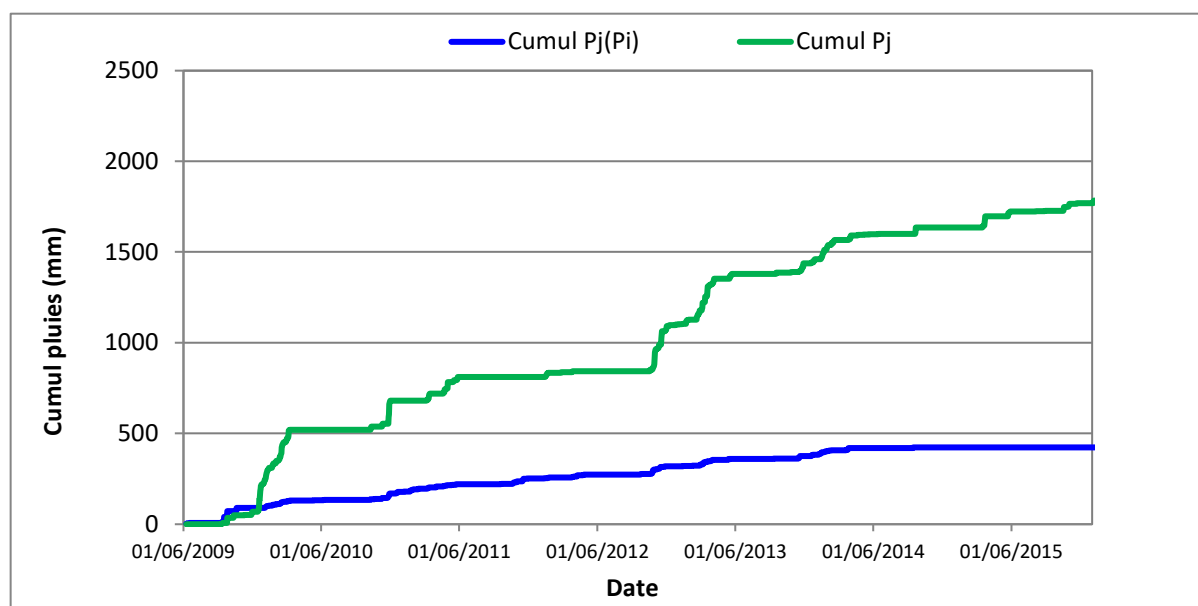


Figure 112: Analyse graphique des données pluviométriques - poste El Gara

Tableau 47: Résultats de l'analyse des pluies - poste El Gara

Année	P. annuelle (Pi) (mm)	P. annuelle (Pj) (mm)	Ratio	% données Pi disponibles
2009-2010	127.60	519.80	0.25	76%
2010-2011	85.60	290.50	0.29	90%
2011-2012	55.00	32.80	1.68	87%
2012-2013	87.60	536.20	0.16	95%
2013-2014	60.20	220.30	0.27	92%
2014-2015	3.60	127.30	0.03	13%

Le graphe suivant présente les pluies instantanées au niveau du pluviomètre automatique El Gara.

Le poste El Gara présente un écart important entre les enregistrements instantanés et journaliers. L'écart maximal entre les données instantanées et journalières est évalué à environ 80%.

L'analyse du niveau de disponibilité des données montre :

- Un manque important évalué à 85% a été enregistré lors de l'année 2014/2015. Ceci est justifié par l'arrêt du pluviomètre automatique ;

- Pour l'année hydrologique 2009/2010, le manque des enregistrements instantanés a été observé lors de la période de forte pluviosité novembre et décembre 2009, ce qui explique en partie l'écart relevé ;
- Sur d'autre périodes, l'IC signale que le taux de disponibilité des enregistrements instantanés est très important pourtant l'écart observé est assez élevé. Ceci peut être expliqué par le dysfonctionnement du pluviomètre automatique à cause d'un problème d'étalonnage après les cinq premiers mois de sa mise en service ;
- Les valeurs des pluies instantanées enregistrées sont très faibles par rapport aux valeurs fortes dans la zone.

Ainsi, les pluies instantanées enregistrées au niveau du pluviomètre automatique El Gara ont été écarté.

