

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté Technologie
Département Hydraulique
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Appliquée et Environnement

THÈSE

Présentée par

AZOUNE Noredine

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR EN SCIENCES

Filière : Hydraulique

Option : Hydraulique Générale

Thème

**MÉTHODOLOGIE POUR LA GESTION DES EAUX
PLUVIALES URBAINES EN ALGÉRIE**

Soutenue le 22 avril 2025

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Mr SAOU Abdelhamid	M.C.A	Univ. de Bejaia	Président
Mr CHERRARED Marzouk	Professeur	USTHB d'Alger	Rapporteur
Mr IKNI Tahar	M.C.A	Univ. de Bejaia	Examineur
Mr BERMAD Abdelmalek	Professeur	ENP d'Alger	Examineur

Année Universitaire : 2024 - 2025

DÉDICACES

Je dédie ce travail de recherche :

A ma petite famille, ma femme et mes enfants.

A ma famille, mon père et ma mère, mes frères plus leurs femmes et leurs enfants.

A mes beaux-parents et leurs enfants.

A toutes les personnes de ma grande famille.

A tous mes amis de l'université Abderrahmane Mira

A tout ceux qui ont participé à l'élaboration de ce travail.

REMERCIEMENTS

Dieu merci de m'avoir permis de publier notre article et de finaliser cette thèse.

Ce travail de recherche n'aurait pas été réalisable sans le soutien bénéficiaire, continu ou ponctuel de nombreuses personnes et institutions. Je leur adresse mes plus sincères remerciements.

- *Je tiens à remercier en tout premier lieu Marzouk CHERRARED, Professeur d'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Bab Ezzouar, Alger, Algérie, qui a dirigé cette thèse, qui a toujours été présent au cours de ces années et qui tout au long de ces longues durées a su orienter mes travaux de recherches. Sa disponibilité, ses précieux conseils, ses relectures et ses corrections, ont été une grande source d'encouragements et de réussite.*
- *Je remercie les membres de jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail.*
- *Je remercie les membres du comité scientifique, chargé de la poste graduation, et les enseignants du département hydraulique en général.*
- *Je tiens à remercier le Directeur de l'Office Nationale d'Assainissement ONA, Monsieur ATHMANO Mourad d'avoir accepté notre demande d'accès aux données indispensables pour notre travail de recherche, sans oublier TABIA Mourad, BOURAS Abdelhakim, Sahali,*
- *Je remercie tous mes collègues que j'ai côtoyés durant ces années de préparation de thèse, en particulier HAMOURA Lakhder, LOUCIF ben Ahmed, pour leur soutien, ainsi que le groupe de la direction des ressources en eau de la Wilaya de Bejaia.*
- *Un énorme remerciement à ma famille. Durant toute cette période, ils m'ont permis par leur soutiens et encouragement de créer les bonnes conditions bénéfiques à un travail de recherche. Leur présence à mes côtés et leur constante aide ont permis aussi de gérer plusieurs situations.*

Enfin, Au terme de cette rédaction, je tiens à remercier tous ceux qui m'ont entouré et soutenu durant ces années et sans lesquels cette thèse n'aurait pas abouti.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XII
LISTE DES ANNEXES.....	XIII
RÉSUMÉ.....	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	15
CHAPITRE 1 LES EAUX PLUVIALES EN MILIEU URBAIN – PROBLÉMETIQUE DES INONDATIONS PLUVIALES.....	21
1.1 Introduction	21
1.2 La pluie et le problème de l'aléa pluviométrique.....	21
1.2.1 Les précipitations	22
1.2.2 Intérêt de modéliser la pluie	23
1.2.3 L'approche statistique pour modéliser la pluie	24
1.2.4 Difficultés et problèmes associés à la modélisation de la pluie	26
1.3 Le ruissellement pluvial et les facteurs d'influence	28
1.3.1 Définition du ruissellement pluvial.....	29
1.3.2 Paramètres influençant le ruissellement pluvial	29
1.4 Les modèles classiques pluies – débits pour modéliser le ruissellement pluvial urbain	30
1.4.1 Le concept général des modèles classiques pluies – débits	31
1.4.2 Les méthodes classiques.....	32
1.4.3 La tendance observée actuellement.....	36
1.5 Les réseaux d'assainissement pluviaux comme solutions de drainage des eaux pluviales urbaines	38
1.5.1 Le réseau pluvial	38
1.5.2 Les méthodes de dimensionnement du RAP.....	40
1.5.3 Les problèmes de fonctionnement du RAP.....	42
1.5.4 Les problèmes de gestion du réseau pluvial en milieu urbain.....	46

1.6	Les causes et les conséquences des inondations pluviales urbaines	47
1.6.1	Les principales causes des inondations pluviales urbaines	49
1.6.2	Les conséquences des inondations pluviales urbaines	51
1.7	Conclusion.....	52
CHAPITRE 2 GESTION DES EAUX PLUVIALES – ÉTAT DE L’ART		53
2.1	Introduction	53
2.2	Intérêt socio-économique de la gestion des eaux pluviales urbaines	54
2.2.1	Limiter l’impact des inondations pluviales	54
2.2.2	Développement durable dans la gestion des eaux pluviales urbaines	57
2.3	Méthodes de gestion des eaux pluviales adoptées dans le monde	58
2.3.1	La naissance de la gestion des eaux pluviales en ville	58
2.3.2	Les techniques alternatives de la gestion des eaux pluviales urbaines (Petrucci, 2012) 59	
2.3.3	Intégration des techniques alternatives en milieu urbain	67
2.4	La gestion à l’aide des outils d’aide à la décision (OAD).....	68
2.4.1	Le domaine d’aide à la décision	68
2.4.2	Choix d’une approche/méthode d’aide à la décision	71
2.4.3	Formalisation du problème décisionnel et la recherche de résultats	73
2.5	Problématique de la gestion des eaux pluviales urbaines en Algérie.....	76
2.5.1	Les inondations urbaines en Algérie	76
2.5.2	Problèmes liés à la variabilité climatique.....	79
2.5.3	Problème d'aménagement et d'application des normes	81
2.5.4	Problèmes liés au RAP	82
2.5.5	Problèmes d’inondations en ville de Bejaia	84
2.6	Conclusion.....	90
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DÉVELOPPÉE : MODÈLE D’AIDE À LA GESTION DES INONDATIONS URBAINES PAR LES MÉTHODES AHP ET FMECA		92
3.1	Introduction	92
3.2	Les étapes de la méthodologie développée	93
3.3	Cartographie des débordements passés.....	94

3.3.1	Principe et intérêt de la consultation des situations passées.....	94
3.3.2	Conception des cartes d'inondation pluviales.....	96
3.3.3	Contraintes d'élaborations des cartes des inondations pluviales – Cas de Bejaia	98
3.4	Analyse multicritère – Échelle et critères d'évaluation	100
3.4.1	Établissement d'une typologie des débordements	100
3.4.2	Les composantes principales du point débordant.....	102
3.4.3	Construction de critères de jugement	104
3.4.4	Critères retenus pour la caractérisation des PN.....	110
3.4.5	Echelle d'évaluation des critères retenus	117
3.5	Méthodologie d'analyse multicritère adoptée	127
3.5.1	Méthode AHP.....	127
3.5.2	Méthode FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)	131
3.6	Conclusion.....	133
CHAPITRE 4 APPLICATION – CAS DU RESEAU DE LA VILLE DE BEJAIA		134
4.1	Introduction.....	134
4.2	Choix du site et possibilité de suggérer des actions	135
4.2.1	Présentation et caractéristiques de la ville de Bejaia.....	135
4.2.2	Potentialités naturelles, historiques et culturelles de la ville de Bejaia.....	137
4.2.3	Développement urbain accéléré de la ville	139
4.3	Élaboration de la cartographie des débordements passés.....	142
4.3.1	Données Collectées pour l'élaboration des cartes.....	142
4.3.2	Réseau pluvial de la ville	143
4.3.3	Recensement des points noirs	147
4.3.4	Débordements passés et zones d'inondations dans la ville de Bejaia	148
4.4	Évaluation des critères – Performances	149
4.4.1	Perturbation du trafic (C ₁).....	149
4.4.2	Sensibilité de la zone touchée (C ₂).....	150
4.4.3	Surface inondée (C ₃)	151
4.4.4	Hauteur d'inondation (C ₄).....	152
4.4.5	Surface (A) (C ₅)	153

4.4.6	Pente moyenne (C ₆).....	154
4.4.7	Allongement M (C ₇).....	155
4.4.8	Temps de concentration tc (C ₈).....	155
4.4.9	Coefficient d'imperméabilisation (C ₉).....	156
4.4.10	Lacune observée (Cause du débordement) (C ₁₀).....	157
4.4.11	Tronçon amont (C ₁₁)	158
4.4.12	Jonction (C ₁₂)	159
4.5	Résultats obtenus – discussion	172
4.5.1	Classement des PNs de la ville de Bejaia.....	172
4.5.2	Fiabilité des méthodes utilisées.....	179
4.5.3	Résultats de classification multicritère.....	180
4.5.4	Solutions compensatoires retenues dans le cas d'étude	183
4.6	Conclusion.....	186
CONCLUSION GÉNÉRALE		188
BIBLIOGRAPHIE		193
ANNEXES		199
ANNEXE A – PRESENTATION DES CARTES		200
ANNEXE B – LA MISE EN ŒUVRE D'UNE MULTITUDE D'OUTILS INSTITUTIONNELS ET LEGISLATIFS		202
ANNEXE C – QUELQUES TERMES TRES EMPLOYES DANS LE PRESENT OUVRAGE		207

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 : Synthèses des méthodes d'estimation des débits de ruissellement et des hydrogrammes	36
Tableau 1-2 : Synthèse des problèmes de fonctionnement d'un réseau RAP	46
Tableau 2-1 : Synthèse résumant les principaux OAD existant	75
Tableau 2-2 : Habitations construites en zones inondables par wilaya	79
Tableau 2-3 : Station hydrométrique Sidi Aich	81
Tableau 2-4 : Les problèmes liés au réseau pluvial , leurs causes et leurs conséquences	83
Tableau 3-1: Définition et échelle d'évaluation des critères d'influence et d'impact sélectionnés	126
Tableau 3-2: Comparaison par paire des préférences dans AHP	127
Tableau 3-3: Valeurs de l'indice RI (Saaty,1980)	130
Tableau 4-1: Synthèse de document et de données recueillies	143
Tableau 4-2 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₁	150
Tableau 4-3 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₂	150
Tableau 4-4 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₃	151
Tableau 4-5 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₄	152
Tableau 4-6 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₅	153
Tableau 4-7 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₆	154
Tableau 4-8 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₇	155
Tableau 4-9 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₈	156
Tableau 4-10 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₉	156
Tableau 4-11 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₁₀	158
Tableau 4-12 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₁₁	159
Tableau 4-13 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C ₁₂	160
Tableau 4-14 : Notation des points noirs vis-à-vis les 12 critères retenus.....	161
Tableau 4-15 : Les performances des douze critères retenus	164
Tableau 4-16 : Notation des points noirs vis-à-vis les 12 critères retenus.....	167
Tableau 4-17 : Performance (Faible, Moyenne et Forte) des PN.....	171
Tableau 4-18 : Hiérarchisation des critères retenus par ordre d'importance	174

Tableau 4-19 : Poids des critères. 174

Tableau 4-20 : Scores et rang des points noirs..... 176

Tableau 4-21 : Valeurs des paramètres de la méthode FMECA 177

Tableau 4-22 : Indices de criticités et rangs des points noirs..... 178

Tableau 4-23 : Techniques Alternatives retenues : définition, conditions d'application et faisabilité
..... 184

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1: Cycle de l'eau. A : Bilan hydrologique ; B : Conceptualisation du cycle de l'eau....	22
Figure 1-2 : Schéma général du processus de transformation de la pluie brute en débit [CHOCAT & al. 1997].....	31
Figure 1-3 : Les causes conséquences des inondations pluviales urbaines.....	48
Figure 1-4 : Les conséquences des inondations pluviales urbaines	48
Figure 2-1 : Toitures végétalisées ou à rétention d'eau et toitures stockantes.....	60
Figure 2-2 : Les citernes, le système de récupération d'eau de pluie	61
Figure 2-3 : Les fossés larges et peu profonds, généralement végétalisés, susceptibles de stocker, de transporter e d'infiltrer les eaux de pluie.....	61
Figure 2-4 : Les puits de stockage-infiltration des eaux pluviales.....	62
Figure 2-5 : Les tranchées drainantes.....	63
Figure 2-6 : Les structures réservoirs.....	64
Figure 2-7 : Les bassins stockant/infiltrant	65
Figure 2-8 : Les chaussées à structure réservoir et poreuse	66
Figure 2-9 : Les réseaux surdimensionnés.....	66
Figure 2-10 : Méthodes / approches/ modèles d'aide à la décision (Franck SFILIGOÏ TAILLANDIER).....	73
Figure 2-11 : Inondations à plusieurs wilayas d'Algérie	78
Figure 2-12: Carte du réseau hydro-climatologie et de la surveillance de la qualité des eaux, du nord d'Algérie (A), particulièrement la ville de Bejaia (B).	81
Figure 2-13 : Inondation à Sidi Ali L'Abher : Iriahen (A) ; Iriahen (B) ; Sidi Ali L'Abher ; Bir Selam (D); RN°09 (E) ; côté gauche de RN°09 (F); Tamalahth (G) ; Abodaou - université (H) ; Marché Iriahen (I) ; Ecole première Iriahen (J) ;	85
Figure 2-14 : Inondations Daouadji vers Amriou : Sidi Ahmed (A) ; Daouadji (B) ; Arrêt Daoudji ; Hôtel des finance (D); Amriou (E) ; Amriou (F); Amriou (G) ; Amriou (H) ; Parc Mozaia (I); Souk El Falah (J).....	85
Figure 2-15 : Inondations à plusieurs endroits ; Ancienne ville (A) ; Tunnel Sidi A/Kader (B) ; Porte Sarrasine ; APC Bejaia - nouvelle ville (D); Cité Tobal- arrêt de Bus (E) ; Cité Tobal (F); Ighil Azoug (G); Remla - DHW (H) ; Cité Adrar (I); Quartier Seghir (J) ; Quartier Seghir (K) ; Université Targa Ouzmour (L).....	86
Figure 2-16 : Insuffisance de capacité du réseau de Bejaia. Obstacles d'écoulement et réduction de section ((A), (B), , (D), (E), (F), (E), (G), (H)) ; Manque d'entretien périodique (I) ; Dépôt dans les regards (J) ; Eaux pluviales non drainer ((K), (I)).....	87

Figure 2-17: Série de données de l'ONA Bejaia, période du 2011 au 2016.....	88
Figure 3-1: Organigramme méthodologique de l'étude.....	93
Figure 3-2 : Organigramme de la démarche pour la cartographie des débordements passés et l'amélioration de la gestion des EP.....	95
Figure 3-3 : Typologie des débordements.....	101
Figure 3-4 : Composantes principales d'un point noir.....	102
Figure 3-5 : Les niveaux de sélection des critères de jugement.....	106
Figure 3-6 : Vecteur « Critères retenus » pour la caractérisation des PN.....	111
Figure 3-7: Échelle de performance adoptée.....	125
Figure 4-1: Localisation de la ville de Bejaia (D) à l'échelle mondiale (A), nationale (B) et provinciale.....	135
Figure 4-2: Les trois zones de la ville Bejaia.....	137
Figure 4-3 : Sites et monuments de la ville de Bejaia.....	138
Figure 4-4 : Ville de Bejaia, vues actuelles.....	140
Figure 4-5: Ville de Bejaia, vues anciennes.....	141
Figure 4-6 : Réseaux d'assainissement de ville de Bejaia.....	144
Figure 4-7 : Débordements à ciel ouverts, enterrés et mixte.....	147
Figure 4-8 : Carte des débordements passés ; (A) Types de débordements ; (B) Carte des Surfaces inondées.....	148
Figure 4-9 : Performances par PN.....	172
Figure 4-10 : Impacts des PN selon les données d'expertise.....	173
Figure 4-11 : Comparaison des performances PN observées et modélisées.....	179
Figure 4-12 : Résultats de classification multicritère obtenus par les deux méthodes.....	181
Figure 4-13 : Pourcentage (%) des PN en priorité d'intervention.....	182
Figure 4-14 : Classement des PN par ordre de priorité d'intervention.....	182
Figure 4-15 : Cartographie des PN par ordre de priorité d'intervention.....	183
Figure 4-16 : Cartographie des solutions compensatoires retenues dans le cas d'étude.....	186
Figure 4-17 : Agents du système d'assainissement en Algérie.....	205

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

A

ADE : Algérienne Des Eaux

AHP: Analytic Hierarchy Process

AMC : Analyse Multi-Critère

B

BV: Bassin Versant

D

DAH : Département des Affaires Humanitaires

E

EP : Eaux Pluviale

EPU : Eaux Pluviales Urbaines

F

FMECA: Failure Mode, Effects and Criticality Analysis

I

IDF : Intensité-Durée-Fréquence

O

OAD : Outils d'Aide à la Décision

ONA : Office National d'Assainissement

P

P : Performance

PNs : Points Noirs

R

RAP : Réseau Assainissement Pluvial

S

SDEP : Système de Drainage des Eaux Pluviales

T

TA : Technique Alternative

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – PRESENTATION DES CARTES	200
ANNEXE B – LA MISE EN ŒUVRE D’UNE MULTITUDE D’OUTILS INSTITUTIONNELS ET LEGISLATIFS	202
ANNEXE C – QUELQUES TERMES TRES EMPLOYES DANS LE PRESENT OUVRAGE	207

RÉSUMÉ

Résumé : Dans le choix d'une approche de gestion des Eaux Pluviales (EP) urbaines, il est important de tenir compte des aspects ayant rapport avec les EP et la méthode pratiquée au milieu qu'on essaie d'atteindre. Cette étude vise à aider les gestionnaires du Système de Drainage des Eaux Pluviales (SDEP) d'une ville à gérer les problèmes des EP urbaines, c'est-à-dire, à leur fournir des outils pour une meilleure organisation de l'information sur le SDEP combinée à une meilleure optimisation de ses interventions sur le réseau. Notre étude de cas (Bejaia) est basée sur une analyse multicritère du système "SDEP - inondation - Impact". Nous avons utilisé une approche multicritère et avons classé les points de débordement appelés Points Noirs (PNs) en utilisant deux méthodes : Le processus de hiérarchie analytique (AHP : Analytic Hierarchy Process) et la méthode FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Les critères et l'échelle d'évaluation ont été définis sur la base d'observations passées, d'avis d'experts et de retours d'expérience. La carte des anciennes zones inondées a été réalisée et utilisée pour calibrer les deux modèles. Nous avons cartographié les PNs en fonction des priorités d'intervention (1 à 4). Les résultats des deux modèles sont largement comparables à ceux de l'évaluation de l'impact des inondations passées (données observées). L'approche proposée peut également réduire les risques d'inondation en intégrant certains des facteurs d'influence (causant les inondations) et l'application peut être adaptée et mise en œuvre dans d'autres villes. Les deux méthodes sont fiables, en particulier l'AHP pour les PNs les plus débordants. Elles pourraient être avantageusement combinées pour améliorer la prise de décision.

Mots clés : Systèmes de drainage d'eaux pluviales ; débordements ; approche multicritère ; AHP, FMECA

Abstract: To choose an approach, it is important to consider the aspects to do with stormwater and the urban used method that we are trying to reach. This study aims to help managers of Stormwater Drainage System (SDS) to manage urban flood problems, i.e., to provide them with tools for a better organization of information on SDS combined with a better optimization of its interventions on the network. Our study (Bejaia) is based on a multicriteria analysis of the "SDS-inundation-Impact" system. We used multicriteria approaches and classified the overflow points called Black Points (BPs) using two methods: Analytic Hierarchy Process (AHP) and Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). The criteria and the evaluation scale were defined on the basis of past observations, expert opinions, and feedback experience. The map of the past flooded areas was made and used to calibrate the two models. We mapped the BPs according to intervention priorities (1 to 4). The results of both models are greatly comparable to those of the impact assessment of past floods (observed data). The proposed approach can also reduce flood risks by integrating some influencing factors (causing floodings) and the application can be adapted and implemented in other cities. Both methods are reliable, particularly the AHP for the most overflowing BPs. They could be advantageously combined to improve decision-making.

Keywords: Stormwater drainage systems; overflow; multicriteria approach; AHP, FMECA

ملخص: عند اختيار نهج إدارة مياه الأمطار في المناطق الحضرية، من المهم مراعاة الجوانب المتعلقة بهذه المياه والطريقة المستخدمة في البيئة التي نحاول الوصول إليها. تهدف هذه الدراسة إلى مساعدة مسيري نظام تصريف مياه الأمطار لمدينة ما على إدارة مشاكل الفيضانات الحضرية، أي لتزويدهم بأدوات لتنظيم أفضل للمعلومات المتعلقة عن النظام إلى جانب تحسين تدخلاتها لتيسير الشبكة. تعتمد دراستنا (المطبقة على مدينة بجاية) على تحليل متعدد المعايير للعلاقة النظامية "تصريف مياه الأمطار - الفيضانات - التأثير". استخدمنا نهجًا متعدد المعايير وصنفنا النقاط السوداء (نقاط التدفق) باستخدام طريقتين: عملية التسلسل الهرمي التحليلي وأنماط الفشل والتأثيرات وتحليل الأهمية. تم تحديد المعايير ومقياس التقييم على أساس الملاحظات السابقة (المعطيات المتعلقة) وآراء الخبراء وردود الدراسات السابقة. تم إنتاج خريطة بيانية للمناطق القديمة التي غمرتها المياه سابقًا واستخدامها لمعايرة النموذجين. قمنا بتعيين النقاط السوداء وفقًا لأولويات التدخل (من 1 إلى 4). نتائج النموذجين قابلة للمقارنة على نطاق واسع بنتائج تقييم تأثير الفيضانات السابقة (المعطيات المتعلقة). يمكن للمنهجية المقترحة أيضًا أن تقلل من مخاطر الفيضانات من خلال دمج بعض العوامل المؤثرة (المسببة للفيضانات) ويمكن تكييف التطبيق وتنفيذه في مدن أخرى. كلتا الطريقتين موثوقتان، خاصةً عملية التسلسل الهرمي التحليلي لمعظم النقاط السوداء المتدفقة. يمكن دمجها بشكل مفيد لتحسين عملية صنع القرار.

الكلمات الرئيسية : أنظمة تصريف مياه الأمطار؛ تدفق؛ منهجية متعددة المعايير؛ طرق التحليل المتعدد المعايير؛ AHP, FMECA

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La ville, l'un des principaux systèmes vitaux de l'homme a considérablement évolué au cours des siècles, particulièrement en termes de taille et d'exposition aux risques naturels. Les catastrophes naturelles les plus habituelles sont les inondations, les tremblements de terre, les températures extrêmes, les glissements de terrain, la sécheresse, les incendies de forêt, les éruptions volcaniques. Parmi ces risques naturels, les inondations relèvent de phénomènes météorologiques et ont la fréquence d'occurrence la plus élevée en milieu urbain. En général, elles entraînent des dégâts matériels et humains importants, ainsi que des perturbations économiques majeures dans les régions touchées.

Selon les informations et les déclarations du Département des Affaires Humanitaires des Nations unies (DAH), les inondations sont les plus fréquentes et représentent plus d'un quart de l'ensemble des catastrophes recensés et touchent le plus grand nombre d'individus. Récemment par exemple, le Pakistan a déclaré l'état d'urgence suite aux inondations du 25 août 2022. Ces inondations ont fait au moins 1700 morts, affecté 33 millions d'habitants et détruit 250 000 habitations et 1,8 million d'hectares de terres agricoles. En Europe, plus de deux cents personnes sont mortes dans les inondations de juillet 2021 et plus particulièrement en Allemagne, en Belgique, au Luxembourg et aux Pays-Bas. Ça a fait de nombreux disparus, et détruit des centaines de maisons ainsi que des infrastructures. En Amérique, plus 400 personnes tuées, 900 blessés et des centaines de disparus à la suite des inondations qui ont frappé Haïti et la République dominicaine le 25 mai 2004 (Indique un communiqué du Bureau des affaires humanitaires de l'Organisation des Nations Unies - ONU). D'autres exemples comme les inondations de Bab-el-Oued d'Alger dont l'ampleur des dégâts occasionnés est énorme. Ces dernières années, plusieurs wilayas d'Algérie ont été touchées par ce phénomène. L'inondation des 9-10 novembre 2001, qui a affecté la partie ouest du Grand Alger, reflète parfaitement ce propos. Les crues déclenchées par cet événement ont causé des dégâts matériels et des pertes en vie humaine inégalés dans le bassin méditerranéen (Menad, 2012).

Le système d'assainissement urbain constitue un élément important et nécessaire à l'homme. Ses équipements doivent être conçus, construits et entretenus pour assurer les services leur étant associés, et garantir un niveau de qualité de vie en maîtrisant et/ou réduisant localement les inondations et la pollution des milieux récepteurs. Aujourd'hui, la proportion de la population urbaine augmente rapidement, et cette croissance s'accompagne naturellement d'une extension spatiale très rapide des villes disproportionnellement à celle des réseaux existants.

Généralement, les réseaux d'assainissement d'eaux pluviales reposent sur un mode d'écoulement gravitaire. Une inondation due au débordement du réseau pluvial est un phénomène que se produit lorsque les eaux de pluie (crue rapide) ne peuvent pas ou plus s'écouler dans le réseau existant (surcharge ou incapacité hydraulique). Actuellement, le problème des inondations urbaines risque d'augmenter et de causer des dégâts considérables. L'urbanisation rapide,

l'imperméabilisation des surfaces, et l'augmentation de la pollution atmosphérique contribuent à une intensification et une fréquence accrue des précipitations extrêmes en milieu urbain. Ces processus renforcent les effets du changement climatique et perturbent le cycle hydrologique urbain. D'ailleurs, la gestion des inondations dues aux débordements des réseaux d'eaux pluviales a fait l'objet de nombreuses études ([Hmidi, 2023](#) ; [Asry, 2023](#)). En général, ces études s'appuient principalement sur l'analyse multicritère, la cartographie, les bases de données spécifiques et/ ou les SIG et la télédétection. Ces études s'intéressent à l'évaluation de l'impact des inondations en milieu urbain ammond, Chen, Djordjević, Butler, and Mark (2015), Hammond, Chen, Djordjević, Butler, and Mark (2015), au développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain ([Marion, 2016](#)), à l'application de la méthode d'analyse de la résonance fonctionnelle pour l'analyse qualitative du risque des défenses multifonctionnelles contre les inondations [Anvarifar et al. \(2017\)](#), à un test de stress des inondations du système urbain lors de tempêtes de pluie extrêmes à Hong Kong ([He et al. \(2021\)](#)), à la modélisation à base d'agents et la gestion des risques d'inondation ([Zhuo and Han, 2020](#)), à l'évaluation de la vulnérabilité urbaine aux inondations et la cartographie des risques à l'aide d'ADP et du SIG multiparamétriques intégrés : aperçu méthodologique et évaluation des études de cas ([Ouma and Tateishi, 2014](#)), cartographie des inondations par représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité ([Renard and Soto, 2015](#)), zonage de la vulnérabilité aux inondations urbaines à l'aide de la télédétection et du SIG ([Sowmya et al., 2015](#)), intégration du SIG et de l'analyse multicritère hiérarchique pour la cartographie de la vulnérabilité aux inondations ([Loumi and Redjem, 2021](#)).

La simulation est un outil essentiel pour l'analyse des débordements des réseaux pluviaux associés à des précipitations de différentes intensités et périodes de retour. Cependant, elle peut être complexe en raison de plusieurs causes possibles, notamment l'indisponibilité des données et la difficulté à prédire les facteurs à l'origine de ces dysfonctionnements ([Caradot et al., 2011](#), [Granger et al., 2014](#)). Pour cette raison, notre thèse est caractérisée par des approches diversifiées conduisant à des méthodes variées adaptées à notre cas et adoptées pour l'exploitation des données existantes.

En 2016, l'Office National de l'Assainissement (ONA) a mis en œuvre une étude de diagnostic et de réhabilitation des réseaux d'assainissement des villes de Tizi Ouzou et de Bejaïa, incluant la réalisation d'un schéma directeur d'assainissement. En l'absence d'une stratégie et d'outils efficaces, les gestionnaires des réseaux ont rencontré des difficultés à gérer ce problème d'inondation. Depuis des années, le SDEP de la ville de Bejaia est fréquemment inondé en raison des fortes pluies d'une part et du mauvais état du réseau d'eaux pluviales (encrassement fréquent et insuffisance hydraulique notamment) d'autre part. A chaque fois, ces inondations provoquent des dégâts et des désagréments importants (gêne ou blocage de la circulation, intrusions d'eaux usées dans les habitations, etc.), notamment dans la partie basse de la ville, la plus fréquentée. Sans stratégie ni outils efficaces, les gestionnaires de réseaux peinent à gérer les problèmes d'inondation. Le

phénomène d'inondation est devenu ardu et les décideurs doivent relever le défi d'adapter efficacement une stratégie en réponse aux inondations urbaines fréquentes et brusques.

L'objectif de l'étude est donc de développer une méthodologie simple et fiable permettant de mieux gérer ces inondations. Le principe de la démarche adoptée consiste d'abord à définir et analyser tous les aspects de la problématique étudiée (diagnostic détaillé de l'état du réseau, recherche et analyse de l'historique des inondations survenues dans le passé, etc.) puis formuler le problème d'une façon paramétrée et structurée, cohérente avec la méthode d'analyse multicritère à utiliser. Pour cela, notre démarche a été axé sur les tâches suivantes :

- Recueil et analyse des informations et données disponibles sur les caractéristiques et l'état du réseau
- Diagnostic structurel et de fonctionnement du réseau
- Recueil et analyse des informations et données disponibles sur les inondations survenues dans le passé (données d'experts, photos, mesures ...)
- Mise au point d'un modèle structurel du réseau existant en définissant les éléments essentiels (structurels, et hydrologiques et hydrauliques) en relations directes ou indirectes avec les débits d'écoulements et les inondations (les sous-bassins versants et leur caractéristiques physiographiques, hydrologiques et d'occupation des sols, les tronçons de conduites homogènes et leur caractéristiques géométriques, structurelles et d'état, les ouvrages annexes et leur caractéristiques, les points susceptibles de déborder, etc.)
- Cartographie des inondations survenues dans le passé en termes de quantités d'eaux inondées (hauteur ou surface inondée selon données disponibles) et leur association aux points de débordement du modèle structurel
- Analyse multicritère du processus d'écoulement et de débordement des eaux pluviales et leur impact sur la ville de Bejaia afin de définir les critères d'impact des débordements
- Construction d'une grille d'évaluation et d'appréciation de l'ampleur des débordements selon l'importance des critères retenus (grille d'évaluation des performances des points de débordement)
- Approche multicritère (AHP, FMECA, ...) d'évaluation des performances des points de débordement (appelés points noirs PN) vis-à-vis de leur impact sur la ville
- Classement des PN en fonction de leur impact sur la ville.

Le classement final des PN permettra de prioriser les interventions de réhabilitation du réseau et de gestion des inondations et ainsi d'optimiser les coûts et les temps de réponse (les délais d'intervention et de réhabilitation).

Dans notre étude de cas, nous avons adopté deux méthodes, le processus de hiérarchisation analytique (AHP) et l'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (FMECA).

Ces méthodes sont très utilisées dans plusieurs domaines de recherche (Ho, 2008 ; Darko, 2018 ; Thoppil, 2019). L'AHP est utilisée dans cette étude car c'est une technique de prise de décision structurée basée sur les mathématiques et la psychologie. Plusieurs études sur le risque d'inondation urbaine ont utilisé cette technique pour sa simplicité et sa robustesse (Philippe et al., 2018, Ayari et al., 2016). En effet, elle permet de vérifier la cohérence des relations importantes entre les critères (Benbachir et al., 2021), de renforcer la robustesse de la méthodologie d'évaluation des performances des SDEP en termes de débordements pluviaux, de calculer un indice de cohérence permettant d'évaluer les jugements rendus (grand avantage), et enfin, de disposer d'un outil valide pour prendre les meilleures décisions puisque son application permet de converger vers un choix partagé entre les différents décideurs qui expriment leur préférence dans les jugements sur les critères et sous-critères de comparaison.

La FMECA est basée sur des critères précis. Elle a été conçue à l'origine pour étudier des processus industriels très connus, et sur lesquels on disposait notamment de données précises concernant l'historique des défaillances passées, ainsi que leurs conséquences et les délais de remise en service du système après une défaillance (Press, 2003, Stamatis, 2003) . Cette approche a été adaptée aux données et connaissances disponibles sur le SDEP étudié. La méthode est basée sur l'estimation d'un indice de criticité (I_c) qui repose sur un ensemble de critères permettant de mettre en évidence les PN les plus sensibles aux risques de débordement.

La méthodologie développée sera utilisée pour faire face aux inondations susceptibles de se reproduire à l'avenir dans la ville, en s'inspirant des inondations qui se sont produites dans le passé.

Le processus de calage de nos résultats et de la phase finale de la méthodologie adoptée consiste à :

- Cartographier les points de débordement observés dans le passé (PNs : points noirs).
- Cartographier les zones inondées passées : une classification de référence des PNs est réalisée sur la base des zones inondées dans le passé et sert à calibrer les résultats de l'analyse multicritères réalisée dans la dernière étape.
- Construire une grille d'évaluation basée sur les données caractéristiques des PNs en considérant les paramètres d'influence (morphologiques, hydrologiques, fonctionnels et d'impact) (Tableau 3-1).
- Cartographier les priorités d'intervention sur les PN en utilisant deux méthodes d'analyse multicritères : AHP et FMECA.

Le couplage de ces deux méthodes a déjà été utilisé sur le réseau d'Alger pour gérer les défaillances structurelles des collecteurs d'assainissement (Benbachir et al., 2021) et les résultats obtenus sont très encourageants.

Enfin, la cartographie présente plusieurs avantages. Elle permet de présenter clairement les différents types de débordements, de modéliser structurellement les données nécessaires aux calculs relationnels et de visualiser objectivement les résultats obtenus.

Dans ce contexte, ce travail sera décomposé en quatre chapitres qui reprennent les étapes adoptées de la démarche menée.

- Le premier chapitre est consacré aux rappels sur les eaux pluviales en milieu urbain, le système d'assainissement pluvial et les événements hydrologiques associés. Ensuite, nous y présentons la ville de Bejaia (cas d'étude), et nous citons les problèmes d'assainissement des eaux pluviales, où la récurrence des inondations urbaines est accentuée par l'état dégradé et l'encrassement fréquent des réseaux d'assainissement, ainsi que par leur capacité hydraulique insuffisante. En l'absence d'une stratégie adaptée, ces défaillances entraînent des perturbations majeures, notamment dans les zones basses et fréquentées, avec des impacts sur la circulation, et des dégâts matériels. Ce travail vise à proposer une approche structurée pour mieux anticiper et gérer ces inondations fréquentes.
- Le deuxième chapitre présente le concept de perception du risque et sa gestion. Il donne non seulement les principaux points qui guident cette notion du risque, mais aussi les divers éléments de bases d'hydrologie et d'hydraulique. Enfin, et avant de rentrer au cœur de la méthodologie adoptée (d'étude de cas), nous y exposons différentes approches permettant d'aider à gérer le risque d'inondation en milieu urbain.
- Le troisième chapitre présente la méthode de gestion des inondations pluviales urbaines par l'application des méthodes AHP et FMECA. C'est la méthodologie que nous avons développée pour l'appliquer à un cas réel. Puisque l'approche à laquelle nous nous intéressons dans cette thèse vise à définir des priorités d'intervention et d'ordonner les points débordants suivant leurs importances, le domaine d'aide à la décision y est donc rappelé. De nombreux éléments, composantes et paramètres liés et nécessaires à l'analyse du problème d'inondation ont été définis et exposés, et les méthodes AHP et FMECA sont formulés à partir des connaissances de base et des données collectées et en fonction des critères retenus.
- Le quatrième chapitre est une mise en application de la méthodologie développée sur un cas réel. Le cas d'étude retenu a été étudié à l'aide de la décision multicritère pour la gestion des points noirs du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia. Nous avons pu élaborer des cartes des débordement existants ou susceptibles d'être inondés, des surfaces d'inondations, et des PN en fonction de l'importance de l'impact diagnostiqué. Nous avons ensuite comparé les performances des PN observées et modélisées en utilisant AHP et la FMECA afin de caler nos résultats. Les résultats de la classification multicritères obtenus par ces méthodes nous ont permis ensuite de classer des PN par ordre de priorité d'intervention.

Enfin, en conclusion générale, ce travail met en lumière l'importance d'une approche méthodologique rigoureuse pour la gestion des inondations pluviales en milieu urbain. À travers les quatre chapitres, nous avons démontré comment une compréhension approfondie des eaux pluviales et du système d'assainissement, combinée à une évaluation des risques et à l'application de méthodes de décision multicritères comme l'AHP et la FMECA, peut permettre de prioriser efficacement les interventions sur les points noirs.

La ville de Bejaia, en tant que cas d'étude, illustre les défis rencontrés et les solutions possibles. Les résultats obtenus, notamment les cartes des zones inondables et la classification des points noirs par ordre de priorité, fournissent des outils concrets pour les décideurs et les gestionnaires. Ce travail souligne également la nécessité d'une coordination entre les différentes parties prenantes et d'une mise à jour continue des données pour améliorer la gestion des risques d'inondation dans un contexte urbain en constante évolution.

CHAPITRE 1 LES EAUX PLUVIALES EN MILIEU URBAIN – PROBLÉMATIQUE DES INONDATIONS PLUVIALES

1.1 Introduction

Les précipitations, les aléas pluviométriques, le ruissellement pluvial, les inondations dues aux débordements du réseau pluvial présentent des processus hydrologiques les plus variables dans le temps et dans l'espace. Les activités humaines et l'imperméabilisation des sols ont de nombreux effets sur la modification (l'apparition des pluies, augmentation du ruissellement pluvial) du cycle de l'eau et le changement climatique.

Le milieu urbain est le lieu des phénomènes hydrologiques rapides et la solution classique proposée pour assainir les eaux de pluie est le réseau d'assainissement. Le principal problème lié à l'utilisation de cette solution, c'est que, lorsqu'il pleut faiblement, les eaux de pluie sont évacuées facilement, par contre, lors des événements pluvieux plus intenses, le réseau ne peut plus assurer la continuité de sa fonction et se trouve exposé aux dysfonctionnements. Ces débordements touchent parfois de grandes étendues.

Pour réunir les différents éléments liés aux EP en milieu urbain, nous avons retracé brièvement dans ce premier chapitre, les étapes principales reliant l'eau de pluie ces inondations. Nous avons cité les éléments de connaissances d'une pluie en générale et nous avons donné l'approche statistique appliquée pour modéliser une pluie. Ensuite, nous avons expliqué le problème de l'aléa pluviométrique non maîtrisable. En même temps, nous avons expliqué le processus de ruissellement et dégager les facteurs d'influence essentiels dans le ruissellement pluvial. Nous rappelons les modèles classiques pluies – débits et la relation intensité moyenne maximale avec le temps de concentration du bassin versant. En ce qui concerne, le réseau pluvial, il est important de garder à l'esprit que beaucoup d'éléments affectent sa réalisation et sa gestion. Les extensions urbaines, les malfaçons et les défauts de fonctionnement du réseau d'assainissement ont une influence directe sur les inondations. La prise en compte de leurs paramètres caractéristiques d'influence (sur les débordements) s'impose.

L'intérêt de ce chapitre est de fournir les définitions essentielles en rapport avec l'hydrologie urbaine, et permettre de connaître avec suffisamment de précision les causes et les conséquences des inondations pluviales urbaines. Enfin, ce chapitre donnera suffisamment d'information qui nous aideront à la sélection des critères d'influence et d'impact d'un débordement pluvial et de justifier le choix des paramètres retenus.

1.2 La pluie et le problème de l'aléa pluviométrique

L'aléa pluviométrique constitue un indicateur potentiel du changement climatique et de variation du phénomène « pluie ». En hydrologie urbaine, la pluie, phénomène aléatoire est le paramètre

d'entrée principal du processus de décision. Il est donc essentiel de savoir la décrire et la modéliser en fonction des objectifs visés.

1.2.1 Les précipitations

A ce jour, l'étude des précipitations constitue une étape préalable à la plupart des applications utilisées dans le domaine. La construction des dispositifs efficaces de gestion des réseaux d'assainissement pluvial est fondée sur une approche scientifique fine du cycle de l'eau et l'acquisition de connaissances sur l'eau précipitée, qui se situe en amont des processus, constitue un souci essentiel de l'action engagée (Chocat, 1997).

1.2.1.1 Cycle de l'eau et la pluie

Les mouvements de l'eau sur la terre peuvent être défini comme des flux hydriques dans un système à circuit fermé dit « cycle de l'eau ». Le produit de l'apport énergétique du rayonnement solaire et terrestre, et de l'accélération gravitationnelle sont les principaux cheminements de l'eau. la **Figure 1-1** montre plusieurs cheminements (François Anctil, 2012).

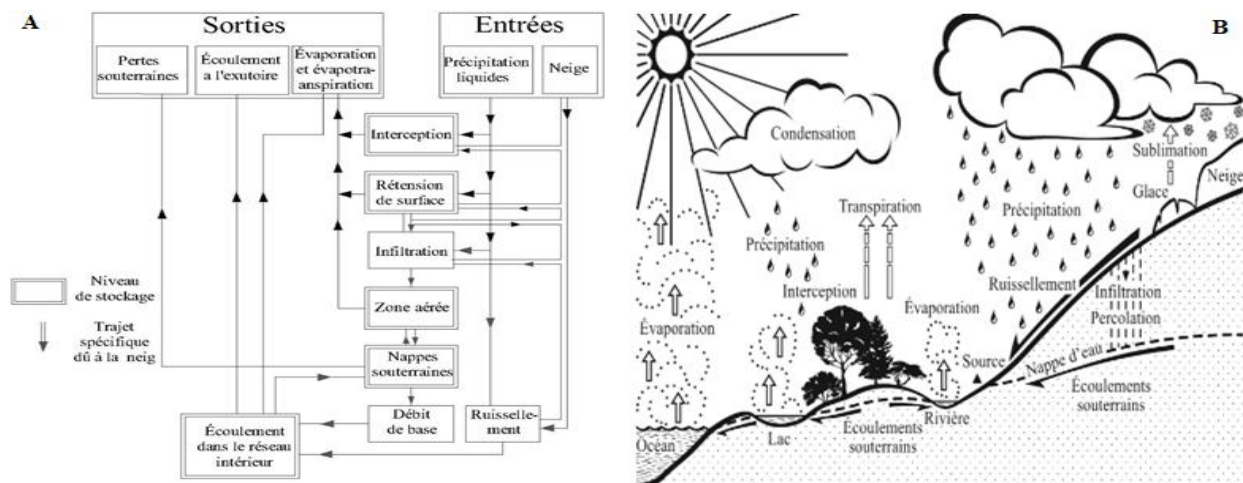


Figure 1-1: Cycle de l'eau. A : Bilan hydrologique ; B : Conceptualisation du cycle de l'eau

Le cycle de l'eau et le bilan hydrologique désignent la répartition des différents volumes d'eau compris dans chacune des parties du cycle de l'eau, pour une période et un bassin donné.

La pluie constitue le point de départ des processus de transfert des eaux pluviales à l'échelle des bassins versants. C'est également elle qui est à l'origine des risques d'inondation pluviale en milieu urbain et présente la composante principale à la mise en œuvre des protections contre le phénomène d'inondations pluviales, au même temps à l'augmentation des enjeux exposés aux risques de débordement du réseau pluvial.

1.2.1.2 La pluie

Habituellement, les précipitations désignent toutes les formes d'eau qui proviennent de l'atmosphère et tombent sur la surface de la Terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre, ..., etc.) est sans conteste l'élément fondamental du bilan hydrique puisqu'elle en constitue le paramètre d'entrée. Pour cette étude de cas, les précipitations occultes (rosée) ou sous forme solide (neige - grêle) ne jouent pratiquement aucun rôle. Les précipitations seront donc synonymes de pluie ou d'averse.

En milieu urbain, nous nous concentrons sur trois types de précipitations différents :

- **Les pluies fréquentes.** Ils ne s'appliquent qu'aux événements qui ont une durée de retour inférieure à quelques mois. Ces pluies sont prises en compte uniquement dans certaines villes où les rejets urbains pollués par temps de pluie sont considérés comme plus polluants que les eaux usées.
- **Les pluies fortes (aléa courant).** Leur définition est souvent limitée à un risque de défaillance décennal. Le gestionnaire du réseau pluvial accepte généralement ces pluies en mode de fonctionnement normal (capacité maximale disponible, entretien correct).
- **Les pluies exceptionnelles (aléa rare).** C'est pour gérer les inondations qu'elles engendrent. En raison économiques, le réseau pluvial ne peut plus garantir l'écoulement complet des eaux d'aléas rares.

Actuellement, les études et les recherches sont principalement menées pour gérer ces débits excessifs. Les données pluviométriques peuvent présenter un grand intérêt et résoudront certains problèmes liés à la modélisation de pluie-débit.

1.2.2 Intérêt de modéliser la pluie

La pluie est le principal facteur contribuant au ruissellement, aux infiltrations des sols, aux débits d'écoulements et aux inondations pluviales, ...etc. Le modèle de la pluie présente donc un intérêt tout particulier lorsqu'on parle de valorisation de l'eau de pluie, de gestion et de préservation des milieux urbains et aquatiques.

En général, les pluies sont caractérisées par des variables incertaines indépendantes comme le nombre d'averses, intervalle de temps entre averses successives, durée et hauteur totale précipitée, hauteur maximale sur un temps, etc. Vue le format de ces données, la disponibilité d'outils tels que l'approche statistique permet d'aller au-delà des mesures de pluie pour résoudre certains problèmes hydrologiques. A présent, la modélisation est un moyen très utilisé pour présenter et étudier un phénomène aléatoire comme la « pluie ».

L'invariabilité de la précipitation dans un site et la modélisation de pluie-débit passent essentiellement par la modélisation de la pluie. Les échantillons sont généralement tenus en raison

de la rareté des données traitées et du fait que les séries de mesures de pluies ne sont pas toujours très longues. Cela nécessite l'application de lois statistiques appropriées pour modéliser de tels événements afin de pouvoir extrapoler de manière optimale leur comportement dans le temps.

L'analyse des données sur la pluie offre la possibilité d'attribuer une probabilité d'occurrence aux plusieurs pluies de références et offre des informations essentielles dans la pratique de l'assainissement pluviale en milieu urbain. Elle fournit des éléments objectifs (courbes IDF) permettant de prendre les décisions utiles lors de l'établissement des plans de drainages des eaux pluviales. A cet effet, il est important d'avoir des séries longues et des connaissances représentatives de la pluviométrie locale pour l'étude des pluies rares.

En milieu urbain, plusieurs modes d'utilisation des pluies à des fins opérationnelles existent, pour le développement des projets (diagnostic de réseau, réhabilitation, construction), pour le diagnostic d'un événement particulier (validation de projets, expertise en cas de défaillance, déclarations de catastrophes naturelles) et pour la gestion du système d'assainissement en temps réel (prévision, consigne de gestion, alerte). Comme il s'agit souvent d'évaluation des risques liés aux eaux pluviales, d'un souci de préserver du milieu naturel, de valoriser des ressources et de réduire l'impact, les résultats sont le plus souvent, exprimés en fréquence ou sous forme probabiliste.