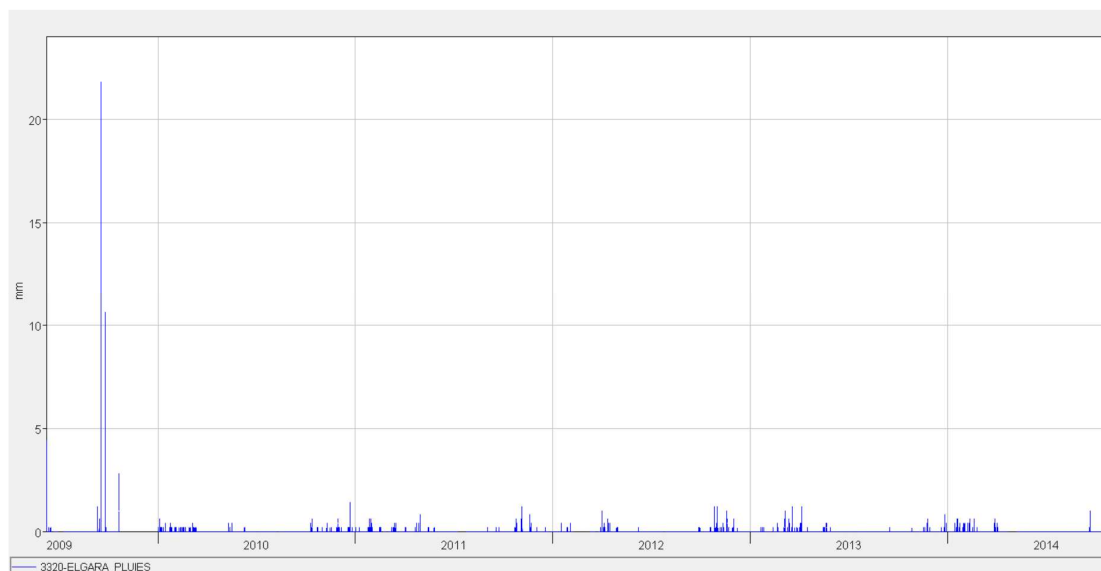


Figure 113 : Pluies instantanées - pluviomètre automatique El Gara

***Annexe 3: Analyse de lame d'eau moyenne
par poste relatives aux averses retenues***

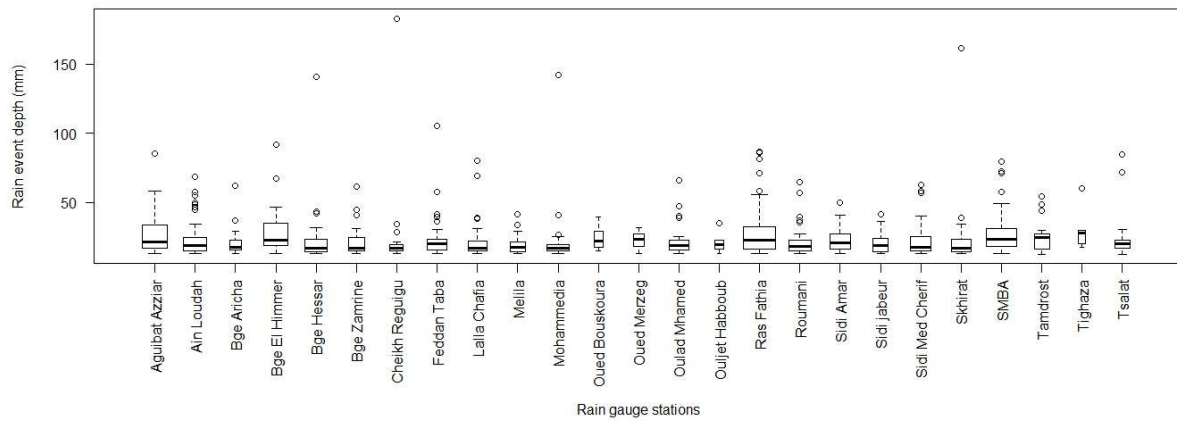


Figure 114: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=12h

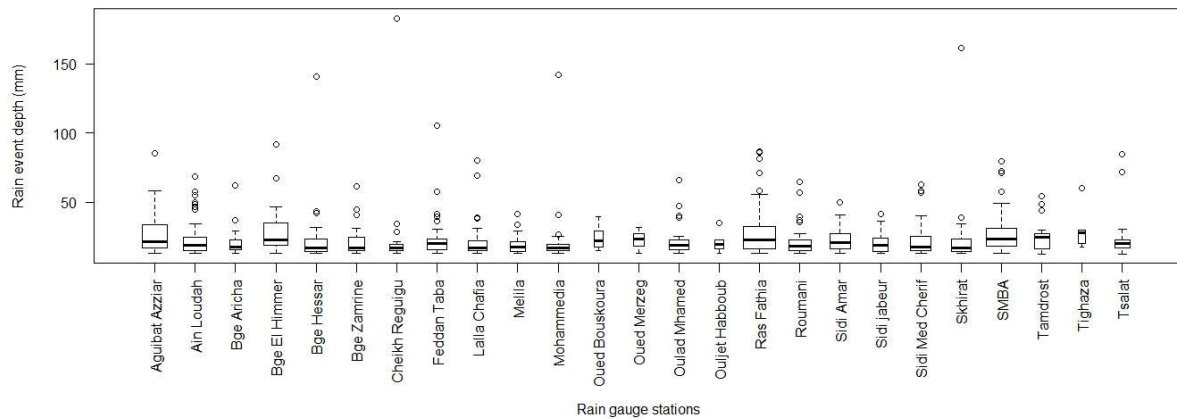


Figure 115: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=6h

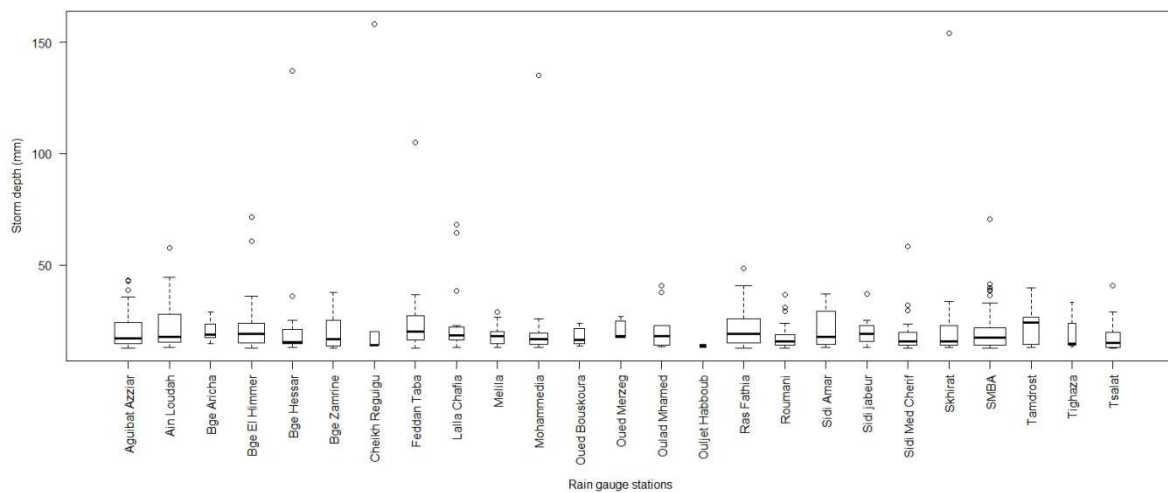


Figure 116: Boîtes à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=1h

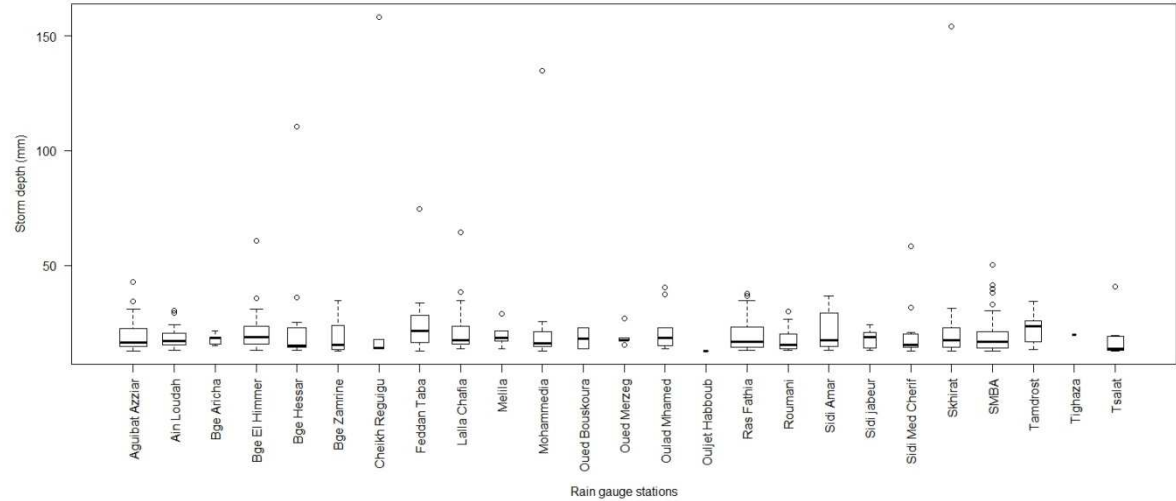


Figure 117: Boites à moustaches des lames d'eau moyennes par postes - MIET=0.5h

***Annexe 4: Caractéristiques des bassins
versants étudiés***

Tableau 48: Caractéristiques des bassins versants étudiés

Bassin versant	Surface (Km ²)	Plus long talweg (Km)	Hmin (mNGM)	Hmax (mNGM)	Dénivelé (m)	Pente (%)
Bassins Chaouia et Chaouia côtière						
BV Fath	0,63	0,76	14	26	12	1,6%
BV Lahwawra	1,93	2,12	31	52	21	1,0%
BV Oued Chorfa	19,75	9,44	32	133	101	1,1%
BV Clantna	7,67	3,41	60	95	35	1,0%
BV Douar Chorfa 1	1,59	0,73	33	36	3	0,4%
BV Douar Chorfa 2	1,89	1,79	17	35	19	1,0%
BV Sidi Abdellah	1,26	0,9	103	115	12	1,3%
BV Ain Jmel	1,68	2	113	128	15	0,8%
BV Sidi Boutayeb	4,12	1,85	115	131	16	0,9%
BV ST Sud 1	2,6	1,94	73	98	25	1,3%
BV ST Sud 2	2,2	2,45	95	98	3	0,1%
BV ST Sud 3	2,19	1,84	87	115	28	1,5%
BV ST Sud 4	0,19	0,51	85	89	4	0,8%
BV ST Sud 5	0,79	0,51	75	88	13	2,5%
BV ST Sud 6	0,71	0,56	77	82	5	0,9%
BV ST Sud 7	2,34	1,67	83	97	14	0,8%
BV ST Sud 8	2,87	2,04	83	117	34	1,7%
BV Ragragui	2,48	1,72	141	145	4	0,2%
BV Bou Atrous	2,17	2,35	143	160	17	0,7%
BV Jenja 1	33,42	10,81	152	232	80	0,7%
BV Jenja 2	6,45	3,84	111	134	23	0,6%
BV Jenja 3	10,8	7,63	134	185	51	0,7%
BV Jenja 4	4,55	2,99	152	175	23	0,8%
BV Jenja 6	3,48	2,07	142	175	33	1,6%
BV Jenja 7	7,72	7,37	108	149	41	0,6%
BV Jenja 8	5,38	5,4	122	160	38	0,7%
BV Jenja 9-1	1,63	1,95	123	145	22	1,1%
BV Jenja 9-2	1,52	0,79	119	130	11	1,4%
BV Jenja 10	1,39	3,17	114	122	8	0,3%
BV Jenja 11	2,17	2,01	100	127	27	1,3%
BV Jenja 12	19,16	8,53	75	117	42	0,5%
BV Ain Moula Ali	45,49	14,06	115	185	70	0,5%
BV Merzeg Am 12	5,59	2,68	159	169	10	0,4%
BV Merzeg Am 11	15,87	3,41	190	194	4	0,1%
BV Merzeg Am 13	8,29	4,09	172	186	14	0,3%

Bassin versant	Surface (Km ²)	Plus long talweg (Km)	Hmin (mNGM)	Hmax (mNGM)	Dénivelé (m)	Pente (%)
BV Merzeg Am 14	9	4,87	170	180	10	0,2%
BV Merzeg Am 10	17,08	5,96	180	211	31	0,5%
BV Merzeg Am 8	23,62	7,27	189	211	22	0,3%
BV Merzeg Am 9	15,46	5,86	190	214	24	0,4%
BV Merzeg Am 7	8,24	5,87	205	218	13	0,2%
BV Merzeg Am 6	11,23	5,58	219	227	8	0,1%
BV Merzeg Am 5	18,27	5,13	217	228	11	0,2%
BV Arred	20,48	9,8	182	215	33	0,3%
BV Sehbm Rmel	88,59	26,44	192	307	115	0,4%
BV1 Lagh	4,41	4,52	224	240	16	0,4%
BV2 Lagh	1,18	1,41	222	230	8	0,6%
BV3 Lagh	0,26	0,46	221	224	3	0,7%
BV4 Lagh	0,25	0,45	222	225	3	0,7%
BV5 Lagh	0,51	0,98	222	227	5	0,5%
BV6 Lagh	0,35	0,42	220	225	5	1,2%
BV7 Lagh	0,65	0,8	222	225	3	0,4%
BV8 Lagh	0,29	0,46	222	226	4	0,9%
BV Merzeg Am 1	9,49	6,37	228	256	28	0,4%
BV Merzeg Am 2	3,63	1,65	237	244	7	0,4%
BV Merzeg Am 3	9,43	5,53	227	238	11	0,2%
BV Merzeg Am 4	12,34	6,75	224	235	11	0,2%
BV Timlikch	122,54	28,22	222	338	116	0,4%
BV Oued Araba	67,65	18,2	254	407	153	0,8%
BV Oued Skhkhana	83,29	23,17	249	430	181	0,8%
BV Ch Oulad	24,8	8,35	243	375	132	1,6%
BV Al Khadra	29,85	9,21	237	400	163	1,8%
BV Boumoussa 2	28,1	8,62	300	398	98	1,1%
BV Boumoussa 3	24,31	10,05	245	350	105	1,0%
BV Sidi Moumen	25,61	8,78	392	475	83	0,9%
BV Boumoussa 1	104,9	22,15	398	609	211	1,0%
BV Touijine	64,33	20,14	290	530	240	1,2%
BV Tamdrost 3	54,96	19,14	295	605	310	1,6%
BV Kodiat El Garn 2	36,57	15,68	360	550	190	1,2%
BV Kodiat El Garn 1	168,4	28,17	505	700	195	0,7%
BV Chaâbat Abda	15,81	9,81	305	500	195	2,0%
BV Chaâbat Ezza'ter	17,82	10,83	300	560	260	2,4%
BV Chaâbat Rmoulat	10,8	6,73	299	450	151	2,2%
BV Mazer 2	5,25	2,92	297	320	23	0,8%

Bassin versant	Surface (Km ²)	Plus long talweg (Km)	Hmin (mNGM)	Hmax (mNGM)	Dénivelé (m)	Pente (%)
BV Mazer 1	179,69	33,82	320	740	420	1,2%
BV Tamdrost 2	148,32	28,11	430	730	300	1,1%
BV Tamdrost 1	243,25	26,83	635	790	155	0,6%
BV Mazer 3	116,83	18,54	221	297	76	0,4%
BV Chaâbat Lemsalla	10,64	6,68	302	478	176	2,6%
BV Oued Lqirac	13,05	9,88	310	511	201	2,0%
BV Chaâbat	5,06	3,49	325	450	125	3,6%
BV EL Heimer 3	89,06	50,26	221	318	97	0,2%
BV EL Heimer 2	30,89	14,52	318	475	157	1,1%
BV EL Heimer 1	191,05	31,57	442	731	289	0,9%
BV Fayda 3	41,11	12,31	198	229	31	0,3%
BV Fayda 2	62,14	17,48	229	325	96	0,5%
BV Fayda 1	9,38	5,92	325	402	77	1,3%
BV Affluent Fayda	4,83	2,42	325	395	70	2,9%
BV Zririf 1	46,4	14,6	325	569	244	1,7%
BV Zririf 3	111,04	20,21	234	325	91	0,5%
BV Zririf 2	55,21	19,29	170	235	65	0,3%
BV Affluent Zririf 1	17,08	8,37	323	480	157	1,9%
BV Hassar 1	54,74	15,67	116	170	54	0,3%
BV Ayyada 3	86,79	13,62	180	227	47	0,3%
BV Ayyada 2	66,49	23,78	227	322	95	0,4%
BV Ayyada 1	116,45	24,11	322	691	369	1,5%
BV Chouiref	103,51	26,37	217	445	228	0,9%
BV Ch1 Cebbah	3,78	3,22	322	420	98	3,0%
BV Ch2 Cebbah	1,37	1,01	330	350	20	2,0%
BV Ch1 El Gara	1,04	1,61	345	390	45	2,8%
BV Ch2 El Gara	0,95	2,27	325	425	100	4,4%
BV Dil Al Awda	173,53	36,23	325	700	375	1,0%
BV TM1	7,6	3,94	177	185	8	0,2%
BV TM2	4,01	3,37	170	176	6	0,2%
BV TM3	5,58	4,1	155	170	15	0,4%
BV TM4	3,78	2,47	146	155	10	0,4%
BV TM5	1,49	1,41	133	150	17	1,2%
BV TM6	3,28	2,42	133	145	12	0,5%
BV TM7	1,49	1,16	125	129	4	0,4%
BV TM8	2,91	2,16	137	145	9	0,4%
BV TM9	3,75	4,04	116	133	18	0,4%
BV TM10	0,57	1,17	121	125	5	0,4%

Bassin versant	Surface (Km ²)	Plus long talweg (Km)	Hmin (mNGM)	Hmax (mNGM)	Dénivelé (m)	Pente (%)
BV TM11	2	1,64	123	128	6	0,3%
BV TM12	0,81	0,77	117	118	1	0,1%
BV TM13	2,49	1,66	115	136	21	1,3%
BV TM14	1,46	1,71	114	152	38	2,2%
BV TM15	4,03	1,34	129	155	27	2,0%
BV Hassar aval	12,47	8,6	80	102	22	0,3%
BV Hassar 3	31,32	5,44	102	117	15	0,3%
BV Hassar 2	162,8	35,16	130	261	131	0,4%
BV-Dayat	1,41	1,34	112	124	12	0,9%
BV-Dayat Lhalhal	2,17	1,12	134	144	10	0,9%
BV-Mwilha	9,57	6,09	122	152	30	0,5%
Bassin El Malleh						
BV Al Atach	269,44	50,09	179	809	630	1,3%
BV Aricha	139,81	26,47	320	700	380	1,4%
BV Bast Al Arab	78,35	23,22	370	725	355	1,5%
BV El Gara	172,26	35,08	320	700	380	1,1%
BV El Malleh	313,72	47,93	80	320	240	0,5%
BV Hessar	236,53	36,66	102	249	147	0,4%
BVI El Malleh	170,14	29,81	7	172	165	0,6%
BV IH	12,3	8,6	55	102	47	0,5%
BV Mkahlou	191,35	31,22	530	750	220	0,7%
BV Tamlalet	83,69	15,98	100	250	150	0,9%
BV Ultet	128,87	34,69	484	850	366	1,1%
BV Zamrane	88,13	20,82	186	300	114	0,5%
BV Zamrine1	199,25	41,87	698	947	249	0,6%
BV Zamrine2	176,91	26,3	698	920	222	0,8%
BV Zamrine3	178,67	26,98	530	861	331	1,2%
BV Zamrine4	99,01	33,73	300	700	400	1,2%
Bassin Bouskoura						
BV Ch1.Sidi Maârouf	7,8	7,37	90	160	70	0,9%
BV Ch2.Sidi Maârouf	18,03	8,09	78	170	92	1,1%
BV O.Ain Jemaâ	12,17	7,93	115	135	20	0,3%
BV O.Bouskoura Intermédiaire	14,37	9,11	98	130	32	0,4%
BV Ch.Ville verte	9,77	5,08	118	130	12	0,2%
BV Ch.Gare	49,5	9,19	120	190	70	0,8%
BV O.Bouskoura	3,38	3,66	120	155	35	1,0%
BV O.Mziria	36,46	11,62	137	190	53	0,5%
BV O.Limirikane	38,71	9,85	122	183	61	0,6%

Bassin versant	Surface (Km ²)	Plus long talweg (Km)	Hmin (mNGM)	Hmax (mNGM)	Dénivelé (m)	Pente (%)
Bassin Bouregreg et bassins côtiers						
BV Aguibat Ezziar	413,79	37,84	121	423	302	0,8%
BV Ain Loudah	696,83	88,51	250	829	578	0,7%
BV Ait Boukhayou	264,69	45,35	379	1026	647	1,4%
BV Bge.ain Kwachia	166,28	31,12	200	367	166	0,5%
BV Bge.SMBA	320,54	34,41	14	199	184	0,5%
BV Boukhmis	935,75	64,75	450	932	482	0,7%
BV Cheikh Rguig	291,83	44,37	49	402	353	0,8%
BV Fadane Taba	654,11	71,91	128	659	531	0,7%
BV Ksisksou	514,74	64,88	694	1233	539	0,8%
BV Lalla Chafia	732,06	51,61	281	670	389	0,8%
BV Nfifikh aval	149,08	29,57	0	238	238	0,8%
BV O.Aakrach	159,25	33,61	57	244	188	0,6%
BV O.Grou	240,18	38,42	51	356	305	0,8%
BV O.Kourifla	199,53	28,97	127	250	124	0,4%
BV O.Mechra	204,35	42,04	58	278	220	0,5%
BV Ouljet Haboub	1153,73	69,46	550	873	323	0,5%
BV Ras fathia	441,32	39,78	201	485	284	0,7%
BV Sidi Amar	353,59	78,55	277	1229	952	1,2%
BV Sidi Jabour	461,56	71,45	202	794	592	0,8%
BV Sidi Lamine	500,65	56,53	763	1159	396	0,7%
BV Sidi Mhammed Cherif	655,4	63,69	278	818	540	0,8%
BV Skhirat	511,14	71,59	87	420	333	0,5%
BV Tiddas	702,44	80,17	227	991	765	1,0%
BV Tighza	113,89	19,72	1116	1266	150	0,8%
BV Tsalat	574,43	66,19	692	1116	425	0,6%

***Annexe 5: Temps de concentration des
bassins versant étudiés***

Tableau 49: Temps de concentration des bassins versants étudiés

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
Bassins Chaouia et Chaouia côtière								
BV Fath	0,3	0,5	0,3	0,3	0,7	0,8	4,4	0,2
BV Lahwawra	0,7	1,1	0,8	0,7	1,7	1,8	5,8	0,4
BV Oued Chorfa	2,1	2,9	2,5	2,1	6,0	5,5	11,6	1,3
BV Clantna	1,0	1,5	1,2	1,0	3,2	3,5	7,9	0,6
BV Douar Chorfa 1	0,4	0,8	0,4	0,4	1,8	2,6	5,3	0,3
BV Douar Chorfa 2	0,6	1,0	0,7	0,6	1,6	1,7	5,6	0,4
BV Sidi Abdellah	0,3	0,6	0,4	0,3	1,0	1,2	4,9	0,2
BV Ain Jmel	0,7	1,2	0,8	0,7	1,9	1,9	5,3	0,4
BV Sidi Boutayeb	0,7	1,1	0,8	0,7	2,3	2,8	6,3	0,4
BV ST Sud 1	0,6	1,0	0,7	0,6	1,6	1,8	6,3	0,4
BV ST Sud 2	1,7	2,4	1,3	1,7	5,4	5,4	5,9	1,0
BV ST Sud 3	0,5	0,9	0,7	0,5	1,4	1,5	6,4	0,3
BV ST Sud 4	0,3	0,5	0,3	0,3	0,6	0,6	3,0	0,2
BV ST Sud 5	0,2	0,3	0,2	0,2	0,5	0,7	4,6	0,1
BV ST Sud 6	0,3	0,5	0,3	0,3	0,8	1,1	4,0	0,2
BV ST Sud 7	0,6	1,0	0,7	0,6	1,9	2,1	5,6	0,4
BV ST Sud 8	0,6	0,9	0,7	0,6	1,5	1,7	6,9	0,3
BV Ragragui	1,0	1,6	0,9	1,0	3,6	4,2	5,8	0,6
BV Bou Atrous	0,9	1,3	0,9	0,8	2,2	2,2	5,7	0,5
Jenja BV1	2,7	3,5	3,0	2,7	8,9	8,5	11,6	1,6
Jenja BV2	1,3	1,9	1,4	1,3	4,1	4,2	7,1	0,8
Jenja BV3	2,2	2,9	2,3	2,2	5,7	5,1	9,0	1,3
Jenja BV4	1,0	1,5	1,1	1,0	2,9	3,1	6,7	0,6

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
Jenja BV6	0,6	1,0	0,7	0,6	1,7	1,9	7,0	0,3
Jenja BV7	2,3	3,0	2,3	2,3	5,6	4,7	8,2	1,4
Jenja BV8	1,6	2,3	1,8	1,6	4,0	3,5	7,7	1,0
Jenja BV9-1	0,6	1,0	0,7	0,6	1,5	1,5	5,8	0,4
Jenja BV9-2	0,3	0,5	0,4	0,3	1,0	1,3	5,0	0,2
Jenja BV10	1,6	2,3	1,4	1,6	3,5	3,0	4,7	1,0
Jenja BV11	0,6	1,0	0,7	0,6	1,5	1,6	6,3	0,4
Jenja BV12	2,7	3,5	2,7	2,7	8,4	7,9	9,5	1,6
BV Ain Moula Ali	3,9	4,7	3,9	3,9	13,2	12,2	11,9	2,3
BV Merzeg Am 12	1,2	1,8	1,2	1,2	4,4	4,9	6,7	0,7
BV Merzeg Am 11	2,3	3,0	1,7	2,3	11,9	14,8	11,8	1,4
BV Merzeg Am 13	1,7	2,4	1,6	1,7	6,0	6,3	7,4	1,0
BV Merzeg Am 14	2,4	3,2	2,1	2,4	8,4	8,4	7,7	1,5
BV Merzeg Am 10	2,0	2,7	2,0	2,0	7,0	7,3	8,9	1,2
BV Merzeg Am 8	2,8	3,6	2,6	2,8	10,9	11,2	9,6	1,7
BV Merzeg Am 9	2,1	2,9	2,1	2,1	7,6	7,8	8,6	1,3
BV Merzeg Am 7	2,7	3,5	2,3	2,7	8,4	7,8	7,4	1,6
BV Merzeg Am 6	3,1	3,9	2,4	3,1	11,3	11,3	8,6	1,9
BV Merzeg Am 5	2,5	3,3	2,1	2,5	10,6	11,7	9,6	1,5
BV Arred	3,4	4,3	3,2	3,4	10,9	9,9	9,3	2,1
BV Sehb Rmel	6,7	7,4	6,5	6,7	21,7	18,2	14,4	4,0
BV1 Lagh	1,9	2,6	1,8	1,9	4,9	4,5	6,4	1,1
BV2 Lagh	0,6	1,0	0,7	0,6	1,7	1,8	4,6	0,4
BV3 Lagh	0,3	0,5	0,3	0,3	0,7	0,8	3,1	0,2
BV4 Lagh	0,2	0,5	0,3	0,2	0,6	0,8	3,1	0,1
BV5 Lagh	0,5	0,9	0,5	0,5	1,2	1,3	3,7	0,3

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
BV6 Lagh	0,2	0,4	0,2	0,2	0,5	0,7	3,4	0,1
BV7 Lagh	0,5	0,8	0,5	0,5	1,4	1,7	4,0	0,3
BV8 Lagh	0,2	0,4	0,3	0,2	0,6	0,7	3,2	0,1
BV Merzeg Am 1	2,2	3,0	2,2	2,2	6,4	5,9	7,9	1,3
BV Merzeg Am 2	0,8	1,3	0,8	0,8	3,0	3,7	6,1	0,5
BV Merzeg Am 3	2,7	3,5	2,3	2,7	9,0	8,8	7,7	1,6
BV Merzeg Am 4	3,4	4,2	2,8	3,4	11,7	11,1	8,4	2,0
BV Timlikch	7,2	7,9	6,9	7,2	25,5	22,0	15,2	4,3
BV Oued Araba	3,9	4,7	4,3	3,9	12,6	11,4	14,9	2,3
BV Oued Skhkhana	4,8	5,7	5,2	4,8	15,2	13,1	16,0	2,9
BV Ch Oulad Ghannam	1,7	2,3	2,1	1,7	5,1	5,0	12,9	1,0
BV Al Khdadra	1,7	2,4	2,2	1,7	5,3	5,2	14,1	1,0
BV Boumoussa 2	2,0	2,7	2,3	1,9	6,3	6,3	12,0	1,2
BV Boumoussa 3	2,3	3,0	2,6	2,3	6,6	6,1	12,0	1,4
BV Sidi Moumen	2,1	2,9	2,4	2,1	6,8	6,6	11,3	1,3
BV Boumoussa 1	4,3	5,2	4,9	4,3	14,7	13,3	17,1	2,6
BV Touijine	3,7	4,5	4,3	3,7	10,8	9,3	17,1	2,2
BV Tamdrost 3	3,1	4,0	3,9	3,1	8,6	7,4	18,6	1,9
BV Kodiat El Garn 2	3,0	3,8	3,6	3,0	8,2	7,0	15,1	1,8
BV Kodiat El Garn 1	5,9	6,7	6,2	5,9	21,8	19,8	17,7	3,5
BV Chaâbat Abda	1,7	2,4	2,3	1,7	4,1	3,6	14,5	1,0
BV Chaâbat Ezza'ter	1,7	2,4	2,4	1,7	4,0	3,5	16,4	1,0
BV Chaâbat Rmoulat	1,2	1,8	1,7	1,2	3,0	2,8	12,9	0,7
BV Mazer 2	1,0	1,5	1,1	1,0	3,0	3,3	6,9	0,6
BV Mazer 1	5,4	6,2	6,4	5,4	17,7	15,3	22,5	3,2
BV Tamdrost 2	5,0	5,8	5,7	4,9	16,8	15,0	19,8	3,0