1.2.3 L'approche statistique pour modéliser la pluie

La méthode d'analyse des précipitations s'appuie sur la mise en forme d'un jeu considérable de données pluviométrique de différents types de format (de pas de temps constant ou variable). L'approche statistique pour modéliser la pluie repose sur traitement des données et l'analyse de la cohérence spatiale des mesures pluviométriques. Elle se limite à l'analyse événementielle de périodes de retour et de représentations graphiques (hyétogrammes) et elle se dirige vers la construction de fichiers de données pour l'analyse statistique des pluies intenses de courtes durées considérées comme principales génératrices des débits pluviaux maximum (courbes IDF : Intensités-Durées-Fréquences).

1.2.3.1 Traitement des données pluviométriques

Les différents types de données de précipitation sont des mesures obtenues du réseau pluviométrique/pluviographique, mesures radar et produit satellites. Dans ce travail, nous nous concentrons sur les données provenant des stations pluviométriques. Souvent, c'est la seule donnée hydrologique dont on puisse disposer.

Les mesures pluviométriques donnent lieu, une fois exploitées à l'élaboration ou au calcul des courbes donnant l'intensité de la pluie en fonction du temps (hyétogrammes), des intensités moyennes maximales pour diverses durées, et de tracer des courbes représentant l'intensité moyenne maximum pour diverses périodes de retour (IDF).

La pluie est en règle générale mesurée à l'aide d'instruments spécifiques (Pluviographe ou pluviomètre). Les quantités d'eau mesurées dépendent de l'état des instruments installés, des

conditions météorologiques (vent, température et ensoleillement) de l'instrument lui-même ainsi que de la topographie du bassin et de son altitude. Donc, il est indispensable, avant d'utiliser des séries de données, de se préoccuper de leur qualité et de leur représentativité.

Le traitement des données pluviométriques est une étape essentielle à l'analyse fréquentielle. Les mesures ponctuelles acquises aux niveaux des pluviomètres ou des pluviographes sont analysées et soumises à différents traitements. Ces données sont généralement des relevés journaliers effectués à un pluviomètre, donc pour un certain nombre de poste et d'agents, l'interruption dans les relevés ou les erreurs d'enregistrements sont des lacunes fréquentes beaucoup plus dans des périodes critiques (poste inaccessible, poste en panne, ...etc.).

Afin d'utiliser et d'exploiter ces données, il est nécessaire de chercher la nature des hétérogénéités auxquelles on peut porter remède, comme l'absence de données, le déplacement des pluviomètres, le changement d'environnement des pluviomètres, ... etc. Ensuite, il convient d'examiner l'ensemble des relevés, et détecter toutes les erreurs grossières, c'est la première vérification des données pluviométriques. La recherche de comparer des totaux cumulés annuels est un travail souvent demandé et le choix d'une série de base homogène est parfois difficile à appliquer.

1.2.3.2 La période de retour d'un évènement pluvieux

Dans cas générale, la pluie est présentée par deux paramètres, le premier c'est la fréquence moyenne de l'évènement considéré (la période de retour) et la partie de l'évènement où se concentre le plus fort de la pluie (durée de précipitation intense).

La notion de période de retour constitue un moyen pratique d'associer une probabilité à un aléa pluviométrique particulier. En hydrologie urbaine, le temps de retour d'une pluie est la durée au cours de laquelle un évènement d'une même intensité se reproduit. On utilise ce terme pour désigner l'intervalle de temps moyen séparant deux occurrences d'une averse caractérisé par le dépassement d'une valeur particulière pour une pluie unique.

Partant des séries observées, la détermination des durées de retour de la pluie consiste alors à calculer quelles sont les valeurs du phénomène susceptibles d'être dépassées en moyenne une fois tous les années 2, 5, 10, 20, 30, 50 ou 100 ans... etc. On parlera, par exemple, de pluies décennales pour les épisodes de pluies qui, statistiquement, se présentent environ une fois tous les dix ans en un endroit donné.

Les méthodes d'estimation des durées de retour s'appuient principalement sur des outils statistiques. Les méthodes dérivées de la théorie des valeurs extrêmes et les générateurs stochastiques sont les deux principales familles à distinguer. L'approche locale ou régionale sur une sélection de longues séries et l'approche par types de temps (améliorer l'homogénéité des séries locales) sont les méthodes les plus utilisées.

Le choix du temps de retour est stratégique, en particulier en milieu urbain. Elle conditionne le choix du dimensionnement des réseaux, le risque de saturation, la possibilité de financement des ouvrages, le niveau de détérioration des milieux récepteurs.

1.2.3.3 Les courbes Intensité-Durée-Fréquence

L'étude statistique des séries de données pluviométriques permet de mettre en évidence les propriétés des précipitations telles qu'elles sont mesurées au sol. Parmi les paramètres descriptifs des précipitations, on distingue notamment la durée et l'intensité. Ces paramètres sont reliés pour établir les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF), en associant les intensités moyennes maximales des événements pluvieux à leur durée et à leur période de retour.

La construction des courbes IDF en utilisant les données d'une station donnée se fait en plusieurs étapes. Il est tout d'abord nécessaire de choisir la façon de définir ce qu'est un événement pluvieux, puis de rechercher les événements pluvieux significatifs dans la série de données. Une fois ce découpage effectué, il faut rechercher, dans chaque événement, les maximas correspondant aux différentes durées de cumul retenue pour l'analyse (par exemple 6 minutes, 15 min, 30 min, 1 heure, 2 h, 3h, 6 h, ... etc.).

En milieu urbain, les courbes IDF représentent un outil très employé de nos jours pour le dimensionnement d'ouvrages d'un réseau d'assainissement avec en particulier celui des canalisations. Elles interviennent aussi dans certains cas pour l'étude des bassins de rétention (méthode des pluies). On les utilise pour estimer le débit de pointe d'une conduite en référence à un risque de défaillance. Nous rappelons ci-après leurs méthodes de calcul, en les envisageant successivement d'après les mesures d'une série ponctuelle (analyse locale), puis d'après celles d'un réseau de postes (analyse régionale). Le phénomène de saisonnalité est évoqué en raison de son importance pour la construction de modèles et pour la gestion des eaux (Morel à L'Huissier, 1996 ; GUILLAUME), 2023).

1.2.4 Difficultés et problèmes associés à la modélisation de la pluie

Certe les marges d'incertitude de la pluie sont encore trop fortes avec l'urbanisation et l'évolution climatique. L'utilisation de modèle de pluie donne des possibilités d'éviter de beaucoup de scénarios (débordements), mais au cours des années, les inondations pluviales sont devenues plus fréquentes et ce problème est principalement liés au développement urbain et à la vulnérabilité des bassins versants face à des phénomènes de pluie extrêmes, plutôt qu'à une augmentation de l'occurrence de ces épisodes, qui n'est pas reflétée par les séries de pluie (Desbordes, 1997).

Le problème d'aujourd'hui, c'est que les milieux urbains sont soumis à des régimes pluviométriques très irréguliers et l'augmentation des précipitations entraînera également un excédent d'eau dans les bassins versants et causant l'augmentation des flux dans les cours d'eau et des inondations extrêmes (Didier, 2010).

1.2.4.1 L'apparition des aléas pluviométriques

La caractérisation de l'aléa pluviométrique, notamment pour étudier les risques d'inondation, constitue un sujet de recherche encore d'actualité ((Gralepois, 2015), (Verlynde, 2018), (Karol Lavoine et al., 2021), (Azaiez and Allaoua, 2022)). A cet effet, il est intéressant d'expliquer ce qu'on entend par aléa pluviométrique et ce qui rend ce phénomène météorologique si préoccupant.

Les paramètres influençant l'aléa dépendent largement du type de phénomènes décrits. L'aléa ne se limite pas en effet aux seules intensités maximales, mais comporte des aspects liés à la chronologie, à la répartition spatiale et à la dynamique des précipitations.

Des développements méthodologiques pourraient préciser les moyens de les prendre en compte pour la mesure de la pluviométrie et l'évaluation quantitative des précipitations. Mais les aléas pluviométriques présentent plusieurs caractéristiques (temps, espace, régime) qui les rendent particulièrement difficile à modéliser. En plus la modélisation des pluies fait appel à diverses techniques statistiques et constitue une filière complexe qu'il convient de traiter des données avec beaucoup de rigueur.

D'ailleurs, pour anticiper l'augmentation des précipitations induites par les changements climatiques, il faut prendre en compte l'augmentation des précipitations courtes et intenses. La pluie qui tombe sur un espace n'est pas uniforme et sa répartition est influencé par la taille du bassin versant et les durées des pluies.

1.2.4.2 La compréhension et les confusions de la période de retour

En hydrologie urbain, un des problèmes fréquemment posé par les utilisateurs est la connaissance de la valeur extrême d'une pluie en un point donné. La difficulté liée à l'interprétation et à l'utilisation de la notion de période de retour provient de confusions fréquentes entre plusieurs aspects : la période de retour d'un événement observé versus le délai réel avant la survenue d'un événement similaire, la période de retour liée à la variable caractérisant l'événement pluvieux, et enfin, la probabilité d'occurrence d'un tel événement.

La plupart des intensités sont faibles et les intensités fortes sont plus rares mais des événements extrêmes peuvent survenir la référence de la pluie est dans la plupart des cas est une mesure ponctuelle et la fréquence de pluie d'inondation peut être supérieure à celle prévue en un point de mesure. Réellement, d'un endroit à l'autre, on possède peu de connaissances sur les variations éventuelles des pluies.

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction, consistant à étudier les événements passés, afin d'en définir les probabilités d'apparition future. Tellement, la pluie a par nature un caractère intermittent, dû au fait qu'il ne pleut pas toujours et la distribution de la pluie est fortement variable. Aussi, la détermination d'une pluie moyenne peut s'avérer difficile car on possède des enregistrements issus de plusieurs instruments. À cela s'ajoute encore la problématique de l'abattement spatial des pluies.

1.2.4.3 Les risques d'inondations associés à la modélisation de l'aléa pluviométrique

Le développement d'outils pratiques permettant de les exploiter à des fins d'hydrologie urbaine est une tâche très difficile. Les inondations récurrentes montrent l'une des difficultés d'utiliser un modèle par événement et le problème des aléas pluviométriques reste toujours posé en raison de leur caractère aléatoire.

Le fait qu'il est nécessaire d'associer une fréquence d'apparition d'une pluie, donc la variabilité spatiale et temporelle de ce phénomène « Aléa pluviométrique » contribue à la diversité des inondations pluviales en milieu urbain. D'ailleurs, il arrive que parmi les échantillons examinés, on observe des événements exceptionnels, très éloignés des autres événements déjà observés, ce qui rend difficile d'évaluer précisément le temps de retour en raison des incertitudes des méthodes statistiques.

Aussi, la pluie du projet est fondée sur les propriétés d'invariance de la pluie et l'eau précipitée ne se propage pas de manière uniforme dans le temps et dans l'espace. Le problème et les difficultés liées à la modélisation de l'aléa pluviométrique est le fait que certaines échelles ne sont pas échantillonnées et les séries temporelles pluviométriques sont souvent courtes. Il faut savoir que les extrêmes sont très dépendants de l'environnement immédiat du poste de mesure.

La quantité de pluie qui a déclenché une inondation sur un milieu urbain peut-être estimée, mais elle n'est pas connue parfaitement car on ne peut faire des mesures de pluie qu'en nombre très limité de points du bassin urbain. Les échelles de mesures des capteurs ne sont pas toujours adaptées à cette variabilité. Aussi, si on dispose de données suffisantes, on peut décrire les propriétés statistiques comme la pluie moyenne annuelle ou la variance, mais on ne peut pas être certain à l'avance de la quantité de pluie qui tombera et la façon comment elle tombe .

L'étude des précipitations ne représente pas une fin en soi pour l'hydrologie urbaine. Elle ne constitue qu'une étape préalable à la plupart des applications développées dans cette discipline, à savoir, l'étude quantitative/qualitative des eaux de ruissellement et l'étude de la gestion des eaux pluviales.

1.3 Le ruissellement pluvial et les facteurs d'influence

Après avoir fait le point sur les connaissances actuelles sur la pluie et le problème d'aléa pluviométrique, nous abordons le ruissellement pluvial en milieu urbain. Souvent, la conception des aménagements destinés à la mise en valeur des ressources en eau de pluie dépend étroitement des évaluations hydrologiques. Couramment, le concepteur d'un réseau d'assainissement s'intéresse à la pluie à travers ses conséquences en terme de ruissellement, donc de débit à l'exutoire du BV.

1.3.1 Définition du ruissellement pluvial

En général, les spécialistes se trouvent devant la difficulté de trouver des définitions claires et simples pour des modalités et des formes de ruissellement qui n'entrent pas dans le cadre d'écoulements mieux connus tels que ceux des eaux des rivières (Guiton, 1994).

Le ruissellement pluvial est un phénomène physique localisé dans l'espace et dans le temps, présente un écoulement des eaux pluviales à la surface de la terre perméable ou étanche. Lors d'un événement pluvieux, le surplus d'eau de pluie, n'ayant pas pu s'infiltrer dans les espaces verts ni s'évaporer, s'écoule en surface sous forme de ruissellement.

Le ruissellement pluvial provoque des inondations en milieu urbain et ce problème n'est pas nouveau. La littérature scientifique est riche de nombreuses études traitant cet aspect. En 1994, Guiton M. développe une thèse sur ruissellement et risque d'inondation en milieu urbanisé. La thèse établit les fondements techniques essentiels pour enclencher les moyens de lutte contre le ruissellement, en tenant compte du fait que cette lutte doit porter à la fois sur la formation du ruissellement et sur ses effets, et que chaque phase du processus (rétention, conduite de l'écoulement, protection) requiert des solutions techniques spécifiques. Aussi, le travail de Hingray, 1999, s'inscrit dans la problématique de la modélisation des inondations par ruissellement pluvial d'un secteur urbanisé.

En milieu urbain, une fois un aléa pluviométrique est survenu, la rapidité de la transformation des pluies en ruissellement est interprétée par la réaction des surfaces imperméables à ce phénomène et la force du ruissellement dépend d'une combinaison de multiples facteurs (événement, site et les activités humaines).

1.3.2 Paramètres influençant le ruissellement pluvial

La production du ruissellement pluvial et la dynamique de ce phénomène reposent sur une certaine composante liée à l'occupation et l'imperméabilisation des sols, à la morphologie des bassins versants, à la longueur des chemins superficiels et le temps de concentration des bassins versants.

1.3.2.1 L'occupation et l'imperméabilisation des sols

Le début de l'apparition du ruissellement dépend de l'intensité de pluie et de l'occupation des terres qui conditionne l'infiltration de l'eau de pluie. L'aléa déclenche un ruissellement pluvial, mais quand et comment dépend de l'état et l'imperméabilisation des sols, ensuite, les conditions hydriques initiales du sol modifient le stockage en surface. Au centre de la ville, le ruissellement pluvial apparaît rapidement juste après un événement pluvieux, car la capacité d'infiltration du sol est faible et se modifie rapidement, en raison de l'augmentation des revêtements étanches. Toutes ces occupations évoquent l'urbanisation progressive à la périphérie du centre de la ville, diminuent les quantités d'eau à infiltrer, augmentent et accélèrent le volume de ruissellement, surchargent d'une manière croissante les vieux réseaux et augmentent le risque d'inondation pluviale.

1.3.2.2 La morphologie des bassins versants

La réponse hydrologique est une fonction de variables aléatoires (Pluies) et de variables physiographiques (dimensions, pente et forme du bassin, type de conduites, type de sol et pourcentage imperméable). La morphologie du bassin à étudier exerce une influence directe sur le volume et la répartition du ruissellement. En effet, les bassins versants ne présentent pas tous la même forme, la même inclinaison ni la même capacité de stockage. Par conséquent, l'eau de pluie ruisselant sur ces bassins varie en fonction de la topographie et de la forme du terrain. La pente, par exemple, peut fortement modifier le potentiel d'infiltration de l'eau de pluie et augmenter rapidement la vitesse du ruissellement pluvial.

1.3.2.3 La longueur des chemins superficiels

En milieu urbain, les chemins superficiels, leur densité et leur contribution influent fortement sur la réponse hydrologique du bassin. La rapidité des réponses des bassins versants est généralement expliquée par la formation de ruissellement à la surface du sol dont le temps de transfert est court. Généralement un bassin versant est représenté par une seule unité hydrologique et le réseau pluvial par un seul tronçon représentatif du réseau pluvial. Les chemins superficiels ne donnent pas lieu à des inondations pluviales si l'eau de pluie peut s'infiltrer dans le sol et le taux d'infiltration de la plupart des sols, en la présence de couvert forestier dense est très supérieurs aux intensités pluvieuses que l'on peut rencontrer lors des aléas pluviométriques. Par contre, dans le milieu urbain, la couverture par du béton, du bitume ou d'autres matériaux étanches de grandes étendues entraîne une augmentation des chemins superficiels et des volumes ruisselés.

1.3.2.4 Le temps de concentration

Au cours du temps, le temps de concentration du site diminue si les espaces verts ont été rendus imperméable. L'influence du temps de concentration du bassin versant se traduit par une diminution du temps de montée et une augmentation de la pointe de l'hydrogramme au point de crue. En milieu urbain, la proportion des surfaces rendues imperméables est considérable, ce qui bouleverse la composante « ruissellement pluvial » du bilan hydrologique. Les points d'inondations pluviales sont plus nombreux en milieu urbain que dans les zones agricoles, d'une part parce que le ruissellement pluvial y est plus important, et d'autre part parce que les surfaces imperméables accélèrent l'écoulement. En conséquence, le temps de réponse du bassin à l'averse est réduit et le débit de pointe augmente.

1.4 Les modèles classiques pluies – débits pour modéliser le ruissellement pluvial urbain

Pour atteindre des objectifs multiples, l'hydrologie met en œuvre des modèles (statistiques ou déterministes) transformant la pluie en débit par l'intermédiaire des opérateurs dont les paramètres sont reliés à une description physique des bassins versants. La fonction d'un modèle pluie-débit est

d'estimer débit de pointe à l'exutoire de chaque bassin versant et l'hydrogramme (évolution du débit dans le temps) du ruissellement résultant des précipitations tombées. Les travaux de Desbordes, 1984, constituent une synthèse de ces connaissances pour les besoins de l'hydrologie urbaine.

1.4.1 Le concept général des modelés classiques pluies – débits

Dans les milieux urbains qui nous intéressent, le processus d'écoulement rapide de l'eau de pluie est l'objet principal de l'hydrologie urbaine. Généralement, il est facile de concevoir un processus « Pluie – Ruissellement pluvial – débit à l'exutoire » en deux étapes.

La première étape se concentre sur la répartition de la pluie tombée sur bassin versant et la réaction du sol. À l'origine, la pluie se divise en deux parties. La première se connecte rapidement au réseau hydrographique. La seconde est absorbée ou infiltrée, destinée par la suite à s'évaporer ou à contribuer à la composante lentement évolutive du débit, le "débit de base".

La deuxième étape concerne la lame d'eau disponible pour un écoulement rapide qui sera acheminée dans le bassin jusqu'à son exutoire selon un processus gouvernant à la fois le temps de transfert et la réduction de l'onde de crue.

Les modèles classiques pluies-débits sont utilisés pour modéliser le ruissellement pluvial urbain. Ils s'appliquent à des composantes comme l'intensité moyenne maximale de la pluie, temps de concentration, surface du bassin versant où aux interactions des données sur le volume d'eau de pluie, infiltration et imperméabilisation des sols. Souvent, Le modèle classique pluie-débit prend en compte non seulement le modèle de pluie, mais aussi le pourcentage d'infiltration (le stockage) ainsi que le mode d'occupation des sols.

Le concept général des modèles classiques pluies – débits peut être illustré dans **Figure 1-2** :

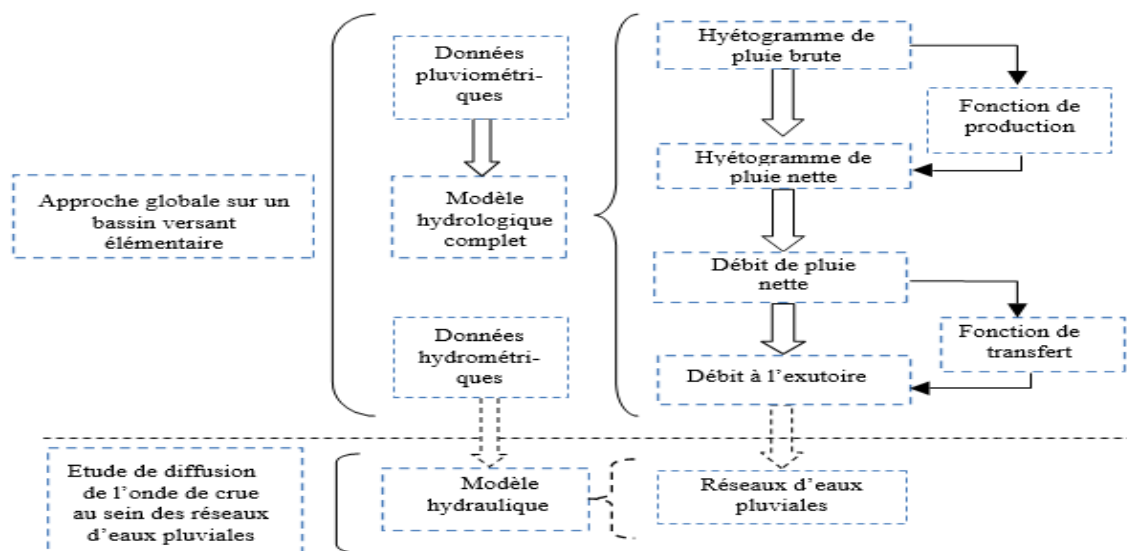


Figure 1-2 : Schéma général du processus de transformation de la pluie brute en débit [CHOCAT & al. 1997]

1.4.1.1 L'intensité moyenne maximale – modèle de pluie

Prévoir l'évolution du ruissellement en milieu urbain nécessite d'utiliser un modèle ou des modèles de pluies et la nature de l'information sur la pluie dont on a besoin dépend du problème à traiter. L'indisponibilité des données pluviométriques au niveau du bassin d'étude, impose l'étude hydrologique sur un ou plusieurs autres bassins analogues, pour lesquels les mesures sont disponibles. Les résultats issus de telles études peuvent être transposés sur le bassin d'étude. Pratiquement, les études pluviométriques donnent une possibilité de construire des courbes IDF de la pluie qui sont directement utilisées dans les modèles statistiques reliant le débit à l'intensité de la pluie. Une averse d'intensité moyenne maximale, d'une certaine durée, se produisant en moyenne sur l'ensemble des périodes annuelles.

1.4.1.2 La surface du bassin versant

Après la modélisation de la pluie c'est la recherche du volume d'eau ruisselé sur une entité globale (surface du bassin versant). Le modèle de la pluie présente l'entrée fondamentale aux modèles de ruissellement et le modèle pluviométrique, courbes intensité-durée-fréquence (IDF), demeure l'approche statistique la plus courante, particulièrement en hydrologie urbaine, ensuite, la modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant est généralement abordée de façon globale. Le comportement hydrologique des bassins versants face à l'aléa pluviométrique dépend de plusieurs caractéristiques morphométriques et d'autres facteurs d'ordre anthropique caractérisés par des aménagements. Mais, en premier lieu, la surface du bassin versant présente la composante principale dans le concept d'un modèle classique pluie – débit. A ce facteur s'ajoute encore les conditions et la validité d'appliquer un modèle classique. Les calculs hydrologiques se basent sur la surface du bassin versant pour estimer les débit max.

1.4.1.3 La quantité d'eau de pluie reçu par le sol

Des parcelles d'espace non homogènes forment l'unité globale de calcul hydrologique. La végétation s'oppose au ruissellement et favorise l'infiltration. Les tiges constituent des obstacles à l'écoulement superficiel qui diminuent la vitesse des filets d'eau. Les racines augmentent la perméabilité du sol et absorbent par des couches superficielles une partie d'eau de pluie, et une autre partie d'eau s'enfonce dans les couches plus profondes. Pour établir une relation entre la pluie et le débit à l'exutoire du bassin versant il est nécessaire de procéder à la recherche d'estimer les quantités d'eau de pluie absorbés ou infiltrés dans le sol. La nature de la couverture végétale influence sur la production du ruissellement pluvial et joue un rôle important lors de l'identification des paramètres du coefficient de ruissellement.

1.4.2 Les méthodes classiques

Pour appliquer l'une des méthodes nous avons besoin des données et d'évaluer certains paramètres, comme la surface du bassin versant (hectare), la durée de la période de pluie critique du bassin (sensiblement égale au temps de réponse) (minute), la hauteur de pluie (millimètres), le coefficient

d'imperméabilisation (pourcentage), la longueur du plus long parcours de l'eau (mètre) et la pente en %. Actuellement, de nombreuses formulations existent pour les bassins versants urbains, et les ajustements les plus utilisés dans le domaine est celles obtenus par Desbordes, 1974 et Desbordes & Ramperez 1977 ; (CHAMOUX, 2003); (Morel, 1996). Les méthodes d'estimation des débits de ruissellement et des hydrogrammes développées et utilisées dans domaine sont :

1.4.2.1 Méthode rationnelle.

Il s'agit d'une approche classique en hydrologie urbaine, utilisée pour estimer le débit de pointe lors d'un événement pluvieux. Elle repose sur plusieurs hypothèses fondamentales visant à simplifier la complexité des processus hydrologique.

- **Pluie uniforme dans le temps et l'espace** : Il est supposé que l'intensité des précipitations reste constante tout au long de l'événement et qu'elle est répartie de manière homogène sur l'ensemble du bassin versant.
- **Durée de pluie égale au temps de concentration** : La durée de l'épisode pluvieux est assimilée au temps nécessaire pour que les eaux provenant du point le plus éloigné du bassin atteignent l'exutoire.
- **Coefficient de ruissellement constant** : L'ensemble des pertes hydrologiques (infiltration, évaporation, rétention, etc.) est regroupé dans un coefficient de ruissellement unique, considéré comme constant, indépendamment de la durée ou de l'intensité de la pluie.
- **Bassin versant de faible superficie** : Cette méthode est principalement applicable à des bassins versants de petite taille (généralement inférieure à 250 hectares), pour lesquels les hypothèses précédentes sont raisonnablement valides).

L'équation de la méthode rationnelle s'écrit comme suit :

$$Q_p(T) = C \cdot i_{(tc,T)} \cdot A \quad (1.1)$$

Avec :

- Q_p : Débit de pointe (en m^3/s ou l/s). Il s'agit du débit maximal durant un événement pluvieux de période de retour T .
- C : Coefficient de ruissellement (sans unité). Il représente la proportion de précipitations qui devient du ruissellement. Ce coefficient dépend du type de sol, de la pente, et du degré d'urbanisation (zones imperméables).
- $i_{(tc,T)}$: intensité pluviométrique (en mm/h ou $l/s \cdot ha$). Elle est souvent déduite des courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) pour une durée équivalente au temps de concentration.
- A : Aire du bassin versant (en hectares ou km^2). C'est la superficie qui collecte les précipitations, participant ainsi à l'écoulement du ruissellement.

1.4.2.2 Méthode superficielle de Caquot

Cette méthode représente une évolution par rapport à la méthode rationnelle en évitant d'estimation des temps de concentration et en prenant en compte les possibilités de stockage des eaux sur le bassin versant (en surfaces et dans les canalisations). La méthode de CAQUOT est bien adopter au cas des milieux urbains, cette dernier consiste à établir un bilan hydraulique du volume d'eau précipité sur le bassin versant (de surface A exprimée en ha) jusqu'à l'instant à peu près égal au temps de concentration t_c , ou l'on observe le débit de pointe Q_p , a l'exutoire.

La formule superficielle de Caquot s'écrit :

$$Q_p(T) = K \cdot C^\mu \cdot I^\alpha \cdot A^\beta \quad (1.2)$$

Et pour le débit corrigé la formule superficielle de Caquot s'écrit :

$$Q_{pc}(T) = m \cdot K \cdot C^\mu \cdot I^\alpha \cdot A^\beta \quad (1.3)$$

Avec :

- $Q_p(T)$: débit de pointe de période de retour T (en m³/s) à l'exutoire du BV
- $Q_{pc}(T)$: débit de pointe corrigé de période de retour T (en m³/s) à l'exutoire du BV
- C : coefficient de ruissellement moyen du BV
- I : pente moyenne le long du réseau du BV (en m/m)
- A : surface du BV (en ha)
- m : coefficient de la correction de débit, $m = \left(\frac{M}{2}\right)^{0.7b(T)}$
- M : coefficient d'allongement $M = L/\sqrt{A}$
- L : longueur du cheminement par lequel transite le plus fort débit
- $a(T)$ et $b(T)$:: paramètres entrant dans la formulation de la pluie de période de retour T ($i = a(T)t^{b(T)}$)
- $\alpha, \beta, \gamma, \delta$: coefficients qui dépendent du site et de la période de retour.

1.4.2.3 Modèle de l'Hydrogramme Unitaire (H.U),

Repose sur l'observation de la réponse d'un système hydrologique à une pluie de durée très courte (impulsion) par rapport à son temps de concentration [CHOCAT & al. 1997]. Tellement, les observations de débit de crue sont très rares établis dans des espaces du milieu urbain, donc la pratique d'identifier cet hydrogramme par la méthode directe est impossible. Pour cette raison,

plusieurs approches ont été élaborées et reposent sur un nombre variable de paramètres plus ou moins facilement déterminables. Par exemple calcul du temps de concentration (t_c) d'un bassin versant, cette valeur peut être calculée à partir de mesures réalisées sur le terrain, mais dans cas générale cette dernière est approchée par des formules empiriques. L'avantage de ce paramètre associe généralement les caractéristiques de formes des bassins versants aux temps de parcours des eaux de ruissellement.

Équation de l'hydrogramme unitaire est généralement exprimé par une fonction de débit en fonction du temps. L'une des formes les plus courantes de l'équation est :

$$Q(t) = K.P(t) \quad (1.4)$$

Avec :

$Q(t)$ = Débit de ruissellement à l'instant t (m^3/s)

$P(t)$ = Précipitation cumulée à l'instant t (en mm/h)

k = Coefficient qui dépend des caractéristiques du bassin versant et est souvent exprimé en fonction du temps (soit en m^3/mm ou m^2).

1.4.2.4 Méthodes à réservoirs

C'est un modèle conceptuel qui assimile le fonctionnement d'un bassin versant à celui d'un réservoir se remplissant avec un débit égal à celui de la pluie nette (après déduction des pertes) et se vidangeant selon un débit correspondant à celui observé à l'exutoire du bassin versant. Ainsi, ce modèle agit comme une fonction de transfert permettant de transformer un hydrogramme de pluie nette en un hydrogramme de débit à l'exutoire. Le système du modèle linéaire se définit par deux équations. Dans la première, on suppose que la différence entre le débit de pluie nette et le débit à l'exutoire représente le volume stocké dans le bassin versant à un instant donné. Ensuite, dans la deuxième équation, ce volume stocké est exprimé en fonction du débit à l'exutoire et du temps de réponse du bassin versant.

Trois lois gouvernent le fonctionnement de ce modèle réservoir :

$$\begin{aligned} dV(t)/dt &= Q_e(t) - Q_s(t) \quad (\text{Loi de conservation}) \\ V(t) &= A[H(t)] \quad (\text{Loi de stockage}) \\ Q_s(t) &= B[H(t)] \quad (\text{Loi de vidange}) \end{aligned} \quad (1.5)$$

Avec :

- $H(t)$: désigne la hauteur dans le réservoir à l'instant t ;
- $V(t)$: volume d'eau stocké dans la structure à l'instant t ;

- $Q_e(t)$: débit entrant à l'instant t ;
- $Q_s(t)$: débit sortant à l'instant t ;
- A et B sont des fonctions de la hauteur H du réservoir.

Tableau 1-1 : Synthèses des méthodes d'estimation des débits de ruissellement et des hydrogrammes

Méthode	Principe de base	Paramètres principaux	Avantages	Limites	Applications
Méthode rationnelle	Évaluation du débit de pointe à partir de la pluie maximale	- Coefficient de ruissellement - Intensité de la pluie - Surface du bassin versant	Simple à utiliser, adaptée pour des petits bassins ($A < 5 \text{ km}^2$)	N'évalue que le débit de pointe, pas l'évolution du débit dans le temps	Calcul des pics de crue, dimensionnement de petits ouvrages
Méthode superficielle de Caquot	Extension de la méthode rationnelle, prenant en compte la pente et les caractéristiques du sol	- Coefficient de Caquot - Pente du sol - Surface du bassin	Prend en compte plus de variables (pente, nature du sol), plus précise que la méthode rationnelle	Nécessite plus de données, complexe pour des grands bassins	Dimensionnement des réseaux d'assainissement, petits ouvrages
Modèle de l'hydrogramme unitaire (HU)	Génère un hydrogramme à partir d'une pluie nette unitaire	- Pluie nette - Temps de concentration - Surface du bassin	Simple et utile pour modéliser des réponses hydrologiques basiques	Hypothèses simplifiées, ne convient pas pour des précipitations complexes	Gestion hydrologique basique, modélisation rapide
Méthodes à réservoirs	Modélisation des écoulements à l'aide de réservoirs successifs	- Temps de retard - Paramètres d'écoulement des réservoirs	Modèle réaliste des écoulements, permet de capturer des phénomènes complexes	Modèle complexe, exige beaucoup de données et de calibration	Modélisation détaillée des crues, prévision hydrologique

1.4.3 La tendance observée actuellement

Le problème de ruissellement pluvial en milieu urbain renforce la tendance actuellement observée vers une limitation d'utilisation des modèles classiques et des données de mesures sur site. Une autre tendance de réduction de ruissellement à la parcelle et en amont du bassin versant, peut toutefois être observée de manière générale en villes durables.

1.4.3.1 Une diminution de la demande d'utilisation des modèles classiques

Aujourd'hui, plusieurs modèles d'hydrologies trouvent leurs limites d'application pour les BV urbains (bassins de petites tailles à réponse rapide) et s'écartent de plus en plus de l'hydrologie

urbaine, puisque les échelles d'espaces et de temps n'y sont pas les mêmes, aussi les formes de ruissellement diffèrent totalement.

L'utilisation de méthodes simplifiées basées sur des relations empiriques s'est répandue, avant la densification des villes, le changement climatique et la venue des micro-ordinateurs puissants. L'application de la méthode calcul classique la plus simple permettra d'obtenir les informations requises pour les concepteurs. A titre d'exemple la méthode rationnelle, dont l'origine remonte à 1889 pour l'Amérique du Nord, est largement utilisée pour l'estimation des débits de ruissellement et donne des réponses satisfaisantes pour de petits bassins versants.

Un des problèmes capitaux qui peut être identifié est la sous-estimation des débits de ruissellement. La cause est due à l'application des différentes méthodes simplifiées, aux données d'entrée différentes pour la pluie de projet ou encore à l'identification d'autres paramètres de base comme les pourcentages d'imperméabilisation des différents types des sols et le temps de concentration des surfaces urbanisées.

D'ailleurs, à l'arrivée de deux pluies identiques, on peut facilement avoir un débit différent pour le même bassin. Fréquemment, les conditions antérieures d'humidité différentes d'un même bassin versant contribueront à la production des débits et des volumes de ruissellement complètement différents.

De plus, la distribution temporelle de la pluie, la localisation des intensités maximales de pluie, la réponse rapide des surfaces imperméables sont des paramètres ayant une influence sur le ruissellement pluvial et augmentant le débit de point à l'exutoire du bassin versant. Malheureusement, dans la pratique, la capacité du réseau pluvial est généralement limitée à la période de retour retenue pour la pluie de projet.

Le recours à d'autres approches est une solution demandée, de faire appel à la modélisation plus avancée donnera nécessairement des réponses acceptables et diminuera les impacts des problèmes futurs. Les modèles qui rendent simplement possible l'analyser du ruissellement en plus grand détail avec moins de temps, et fournissent une base d'analyse commune pour les différents utilisateurs.

1.4.3.2 Une diminution d'introduction des facteurs économiques

Le dimensionnement des ouvrages d'un réseau d'assainissement fait référence à des événements d'une certaine période de retour, qui en réalité devrait concerner le risque de défaillance des ouvrages. En fait, cette période de retour concerne l'intensité moyenne maximale de la pluie au cours d'une durée équivalente à celle du temps de concentration du bassin versant. Celle-ci s'appuyait sur des estimations ponctuelles de pluies de périodes de retour données (10 ans ou 20 ans). Ces événements correspondent à un aléa dit "courant" et la gestion des risques correspondant à un aléa dit "rare".

Les processus pouvant affecter le ruissellement étant complexes et la modélisation du ruissellement pluvial doit pas se faire en s'appuyant uniquement sur certain nombre hypothèses. A présent, les régimes hydrologiques varient suivant la répartition des précipitations et suivant les conditions naturelles des bassins versants (Remenieras, 1980).

En milieu urbain, la modélisation des phénomènes a bien avancé, mais reste toujours difficile et compliquée car les pas du temps et les pas d'espace sont plus courts qu'en hydrologie classique, ou l'approche est plus simple car l'infiltration est généralement considérée comme n'ayant pas d'incidence sur le ruissellement urbain (Rousselle, 1990).

1.5 Les réseaux d'assainissement pluviaux comme solutions de drainage des eaux pluviales urbaines

En milieu urbain, l'infiltration naturelle de l'eau de pluie est souvent remplacée par le transfert des eaux pluviales dans les réseaux pluvieux vers un exutoire. La capacité de ce réseau est généralement obtenue par l'application des méthodes de dimensionnement après le choix de la période de retour de la pluie du projet. Cette solution de drainage des EP est compromise entre les moyens disponibles et l'objectif fixé (le coût et le risque d'inondation), cette opération trouve certaines limites d'application autant que les problèmes liés au fonctionnement et la gestion du réseau pluvial présentent des charges importantes dans la plus parts des villes au monde (Triantafillou, 1987 ; Chocat, 2001 ; Chalaux et al, 2015).

1.5.1 Le réseau pluvial

C'est la solution utilisée pour drainer l'eau de pluie en milieu urbain et de rendre sain ces surfaces à l'aide d'une structure souvent linière. Dans ce travail, nous concentrons beaucoup plus sur les interactions des paramètres liés à l'eau de pluie (l'aléa pluviométrique, le ruissellement pluvial) et la fonctionne du réseau pluvial qui transport des quantités provenant d'une pluie et qui converge gravitaire-ment vers un point unique situé à une altitude inférieure « exutoire ».

1.5.1.1 Définition du réseau d'assainissement pluvial

Les réseaux d'assainissements pluvial (RAP) sont conçus de manière à prévenir les inondations pluviales avec un certain seuil de risque, c'est-à-dire la probabilité qu'un événement dépassant un certain niveau se produise. Ce seuil de risque a de fortes chances d'être atteint au cours de la vie d'un ouvrage, il est donc souhaitable et recommandé par l'Instruction Technique de 1977 d'envisager une gestion de l'inondation en vue de limiter ses conséquences.

Le RAP présente un assemblage complexe d'ouvrages, en général est composé des canalisations, des chambres d'accès et des ouvrages dit « spéciaux » ou « annexes ». L'ensemble de conduites sont liées entre elles, parcourant sous terre les zones urbanisées et communiquant avec la surface par des ouvrages tels que les branchements, les avaloirs et les bouches. Les branchements assurent la liaison du réseau avec la surface bâtie (logements privés, manufactures), tandis que les avaloirs

et les bouches donnent issue à la surface libre. Cet ensemble de conduites communique avec le milieu naturel, le réseau hydrographique de surface (ruisseaux, rivières, fleuves, mer), le sol, les nappes souterraines et de puits d'infiltration ...etc.

Lorsqu'on parle du RAP, cohabitant avec le réseau d'assainissement d'eaux usées, il faut rappeler qu'il existe quatre types de réseaux fondamentaux.

- **Le système séparatif** qui consiste à réserver un réseau à l'évacuation des eaux usées domestiques (et souvent aussi aux effluents industriels), alors que l'évacuation des eaux pluviales est assurée par un autre réseau (canalisations, fossés, caniveaux, écoulement superficiel...);
- **Le système unitaire** qui consiste à évacuer l'ensemble des eaux usées et pluviales par un seul réseau, généralement pourvu de déversoirs, permettant en cas d'orage le rejet direct par surverse d'une partie des eaux dans le milieu naturel ;
- **Le système mixte**, on appelle habituellement système mixte un réseau constitué, suivant les zones, en partie en système unitaire et en partie en système séparatif. Plus précisément le système unitaire se situe à l'aval et les parties en séparatif à l'amont.
- **Le système pseudo-séparatif** qui consiste à réaliser un réseau séparatif particulier pour lequel il est admis que le réseau d'évacuation des eaux usées peut recevoir certaines eaux pluviales (toitures, caves...) en provenance des propriétés riveraines. Dans ce cas, la fonction du réseau d'évacuation des eaux pluviales est réduite à la collecte et à l'évacuation des eaux ruisselant sur la chaussée et les trottoirs.

Le réseau doit fonctionner sans obstruction, l'accès doit être prévu pour l'entretien et les fréquences d'inondations doivent être limitées aux valeurs exigées. En outre, lorsque l'évacuation des EP est commune avec celle des eaux usées, il y a des risques importants d'impact de la pollution des effluents en cas d'inondations pluviales.

1.5.1.2 Le rôle du réseau pluvial

En milieu urbain, l'évacuation des eaux des EP est la première fonction attribuée au réseau pluvial. Le réseau pluvial assure la collecte, le drainage, le transport des eaux pluviales, plus le contrôle des déversements finals. Le rôle de ce réseau, principalement est de :

- Protéger la ville contre les inondations et d'améliorer la sécurité des personnes. Les premières canalisations, dans leurs formes les plus primitives -les fossés- visaient à débarrasser les centres urbains des eaux de pluie, qui pouvaient perturber le déroulement des activités commerciales et, par conséquent, freiner leur développement économique et même menacer la vie de ses habitants.
- Préserver l'environnement et de réduire la pollution déversée par temps de pluie. Le souci du réseau pluvial est de plus en plus renforcé à la protection de l'environnement, la

préservation des ressources naturelles et la concentration de grandes quantités des rejets aux exutoires. Actuellement, des techniques alternatives sont introduites au réseau pluvial et l'idée est de stockage et de retarder l'écoulement des eaux pluviales, de favoriser l'infiltration des eaux pluviales et de diminuer la surcharge des canalisations.

1.5.1.3 La structure physique du réseau

En général, un collecteur est composé de conduites, de regards, de puisards, et menu de bassins de rétention, de décantation et de différents ouvrages de contrôle. (Triantafillou, 1987).

Au début, la fabrication des canalisations est en maçonnerie de briques ou de pierres, actuellement, les matériaux utilisés sont le béton, l'amiante ciment, le grès, le polychlorure de vinyle et la fonte ductile. La forme de la section des canalisations est circulaire ou ovoïde, les dimensions des collecteurs sont déterminées suite aux calculs du débit des eaux évacuées. Les diamètres sont de l'ordre de 350mm (branchements) jusqu'à 2.000. Autres ouvrages qui s'y ajoutent et assurent les liaisons entre les différents tronçons qui composent le réseau pluvial.

- **Regards :** ouvrages souterrains reliés aux canalisations, destinés pour faciliter la connexion des drains, la surveillance et permettre le nettoyage de toutes les parties susceptibles de recevoir des dépôts. Il convient de disposer les regards en nombre suffisant pour assurer le bon fonctionnement de l'ensemble, et d'en placer notamment à tous les changements de pente ou de direction des conduits.
- **Conduits surdimensionnés ou galeries** de dimensions suffisantes pour qu'un homme puisse s'y introduire. Pendant les orages, ces éléments peuvent recevoir sans difficulté des grandes matières solides entamées par les eaux de ruissellement. Les galeries peuvent être placés au besoin des canalisations diverses (distribution d'eau ou d'énergie, des câbles télégraphiques ou téléphoniques, ...etc.) et les transformer en voies souterraines susceptibles d'utilisations multiples.
- **Les conduits sont en général**, situés au-dessous de la voirie à une profondeur de 3 à 5m., parfois peuvent atteindre les 6m (la profondeur admissible).
- **Déversoirs** sont constitués par des seuils et à partir d'un certain niveau, les eaux trouvent un écoulement supplémentaire. Planter pour éviter des sous-pressions dangereuses, et même des débordements et des inondations (formant trop-pleins, laissant échapper les eaux surabondantes vers les nappes d'eau superficielles du voisinage).

1.5.2 Les méthodes de dimensionnement du RAP

Un réseau pluvial est calculé en fonction d'un risque de défaillance mesuré par sa période de retour (période de temps s'écoulant en moyenne entre deux observations supérieures ou égales à la valeur considérée). En fait, la période de retour est calculée par rapport à l'événement pluvial pouvant

causer la défaillance. Il s'agit ici de l'usage le plus fréquent et le plus ancien des mesures de pluie en hydrologie urbaine.

La conception inclut plusieurs étapes essentielles :

- La définition de la zone qui doit être couverte par le projet et le recueil des données concernant son environnement,
- Le choix du tracé d'assainissement pluvial, ainsi que des composants clés du réseau, tels que les regards, les collecteurs et autres éléments structurants.
- La fixation d'une période de retour qui correspond à une pluie dont l'intensité maximale au cours d'une certaine durée présente une période de retour donnée (courbes Intensité-Durée-Fréquence),
- Calcul des dimensions des canalisations en fonction de leurs pentes,
- Tracé du profil en long du réseau et élaboration du dossier d'exécution de la canalisation avec une vérification du bon fonctionnement du réseau.

1.5.2.1 Conception du tracé du réseau pluvial

Sur un périmètre bien défini du terrain à drainer nous projetterons l'ossature du réseau à dimensionner. Souvent, avant de passer au dimensionnement du réseau pluvial, on fait une conception du tracé des tronçons à réaliser et la connaissance du terrain (topographie) nous aiderions à indiquer le sens d'écoulements des eaux partout dans les chaussées, les fossés, les caniveaux, ...etc. D'ailleurs, il est nécessaire de connaître les dispositions relatives à la préservation de la santé, de la sécurité des habitants et de la qualité de l'environnement, aussi de connaître les dispositions particulières relatives au drainage adopté par le gestionnaire. Les informations relatives à l'urbanisation, aux équipements existants, aux caractéristiques du réseau existant et aux informations sur le milieu naturel sont nécessaires pour bien drainer les eaux de ruissellement pluviales et de choisir le tracé du réseau pluvial adapté.

1.5.2.2 BVE aux points de calcul

Le milieu urbain est découpé en plusieurs bassins versants, définis comme étant l'espace où les précipitations sont susceptibles de contribuer au ruissellement en direction du réseau de drainage qui possède un ou plusieurs exutoires situés à l'aval du réseau pluvial. Le dimensionnement des canalisations c'est de connaître en chaque point, les débits à évacuer. Cette opération nécessite une caractérisation des BVE et les dimensions des réseaux varient suivant les surfaces drainées vers ce point de calcul. L'unité spatiale à partir de laquelle est définie l'organisation globale d'un réseau de drainage des eaux pluviales urbaines est caractérisé par composantes principales : sa limite, son organisation et sa composition, sa forme. Le découpage en bassins versants élémentaires (BVE) relève d'une approche topographique et hydrographique du milieu urbain. La surface obtenue à partir d'une étude topographique est caractérisée suivant les paramètres physiques et géométriques

essentiels qui caractérisent classiquement un bassin versant, sa pente moyenne en %, sa superficie en hectare et son coefficient d'imperméabilisation en %, son temps de concentration, ... etc.

1.5.2.3 Le calcul du diamètre et vérification des conditions d'écoulements

En milieu urbain, le réseau considéré doit être dimensionné pour permettre le passage des eaux pluviales sans être débordé ou sans dommage, tout ça se fait avec une certaine fréquence exprimée en temps de retour et une estimation de la valeur maximum du débit de point. Le dimensionnement de la conduite est basé sur le débit de projet ou la précipitation a été servi pour définir la pluie de projet. Les formules employées pour déterminer le débit de projet sont celles de la méthode rationnelle et la méthode superficielle de Caquot, ces méthodes peuvent conduire un calcul des réseaux et la définition du débit volumique. Afin d'estimer le diamètre de la conduite nous utilisant le débit calculé au même temps on fait des vérifications de la vitesse d'écoulement et les conditions d'autocabrages et dépôts dans les conduites.

1.5.2.4 La problématique de la période de retour

Il est capital d'évaluer les quantités de pluie extrême en fonction de la probabilité d'occurrence afin de prévenir les phénomènes liés à la pluviométrie. Cependant, le caractère particulier du phénomène pluviométrique et la difficulté de modéliser le ruissellement pluvial pour dimensionner telles solutions conduisent les techniciens à limiter la définition du risque à la notion de période de retour admissible entre deux événements d'importances données. Par exemple, en France, l'usage a consacré la valeur de 10 ans.

L'accès difficile aux données pluviométriques constitue la principale préoccupation de l'analyse fréquentielle. A l'heure actuelle, faute de connaissances et de mesures suffisantes, de nombreuses études sont fondées sur une prise en compte très simplifiée et parfois très incertaine des phénomènes de pluie. Les précipitations ne sont analysées qu'à travers des séries d'observations ponctuelles de longueurs parfois assez courtes par rapport aux informations que l'on y recherche. Leur dimension spatiale est bien souvent négligée, de même que leur dynamique. Une attention particulière soit recommandée pour des centres urbains denses et aux endroits très exposés aux obstructions des conduites.

1.5.3 Les problèmes de fonctionnement du RAP

Les problèmes sont les encrassements, les détériorations et les vieillissements rapides dues à la complexité du milieu urbain, à l'augmentation dramatique des rejets, à la réduction d'infiltration et l'imperméabilisation des sols, aux intensités des phénomènes naturels et leurs fréquences, aux transferts de l'eau de pluie et la nature des effluents, à l'entretien périodiques et aux réparations des défauts.

1.5.3.1 Problèmes des fonctionnalités élémentaires des réseaux pluvieux

Le fonctionnement du réseau pluvial se diminue de plus en plus à cause des défauts sur les fonctionnalités élémentaires des réseaux. L'étanchéité et l'intégrité structurale sont des fonctionnalités élémentaires pour lesquelles l'ouvrage a été construit. D'ailleurs pour détecter les défauts, ponctuels ou longitudinaux du tronçon pluvial, et d'évaluer l'état de dégradation détaillée des tronçons est absolument difficile. Les défaillances du réseau pluvial peuvent être dûes aux interventions multiples, à la surcharge des réseaux, au l'âge de conduites, ...etc. Généralement les familles types d'anomalies sont (Vasconcelos, 2005; Schoefs, 2006) :

- **L'assemblage de deux conduites.** Cette fonction n'est pas bien assurée tout le temps en particulier lorsque l'emboîtement est insuffisant et en cas de déviation angulaire. Le déboîtement longitudinal, le désaxement horizontal et/ou vertical et le décentrement horizontal et/ou vertical sont des défauts qui provoquent la défection des joints (Plastique, mortier).
- **La géométrie de la section d'écoulement,** le passage de l'écoulement des eaux pluviales de réseau à ciel ouvert vers réseau fermé demande de modifier la section du canal et parfois cause un rétrécissement de la section dans le sens d'écoulement, le changement des sections des conduites de diamètre important aux plusieurs diamètres faibles (contraintes des sites) modifient l'écoulement des eaux pluviales et favorisant le dépôts et bouchages des conduites de diamètres faibles.
- **L'étanchéité,** c'est un défaut observé fréquemment en milieu urbain (L'infiltration, le retour en surface et débordement). Par exemple : La modification de tracé du profil en long engendre des contres pentes et favorisant la déformation des conduites à partir des points d'assemblages.
- **Fissures - Déformations,** le réseau pluvial est subi fréquemment aux efforts physique qui causent des fissures longitudinales ou transversales, des effondrements partiels ou total (voute/radier/latéral), des écrasements vertical ou latéral, des affaissements, des éclatements, des perforations., des poinçonnements, ..., etc. Le produit et la matière des conduites, le type du sol, la profondeur, la couverture, le trafic routière sont des paramètres influencent la structure du réseau.
- **Obstruction et obstacle.** Dépôts sédiments. Dépôts - résidus de chantier coulis béton, - blocs. Dépôts des graisses. Dépôts de concrétions. Racines et radicules obstruction partielle ou totale. Branchement pénétrant. Pénétration d'éléments extérieurs. Masque partiel ou total
- **Raccordements du branchement,** Piquage direct sur des conduites, en retrait, pénétrant et percement mal découpé, mal renformé. Parfois en contra sens, et fond de l'ouvrage et le raccordement son au même niveau, aussi les raccordements avec chute et la liaison canalisation vers regard de visite.

Dans le cas où l'aspect structural d'une conduite ne répond plus aux exigences des gestionnaires (déstabilisation de l'équilibre sol/conduite ou effondrement), l'étanchéité de l'ouvrage est mise en péril, ce qui engendre des intrusions de remblai ou de sol encaissant, minimisant la capacité hydraulique (obstruction du tronçon).

Autre cas, si la capacité hydraulique est menacée par l'intrusion d'un objet ou par un sous-dimensionnement de l'ouvrage, des mises en charges peuvent intervenir en amont du tronçon et provoquer des phénomènes de surpression sur les joints, pénalisant à terme l'étanchéité (phénomène de fatigue), créant des vides à l'extérieur de la conduite par entrainement des fines du sol extérieur et déstabilisant l'intégrité structurale.

Enfin autre possibilité, si l'étanchéité n'est pas respectée, une conduite sous nappe va infiltrer des eaux parasites qui peuvent, soit entrainer des fines provenant du sol encaissant (création de vides autour du tronçon) et affecter la stabilité, soit sous dimensionner les conduites aval (capacité hydraulique réduite).

1.5.3.2 Défaillances des réseaux d'assainissement

La description des défauts par familles d'anomalies est un moyen permettre l'établissement un diagnostic et la connaissance de l'état de dégradation des conduites non visitables peut être réalisé par l'inspection télévisée. La présence de défauts implique tôt ou tard l'apparition de défaillances ou de dysfonctionnements. Aujourd'hui, les défaillances des réseaux d'assainissement sont multiples, en plus le réseau enterré est dans la plupart des cas inaccessible, donc la vérification d'une anomalie n'est pas toujours permise à réaliser. Par exemple, vérifier qu'un affaissement de chaussée n'est pas dû à l'effondrement d'un collecteur, vieillissement des conduits. Neuf types de dysfonctionnement sont cités (Vasconcelos, 2005).

- **Infiltration**, par les joints situés entre de tuyaux emboîtés ou par la non-conformité d'un branchement raccordé au collecteur principal, pénétrations d'eau de l'ouvrage lorsque l'étanchéité d'un tronçon n'est plus assurée alors les eaux commencent à s'infiltrer dans le sol.
- **Exfiltration, c'est contraire de l'infiltration**. Ce dysfonctionnement est difficilement perceptible. Elle se caractérise le plus souvent par une perte de capacité d'évacuation des débits entraîne les fines et la décompression des terrains attenants.
- **Diminution de la capacité hydraulique, débordements (inondation), et déversements anormaux**. C'est cas de la mise en charge correspond à l'utilisation maximum du volume de la canalisation avec la création de pression sur l'intrados. C'est réduction du volume d'eau de pluie qui devrait passer et le ralentissement de la vitesse d'écoulement dû généralement à des obstructions diverses, à la présence d'un multiple réseau (les entrées supérieures à la sortie), à la diminution de la section d'écoulement ou à des branchements pénétrants, ..., etc.

- **Ensablement**, Ce phénomène correspond à l'accumulation de particules fines sur la partie basse des conduites. L'ensablement évolue progressivement et peut être observé au niveau des regards, des conduites, ... etc.
- **Bouchage**, C'est l'interruption de l'écoulement après une forte accumulation de matières solides. Ce dysfonctionnement nécessite souvent une intervention (curage curatif) en urgence car il provoque des débordements et des déversements en temps sec et en temps de pluie.
- **Déstabilisation du complexe sol-conduite**. Le complexe sol-conduite correspond à l'état du contact physique entre le sol et de la canalisation. La présence de vides ou de sols déconsolidés autour de la conduite peut induire des déplacements différentiels et des contraintes à différents points du linéaire du réseau. Si l'équilibre entre l'ouvrage et le sol n'est plus statique et non respecter alors le risque de rupture augmente et débordement des eaux pluviales est probable.
- **Attaque chimique et dégradation en cours par abrasion**. La corrosion des métaux des collecteurs, peut survenir, entre autres, suite aux attaques chimiques. Les attaques chimiques sur les matériaux de construction du tronçon, peuvent être partielle ou totale et peuvent atteindre toute l'épaisseur de la canalisation. La dégradation de l'état de surface de la canalisation due aux rejets d'effluents non contrôlés (raccordement sans autorisation).
- **Dégradation en cours par intrusion de racine**, elle affecte une canalisation construite à proximité d'arbres et de végétation arbustive dont les racines peuvent atteindre un ouvrage à grande profondeur (racines pénétrantes) ou à grande distance (racines traçantes). Ce phénomène peut être accentué en sol sec car les racines tentent de pénétrer dans la canalisation à la recherche d'eau.
- **Risque d'effondrement et l'altération de l'intégrité structurale**, ce dysfonctionnement cause des dégâts importants et détériore la structure des conduites, le problème tout ça se passe dans un instant (rapidement). Cette notion de risque correspond à une probabilité d'effondrement, puisqu'il est impossible de prédire exactement quand l'effondrement aura lieu.

En milieu urbain, la contribution du réseau d'assainissement dans la formation des débordements n'est pas écartée dans la plupart des cas. Puisque, une augmentation du débit liquide et une montée significative du niveau d'eau dans le lit d'oued sont souvent dues à la qualité du service qui gère ce réseau pluvial.

Tableau 1-2 : Synthèse des problèmes de fonctionnement d'un réseau RAP

Les problèmes de fonctionnement du RAP		Causes possibles	Conséquences
Fonctionnalités élémentaires	L'assemblage de deux conduites	Urbanisation rapide Conception ou installation inadéquates Absence de protections	Inondations et augmentation des surfaces touchées Perturbation de la circulation des véhicules et des piétons Dommages aux divers réseaux et infrastructures Augmentation des frais d'opération et de gestion
	La géométrie de la section d'écoulement		
	L'étanchéité		
	Fissures - Déformations		
	Obstruction et obstacle		
	Raccordements du branchement		
Défaillances	Infiltration et exfiltration	Respecter les normes techniques Accumulation de débris, Absence d'entretien régulier	
	Diminution de la capacité hydraulique, débordements et déversements anormaux		
	Ensablement,		
	Bouchage		
	Déstabilisation du complexe sol-conduite		
	Attaque chimique et dégradation en cours par abrasion		
	Dégradation en cours par intrusion de racine		
Risque d'effondrement et l'altération de l'intégrité structurale			

1.5.4 Les problèmes de gestion du réseau pluvial en milieu urbain

Réellement, le gestionnaire rencontre une complexité considérable dans la gestion du réseau pluvial. La complication est liée à la complexité du système anthropique de la ville et la durabilité du réseau pluvial. Les problèmes des institutions chargées de la gestion des eaux pluviales urbaines sont variables et concernent les moyens, les compétences, les effectifs, la qualité des travaux de conception, de construction, d'exploitation, ..., etc.

1.5.4.1 C'est un investissement lourd

Pour des raisons d'économie, plusieurs parties des villes ne sont pas drainées, puisque les coûts d'investissement sont lourds. En milieu urbain, les coûts de la gestion du réseau pluvial sont également des coûts importants, rassemble des coûts des investigations et de diagnostic, concerne aussi les coûts des exploitations et réhabilitation en cas des dysfonctionnements.

Un réseau pluvial est un investissement lourd à cause de sa structure, sa construction, son emplacement et son environnement. Il relie par le biais des collecteurs tous les lieux de la ville et le fait que le réseau est inaccessible dans la majorité des tronçons, donc il renforce cette caractéristique. Souvent, le réseau souterrain impose depuis les premières installations, l'assurance de son emplacement, équilibre et stabilité. Sa structure physique doit être apte à répondre aux contraintes mécaniques et physico-chimiques exercées à l'intérieur et à l'extérieur de ses canalisations. D'ailleurs, l'exigence d'une certaine qualité des produits (canalisation, ouvrages préfabriqués) c'est pour assurer une durée de vie minimum accordée au réseau, les interventions sur les structures, les remplacements, et les transformations se traduisent par une opération difficile et coûteuses.

L'entretien du réseau et le contrôle du service comprennent les opérations des curages, la réparation et le renouvellement du matériel endommagé, la vérification de la conformité des branchements particuliers et la surveillance des déversements, l'inspection du réseau et l'enregistrement des réclamations, la surveillance des chantiers d'extension et la mise à jour des plans des ouvrages.

1.5.4.2 La nécessité d'une bonne intégration sociale (usagers)

La solidarité entre les usagers est indispensable pour garantir le bon fonctionnement du réseau pluvial. Avant les événements pluvieux majeurs, il est souvent possible de réduire considérablement les dégâts en intervenant rapidement sur les obstacles à l'écoulement des eaux. Ces interventions, bien que peu coûteuses par rapport aux budgets consacrés à la gestion des inondations, jouent un rôle essentiel dans la prévention.

Cependant, cette solidarité et cette organisation concertée sont encore insuffisantes. Après une inondation, les frais engagés pour réparer les dégâts n'améliorent pas la résilience du réseau, et les réparations effectuées ne contribuent pas toujours à sa protection future. Cela montre l'importance d'un travail en amont et d'une véritable synergie entre les différents acteurs (association, comité) pour assurer un fonctionnement optimal du réseau pluvial avant qu'il ne soit trop tard.

Il est important de nettoyer les rues périodiquement pour prévenir les inondations en milieu urbain, notamment en raison de l'accumulation des déchets qui peuvent obstruer le réseau d'assainissement pluvial. Ce processus, connu sous le nom de « nettoyage des rues », consiste à éliminer les débris et les matières accumulées en surface pendant les périodes sèches, ce qui réduit la vulnérabilité du réseau aux pluies torrentielles.

Aux États-Unis, par exemple, ce nettoyage est modélisé pour évaluer l'accumulation de matières sur les surfaces urbaines, avec un intérêt particulier pour la pollution transportée par les eaux pluviales. Cette approche vise à comprendre comment les polluants accumulés sur les surfaces pendant les périodes sèches sont ensuite charriés par les eaux de ruissellement lors des pluies. Ces matières contribuent à la pollution des eaux et à l'obstruction des systèmes de drainage, augmentant ainsi le risque d'inondation.

Dans le contexte local, comme souligné dans le paragraphe I.6.2.2, l'accumulation des déchets dans les rues est l'un des facteurs majeurs qui rend le réseau pluvial vulnérable. En l'absence d'un nettoyage régulier, ces débris peuvent bloquer les égouts et réduire l'efficacité du réseau d'assainissement, amplifiant les risques d'inondations lors de fortes pluies. Cela souligne l'importance d'une gestion proactive et d'une maintenance continue pour assurer un fonctionnement optimal du réseau pluvial et protéger les zones urbaines contre les inondations.

1.6 Les causes et les conséquences des inondations pluviales urbaines

Il est important de se rappeler que les aménagements urbains mal élaborés, le dysfonctionnement du réseau pluvial, l'aléa pluviométrique peuvent également contribuer à la production d'une

inondation urbaine. Les dégâts engendrés (augmentation des surfaces inondées, les pertes de vies, de matériels, ..., etc.) sont les principales conséquences des inondations urbaines.

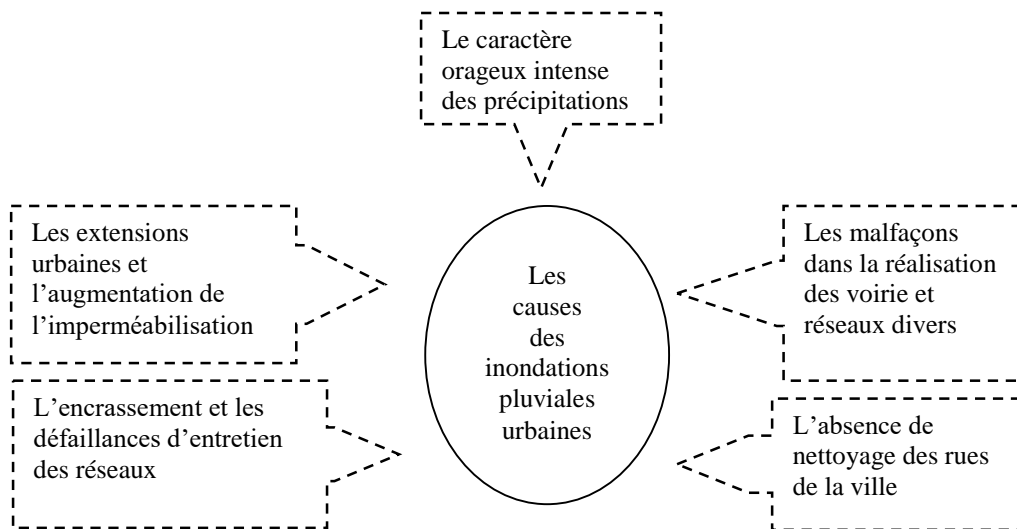


Figure 1-3 : Les causes conséquences des inondations pluviales urbaines

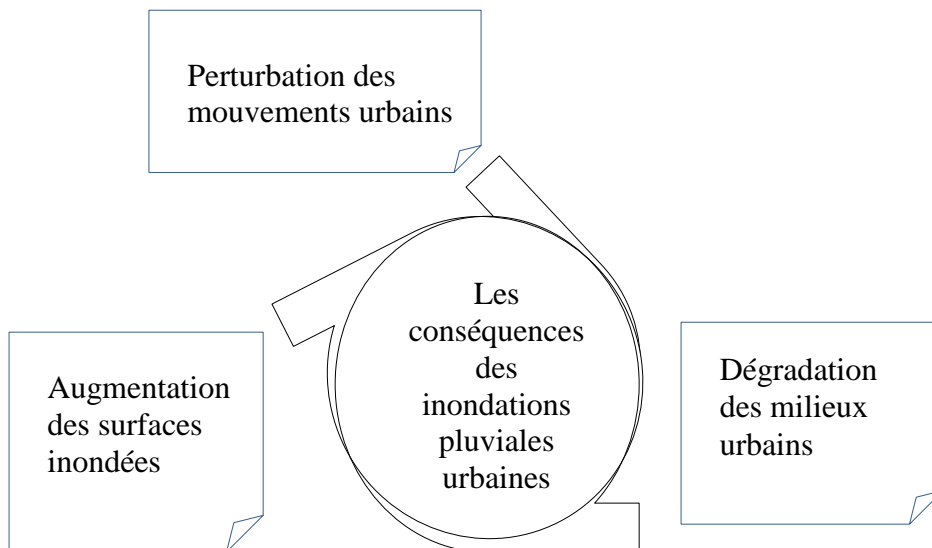


Figure 1-4 : Les conséquences des inondations pluviales urbaines

1.6.1 Les principales causes des inondations pluviales urbaines

En milieu urbain, les causes d'aggravation d'inondations par ruissellement/débordement pluvial sont nombreuses. Elles sont la conséquence des extensions urbaines et l'augmentation de l'imperméabilisation, de l'engorgement et les défaillances d'entretien des réseaux, des malfaçons dans la réalisation des voiries et réseaux divers, de l'absence de nettoyage de la ville et le caractère orageux intense des précipitations qui augmente avec le changement climatique (Desbordes, 2017).

1.6.1.1 Les extensions urbaines et l'augmentation de l'imperméabilisation

Les inondations pluviales sont découlées de l'urbanisation des espaces naturels et des activités qui y sont associées. Durant les dernières années, les milieux urbains ont connu un accroissement de l'imperméabilisation des sols et une augmentation des vitesses de transfert des écoulements pluviaux. Les extensions urbaines par la suppression des zones de rétention naturelle, par redressement des rivières et le comblement des bras morts, facilement peuvent être inondés.

Les modifications urbaines modifient son environnement naturel et augmentent la probabilité de survenue une inondation pluviale en renforçant la couverture des sols et modifiant les capacités d'absorption par le sol. L'imperméabilisation des toitures, des voiries, des lieux de parkings ... ont accentué le ruissellement pluvial et ont compliqué le problème d'évacuation des eaux pluviales.

En milieu urbain, le franchissement des aménagements nécessitant la réalisation des traversées de routes, mais, en cas d'aléa pluviométrique, il est possible qu'ils soient surchargés par des écoulements très supérieurs à ceux qui ont été initialement calculés. La situation peut devenir très grave si l'aménagement est placé sur des grandes longueurs des cheminements d'eau de pluie, sur des anciens marais ou d'anciens fonds de vallées.

1.6.1.2 L'engorgement et les défaillances d'entretien des réseaux

En milieu urbain, certaines parties du réseau pluvial peuvent entraîner des dommages considérables grâce à des effets cumulatifs. Le réseau pluvial est responsable de nombreux incidents, en raison d'un manque d'entretien, d'engorgement de la structure des conduites et des défaillances dues à la gestion du réseau pluvial.

Il convient de vérifier le bon fonctionnement des réseaux pluviaux, non seulement en situation normale, mais aussi en période de crise lorsque leur rôle n'est plus rempli. L'accumulation de débris favorisent la formation d'obstructions partielles de conduites et diminuent leurs capacités.

Fréquemment, les réseaux pluviaux font face à un excédent d'eau de pluie qui dépasse leurs capacités d'absorption, alors, lors de pluies exceptionnelles, le réseau n'est plus alors capable de fonctionner dans des conditions normales. Le problème c'est que les interventions d'entretien répétitives engendrent une réduction de leurs capacités de résistance, et augmentent leurs risques de défaillances.

1.6.1.3 Les malfaçons dans la réalisation des voiries et réseaux divers

Le milieu urbain c'est un système complexe dans lequel l'homme et son environnement s'échangent différents flux (eau, gaz, énergie, téléphone, route,) dus à ses multiples activités, domestiques, industrielles, de déplacement, ..., etc.

Le tissu urbain est fortement discontinu par la présence des différents réseaux, des infrastructures, et des trottoirs. Pour cette raison, les problèmes soulevés par les travaux de réalisation des voiries et réseaux divers sont liés aux plusieurs paramètres, comme la présence des contres pentes, l'absence de pente d'écoulement sur les chaussées et les trottoirs et la défaillance des ouvrages de collecte des eaux pluviales (avaloirs).

Les malfaçons dans la réalisation des réseaux divers dépendent d'orientation, de densité des voiries de la modification progressive des revêtements des voies. D'ailleurs, la réalisation des voies perpendiculaires aux courbes de niveaux concentre le ruissellement pluvial, ainsi, l'orientation de plusieurs voies dans le sens de la plus grande pente vers un point commune situé en bas facilitent le ramassage des quantités importantes d'eau de pluie dans un temps réduit.

Le stationnement, la dérive des voitures, la formation d'embâcles de voitures même par la réalisation des double dos dan, l'emplacement des avaloirs, orientation des murs face à l'écoulement préférentiel et construction vulnérable par sa mise en œuvre.

1.6.1.4 L'absence de nettoyage des rues de la ville

Une mauvaise gestion qui ne tient pas compte le nettoyage de la ville et l'accumulation des différentes matières (les cartons, les papiers, ...etc.) dans le réseau pluvial augmente et favorise la production des inondations pluviales.

Le milieu urbain expose la population au risque d'inondation pluviale dans l'absence de nettoyage des débris de toutes natures. Les pratiques d'utilisation des sols urbains peuvent entraîner une aggravation des dégâts lorsque celles-ci gênent les écoulements superficiels. Souvent, il faut penser à bien nettoyer la ville et à transporter les déchets à la décharge pour éviter beaucoup de situations graves.

Des matières et des sédiments se produisant en milieu urbain, lors des défrichements de terrains pour de nouveaux projets, pendant la réalisation des travaux de construction de nouveaux projets, ... etc. Pendant les périodes de pluies, des diverses substances solides non dissoutes provoquent des embâcles naturels superficiels, créent des difficultés et obstacles au ruissellement pluvial, aussi l'obstruction des conduites du réseau enterré. Une accumulation de matériaux apportés par l'eau, il peut s'agir d'accumulation de matériaux rocheux issus de l'érosion, de branches mortes, de plantes et de feuilles mortes.

1.6.1.5 Le caractère orageux intense des précipitations

La pluie est considérée comme un phénomène aléatoire variable dans le temps et dans l'espace, mais avec le changement climatique qui peut avoir un impact direct sur l'homogénéité spatiale des statistiques de pluies, le caractère orageux intense des précipitations augmente la surface active qui contribuera rapidement au débit de point.

Aujourd'hui, le caractère orageux intense des précipitations s'est accentué et sa non prise en compte à des sous estimations importantes des débits des projets. D'ailleurs, l'un des points faibles des conceptions classiques des réseaux pluviaux est la connaissance insuffisante des phénomènes pluvieux. D'autre part, en milieu urbain, l'aléa pluviométrique de ces valeurs intenses de courtes durées est difficilement modélisable et ceci est susceptible de provoquer des inondations pluviales si la capacité hydraulique du réseau pluvial est rapidement dépassée.

1.6.2 Les conséquences des inondations pluviales urbaines

En milieu urbain, on pense très souvent aux phénomènes « aléas pluviométriques » exceptionnels et aux inondations pluviales qui s'accompagnent de nombreuses conséquences. Des multiples enjeux très sensibles sont exposés au risque d'inondation et les impacts humains, sociaux, environnementaux déclenchés pendant une inondation sont considérables.

1.6.2.1 Augmentation des surfaces inondées

En milieu urbain, l'augmentation des surfaces touchées est en fait principalement liée aux revêtements des sols par des produits étanches (béton, ciment, fer, bitume), les constructions vulnérables (anciennes maisons, bloc, bâtiments) et certains infrastructures (routes, ponts, tunnels, trimés). En cas d'aléa pluviométrique, de ruissellement pluvial ou de débordement pluvial, l'urbanisation aggrave

1.6.2.2 Dégradation des milieux urbains

Les inondations pluviales détériorent le milieu urbain et dégradent les enjeux exposés aux risques. La perte économique est potentielle si les dégâts matériels sont considérables et le milieu urbain est gravement touché. La dégradation des infrastructures et des équipements publics, des biens et des matériels s'accompagne plus souvent des pertes d'argent importantes.

1.6.2.3 Perturbation des mouvements urbains

Les inondations détériorent le milieu de vie et perturbent la vie sociale. Ils accroissent l'incertitude financière par les surcoûts et les perturbations économiques qu'elles entraînent. Les inondations influencent également les mouvements urbains par les impacts économiques dues aux ruptures temporaires des voies de communication, des réseaux électriques et de l'assainissement. L'état de santé général de la population, les complications associées aux usagers (maladies contaminations

pathogènes et psychologiques, blessures ...), les arrêts ou perturbations d'activités industrielles ou commerciales, ...etc., créent un état de stress et de surcharge.

1.7 Conclusion

Ce chapitre introductif nous a permis de montrer les différentes notions et facteurs à prendre en compte dans un travail lié à l'eau de pluie, notamment aux inondations pluviales. Nous avons présenté les aspects ayant rapport avec les eaux pluviales en ville et nous avons discuté de la problématique des réseaux pluviaux urbains et les effets des inondations en ville.

La difficulté majeure relative à l'approche classique pour drainer l'eau de la pluie est mise en évidence. Le débit de base est lié à la réponse hydrologique d'un bassin versant (forme de l'hydrogramme) qui dépend fortement des caractéristiques physiographiques du BV. Le temps de concentration, qui est le temps maximal de parcours d'une goutte d'eau lors d'une averse pour parvenir par ruissellement à l'exutoire du bassin versant, caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une précipitation. Ce paramètre important, dans la classification des BV, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques : la taille du bassin (sa superficie), sa forme et sa pente. Une forme allongée engendre, pour une même pluie, de faibles débits de pointe, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire (temps de concentration) plus importants. À ces facteurs s'ajoutent encore l'influence des paramètres hydrométéorologiques qui varient en fonction de l'altitude (précipitations, température, vent, rayonnement solaire), du type de sol (propriétés d'infiltration et de rétention, perméabilité) et de son occupation (occupations des sols).

En effet, aucune méthode efficace et suffisamment précise, ne permet de modéliser et de calculer un aléa d'inondation. En plus, le choix d'une période de retour d'une pluie - pour définir les risques des inondations, pour élaborer les modèles classiques pluie – débits pour modéliser le ruissellement pluvial urbain - et la conception classique RAP restent insuffisants pour gérer durablement les eaux pluviales urbaines.

Des nombreux paramètres devraient être pris en compte pour adopter des solutions durables : le changement climatique, le ruissellement pluvial, l'occupation des sols qui conditionne l'imperméabilisation, la morphologie des bassins versants, le temps de concentration, les problèmes d'encrassement, la détérioration et le vieillissement rapides du réseau pluvial, ..., etc.

Une fois les causes et les conséquences des inondations pluviales urbaines bien définies, il est nécessaire de présenter les méthodes les plus utilisées pour une bonne pratique de la gestion des eaux pluviales urbaines et de présenter la problématique de la gestion des eaux pluviales urbaines en Algérie .

CHAPITRE 2 GESTION DES EAUX PLUVIALES – ÉTAT DE L'ART

2.1 Introduction

Après avoir exposé, dans le chapitre précédent, les défis posés par les eaux pluviales en milieu urbain, ce chapitre se concentre sur un examen approfondi de l'état de l'art et des retours d'expérience en matière de gestion des eaux pluviales urbaines (EPU). Alors que l'approche traditionnelle, centrée uniquement sur les réseaux pluviaux, expose nos villes aux risques d'inondations, l'objectif actuel est de rendre nos zones urbaines plus résilientes en réintégrant l'eau de pluie sur site.

La gestion des EPU est devenue un défi majeur à l'échelle mondiale, notamment en raison de l'urbanisation croissante et des changements climatiques. Cette évolution entraîne une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations, ce qui accroît les risques d'inondations et de dégradation des infrastructures urbaines ainsi que des écosystèmes aquatiques. Dans ce contexte, il est essentiel de mettre en place des stratégies efficaces de gestion des EP pour renforcer la résilience des villes et préserver la qualité de vie de leurs habitants.

L'état actuel de la gestion des EP englobe une variété de pratiques, de technologies et de politiques visant à favoriser une gestion urbaine plus durable. Ce domaine, en constante évolution, offre de multiples opportunités d'innovation et d'amélioration des approches pour répondre aux défis posés par la gestion des EP dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation croissante. L'intégration de la gestion des EP est désormais un aspect incontournable des politiques d'aménagement du territoire. Toutefois, pour une gestion efficace des EPU, il est important de considérer diverses techniques et stratégies, comme souligné par ([Granger et al., 2009](#)).

La ville, dans son ensemble, constitue une entité géographiquement cohérente, caractérisée par une organisation complexe incluant des dimensions économiques, politiques, culturelles, religieuses, administratives et juridiques. Elle abrite généralement une multitude de fonctions telles que le commerce, les services publics, la culture, le tourisme, l'industrie, ..., etc. La mise en œuvre d'une gestion intégrée, prenant en compte plusieurs aspects (sociaux, économiques, environnementaux, juridiques), reste souvent difficile. Valoriser l'eau sous toutes ses formes en milieu urbain peut parfois s'avérer une tâche complexe, puisque, la gestion des EPU implique la prise en charge de multiples aspects variés.

Ce chapitre explore les divers intérêts socio-économiques liés à la gestion des EPU, offre un aperçu des différentes techniques alternatives et de la gestion à l'échelle de la parcelle, et examine la problématique spécifique de la gestion des EPU en Algérie. L'objectif est d'analyser l'état actuel des connaissances et des pratiques dans ce domaine, en mettant en évidence les principaux défis, les avancées technologiques et les approches novatrices développées pour y répondre. Nous examinerons également les implications socio-économiques et environnementales de la gestion des

EPU, ainsi que les défis associés à sa mise en œuvre dans un contexte urbain en mutation constante, en prenant comme cas d'étude l'Algérie.

2.2 Intérêt socio-économique de la gestion des eaux pluviales urbaines

En général, le terme « ville » est utilisé pour mettre en avant les différences qui existent par rapport aux milieux naturels ou ruraux. La ville est plus qu'une agglomération de population et de fonctions. La taille et la densité sont également des critères de définition (Paulet, 2010). En milieu urbain, en cas d'inondation pluviale, les dégâts matériels, les dégâts sur l'environnement, les personnes traumatisées, disparues, blessées ou tuées entraînent des impacts socio-économiques importants. L'intérêt socio-économique de la gestion des EP urbaines réside dans plusieurs aspects capitaux pour le bien-être des citoyens et le développement durable des zones urbaines. Les points clés expliquant cet intérêt sont les limitations d'impact des inondations et le développement durable dans la gestion des eaux pluviales urbaines.

2.2.1 Limiter l'impact des inondations pluviales

La ville est une entité qui possède un fonctionnement propre (social, économique, culturel...) et un lieu d'échange ((Pagand, 1997) et (Valy, 2010)). Les inondations produisent des effets très divers sur les milieux urbains et les milieux naturels. Une gestion efficace des EP permet de réduire le risque d'inondations dans le milieu urbain, ce qui limite les dommages aux biens, aux infrastructures et aux équipements publics. Cela préserve également la sécurité des habitants et des entreprises contre les pertes économiques importantes liées aux débordements pluviaux.

2.2.1.1 Protéger la vie humaine et les usagers

Protéger la vie humaine et les usagers constitue une priorité capitale dans la gestion des EP en milieu urbain. Les inondations pluviales peuvent avoir des conséquences dévastatrices, allant de la destruction de biens matériels à la perte de vies humaines, en passant par des dommages économiques considérables. Les répercussions sur l'habitat se manifestent par des perturbations touchant les constructions et les ensembles immobiliers situés dans les zones exposées aux inondations. Ces perturbations dépendent de plusieurs facteurs, tels que la hauteur du premier plancher habitable par rapport au sol naturel, la présence ou l'absence d'un sous-sol aménagé, la configuration en étages, ..., etc. Les zones urbanisées abritent une diversité de types d'habitat, chacun pouvant être classé selon des critères prédéfinis. Par exemple, on peut distinguer les habitats collectifs, individuels et mixtes selon leur nature.

La première étape de la contribution à la protection du milieu urbain se concentre sur les zones où la population est susceptible d'être affectée par les inondations. Il peut s'agir de zones où la population saisonnière est accrue, telles que les écoles, les services publics, les hôpitaux, les maisons de retraite, les commerces et les industries.

Protéger la vie humaine et les usagers contre les inondations urbaines nécessite une approche holistique et coordonnée, impliquant une combinaison d'actions à différents niveaux, allant de la planification urbaine à l'alerte précoce et à la préparation aux situations d'urgence. En investissant dans la prévention et la gestion des inondations urbaines, les villes peuvent renforcer leur résilience face aux événements météorologiques extrêmes et améliorer la sécurité et le bien-être de leurs habitants.

La mise en place de mesures de prévention et de protection contre les inondations urbaines revêt une importance capitale. Cela comprend la conception et la construction d'infrastructures de drainage adéquates, telles que les réseaux surdimensionnés et les systèmes de drainage et stockage pluvial, ainsi que la mise en œuvre de politiques d'aménagement du territoire visant à limiter le développement dans les zones à risque. De plus, il est crucial d'éduquer et de sensibiliser les habitants aux risques d'inondation et aux mesures préventives à prendre, notamment en cas d'alerte météorologique.

2.2.1.2 Éviter les pertes des activités économiques

Éviter les pertes des activités économiques constitue un impératif majeur dans la gestion des inondations urbaines. Ces perturbations économiques peuvent être considérables et toucher divers secteurs tels que le commerce, l'industrie, les services, l'agriculture urbaine, ..., etc. Les inondations peuvent entraîner la fermeture temporaire ou permanente des entreprises, la destruction des stocks de marchandises, des équipements et des infrastructures, ainsi que des pertes de revenus pour les travailleurs et les entrepreneurs.

Pour prévenir ces pertes économiques, il est essentiel de mettre en place des mesures de préparation et d'adaptation appropriées. Cela inclut notamment le renforcement des infrastructures critiques, telles que les réseaux, les routes et les ponts, pour les rendre plus résilientes aux inondations. De plus, les entreprises peuvent bénéficier de programmes de lutte contre les risques d'inondation, ainsi que de plans de continuité des activités grâce à la politique de minimiser les perturbations en cas d'événement météorologique extrême.

Il est important de sensibiliser les acteurs économiques aux risques d'inondation et de les encourager à adopter des pratiques de gestion des risques et de résilience. Cela peut impliquer la mise en place de stratégies d'aménagement du territoire pour limiter le développement dans les zones à risque, ainsi que l'intégration de considérations de résilience dans la planification stratégique des entreprises. Éviter les pertes des activités économiques nécessite une approche collaborative et multidisciplinaire, impliquant la participation des gouvernements, des entreprises, des organisations communautaires et de la société civile. En investissant dans la prévention et la préparation aux inondations, les villes peuvent renforcer leur capacité à résister aux chocs économiques et à favoriser un développement urbain durable et inclusif.

2.2.1.3 Conserver les équipements publics et les infrastructures

La conservation des équipements publics et des infrastructures face aux inondations pluviales représente un enjeu important pour la résilience urbaine. Les équipements publics tels que les installations dans les écoles et les hôpitaux, ainsi que les infrastructures critiques comme les routes, les ponts et les trémies, sont essentiels au bon fonctionnement d'une ville. Cependant, ces éléments sont souvent exposés aux risques d'inondations, ce qui peut entraîner des dommages importants, des interruptions de service et des coûts de réparation élevés.

Pour préserver ces équipements et infrastructures, il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures de protection et d'adaptation appropriées. Cela peut inclure la réalisation d'ouvrages, de stockage et de grandes capacités pour contrôler le flux des EP, ainsi que la conception et la construction d'infrastructures résilientes aux inondations, telles que des routes surélevées et des techniques de drainage renforcés. De plus, il est essentiel d'identifier les équipements et les infrastructures les plus vulnérables aux inondations et de mettre en place des plans d'urgence pour assurer leur protection en cas de catastrophe.

L'intérêt de la gestion des EP est d'intégrer la gestion des risques d'inondation dans la planification urbaine et dans la conception des nouveaux projets d'infrastructures. Cela peut impliquer l'identification et la protection des zones inondables, la réglementation de l'utilisation des terres dans les zones à risque, ainsi que l'intégration de considérations de résilience dans la conception des bâtiments et des infrastructures. Les villes peuvent renforcer leur résilience face aux événements météorologiques extrêmes, réduire les pertes économiques et sociales associées aux inondations, et assurer un développement urbain durable et sûr pour les générations futures.

2.2.1.4 Minimiser la détérioration des réseaux divers

La minimisation de la détérioration des réseaux divers en raison des inondations urbaines revêt une importance déterminante pour assurer le bon fonctionnement des services essentiels et la sécurité des citoyens. Les réseaux divers comprennent les réseaux d'égouts/pluvieux, les réseaux de distribution d'eau, les réseaux électriques, les réseaux de télécommunications, les réseaux de transport en commun, ..., etc. Ces réseaux sont vitaux pour la vie quotidienne en milieu urbain, assurant l'approvisionnement en eau potable, l'évacuation des eaux usées et des eaux pluviales, la fourniture d'électricité, la connectivité numérique et la mobilité des habitants.

Cependant, lors d'événements d'inondations urbaines, ces réseaux sont souvent exposés à des risques de détérioration, tels que le débordement pluvial, l'infiltration d'eau, la corrosion, les courts-circuits électriques et les ruptures de canalisations. Ces dommages peuvent entraîner des perturbations majeures dans la prestation des services, des coûts de réparation élevés et des risques pour la santé publique et la sécurité.

Pour minimiser la détérioration des réseaux divers, il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures de prévention et de protection intégrables. Cela peut inclure la conception et la construction de réseaux renforcées et des systèmes de drainage améliorés. De plus, il est meilleur d'identifier les

points faibles des réseaux existants et de mettre en place des plans d’urgence, plus la mise en place de mesures de prévention telles que la végétalisation et la création de zones tampons,

En investissant dans la minimisation de la détérioration des réseaux divers en raison des inondations urbaines, les villes peuvent renforcer leur résilience face aux événements météorologiques extrêmes, garantir la continuité des services essentiels et assurer la sécurité et le bien-être de leurs habitants.

2.2.2 Développement durable dans la gestion des eaux pluviales urbaines

Le développement durable dans la gestion des EPU implique l'adoption de pratiques et de stratégies qui garantissent une gestion équilibrée, efficace et respectueuse de l'environnement des ressources en eau pluvial dans les zones urbaines. Cela englobe plusieurs dimensions clés :

2.2.2.1 Préservation de l'environnement

Une approche durable de la gestion des eaux pluviales vise à réduire l'impact négatif des activités urbaines, le ruissellement pluvial et les débordements des réseaux pluvieux sur les milieux récepteurs. Cela peut inclure la préservation des zones de stockage naturel, des cours d'eau et des espaces verts, ainsi que la limitation de la pollution des eaux de ruissellement par la mise en œuvre de pratiques de gestion des eaux pluviales basées sur la nature, telles que les jardins de pluie et les zones tampons végétalisées.

2.2.2.2 Adapter au changement climatique

Dans un contexte de changement climatique, il est essentiel d'adopter des approches de gestion des eaux pluviales qui tiennent compte de la variabilité et de l'incertitude des conditions météorologiques. Cela peut impliquer la mise en place de systèmes de drainage et adaptables, ainsi que l'intégration de considérations de l'aléa pluviométrique dans la conception des infrastructures urbaines.

2.2.2.3 Optimisation des ressources et des techniques compensatoires

Une gestion durable des EP cherche à optimiser l'utilisation des eaux de pluie disponibles en favorisant la réutilisation des eaux de pluie à des fins non potables, telles que l'irrigation des espaces verts et le lavage des voiries. Cela contribue à réduire la pression sur les ressources en eau douce et à promouvoir une utilisation plus efficace et durable de l'eau en milieu urbain.

2.2.2.4 Intégration avec la planification urbaine

Une approche durable de la gestion des EP nécessite une intégration étroite avec la planification urbaine et l'aménagement du territoire. Cela implique de prendre en compte les aspects hydrologiques dans la conception des nouveaux projets urbains, de promouvoir une gestion intégrée des espaces et des eaux, et de favoriser la création de villes résilientes aux inondations.

Améliorer la qualité de vie des habitants et de garantir la durabilité à long terme des infrastructures urbaines est l'intérêt socio-économique de la gestion des EPU. Les villes peuvent promouvoir un développement urbain plus avancé, préservé et respectueux de l'environnement, en adoptant une approche durable de la gestion des EPU.

2.3 Méthodes de gestion des eaux pluviales adoptées dans le monde

Les méthodes de gestion des EP urbaines adoptées à travers le monde varient en fonction des besoins locaux, des moyens disponibles, des contraintes techniques et environnementales. Pour traiter ce type de situation, la gestion à l'aide des outils d'aide à la décision (OAD) présente un moyen efficace et offre une possibilité de traiter et de résoudre des problèmes liés à la gestion des eaux pluviales urbaines d'une façon intelligente et rapide.

2.3.1 La naissance de la gestion des eaux pluviales en ville

Les villes ont été conçues avec des systèmes de drainage rudimentaires, souvent limités à des canaux ou des égouts ouverts pour évacuer les EP loin des zones habitées. La transition des systèmes d'égouts traditionnels vers les approches alternatives ou compensatoires dans le domaine de l'assainissement urbain peut fournir une réponse à la question de l'origine de la gestion des EP en milieu urbain. Cette transition, qui a débuté dans les années 1960 et qui continue d'évoluer, est devenue une préoccupation majeure pour les espaces urbains. Elle était initialement perçue comme une problématique urgente nécessitant une résolution rapide, comme l'ont souligné plusieurs chercheurs ((Azzout, 1995); (CHAMOIX, 2003) ; (Petrucci, 2012)).

Avant l'expansion urbaine, seule une fraction restreinte des villes était pourvue d'un réseau de collecte des eaux usées, qui les acheminait hors des limites de la cité (Triantafillou, 1987). Avec l'émergence du mouvement hygiéniste, les infrastructures d'assainissement ont été développées en vue d'assurer des conditions sanitaires optimales au sein des zones urbanisées. Cette évolution s'est accompagnée de la mise en place de réseaux d'assainissement dans les villes en expansion, souvent assortis de stations d'épuration opérationnelles, marquant ainsi la transition de la gestion des eaux usées des villes d'un modèle tout-au-réseau à une approche basée sur le dimensionnement des infrastructures hydrauliques.

Dans ce cadre, les réseaux de canalisation, souvent enterrés, ont été conçus pour collecter non seulement les eaux usées, mais aussi les eaux pluviales et les débris solides vers les exutoires en aval de la ville. Cependant, avec l'essor démographique spectaculaire des milieux urbains, les conséquences de la consommation d'espaces verts sont devenues de plus en plus évidentes. En réponse à ces défis, les experts en hydraulique ont élaboré une approche visant à optimiser l'utilisation des réseaux d'évacuation existants, complétée par la création de vastes bassins de rétention pour atténuer les pointes de débit.

Par ailleurs, les dysfonctionnements des systèmes d'assainissement ont des répercussions hydrauliques sur l'environnement et l'ensemble des organismes vivants, y compris l'homme,

affectant ainsi son bien-être, sa santé et ses systèmes socio-économiques ((Granger, 2009) ; (Marion, 2016)). Face à ces conséquences, il est fréquent que l'homme envisage une nouvelle conception de l'hydrologie urbaine, intégrée à l'échelle globale du projet, où la conception des ouvrages hydrauliques devient un élément structurant du paysage et aboutit à la création d'espaces multifonctionnels ((Chocat, 1997); (CERTU, 2000)).

Une évolution de la vision scientifique de la ville en général, et de l'assainissement pluvial en particulier, est indispensable pour comprendre le contrôle et la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. Au fil des années, alors que la pratique de l'assainissement pluvial se développait, le système traditionnel s'est révélé souvent insuffisant pour assurer le drainage des eaux pluviales dans de nombreuses villes à travers le monde (Morel, 1996, Triantafillou, 1987). Il est donc primordial de reconnaître la nécessité d'une vision de l'assainissement pluvial qui dépasse la simple implantation de réseaux enterrés.