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
BV Tamdrost 1	6,1	6,8	6,2	6,0	26,6	26,1	17,9	3,6
BV Mazer 3	5,2	6,0	5,0	5,2	21,8	21,5	14,4	3,1
BV Chaâbat Lemsalla	1,2	1,7	1,6	1,2	2,8	2,6	13,7	0,7
BV Oued Lqirae	1,7	2,4	2,3	1,7	3,8	3,2	14,6	1,0
BV Chaâbat Echaguiya	0,6	1,0	0,9	0,6	1,5	1,5	11,5	0,4
BV EL Heimer 3	15,0	14,5	12,3	14,9	40,5	27,3	14,0	9,0
BV EL Heimer 2	3,0	3,8	3,4	3,0	8,0	6,8	14,0	1,8
BV EL Heimer 1	5,8	6,6	6,4	5,7	20,5	18,4	20,0	3,5
BV Fayda 3	4,6	5,4	4,0	4,6	17,2	16,3	11,0	2,8
BV Fayda 2	4,4	5,3	4,5	4,4	15,0	13,5	13,2	2,7
BV Fayda 1	1,4	2,0	1,7	1,4	3,6	3,4	10,0	0,8
BV Affluent Fayda	0,5	0,9	0,7	0,5	1,4	1,6	9,2	0,3
BV Zririf 1	2,5	3,3	3,2	2,5	7,3	6,7	16,8	1,5
BV Zririf 3	5,4	6,2	5,2	5,3	21,1	20,0	14,5	3,2
BV Zririf 2	5,8	6,6	5,3	5,8	19,0	16,3	12,2	3,5
BV Affluent Zririf 1	1,6	2,2	2,0	1,6	4,1	3,8	13,4	0,9
BV Hassar 1	4,9	5,7	4,5	4,9	17,5	16,0	11,9	2,9
BV Ayyada 3	4,4	5,2	4,1	4,4	19,4	20,2	13,2	2,6
BV Ayyada 2	6,4	7,1	6,1	6,3	19,9	16,4	13,3	3,8
BV Ayyada 1	3,8	4,7	4,7	3,8	12,3	11,1	20,8	2,3
BV Chouiref	5,1	5,9	5,7	5,1	16,2	13,9	17,5	3,1
BV Ch1 Cebbah	0,6	1,0	0,9	0,6	1,4	1,4	10,3	0,4
BV Ch2 Cebbah	0,3	0,6	0,4	0,3	0,9	1,1	5,5	0,2
BV Ch1 El Gara	0,4	0,7	0,5	0,4	0,8	0,8	7,0	0,2
BV Ch2 El Gara	0,4	0,7	0,6	0,4	0,7	0,6	9,9	0,2
BV Dil Al Awda	6,1	6,9	7,0	6,1	19,6	16,5	21,6	3,7

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
BV TM1	2,1	2,8	1,8	2,1	7,4	7,7	7,5	1,2
BV TM2	2,0	2,7	1,6	2,0	6,2	6,2	6,4	1,2
BV TM3	1,7	2,4	1,6	1,7	5,1	5,0	6,7	1,0
BV TM4	1,1	1,7	1,1	1,1	3,6	3,9	6,0	0,7
BV TM5	0,5	0,8	0,6	0,5	1,3	1,4	5,4	0,3
BV TM6	1,0	1,6	1,0	1,0	3,1	3,3	5,9	0,6
BV TM7	0,6	1,1	0,6	0,6	2,1	2,6	4,9	0,4
BV TM8	1,0	1,5	1,0	1,0	3,1	3,4	5,7	0,6
BV TM9	1,6	2,2	1,6	1,6	4,1	3,7	6,2	0,9
BV TM10	0,6	1,0	0,6	0,6	1,5	1,5	3,8	0,4
BV TM11	0,9	1,3	0,8	0,9	2,7	3,1	5,2	0,5
BV TM12	0,7	1,1	0,5	0,7	2,5	3,1	5,4	0,4
BV TM13	0,5	0,9	0,6	0,5	1,5	1,8	6,0	0,3
BV TM14	0,4	0,8	0,6	0,4	1,0	1,0	6,7	0,3
BV TM15	0,4	0,7	0,5	0,4	1,3	1,8	6,8	0,2
BV Hassar aval	3,5	4,3	3,0	3,4	10,1	8,9	8,2	2,1
BV Hassar 3	2,4	3,1	2,1	2,4	11,4	13,6	10,9	1,4
BV Hassar 2	8,8	9,4	8,3	8,8	31,7	26,6	16,3	5,3
BV-Dayat Lahraouiyine	0,5	0,9	0,6	0,5	1,4	1,6	5,0	0,3
BV-Dayat Lhalhal	0,4	0,8	0,5	0,4	1,5	2,0	5,3	0,3
BV-Mwilha	2,1	2,8	2,1	2,1	6,0	5,6	8,0	1,2
Bassin El Malleh								
BV Al Atach	7,3	8,0	8,6	7,2	22,9	18,6	26,8	4,4
BV Aricha	4,2	5,1	5,2	4,2	13,9	12,6	21,3	2,5
BV Bast Al Arab	3,7	4,6	4,6	3,7	10,7	9,1	20,0	2,2
BV ElGara	5,9	6,6	6,7	5,8	18,9	16,0	21,6	3,5

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
BV ElMalleh	10,0	10,4	9,9	10,0	37,7	31,8	20,2	6,0
BV Hessar	8,9	9,4	8,4	8,8	35,0	30,9	17,7	5,3
BV BVI	6,7	7,4	6,8	6,7	24,9	22,3	17,1	4,0
BV IH	2,6	3,4	2,6	2,6	6,9	6,0	9,0	1,5
BV Mkahlou	6,3	7,1	6,7	6,3	23,3	21,0	18,6	3,8
BV Tamlalet	3,4	4,2	3,8	3,4	12,3	12,0	15,2	2,0
BV Ueltet	5,9	6,7	6,7	5,8	17,3	14,1	20,9	3,5
BV Zamrane	5,1	5,9	5,2	5,1	17,9	16,1	14,4	3,1
BV Zamrine1	8,5	9,0	8,6	8,4	28,4	23,3	19,3	5,1
BV Zamrine2	5,2	6,0	5,7	5,1	19,6	18,4	18,4	3,1
BV Zamrine3	4,6	5,4	5,4	4,5	16,5	15,4	20,7	2,7
BV Zamrine4	5,5	6,3	6,4	5,5	14,8	11,6	21,2	3,3
Bassin Bouskoura								
Ch1.Sidi Maârouf	1,9	2,6	2,1	1,8	4,3	3,6	9,5	1,1
Ch2.Sidi Maârouf	1,9	2,6	2,2	1,8	5,3	5,1	11,2	1,1
O.Ain Jemaâ	3,3	4,1	2,9	3,3	9,9	8,8	8,1	2,0
O.Bouskoura	3,2	4,0	3,0	3,2	9,3	8,1	8,7	1,9
Ch.Ville verte	2,4	3,1	2,1	2,4	8,2	8,2	7,8	1,4
Ch.Gare Bouskoura	2,4	3,2	2,6	2,4	9,5	10,3	12,0	1,4
O.Bouskoura Amont	1,1	1,6	1,2	1,1	2,6	2,4	7,1	0,6
O.Mziria	3,5	4,3	3,4	3,5	12,0	11,4	11,0	2,1
O.Limirikane	2,7	3,5	2,9	2,7	10,0	10,1	11,3	1,6
Bassin Bouregreg et bassins côtiers								
Aguibat Ezziar	7,0	7,7	7,6	7,0	30,3	29,0	22,1	4,2
Ain Loudah	14,5	14,1	15,0	14,4	52,8	41,5	28,0	8,7
Ait Boukhouyou	6,4	7,2	7,8	6,4	20,7	17,3	27,0	3,9

Bassin versant	Temps de concentration (h)							Lag time (h)
	Kirpich	Ven Te Chow	US Corps	Californienne	Turraza	Ventura	Giandotti	
Bge.ain Kwachia	7,0	7,7	7,0	7,0	25,5	22,4	17,1	4,2
Bge.SMBA	7,6	8,2	7,6	7,5	32,8	31,1	19,3	4,5
Boukhmis	10,8	11,1	11,5	10,8	49,2	45,1	27,6	6,5
Cheikh Rguig	7,9	8,5	8,5	7,9	28,4	24,4	22,2	4,7
Fadane Taba	11,8	11,9	12,5	11,7	45,4	37,9	27,2	7,1
Ksisksou	10,4	10,7	11,3	10,4	38,2	31,7	26,7	6,2
Lalla Chafia	9,1	9,6	9,7	9,0	41,8	39,7	25,3	5,4
Nfifikh aval	5,8	6,6	6,3	5,7	19,8	17,3	18,4	3,5
O.Aakrach	7,3	8,0	7,4	7,3	25,3	21,5	17,4	4,4
O.Grou	7,1	7,8	7,7	7,1	25,4	22,1	20,8	4,2
O.Kourifla	7,2	7,9	7,0	7,2	29,7	27,5	16,8	4,3
O.Mechra	8,9	9,4	8,9	8,9	30,6	25,1	18,7	5,3
Ouljet Haboub	13,7	13,5	13,3	13,7	68,3	63,4	26,3	8,2
Ras fathia	7,6	8,2	8,0	7,5	33,2	31,6	22,0	4,5
Sidi Amar	10,4	10,7	12,2	10,4	29,7	21,7	32,0	6,3
Sidi Jabour	11,2	11,4	12,2	11,2	38,1	30,0	27,2	6,7
Sidi Lamine	10,0	10,4	10,5	10,0	39,3	34,0	24,3	6,0

***Annexe 6: Résultats de simulations
hydrologiques pour les conditions
d'humidité II et I***

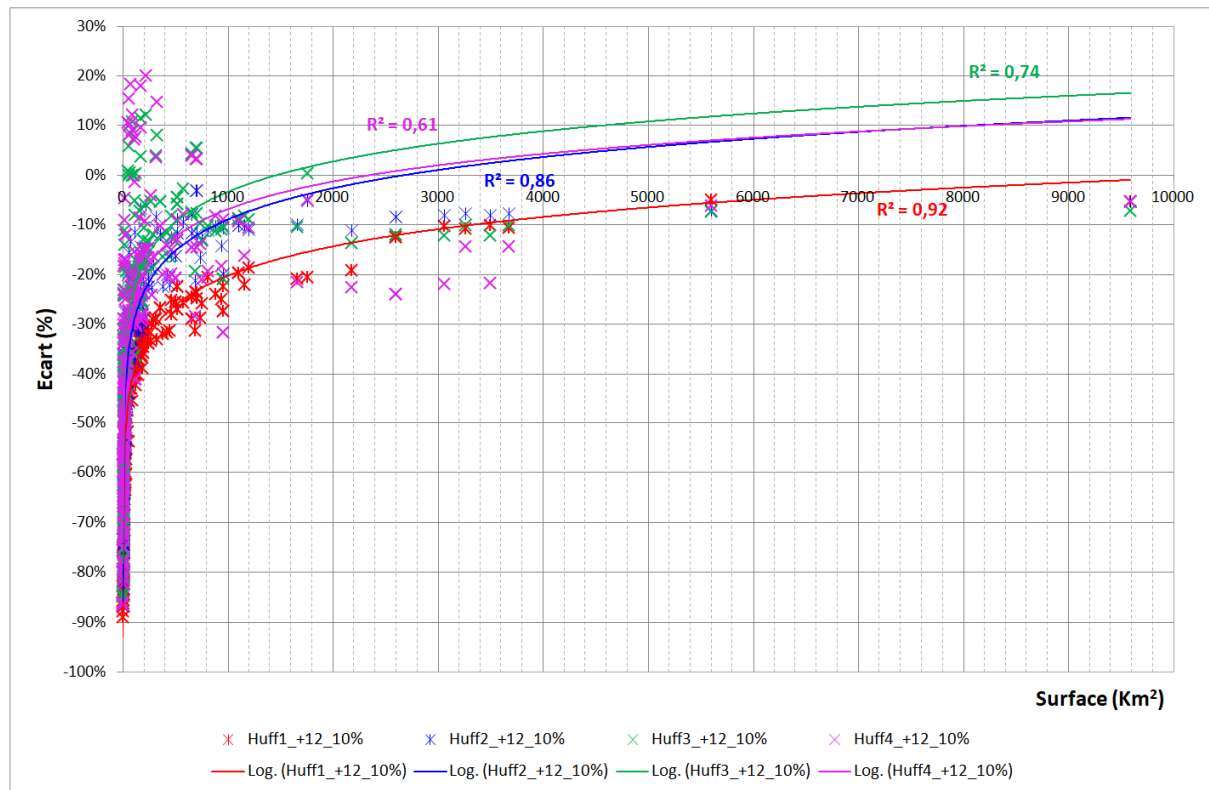


Figure 118: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II)

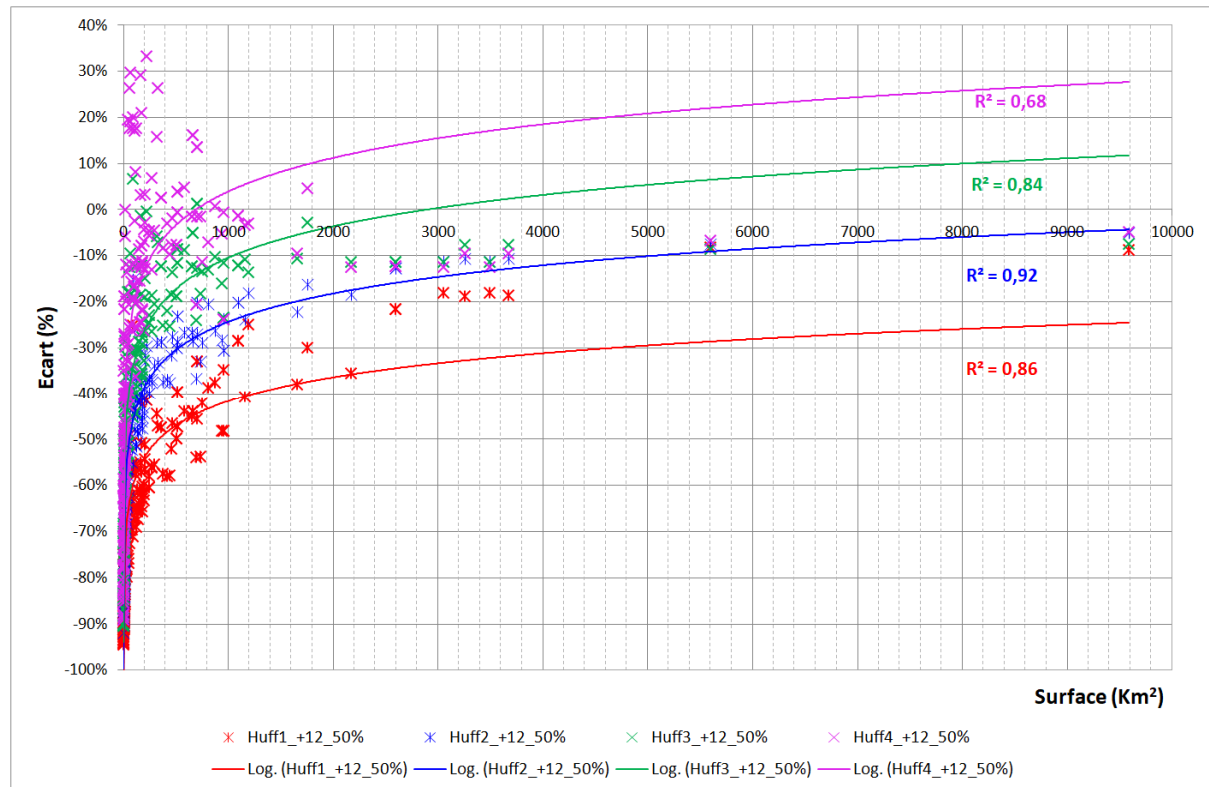


Figure 119: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II)

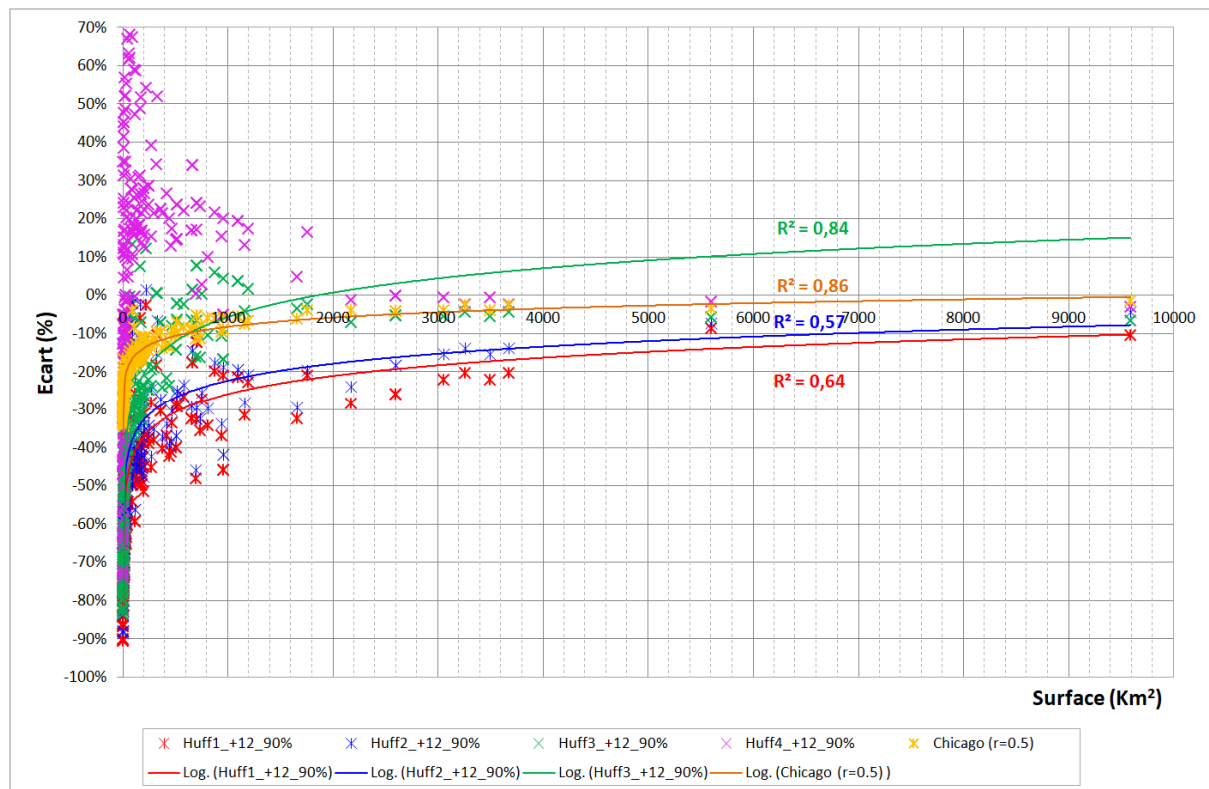


Figure 120: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité II)

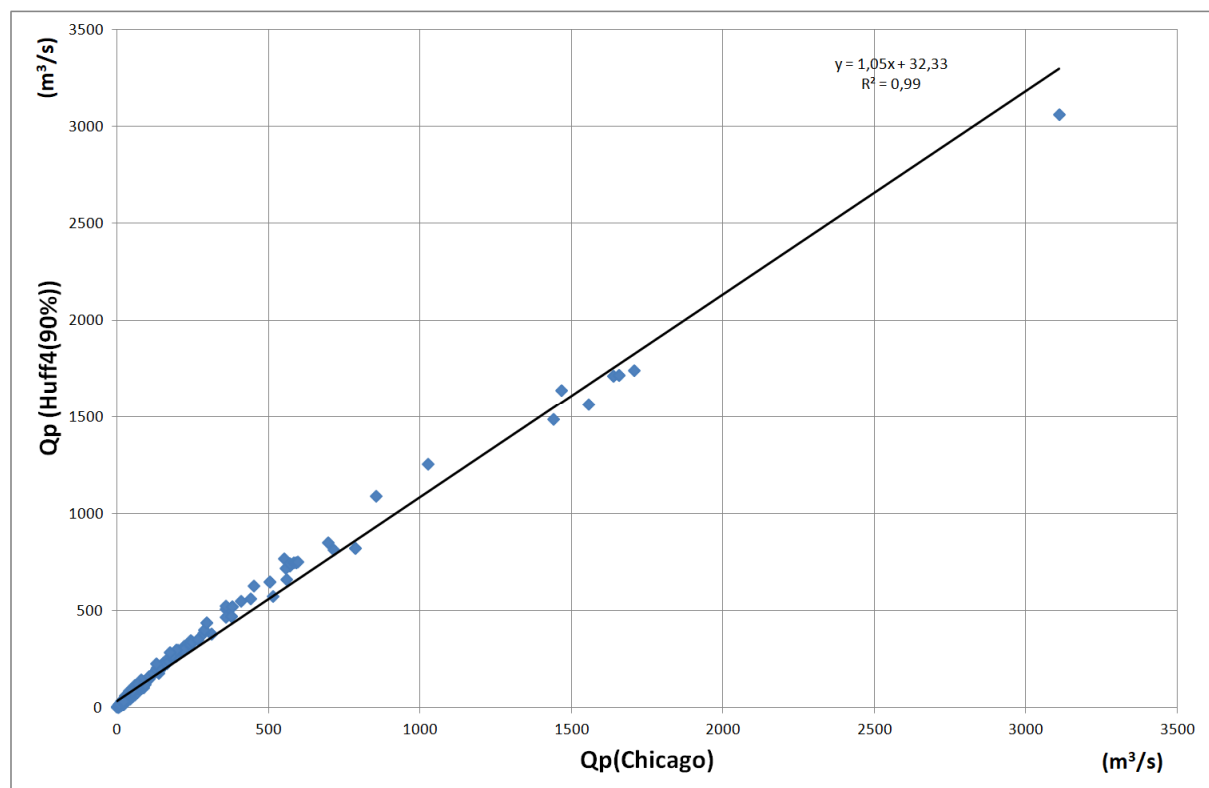


Figure 121: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ème} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité II)



Figure 122: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II)

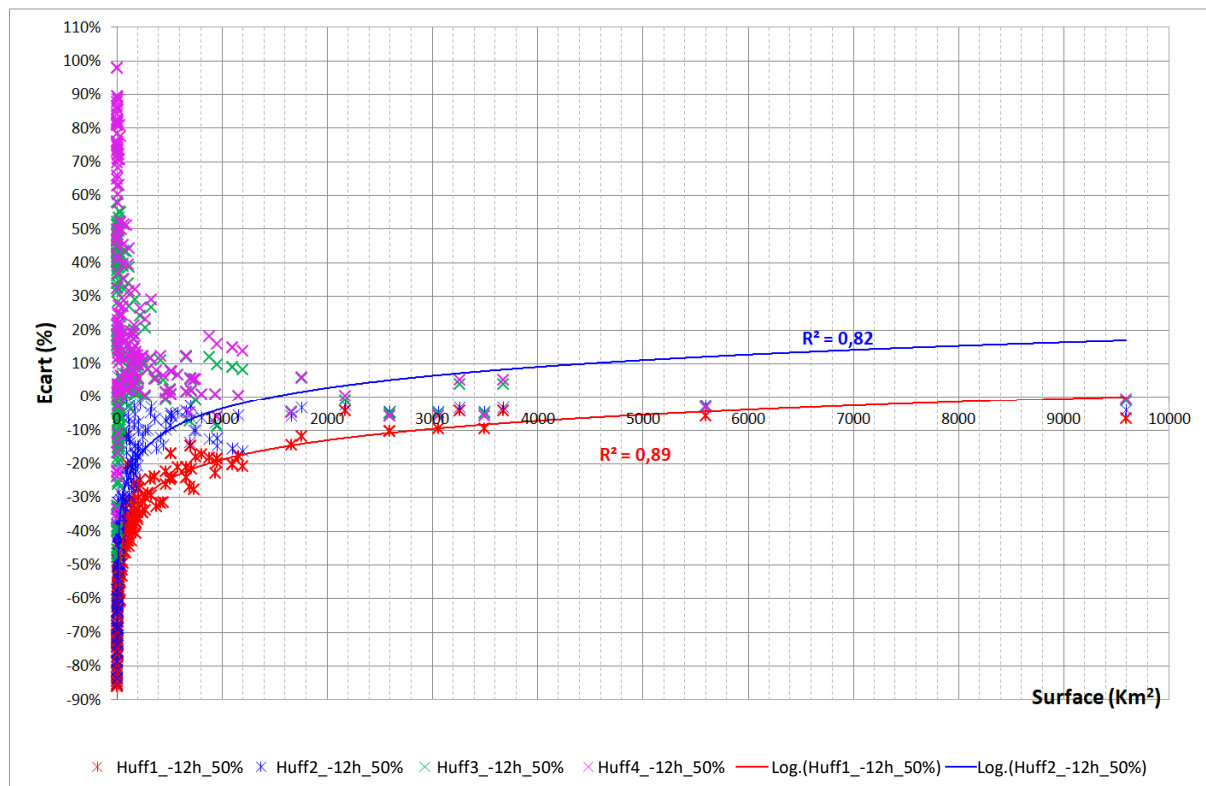


Figure 123: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II)