2.3.2 Les techniques alternatives de la gestion des eaux pluviales urbaines (Petrucci, 2012)

L'émergence de nouvelles techniques, qualifiées d'alternatives, vise à compléter l'approche traditionnelle centrée sur l'aspect hydraulique par une approche plus environnementale ou par une réflexion urbaine intégrant davantage l'eau dans la ville ((CERTU, 1998) ; (Azzout et al., 1995)). De nos jours, ces techniques alternatives de gestion des eaux pluviales sont largement adoptées dans de nombreuses régions (CHAMOUX, 2003), et leur intégration dans la gestion des eaux pluviales est reconnue comme une stratégie bénéfique et durable (BOUCHER, 2010) .

L'utilisation de ces TA dépend de leur fonctionnement qui repose sur deux principes fondamentaux. Le premier consiste à retenir l'eau de pluie et le ruissellement afin de réguler les débits et de répartir les apports en aval. Le second principe consiste à favoriser l'infiltration dans le sol lorsque cela est possible, ce qui permet de réduire les volumes d'eau s'écoulant vers l'aval.

Les TA les plus utilisées au monde sont décrites ci-dessous.

2.3.2.1 Les toits stockant et/ou végétalisés

Les toits, éléments essentiels de toute structure bâtie, jouent un rôle capital dans la protection des bâtiments contre les intempéries tout en contribuant à l'esthétique et à l'intégration paysagère. Cette technique consiste, qui consiste parfois à stocker provisoirement l'eau de pluie, est utilisée pour ralentir le ruissellement dès le début. Elle repose sur un stockage temporaire de quelques centimètres d'eau sur les toits, généralement plats.

Les toits peuvent être construits avec une variété de matériaux et de techniques en fonction des besoins climatiques, esthétiques et structurels La **Figure 2-1** présente les différents types de toits ainsi que leurs caractéristiques.



Figure 2-1 : Toitures végétalisées ou à rétention d'eau et toitures stockantes

Le revêtement d'étanchéité des toitures peut également servir de dispositif de gestion des eaux pluviales à la source, permettant de retenir temporairement les eaux de pluie et d'alimenter d'autres techniques alternatives (TA).

Les toitures végétalisées sont recouvertes d'une couche thermique, d'un revêtement étanche sur lequel se pose une couche drainante et un substrat lui-même recouvert de végétation. La végétation doit être sélectionnée pour ses capacités dépolluantes et de stockage de l'eau, ou encore pour ses capacités à piéger le CO₂. L'eau ainsi épurée peut-être stockée dans le substrat et la couche drainante ou rejoindre un exutoire vers l'aval lors de fortes pluies. Cette technique permet la rétention de l'eau pluviale et ainsi de limiter le ruissellement urbain et de décharger les réseaux d'assainissement. Elle joue un rôle dans la lutte contre les îlots de chaleur urbains en augmentant les surfaces végétalisées et donc l'évapotranspiration. L'intégration est possible sur tout type de toiture, plate ou en pente (photo de gauche de la figure 2.1).

2.3.2.2 Les citernes de stockage

Une citerne est une structure de stockage conçue pour recueillir et stocker l'eau de pluie à des fins diverses, notamment pour une utilisation ultérieure dans les ménages, l'irrigation des jardins, ou d'autres besoins non potables.

La citerne est un ouvrage de control à la source alimentée par les toits utilisé pour réutiliser les eaux pluviales comme le montre la **Figure 2-2**. La citerne peut être enterrée ou non, elle joue le même rôle qu'un bassin de stockage dans la rétention et la réutilisation de l'eau pluviale. Les citernes permettent le stockage des eaux pluviales des toitures et leur réutilisation. Elles sont efficaces pour un usage privé car elles possèdent un volume de stockage peu important. Elles sont équipées d'un filtre positionné à l'amont de la cuve qui permet l'élimination des impuretés (feuilles, brindilles, cailloux...).



Citernes de collecte d’eau de pluie dans l’Ohio aux États-Unis

Figure 2-2 : Les citernes, le système de récupération d’eau de pluie

En tant que technique alternative de gestion des eaux pluviales, les citernes permettent de réduire le ruissellement des eaux pluviales vers les systèmes de drainage municipaux, contribuant ainsi à la gestion durable de l’eau en milieu urbain.

2.3.2.3 Les fossés et les noues

Les fossés, des ouvrages linéaires très anciens et bien connus, peuvent naturellement contenir de l’eau. Une noue est une forme de terrain, souvent similaire à un fossé large et peu profond, avec des pentes douces. Les fossés et les noues sont deux systèmes efficaces pour ralentir l’évacuation de l’eau, permettant un écoulement et un stockage à l’air libre (**Figure 2-3**).



Noue cloisonnée par des gabions. Crédit photo GRAIE

Noue classique en bordure de voirie et la bordure de trottoir. Crédit photo Bernard Chocat.

Noue d’infiltration - Chens-sur-Léman- France

Figure 2-3 : Les fossés larges et peu profonds, généralement végétalisés, susceptibles de stocker, de transporter e d’infiltrer les eaux de pluie.

Généralement, ce sont des ouvrages linéaires aménagés en espaces verts temporairement submersibles, permettant de ralentir le ruissellement des EP, comme le montre la **Figure 2-3**.

Les fossés et les noues ont également un potentiel de dépollution grâce à au couvert végétal. Les végétaux présents épurent l’eau d’une partie de ses polluants comme les nitrates, ou les phosphates, pouvant être rejetés par l’agriculture conventionnelle.

Les noues peuvent être :

- filtrantes : le principe est de recueillir et d'infiltrer l'eau de ruissellement sur place, après son recueillement. La noue doit être conçue en accord avec le type de sol afin de permettre la meilleure infiltration possible. Lorsque ça n'est pas possible, la noue de transfert est privilégiée.
- de transfert : le principe est de recueillir les eaux de ruissellement et de les transférer vers l'aval, que ça soit vers un réseau d'assainissement, ou une infrastructure de drainage alternative (bassin inondable, champs inondables, ou autre). Une partie de l'eau écoulee s'infiltré lors du trajet, tout dépend du type de sol sur laquelle elle est aménagée, une partie est également évapotranspirée sur place.

2.3.2.4 Les puits d'infiltration

Un puits d'infiltration/de stockage est une structure verticale conçue pour permettre l'infiltration des eaux pluviales directement dans le sol. En tant que technique alternative de gestion des eaux pluviales, il collecte l'eau de pluie depuis la surface et la dirige vers des couches de sol perméables, favorisant ainsi la recharge des nappes phréatiques et réduisant le ruissellement de surface.



Figure 2-4 : Les puits de stockage-infiltration des eaux pluviales

Les puits d'infiltration aident à prévenir les inondations, à diminuer la charge sur les systèmes de drainage urbain et à améliorer la qualité de l'eau en filtrant les polluants. Ils sont plus ou moins sophistiqués et sont équipés d'une multitude de techniques et de couches de matériaux divers qui permettent de filtrer et de décanter l'eau qu'ils reçoivent. Les parois des puits sont généralement recouvertes de géotextile afin de filtrer la pollution et l'empêcher de migrer dans le sol. Les puits sont souvent utilisés en complément des techniques de stockage en amont (tranchée drainante, noue et fossé, bassin de rétention) et permettre d'accueillir leur débit de fuite.

2.3.2.5 Les tranchées drainantes ou d'infiltration

Les tranchées drainantes ou d'infiltration sont des structures linéaires, superficielles c'est-à-dire peu profondes offrant un volume-tampon permettant un stockage provisoire de l'eau qui peut ensuite

être drainée ou infiltrée dans le sol (**Figure 2-5**). Elles sont remplies de matériaux poreux tels que du gravier ou des galets sous lesquels est généralement situé un drain. Les galets en surface sont laissés tels quels ou recouverts de végétation et parfois d'un revêtement poreux pour permettre l'infiltration. Les tranchées d'infiltration captent les eaux pluviales à la surface et les dirigent vers des couches de sol sous-jacentes perméables, où elles peuvent s'infiltrer lentement.

L'eau de pluie - qui arrive jusqu'à la tranchée - provient du ruissellement ou arrive par l'intermédiaire d'infrastructures permettant de la canaliser jusqu'à la tranchée. Selon leur type, les tranchées retiennent l'eau de pluie et l'évacuent vers un exutoire, ou l'infiltrent dans le sol. Ces deux techniques peuvent être combinés dans un seul ouvrage.



Figure 2-5 : Les tranchées drainantes

Ces systèmes sont conçus pour gérer et traiter les eaux de ruissellement en particulier le débit et en améliorant la qualité de l'eau avant qu'elle n'atteigne les cours d'eau naturels ou les nappes phréatiques

Elle est fréquemment équipée d'un système de drainage pour recueillir et infiltrer les eaux de ruissellement provenant des voiries et le long des routes, des parkings, des toitures pour capter l'eau de ruissellement., des allées, et des toitures.

2.3.2.6 Les structures réservoirs - Les bassins

Une structure réservoir des eaux pluviales urbaines est une installation conçue pour collecter, stocker et éventuellement réutiliser l'eau de pluie captée depuis les surfaces urbaines telles que les toits, les routes, et les espaces ouverts. Ces ouvrages stockant temporairement l'eau de pluie dans leur corps, couramment composée de grave poreux ou bien de matériaux préfabriqués, cette structure peut être mise en place sous des espaces publics. Ces réservoirs peuvent être souterrains ou de surface et jouent un rôle important dans la gestion durable de l'eau en milieu urbain.

La figure suivante (**Figure 2-6**) illustre une structure réservoir typique, montrant les composants principaux tels que les systèmes de collecte, de filtration, et de stockage.



Figure 2-6 : Les structures réservoirs

Généralement, la structure réservoir est destinée au stockage provisoire de l'eau de pluie. Celle-ci est ensuite restituée localement (sans transport) à débit limité, soit dans un exutoire de surface, soit dans le sous-sol par infiltration, soit les deux, mais sans évapotranspiration.

Les bassins enterrés et à ciel ouvert de gestion des eaux pluviales sont des infrastructures conçues pour recueillir, stocker et diminuer la charge des eaux pluviales en milieu urbain. Ils peuvent être enterrés (sous-sol) ou à ciel ouvert (en surface), et leur principale fonction est de contrôler le ruissellement des eaux de pluie, prévenir les inondations et améliorer la qualité de l'eau avant son rejet dans les cours d'eau ou son infiltration dans le sol. L'eau de ruissellement est collectée par des ouvrages associés puis stockée dans le bassin, elle est soit infiltrée dans le sol (bassins d'infiltration) soit redirigée vers un réseau d'assainissement (bassin de stockage).

Les bassins d'infiltration végétalisés sont habituellement de taille plus importante que les solutions précédentes. Ils peuvent recueillir des afflux massifs d'eau de ruissellement, avant de les épurer et de lentement la laisser s'infiltrer dans le sol. C'est une solution pour le stockage temporaire de l'eau de pluie. Les bassins d'infiltration végétalisés peuvent prendre la forme d'un jardin de pluie, conçu de manière qu'il n'y ait pas d'ilot où des enfants risqueraient d'être surpris par la montée de l'eau.

Les bassins de stockage permettent une réutilisation de l'eau pour les usages domestiques ou agricoles. Ils sont de deux types :

- Les bassins à sec : Le bassin sec est vide la majeure partie du temps, il se remplit surtout lors d'éléments pluvieux d'envergure, l'eau est ensuite infiltrée ou dirigée vers un exutoire lors d'événements intenses pour éviter les débordements.
- Les bassins en eau : C'est un bassin à retenue permanente ; c'est-à-dire, rempli en permanence, il peut être alimenté par une source d'eau supplémentaire que les seules eaux pluviales. Il possède une fonction paysagère et peut être valorisé pour améliorer le cadre de vie des populations qui le côtoient.

La **Figure 2-7** montre plusieurs bassins, un bassin en béton à ciel ouvert, un bassin enterré et un exemple de bassin sec d'infiltration à ciel ouvert rempli d'eau de pluie, avec une zone végétalisée autour pour stabiliser les berges et améliorer l'esthétique du site.



Figure 2-7 : Les bassins stockant/infiltrant

En milieu urbain, les bassins enterrés ou à ciel ouvert sont des solutions efficaces pour la gestion durable des eaux pluviales. Leur conception et leur installation nécessitent une détermination du volume de ruissellement à gérer et les caractéristiques géologiques et hydrologiques du site, nécessitent aussi une prise importante d’espace en ville et une planification propre pour s’assurer qu’ils répondent aux besoins spécifiques du site

2.3.2.7 Les chaussées à structure réservoir

Une chaussée à structure réservoir est une infrastructure routière conçue pour gérer les eaux pluviales en intégrant des capacités de stockage et d’infiltration d’eau dans sa structure. Ce type de chaussée permet de recueillir, stocker temporairement et infiltrer les eaux de pluie directement dans le sol, réduisant ainsi le ruissellement et peut contribuer à la recharge des nappes phréatiques. La **Figure 2-8** illustre une chaussée à structure réservoir typique, utilisée dans les zones résidentielles et commerciales pour gérer les eaux pluviales à la source et les parkings avec structure réservoir réduisent le ruissellement.



Figure 2-8 : Les chaussées à structure réservoir et poreuse

Les ouvrages routiers poreux permettant d'écarter les débits de pointe de ruissellement par stockage temporaire de l'eau dans le corps de la chaussée, comme peuvent être assimilées à d'autre TA. Mais, leur conception et leur mise en œuvre nécessitent une planification minutieuse pour s'assurer qu'elles répondent aux besoins spécifiques du site tout en maximisant les avantages environnementaux et sociaux.

2.3.2.8 Les réseaux surdimensionnés

C'est un système de drainage conçu avec une capacité supérieure, il vise à gérer des volumes importants, tels que ceux rencontrés lors de fortes pluies ou d'événements météorologiques extrêmes, afin de réduire les impacts négatifs sur le milieu urbain. C'est un réseau de gros diamètres, le stockage des eaux pluviales généré par le surdimensionnement de la canalisation d'évacuation d'eau pluviale.



Figure 2-9 : Les réseaux surdimensionnés

Le réseau surdimensionné présente une solution efficace pour les défis posés par les précipitations, le ruissellement rapide et le changement climatique. D'ailleurs, les nouveaux projets de développement urbain intègrent souvent des systèmes de drainage surdimensionnés dès la phase de conception pour assurer une gestion durable des eaux pluviales. Cette technique présente cependant un inconvénient majeur à travers son emprise au sol importante. En outre, son coût est difficilement amortissable puisqu'elle n'est utile que lors de fortes orages et son intégration dans le milieu urbain passe inaperçue (ouvrages non visibles) et n'offre pas de potentialités paysagères intéressantes.

2.3.3 Intégration des techniques alternatives en milieu urbain

Implique d'adopter des approches créatives pour gérer efficacement les eaux pluviales tout en réduisant les risques d'inondation et en préservant le milieu urbain. Voici quelques étapes clés pour intégrer ces techniques :

2.3.3.1 Évaluation des besoins et des contraintes

Il est possible de concevoir des solutions innovantes et durables qui répondent efficacement aux besoins et aux contraintes des techniques alternatives pluviales en milieu urbain. L'essentiel est d'identifier les points faibles et les besoins d'amélioration pour mieux intégrer les TA pluviales dans le système de drainage urbain, aussi de comprendre les défis spécifiques liés à la gestion des EP dans la zone d'étude, y compris les caractéristiques hydrologiques, les contraintes géographiques, les enjeux et infrastructures existantes et les réglementations locales.

L'évaluation des besoins et des contraintes des techniques alternatives pluviales en milieu urbain est une étape fondamentale pour concevoir des solutions efficaces et adaptées aux défis spécifiques de chaque environnement urbain. Cette évaluation commence par une analyse approfondie des caractéristiques hydrologiques de la zone, notamment la pluviométrie, la topographie, la géologie et l'hydrologie locale. Il est essentiel de comprendre comment les précipitations sont réparties dans la zone urbaine, comment les eaux s'écoulent et s'accumulent, et quels sont les points sensibles aux inondations.

Les contraintes potentielles qui pourraient limiter la mise en œuvre des techniques alternatives peuvent être d'ordre géographique, telles que des terrains difficiles à aménager, des zones fortement urbanisées ou des contraintes réglementaires liées à la protection des zones naturelles. Elles peuvent également être d'ordre financier, avec des budgets restreints pour la mise en œuvre des infrastructures, aussi pour examiner l'état et la capacité des infrastructures de drainage urbain existantes, telles que les caniveaux, les réseaux pluviaux. Prenant en compte les changements à long terme tels que l'urbanisation future, l'évolution des modèles climatiques et les progrès technologiques dans le domaine de la gestion des eaux pluviales.

2.3.3.2 La conception et la planification

C'est de concevoir un plan d'aménagement urbain intégrant des TA pluviales, telles que la création de bassins de rétention, la végétalisation des toits, les chaussées perméables, les zones tampons naturelles, ..., etc. Ces solutions doivent être adaptées aux caractéristiques spécifiques de la zone urbaine qui dépendent d'une multitude de paramètres tels que la volonté d'anticiper le risque de ruissellement pluvial.

Tout faire pour en réduire les impacts socio-économiques. En cas d'évènement pluvieux, la technique alternative permet de faciliter et de renforcer le processus de récupération des eaux de pluie, beaucoup plus les systèmes qui possèdent d'importantes capacités. Réduire les impacts directs

des ruissellements est de savoir gérer les eaux pluviales, d’une façon d’avoir la capacité de stockages sur une durée courte ensuite les déversées lentement, de façon étudiés.

Au cours des dernières années, le concept d’une solution technique de gestion des eaux pluviales urbaines a subi de profonde modification et les concepteurs se sont retourné vers l’utilisation des techniques offrent plus d’intérêt socio-économiques. Un concept opérationnel pour la gestion des eaux pluviales et la réduction des effets inondations nécessite de mettre en place des ouvrages de capacités de stockages importantes et de de dimensionner correctement les ouvrages en fonction des débits de pluie estimés, en tenant compte des exigences de sécurité, de durabilité et d’intégration paysagère.

2.4 La gestion à l’aide des outils d’aide à la décision (OAD)

La gestion à l’aide des outils d’aide à la décision fait référence à l'utilisation de méthodes, de techniques et de technologies spécifiques pour faciliter le processus de prise de décision dans un domaine donné. Ces outils peuvent comprendre des logiciels informatiques, des modèles mathématiques, des analyses statistiques, des systèmes d'information géographique (SIG), des algorithmes d'optimisation, entre autres. L'objectif principal de ces outils est d'assister les décideurs en leur fournissant des informations pertinentes, des analyses approfondies et des prévisions précises, afin de les aider à identifier les meilleures options et à prendre des décisions éclairées et efficaces.

2.4.1 Le domaine d’aide à la décision

L'aide à la décision englobe un ensemble de techniques visant à faciliter la prise de décision individuelle ou à assister les utilisateurs dans ce processus. Elle trouve principalement application dans divers domaines tels que la finance, la banque, l'informatique, la politique et la gestion de crises. Selon (Roy, 1985), l'aide à la décision consiste à fournir des éléments de réponse à un intervenant dans un processus de décision, en s'appuyant sur des modèles explicites mais pas nécessairement entièrement formalisés. Ces éléments éclairent la décision et contribuent à renforcer la cohérence entre l'évolution du processus décisionnel, les objectifs et les valeurs de l'intervenant.

Il existe plusieurs approches pour aborder les sciences de la décision, notamment une approche descriptive ou une approche cognitive. SFILIGOÏ TAILLANDIER Franck dispense des cours particuliers sur l'introduction à l'aide à la décision et à l'aide à la décision multicritère.

- Dans l'approche descriptive, l'objectif est de comprendre et de reproduire le processus de prise de décision humaine. Elle relève principalement des sciences cognitives telles que la psychologie, la sociologie, l'intelligence artificielle et la neuroscience.
- L'approche prescriptive vise quant à elle à guider les décideurs dans leur processus de prise de décision. Elle s'appuie sur la recherche opérationnelle qui mobilise les mathématiques, l'informatique et les sciences de l'ingénieur. On y trouve également des méthodes

participatives, notamment dans le domaine de la sociologie, qui impliquent les parties prenantes dans le processus décisionnel.

Évidemment c'est deux approches d'aide à la décision vont interagir et on comprend mieux la façon comment l'être humain pense.

Généralement, on parle de décision lorsqu'un acteur (ou un groupe d'acteurs) choisit entre plusieurs solutions possibles pour résoudre un problème ou une situation donnée. Lorsqu'on examine de près le processus décisionnel en impliquant différents processus mentaux, comme l'ont démontré Schneider et Shiffrin en 1977, on distingue deux types de processus : les processus automatiques et les processus contrôlés.

- Les processus automatiques sont exécutés rapidement, de manière autonome et irrépressible, sans nécessiter de ressources supplémentaires et sans être conscients. Par exemple, lorsqu'on effectue un réflexe pour éviter un obstacle, on prend une décision instantanée sans avoir besoin de beaucoup réfléchir, en choisissant de se déplacer soit vers la gauche, soit vers la droite. Ces processus font appel à des heuristiques, qui sont des opérations mentales rapides et intuitives visant à trouver la meilleure solution possible dans un laps de temps très court.
- En revanche, les processus contrôlés sont exécutés lentement et délibérément, nécessitant beaucoup de ressources. Ils sont réalisés consciemment et impliquent une analyse réfléchie de la situation. Contrairement aux processus automatiques, les processus contrôlés font appel à des stratégies cognitives élaborées, qui impliquent une réflexion consciente, l'utilisation de ressources externes telles que des données ou des recherches, et un cheminement mental qui mène à la décision.

Ces processus ne sont pas indépendants, et lorsqu'on est confronté à une décision, on passe généralement d'abord par un processus automatique qui nous propose une première solution, pour ensuite passer à un processus contrôlé. Entre ces deux processus, il est important de comprendre certains éléments. Camerer, Loewenstein et Prelec (2005) ont ajouté une autre dimension, à savoir cognitive et affective, à ce modèle de processus. La dimension cognitive concerne les aspects de connaissance, de raisonnement et de calculs délibérés, tandis que la dimension affective concerne les considérations biologiques de base ou les émotions. Ainsi, il existe quatre situations possibles, combinant les processus automatiques et contrôlés avec les dimensions cognitive et affective.

L'être humain est un agent cognitif efficace qui peut résoudre efficacement les problèmes décisionnels, mais il n'est pas un penseur rationnel. Ce problème découle du fait que l'état mental n'est pas neutre, et dans le cas des problèmes automatiques, nous faisons appel à des heuristiques qui peuvent nous tromper. En 1974, Tversky et Kahneman ont identifié de nombreux biais cognitifs par expérience, parmi lesquels le mécanisme de la pensée, qui entraîne un jugement dévié. On peut citer, par exemple :

- Le biais rétrospectif se manifeste par une tendance à surestimer, une fois qu'un événement s'est produit, à quel point on le jugeait prévisible ou probable. Cela concerne notamment l'évaluation des risques et la probabilité d'occurrence d'un événement aléatoire.
- Le biais d'ancrage se traduit par l'influence durable de la première impression. Même si l'on dispose d'un raisonnement à long terme et que de nombreux éléments ont été pris en compte, il peut être difficile de se détacher de cette première idée. Cela démontre également que le processus automatique peut avoir une influence notable sur le processus contrôlé.

En fin de compte, les processus mentaux utilisés (et les biais associés) dépendront du problème décisionnel auquel le décideur est confronté. Chaque problème décisionnel présentera un type spécifique de biais et de processus décisionnels en jeu.

Les chercheurs en aide à la décision ont pris en considération les problèmes décisionnels et ont cherché à rendre les modèles plus réalistes. Ils ont ainsi conclu que leur rôle n'était pas de créer des outils capables de fournir "la" solution à tout problème de décision, mais plutôt d'aider le décideur à élaborer sa solution préférée en tenant compte explicitement des aspects imprécis, incertains et multicritères de la réalité.

Dans le domaine de l'aide à la décision, l'accent est mis sur le processus contrôlé et sur les problèmes décisionnels. Par exemple, l'aide au choix d'une stratégie pour une entreprise de gestion des eaux pluviales, le vote pour une action, ou la recherche d'une solution optimale pour l'infiltration, le stockage et la réutilisation de l'eau de pluie sont autant d'exemples de problèmes décisionnels. Il y a cependant un point commun à toute démarche d'aide à la décision : il est essentiel d'analyser minutieusement le problème décisionnel. Pour ce faire, il est nécessaire de poser des questions sur les décideurs, de déterminer s'il s'agit d'un ou de plusieurs décideurs, et dans quel environnement ils prendront leur décision. Certains paramètres définissent un problème décisionnel :

- Processus décisionnel : Qui prend la décision ? S'agit-il d'une chaîne de décision impliquant plusieurs personnes ou d'une décision prise par une seule personne isolée ?
- État mental : Dans quel état mental se trouve la personne prenant la décision ? Est-elle stressée ou stable au bureau, par exemple ?
- Données : Les données nécessaires à la prise de décision sont-elles disponibles et accessibles ?
- Contraintes : Quelles sont les contraintes qui influencent la décision ? Les contraintes jouent un rôle important dans la résolution de problèmes d'optimisation.
- Critères : Les critères de décision sont-ils fixés par le décideur lui-même ou sont-ils déterminés par d'autres parties prenantes ?
- Objectifs : Quels sont les objectifs du décideur ? Les objectifs déterminent les actions nécessaires pour atteindre le meilleur résultat possible.

- **Connaissances** : Les connaissances requises pour la prise de décision sont-elles partagées entre tous les décideurs ?
- **Préférences** : Les préférences des décideurs par rapport au problème décisionnel sont-elles bien définies ? Elles jouent un rôle crucial dans le processus de prise de décision.
- **Temps** : Quel est le délai imparti pour prendre la décision ?
- **Alternatives** : Y a-t-il un ensemble défini ou indéfini d'alternatives disponibles pour la décision ? Ces alternatives sont-elles limitées ou illimitées ?
- **Incertitudes** : Quel est le niveau d'incertitude inhérent à l'acte de décision ? Les décisions impliquent souvent des éléments futurs et des conséquences qui peuvent être difficiles à prévoir.

Ces dernières années, la gestion intégrée des EP dans les aménagements urbains a connu une nouvelle évolution. De nouvelles expressions ont émergé pour désigner une gamme variée de pratiques en matière de gestion des EP. Parmi celles-ci, on trouve par exemple : le contrôle des EP à la source en milieu urbain, la gestion durable des systèmes d'assainissement pluvial, le traitement des EP et du ruissellement concentré, les techniques alternatives de gestion des eaux pluviales, l'approche multicritères pour la gestion des EP urbaines, ..., etc.

Les outils d'aide à la décision sont des moyens offrent une possibilité de traiter et de résoudre des problèmes liés à la gestion des eaux pluviales urbaines.

2.4.2 Choix d'une approche/méthode d'aide à la décision

Le choix d'une méthode spécifique pour un cas décisionnel devrait être effectué après avoir sélectionné une approche décisionnelle qui correspond le mieux au problème en question. Parmi ces approches, on trouve celles qui utilisent un ou plusieurs critères.

- **Approche monocritère** : Cette approche se concentre sur un seul point de vue (ou prédominant) ou sur plusieurs points de vue non conflictuels. Par exemple, choisir une stratégie commerciale peut être ramené à un aspect économique unique. Dans ce cas, les décideurs peuvent consulter des experts ou utiliser des techniques de recherche opérationnelle classiques pour maximiser ou optimiser les aspects économiques.
- **Approche multicritère** : Contrairement à l'approche classique qui consiste à optimiser une seule fonction économique, l'approche multicritères prend en compte plusieurs critères souvent incommensurables et reflétant différents points de vue contradictoires.

L'intérêt des méthodes multicritères réside dans leur capacité à considérer un ensemble de critères de différentes natures sans les transformer nécessairement en critères économiques ou en une fonction unique. L'objectif n'est pas de rechercher un optimum, mais plutôt une « solution compromis » qui peut prendre différentes formes, telles que des choix, des affectations ou des classements.

Actuellement, le domaine de l'optimisation multicritère est en plein essor. Avec la multitude de méthodes multicritères disponibles, le choix d'une méthode appropriée nécessite une analyse approfondie. En 1998, Martel et Guitoni ont suggéré de prendre en compte plusieurs aspects avant de sélectionner une méthode :

- La nature du problème : Il est important de considérer la hiérarchisation des critères, la sélection des alternatives et leur catégorisation.
- Le nombre de décideurs impliqués dans le processus décisionnel.
- Les préférences naturelles des décideurs, qui influenceront le choix de la méthode.
- Le niveau d'information disponible et le type de données disponibles (données cardinales, ordinaires, etc.).
- Le degré de compromis accepté par la méthode, c'est-à-dire si elle permet des solutions qui compromettent certains critères pour améliorer d'autres.
- Les hypothèses sous-jacentes à la méthode, qui peuvent avoir un impact sur sa validité et son applicabilité.
- Les outils disponibles pour mettre en œuvre la méthode sélectionnée.

En tenant compte de ces aspects, les décideurs peuvent choisir la méthode multicritère la plus adaptée à leur situation spécifique. Le défi réside dans la recherche d'une méthode, d'une approche ou d'un modèle adapté à notre problème spécifique. Ainsi, une analyse approfondie est primordiale avant de formaliser le problème, ce qui constitue un aspect central de l'aide à la décision. Cette étape implique de trouver une structure ou un modèle permettant de représenter de manière précise le problème décisionnel. C'est pourquoi de nombreux chercheurs se sont penchés sur l'étude des "solutions efficaces". Il existe plusieurs méthodes de formalisation et différents modèles, comme illustré dans la **Figure 2-10**.

L'expert en aide à la décision est celui qui sait analyser le problème de manière approfondie, en décrivant tous les enjeux de manière précise. Il dispose d'un éventail d'outils et d'approches pour aider à la prise de décision. Aussi, il est important de noter que chaque méthode ne peut pas résoudre tous les problèmes ; généralement, il existe une méthode plus appropriée pour chaque situation spécifique.

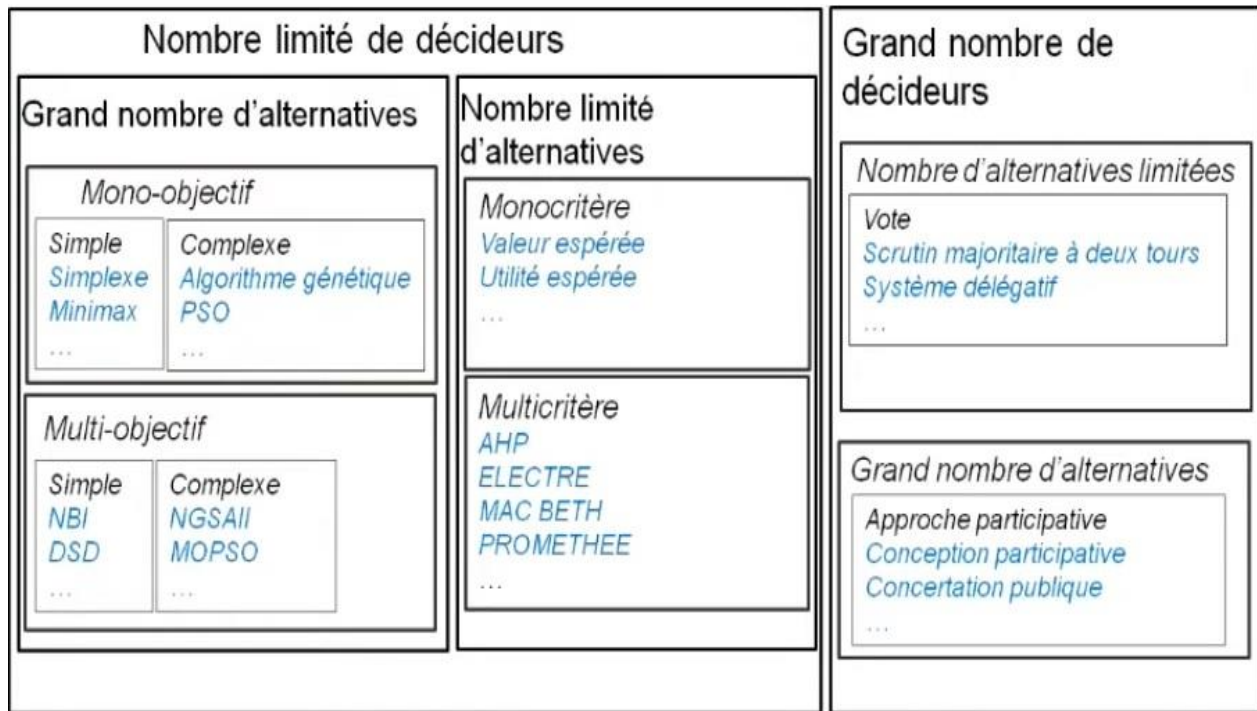


Figure 2-10 : Méthodes / approches/ modèles d'aide à la décision (Franck SFILIGOÏ TAILLANDIER)

2.4.3 Formalisation du problème décisionnel et la recherche de résultats

Tout d'abord, il s'agit de définir les différentes alternatives disponibles. Ensuite, vient la deuxième étape qui consiste à définir les critères qui seront utilisés pour évaluer ces alternatives. Enfin, la dernière étape implique la définition des paramètres de la méthode adoptée pour conduire l'analyse et la prise de décision

- **Définition des alternatives**, représentent les différentes solutions ou actions envisagées dans l'approche multicritère. Il est essentiel d'identifier et de limiter un ensemble de solutions, contrairement à d'autres approches d'optimisation qui permettent de générer un ensemble de solutions possibles au cours du processus de choix. Selon Roy (1985).
- **Définition des critères**, pour une approche multicritère, la définition des critères est primordiale et influence largement les résultats obtenus. Ces critères découlent des conséquences des actions, c'est-à-dire de "tout effet ou attribut de l'action susceptible d'interférer avec les objectifs ou avec le système de valeurs d'un acteur du processus de décision, en tant qu'élément primaire à partir duquel il élabore, justifie ou transforme ses préférences" (Roy, 1985). Pour choisir efficacement des critères, plusieurs conditions et règles ont été proposées : l'exhaustivité, qui implique de ne pas oublier des critères importants ; la cohérence, qui demande une correspondance entre les préférences locales et globales ; et la non-redondance, qui recommande de ne pas inclure de critères superflus, se limitant ainsi au jeu minimum et suffisant de critère.

- **Définition des paramètres de la méthode.** On dispose de deux paramètres essentiels : les performances des alternatives par rapport aux critères et les préférences par rapport aux critères. La performance représente la valeur attendue d'une alternative par rapport à un critère, et peut être évaluée sur une échelle cardinale, ordinale ou par comparaison par paire, selon la méthode utilisée. Les préférences expriment l'importance de la performance d'une alternative par rapport aux critères. Il est souvent utilisé (mais pas toujours) un poids sur les critères, appelé système de pondération, qui attribue un poids à chaque critère pour refléter son importance. Parfois, d'autres méthodes utilisent d'autres paramètres, tels que des seuils de préférence ou de veto.

Une fois que notre problème décisionnel est formalisé, c'est-à-dire que les alternatives, les critères et les différents paramètres tels que les performances et les préférences sont définis, nous pouvons exécuter la méthode choisie afin d'obtenir une solution, comme une hiérarchisation, une sélection ou un classement des alternatives. Une fois les résultats obtenus, il est préférable d'effectuer une analyse de sensibilité et de robustesse.

L'analyse de sensibilité vise à vérifier la validité des résultats en examinant la variation des résultats en fonction de la variation des paramètres de la méthode utilisée, compte tenu des incertitudes inhérentes. En effet, la définition d'un paramètre, tel qu'un poids attribué à un critère, n'est généralement pas fixe, et de petits changements peuvent influencer significativement les résultats.

L'analyse de robustesse, quant à elle, évalue la capacité des résultats à rester stables malgré les variations des paramètres. Un résultat est considéré comme robuste si la plage de variation des paramètres permet de conserver le même résultat.

L'analyse multicritère permet une vision multidimensionnelle des problèmes décisionnels, ce qui permet de considérer divers domaines d'intérêt ainsi que les préférences qui y sont liées. Étant donné que le sens des pondérations peut varier selon les méthodes employées, il est primordial d'ajuster la modélisation du problème décisionnel en fonction de la méthode choisie afin d'obtenir des résultats pertinents. Ainsi, la modélisation constitue l'élément central du processus, tandis que l'exécution de la méthode est d'importance secondaire.

La gestion d'aide à la décision est utilisée dans ce travail et un modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP ET FMECA sera développé dans chapitre 3.

Tableau 2-1 : Synthèse résumant les principaux OAD existant

Outil d’Aide à la Décision (OAD)	Description	Applications	Avantages	Limites
AHP (Analytic Hierarchy Process)	Décompose un problème en hiérarchie de critères pour la priorisation.	Gestion de projets, sélection de sites	Facilité de compréhension, structuration simple	Subjectivité dans le choix et la pondération des critères
ANP (Analytic Network Process)	Extension de l’AHP prenant en compte les interdépendances entre critères.	Stratégie, planification complexe	Utile pour problèmes interconnectés	Complexité accrue, besoin d’expertise
FMECA (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis)	Identifie les modes de défaillance, évalue leurs effets et analyse leur criticité.	Qualité industrielle, ingénierie de la fiabilité, gestion des risques	Hierarchise les défaillances selon leur gravité, aide à la prise de décision et à la priorisation des actions correctives.	Nécessite une évaluation rigoureuse de la criticité et des données quantitatives fiables.
PROMETHEE	Comparaison des alternatives par paires.	Évaluation environnementale, urbanisme	Flexibilité dans les critères de pondération	Difficile pour grands ensembles de données
TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)	Classe les options par proximité avec une solution idéale.	Logistique, évaluation de performances	Rapide et facile à implémenter	Sensible aux pondérations
SMART (Simple Multi-Attribute Rating Technique)	Simplifie la prise de décision pour des choix à multiples attributs.	Sélection de fournisseurs, planification des ressources	Méthode rapide, facile d’application	Approximations, manque de précision
DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory)	Visualise les relations causales entre critères.	Gestion de projets complexes	Analyse les interdépendances	Difficile d’interprétation pour des projets vastes
GIS (Geographic Information System)	Intègre les données géo-spatiales pour des analyses spécifiques.	Urbanisme, gestion environnementale	Précision géo-spatiale, visualisation claire	Coût élevé, besoin de compétences spécialisées
Méthode de Monte Carlo	Simule divers scénarios possibles en utilisant des variables aléatoires.	Gestion de risques, prévision économique	Précision dans les prévisions, adaptabilité	Temps de calcul élevé, complexité
MORO (Multi-Objective Robust Optimization)	Optimise pour plusieurs objectifs avec incertitude.	Planification urbaine, stratégie	Adapté aux contextes incertains	Calculs lourds, complexité algorithmique

2.5 Problématique de la gestion des eaux pluviales urbaines en Algérie

Pendant de nombreuses années, les villes algériennes ont dû faire face à plusieurs défis majeurs en matière de gestion des eaux de pluie. Progressivement, le ruissellement pluvial est devenu plus important et les inondations pluviales sont devenues un phénomène récurrent. Ces problèmes d'inondations sont souvent liés à la variabilité climatique, aux aménagements urbains et au réseau de drainage des eaux pluviales. Voici un aperçu de la situation actuelle :

2.5.1 Les inondations urbaines en Algérie

En Algérie, les phénomènes de crues et d'inondations se manifestent plus fréquemment que d'autres événements naturels tels que les séismes ou les éruptions volcaniques, ..., etc. Ces inondations causent des catastrophes destructrices, entraînant des pertes humaines et matérielles considérables. Quelques exemples significatifs d'inondations sont à noter, notamment :

- Azazga (Tizi Ouzou), le 12 octobre 1971 et qui ont occasionné 40 morts et des centaines d'habitations détruites.
- Tizi Ouzou, du 28 au 31 mars 1974 et qui ont provoqué 52 décès dans la Wilaya, 18000 sinistrés et des dégâts évalués à l'époque à 27 millions de DA.
- El Eulma(Sétif), le 1er septembre 1980 qui ont fait 44 décès.
- Annaba, le 11 novembre 1982, au niveau du centre-ville et qui ont fait 26 morts et 9500 sinistrés
- Jijel, le 29 décembre 1984 et qui ont occasionné 29 morts et 11000 sinistrés.
- Oued Rhiou (Chelf) , le 20 octobre 1993 et qui ont occasionné 22 décès et 14 blessés.
- Bordj Bou Arreridj, le 23 septembre 1994 et qui ont provoqué 16 décès et des dégâts évalués à 10.000.000DA.
- Alger (Bab-El-Oued) , le 10 novembre 2001, et qui ont fait 710 décès, 115 disparus et 30 milliards de DA de pertes.
- Ghardaïa, 1er octobre 2008 : Les inondations ont touché 9 communes de la wilaya, faisant 43 décès et entraînant 1.273 sinistrés, dont 74 familles affectées.
- Inondations d'El Bayadh, 1er octobre 2011 : 13 personnes ont perdu la vie, de nombreuses personnes ont été blessées, et des centaines d'habitations ont été détruites
- Inondations d'El-Tarf, 23 février 2012 : Trois personnes ont perdu la vie et des dégâts matériels importants ont été enregistrés.
- Oum El Bouaghi, 31 août 2013 : Des pluies torrentielles ont isolé la localité de Ksar Sbahi

- Alger, 12 septembre 2019 : Plusieurs quartiers ont été inondés, entraînant des dégâts matériels importants.
- Crue de l'Oued Meknassa (Chlef), 9 mars 2021 : Les inondations ont causé la mort de 7 personnes.
- Tlemcen, El Bayadh et Bordj Bou-Arredj, septembre 2023 : Une inondation a causé la mort d'au moins 8 personnes.
- Bordj Mira (Bejaia), 23 novembre 2023 : Un homme a perdu la vie et un ouvrage a été détruit et emporté par les eaux de l'oued Ait Smail.

La recherche sur Google nous a permis de rassembler des photos d'inondations dans diverses wilayas d'Algérie. Ces images illustrent l'ampleur des problèmes d'inondation rencontrés dans différentes régions et mettent en évidence les impacts sur les infrastructures et les communautés locales.





Figure 2-11 : Inondations à plusieurs wilayas d’Algérie

Le **Tableau 2-2** ci-dessous offre une représentation, par wilaya, du nombre de constructions implantées dans des zones inondables, illustrant ainsi l'ampleur des risques associés à la combinaison des phénomènes d'inondations et d'urbanisation.

Tableau 2-2 : Habitations construites en zones inondables par wilaya

Wilaya	Nombre de constructions	Wilaya	Nombre de constructions
Chleff	2248	Annaba	30 cités et quartiers
Laghouat	3083	Guelma	360
O. E. Bouaghi	1999	Constantine	620
Batna	16261	Médéa	3075
Bejaïa	500	Mostaganem	1633
Biskra	763	M’sila	1185
Bouira	1438	Oran	06 cités
Tamanrasset	1159	Boumerdés	561
Tébessa	17236	El Tarf	2370
Tlemcen	375	Tissemsilt	1340
Tiaret	13	El Oued	766
Alger	14545+ quartiers Merdja et Baraki	Souk Ahras	La plupart des communes
Djelfa	784	Tipaza	2710
Jijel	47(05 zones à risques très élevés)	Mila	1663
Sètif	1261	Ain Defla	7772
Saida	976+ 09 cités	Naama	4924
Skikda	4009	A Témouchent	14 zones jouxtant différents lits
S.B.Abbés	576 +04 cités en centre-ville	Relizane	350

- Source : Publication du Conseil National Economique et Social Mai 2003 : L’urbanisation et les risques naturels et industriels en Algérie - Inquiétudes actuelles et futures ; Protection Civile/Ministère de l’Intérieur et des Collectivités Locales.

2.5.2 Problèmes liés à la variabilité climatique

Actuellement, l’Algérie figure parmi les pays les plus touchés par la variabilité climatique (Sahnoune et al, 2013). En effet, l’influence du changement climatique s’est étendue à l’ensemble des composantes du bilan hydrologique, incluant l’évapotranspiration, l’infiltration, le stockage, et particulièrement les précipitations et le ruissellement pluvial (Meddi et al, 2024). Cette situation se traduit par des périodes de sécheresse prolongée, exacerbées par la variabilité climatique et les changements climatiques. Ces sécheresses ont des conséquences graves sur la gestion du réseau pluvial, l’approvisionnement en eau potable, ...etc.

2.5.2.1 Zone touchée par le changement climatique

La situation géographique de l’Algérie en fait l’une des régions les plus vulnérables aux effets du changement climatique. En effet, elle est située dans une zone soumise à de multiples pressions environnementales, notamment l’augmentation des températures, la diminution des précipitations et l’accentuation des phénomènes climatiques extrêmes. Cette combinaison de facteurs fait de l’Algérie une région où les impacts du changement climatique sont particulièrement ressentis.

Cette situation est doublée par la densification des milieux urbains, l'implantation d'usines et l'augmentation du trafic automobile. Cette densification modifie simultanément le climat local et favorise la formation d'îlots de chaleur et la pollution atmosphérique, accroissant ainsi la vulnérabilité des biens matériels et des populations aux dommages causés par les phénomènes naturels, tels que les débordements pluviaux.

2.5.2.2 Le manque d'information sur l'aléa pluviométrique/ ruissellement

En Algérie, nous faisons face à un manque de données de mesure des précipitations. Ce problème peut être attribué à plusieurs facteurs. Tout d'abord, le nombre de stations météorologiques est insuffisant pour surveiller les précipitations sur l'ensemble du territoire. De plus, les limitations budgétaires ont restreint les investissements dans la recherche et le développement dans le domaine de la météorologie. En outre, la topographie variée de l'Algérie, comprenant des zones montagneuses, désertiques et côtières, rend la collecte de données pluviométriques difficile dans certaines régions.

Parfois, les données historiques sur les précipitations en Algérie ne sont pas suffisamment disponibles ou accessibles. En outre, des lacunes dans la coordination entre les différentes agences météorologiques et environnementales en Algérie, ainsi que des défis liés au partage et à la mise à disposition des données pluviométriques, contribuent également à ce manque d'informations.

Les agences du ministère des Ressources en Eau ou le service Météo-Algérie disposent de plusieurs stations météorologiques. Malheureusement, la plupart d'entre elles sont hors service ou fournissent des données incomplètes. La Figure 2-12 montre la carte du réseau hydro-climatologie et de la surveillance de la qualité des eaux.

En mai 2006, le BET INGEROP, une société d'ingénierie et de conseil française mandatée par le ministère des Ressources en Eau pour réaliser une étude sur la protection de la ville de Bejaia contre les inondations, a signalé qu'il n'avait pas pu obtenir les données de la station de Tilesdit 15 01 06 en raison de leur indisponibilité, selon la responsable du service hydrométrie de l'ANRH.