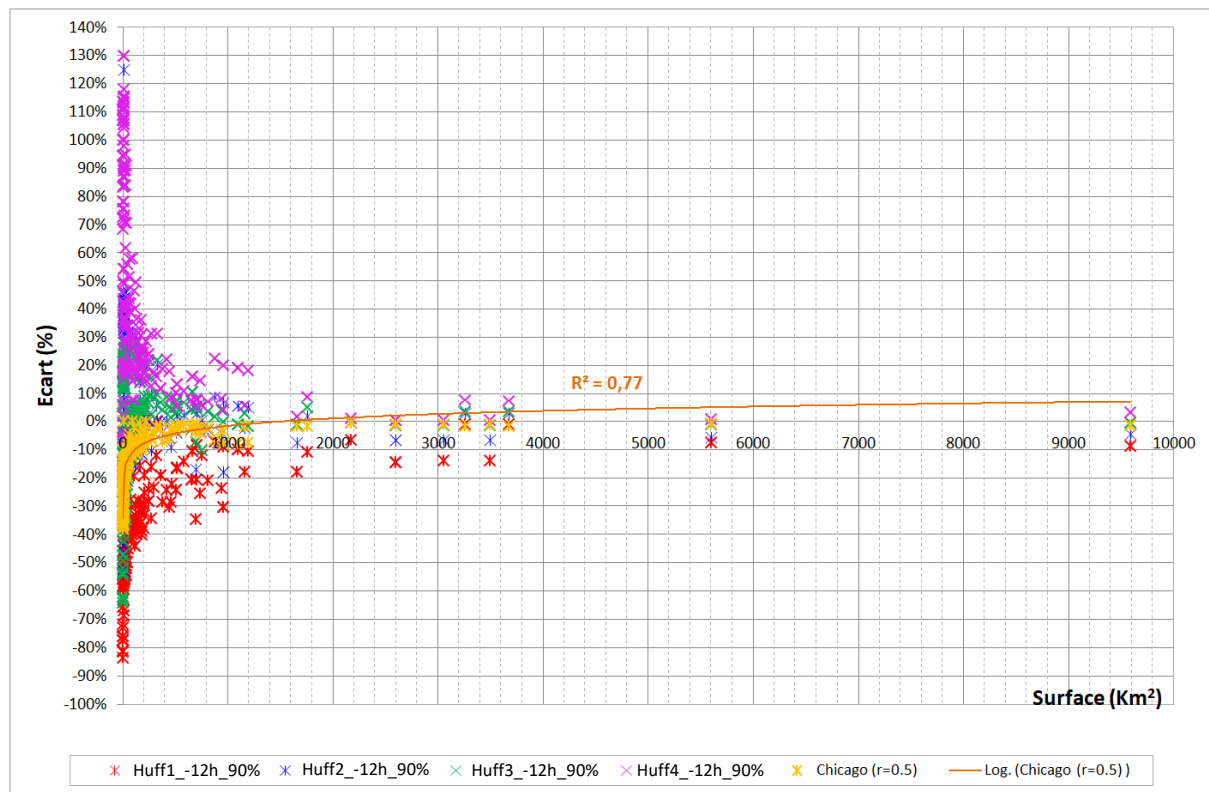


Figure 124: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité II)

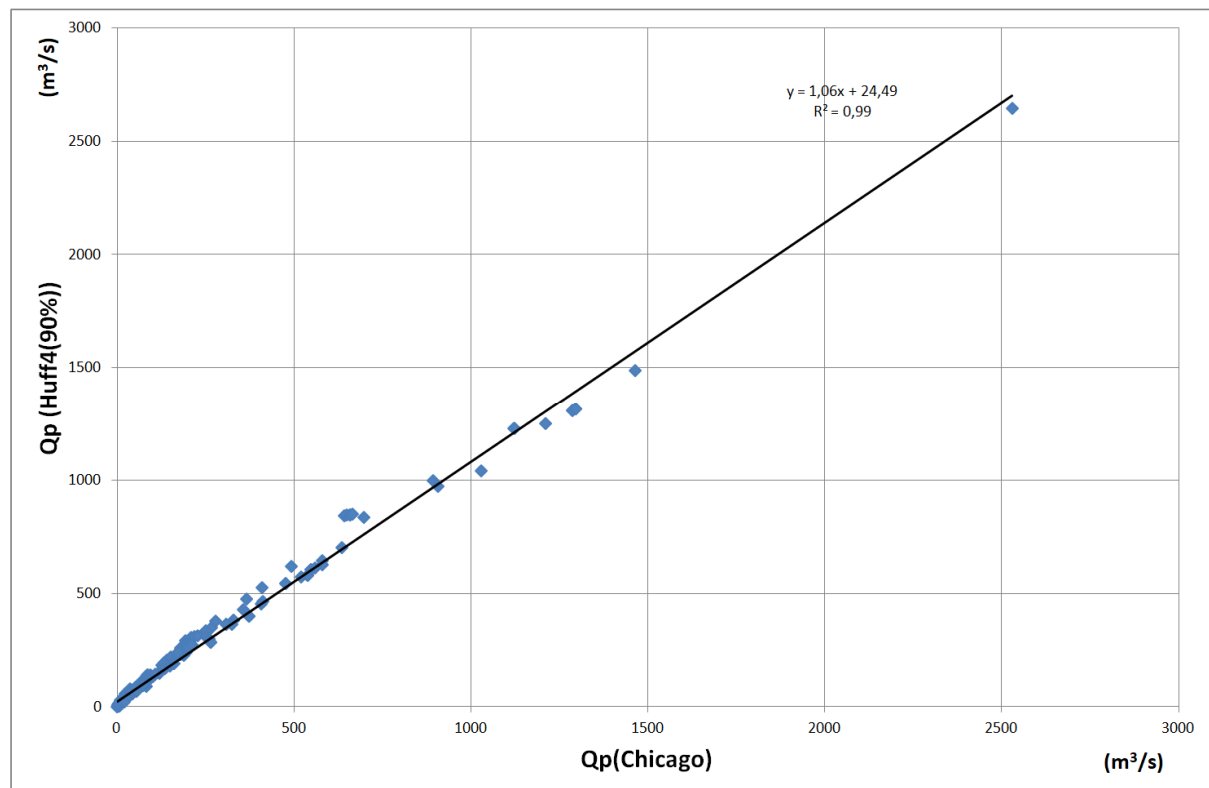


Figure 125: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ème} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité II)

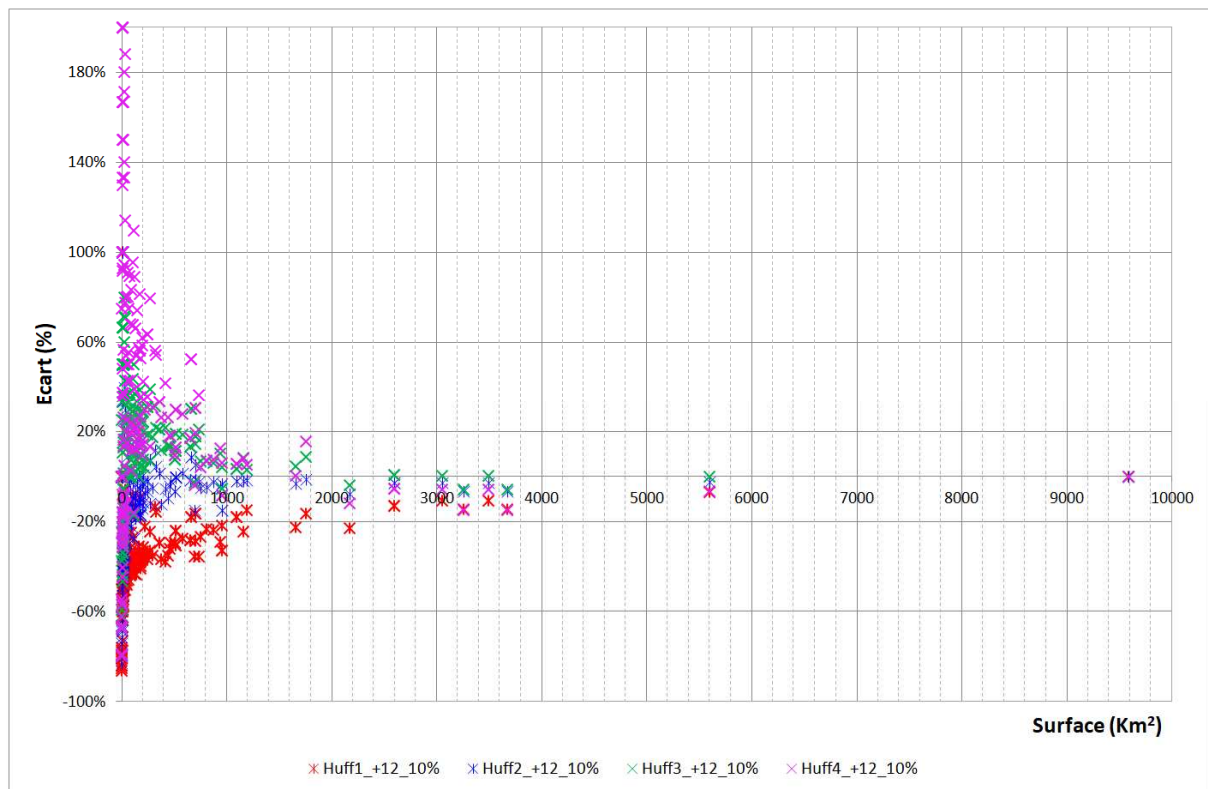


Figure 126: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I)