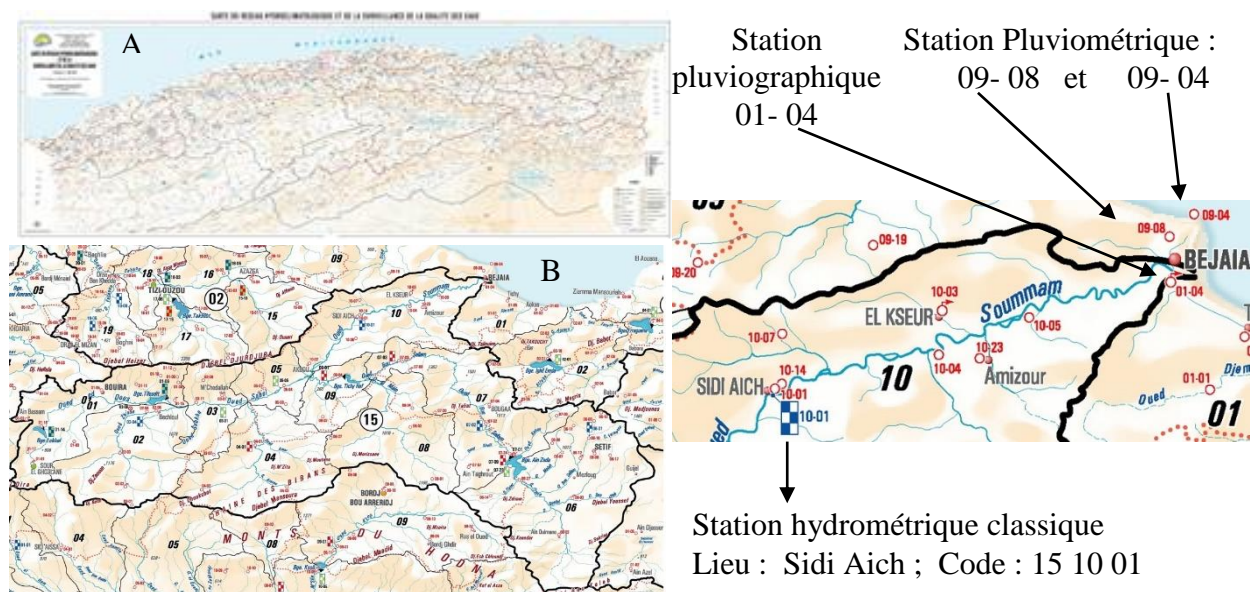


Figure 2-12: Carte du réseau hydro-climatologie et de la surveillance de la qualité des eaux, du nord d’Algérie (A), particulièrement la ville de Bejaia (B).

Le manque de données est justifié est observé dans notre cas d’étude. À ce jour, aucune station hydrométrique n’existe dans la ville de Bejaia. Cependant, une partie de la ville de Bejaia borde l’embouchure de l’oued Soummam, ce dernier draine une surface d’environ 9720 km². La station hydrométrique qui contrôle le bassin versant de la Soummam est située à Sidi Aich (Tableau 2-3). Cette station contrôle une superficie de 8420 km². L’aire additionnelle allant de Sidi Aich à la mer Méditerranée n’est pas contrôlée.

Tableau 2-3 : Station hydrométrique Sidi Aich

Stations	Code	Période / Taille	Années d’enregistrement	Remarque
Sidi Aich	15 10 01	De 1953 au 1992 / 39 ans	(1953/ 54 – 1956/57) + (1958/59-1973/74) + (1975/76) + (1982/83-1983/84 + 1990/91	24 années d’enregistrement

2.5.3 Problème d’aménagement et d’application des normes

La mise en œuvre d’aménagements favorisant le stockage de l’eau et l’évapotranspiration constitue une stratégie efficace pour atténuer les effets des îlots de chaleur urbains, tout en préservant le cycle naturel de l’eau, notamment la variabilité des précipitations. Toutefois, la gestion des eaux pluviales reste entravée par un manque de coordination institutionnelle et par des défaillances dans

l'exécution, le suivi et la réception des travaux, réduisant l'efficacité des interventions en milieu urbain.

2.5.3.1 Coordination entre différents acteurs

Le manque de coordination entre différents acteurs présente l'une des causes principales des inondations pluviales en Algérie. L'inefficacité dans la planification et la mise en œuvre des projets conduit à des décisions incohérentes dans la planification des solutions de gestion des EP. Cela peut entraîner un gaspillage de ressources financières et entraîner des retards dans la résolution des problèmes et une mauvaise coordination des interventions en cas d'urgence. Parfois, un travail de négociation peut s'ouvrir entre les différents acteurs pour parvenir à un accord uniquement pour réaliser une solution classique.

La situation actuelle des inondations en villes algériennes témoignant des difficultés de favoriser la convergence des domaines de l'aménagement du territoire, de l'urbanisme et de la gestion des risques d'inondations. Le manque de coordination entre les différents organismes de gestion du réseau pluvial montre la non efficacité de la gestion des EP, entraînant des coûts supplémentaires/complémentaires et des effets négatifs sur l'environnement et les communautés locales.

2.5.3.2 Exécutions - Suivi - Réception des travaux

La réalisation de nombreuses axes, rues et les voies de circulation peuvent modifier les écoulements naturels et constituent les vrais barrages aux écoulements des EP. Des problèmes capitaux prennent une place particulière dans nos villes algériennes, un problème courant sur le terrain est le non-respect des spécifications techniques des projets de gestion du réseau pluvial. Cela peut inclure des défauts de construction, des matériaux de mauvaise qualité utilisés, des erreurs dans la mise en œuvre des techniques de drainage, etc.

Les retards dans l'exécution des travaux qui peuvent également survenir en raison de divers facteurs, tels que des retards dans la livraison des matériaux, des difficultés d'accès au site, des conditions météorologiques défavorables, des conflits de compétence entre les différentes parties prenantes, etc. Ces retards entraînent des dépassements de budget, des retards dans la réalisation des objectifs du projet et des frustrations chez les parties prenantes.

2.5.4 Problèmes liés au RAP

En Algérie, la gestion des eaux pluviales est fortement préoccupée par divers risques associés au réseau pluvial, notamment les débordements, les nuisances telles que les odeurs, la pollution visuelle, les effondrements et les perturbations du trafic urbain.

Plusieurs facteurs contribuent à la détérioration du réseau pluvial, voici quelques-uns de ces problèmes liés au réseau pluvial (**Tableau 2-4**) :

Tableau 2-4 : Les problèmes liés au réseau pluvial , leurs causes et leurs conséquences

Type de Problème	Description	Causes	Conséquences
Défauts dans la conception du réseau pluvial	Urbanisation rapide et non planifiée entraînant l'imperméabilisation des sols et augmentant le ruissellement. Défauts de conception des réseaux existants (pentes insuffisantes, canalisations bouchées).	Urbanisation non régulée, défauts de conception, vieillissement des infrastructures, accumulation de débris.	Inondations urbaines, risques pour la sécurité publique, dégâts matériels, détérioration de la qualité de vie.
Entretien fréquent du réseau pluvial	Réseaux vieillissants et mal entretenus, obstructions dues aux débris et aux sédiments, difficultés d'accès pour le contrôle et l'entretien.	Manque de financement pour l'entretien, absence de dispositifs de protection, insuffisance des moyens d'intervention.	Augmentation du risque d'inondation, défaillance des infrastructures, nécessité de réparations coûteuses.
Choix inapproprié des types d'ouvrages de protection	Ouvrages de protection inadaptés ne résistant pas à des événements pluvieux extrêmes, aggravant les inondations. Mauvaise compréhension des risques par les services concernés.	Mauvaise évaluation des risques, sous-estimation des événements extrêmes, planification inadéquate des mesures.	Risques accrus d'inondations, dommages matériels importants, vulnérabilité des zones habitées.

2.5.4.1 Défauts dans la conception du réseau pluvial

L'urbanisation rapide et non planifiée dans de nombreuses villes algériennes a entraîné une imperméabilisation croissante des sols, réduisant la capacité d'infiltration naturelle de l'eau de pluie dans le sol. Cela augmente le ruissellement des eaux de pluie et le risque d'inondations, surtout dans les zones à forte densité de population et à faible capacité de drainage. Les réseaux pluvieux existants peuvent parfois présenter des défauts dans leur conception, ce qui les rend inefficaces pour gérer les volumes d'eau pendant les événements pluvieux extrêmes. Des problèmes tels que des pentes insuffisantes, des canalisations bouchées ou endommagées, et des systèmes de collecte mal conçus peuvent contribuer aux inondations urbaines. Les défauts de construction et le vieillissement du réseau aggravent la situation. L'accumulation de matières en suspension, la présence de racines d'arbres ou de corps volumineux, entraînant une réduction de la section du réseau dans le sens d'écoulement. Obturation rapide

2.5.4.2 L'entretien fréquent du réseau pluvial

Dans de nombreuses régions urbaines d'Algérie, les réseaux pluviaux existants sont souvent vieillissants, sous-dimensionnés ou mal entretenus. Les canalisations peuvent être obstruées par des débris, des sédiments ou des déchets, ce qui réduit leur capacité de drainage et augmente le risque d'inondation lors de fortes précipitations.

Le manque de dispositifs de protection du réseau pluvial ainsi que les difficultés à réaliser un contrôle adéquat du réseau enterré constituent également des problèmes majeurs en villes algériennes. La fréquence d'intervention et le moyen utilisé pour le curage du réseau pluvial dépendent des ressources financières disponibles. Le financement insuffisant à l'entretien des réseaux pluviaux constitue un problème majeur en Algérie. Il y a un manque de moyen pour effectuer régulièrement des opérations d'entretien telles que le nettoyage des canalisations, la

réparation des canalisations endommagées ou la mise à niveau des nouveaux systèmes de drainage. En plus, la rapidité avec laquelle les pluies se transforment en débits (transport des matières solides, le réseau pluvial nécessite d'observations). Le réseau pluvial nécessite d'être entretenu à chaque fois, malheureusement l'entretien périodique des réseaux pluviaux urbains contribue dans de nombreux cas à déformer et à aggraver l'état du réseau pluvial.

2.5.4.3 Le choix inapproprié des types d'ouvrages de protection

Lorsque les ouvrages de protection contre les inondations pluviales sont mal choisis, cela peut exposer leur efficacité et leur durabilité. Des ouvrages peuvent ne pas résister à des événements pluviaux extrêmes, ce qui expose les zones habitées à un risque accru d'inondations et de dégâts matériels. De même, des systèmes de drainage mal conçus ou mal entretenus peuvent être submergés par les eaux de ruissellement, aggravant ainsi les inondations urbaines. La stratégie de gestion EP tend à être non efficace, s'il y a un écart de compréhension des risques d'inondations entre les représentants officiels et les experts. Une compréhension insuffisante des caractéristiques hydrauliques locales, une sous-estimation des risques potentiels liés aux inondations pluviales et une planification inadéquate des mesures de protection ont contribué à faire de nos villes des zones susceptibles d'être inondées (Hubert et al, 1999).

2.5.5 Problèmes d'inondations en ville de Bejaia

Comme d'autres wilayas en Algérie, les problèmes d'inondations de la ville de Bejaia sont liés à la contribution des fortes pluies saisonnières, à la concentration urbaine dans la plaine et l'embouchure d'oued de Soummam, ainsi que la dégradation des canalisations du réseau pluvial.

2.5.5.1 Les inondations dans la ville de Bejaia

Plusieurs inondations ont été enregistrées dans la ville de Bejaia pendant ces dernières années. Ces enregistrements sont faits, soit par la protection civile pendant leurs interventions sur site, par les services de l'ONA, APC ou l'Hydraulique. Des fois les photos peuvent être retrouvées dans des articles de journaux, bureau d'étude, entreprises, citoyens et autres. Plusieurs données et photos ont été collectées principalement celles relatives à l'inondation du décembre 2002, avril 2003 et octobre 2007. Les lieux d'inondations sont cités dans les **Figure 2-13**, **Figure 2-14** et **Figure 2-15**.

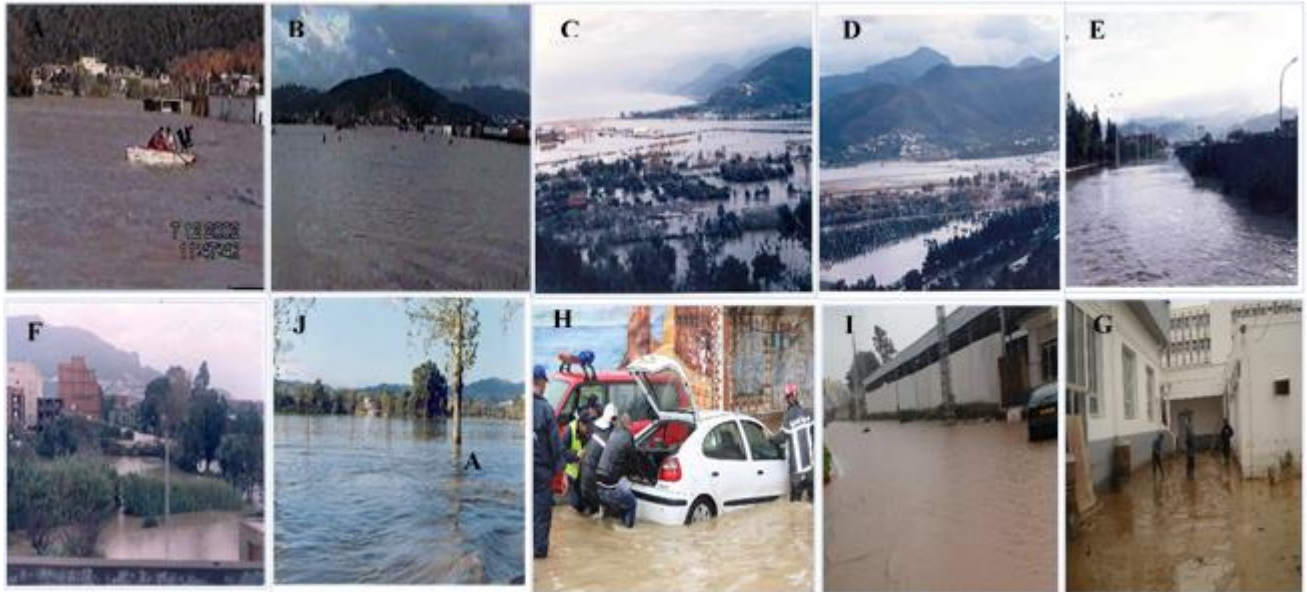


Figure 2-13 : Inondation à Sidi Ali L'Abher : Iriahen (A) ; Iriahen (B) ; Sidi Ali L'Abher ; Bir Selam (D); RN°09 (E) ; côté gauche de RN°09 (F); Tamalahth (G) ; Abodaou - université (H) ; Marché Iriahen (I) ; Ecole première Iriahen (J) ;



Figure 2-14 : Inondations Daoudji vers Amriou : Sidi Ahmed (A) ; Daoudji (B) ; Arrêt Daoudji ; Hôtel des finance (D); Amriou (E) ; Amriou (F); Amriou (G) ; Amriou (H) ; Parc Mozaia (I); Souk El Falah (J)



Figure 2-15 : Inondations à plusieurs endroits ; Ancienne ville (A) ; Tunnel Sidi A/Kader (B) ; Porte Sarrasine ; APC Bejaia - nouvelle ville (D); Cité Tobal- arrêt de Bus (E) ; Cité Tobal (F); Ighil Azoug (G); Remla - DHW (H) ; Cité Adrar (I); Quartier Seghir (J) ; Quartier Seghir (K) ; Université Targa Ouzmour (L)

Vu la gravité du phénomène météorologique, actuellement la ville de Bejaia souffre du problème d'inondation pendant plusieurs périodes, mais l'extension de la ville qui porte beaucoup de modification des cours d'eaux rendre la situation plus compliquer et risque d'inondation augmente. Les causes principales sont liées à l'homme et à ses aménagements :

- Construction en coins morts : La rivière a été busée, pour quelle crue ? Décennale, centennale, avec une crue historique ?
- Des fois, la trace de la rivière a disparu et faisant oublier le risque d'une inondation et les constructions sont au-dessus des cours d'eaux.
- Ces réseaux sont reliés à des ouvrages de connexion de capacité limitée qui ne peuvent souvent pas faire face aux événements pluvieux.
- L'urbanisation des espaces qui se situent dans une plaine inondable, c'est pas un phénomène ancien, mais qui s'est fortement développé ces dernières années. Quel que soit le niveau de développement du pays
- La croissance urbaine dans les pays en développement s'est déroulée de manière non durable, avec pour conséquence une dégradation de la qualité de vie et de l'environnement. Cependant, ce processus est plus important en ville de Bejaia où la servitude d'entretien des deux côtés (gauche et droite) n'a pas été respectée.

2.5.5.2 États actuel du RAP de Bejaia

En générale, le système d'assainissement de la ville de Bejaia est conçu pour transporter un mélange des eaux résiduaires et de l'eau de temps de pluie. Plusieurs modification et changement ont été portés aux lits d'oueds. D'ailleurs, le réseau actuel ne correspond pas au réseau déjà existant, l'origine. La majorité du système d'assainissement de ville de Bejaia est du type unitaire, une grande partie de ces réseaux sont reliés à des installations de traitement de capacité limitée qui ne peuvent souvent pas faire face aux événements pluvieux.

L'enquête de terrain nous a permis de faire une collecte de données sur les inondations passées. La **Figure 2-16** montre des photos prises sur place. Ça c'est un exemple, qui montre la réduction de la section d'écoulement à l'entrée des ouvrage, dépôt et manque d'entretien et la mauvaise connexion des eaux pluviales dans rues.



Figure 2-16 : Insuffisance de capacité du réseau de Bejaia. Obstacles d'écoulement et réduction de section ((A), (B), , (D), (E), (F), (E), (G), (H)) ; Manque d'entretien périodique (I) ; Dépôt dans les regards (J) ; Eaux pluviales non drainer ((K), (I))

D'ailleurs, nous avons fait la même remarque de MATHOT & MARIANI 1994 (Guiton, 1994) « L'homme a oublié le fonctionnement naturel des cours d'eau au point de recouvrir ces derniers de béton ». En ville de Bejaia, plusieurs anciens ruisseaux ont été éliminés où remplacer par un réseau de capacité d'évacuation insuffisante où occupés, en général, par des personnes n'ayant pas une connaissance locale du terrain, ignorant la culture du risque propre à leur nouvelle situation géographique. La perception de l'insuffisance des capacités de drainages existe notamment dans des lieux d'urbanisation denses où réseau principal est sous dimensionné (Comparaison de diamètre du réseau amont et aval).

2.5.5.3 Les problèmes d'exploitation du réseau pluvial de la ville de Bejaia

Pour éclaircir plus le problème de gestion de réseau d'assainissement de la ville de Bejaia, nous avons étudiés une série de données de l'ONA du période du 2011 au 2016. Cette série contient des données sur nombre d'interventions et de réclamations, les regards visités et linéaire de réseau curé, plus le taux curé et volume de déchet évacuées.

Dans cette contribution graphique, nous tentons d'interpréter la notion de gestion du réseau en fonction de travaux réalisés. Pour une bonne lecture des données nous avons présenté la série de données sous forme de graphes et les résultats obtenus sont donnés dans la **Figure 2-17**.

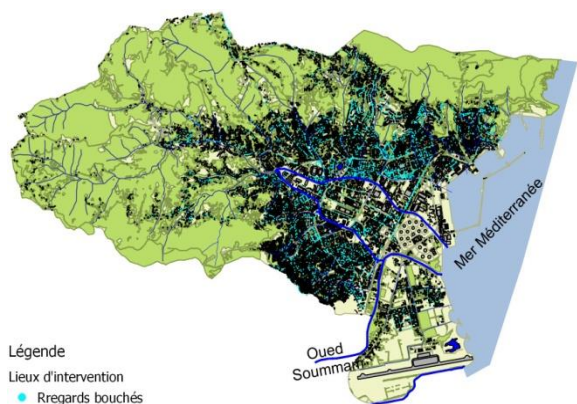


Figure 2-17-A : Carte de localisation des lieux d'interventions par gestionnaire

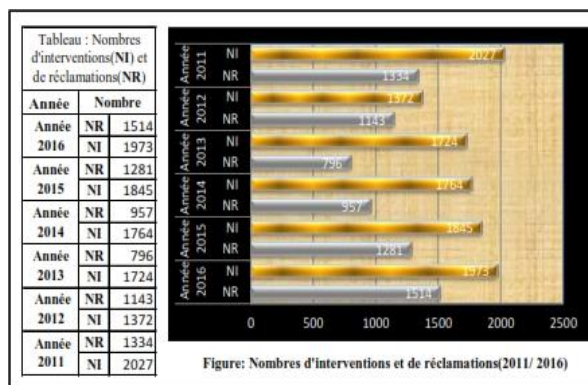


Figure: Nombres d'interventions et de réclamations(2011/ 2016)

Figure 2-17-B : Nombres d'interventions et nombres de réclamations

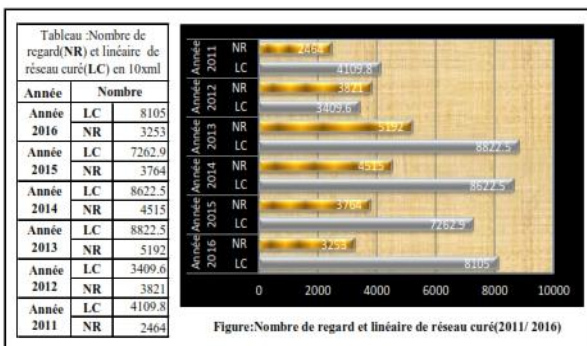


Figure: Nombre de regard et linéaire de réseau curé(2011/ 2016)

Figure 2-17- C : Nombre de regard et linéaire de réseau curé

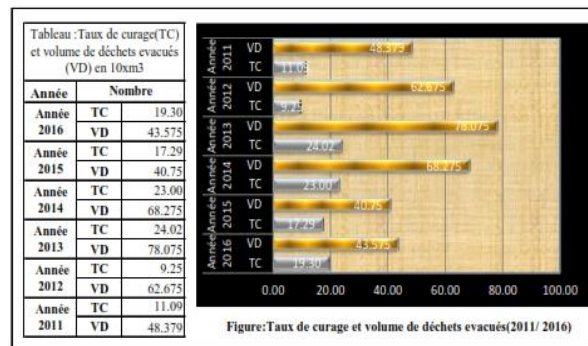


Figure:Taux de curage et volume de déchets évacués(2011/ 2016)

Figure 2-17- D : Taux de curage et volume de déchets évacués

Figure 2-17: Série de données de l'ONA Bejaia, période du 2011 au 2016.

Ce travail permet de comprendre pourquoi les travaux d'intervention sont important et coûts liés au traitement des réclamations sur l'assainissement sont en réalité des investissements lourds et répétitifs non rentables, ni à l'entreprise (gestionnaire), ni à la ville (Citoyens). D'après la Figure 2-17 :

- Toutes les réclamations sont traitées, et Le nombre d'interventions est supérieur au nombre de réclamations enregistrées au cours de la période 2011–2016 voir (Figure 2-17- B). Exemple de 2011, on a 1334 réclamations et 2027 interventions, ce qui donne 701 interventions de plus. Cette différence est due au fait que l'état du réseau dans ces endroits de réclamations est plus ou moins critique. Requête d'une intervention particulière de la part de l'administration, demande parfois de plusieurs interventions. Le nombre d'interventions est plus important, et entre l'année 2011 et 2016 le nombre d'interventions était presque égal. Donc aucune amélioration ou extension n'a été apportée au réseau d'assainissement.
- Nombre de regards visité (5192) et linéaire de réseau curé (88225ml) sont considérables, entraîne un degré élevé de mobilité sur le parc du gestionnaire. Curage des bouches d'égout et nettoyage des regards peuvent engendrées des risques de déformation du réseau.
- Taux de curage et volume de déchets évacués sont importants. Dans la pratique, évacuation des boues des regards et de curage du réseau vers le point de collecte le plus proche est une opération difficile.

La ville de Bejaia est toujours influencée par l'effluent transporté. Les coûts d'interventions sont vraiment importants et la gestion du réseau d'assainissement d'eau de pluie ne peut pas être pris en charge comme celle de l'eau potable ou des eaux usées.

Le rôle tenu par gestionnaires de l'Eau apparaît essentiel et considérable. Mais, l'optimisation des investissements consentis pour la gestion du risque d'inondation à une échelle plus large, nécessite l'intégration progressive de mesures préventives, à l'échelle de la parcelle. Mais cette intégration augmente le nombre d'ouvrages de limite de ruissellement des EP.

Une bonne pratique de la gestion des réclamations peut nous aider à diminuer les frais d'exploitation et la gravité des dégâts causées par les inondations. Lorsque on pense à gérer nos réclamations, nous devons définir un plan d'action, et quelles sont les solutions les plus efficaces pour les plaintes les plus récurrentes.

Puisque le nombre d'intervention est important et les sommes d'argent en jeu sont considérables, donc d'un point de vue opérationnel, une des conséquences de l'application d'ancienne stratégie est que la gestion de réseau d'assainissement n'est plus durable. C'est pourquoi, celles-ci ne peuvent agir que partiellement sur la gestion de la situation non l'élimination des points noirs importants. Certainement, une nouvelle stratégie ne peut pas régler problème directement avec l'existants, mais une amélioration peut être porté aux services actuels. Dans ce cas, les gestionnaires doivent construire une maîtrise des outils d'aide à la gestion du réseau d'assainissement, et d'intégrer des nouvelles techniques et valorisation la gestion des eaux pluviales en ville de Bejaia.

Garantir un coût acceptable est toujours demandé, le coût de construction et le coût d'exploitation (incluant le coût de réhabilitation), aussi de garantir une exploitation facile à réhabiliter et à rénover, son exploitation doit être optimisée au même temps de préserver la santé du personnel, en limitons les risques pour le personnel pendant les interventions (asphyxie, inhalation, chute,

maladie, explosion,...) sur le système d'assainissement de maximiser la capacité d'adaptation du système d'assainissement, en utilisons les technologies mieux adoptées aux différents changements(climatique et anthropiques.

On peut citer trois phénomènes quotidiennement ou périodiques ont rendu notre réseau est incapable de fonctionner des conditions normales. Le premier, c'est les travaux de construction en amont de la ville, ensuite, les dépôts de poubelles, et enfin, les feux de forêt.

Le réseau pluvial des grandes parties de la ville de Bejaia est conçu pour transporter un mélange des eaux résiduaires et de l'eau de temps de pluie. La faite que les terrains de la plaine (faible pente) ont été transformé en terrain imperméable, donc les extensions sur les alentours du centre de ville ont mené à la production de nombreuses inondations et des débordements pluviaux.

Risque d'apparaître des débordements ne cesse de croître beaucoup plus dans des endroits où la gestion de réseau a toujours été faite pour répondre aux problèmes localisés immédiats sans considérer la durabilité du réseau à long terme.

Il est essentiel d'adopter une approche holistique de la gestion des eaux pluviales, en tenant compte des caractéristiques spécifiques du site, des besoins locaux et des impacts potentiels sur l'environnement.

2.6 Conclusion

La gestion des eaux pluviales urbaines présente un intérêt socio-économique significatif en contribuant à la résilience des villes face aux aléas pluviométriques, à la préservation de l'environnement et à la promotion d'un développement urbain durable et inclusif et au suivi des aménagements.

De protéger la santé des personnes et d'évacuer les résidus de l'activité humaine sans risque sanitaire. De protéger le milieu contre les inondations (les personnes, les structures, les biens et les infrastructures). De préserver le milieu naturel et de protéger le milieu naturel contre les pollutions aiguës et chroniques. De préserver les usages du milieu aquatique et de ne pas affecter les usages actuels ou désirés du milieu aquatique : pêche, baignade, promenade, prélèvements pour l'eau potable, ... etc Pour atteindre cet objectif, il nous apparaît qu'il ne peut y avoir une bonne gestion des eaux pluviales (Gralepois and Guevara Viquez, 2015) urbaines sans une bonne connaissance de nouvelles techniques dites "alternatives" ou "compensatoires", plus une mise en place d'une stratégie adaptée suivant cas d'étude. C'est-à-dire, lorsqu'il est très difficile d'agir sur réseau d'assainissement (milieu urbain), l'intégration de l'eau dans l'urbanisme et de concevoir un système durable qui fonctionne dans des conditions la gestion des eaux pluviales à l'aide des ouvrages alternatives devienne une solution.

Les inondations à Bejaia ont des répercussions socio-économiques importantes, notamment des dommages matériels aux habitations et aux infrastructures, des perturbations dans les services

publics, des risques pour la santé publique et des pertes économiques pour les entreprises et les agriculteurs locaux.

Cependant, malgré les efforts et les actions menés par le gestionnaire, mais les inondations continuent de représenter une menace pour la ville, mettant en évidence la nécessité d'une approche intégrée et durable.

CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE DÉVELOPPÉE : MODÈLE D'AIDE À LA GESTION DES INONDATIONS URBAINES PAR LES MÉTHODES AHP ET FMECA

3.1 Introduction

Aujourd'hui, de nombreux pays à travers le monde souffrent des problèmes d'inondations pluviales causées par le débordement des réseaux d'assainissement. Cela est en grande partie dû au fait que les études de gestion des réseaux pluviaux sont souvent réalisées en dehors du cadre de l'aide à la décision, et dépendent traditionnellement du budget réservé par les décideurs, comme c'est le cas en Algérie. Il en résulte un décalage significatif entre les agents de terrain, les gestionnaires et les décideurs au moment de la prise de décision. Les intervenants fondent leurs arguments sur les réclamations et leur raisonnement technique, tandis que les décideurs s'appuient sur les propositions qui leur sont soumises. Modèle

La méthode de gestion des eaux pluviales perd alors de son efficacité, et le principe d'aide à la décision devient moins pertinent pour les décideurs puisqu'ils ne maîtrisent pas les mécanismes de raisonnement des employés. Pour instaurer ce principe, il est essentiel d'impliquer les décideurs dans le processus de résolution de la problématique dès le départ, tout en développant un modèle général de processus de résolution spécifique à la problématique et adapté au cas d'étude. C'est l'objectif général de ce chapitre.

Notre étude propose une méthodologie adaptée à la gestion des inondations urbaines, développée avec des outils d'aide à la décision, visant à réduire l'impact des débordements pluviaux sur les zones à risque d'inondation. La méthodologie que nous proposons repose sur l'hypothèse que tous les points du réseau pluvial peuvent potentiellement déborder et nécessitent au moins une intervention. Cette règle préliminaire découle essentiellement du fait que le réseau d'assainissement de la ville de Bejaia souffre actuellement de nombreuses défaillances qui le rende très vulnérable aux inondations pluviales (voir CH II, §II.5.5.2). Cela présente un défi complexe nécessitant une approche multi-paramètres.

Pour élaborer ce modèle et rendre le travail efficace, nous nous sommes basé sur une liste de 12 critères influençant la production d'un débordement ou impactant le milieu touché. Nous utilisons des outils d'aide à la décision comme l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) et l'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (FMECA). Ces méthodes permettent de hiérarchiser les priorités et d'identifier les points noirs les plus importants dans le réseau pluvial d'une ville. Tout au long de cette partie, nous fournirons les informations et les outils nécessaires pour réussir le développement d'une étude de cas.

3.2 Les étapes de la méthodologie développée

La méthodologie que nous proposons pour la gestion des inondations urbaines repose sur une série d'étapes systématiques et coordonnées. La démarche décrite ci-après a été conçue pour atteindre les objectifs définis précédemment, en tenant compte des données disponibles, des outils d'analyse avancés et de la participation active des parties prenantes (ONA, PC, APC, DRE).

L'organigramme méthodologique suivi dans cette étude s'organise en trois parties. Ces différentes étapes sont présentées par la **Figure 3-1**.

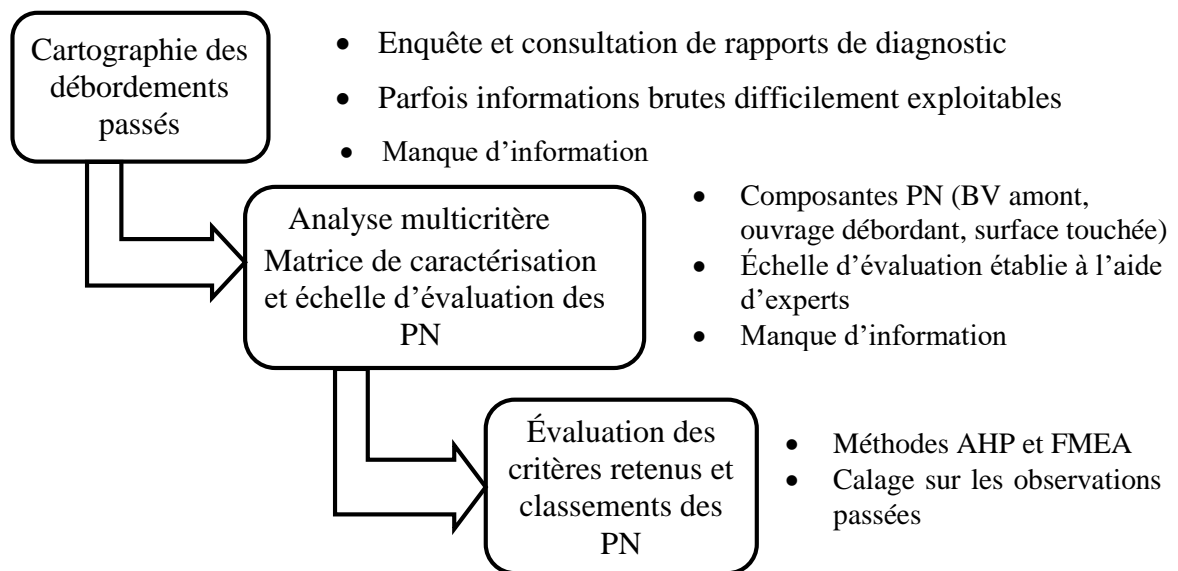


Figure 3-1: Organigramme méthodologique de l'étude

Suivant la Figure 3-1, la méthodologie de recherche consiste à :

- Établir une carte prévisionnelle des débordements possibles basée sur les observations et les diagnostics réalisés dans le passé sur le RAP de la ville de Bejaia.
- Analyser les points de débordements (points noirs) auxquels nous avons associé trois composantes (bassin versant amont, ouvrage débordant, surface touchée). Cette analyse a permis d'évaluer les critères retenus et de définir la matrice de caractérisation et l'échelle de d'évaluation des points noirs.
- Classer, par ordre d'importance, les points noirs en appliquant deux méthodes : AHP (Analytic Hierarchy Process) et FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Le croisement des deux méthodes nous a permis de prioriser les PN en termes d'importance

et d'intervention. Le calage des résultats obtenus a été réalisé en les confrontant aux données d'observations et de diagnostics passés (carte des PN établi en **Figure 4-10**).

Le fonctionnement général de chaque étape est précisé dans les paragraphes suivants. Ensuite, dans le chapitre 4 étude de cas, l'application permet aux lecteurs de comprendre l'approche et les méthodes utilisées.

3.3 Cartographie des débordements passés

Cette pratique recommandée fournit une méthode de cartographie des débordements passés, axée sur l'information géographique. Au sens le plus large, couvrant tous les phénomènes « débordements » auxquels on peut associer une localisation ou une délimitation. Ces données peuvent être structurées et présentées sur des cartes (exemple de la **Figure 4-8** du chapitre 4).

3.3.1 Principe et intérêt de la consultation des situations passées

La différence entre ce qui est actuellement connu et ce qui doit être connu réside dans une déclaration concise des informations et des données concernant les situations réellement passées. Disposer d'informations précises et fiables sur des situations passées est capital pour plusieurs raisons dans la gestion des RAP et la prévention des inondations urbaines. Pour disposer de telles informations la démarche devrait passer par les étapes suivantes :

- Analyse des causes : Comprendre les situations passées permet d'identifier les causes spécifiques des débordements et inondations. Cela inclut les insuffisances du réseau pluvial, les problèmes de structure et les variations des conditions des ruissellements pluviaux.
- Consultation des retours d'expérience : Les insuffisances et les erreurs passées fournissent des leçons précieuses pour améliorer les futures stratégies de gestion des EPU. L'analyse des incidents passés aide à éviter les mêmes erreurs et à adopter des pratiques plus efficaces.
- Évaluation des importances : Les données historiques sont essentielles pour évaluer les zones à risque. Cela permet de cartographier les zones fréquemment touchées et de prioriser les interventions dans ces zones.
- Planification et préparation : Les informations sur les événements passés aident à mieux planifier et préparer les réponses aux futures inondations. Cela inclut l'amélioration des aménagements et les applications des nouvelles techniques de gestion des eaux pluviales, aussi la mise en place de systèmes d'alerte et la préparation des services d'urgence.
- Justification des interventions : Les situations passées servent de base pour justifier les investissements nécessaires dans les infrastructures et les systèmes de gestion des eaux pluviales. Les décideurs peuvent utiliser ces données pour obtenir des financements et du soutien pour des projets de prévention futurs.

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

- Confiance du Public : En montrant que les autorités apprennent des situations passées et prennent des mesures pour prévenir les problèmes futurs, la confiance du public dans les systèmes de gestion et les interventions des autorités peut être renforcée.
- Documentation et Archivage : Une documentation détaillée des événements passés est essentielle pour une gestion efficace à long terme. Cela inclut la création de bases de données et de cartes qui peuvent être utilisées par les futurs gestionnaires et décideurs.

Analyser les situations passées est une étape fondamentale pour améliorer la gestion des inondations urbaines, renforcer les structures, et garantir la sécurité et la résilience des milieux urbains face aux risques des inondations pluviales. Aujourd'hui, le monde numérique offre à chacun de nouvelles techniques pour créer un Système d'Information Géographique (SIG). Ce système facilite la lecture et l'analyse des informations, améliore notre compréhension, accélère la recherche d'informations sur des sites exposés aux risques multiples, encourage la participation des différents acteurs, améliore notre capacité à communiquer sur la gestion des divers problèmes et facilite l'élaboration de stratégies et de cartes.

L'organigramme de la démarche utilisée est présenté par la **Figure 3-2**.

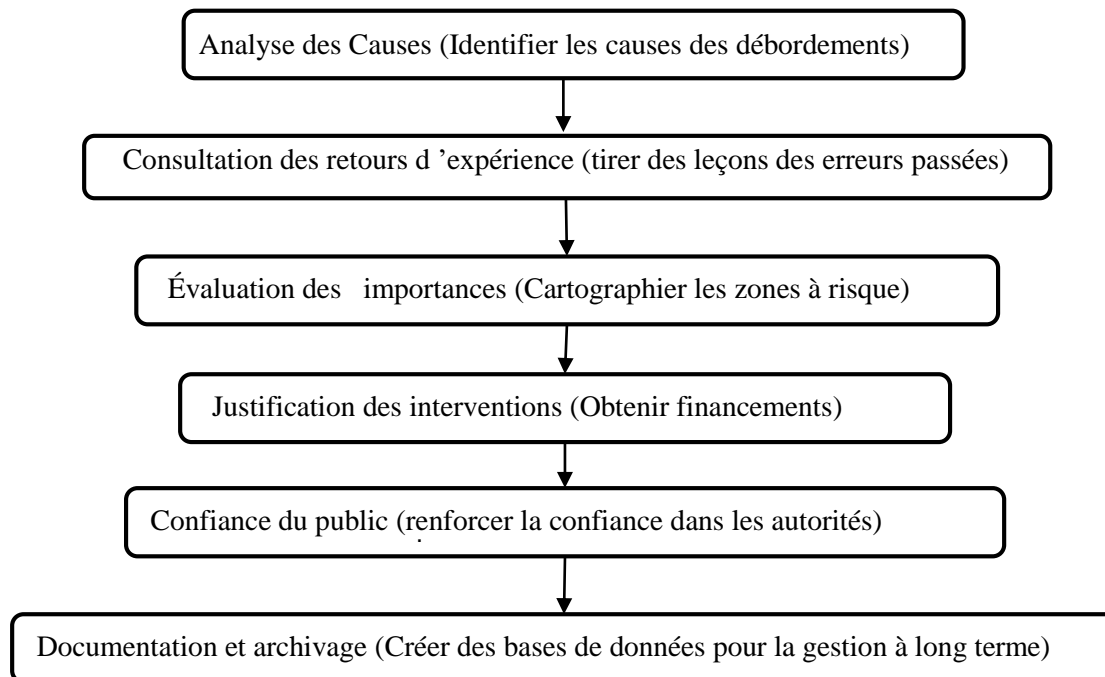


Figure 3-2 : Organigramme de la démarche pour la cartographie des débordements passés et l'amélioration de la gestion des EP

3.3.2 Conception des cartes d'inondation pluviales

C'est le processus de création d'une représentation graphique détaillée des zones urbaines susceptibles d'être touchées par des inondations pluviales. Cette carte vise à identifier les zones d'inondation, à faciliter la planification et la gestion des crises, et à informer les décideurs ainsi que le public. Pour élaborer une carte plus représentative (carte des points noirs et carte des zones touchées), il est essentiel de commencer par collecter et exploiter les documents et données disponibles concernant le système d'assainissement pluvial. Plus ces données sont nombreuses et précises, plus la fiabilité de la carte sera assurée.

3.3.2.1 Enquête et consultation de rapports diagnostic

Pour élaborer une carte d'inondation passées, il est capital de mener une enquête approfondie pour recueillir des données précises sur les événements passés et les réseaux existants de drainage des EP. À présent, l'environnement urbain se reconstruit rapidement et les collectivités mettent en œuvre de nouveaux réseaux pluviaux. Par conséquent, l'amélioration de nos connaissances nécessite une vérification des différents documents d'urbanisme et d'occupation des sols pour bien cadrer le périmètre d'étude.

Il est également essentiel de mener des enquêtes et de consulter les rapports d'expertises sur les problèmes rencontrés afin d'identifier et de localiser les zones d'inondations et les terrains susceptibles d'être inondés.

Dans un premier temps, il s'agit de mener des enquêtes. Une enquête s'applique à différentes échelles (terrain, administration) pour recenser les parties du réseau pluvial et les scènes des inondations. Elle facilite l'identification des points de dysfonctionnement du réseau et propose ensuite toute une gamme d'actions ou de solutions. Parfois, le diagnostic du réseau pluvial ne peut pas uniquement reposer sur une expertise externe ou sur une expérience accumulée. Il n'y a pas de solution prête à l'emploi ni de plans à suivre universels. Nous considérons que ce problème nécessite un apprentissage collectif et une gestion appropriée par divers services.

La collecte de données auprès des agents gestionnaires, des citoyens et des anciens résidents constituent la base de démarrage de développement de notre méthodologie. Une fois les données collectées, la consultation de rapports diagnostic permettra d'analyser les causes des inondations, d'obtenir une idée précise de l'état de fonctionnement du réseau pluvial, d'évaluer les points critiques du système de gestion actuel, et de formuler des recommandations basées sur ces analyses. Ce processus enrichit notre expérience, aide le concepteur à mieux comprendre le terrain. Par conséquent, il est essentiel d'organiser nos travaux sur les objectifs recherchés, puis de les structurer en données exploitables.

3.3.2.2 Élaboration d'une carte des points débordants

Les systèmes d'informations géographiques (SIG) jouent un rôle important dans la communication et l'analyse des données spatiales, accélérant ainsi le taux d'échange et augmentant les relations et

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

les interactions entre les lieux, permettant aux données géographiques et aux connaissances de croître.

Trop souvent, l'absence d'outils et de supports appropriés (cartes numériques ou papier) en cas de situation d'urgence ne permet pas aux gestionnaires du réseau pluvial d'obtenir rapidement les informations nécessaires. Dans certaines villes, les gestionnaires communiquent verbalement les informations aux différents agents, en se concentrant sur les points les plus critiques.

La localisation des points débordants fait référence à l'identification précise des zones où les réseaux pluviaux dépassent leur capacité et entraînent des débordements. Des équipes sur le terrain inspectent ces zones pendant et après les épisodes pluvieux pour repérer les points de débordement. Les informations proviennent également des interventions suite à des plaintes, des relevés de désordres par inspections visuelles, des données obtenues lors des opérations de curage et des données relatives à la vulnérabilité de l'environnement, des milieux récepteurs et du milieu urbain. Ces points sont généralement des sections de cours d'eau, des ouvrages traversant des routes ou des structures composant le réseau souterrain, où l'eau de pluie déborde et s'accumule rapidement, provoquant des inondations locales et des dommages potentiels en milieu urbain.

La conception de ces cartes doit assurer le passage pertinent des données brutes à l'information sur les points d'inondations, tout ça par un traitement statistique appropriée et une communication efficace de cette information grâce à un bon usage du langage graphique. L'opportunité de cartographier des débordements passés est de fournir des cartes comprends les éléments nécessaires pour mieux cibler précisément les zones problématiques, facilitant ainsi la mise en œuvre de solutions adaptées pour prévenir les inondations et les dégâts associé.

3.3.2.3 Délimitation des zones d'inondations

De manière générale, le domaine de la recherche cartographique englobe les aspects naturels et anthropiques de notre environnement. Ce secteur est en pleine expansion, stimulé par des besoins croissants et des avancées technologiques. La cartographie des zones d'inondation est un outil essentiel pour les spécialistes de la gestion des eaux pluviales urbaines.

La cartographie, en raison de ses opportunités de fournir des éléments de réponse, d'échanger des contacts et des informations, suscite un intérêt qui dépasse souvent les capacités individuelles. Par conséquent, sa conception nécessite une collaboration et une coordination efficaces entre différents experts et parties prenantes. L'élaboration de cartes des zones touchées est un processus complexe qui nécessite une combinaison de collecte de données et de maîtrise des étapes de traitement des données ainsi que du langage graphique.

La délimitation des zones d'inondations consiste à identifier et cartographier les régions touchées ou susceptibles d'être touchées lors d'événements pluvieux intenses ou de débordements de cours d'eau. Ces zones sont définies en fonction de divers facteurs tels que la pente du terrain (la plaine, l'entonnement après forte pente), les historiques d'inondation, et le dysfonctionnement du réseau pluvial. Différents outils, techniques et opérations, à savoir les outils informatique les relevés sur

le terrain, la modélisation des terrains et les différents témoins d'inondation (images, photos et vidéos) peuvent être mis à l'avantage pour cartographier l'étendue d'une inondation lorsqu'elle est produite.

Enfin, la cartographie est l'une des bases principales pour le développement d'une stratégie de gestion des risques d'inondation à travers le monde. Elle permet de matérialiser et de rendre visibles les objets et informations cachés. Étant une technique évoluée, les représentations cartographiques sont particulièrement efficaces et permettent une lecture claire et concise des messages globaux.

3.3.3 Contraintes d'élaborations des cartes des inondations pluviales – Cas de Bejaia

La création d'une cartographie nécessite un moyen de comparer plusieurs cartes d'état des lieux, les limites des terrains et les positions des ouvrages, etc. La contrainte d'élaboration des cartes dépend du travail mené sur la collecte des données disponibles. De manière générale, les inondations pluviales sont incontrôlables en milieu urbain. Ce qui facilite le travail avec de très grandes quantités de données et sur des durées limitées, c'est la disponibilité et la qualité de ces données.

3.3.3.1 Manque d'information

L'une des principales difficultés rencontrées lors de la préparation d'une carte des points noirs et des zones d'inondation est le manque d'informations complètes et précises. En générale, la recherche et le développement d'une méthodologie est une pratique qui se base sur l'utilisation de certaines données réelles ou de documents peut être une action unique effectuée à temps pour obtenir l'information ou le document nécessaire à ce moment-là.

Dans notre cas, l'élaboration de cartes d'inondations pluviales est confrontée à plusieurs défis liés au manque d'information :

- **Données historiques incomplètes** : Les enregistrements des événements d'inondation passés sont souvent limités ou absents, rendant difficile l'identification des zones à risque.
- **Qualité des données** : Les informations disponibles peuvent être variées en qualité, incomplètes ou obsolètes, affectant la compréhension des infrastructures de drainage et des modifications paysagères.
- **Manque de coordination** : L'absence de collaboration entre agences et départements rend la collecte de données complexe, entraînant des informations fragmentées et incompatibles.
- **Données géo-spatiales limitées** : L'absence de cartes détaillées et de données géo-spatiales précises complique la modélisation des débordements d'eau.

- **Informations sur les réseaux de drainage** : Les données sur les systèmes de drainage, leur capacité et leur état sont souvent insuffisantes dans plusieurs zones, ce qui est important pour évaluer le risque d'inondation.
- **Données climatiques et météorologiques** : Les prévisions et données historiques sur les précipitations sont souvent imprécises ou insuffisantes, rendant difficile la prévision des événements pluviaux extrêmes.

L'élaboration des cartes d'inondations est un processus à long terme qui nécessite une planification, une mise à jour et une correction. Le manque d'informations complique la distinction entre les différentes données. Par exemple, en cas de débordement en ville, un même rapport peut avoir des significations variées selon les gestionnaires, et même pour un même agent, son interprétation peut évoluer.

3.3.3.2 Informations brute difficilement exploitable

Les données ne deviennent véritablement utiles que lorsqu'elles sont converties en informations exploitables. Malheureusement, il est rare de pouvoir transformer rapidement les données disponibles en informations directement utilisables et de créer ainsi une véritable plus-value. Dans la quête d'informations, les chercheurs évaluent les documents disponibles. Certains documents peuvent être intéressants mais trop anciens, d'autres sont complets mais trop complexes, tandis que d'autres encore sont bien écrits et documentés, mais trop courts ou trop simples. Certains documents peuvent être facilement imprimables mais manquent de profondeur, tandis que d'autres peuvent être captivants parce qu'ils contiennent des interviews, etc. Cette diversité dans les types et la qualité des documents pose des défis dans la transformation des données brutes en informations précieuses et exploitables.

Le moyen de stocker des informations et le système d'exploitation des données géographiques ne résolvent pas les problèmes des eaux pluviales ni ne réduisent le nombre de débordements. Il est vrai que le système d'information est devenu un enjeu important dans la société moderne, permettant de faire progresser le développement et d'améliorer la technologie en fonction des besoins des utilisateurs. Cependant, pour créer ce système, il est nécessaire de collaborer d'abord avec les cartographes, les agents sur le terrain, les riverains et les habitants de la ville pour mener des enquêtes. Cela nécessite la mise en œuvre d'une programmation basée sur une analyse globale des risques d'inondations, afin de développer un système d'information et d'établir une nouvelle cartographie des débordements passés.

Une fois une enquête est menée et la consultation de rapport diagnostic faite ou à réaliser, les chercheurs ont un rôle à jouer dans ce domaine. En effet, on manque d'outils et de méthodes pour initier des conceptions entre les parties prenantes et relever les défis de l'analyse des situations et de l'élaboration de projets communs à travers des perspectives différentes. Pour cette raison, nous

proposons dans cette recherche une méthodologie applicable, d'analyse et d'aide pour la gestion de problèmes à travers l'inondation passée et des débordement enregistrés.

3.4 Analyse multicritère – Échelle et critères d'évaluation

Dans cette étape d'élaboration de la méthodologie à appliquer, nous exposerons l'essentiel de notre travail de recherche. L'objectif de l'analyse des débordements du RAP a pour but d'évaluer l'impact et l'influence des paramètres caractérisant un débordement donné sur une surface touchée. En général, on utilise les critères de jugement principaux liés aux débordements pour mettre en évidence l'efficacité du traitement du problème d'inondation causé par les débordements du RAP.

Chercher à associer à chaque débordement une importance est une mission qui nécessite sans doute de fixer une échelle de variation des critères, ensuite de faire appel à l'une des méthodes d'aide à la décision (**Tableau 2-1**).

3.4.1 Établissement d'une typologie des débordements

Il nous semble nécessaire d'établir une typologie afin de regrouper (ou classer) les points noirs par « familles » ou « Types » de débordements. Le « débordement pluvial » - qui apparaît en périodes de pluie - prend naissance sur des périmètres drainés où le RAP est soit défectueux (encrassement, sous-dimensionnement, ...) soit dépassé par l'ampleur de l'évènement pluvieux en cause (très fort orage, forte imperméabilisation, ...). Les diverses activités indésirables de la population du BV (industrielles, de gestion communales, de circulation, des habitants ...) aggravent l'apparition des débordements et augmentent le nombre de points débordés. En effet, l'eau de pluie se charge de diverses matières au contact de l'air et du sol (rejets de pollution industrie, particules provenant de la circulation automobile, accumulation de déchets due aux activités des usagers ...) puis, en ruisselant, les matières déposées (huiles de vidange, carburants, résidus de pneus et métaux lourds, cartons ...) sur les surfaces du BV (les toits, les terrasses, les trottoirs, les chaussées, etc.) sont transportées par les eaux pluviales vers les ouvrages de collecte et le réseau. Ce qui génère fortement l'obstruction des ouvrages du réseau (phénomène très courant dans le système de la ville de Bejaia). D'autant plus que l'entretien et le nettoyage des rues est absent ou très insuffisant.

Une typologie est finalement proposée (**Figure 3-3**) à partir de ce travail d'inventaire, définie à partir des données recueillies sur le RAP de Bejaia, caractérisée par deux formes différentes. À chaque niveau du réseau où l'écoulement est présent, les débordements sont localisés dans les parties ouvertes ou fermées, ou au niveau des nœuds d'échange des tronçons ouverts

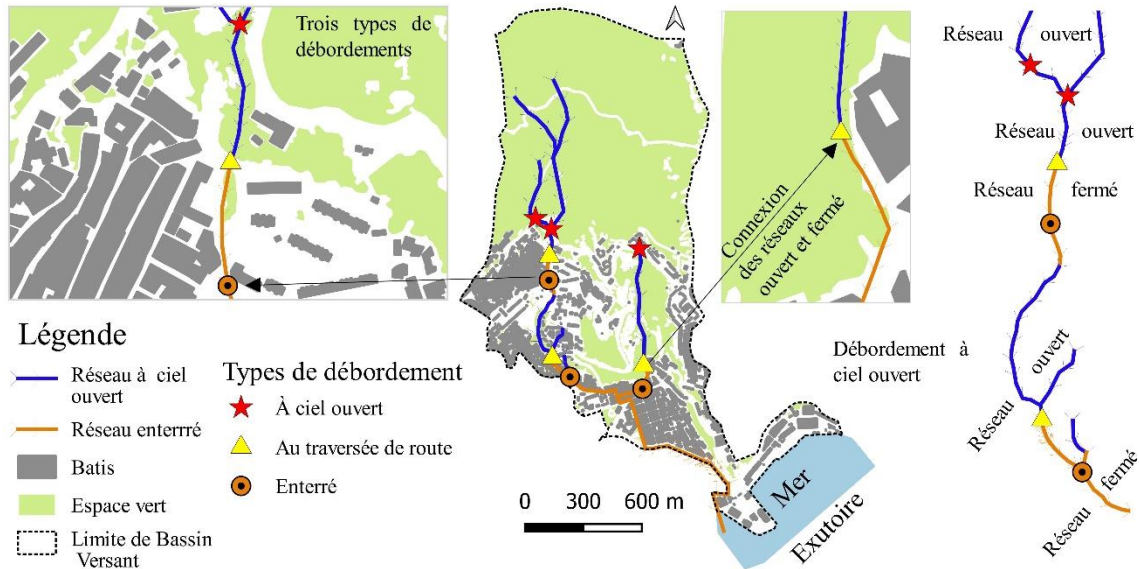


Figure 3-3 : Typologie des débordements

3.4.1.1 Débordement de réseau à ciel ouvert

Durant ce phénomène (Débordement pluvial), l'eau transportée augmente progressivement ou brusquement jusqu'au moment où les EP débordent du RAP ouvert. La différence de position entre le niveau d'eau d'écoulement dans le canal et la hauteur de la section ouverte de ce dernier peut entraîner une inondation à la surface avoisinante. Généralement, à l'endroit du plan d'eau où se situe la perturbation d'écoulement, une surélévation de la hauteur d'eau se produit. Une fois que le niveau dépasse la capacité maximale de la section d'écoulement (la mise en charge), le surplus d'eau déborde et se déplace dans d'autres directions selon la topographie du terrain touché.

3.4.1.2 Débordement de réseau enterré

Il s'agit des cas où les débits générés dépassent la capacité des conduites enterrées. Contrairement au cas précédent, le surplus d'eau peut être amorti et stocké temporairement dans le réseau, et les regards et avaloirs proches. Dans des parties des réseaux enterrés, l'écoulement qui passe à un régime en charge jusqu'au temps de saturation du stockage, déborde et provoque un débordement. La montée de la ligne piézométrique dans un réseau d'assainissement peut être due à plusieurs raisons : lorsque la pluie en cause excède la pluie de projet, en présence d'obstacles, insuffisance du diamètre et diminution de la pente à certains endroits ... etc.

En général, un système de drainage est conçu pour acheminer les débits de ruissellement générés par des pluies de période de retour prescrite par la réglementation et/ou le cahier des charges. Souvent prise égale à dix ans, elle est assimilée approximativement à celle des débits de ruissellement générés dans les différents nœuds du réseau enterré.

3.4.1.3 Débordement mixte ou « en traversée »

C'est le cas où la capacité hydraulique à l'entrée du réseau enterré est insuffisante à transporter le débit évacué. Le passage de l'écoulement à ciel ouvert vers l'écoulement dans un réseau fermé s'accompagne de plusieurs variations d'hauteur d'eau et de pression. Il en résulte des débordements fréquents en ces points critiques. Par exemple, cas de traversée de route, si la capacité d'évacuation est insuffisante, c'est à dire ne peut assurer une évacuation appropriée des effluents supérieure à celle de la canalisation amont, dans cette situation où régime est en charge, des changements de forme de section d'écoulement ouverte/fermée qui se manifestent, ensuite provoque des débordements.

3.4.2 Les composantes principales du point débordant

Ouvrir des pistes de recherche dans le domaine en explorant les relations « Apport du bassin - Débordement - Effet d'inondation » dans un contexte spécifique permet de découvrir de nouveaux éléments. Pour ce faire, nous élargissons l'approche mono-composante afin de prendre en compte les facteurs susceptibles d'influencer l'apport du débordement et ses effets. Les résultats de cette étude mettent en lumière les types de débordements, les points critiques du débordement, ainsi que les critères d'impact et d'influence.

Pour ce travail, l'idée directrice de la méthodologie visant à gérer les problèmes de débordements pluviaux est d'identifier les points de débordement prioritaires nécessitant des interventions ou des éliminations. À cet égard, il est essentiel de présenter un point d'inondation en tenant compte de toutes les composantes principales cruciales pour l'évaluation globale des débordements.

Les trois principales composantes du débordement pluvial en milieu urbain sont le «bassin versant», l'« ouvrage débordant » et la « surface inondée ». (**Figure 3-4**).

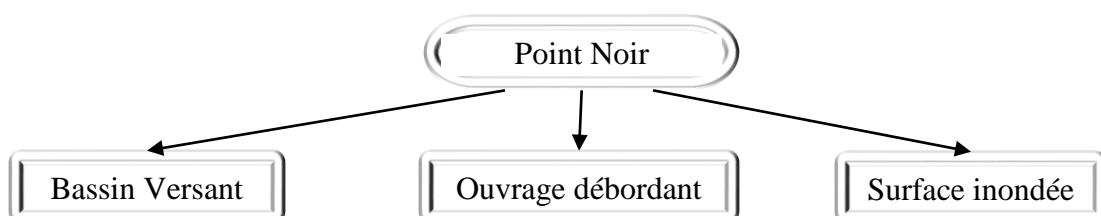


Figure 3-4 : Composantes principales d'un point noir

Ainsi, nous pensons qu'il est nécessaire de renseigner et de connaître les caractéristiques de ces principales composantes pour construire un modèle d'évaluation fiable et représentatif du débordement localisé dans un milieu urbain.

3.4.2.1 Bassin versant

Nous allons considérer, dans notre approche, les bassins versants amont des points débordants ainsi que leurs caractéristiques identifiées lors des consultations des ouvrages et travaux menés pour élaborer la cartographie des débordements passés. Nous avons vu dans la partie précédente qu'un débordement dépend essentiellement du bassin versant amont qui correspond à l'ensemble des surfaces drainées générant le ruissellement vers ce point noir. Les terrains situés en amont d'un point débordant varient, ce qui signifie que l'échelle du bassin n'est pas uniforme, mais spécifique à chaque point de débordement. Cela montre également, à partir de la première enquête de terrain, que les agents intervenant (de l'ONA) sur un site d'inondation ne se sont pas interrogés sur la classification des plus grands bassins versants (en termes de taille par exemple), ou sur celles des débordements. Parfois, même si cela était le cas, ces approches peuvent ne pas avoir le même sens pour eux que pour un spécialiste du domaine. Pour l'exploitant, la vision du débordement est guidée par des choix économiques, ou par la perception du phénomène d'une manière globale. Pour nous, la vision est guidée dans un premier temps par la caractérisation du bassin versant amont du point débordant, puis par les deux autres composantes vues précédemment et développées ci-dessous (ouvrage débordant et surface inondée).

3.4.2.2 Ouvrage débordant

C'est l'échelle de description la plus fine des dysfonctionnements et des défauts au PN. En principe, le drainage des eaux pluviales est une démarche visant à améliorer la situation globale de l'environnement dans ses différents composants. Il existe plusieurs situations d'inondation. Pour les distinguer, les causes d'inondations sont analysées et utilisées dans la définition des indicateurs physiques de fonctionnement correspondant à chacun de ces ouvrages et en intégrant certains paramètres appréciables et établis dans la majorité des cas de débordements pluviaux (Voir §3.4.3.3).

3.4.2.3 Surface inondée

La prise en compte du périmètre touché par l'inondation dans notre approche est essentielle et est justifiée par le fait que le débordement n'est pas uniquement une représentation par deux composantes, bassin versant et l'ouvrage débordant, mais, dépend aussi d'autres facteurs traduisant la perception des intervenants. L'aide à la gestion des points noirs en milieu urbain ne peut pas être de meilleure qualité pour aider à évaluer l'importance des débordements si les inondations ne peuvent pas être caractérisées en fonction de leurs impacts. S'il y a une différence, nous recherchons des critères d'évaluation et les besoins qui nous aideront à juger le dégât du débordement, d'aider les experts à spécifier les PN qui ont une priorité.

Après la construction du système de débordement sous différentes composantes, l'approche multi-composantes mettent en lumière le cheminement à suivre pour construire des familles de critères.

3.4.3 Construction de critères de jugement

La construction des critères de jugement est une étape très importante dans toute approche de gestion et de programmation d'interventions. Dans cette étape de l'analyse, notre méthodologie propose une méthode d'élaboration et de sélection des critères de jugement simple et suffisamment rapide à appliquer aux types de débordements pluviaux et pouvoir facile à être mise en application par les gestionnaires de réseau d'assainissement.

3.4.3.1 Cadre de la décision

Une bonne définition des critères dépend du cadre de la décision, de l'objectif et des résultats attendus. L'objectif n'est pas seulement de créer un classement réaliste, mais également de fournir des supports d'aide contenant des éléments de réponse aux questions fréquemment posées par les gestionnaires impliqués dans le processus de décision. Ces supports doivent être conçus pour répondre aux besoins spécifiques de ces gestionnaires, en leur offrant des informations appropriées et précises pour les aider à prendre des décisions objectives et éclairées.

La construction d'un système de critères de décision doit favoriser la mise en place de nouvelles méthodes de gestion des points noirs en milieu urbain, tout en cherchant à améliorer et optimiser les infrastructures existantes. Cette procédure peut être affinée grâce à une quantité d'informations obtenues ou produites à travers différentes missions, ainsi qu'à des données de base décrivant le réseau global et les débordements, point par point. Ces informations sont essentielles pour identifier précisément les zones problématiques et planifier des interventions efficaces.

La construction d'un paramètre nous invite à préciser les points suivants :

- Pour éclairer la gestion des points noirs, on doit s'intéresser aux conséquences de chaque débordement.
- La construction des paramètres de caractérisation d'un point débordant répond à plusieurs objectifs précis, et peut nous aider à garantir un niveau de service satisfaisant.
- L'approche consiste à rechercher des paramètres qui, sur un débordement de réseau d'assainissement, maximisent les effets d'une inondation pluviale. Donc, un critère retenu est utilisé pour exprimer les évaluations d'une intervention sur différents débordements à l'aide d'un indice d'importance.
- L'approche est considérée dans son ensemble ; les aspects structurels du réseau assainissement, fonctionnels et environnementaux, sont étudiés à l'échelle d'une partie du système, d'un bassin versant et du périmètre touché par l'inondation.
- Les critères à proposer dans ce travail concernent essentiellement les problèmes des débordements. Il s'agit, d'une part, de contribuer à des paramètres d'influence, et, d'autre part, à des critères d'impact.

- La différence entre critères d'influences et critères d'impacts tient essentiellement aux paramètres utilisés en entrée : taille, forme du bassin et/ou indicateur de dysfonctionnement d'ouvrage (pour l'influence), observations des dégâts (pour l'impact).
- La construction de critères de décision peut varier considérablement en fonction de l'influence des paramètres (qu'ils soient quantitatifs ou qualitatifs) dans un espace géographique spécifique (comme le Nord ou le Haut-Plateau). Leur choix n'est pas toujours simple ou complexe, mais il reste essentiel pour classer les points noirs selon leur importance dans le cadre de l'étude.
- En général, ces critères sont définis par la caractérisation des composantes d'un point débordant, et la construction des listes de critères commence à partir de la caractérisation de ces facteurs naturels intervenant dans le processus de l'écoulement des eaux pluviales.
- Aussi, les débordements sont les conséquences de défauts de fonctionnement des ouvrages d'assainissement, donc l'observation (le relevé d'informations) peut être techniquement difficile.
- La présentation se propose de rappeler les principaux éléments structurants du bassin versant associé au point noir. Des critères plus influents dans l'appréciation des débordements et aident à l'évaluation d'importance d'un bassin versant de chaque PN suivant l'impact causé.

À cette étape, il est nécessaire de structurer notre approche autour d'un ensemble de critères afin de porter un jugement juste. Cette démarche repose sur un ensemble de paramètres quantitatifs/qualitatifs essentiels pour comprendre l'influence de l'apport du bassin versant sur un débordement pluvial et l'impact de ce dernier sur le milieu récepteur.

3.4.3.2 Établissement de deux familles de critères « Influence /Impacts »

À cette étape, il est nécessaire de structurer notre approche autour d'un ensemble de critères afin de porter un jugement juste. Cette démarche repose sur un ensemble de paramètres quantitatifs essentiels pour comprendre l'influence de l'apport du bassin versant sur un débordement pluvial et l'impact de ce dernier sur le milieu récepteur. Cet intérêt est justifié par l'objectif principal de cette thèse, qui est de développer une méthodologie d'évaluation représentant cette perception, afin d'évaluer les interventions effectuées par les gestionnaires du point de vue de la protection et de la sécurité des usagers et des biens.

Les deux familles de critères, "Influence" et "Impacts", sont définies comme suit

d. Critères d'influence

C'est une série de facteurs aggravant (ou non) un débordement, caractérisant le bassin versant en cause et l'ouvrage débordé. Les facteurs aggravants correspondent aux différents paramètres morphologiques et hydrologiques – à influence directe sur le ruissellement - calculés sur les bassins versants étudiés : surface, pente moyenne, allongement du bassin versant, temps de concentration

et coefficient d'imperméabilisation. Après présentation des principaux éléments structurants à l'échelle du bassin versant, différents critères sont ensuite mis à jour, et la pertinence d'une cartographie des BV « sensibles » est commentée selon la lacune observée (Cause du débordement), le tronçon amont et la jonction au niveau du PN.

e. Critères d'impacts

Ils visent à mesurer les effets attribuables à une inondation. Cette démarche de caractérisation des critères d'impact s'inspire de celle qui se pratique dans l'étude des risques d'inondation. Des paramètres, tels que la surface touchée, la hauteur d'inondation, l'aléa et la vulnérabilité, ont été définis. Chaque étude pourra donc définir ces critères d'impacts selon ses objectifs. Pour notre cas, quatre critères sont retenus (Voir §3.4.4).

Pour l'étude de cas, l'établissement de deux familles de critères, "Influence" et "Impacts", vise à structurer efficacement l'évaluation en distinguant les facteurs qui influencent réellement le débordement pluvial et en tenant compte des conséquences directes de celui-ci sur l'environnement urbain.

3.4.3.3 Élaboration des critères de jugement

Afin de pouvoir suivre les étapes menées pour la construction des critères, nous allons voir dans la **Figure 3-5** le cheminement suivi pour la construction de critères, et indiquer certaines caractéristiques que doit posséder une telle présentation du débordement.

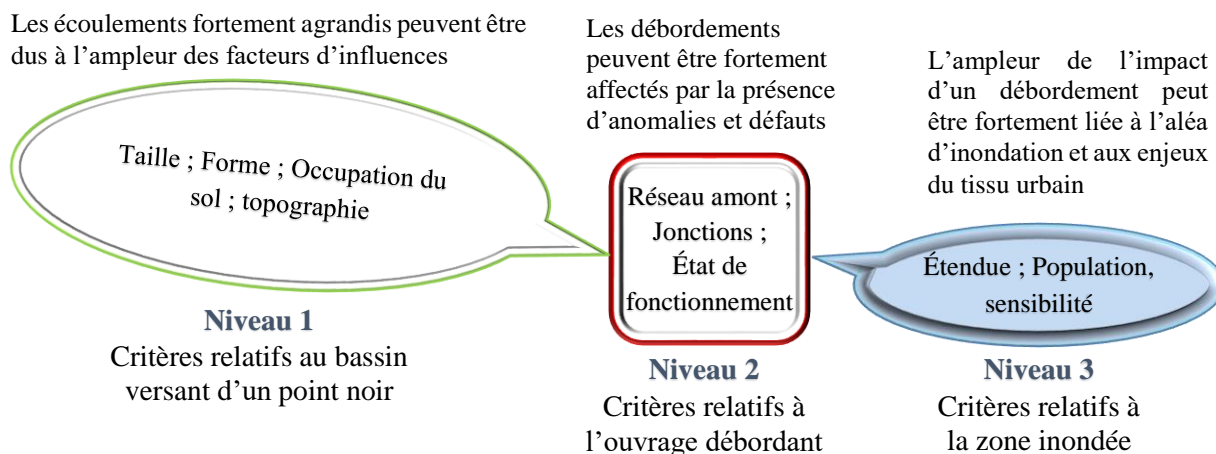


Figure 3-5 : Les niveaux de sélection des critères de jugement

Dans l'ensemble, pour chaque composante du point débordant, on élabore une famille de critères principaux et il est toujours possible de définir un sous-groupe de critères secondaires. Les critères relatifs aux débordements d'un RAP peuvent être caractérisés à trois niveaux :

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

- au niveau du bassin versant (Niveau 1),
- au niveau du fonctionnement du réseau pluvial (Niveau 2), et
- au niveau du milieu à risque d'être inondé (Niveau 3).

Aussi, un critère peut présenter la relation entre différents indices obtenus après identification de certains paramètres. Ces derniers pouvant être recherchés après la combinaison de deux ou plusieurs critères différents. Nous présenterons dans la partie suivante les différents niveaux de construction de critères.

a. Critères relatifs au bassin versant d'un point noir

Évaluer le comportement des points noirs vis-à-vis de leur contribution à l'hydrologie du bassin est une mission laborieuse. Ainsi, la description précise des bassins versants urbains en cause des débordements pluviaux est une problématique de la communauté scientifique qui tente toujours de déduire les paramètres les plus influents.

Habituellement, la démarche classique permettant de caractériser les bassins versant du point de vue hydrologique, consiste à définir :

Des paramètres critères morphométriques : la taille et la forme constituent les critères standards essentiels à la définition des BVs. Les paramètres permettant de caractériser morphologiquement les différents BVs sont :

- La surface du bassin versant qui décrit la taille de la zone qui contribue au ruissellement et donc aux débordements pluviaux.
- Les chemins d'écoulement qui décrivent la direction et les parcours que prend l'eau de ruissellement pendant une période de pluie.
- La pente du terrain qui décrit l'inclinaison du sol, des chemins d'écoulement précisément, qui affecte la vitesse d'écoulement des eaux pluviales
- La topographie du bassin versant qui décrit le relief du terrain influençant la direction (le sens) et la concentration des écoulements.
- Nature du sol qui décrit la capacité de contribution du sol aux écoulements (inversement, sa capacité d'infiltration et de rétention des écoulements) et son influence sur le ruissellement
- Imperméabilité du sol qui décrit le degré de présence de revêtements imperméables (ou de sols non perméable) augmentant ainsi le ruissellement.

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est influencé par les caractéristiques mentionnées précédemment, et l'écoulement des eaux pluviales peut être affecté par d'autres paramètres composés qui influent sur la réponse hydrologique, surtout lors de périodes de pluie intense.

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

De plus, les paramètres individuels spécifiques aux bassins versants peuvent être regroupés en un ou plusieurs critères pour permettre une analyse distinguant différents débordements importants. Par exemple, la surface du bassin versant, les chemins d'écoulement les plus longs, la pente du terrain, la topographie du bassin versant, la nature et l'imperméabilité du sol permettent de prendre en compte le temps nécessaire à l'eau ruisselant sur les surfaces du bassin versant pour atteindre l'ouvrage débordant.

L'influence de la taille spatiale du bassin versant et d'autres critères morphométriques sensibles permet de localiser tous les bassins morphométriquement « sensibles » aux crues rapides. En outre, les paramètres permettant de différencier les différents bassins versants sont :

- La surface du bassin versant, l'indice de compacité K_c de Gravelius, l'indice de forme d'Horton, ..., etc., décrivent à la fois la forme des bassins versants.
- Longueur du drain principal, utilisé pour la recherche de relation entre la forme et le réseau hydrographique
- Indice d'allongement et d'étalement pour donner un degré d'allongement du bassin.
- Écarts-types des pentes, dénivelée ou différence des altitudes pour mesurer le degré d'encaissement au sein des bassins

Les critères relatifs au bassin versant d'un point noir sont nombreux et variés, chacun jouant un rôle décisif dans l'analyse et la gestion des problèmes liés aux débordements pluviaux. Ces critères interagissent de manière complexe pour déterminer la réponse hydrologique d'un bassin versant face aux événements pluvieux, nécessitant une analyse intégrée pour comprendre et gérer efficacement les points noirs de débordement.

b. Critères relatifs à l'ouvrage débordant

Le deuxième niveau comprend les parties du réseau d'assainissement débordantes, parties à ciel ouvert, d'autres à la traversée de route et parties enterrées. Pour chercher des critères relatifs à l'ouvrage débordant, le travail demande au préalable que les parties principales de ce réseau d'assainissement soient présentés, et la spécification de l'état structural du réseau, devrait être connue et mise à jour.

Comme nous l'avons rappelé au chapitre 1, le processus de transformation pluie-débit peut être discontinu dans plusieurs sections de l'écoulement des eaux pluviales en ville. Le phénomène de propagation de la crue dans le réseau à l'amont du point débordant, ramène parfois des quantités d'eau à l'entrée supérieure à la quantité sortante de l'ouvrage. Ainsi, un état structural défaillant peut diminuer la capacité d'écoulement du réseau. D'ailleurs, dans la plupart des cas, l'augmentation du nombre de débordements pluviaux en milieu urbain est sans doute plus liée à la demande de grandes sections d'écoulement croissante des ouvrages d'assainissements qu'à une augmentation d'entretien du réseau. Mais, il reste toujours que la cause du débordement en ville est différente d'un point noir à un autre, donc il est important de prendre en considération cette diversité dans le

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

problème de la gestion des points noirs, ceci par l'intégration des critères à ce niveau de telle sorte à ce que les causes d'inondations regroupent tous les débordements du site.

Les paramètres qui peuvent être utilisés comme moyen de construction de groupes de points noirs, et la recherche d'influence d'un ouvrage dans l'origine des débordements sont :

- Type de réseau, système séparatif ou unitaire ou système à ciel ouvert ou fermé (Section d'écoulement).
- Caractéristiques physique, capacité, tracé, profondeur, pente, diamètre, etc.
- Fonctionnement du réseau d'assainissement, s'intéressant à l'influence du fonctionnement du système d'assainissement dans l'origine des déclenchements des débordements, peut se rédiger essentiellement dans la recherche d'une meilleure connaissance de la formation de l'insuffisance d'évacuation.
- Défauts structurant
- Défauts de conception, jonctions, tronçon amont et aval, branchements ouvrage d'interception, largeur et longueur de rues et ruelles et trottoirs, etc.
- Gestion et entretien, dispositif d'engouffrement et bouches d'égouts, etc.
- Facture entropique et humain, densité population, influence humaine sur le régime des crues, cheminements de l'eau naturels influencés, etc.

Dans ce contexte, il est pertinent de s'intéresser aux influences humaines sur la gravité des débordements. Ces influences humaines sur la survenue des débordements ne datent pas d'hier. En général, ces paramètres dépendent de plusieurs facteurs, notamment des modifications apportées aux réseau pluvial urbain.

c. Indicateurs décrivant le milieu urbain inondé

Les ruissellement violent peuvent y expliquer l'apparition de débordements grands et parfois catastrophiques. La perception des impacts du débordement est reliée à un certain nombre de paramètres caractérisant un milieu urbain.

Pour décrire et analyser les milieux urbains inondés, plusieurs indicateurs sont utilisés. Voici une liste des principaux indicateurs :

- Hauteur d'eau : La mesure de la profondeur de l'eau à divers endroits inondés permet d'évaluer la gravité de l'inondation.
- Surface inondée : L'étendue de la zone affectée par l'inondation est un indicateur clé pour comprendre l'ampleur de l'événement.
- Durée de l'inondation : Le temps pendant lequel une zone reste inondée influence les dégâts potentiels et les coûts de réparation.
- Population affectée : Le nombre de personnes touchées par l'inondation est crucial pour évaluer l'impact social et économique.

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

- Dommages aux infrastructures : L'étendue des dommages causés aux bâtiments, routes, ponts, et autres infrastructures publiques.
- Interruption des services : La durée et l'ampleur des interruptions des services essentiels comme l'électricité, l'eau potable, les transports et les communications.
- Déplacements forcés : Le nombre de personnes déplacées temporairement ou de manière permanente en raison de l'inondation.
- Impacts économiques : Les coûts directs et indirects associés aux inondations, y compris les réparations, les pertes de revenus et les effets sur l'emploi.
- État de l'environnement : La qualité de l'eau après l'inondation, la contamination des sols, et les impacts sur la faune et la flore.
- Résilience communautaire : La capacité des communautés à se rétablir après une inondation, incluant les infrastructures de protection et les plans de gestion des risques.

Ces indicateurs permettent aux urbanistes, gestionnaires de l'environnement et décideurs politiques de mieux comprendre et gérer les risques d'inondation, et d'améliorer la gestion des problèmes du réseau pluvial urbain face à de tels événements « inondation ».

3.4.4 Critères retenus pour la caractérisation des PN

Pour caractériser les points d'inondation dans un milieu urbain, il est essentiel d'identifier et de retenir plusieurs critères qui influencent la gravité et la fréquence des inondations pluviales.

Il est important de noter que le critère d'influence, dans ce contexte, diffère du critère d'impact. Les impacts sont mesurés à travers l'évaluation des effets causés par une inondation et peuvent être observés à l'intérieur de la zone affectée. En revanche, l'influence se réfère spécifiquement à l'accélération de la production de débits importants et aux défauts du système qui facilitent l'apparition d'un débordement

Voici une liste des principaux critères à considérer illustrée dans la **Figure 3-6** :

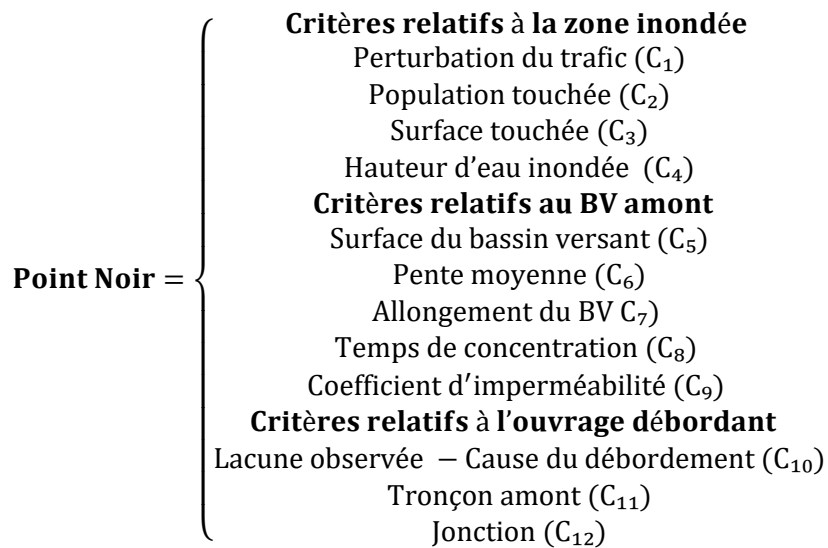


Figure 3-6 : Vecteur « Critères retenus » pour la caractérisation des PN

Douze critères (Figure 3.6 et Tableau 3.1) ont été retenus pour faciliter une analyse précise et efficace. Ces critères servent de paramètres ou d'indicateurs permettant de mesurer, évaluer et comparer les caractéristiques et les conditions des divers points du réseau pluvial urbain. Voici comment ces critères ont été définis et pris en compte.

3.4.4.1 Critères relatifs à la zone inondée

3.4.4.1.1 Perturbation du trafic (C₁)

L'urbanisation croissante et l'expansion des réseaux routiers ont été une réponse à l'augmentation des besoins en déplacement, mais ont également exposé les usagers aux risques d'inondation.

La prise en compte des difficultés de déplacement sur certains secteurs urbains varie en fonction des événements comme les travaux routiers, les accidents ou les conditions météorologiques. Le critère "Perturbation de la circulation" est déterminant dans l'évaluation de l'impact des inondations sur la facilité et la sécurité du trafic routier. Cela implique l'analyse des conséquences des inondations sur les routes principales, les parcours de contournement, les services d'urgence, ainsi que sur la mobilité des résidents et les activités économiques locales.

Ce critère revêt une importance particulière dans les zones urbaines où la circulation automobile est dense, mais son impact est moindre sur les voies moins fréquentées.

3.4.4.1.2 Sensibilité de la zone touchée (C₂)

Évaluation de la vulnérabilité et de la réactivité d'une zone particulière face à des événements pluvieux, incluant sa capacité à être affectée et la gravité potentielle des conséquences. L'intérêt du critère "Sensibilité de la zone inondée" réside dans sa capacité à évaluer à quel point une zone est

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

vulnérable aux inondations et à anticiper les conséquences potentielles en fonction de cette sensibilité. Cela permet de prioriser les mesures d'atténuation des risques et de planifier les interventions d'urgence de manière plus efficace, en se concentrant sur les zones les plus susceptibles d'être sévèrement affectées.

La présence d'eaux pluviales entraîne des obstructions qui augmentent la vulnérabilité des zones touchées, définie ici comme la susceptibilité des activités, des populations et des biens aux inondations. La sensibilité de la zone inondée est influencée par la densité urbaine et révèle les fragilités structurelles, organisationnelles et démographiques.

La fragilité et la sensibilité des enjeux, tels que la capacité physique des individus, le temps de réaction, la couverture d'assurance, ainsi que les ressources financières disponibles pour les réparations, posent des défis considérables pour leur prise en charge.

3.4.4.1.3 Surface inondée (C₃)

L'intérêt du critère "Surface inondée" réside dans sa capacité à quantifier avec précision l'étendue spatiale des zones touchées par les inondations. Cette évaluation permet de comprendre l'ampleur des dommages potentiels, de planifier les interventions d'urgence, de prioriser les mesures de prévention et de contribuer à minimiser les pertes en vies humaines. En résumé, ce critère prend en compte à la fois l'étendue des zones inondées et les conséquences qu'elles entraînent.

Le développement du critère "Surface inondée" inclut plusieurs aspects clés. Il implique la quantification précise de l'étendue des zones touchées à travers la cartographie des zones inondées et la mesure des superficies concernées. Il comprend également l'analyse des impacts en fonction de la surface affectée, l'identification des zones à risque élevé et la sensibilisation des populations locales aux risques d'inondation.

3.4.4.1.4 Hauteur d'eau inondée (C₄)

La hauteur d'eau inondée se réfère au niveau au sol ou à la différence entre la cote d'eau inondée et la celle du sol. Les données de hauteur d'eau dans les zones inondées sont essentielles pour évaluer l'impact des débordements. Cette évaluation permet d'estimer la vulnérabilité des zones touchées et l'ampleur des inondations.

L'accumulation d'eau débordée crée des montées d'eau importantes en certains endroits, posant d'importants problèmes de gêne et de perturbation, en particulier dans les zones du réseau donc aval de la ville. Ce phénomène ne doit pas être sous-estimé car il augmente les risques d'inondation en cas de cumul rapide des crues. Les niveaux d'eau varient dans le temps en fonction de plusieurs facteurs comme les précipitations continues, le type de bassin versant, la pente du terrain et le temps de concentration du BV considéré. Ainsi, une montée rapide des eaux de pluie peut considérablement aggraver la situation.

Le degré de risque d'inondation varie selon les caractéristiques spécifiques de chaque site. Pour prévenir de telles situations, la hauteur de débordement est prise en compte.

La hauteur d'eau maximale correspond au pic atteint pendant le ruissellement, le débit maximal de crue ou le débit de pointe. La trace de ce pic d'inondation donne une indication sur le degré d'exposition d'un site. Par exemple, une maison dans une zone menacée par les inondations présente un risque différent de celle située dans une zone à faible exposition. L'impact augmente proportionnellement avec d'autres facteurs tels que l'apport du bassin versant la vitesse d'écoulement des eaux débordées.

3.4.4.2 Critères relatifs au BV amont

3.4.4.2.1 Surface (A) du Bassin Versant amont du point débordant (C₅)

La surface du bassin versant désigne l'aire totale, en kilomètres carrés ou en hectares, qui collecte et draine les eaux de pluie vers le point d'inondation. Ce dernier peut être un regard, une traversée de route, etc., dont les eaux pluviales sont drainées vers un même point de débordement. Pour l'analyse hydrologique et la gestion des débordements du réseau pluvial, la prise en compte de la surface du BV amont du point débordant est essentiel car il influence directement la quantité d'eau pouvant potentiellement contribuer aux inondations.

Lors de la cartographie des zones inondables et des points noirs, la surface du bassin versant est définie pour chaque point noir. Cependant, l'évaluation de ces apports nécessite une bonne connaissance des bassins versants et des sous-bassins versants, unités élémentaires de production du ruissellement. La topographie et la nature des bassins versants à l'amont d'un secteur inondable sont des facteurs déterminants. Les bassins auront des temps de réponse d'autant plus courts, et donc des débits d'autant plus importants, que la pente moyenne de leur réseau d'écoulement sera plus accentuée. Une plus grande surface de bassin versant peut entraîner une plus grande collecte d'eau de pluie, augmentant ainsi le volume total d'eau à gérer par les infrastructures de drainage urbain. La taille du bassin versant influence la gravité et l'étendue des inondations. Une surface importante peut conduire à des inondations plus étendues, affectant de plus vastes zones urbaines.

Dans ce travail, en intégrant ce critère avec d'autres paramètres, les gestionnaires peuvent développer des stratégies efficaces pour éliminer les points les plus impactant.

3.4.4.2.2 Pente moyenne (C₆)

La pente moyenne du bassin versant se réfère à l'inclinaison moyenne du terrain sur toute la surface du bassin versant, exprimée généralement en pourcentage ou en degré. Ce critère est aussi important pour comprendre le comportement hydrologique du bassin versant, car il influence directement la vitesse à laquelle les eaux pluviales s'écoulent vers le point de débordement.

La pente moyenne du bassin versant est un critère fondamental dans la caractérisation des points d'inondations urbaines. Elle joue un rôle déterminant dans plusieurs aspects de la gestion des eaux pluviales urbaines. Pour la vitesse d'écoulement, une pente plus forte entraîne une vitesse d'écoulement plus rapide, ce qui peut augmenter la probabilité de débordements rapides et soudains. Concernant le volume de ruissellement, les bassins versants avec des pentes fortes

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

tendent à produire un ruissellement plus rapide et plus important, réduisant l'infiltration et augmentant les volumes d'eau de surface. Aussi pour le temps de concentration, la pente affecte le temps de concentration, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que l'eau de pluie s'écoule du point le plus éloigné du bassin versant jusqu'au point de sortie. Des pentes plus raides réduisent ce temps, ce qui peut entraîner des pics de débits plus élevés et plus rapides.

La pente moyenne du bassin versant influence directement la vitesse et le volume de l'eau de ruissellement, impactant ainsi la probabilité et la gravité des inondations. En intégrant ce critère dans les stratégies de gestion, les décideurs peuvent développer des solutions efficaces pour protéger les milieux exposés au risque d'inondation.

3.4.4.2.3 Allongement M du BV (C_7)

L'allongement du bassin versant décrit la forme et à la configuration géométrique du bassin versant vis-à-vis du chemin d'écoulement. Il est généralement mesuré par le rapport entre la longueur du bassin versant et la largeur moyenne (Caquot le définit par $M = L/\sqrt{A}$ où L est la longueur du parcours de l'eau et A la surface du BV) ou par des indices de forme tels que le coefficient de compacité qui décrit l'étroitesse du BV contrairement à M. Un bassin versant allongé et étroit est long, tandis qu'un bassin versant - dont le parcours de l'eau (le chemine d'écoulement) est court – est compact (ou ramassé).

Pour une pluie d'intensité et de durée identiques sur deux bassins ayant la même superficie et la même occupation de sol (donc même coefficient de ruissellement), les crues enregistrées à l'exutoire d'un bassin de forme ramassée seraient plus importantes que celles d'un bassin allongé. Des surfaces imperméables directement raccordées peuvent produire un volume de ruissellement plus important vers le point de débordement que des surfaces en série qui ne sont pas directement raccordées, car le temps de réponse hydrologique est plus lent. Toutefois, la forme relativement ramassée du bassin (M petit) est favorable à l'affluence rapide des eaux vers l'aval.

3.4.4.2.4 Temps de concentration t_c (C_8)

Le temps de concentration (t_c) est défini comme le temps nécessaire pour que l'eau de pluie ruisselle et arrive à l'exutoire du BV le long du plus long parcours de. Le temps de concentration est généralement exprimé en heures ou en minutes.

Le temps de concentration est essentiel pour déterminer les débits de crue. Une compréhension précise du t_c permet de calculer le débit de pointe. Celui-ci est important pour la conception des canalisations de drainage et de gestion des eaux pluviales. Les projets d'aménagement urbain peuvent modifier le temps de concentration en changeant la topographie et l'imperméabilisation des sols. Une évaluation de t_c permet d'approcher l'impact de ces projets sur les débits des eaux pluviales et de prendre des mesures pour atténuer les effets négatifs potentiels.

Cette durée dépend de la topographie, de l'état hydrique et de la capacité d'infiltration du sol, de la pluie antécédente, etc. La diminution du temps de concentration et l'augmentation du volume

ruisselé contribuent généralement ensemble à une hausse considérable des débits de pointe pour une période de retour donnée. Par contre l'augmentation de temps de concentration, généralement retarde la concentration rapide des eaux pluviales.

3.4.4.2.5 Coefficient d'imperméabilisation (C_9)

Le coefficient d'imperméabilisation désigne la proportion de surface d'un bassin versant ou d'une zone urbanisée qui empêche l'infiltration de l'eau de pluie dans le sol naturel. Il est calculé en comparant la surface imperméable (comme les routes, les bâtiments, les trottoirs) à la surface totale du bassin versant. Il est exprimé sous forme de pourcentage ou de fraction.

Le coefficient d'imperméabilisation, qui représente le pourcentage de surfaces imperméables dans un bassin versant ou une zone urbanisée, est un indicateur crucial pour évaluer les volumes d'eau excédentaires lors des précipitations. L'urbanisation augmente significativement ces volumes de ruissellement. Ce coefficient mesure l'importance des pertes en eau lors du transfert des précipitations vers le ruissellement. Ces pertes incluent l'évaporation, l'interception par la végétation, l'infiltration dans le sol, et la rétention à la surface.

Malgré la diversité de ces pertes, les hydrauliciens assimilent souvent le coefficient de ruissellement au coefficient d'imperméabilisation dans le calcul des débits de crue. L'imperméabilisation croissante des surfaces et l'extension des réseaux pluviaux ont considérablement augmenté les volumes d'eau à évacuer. De plus, les bassins versants imperméabilisés, surtout après urbanisation, produisent du ruissellement même lors d'événements pluvieux de faible période de retour, accentuant ainsi les défis de gestion des eaux pluviales urbaines (Musy et al, 1998 ; Chamoux, 2003).

3.4.4.3 Critères relatifs à l'ouvrage débordant

3.4.4.3.1 Lacune observée (Cause du débordement) (C_{10})

Lors des événements pluvieux, le réseau d'assainissement peut provoquer des débordements catastrophiques. L'encrassement et le sous-dimensionnement du réseau pluvial sont des défauts qui peuvent entraîner fréquemment une réduction du débit de l'eau de pluie et surcharger certains tronçons. En milieu urbain, l'encrassement du réseau pluvial réduit sa capacité en raison de l'accumulation de débris, de sédiments et d'autres matières dans les canalisations et les ouvrages de drainage. De plus, si un réseau conçu avec une capacité insuffisante pour gérer les quantités d'eau générés par des événements pluviaux, en particulier ceux de forte intensité, peut aggraver ces problèmes.

En milieu urbain, il est important de prendre en compte la capacité et l'état du réseau pluvial. Identifier les lacunes du réseau pluvial urbain permet de soutenir la pratique de la protection des zones vulnérables et de préserver le milieu urbain contre les inondations, en réduisant l'apparition de ces débordements.

3.4.4.3.2 Tronçon amont (C₁₁)

Le critère "tronçon amont" se réfère à la structure du réseau pluvial située en amont du point d'inondation. Il peut s'agir de canaux ou de fossés non couverts, où l'eau de pluie s'écoule à ciel ouvert, ou de structures souterraines où l'eau de pluie s'écoule à l'intérieur de conduites fermées.

Les sections de canaux ou d'oueds en contact direct avec l'atmosphère sont influencées par les conditions météorologiques et l'écoulement naturel, qui peuvent être chargés de matières solides. Les structures souterraines telles que des conduites ou des traversées sont influencées par la surcharge des eaux de pluie, ce qui peut causer des débordements internes.