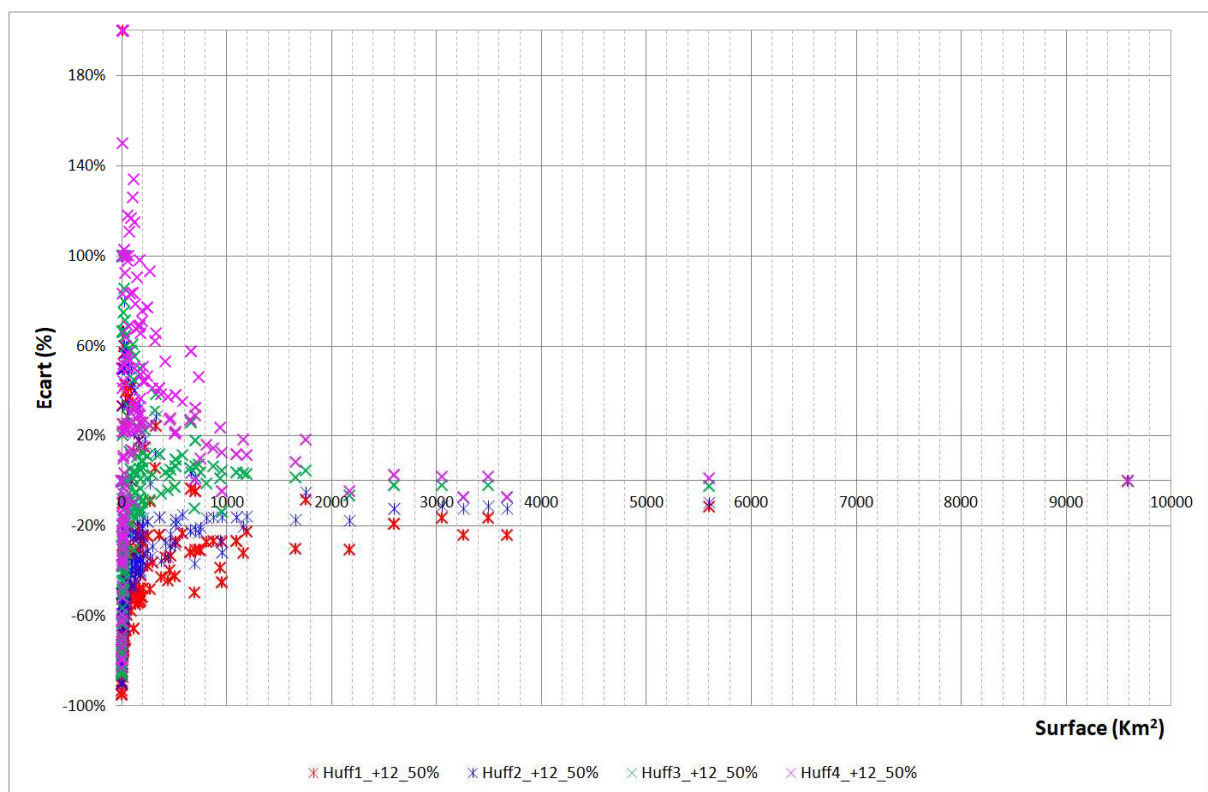


Figure 127: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I)

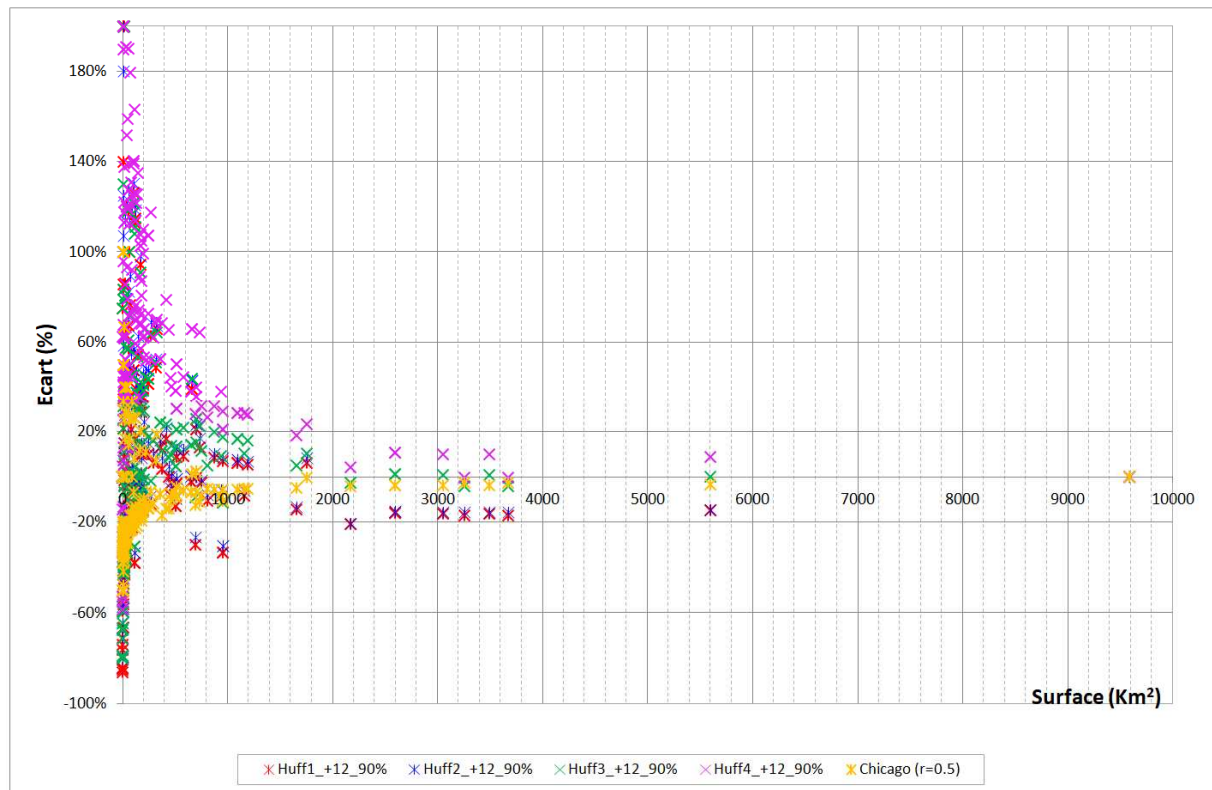


Figure 128: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 24h (Condition d'humidité I)

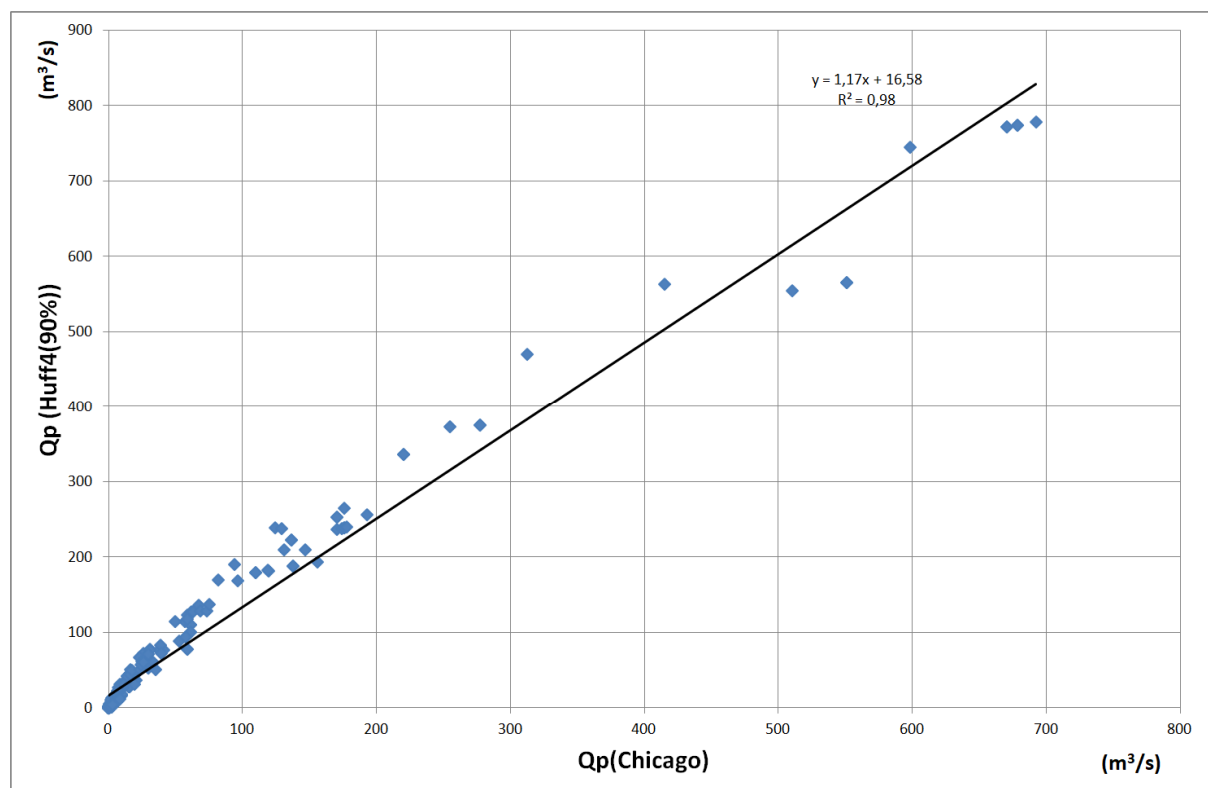


Figure 129: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 24h (Condition d'humidité I)

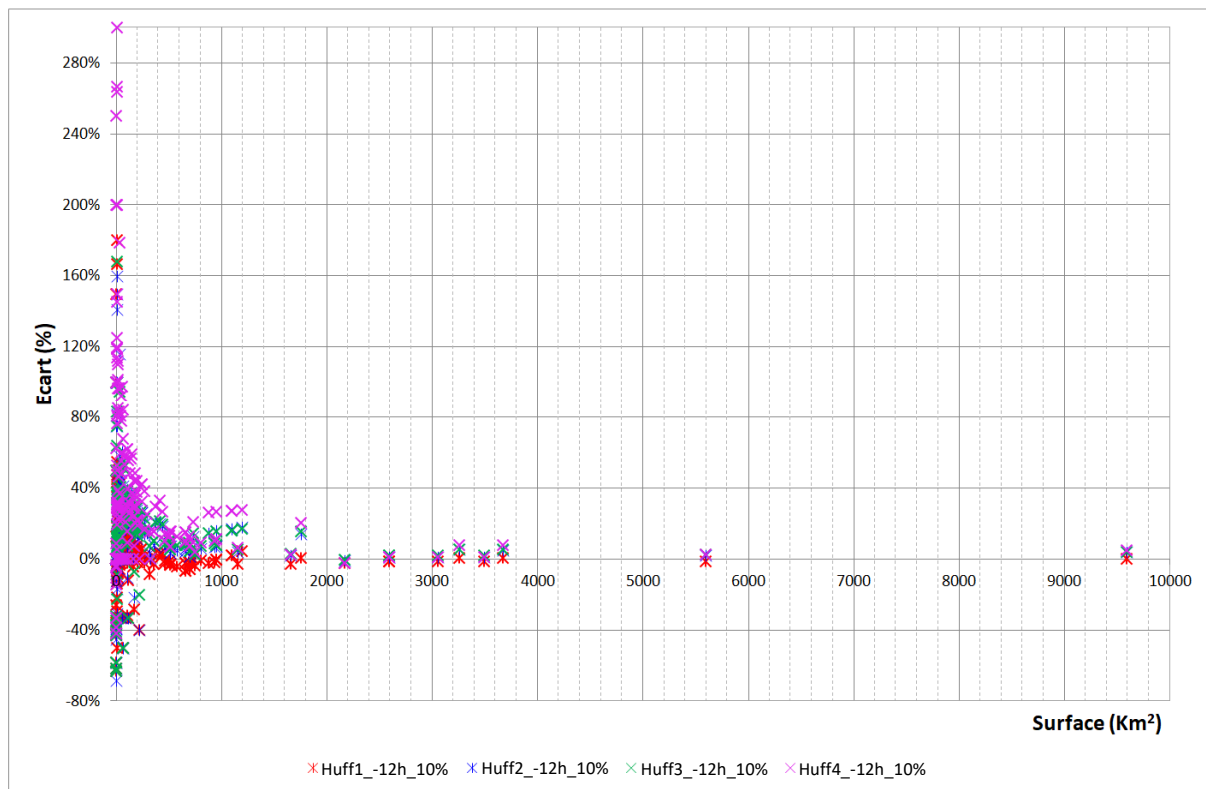


Figure 130: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (10%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I)