L'analyse des débordements causés par l'obstruction du réseau pluvial montre que ce phénomène est souvent limité au tronçon amont du point d'inondation. Les ruissellements des versants en amont, surtout pendant les crues, transportent des volumes importants et des sédiments vers la partie dysfonctionnelle.

L'analyse des débordements causés par l'obstruction du réseau pluvial montre que ce phénomène est souvent limité au tronçon amont du point d'inondation. Les ruissellements des versants en amont, surtout pendant les crues, transportent des volumes importants et des sédiments vers la partie dysfonctionnelle.

3.4.4.3.3 Jonction (C₁₂)

La jonction au point noir du réseau pluvial urbain fait référence aux endroits où des débordements se produisent fréquemment en raison de l'accumulation de débits de pluie, de débris et de sédiments. Ces jonctions peuvent inclure des ravins encombrés, des collecteurs naturels et artificiels, des intersections entre canalisations principales et secondaires, ainsi que des points de connexion avec d'autres ouvrages du réseau pluvial.

La localisation précise des points de débordement et la cartographie des points noirs du réseau pluvial aideront à repérer et à identifier les sections du réseau qui mènent vers ces points de débordement. Le critère "jonction" fournit une première indication du sous-dimensionnement du réseau à certains endroits. Les jonctions doivent être dimensionnées pour gérer le débit maximal attendu lors des pluies intenses. En réalité, sur le terrain, les jonctions du réseau pluvial sont des zones critiques, et une capacité insuffisante à la sortie des ouvrages d'assainissement peut provoquer des refoulements d'eau dans les zones urbaines.

Une fois que la famille des critères a été établie, la construction des échelles associées aux influences/impacts élémentaires des critères est une étape importante dans l'analyse. Dans le contexte de la gestion des points d'inondation pluviale en milieu urbain, la variation des critères retenus et l'échelle d'évaluation sont indispensables pour évaluer et améliorer la qualité de service du gestionnaire

3.4.5 Échelle d'évaluation des critères retenus

Une échelle d'évaluation des critères retenus est un outil structuré utilisé pour mesurer et attribuer une valeur ou une note à différents critères spécifiques dans un processus d'évaluation ou d'analyse. Dans ce cas d'étude, il s'agit d'un système progressif qui permet de quantifier ou de qualifier la performance d'un critère retenu par rapport à des normes prédéfinies ou des attentes particulières.

Tout d'abord, il est nécessaire d'adapter les critères retenus en fonction des besoins locaux et des priorités spécifiques au milieu urbain. Ensuite, une échelle d'évaluation est construite. Cette échelle de performance est utilisée pour noter les performances des paramètres caractérisant un point noir PN.

3.4.5.1 Variation des critères retenus

Le critère consiste à rechercher la valeur du paramètre qui, sur un débordement de réseau d'assainissement, maximisent l'importance du point noir. Certaines informations peuvent être disponibles à l'échelle d'un secteur

Un critère peut donc avoir deux ou plusieurs niveaux associés et par conséquent plusieurs échelles associées. Dans cette partie nous nous intéresserons, tout d'abord, aux variations de douze critères retenus, ensuite, la construction de ces échelles.

3.4.5.1.1 Critère C_1 : Perturbation du trafic.

Connaître les voies les plus fréquentées aide les gestionnaires du réseau pluvial à prioriser les interventions et les améliorations nécessaires pour minimiser les perturbations. Une voie très fréquentée par la population et/ou véhicules, lorsqu'elle est inondée, peut poser des dangers importants pour la sécurité des circulants, notamment en retardant les interventions d'urgence et en augmentant les risques d'accidents, même peuvent avoir des impacts économiques significatifs en retardant le transport de marchandises.

Pour évaluer les perturbations de la circulation selon ce critère, nous pouvons utiliser trois niveaux de fréquentation :

- **Voie peu fréquentée.** Une voie tertiaire ou qui est utilisée par un faible nombre de personnes, généralement en raison de sa localisation périphérique secondaire ou de son utilisation principalement par un faible résident local. Les perturbations sur ces voies ont un impact faible et aucune influence sur la mobilité urbaine globale et affectent principalement les habitants locaux. La gestion des inondations peut être moins prioritaire ici, sauf si elle perturbe l'accès aux services essentiels.
- **Voie moyennement fréquentée.** Une voie utilisée de manière régulière par un nombre modéré de personnes, incluant les résidents, les travailleurs et les services locaux. Elle peut se situer dans des zones résidentielles ou commerciales de densité moyenne. Les perturbations sur ces voies peuvent causer des désagréments notables, retardant les déplacements quotidiens et affectant les opérations des commerces locaux. La gestion des

inondations sur ces voies nécessite une attention modérée pour assurer la facilité de la circulation et le bon fonctionnement des activités locales.

- **Voie très fréquentée.** Une voie capitale utilisée par un grand nombre de personnes et de véhicules, souvent située dans des centres villes et dans des zones à haute densité urbaine, incluant les principales avenues de transport, les axes commerciaux et les routes vers les centres commerciaux et les places historiques. Les perturbations sur ces voies ont un impact important sur la mobilité urbaine, provoquant des embouteillages, retardant les services d'urgence et affectant gravement l'économie locale. La gestion des inondations sur ces voies est exigée pour maintenir la fluidité du trafic et la sécurité publique

3.4.5.1.2 Critère C₂ : Sensibilité de la zone touchée.

Pour évaluer la sensibilité de la zone touchée par une inondation en fonction de la présence de structures à activité, nous pouvons classer les zones selon trois niveaux de sensibilité : forte, moyenne, et faible. Voici comment définir et utiliser ces niveaux pour l'évaluation :

"tronçon amont"

- **Présence de structures à activité "Faible".** Inclut les zones résidentielles ou suburbaine, les terrains inoccupés, petits commerces, ...etc. Les inondations dans ces zones ont un impact limité sur la vie quotidienne et l'économie locale. La gestion des inondations peut être moins prioritaire, avec des mesures de base suffisantes pour protéger les biens et assurer la sécurité des résidents. Une zone rurale avec des terres stériles pourrait nécessiter des actions simples pour minimiser et éviter les pertes.
- **Présence de structures à activité "Moyenne".** Inclut les écoles, habitat moyennement dense, petit centre de santé, les petites entreprises, les parcs, les infrastructures secondaires de transport (routes secondaires, parkings). Les inondations dans ces zones peuvent causer des désagréments modérés, affectant les activités économiques locales et la qualité de vie sans compromettre des services vitaux. La gestion des inondations nécessite des mesures appropriées pour réduire les impacts économiques et les perturbations de la population. Une zone commerciale avec plusieurs petits magasins pourrait voir une baisse d'activité significative lors d'une inondation, nécessitant des mesures de prévention pour protéger les moyens de subsistance.
- **Présence de structures à activité " Forte ou Vital".** Inclut les hôpitaux, les centres de commandement d'urgence, les écoles, pôle de loisirs et d'attraction, université, habitation dense, les grandes zones commerciales et les centres de transport (gares, aéroports), ..., etc. Les inondations dans ces zones peuvent entraîner des conséquences graves pour la sécurité publique, la santé, et l'économie. La gestion des inondations doit être prioritaire pour minimiser les interruptions des services vitaux et assurer la résilience de la ville. Si un hôpital est situé dans une zone inondable, la planification et les mesures d'atténuation doivent être robustes pour éviter des perturbations graves.

3.4.5.1.3 Critère C₃ : Surface inondée

Pour évaluer la surface inondée à partir de la carte des zones touchées, nous pouvons classer les zones selon trois niveaux : importante, moyenne, et faible. Voici comment définir et utiliser ces niveaux pour l'évaluation :

- **Surface inondée "Faible"**. Représente les zones où l'étendue de l'inondation est limitée, couvrant une petite superficie du milieu faiblement urbanisé. Les inondations faibles affectent un nombre limité de propriétés et infrastructures (route secondaires), avec des impacts mineurs sur la vie quotidienne. Ces zones nécessitent des mesures de base pour la gestion des inondations et la protection des biens. Une zone rurale ou périphérique où les eaux de débordement couvrent une faible emprise, avec un impact faible limité sur les habitations.
- **Surface inondée " Moyenne"**. Représente les zones où l'étendue de l'inondation est modérée, couvrant une superficie intermédiaire. Les inondations moyennes affectent plusieurs propriétés et infrastructures (route moyennement fréquentée), avec des impacts modérés sur la vie quotidienne et l'économie locale. Ces zones nécessitent des mesures de gestion appropriées pour minimiser les impacts et améliorer la résilience. Une zone résidentielle ou commerciale où les eaux de crue couvrent plusieurs hectares, perturbant plusieurs blocs de bâtiments mais sans affecter des zones critiques de la ville.
- **Surface inondée " Importante"**. Représente les zones où l'étendue de l'inondation est vaste, couvrant une grande superficie de terre. Les inondations importantes peuvent affecter de nombreuses propriétés, infrastructures et potentiellement un grand nombre de personnes. Ces zones nécessitent des mesures de gestion des inondations plus robustes et des ressources accrues pour la prévention et la réponse. Une zone urbaine dense où les eaux débordées couvrent plusieurs constructions, impactant des quartiers et de la population entière est considérée une surface inondée " Importante".

3.4.5.1.4 Critère C₄ : Hauteur d'inondation

L'évaluation de la hauteur d'inondation est faite par l'accotement, la partie de la route située est sur les côtés, il est destiné principalement à des usages de sécurité et essentielle pour comprendre l'impact des inondations sur les enjeux exposés aux risques. Ce critère se base sur la hauteur de l'eau lors des événements d'inondation et est classifié en trois niveaux : importante, moyenne, et faible.

- **Hauteur d'inondation " faible"**. Représente les zones où la hauteur de l'eau est faible, généralement inférieure à l'accotement (0,15 à 0.20 mètre). Les inondations faibles causent des dommages mineurs aux infrastructures et aux biens, et présentent des risques limités pour la sécurité des personnes. Nécessitent des mesures de base pour la gestion des inondations et la protection des biens. Une zone rurale où l'eau de crue atteint moins de 0,2 mètre, affectant principalement les terrains et les infrastructures de base

- **Hauteur d'Inondation " Moyenne".** Représente les zones où la hauteur de l'eau est modérée, généralement supérieur ou égale à l'accotement. Les inondations de hauteur moyenne peuvent causer des dommages aux infrastructures et aux biens, affectant la vie quotidienne des résidents et des activités économiques. Nécessitent des mesures de gestion pour minimiser les impacts et accélérer le rétablissement après l'inondation. Une zone résidentielle où l'eau de crue atteint un peu plus l'accotement, impactant les cours, les routes et beaucoup plus les sous-sols.
- **Hauteur d'Inondation Importante.** Représente les zones où la hauteur de l'eau dépasse largement l'accotement et les niveaux normaux, généralement bloc toutes circulation de la population ou les véhicules. Les inondations de grande hauteur causent des dommages significatifs aux infrastructures et aux biens, et posent de graves risques pour la sécurité des personnes. Les inondations causent des dommages importants aux infrastructures, aux biens et peuvent présenter des risques significatifs pour la sécurité des personnes. Nécessitent des mesures d'urgence pour évacuer les résidents et protéger les bâtiments et infrastructures critiques. Une zone urbaine où l'eau de débordement dépasse plus l'accotement, submergeant les véhicules et les rez-de-chaussée des bâtiments.

3.4.5.1.5 Critère C_5 : Surface A

La surface du bassin versant (A) se réfère à l'aire totale, mesurée en hectares (km^2) ou en (ha). Cette surface est déterminante pour estimer la quantité d'eau de pluie qui peut potentiellement contribuer au ruissellement et au débordement du réseau pluvial, par conséquent, aux inondations pluviales.

Pour évaluer ce critère, la surface du bassin versant est classée en trois catégories en fonction de sa taille :

- **Petite surface ($A < \text{qq ares}$).** Un bassin versant est classé comme ayant une petite surface si sa superficie est inférieure à quelques ares. Les bassins versants de petite taille collectent une quantité d'eau de pluie plus faible, ce qui se traduit généralement par des débordements moins importants. Ces bassins sont susceptibles de provoquer des inondations d'impacts moins significatifs en raison du volume réduit d'eau à gérer. Cependant, même les petites inondations peuvent causer des désagréments locaux et nécessitent une gestion appropriée pour éviter des dommages.
- **Surface moyenne ($A = \text{qq ares à qq ha}$).** Un bassin versant est défini comme ayant une surface moyenne si sa superficie varie de quelques ares à quelques hectares. Ces bassins versants collectent une quantité d'eau de pluie modérée. Dans des zones sensibles, les débordements sont potentiels et nécessitent des interventions immédiates pour prévenir des impacts négatifs. La gestion de ces bassins versants requiert des actions de drainage adaptées pour éviter des inondations significatives, surtout dans les zones urbaines densément peuplées ou critiques.
- **Grande surface ($A > \text{qq ha}$).** Un bassin versant est considéré comme ayant une grande surface si sa superficie dépasse plusieurs hectares (ha). Une grande surface de bassin

versant peut collecter une quantité d'eau de pluie considérable, augmentant ainsi le volume total d'eau à évacuer. Cela peut entraîner des débits plus élevés et, en cas de débordement du réseau pluvial, augmenter considérablement les risques d'inondations majeures. La gestion de ces bassins versants est essentielle pour minimiser les risques d'inondation, nécessitant souvent des interventions prioritaires et des actions de gestion des eaux pluviales bien intégrées.

3.4.5.1.6 Critère C₆ : Pente moyenne I

La pente moyenne d'un bassin versant est une mesure de l'inclinaison moyenne du terrain sur toute la surface du bassin versant. Elle est généralement exprimée en pourcentage (%).

Pour évaluer la pente moyenne (I) d'un bassin versant, nous pouvons utiliser les catégories suivantes :

- **Faible pente (I < 2%).** Une pente moyenne inférieure à 2%. Cette pente entraîne un écoulement lent des eaux pluviales, favorisant l'infiltration et réduisant le ruissellement de surface. Les bassins versants avec des pentes faibles sont moins susceptibles de provoquer des débordements rapides. Cependant, ils peuvent être plus sujets à l'accumulation d'eau stagnante, ce qui peut entraîner des problèmes d'infiltration et de saturation des sols.
- **Pente moyenne (I = 2 à 5%).** Une pente moyenne comprise entre 2% et 5% permet un écoulement plus contrôlé des eaux pluviales. Ces bassins versants favorisent un ruissellement plus rapide tout en diminuant l'infiltration des eaux de pluie dans le sol. Pour ces bassins versants, les points noirs (PN) nécessitent une gestion adaptée pour prévenir les inondations. Cependant, les risques d'inondation sont généralement moins sévères que dans les zones à forte pente.
- **Forte pente (I > 5%).** Une pente moyenne supérieure à 5% entraîne une vitesse d'écoulement rapide des eaux pluviales, augmentant ainsi le risque de débordement et d'érosion. Les bassins versants avec des pentes fortes tendent à produire un ruissellement rapide, ce qui peut provoquer des inondations soudaines et une érosion des sols. La gestion des eaux pluviales dans ces zones nécessite des ouvrages de grande capacité pour contrôler le débit et prévenir les dommages.

3.4.5.1.7 Critère C₇ : Allongement M

Pour évaluer l'influence et le sens de variation du critère C7 concernant l'allongement (M), voici comment interpréter les valeurs données :

- **Faible (M < 2) :** Lorsque M est inférieur à 2, cela indique un allongement faible. Dans ce cas, le bassin versant est dit "ramassé", ce qui signifie que des distances plus courtes ou des variations limitées augmentent de manière significative la quantité d'eau qui atteint le point d'inondation urbain. Cela peut accroître le risque d'inondation urbaine en raison de la concentration rapide des eaux de ruissellement.

- Moyen ($M = 2$) : Une valeur de M égale à 2 suggère un allongement de niveau moyen. Cela indique que l'allongement a une influence modérée sur le volume d'eau ruisselée vers le point d'inondation urbain. Bien que cela ne soit pas aussi critique que dans le cas "ramassé", l'allongement peut encore influencer de manière significative la quantité d'eau atteignant le point critique d'inondation.
- Fort ($M > 2$) : Lorsque M est supérieur à 2, cela indique un allongement significatif. Dans cette situation, des distances plus longues diminuent de manière remarquable le volume d'eau qui atteint le point d'inondation urbain. Cela peut contribuer à réduire le risque d'inondation en permettant une dispersion plus étendue des eaux de ruissellement.

3.4.5.1.8 Critère C_8 Temps de concentration t_c .

Le temps de concentration (t_c) est une mesure importante en hydrologie dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont la pente moyenne (I) et de l'allongement (M). la combinaison de deux paramètres peut influencer de manière significative le temps nécessaire pour que l'eau atteigne un point de débordement.

- Si (I faible et M fort) : Une pente faible combinée à un allongement élevé peut prolonger significativement le temps de concentration. Cela est dû à la combinaison d'une faible inclinaison qui ralentit l'écoulement initial et d'une distance plus longue que l'eau doit parcourir avant d'atteindre le point de concentration.
- Si (I faible et M faible) : Une pente faible avec un allongement faible maintiendra un temps de concentration modéré. Bien que la pente soit douce, une distance plus courte permet à l'eau de s'écouler relativement rapidement vers le point de concentration.
- Si (I fort et M fort) : Une pente forte et un allongement élevé accéléreront le temps de concentration. Une pente abrupte favorise un écoulement rapide, et une distance plus longue peut potentiellement augmenter la vitesse à laquelle l'eau atteint le point de concentration.
- Si (I fort et M faible) : Une pente forte avec un allongement faible peut également accélérer le temps de concentration. La combinaison d'une forte pente et d'une distance plus courte permet à l'eau de s'écouler rapidement vers le point de concentration.

3.4.5.1.9 Critère C_9 : Coefficient d'imperméabilisation

Pour interpréter la variation du coefficient d'imperméabilisation en fonction des catégories spécifiées nous avons défini les trois classes suivantes :

- Faible ($< 40\%$) : Cette classe indique que moins de 40% de la surface du bassin versant est imperméable. Cela comprend généralement des zones avec une prédominance de surfaces perméables telles que des terres agricoles, des forêts, des parcs naturels, etc. Dans ces zones, l'infiltration est élevée et le ruissellement est généralement limité, réduisant ainsi les risques d'inondation.

- Moyenne (40 à 80%) : Dans cette classe, entre 40% et 80% de la surface du bassin versant est imperméable. Cela inclut souvent des zones urbaines avec une combinaison de surfaces imperméables (comme les routes, les parkings) et de surfaces perméables (parcs, espaces verts). Le ruissellement est significatif mais peut être atténué par l'utilisation de techniques d'aménagement durable comme les bassins de rétention, les zones tampons végétalisées, et les revêtements perméables.
- Élevée (> 80%) : Cette classe indique que plus de 80% de la surface du bassin versant est recouverte de surfaces imperméables telles que le béton, le bitume, les toits, ..., etc. Un coefficient d'imperméabilisation élevé entraîne un ruissellement important, car l'eau de pluie ne peut pas s'infiltrer dans le sol. Cela peut conduire à des problèmes d'inondation et nécessite une gestion des eaux pluviales efficace pour contrôler le débit et prévenir les débordements.

3.4.5.1.10 Critère C_{10} : Lacune observée (Cause du débordement)

La variation du critère₁₀ permet d'identifier les raisons spécifiques derrière les débordements observés dans les systèmes de drainage urbain. Voici comment interpréter chaque catégorie typique

- Encrassement : Ce terme désigne une obstruction totale ou partielle des systèmes de drainage, tels que les canalisations ou les ouvrages d'égout, à cause de débris, de sédiments ou d'autres matériaux. L'encrassement peut entraîner un débordement en empêchant l'eau de s'écouler normalement vers l'aval.
- Sous-dimensionnement : Cette cause indique que les infrastructures de drainage, comme les canalisations ou les cadres, sont dimensionnées de manière insuffisante pour gérer efficacement les volumes d'eau attendus, surtout pendant les fortes pluies. Le sous-dimensionnement peut provoquer des débordements car les capacités d'évacuation des systèmes sont dépassées.
- Autre : Cette catégorie inclut d'autres causes spécifiques de débordement qui ne rentrent pas dans les catégories précédentes. Cela peut inclure des défauts de conception, des défaillances d'équipement, des erreurs de gestion des eaux pluviales, ou d'autres facteurs techniques d'aménagement.
- Aucun : Lorsque aucune lacune spécifique n'est identifiée comme cause directe du débordement, cela peut indiquer que les systèmes de drainage ont fonctionné comme prévu ou que d'autres facteurs, comme des événements météorologiques extrêmes, ont joué un rôle prépondérant dans le débordement observé.

3.4.5.1.11 Critère C_{11} : Tronçon amont

Lorsqu'on évalue le critère "Tronçon amont" en fonction de l'état "fermé" ou "ouvert", voici comment interpréter chaque catégorie typique :

- Ouvert : Cela inclut des canaux, des cours d'eau, des drains ou des fossés. Un tronçon amont considéré comme "ouvert" signifie généralement que l'apport en eau du bassin versant est

significatif et que l'écoulement des eaux pluviales peut circuler à travers ce BV des débris, transporter des obstacles ou des sédiments.

- Fermé : Lorsqu'un tronçon amont est décrit comme "fermé", cela indique qu'il y a une réduction sur l'apport du bassin par rapport au tronçon amont "ouvert".

3.4.5.1.12 Critère C₁₂ : Jonction

L'évaluation des jonctions dans un réseau pluvial peut être déterminée par la présence ou l'absence de jonctions spécifiques. Voici comment identifier de la jonction :

- Oui, il y a une jonction : Si des canalisations principales et secondaires se rencontrent ou si le réseau se connecte à des ouvrages de drainage spécifiques à cet endroit.
- Non, il n'y a pas de jonction : Si le point en question ne correspond pas à un lieu où différentes sections du réseau se rejoignent.

3.4.5.2 Échelle d'évaluation des critères retenus

Une échelle d'évaluation des critères d'impact ou d'influence est un outil méthodologique nécessaire permettant de quantifier et de qualifier l'impact ou l'influence de divers facteurs sur un phénomène spécifique « débordement pluvial ». Dans la gestion des débordements de réseaux pluviaux urbains, cette échelle permet de mesurer l'ampleur des effets et d'aider à la prise de décisions pour des interventions efficaces.

D'ailleurs, tout risque et toute catastrophe ne peuvent être compris ou expliqués sans une étude spatio-temporelle précise. Le concept d'échelle est en effet essentiel pour comprendre la répartition des risques et leurs conséquences (Nikolase et al, 2010 ; Dauphiné et al, 2013).

Pour quantifier les critères retenus, nous avons établi une échelle de performance de 0 à 1. Selon l'ampleur de l'impact ou de l'influence, nous avons défini cinq niveaux de performance : « Forte », « moyenne » et « faible » pour une influence directe, et « vulnérable » et « non vulnérable » pour une influence indirecte. Pour que la grille d'évaluation soit homogène à tous les critères nous avons établi le barème indiqué dans le **Tableau 3-1** et illustré par la **Figure 3-7**.

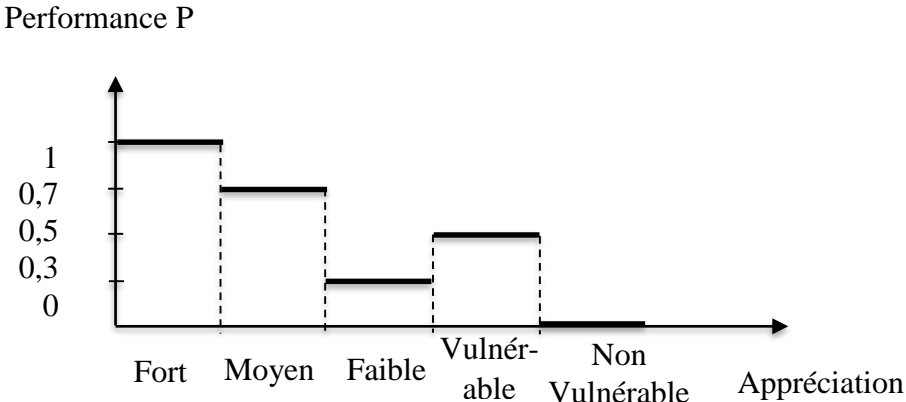


Figure 3-7: Échelle de performance adoptée

3.4.5.3 Notations des performances des paramètres caractérisant un PN

Les points noirs dans le réseau pluvial urbain sont des zones sujettes à des débordements et à des inondations fréquentes. Pour évaluer et caractériser ces points noirs, nous prenons en compte les douze paramètres principaux. La notation des performances des paramètres retenus est indiquée dans le **Tableau 3-1**.

Tableau 3-1: Définition et échelle d'évaluation des critères d'influence et d'impact sélectionnés

Type de critères	Critères		Description	Performances	
Critère d'impact	C1 : Perturbation du trafic	Voie peu fréquentée	Piétons et/ou véhicules	Faible	
		Voie moyennement fréquentée		Moyenne	
		Voie très fréquentée		Forte	
	C2 : Sensibilité de la zone touchée	Présence de structures à activité	Forte ou vital	Hôpital, Gare, Centre commercial, Pôle de loisirs et d'attraction, Université, Habitation dense, ...	Forte
			Moyenne	École, Habitat moyennement dense, petit centre de santé, ...	Moyenne
			Faible	Zone résidentielle ou Suburbaine, petits commerces, ...	Faible
	C3 : Surface inondée	Importante	Évaluée à partir de la figure 4b (à l'échelle)	Forte	
		Moyenne		Moyenne	
		Faible		Faible	
	C4 : Hauteur d'inondation	Importante	>> Accotement	Forte	
Moyenne		≥ Accotement	Moyenne		
Faible		< Accotement	Faible		
Critères d'influence	BV amont	C5 : Surface (A)	Grande	A > qq ha	Forte
			Moyenne	A=qq ares à qq ha	Moyenne
			Petite	A < qq ares	Faible
		C6 : Pente moyenne (I)	Forte	I > 5 %	Forte
			Moyenne	I = 2 à 5 %	Moyenne
			Faible	I < 2 %	Faible
		C7 : Allongement ($E = M/\sqrt{A}$)	Fort	M > 2	Faible
			Moyen	M = 2	Moyenne
			Faible	M < 2	Forte
	C8 : Temps de concentration (t_c)	Fort	I faible et E fort	Faible	
		Moyen	(I faible et E faible) ou (I fort et E fort)	Moyenne	
		Faible	I fort et E faible	Forte	
	C9 : Coefficient d'imperméabilisation	Élevée	> 80 %	Forte	
		Moyen	40 à 80 %	Moyenne	
		Faible	< 40 %	Faible	
C10 : Lacune observée (Cause du débordement)	Encrassement	Total (Obturation)	Forte		
		Partiel	Moyenne		
	Sous-dimensionnement				
	Autre			Faible	
C11 : Tronçon amont	Aucun		Non vulnérable		
	Ouvert		Vulnérable		
C12 : Jonction	Fermé		Non vulnérable		
	Oui		Vulnérable		
	Non		Non vulnérable		

Échelle de notation de la performance : P = 1 ; 0,7 ; 0,3 ; 0,5 et 0 pour Forte ; Moyenne ; Faible ; Vulnérable ; Non vulnérable respectivement (Plus l'impact est fort plus la performance P est élevée avec P = 0 à 1).

3.5 Méthodologie d'analyse multicritère adoptée

L'analyse multicritère (AMC) est un outil d'aide à la décision utilisé dans ce travail pour évaluer et prioriser les problèmes de débordements pluviaux qui englobent plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs. L'AMC, à travers des méthodes comme l'AHP et la FMECA, permet de regrouper diverses informations dans un indice unique reflétant l'importance de chaque débordement. Cette approche facilite la prise de décision en classant les actions nécessaires pour gérer les points noirs dans le réseau pluvial urbain, en tenant compte de plusieurs aspects critiques.

3.5.1 Méthode AHP

La méthode AHP se décompose en quatre étapes (Saaty, 2008): hiérarchisation des critères par importance du plus important au moins important, construction d'une matrice à partir de la comparaison des critères deux à deux, détermination des poids associés à chaque indicateur grâce à une méthode de calcul des vecteurs propres, et enfin, vérification de la consistance du résultat.

3.5.1.1 Structure hiérarchique du problème

Cette étape consiste à établir des priorités entre critères appartenant au même PN, selon le principe de l'importance. Soit $C_1, C_2, \dots, C_i, \dots, C_n$ l'ensemble des critères dont on cherche le coefficient de pondération. Selon le principe de la hiérarchisation, C_1 est plus important que C_2 qui est plus important que C_{i-1} , lequel plus important que C_n . A la fin, C_n est l'indicateur le moins important.

3.5.1.2 Matrice de comparaison des critères

Afin d'établir les préférences spécifier le degré d'importance d'un critère par rapport à un autre, nous avons utilisé l'échelle de Saaty (tableau 2), cette échelle allant de 1 à 9 où 1 implique qu'il n'y a pas de préférence entre deux critères et 9 signifie qu'un critère est absolument préféré par rapport à un autre. Nous avons introduit les jugements plus proches de la réalité sur avis d'experts.

Les critères sont comparés sur un intervalle allant de 1 à 9 comme le recommandent (Saaty, 1991), où 1 implique qu'il n'y a pas de préférence entre les deux critères et 9 signifie qu'un facteur est extrêmement favorisé par rapport à un autre.

Tableau 3-2: Comparaison par paire des préférences dans AHP

Poids de l'importance	Jugement de préférence
1	Même Préférence
3	Préférence Modérée
5	Forte Préférence
7	Très Forte Préférence
9	Préférence Absolue
2, 4, 6, 8	Utilisés pour des Jugements Intermédiaires

La comparaison entre tous les indicateurs donne la matrice suivante (Chang, 2007) :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1i} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii} & a_{ij} & \dots & a_{in} \\ a_{j1} & \dots & a_{ij} & a_{jj} & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{ni} & a_{nj} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

Avec $a_{ij} = \frac{w_i}{w_j}$; $a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$ et $a_{ii} = 1$

$a_{ij} (>0)$ est l'intensité de l'importance de C_i sur C_j et w_i le coefficient de pondération associé à C_i .

3.5.1.3 Détermination des poids associés à chaque critère

Il s'agit de calculer le vecteur des coefficients de pondération $W = \{w_1 \dots w_2 \dots w_n\}$. Pour ce faire, nous avons utilisé MATLAB. Le calcul effectué consiste en ce qui suit :

$$W = \begin{bmatrix} \frac{a_{11} + \dots + a_{1i} + \dots + a_{1n}}{\sum_{k=1}^n a_{k1} + \sum_{k=1}^n a_{ki} + \sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \dots \\ \frac{a_{i1} + \dots + a_{ii} + \dots + a_{in}}{\sum_{k=1}^n a_{k1} + \sum_{k=1}^n a_{ki} + \sum_{k=1}^n a_{kn}} \\ \dots \\ \frac{a_{n1} + \dots + a_{ni} + \dots + a_{nn}}{\sum_{k=1}^n a_{k1} + \sum_{k=1}^n a_{ki} + \sum_{k=1}^n a_{kn}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{l=1}^n \frac{a_{1l}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}}}{n} \\ \dots \\ \frac{\sum_{l=1}^n \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}}}{n} \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

Donc, chaque coefficient w_i est obtenu par la formule suivante :

$$w_i = \frac{\sum_{l=1}^n \frac{a_{il}}{\sum_{k=1}^n a_{kl}}}{n} \quad (3-3)$$

Avec $\sum w_i = 1$

Par la suite les poids des critères sont exprimés en valeurs pondérés.

3.5.1.4 Vérification de la consistance des résultats

L'AHP permet de calculer un indice de consistance (Granger et al.) puis un ratio de cohérence (Azzout et al.) qui permet d'évaluer les calculs effectués. En d'autres termes, il permet de vérifier si les valeurs de l'échelle (1-9) attribuées par le décideur sont cohérentes ou non. Il fournit une mesure de la probabilité que la matrice a été complétée purement au hasard. Ainsi, l'AHP n'exige pas des décideurs d'être cohérent mais plutôt fournit une mesure d'incohérence et permet de réduire cette incohérence.

On définit les deux vecteurs suivants :

$$\begin{bmatrix} \lambda'_1 \\ \dots \\ \lambda'_i \\ \dots \\ \lambda'_n \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n w_k \times \begin{bmatrix} a_{1k} \\ \dots \\ a_{ik} \\ \dots \\ a_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 \times \begin{bmatrix} a_{11} \\ \dots \\ a_{1i} \\ \dots \\ a_{1n} \end{bmatrix} + \dots + w_i \times \begin{bmatrix} a_{1i} \\ \dots \\ a_{ii} \\ \dots \\ a_{ni} \end{bmatrix} + \dots + w_n \times \begin{bmatrix} a_{1n} \\ \dots \\ a_{in} \\ \dots \\ a_{nn} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

Et $\lambda_i = \frac{\lambda'_i}{w_i}$; $i = 1 \text{ à } n$

Chapitre 3 : Méthodologie développée : modèle d'aide à la gestion des inondations urbaines par les méthodes AHP et FMECA

Puis $\lambda_{\max} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i}{n}$

L'indice de consistance CI est alors :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{3-5}$$

Pour calculer le ratio de consistance CR, on divise CI par une valeur RI (indice randomisé) donné par le tableau 3 en fonction du nombre de critères n.

Pour notre cas, 1.53 est la valeur de RI correspond à la matrice de taille d'ordre 12 (n=12).

$$CR = \frac{CI}{RI} \tag{3-6}$$

Tableau 3-3: Valeurs de l'indice RI (Saaty,1980)

Taille de la matrice (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,53	1,56	1,57	1,59

L'attribution des poids est jugée acceptable si CR est inférieur à 0,1. Dans le cas contraire, les coefficients de la matrice comparaison sont incohérents et la procédure doit être de nouveau appliquée. Le vecteur λ_i' maximum indique la ligne dans laquelle il y a un problème avec un coefficient a_{ij} . Si plusieurs coefficients sont en cause, l'erreur devient plus difficile à localiser.

3.5.1.5 Évaluation des scores par PN

La détermination des scores S_i des n PN nécessite l'agrégation des critères. Nous avons opté pour une agrégation complète pour sa clarté et sa simplicité (Bouyssou, 2003). C'est la méthode des additions linéaires (dite aussi méthode de la somme pondérée) qui est également une des méthodes les plus utilisées (Sahely, 2005). Le Score S_i (ou note globale) d'un PN i est obtenu la relation de pondération suivante :

$$S_i = \sum_{j=1}^n w_j N_{ij} = w_1 N_{i1} + w_2 N_{i2} + \dots + w_n N_{in}, N_{ij} = P_{ij} \quad (3-7)$$

Avec :

S_i : Score du PN i (plus S_i est grand plus le PN est prioritaire à considérer)

w_j : Poids affecté au critère de classement j du PN i

N_{ij} : Note affectée au PN i vis-à-vis du critère j

P_{ij} : Performance du PN i vis-à-vis du critère j (tableau 3)

3.5.2 Méthode FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis)

Cette méthode, basée sur des critères précis, a été conçue à l'origine pour l'étude de procédés industriels très bien connus, et sur lesquels étaient en particulier disponibles des données précises concernant l'historique des défaillances passées, leurs conséquences et les délais de remise en service du système après une défaillance (Press, 2003, Stamatis, 2003). Cette démarche a été adaptée aux données et connaissances disponibles concernant le RAP étudié.

La méthode est axée sur l'estimation d'un indice de criticité I_c basé sur un ensemble de critères permettant de mettre en avant les PN les plus sensibles aux risques de débordement.

3.5.2.1 Paramètres d'évaluation

Trois paramètres d'évaluation des risques de débordement ont été définis :

- Un « Risque » de débordement : il s'agit de définir les critères pertinents nous permettant de classer le risque qu'un débordement identifié puisse apparaître. Par exemple, un PN comptabilisant des performances plus élevées (vis-à-vis du débordement) qu'un autre PN est le signe qu'il présentera un risque de débordement plus grand.
- Une « Gravité » de débordement : on se met en situation d'un débordement avéré et on essaie d'en estimer la gravité. Ce qui revient à envisager et quantifier les conséquences de ce débordement. C'est-à-dire, est-ce que ce débordement pourrait entraîner des dégâts pour les biens et les personnes ? Si oui, quel degré de gravité peut-on lui attribuer ? La réponse devrait nécessairement être basée plus sur les critères d'impact que sur les critères d'influence.
- Un « Délai de détectabilité » : ce paramètre joue un rôle important dans l'estimation de la criticité du PN. On attribue à chaque PN un délai de détectabilité selon son emplacement, l'impact du débordement ou encore son système de gestion. Par exemple, il apparaît évident qu'un débordement sur une route à grande circulation sera plus rapidement identifié que sur un chemin peu fréquenté.

3.5.2.2 Indice de criticité

L'association des trois paramètres ci-dessus permet de définir un indice de criticité I_c d'un PN par l'équation ((Press, 2003 ; Stamatis, 2003)) :

$$I_c = (N_m)_{\text{Risque}} \times (N_m)_{\text{Gravité}} \times (N_m)_{\text{Délai de détection}} \quad (3-8)$$

N_m est la note moyenne affectée à chaque paramètre et est obtenue par la relation :

$$N_m = \frac{\sum_{j=1}^n N_j}{N_{\max}} \quad (3-9)$$

Où N_j : note donnée au critère j du paramètre considéré et n : nombre de critères (tableau 4)

N_{\max} : somme des notes max donnée aux critères de chaque paramètre

Tableau 4. Notes des critères retenues

Paramètre	Critères	Performance					N_{\max}
		non vulnérable	faible ou court	vulnérable	moyenne ou moyen	forte	
Risque	C5 à C9	---	0.3	0.5	0.7	1	7
	C10	0	0..3	0.5	0.7	1	
	C11 et C12	0	---	0.5	---	---	
Gravité	C1 à C4	---	0.3	---	0.7	1	4
Détection	Rapide (Endroit fréquenté)	---	0.3	---	---	---	1
	Peu rapide (Endroit peu fréquenté)		---		0.7		

Dans la présente étude, une fois les paramètres des méthodes définis, notre méthodologie propose de tester l'évaluation des critères d'impacts et d'influence via une analyse multicritère avec données réelles et étude d'expertise.

Couplage entre modules vise à combiner les méthodes multicritères et l'établissement des classements des débordements à l'aide d'une seule analyse multicritère. Cependant, dans un environnement authentique, si la décision de la gestion des eaux pluviales à donner lieu à plusieurs travaux de recherche (Dubois, 2008, Nicolas, 2010, Morel, 2011, Le Goff, 2012, Bachoc, 2013) elle n'a jamais été l'objet, à notre connaissance, d'une décision prise à gérer par des ordonnances.

Pour se faire, nous avons mené une étude de cas dont le but est de contribuer à une amélioration d'utilisation des modèles par les spécialistes, et d'aider des personnes non-expertes à sélectionner des points noirs parmi les débordements déjà localisés dans milieu urbain.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré une méthodologie qui nous semble la mieux adaptée - vis-à-vis des données et composants du problème étudié (nombre et diversités des critères retenus, objectif visé de nature sélective, etc.) - pour l'évaluation et la gestion des points noirs (PN) dans un milieu urbain, en utilisant les méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process) et FMECA (Failure Modes and Effects Analysis). Cette approche permet de structurer et de hiérarchiser les problèmes de débordements pluviaux en prenant en compte plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs, facilitant ainsi la prise de décision.

Nous avons sélectionné douze paramètres essentiels pour caractériser les points noirs, tels que la pente moyenne du bassin versant, la surface du bassin, la jonction des réseaux, etc. Chaque critère a été évalué et noté selon une échelle définie pour quantifier son impact sur les débordements pluviaux.

L'AHP permet de hiérarchiser les critères selon leur importance relative en utilisant une matrice de comparaison par paires. Cela nous fournit un poids pour chaque critère, facilitant ainsi une évaluation plus précise de chaque point noir.

La FMECA aide à identifier et à analyser les modes de défaillance potentiels et leurs effets sur le réseau pluvial, ce qui est crucial pour anticiper et prévenir les débordements.

Comme d'autres villes au monde, la gestion des EP en villes algériennes peut se faire à l'aide des techniques plutôt d'actualité et ayant montré leur performance dans différents domaines. Élaborer une liste de points noirs et de réaliser une base de données sous format numérique et cartographique offrent un pas important dans l'amélioration du niveau de service réellement rendu aux gestionnaires du réseau d'abord puis à la population.

Le chapitre III a permis d'identifier les facteurs influençant l'hydrologie du bassin ainsi que les zones à risque. Le chapitre IV s'appuie sur ces résultats pour évaluer les débordements à travers une approche multicritère, dans le but de hiérarchiser leur vulnérabilité et de proposer des outils d'aide à la décision pour une gestion plus efficace du territoire de la ville de Bejaia.

.

CHAPITRE 4 APPLICATION – CAS DU RESEAU DE LA VILLE DE BEJAIA

4.1 Introduction

L'étude de cas est une méthode qualitative permettant de tester une démarche de recherche sur des situations réelles, complexes et spécifiques. Elle repose sur des données descriptives et empiriques, et vise à analyser des comportements ou des dynamiques propres à un territoire donné. Selon Gauthier (1993), elle constitue une stratégie descriptive fondée sur un cas unique. Utilisée en communication, en formation ou en gestion urbaine, elle permet de comprendre les relations entre les acteurs, les infrastructures et les stratégies d'adaptation.

Des travaux menés par Frédéric Cherqui et Nina Cossais, dans un ouvrage dirigé par Bacot, Barraud et Lipeme Kouyi, interrogent la gestion des eaux pluviales et les outils méthodologiques disponibles pour accompagner le changement. Le cas de l'Algérie, par sa spécificité sociale et institutionnelle, mérite une approche différenciée. À l'échelle internationale, Tucci et Bertoni (2004) ont compilé plusieurs études de cas en Amérique latine (Brésil, Argentine, Salvador, Nicaragua), illustrant la diversité des problématiques liées aux inondations. Verlynde (2018) a, quant à elle, étudié la perception du risque d'inondation dans la communauté urbaine de Dunkerque, identifiant des pistes d'adaptation selon les besoins exprimés par les habitants.

L'étude de cas reste pertinente aujourd'hui pour intégrer l'expérience passée, les nouvelles technologies de communication et les réalités institutionnelles locales dans une logique d'adaptation durable. Elle s'avère indispensable dans les pays confrontés à des conditions climatiques et économiques différentes de celles des pays développés.

Ce chapitre est consacré à l'application de la méthodologie précédemment développée au cas de la ville de Bejaia. Dans plusieurs situations, nous avons été amenés à jouer le rôle des décideurs ou d'autres acteurs, et les résultats présentés peuvent être appliqués ou comparés aux résultats d'autres études de cas.

L'approche méthodologique vise d'abord à collecter suffisamment de données sur les événements passés à Bejaia, à identifier les causes des débordements pluviaux, et à comprendre comment le gestionnaire dirige ces opérations et interventions. Les différents travaux et enquêtes sur le terrain permettent de concevoir l'exemple selon une approche spécifique.

Après la localisation des points noirs, un classement a été réalisé en appliquant les méthodes AHP et FMECA, et en calant notre démarche sur la carte des surfaces inondées ayant survécu dans le passé. Les résultats obtenus permettent de proposer de nouvelles directives de gestion des eaux pluviales et aident le gestionnaire local à planifier les prochaines interventions sur le réseau pluvial.

4.2 Choix du site et possibilité de suggérer des actions

Aujourd'hui, la possibilité de suggérer des actions spécifiques basées sur des études de cas est susceptible d'améliorer la gestion des eaux pluviales et d'adopter des solutions optimales pour chaque site. Les raisons qui justifient le choix d'une étude de cas incluent sa potentialité naturelle, historique et culturelle, ainsi que la récurrence des débordements pluviaux qui frappent fréquemment la ville de Bejaia.

4.2.1 Présentation et caractéristiques de la ville de Bejaia

La ville de Bejaïa est située dans un cadre pittoresque, façonné par la mer, les montagnes, la plaine, ainsi qu'une faune et une flore diversifiées. Elle revêt une importance réelle, combinant une fonction portuaire avec un rôle de centre commercial et administratif. Localisée sur le golfe de la Méditerranée, elle a fait l'objet de nombreuses études. Plusieurs d'entre elles portent sur les domaines hydraulique, génie civil, biologie, environnement, ainsi que sur les aspects socioculturels.

4.2.1.1 Localisation et présentation de la ville de Bejaia

Sur le plan géographique, le territoire de la Wilaya de Bejaia se situe au nord-est de l'Algérie. Il est délimité au nord par la mer Méditerranée, ce qui lui confère environ 100 km de côtes. Au sud, il est limité par les massifs des Bibans, à l'est par les massifs des Babors, et à l'ouest par la chaîne montagneuse du Djurdjura.

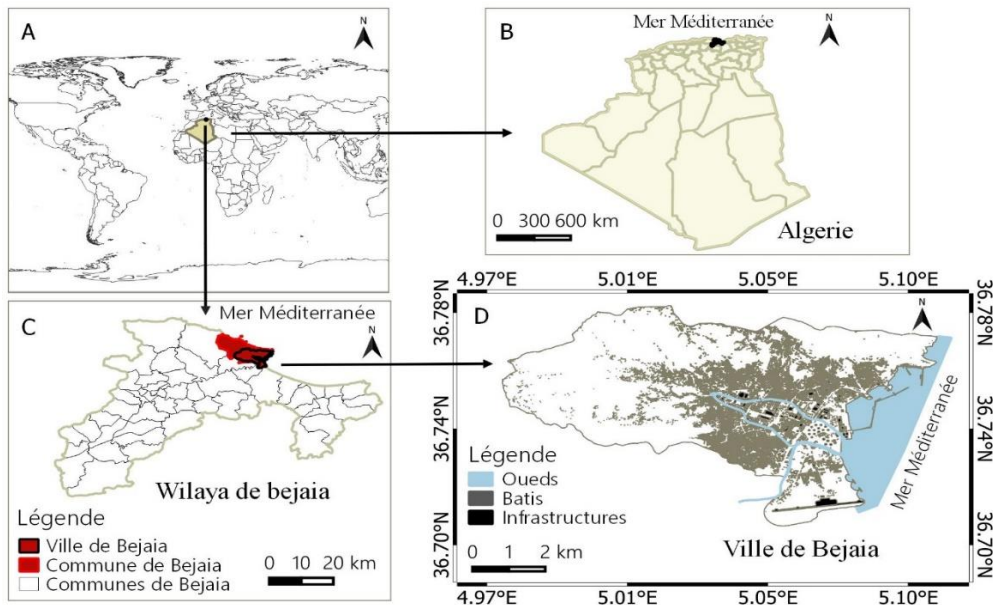


Figure 4-1: Localisation de la ville de Bejaia (D) à l'échelle mondiale (A), nationale (B) et provinciale

La ville de Bejaia est le chef-lieu de la wilaya, de la daïra et de la commune du même nom, également appelée Bgayet en dialecte local. C'est une ville côtière située à 240 km à l'est d'Alger, avec une superficie d'environ 120,22 km² (**Figure 4-1**).

Actuellement, l'espace algérien se subdivise en 58 Wilayas dont fait partie la wilaya de Bejaia. Après avoir été annexée au département de Constantine à l'époque d'occupation française, puis devenue Daïra dans l'emprise territoriale de Sétif pendant la période de la postindépendance, Bejaia accède à sa propre Wilaya en 1983. Elle est subdivisée en 52 communes regroupées elles-mêmes en 19 daïras. En 60 ans seulement, la ville a connu une croissance rapide des zones urbaines, comme en témoigne l'augmentation de la population totale vivant en zone urbaine, passée de 29,6 % en 1950 à 54 % en 2015.