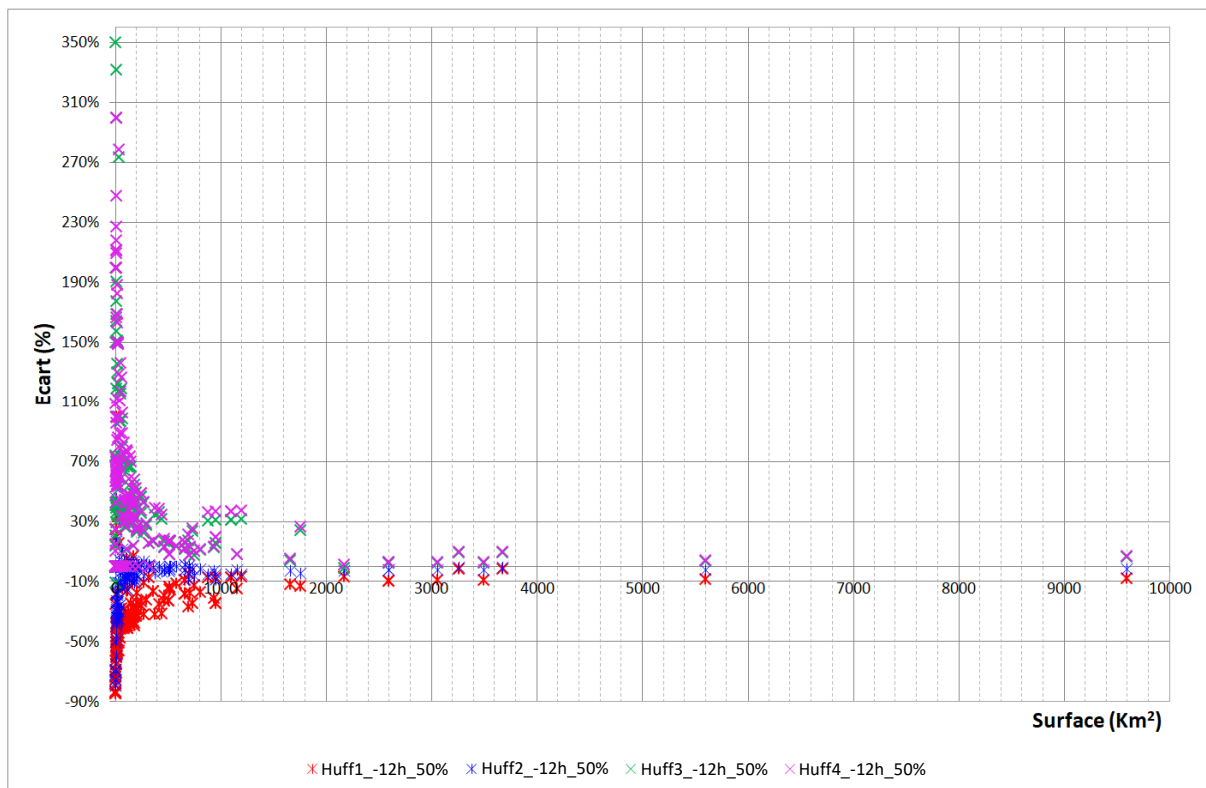


Figure 131: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (50%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I)

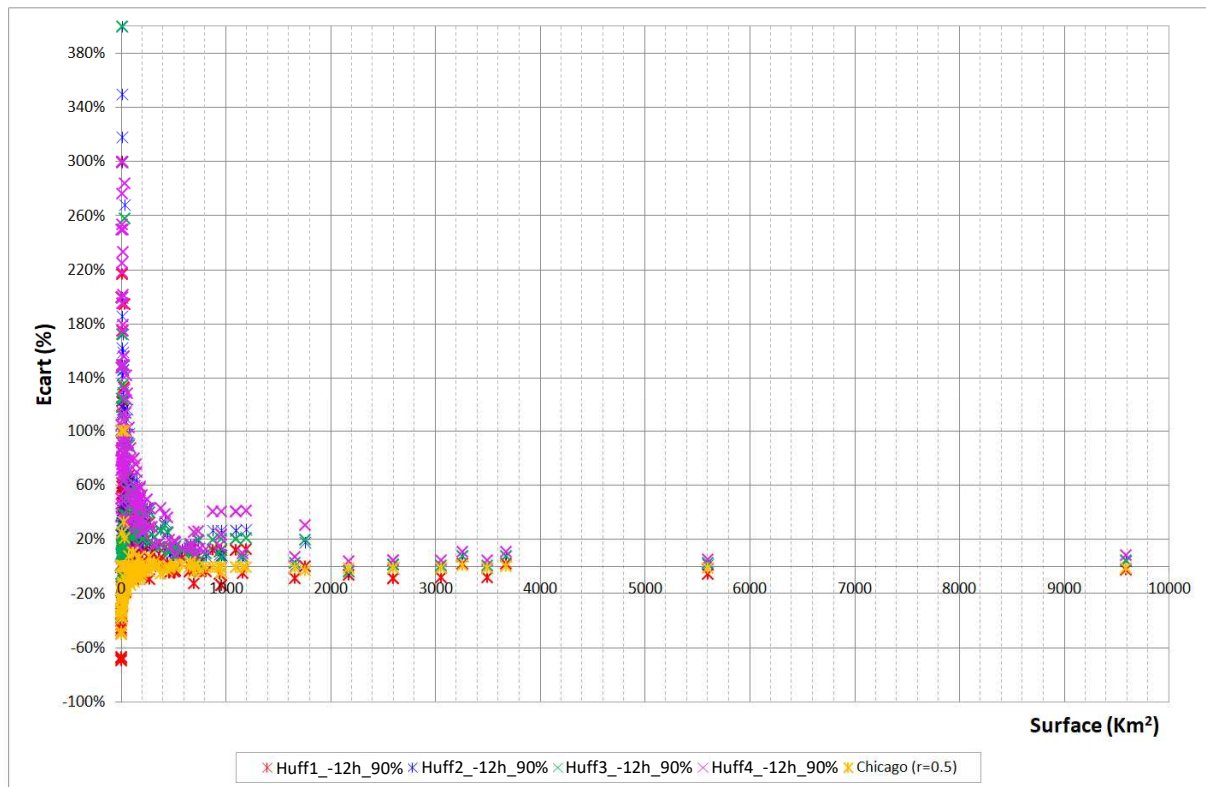


Figure 132: Ecart des débits de pointe calculés à partir des courbes de Huff (90%) par rapport à la distribution SCS Type II pour une pluie centennale de 12h (Condition d'humidité I)

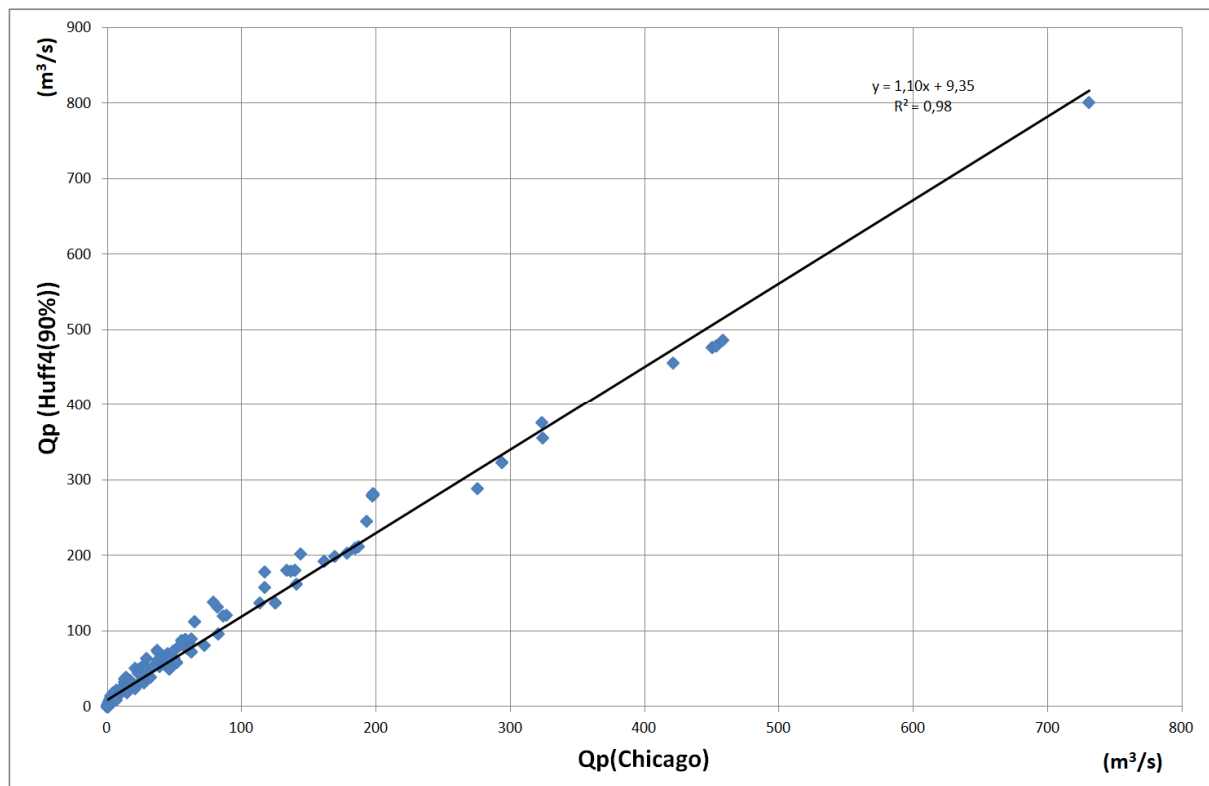


Figure 133: Confrontation des débits de pointe calculés par la distribution de Chicago et la courbes de Huff du 4^{ième} quartile avec une probabilité de 90% pour une pluie de durée de 12h (Condition d'humidité I)

Annexe 7: Articles scientifiques publiés

Résumé

Cette recherche concerne le traitement des pluies instantanées dans la zone d'action de l'ABHBC (20.470 km²). Ce territoire a été choisi comme une zone pilote dans le contexte marocain. Les données utilisées sont les pluies instantanées de 25 pluviomètres automatiques couvrant la période 2009-2016. Les propriétés des pluies instantanées ont été analysées en se basant sur les caractéristiques des averses retenues selon la durée minimale entre les averses (MIET), les lames d'eau et les durées des averses ainsi que leurs quartiles. Une analyse de la répartition spatiale des résultats obtenus a été également effectuée. Ce travail constitue une première dans l'analyse des pluies instantanées dans le contexte marocain et montre l'importance du MIET dans le choix des averses. Après une revue de littérature des hyétogrammes synthétiques de pluie de projet, le choix a statué sur le développement des courbes de Huff adaptées au contexte local. La modélisation hydrologique de 80% de la zone a permis de proposer la distribution de type Chicago, pour le calcul des débits de pointe. Les deux distributions de Huff4 (90%) (0-12h et +12h) doivent être utilisées pour la vérification des dimensions adoptées pour les ouvrages hydrauliques et pour la délimitation de la zone d'aléa inondation.

Mots-clefs : Pluie instantanée, hyétogramme synthétique, pluie de projet, courbes de Huff, modélisation hydrologique.

Abstract

This research concerns the treatment of instantaneous rainfall in area monitored by the HBABC (20.470 km²). This territory has been chosen as a pilot zone in the Moroccan context. The data used is the instantaneous rainfall from 25 automatic rain gauges covering the period 2009-2016. The properties of the instantaneous rainfall were analyzed based on the characteristics of the storms selected according to the Minimum Inter-Events Time (MIET), the storms depth, the storm durations and their quartiles. An analysis of the spatial distribution of the results obtained was also carried out. This work constitutes a first in the analysis of instantaneous rainfall in the Moroccan context and shows the importance of the MIET in the choice of storms. After a literature review of synthetic design storm hyetograph, the choice was made on the development of Huff curves adapted to the local context. The hydrological modeling of 80% of the area made it possible to propose the Chicago type distribution for the calculation of peak flows. The two Huff4 (90%) distributions (0-12h and +12h) should be used to verify the dimensions adopted for the hydraulic structures and for the delimitation of the flood hazard area.

Key Words : Instantaneous rainfall, synthetic hyetograph, design rainfall, Huff curves, hydrological modeling.