4.2.1.2 Climat de la ville de Bejaia

Le climat est la distribution statistique des conditions de l'atmosphère terrestre dans une région donnée pendant une période déterminée. La caractérisation du climat est effectuée à partir de mesures statistiques des données atmosphériques locales : température, pression atmosphérique, précipitations, ensoleillement, humidité, et vitesse du vent.

Le climat à Bejaia est méditerranéen, avec des précipitations parfois fortes et irrégulières, et des étés chauds et humides. La température et les précipitations à Bejaia sont caractérisées par:

- **Températures**, moyennes mensuelles varient de 11°C en janvier à 32°C en août. Les températures minimales moyennes mensuelles descendent à 7°C et les températures maximales moyennes mensuelles sont de l'ordre de 31°C.
- **Précipitations**, La hauteur moyenne des précipitations annuelles relevées entre 1993 et 2006 est de 762mm. La période de novembre à février inclus correspond à une saison très humide, représentant plus de la moitié (58 %) de la pluviométrie annuelle. En revanche, la saison sèche est clairement marquée de juin à août inclus, durant laquelle la pluviométrie des trois mois ne représente qu'un pourcentage très faible (6,5 %) de la pluviométrie annuelle. Ces dernières années, nous avons observé une perturbation des précipitations. Malgré ce changement climatique dans la région, le mois le plus pluvieux reste décembre, avec une pluviométrie de 134,6 mm, tandis que le mois le plus sec est août, avec une pluviométrie moyenne de 10,2mm (ONM).

4.2.1.3 Reliefs et topographie du site

La ville présente une morphologie en étages, semblable à un amphithéâtre. Elle s'étend du piedmont de la montagne de Gouraya au nord (150 m d'altitude sur 672 m du mont) vers son golfe maritime au sud (la mer Méditerranée). Elle s'étale d'est en ouest et en sud-ouest sur la partie nord du golfe, qui a une forme semi-elliptique, sur une longueur et une largeur moyenne d'environ 5 km. Cette partie du territoire est située entre le cap Carbon à l'est et Ighzer N'Themelaht (emplacement de l'aéroport) à l'ouest. Elle forme une bande entre la mer et le relief montagneux, raide et élevé

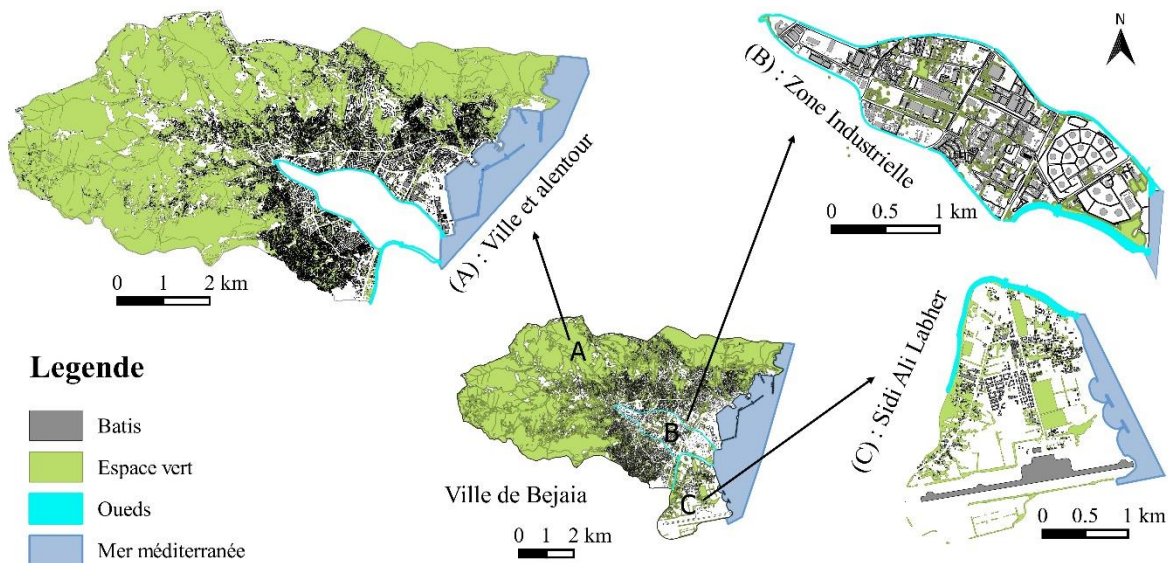


Figure 4-2: Les trois zones de la ville Bejaia

Le site offre ainsi une protection naturelle et une opportunité de défense qui ont justifié l'implantation de cette grande ville. Le site est marqué par la prépondérance des reliefs montagneux et la plaine située près de la mer Méditerranée. Cette morphologie irrégulière permet de distinguer trois zones : une zone amont très accidentée avec des pentes fortes, une partie aval plate avec une pente faible, et une autre partie intermédiaire avec une pente moyenne.

4.2.2 Potentialités naturelles, historiques et culturelles de la ville de Bejaia

La ville de Bejaia est considérée comme la porte de l'Afrique, ce qui a fait d'elle un objet de convoitise pour différentes civilisations depuis la nuit des temps. En effet, Bejaia est l'une des villes de premier ordre du littoral algérien et de l'espace méditerranéen. Elle a hérité d'un certain nombre d'éléments de valeur en matière de culture historique.

De plus, la ville a été la capitale de l'Algérie actuelle avant que l'Empire ottoman ne décide de transférer la capitale à Alger. Le site a suscité la convoitise de plusieurs civilisations ayant traversé l'espace méditerranéen, telles que les Phéniciens, les Romains, les musulmans durant la conquête, les Hammadites, les Espagnols, les Turcs et les Français. (Aouni, 2014)

La ville de Bejaia présente une certaine richesse et diversité dans ses formes architecturales et urbaines, avec l'existence de quelques espaces publics collectifs (esplanades, places, rues) et une vaste zone fonctionnelle dans la partie sud-ouest. De plus, le tissu urbain est marqué par une forte concentration de constructions et de population dans la plaine, notamment autour du centre-ville. Cette répartition spatiale est déséquilibrée par des zones d'emploi dans l'aire dense.

Cependant, la typologie du petit commerce occupe les parties basses des quartiers traditionnels, où les restaurants, cafétérias, librairies et produits locaux constituent l'essentiel du contenu

commercial. Cela représente un avantage pour l'activité touristique, bien que certains quartiers semblent très silencieux et isolés en raison de l'absence de cette dynamique commerciale.

Deux entités se distinguent par leur richesse en histoire et en sites naturels : le parc national de Gouraya et la partie basse du noyau historique. Le Djebel Gouraya est une zone très peu urbanisée, instituée par décret en 1983 en tant que parc national à vocation touristique. S'étendant sur une superficie de 2080 hectares, cette zone réunit plusieurs sites naturels d'une haute valeur paysagère, tels que le mont Gouraya, le cap Carbon, les Aiguades, le pic des Singes, et le site sauvage de la côte ouest.

Elle englobe également une bande de la partie nord de l'agglomération, ainsi que le lac Mezzai, situé à la jonction du boulevard Krim Belkacem avec la rue Hassiba Ben Bouali, et qui se trouve ainsi isolé en enclave dans l'agglomération urbaine. (Aouni, 2014)

Des monuments, sites et entités urbaines témoignant des passages de diverses civilisations et de la culture locale (notamment les villages kabyles) se trouvent parsemés dans toute la région de Bejaia, et particulièrement dans la ville de Bejaia.

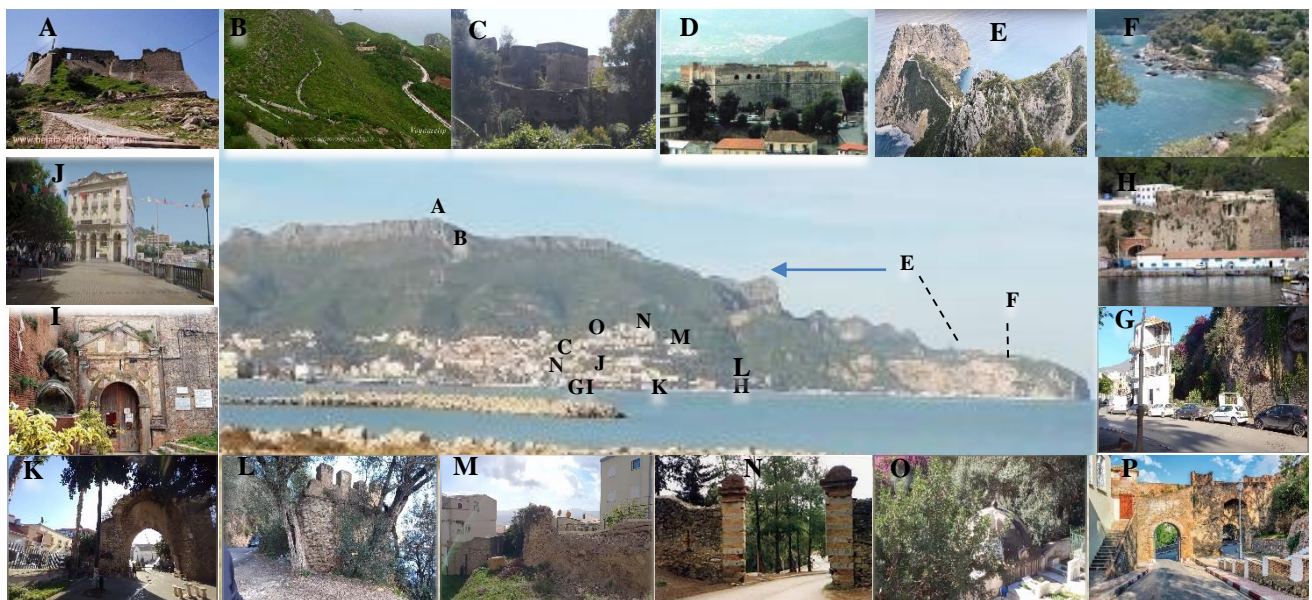


Figure 4-3 : Sites et monuments de la ville de Bejaia

Sites : Gouraya (A) ; Parc Gouraya (B) ; Fort (C) ; Fort Moussa (D) ; Pic de singe et cap carbon (E) ; Les Zaiguoides (F); Place de Gueydon (J) ; Fort Sidi Abdelkader(H) ; Casbah (I) ; Porte Assanea (G) ; Porte Sarrasine (K) ; Porte Assadate (L) ; Porte Amssioun (M) ; Porte El Ber - Gouraya (N) ; Porte Amandes (O) ; Porte Étendards - Bab El Fouka(N)

Il y a des éléments ponctuels qui caractérisent cette composante historique, ainsi que le tissu urbain dans son hétérogénéité, suscitant un intérêt pour le tourisme culturel et pour la reconnaissance locale d'une histoire riche en témoignages de civilisations diverses.

La porte de la mer ou porte Sarrasine, les citernes d'époque romaine, la porte Fouka, qui est un monument hammadi classé patrimoine national, la mosquée Sidi Soufi, un site religieux de la même époque également classé au patrimoine national, la Casbah construite par les Espagnols au XVI^e siècle à l'emplacement de la citadelle hammadi, ainsi que les places, boulevards, édifices militaires et administratifs d'époque française, sont autant de monuments et sites qui, plus ou moins reliés, évoluent dans cet espace global à vocation culturelle qu'est actuellement la vieille ville.

Des retenus naturelles permanentes ou saisonniers ont été formé, deux retenus permanentes (Tamalahth et Mozaia), et la troisième c'est une retenue temporelle(Gouraya).

- **Tamalahth** est situé à Sidi Ali L'Abhar, à l'est du chef-lieu de la commune de Bejaia. Il est en limite avec la mer Méditerranée et l'aéroport de Bejaia (Abbane Ramdane), avec une superficie d'environ une dizaine d'hectares (17 ha). Le lac Tamalahth est l'une des zones humides à grande diversité naturelle de la région centre-est du pays. Il abrite plusieurs espèces d'oiseaux d'eau en hiver, qui l'utilisent surtout comme site de reproduction.
- **Mozaia** est la zone humide située à l'intérieur du parc d'attraction d'Amriou, au centre de la ville de Bejaia. Elle est limitée au nord par la maison de la culture, à l'ouest par la route menant à l'université, et à l'est par la route menant à Ihadaddene (Boulevard Krim Belkacem). La superficie totale du site est d'environ trois (3) hectares, avec un plan d'eau s'étendant sur environ deux (2) hectares et une profondeur variant de quelques centimètres à une dizaine de mètres. Mozaia est unique dans le milieu urbain et renferme une biodiversité riche et diversifiée, incluant des espèces de flore, faune et oiseaux (Source : Parc National de Gouraya - Bejaia).
- **Gouraya** est situé au-dessous du monument Yama Gouraya. La montagne de Gouraya surplombe la ville de Bejaia et se situe à une altitude de 660 mètres au-dessus du niveau de la mer. Elle est entourée d'un espace plat formant un bassin à ciel ouvert, et est remplie de forêts denses ainsi que de diverses plantes et animaux. Actuellement, l'espace est aménagé en parc d'attraction.

4.2.3 Développement urbain accéléré de la ville

Aujourd'hui, la ville de Bejaia connaît une grande extension urbaine, particulièrement marquée après l'indépendance. Au cours de ces années, l'urbanisation, la zone industrielle et l'activité économique de Bejaia se sont structurées autour de plusieurs types prédominants : l'activité administrative, éducative et sanitaire, en raison de son statut de ville chef-lieu de wilaya (Voir **Figure 4-4**).



Figure 4-4 : Ville de Bejaia, vues actuelles

Les places : Brise de mer (A), Montagne de Gouraya (B), Construction en ville de Bejaia ,
Mosquée Sidi Soufi (D), Lac Mozaia (E), Ancienne ville (F), Nouvelle ville (J)

Un étalement urbain rapide peut être observé avec le passage de l'activité agricole à l'activité industrielle publique, principalement orientée vers le textile et les produits manufacturés. Cette extension s'est également accentuée avec la transition de l'industrie publique à l'industrie privée, qui est désormais axée sur l'agroalimentaire (comme Cevital, les laiteries et les boissons).

Le golfe de la ville de Bejaia est désormais bordé par de nouvelles constructions du côté de Sidi Ali Labher, la réalisation d'un aéroport à caractère national et international (avec plusieurs vols quotidiens tout au long de l'année), et le port industriel et commercial dominant dans les hydrocarbures. La ville a développé une zone industrielle centrale de 156 hectares, 181 établissements classés selon la législation sur la protection de l'environnement, ainsi qu'environ 5 000 PME et artisans. La ville comprend également une caserne militaire centrale de 35 hectares avec une école des cadets, deux centres d'enseignement supérieur, deux hôpitaux et cliniques importants, six centres culturels majeurs, et un centre administratif de wilaya avec l'ensemble de ses directions réparties sur plusieurs sites (ONA, 2017).

Actuellement, la grande pression démographique, l'accessibilité et le fonctionnement urbain et économique sont concentrés dans le centre de l'ancienne ville, en particulier dans la partie basse, qui renferme le plus grand nombre d'éléments significatifs. Cette zone associe une fonction portuaire à un rôle de centre commercial, industriel et administratif. Elle concentre pratiquement tous les aspects de la centralité, et son attractivité exerce une pression considérable sur le milieu urbain. Les **Figure 4-4** et **Figure 4-5** montrent respectivement les vues actuelles et anciennes de la ville de Bejaia.

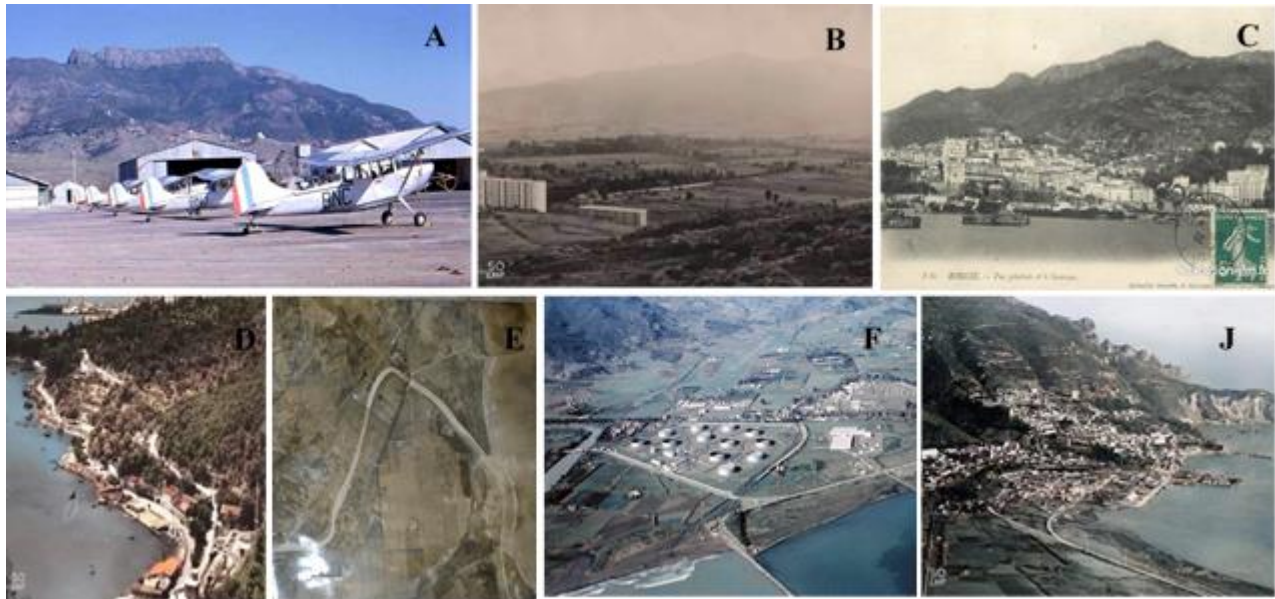


Figure 4-5: Ville de Bejaia, vues anciennes

Les zones : Ancien aéroport (EDIMCO actuel) & Décollage d'avion (A), Plaine (B), Ancienne ville, Brise de mer (D), Sidi Ali Labher (E), Zone industrielle(F), (J), L'arrière port (J)

La recherche sur les modifications apportées à la ville de Bejaia montre que l'augmentation des surfaces recouvertes de revêtements imperméables a réduit le nombre des oueds et augmenté la fréquence des inondations pluviales. Auparavant, la configuration spatiale de la ville de Bejaia était peu structurée ; après une dizaine d'années, son espace central nouvellement développé se caractérise par une activité commerciale intense, ainsi que par des fonctions administratives, industrielles, commerciales et touristiques.

Les présentations cartographiques ou photographiques (voir **Figure 2-13** à **2.15**) offrent des avantages particuliers pour obtenir simultanément des informations qualitatives et quantitatives sur les inondations en milieu urbain. Actuellement, deux évolutions sont observables sur les **Figures 4-4** et **4.5**. La première évolution est détectable par la comparaison des surfaces imperméables, la disparition des terrains agricoles et les retenues naturelles d'eaux pluviales (Tala n'Tamalahth, Tala Mozaia, Remela, Bir Slam). La deuxième évolution concerne la modification des chemins d'écoulement naturel et la couverture des oueds.

La situation concernant les inondations pluviales pourrait devenir grave si le milieu urbain est exposé à des débordements pluviaux. Le changement climatique est l'enjeu le plus important de notre époque, et les aléas pluviométriques exposeront le milieu urbain à un risque accru d'inondations pluviales. Actuellement, la problématique de la gestion des eaux pluviales dans la ville de Bejaia ne cesse de croître, et le risque de débordement du réseau pluvial est de plus en plus probable. D'ailleurs, une grande partie du milieu urbain de la ville de Bejaia est construite sur un terrain agricole, marécageux et à **faible pente**, situé entre la mer Méditerranée et une série de montagnes.

4.3 Élaboration de la cartographie des débordements passés

L'élaboration de la cartographie des débordements passés dans la ville de Bejaïa nécessite une approche méthodique pour collecter, analyser et représenter les données historiques des inondations. Voici les étapes détaillées de ce processus.

4.3.1 Données Collectées pour l'élaboration des cartes

Pour notre cas d'étude, de nombreuses données ont été collectées par plusieurs méthodes et en des points différents. La synthèse des données et documents recueillis sont représentées dans tableau au-dessous.

Les données, qui devraient être collectées pour gérer convenablement ces débordements ont été retrouvées sur l'ensemble des fichiers numériques et rapports études, de diagnostic et de réhabilitation des réseaux d'assainissement de la ville de Bejaia (SCE-EHE/SEPTEMBRE 2016), le rapport hydrologique et hydraulique de l'étude d'avant-projet détaillé de la liaison autoroutière reliant le port de Bejaia à l'autoroute est-ouest au niveau d'ahnif sur 100 km, ainsi que les résultats de la modélisation hydraulique de l'étude de la protection de la ville de BEJAIA contre l'inondation réalisée par l'INGEROP ALGERIE en mai 2006, pour les deux crues qui ont frappé la région à savoir la crue du 6/7 décembre 2002 et 3/4/5 avril 2003. De série des cartes de l'Institut National de Cartographie et Télédétection (INCT), comme cartes d'états-majors (Carte d'état-major d'une échelle de 1/50000 année 1965, 1986 et d'une échelle de 1/25000 année de 1988), une carte géologique (Carte d'une échelle de 1/50000, année 1936), des séries de données de l'Office National de Météorologie (ONM), des fiches et bulletins d'enregistrement aux prêts des différents services public(ONA, APC, protection civil), des Plans d'Occupation des Sols(POS) à travers les quartiers situés le long du périmètres de la ville, et des plans PDAU intercommunales mise à jour en 2014 par la Direction de l'Urbanisme et de la Construction (DUC), une série de des images aériens 1958 et 1973 et les images satellitaires (Google earth), photos, Internet, Vidéos, Film, ... etc.

Tableau 4-1: Synthèse de document et de données recueillies

Source	Données recueillies			
	Noms/Nature	Type	Date	Format
ONA : Office nationale d'assainissement de Bejaia	BMS : Bulletin Météo Spécial	Bulletins	2011/ 2017	Word
	Liste des points de débordement	Document	2017	Word
	Rapport d'enquête sur les débordements	Enquête	2017	Word
	Étude de diagnostic et de réhabilitation de réseau d'assainissement de la ville de Bejaia, réalisé par BET SCE-EHE/SEPTEMBRE 2016 pour l'ONA	Étude	2016	Word
	Carte de la commune de Bejaia et Synthèse de composantes du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia	Base de données	2017	Numériques
DHW : Direction d'hydraulique de Bejaia	Étude de la protection de la ville de BEJAIA contre l'inondation réalisée par l'INGEROP ALGERIE pour DHW en mai 2006, pour les deux crues qui ont frappé la région à savoir la crue du 6/7 décembre 2002 et 3/4/5 avril 2003	Étude	2006	fichiers numériques
ONM : Office Nationale de météorologie	Données de caractéristiques de pluie d'inondations (date, hauteur, durées, type de pluie).	Mesures	2003-2017	Word
DUCH : Direction d'urbanisme la de constriction et l'Habita	Série des cartes de l'Institut National de Cartographie et Télédétection (INCT), cartes d'états-majors d'une échelle de 1/50000 année 1965, 1986, d'échelle de 1/25000 année de 1988, une carte géologique d'une échelle de 1/50000 année 1936	Cartes	2016	Photos
DPC : Direction de Protection Civile	La recherche s'est appuyée sur les observations visuelles du site sur une série de cartes d'états-majors (Carte d'état-major d'une échelle de 1/50000 année 1965 et d'une échelle de 1/25000 année de 1988), une carte géologique (Carte d'une échelle de 1/50000, année 1936), des images aériennes prises en 1958 et 1973	cartes	2015	Photos
BET : Bureau d'Étude AXXAM	Plans d'Occupation des Sols (POS et des plans PDAU intercommunales mise à jour en 2014 par la Direction de l'Urbanisme et de la Construction (DUC)	Document	2015	numériques
	Une série de des images aériennes 1958 et 1973	cartes	2015	numériques
Terrain	Rapport hydrologique et hydraulique de l'étude d'avant-projet détaillé de la liaison autoroutière reliant le port de Bejaïa à l'autoroute est-ouest au niveau d'Ahnif sur 100 km	Étude	2014	Word
	Visite des lieux de débordement	Enquête	2015/ 2018	Word
	Photographie de zone d'étude	Enquête	2015/ 2018	Photos
	Internet, images satellitaires (Google earth), photos, Vidéos, Film, ... etc.	Divers	---	observations

4.3.2 Réseau pluvial de la ville

La connaissance détaillée du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia est essentielle pour étudier les inondations pluviales. Une cartographie précise du réseau d'assainissement de Bejaia

nous aidera à localiser les points faibles du réseau pluvial et à délimiter précisément les zones les plus exposées au risque de points noirs.

4.3.2.1 Carte réseau d'assainissement de la ville

Le réseau d'assainissement de la ville de Bejaia est illustré dans la **Figure 4-6**, qui présente une vue générale des différentes parties du réseau destinées à l'évacuation des eaux usées et le drainage des pluviométriques dans la ville. Les premières canalisations se construisent dans l'ancienne ville, où se pratique une politique de grands travaux dans la ville et d'urbanisme à Bejaia.

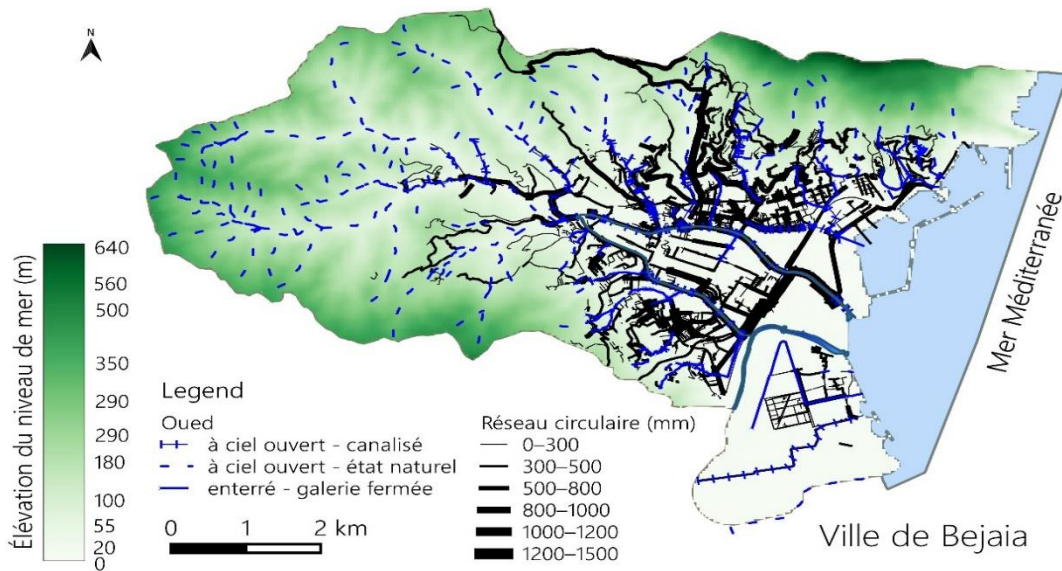


Figure 4-6 : Réseaux d'assainissement de ville de Bejaia

Le moment fort de l'histoire des égouts de Bejaia est la période de construction des galeries. Ces réseaux sont construits en pierre maçonnerie selon la topographie du terrain, et dans la possibilité d'avoir la double fonction d'évacuation des eaux pluviales, de lavage des chaussées, et ménagères et d'accueil des réseaux divers.

À présent, le réseau d'assainissement de la ville de Bejaia est majoritairement unitaire et enterré. Le choix entre un réseau séparatif et unitaire n'a pas été envisagé à l'époque, car aucun nouveau cycle n'avait été développé. Il a fallu attendre le début des années 2017 pour commencer à restructurer le réseau d'assainissement en préparant des études et en séparant les eaux usées des eaux pluviales.

4.3.2.2 Les oueds principaux de la ville

La ville de Bejaia est traversée par plusieurs oueds qui jouent un rôle important dans le drainage des eaux pluviales. Bejaia est drainée par de nombreux oueds, Ighzer et Chaaba, ainsi que par des canaux aménagés en béton, à ciel ouvert ou enterrés. La ville est caractérisée en particulier par la

présence de l'Oued Soummam, ainsi que d'autres oueds de moindre importance provenant des hauteurs des montagnes de Mezzaia et Gouraya.

Les principaux oueds de la ville de Bejaia sont :

- **Oued Soummam** : Draine un bassin versant d'une superficie de 9 200 km², englobant les bassins de l'Oued Sahel (3 750 km²), de l'Oued Boussellam (4 500 km²) et de l'Oued Soummam au sens strict (950 km²) (Zerrourou, 1990).
- **Oued Serir**, Oued Serir : Le plus important après l'Oued Soummam. Il prend naissance à Tazeboudjt et sépare au sud la zone industrielle d'Ighil Azoug avant de se jeter dans l'Oued Soummam. Conçu pour protéger la ville contre les inondations, il a été aménagé en béton pour séparer plusieurs surfaces du bassin de l'Oued Seghir. Plusieurs affluents y sont connectés, notamment ceux provenant de la route nationale RN12 (Oued Bir Selam), de l'Oued Ihadaden, de l'Oued n'Savone, de l'Oued Laazib, de l'Oued Laamrache, et de l'Oued Bouhoual et Ighzer Bou Auinane.
- **Oued Seghir** : Connecté à l'Oued Serir à Tazeboudjt, il se déverse dans la mer et est entièrement aménagé en béton. L'Oued Seghir joue deux rôles principaux : celui de trop-plein de l'Oued Serir et celui de transporteur des effluents de plusieurs autres oueds. Parmi les oueds connectés figurent l'Oued Sidi Ahmed, l'Oued n'Dfali, et l'Oued Segouili.

Il y a également d'autres oueds qui drainent les eaux pluviales et traversent la ville avant de se déverser dans la mer, tels que :

- **Oued Salomon** démarre des hauteurs du Djebel Gouraya, traverse plusieurs endroits et quartiers, et sépare une caserne militaire de l'école des cadets de la ville avant de rejoindre directement l'arrière-port (la mer Méditerranée). Cet oued est traversé une dizaine de fois par les routes, souvent couvert par des cadres ou des dalles lorsqu'il serpente à travers les zones les plus urbanisées de Bejaia. La partie aval est couverte, passant sous le port et la route de l'arrière-port, puis l'oued est à nouveau ouvert jusqu'à la caserne. Dans cette section ouverte, l'oued Salomon connecte les eaux de l'oued Danous. Cet affluent est assez important et traverse également une zone urbanisée, la cité Tobal.

Oued Romaine, à l'instar de l'oued Salomon, prend son origine dans les hauteurs du Djebel Gouraya et se dirige vers le port de Bejaia. La section d'écoulement dans la zone urbaine est couverte, tandis que dans la montagne, elle reste ouverte et naturelle. L'oued est traversé par plusieurs routes, et entre ces sections, il reçoit les eaux de l'oued Bois Sacré.

- **Oued Ouchaalal** prend son origine dans les hauteurs du Djebel Gouraya et se déverse dans la mer près du Fort Sidi Abd El Kader. Ce collecteur traverse l'ancienne ville de Bejaia, reliant plusieurs quartiers et passant par la rue Chellouah, le boulevard Bouaouina, et la Rampe Ali Rebhi. En amont, l'oued reçoit un affluent provenant du flanc du Djebel Gouraya, près de la rue Benatia, puis de l'École Mansour, où il se raccorde au niveau de l'intersection avec la rue Mohamed El Hadoui.

- **Oued les oliviers** est le plus petit des oueds de la ville de Bejaia. Il prend sa source près du cimetière chrétien, passe à proximité de l'aire de jeux, et se termine à la brise de mer.

Les informations recueillies sur les différentes composantes des oueds de la ville de Bejaia sont présentées dans la Figure 4 6 et enregistrées dans la table des attributs (Qgis).

4.3.2.3 Description du Réseau d'Assainissement de la Ville

La mission consiste à connaître en détail les caractéristiques du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia, incluant le mode de fonctionnement, le linéaire, le type, la nature, la géométrie, les matériaux, l'âge et la profondeur des conduites. Les points essentiels relevés sont les suivants (ONA, 2017) :

- **Mode de fonctionnement** : Le réseau d'assainissement de Bejaia fonctionne principalement par gravité, que ce soit pour les réseaux naturels ou artificiels. La topographie exerce généralement une influence dominante sur le fonctionnement des collecteurs.
- **Linéaire du réseau** : Le linéaire total du réseau artificiel est d'environ 312,6 km. Parmi cela, 26,1 km concernent des oueds et chaaba recouverts, 20,1 km sont des canaux à ciel ouvert, et 359 km constituent le linéaire total. Une partie du réseau, estimée à 125 km, est constituée de réseaux publics non accessibles et non recensés (réseaux tertiaires) ou de réseaux spontanés créés par des riverains sans plans de raccordement directs.
- **Nature du réseau (Type)** : Le réseau d'assainissement de Bejaia est en grande partie unitaire, représentant 49,6 % (155,177 km). Les réseaux d'eaux pluviales constituent 21,9 % (68,301 km), tandis que le reste concerne les eaux usées (88,320 km).
- **Géométrie des collecteurs** : Le réseau présente diverses formes géométriques : ovoïde, trapézoïdale, cadre rectangulaire, cunettes, banquettes et fossés. Pour les formes circulaires, 91,9 % du réseau a un diamètre compris entre 200 et 650 mm, 7,6 % entre 700 et 1500 mm, et 0,5 % inférieur à 200 mm. Les formes cadre et trapézoïdales sont également présentes.
- **Matériaux des conduites** : 79,56 % du linéaire total (312,562 ml) est en béton. Le PVC lisse représente 13,52 %, tandis que le PEHD, la brique et l'acier représentent moins de 0,52 %. Le reste n'est pas renseigné.
- **Âge des conduites** : Plus de 88,32 % du linéaire total n'est pas renseigné quant à son âge. Les autres conduites se répartissent comme suit : 0,02 % avant 1983, 8,64 % avant 1996, et le reste après 1996.
- **Profondeur des conduites** : Le taux de renseignement sur la profondeur des conduites enterrées est de 59,21 % du réseau total. Parmi les conduites renseignées, 10,29 % sont inférieures à 1 m, 85,01 % se situent entre 1 m et 3 m, et 4,7 % entre 3 m et 7 m.

Le développement urbain dans la plaine et ses environs, la concentration des points de rejet, et le dimensionnement optimisé des canalisations pour limiter les coûts ont entraîné une insuffisance

d'espaces dédiés à une bonne pratique de l'assainissement urbain, ainsi qu'une réduction de la section d'écoulement des collecteurs...

4.3.3 Recensement des points noirs

Le recensement des points noirs (PN) du réseau d'assainissement de la ville de Bejaia a été réalisé en collaboration avec les services chargés de la prévention et de la sécurité l'ONA, l'APC et la DRE. Tellement la liste disponible sur les inondations passées est incomplète et nécessite d'être mise à jour dans un cadre hydraulique plus important qu'auparavant, donc il est demandé à nous de conduire le recensement des PN du système d'assainissement pluvial de la ville complète et de solliciter les agents locaux à organiser des sorties sur sites dont elles ont la charge.

Cette opération s'achève et conduira à la préparation d'une liste finale de 125 points noirs. La réparation des points identifiés sur trois types de point noir est illustré dans la figure au-dessous :

- Type a1, débordement du réseau à ciel ouvert (Traçons du canal, oued, Ighzer, Chaaba rivière)
- Type a2, débordement au passage d'écoulement : Traversé de route, piste, chemin, espace urbanisé sur un ruisseau, ...
- Type a3, débordement du réseau enterré : Regard, avaloir, régulateur de niveau, déversoir,

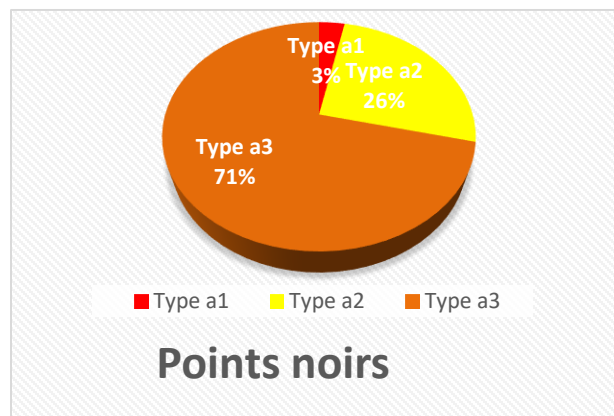


Figure 4-7 : Débordements à ciel ouverts, enterrés et mixte

Ce travail est axé sur l'identification des zones critiques en matière de débordements, en mettant l'accent sur les secteurs les plus exposés au risque d'inondation et aux problématiques liées à l'assainissement pluvial, telles que :

- Réseaux de circulation : La grande évolution des moyens de communication, et de transports fait que la largeur des routes est plus importante que la connexité des réseaux hydrographiques. Il y a lieu de distinguer cependant une échelle de production des inondations dans cette zone de rupture. La production la plus dense se concentre au niveau de l'axe qui reliant Bir-Slam, Ighil-Ouazoug , Iheddaden, Tajzeboucht, Université, Stade Amriw polyvalent Daouadji, wilaya, nouvelle-Ville, Lakhmis , Porte-Sarasine et Bris de mer.
- Ronds-Points et les intersections situés à proximité de la zone de rupture l'université de Bejaia de Daoudji, situé au cœur de la ville, rond-point d'Amriou et de Sidi Ahmed.

- La plaine et l’embouchure de l’oued de Soummam, situé au centre-ville et terrain de Zidi Ali labher
- Quartiers de l’ancienne ville, quartier Seghir et Naceria

La liste rassemble les débordements déclarés par les agents du terrain, les anciens habitant et les points indiqués sur photos qu’ont été prise sur places le jour d’inondation (voir **Figure 2-13** à 2.14).

4.3.4 Débordements passés et zones d’inondations dans la ville de Bejaia

Chaque point recensé est localisé sur carte et résultat obtenu est présenté sur carte (**Figure 4-8**). La délimitation manuelle des zones touchée constituent un moyen pour obtenir une cartographie de l’étendue des surfaces inondées. Les informations issues des prises de vue satellitaire, les données géographiques, cartes d’états-majors, Servent de base pour finaliser l’élaboration de cartes. Pour numériser l’étendue des inondations passées nous avons utilisé logiciel Qgis.

Les étendues des d’inondations en ville de Bejaia ont été bénévolement représentées par des formes géométriques multiples (rectangle, carrés, ellipses et cercles ...). L’objectif d’une part, les formes géométriques tranchent visuellement avec la forme naturelle des objets du territoire, eux majoritairement constitués de lignes courbes, et rendent plus saillante cette information. D’autre part, la signification des étendues spatiales sélectionnées est en fait très générale.

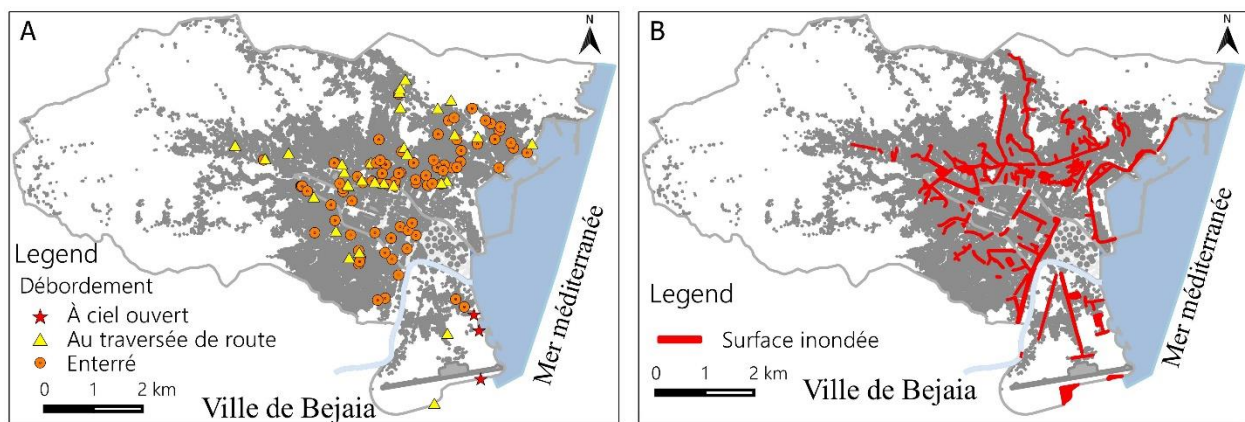


Figure 4-8 : Carte des débordements passés ; (A) Types de débordements ; (B) Carte des Surfaces inondées

Dans ce travail, les anciennes cartes conservent leur importance en tant que témoins précieux de l'évolution du paysage. Grâce au logiciel QGIS, nous avons pu présenter et superposer plusieurs cartes, notamment celles du réseau hydrographique (oueds, mer), du réseau d'assainissement, ainsi que des différentes occupations du sol. Cette approche permet une analyse approfondie et une meilleure compréhension des interactions entre ces éléments au fil du temps.

Diverses surfaces de formes simple qui peuvent être déclinées ou facilement identifiables, par contre plusieurs formes de surfaces ces limites ont été retrouvée à l'interaction des limites

retrouvées et fondent sur une recherche historique présumées, constatées et reposent sur la perception de l'existant, ou de limites présumées, qui sont établies sur la base d'une approche prospective

Ces zones touchées par les inondations pluviales sont souvent marquées par des défaillances dans le réseau pluvial qui entraîne des impacts significatifs sur les activités urbaines et la qualité de vie, notamment des perturbations urbaines importantes. Aussi, nous nous sommes appuyés sur des expérimentations dans différents acteurs pilotes et nous avons relevé, aux cours de nos déplacements, un certain nombre de points où des perturbations pourraient arriver.

4.4 Évaluation des critères – Performances

L'attribution des notes aux douze critères retenus est une étape capitale dans l'évaluation multicritère des points d'inondations (PN) dans un milieu urbain. Cette étape consiste à attribuer une note à chaque point noir pour chaque critère, ensuite, de comparer et de classer les points noirs en fonction de leur importance relative.

Pour chaque critère, une échelle de notation est définie dans **Tableau 3-1**. Les données nécessaires pour chaque critère sont collectées. Par exemple, pour la surface touchée ou d'inondation, on peut se baser sur des rapports historiques, des observations locales, ou des études hydrauliques.

Pour la gravité des impacts, on peut utiliser des rapports de dommages ou des évaluations des services d'urgence. Dans certains cas, des travaux ou des cartes spécifiques peuvent être utilisés pour évaluer quantitativement certains critères, surtout lorsque les données sont limitées.

Pour analyser l'influence des apports des bassins versants, un ensemble de cartes (Limites des BVs, occupation du sol, réseau pluvial) a été élaboré (Voir annexe A). Ces cartes permettent de visualiser et de quantifier divers paramètres hydrologiques et réseaux de ruisseaux des bassins versants.

4.4.1 Perturbation du trafic (C₁)

Chaque point noir est évalué en fonction de la gravité de la perturbation qu'il cause. Par exemple, un point noir peut recevoir un score de 0.3 à 1, où 0.3 représente une perturbation minimale (la voie est peu fréquentée et 1 une perturbation majeure (la voie très fréquentée).

Pour les 125 points noirs analysés, les résultats d'évaluation du critère de perturbation de la circulation sont les suivants :

Tableau 4-2 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₁

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
48	Faible	<p style="text-align: center;">C₁ : Perturbation du trafic</p> <p style="text-align: right;"> ■ P= 0.3 ■ P = 0.7 ■ P= 1 </p>
51	Moyenne	
26	Forte	

- **Perturbation faible : 38.40%** des points noirs, indiquant que presque la moitié des sites évalués ont un impact minimal sur la circulation. Ces zones pourraient connaître des impacts mineurs ou des interruptions qui ne perturbent pas significativement le trafic.
- **Perturbation moyenne : 40.80%** des points noirs, ce qui montre qu'une majorité de ces points présentent des perturbations modérées. Ces zones pourraient nécessiter des interventions pour maintenir un flux de trafic acceptable.
- **Perturbation forte : 20.80%** des points noirs, impliquant des perturbations graves qui affectent considérablement le flux de trafic. Ces zones sont probablement prioritaires pour des travaux d'amélioration infrastructurelle, car elles causent des interruptions significatives ou prolongées du trafic.

4.4.2 Sensibilité de la zone touchée (C₂)

Le résultat de l'évaluation des points noirs (PNs) vis-à-vis du critère de "Sensibilité de la zone touchée" sont donnés dans **Tableau 4-3** :

Tableau 4-3 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₂

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
50	Faible	<p style="text-align: center;">C₂ : Sensibilité de la zone touchée</p> <p style="text-align: right;"> ■ P= 0.3 ■ P = 0.7 ■ P= 1 </p>
54	Moyenne	
21	Forte	

Le résultat de l'évaluation des points noirs (PNs) par rapport au critère de "Sensibilité de la zone touchée" indique la gravité de l'impact potentiel de ces points noirs sur leur environnement, notamment en termes, de population, de structures et d'activités (aspects critiques).

- **Performance faible (40.00% avec une note de 0.3) :** Cette proportion des points noirs présente une sensibilité faible, ce qui signifie que les zones touchées par ces PN ont un impact limité ou négligeable sur les résidents ou les activités. Les risques associés à ces PN sont relativement mineurs, et les zones concernées sont moins peuplées, moins développées et moins critiques en termes d'activités sensibles.
- **Performance moyenne (43.20% avec une note de 0.7) :** "La majorité des points noirs (43,20 %) ont une sensibilité moyenne. Cela suggère que les zones touchées sont modérément affectées, ce qui inclut des perturbations significatives, mais pas graves. Ces zones pourraient nécessiter une attention particulière si la surface et la hauteur d'inondation sont importantes, mais les interventions ne sont pas aussi urgentes ou critiques que pour les zones à sensibilité élevée."
- **Performance forte (16.80% avec une note de 1) :** Une minorité des points noirs (16.80%) sont dans des zones de haute sensibilité, où les impacts potentiels sont graves. Ces zones sont densément peuplées, et la présence de structures à activité sensible ou importantes. Les risques associés à ces PN sont élevés, et les interventions sont prioritaires pour éviter des dommages considérables.

4.4.3 Surface inondée (C₃)

L'évaluation des points noirs (PNs) vis-à-vis du critère "Surface inondée" révèle des variations significatives (**Tableau 4-4**) dans la performance des zones touchées.

Tableau 4-4 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₃

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
42	Faible	<div style="text-align: center;"> <p>C₃ : Surface inondée</p> </div>
27	Moyenne	
56	Forte	

- **Performance faible (33,60 %) :** Un tiers des points noirs affichent une faible performance, ce qui signifie que la surface inondée dans ces zones est relativement limitée. Ces zones ont des impacts locaux, et les inondations ne couvrent pas une grande superficie. Par

conséquent, les interventions nécessaires pour réduire les risques sont moins urgentes, bien que ces zones puissent encore nécessiter des mesures préventives pour éviter des problèmes futurs.

- **Performance moyenne (21,60 %)** : Un peu plus d'un cinquième des points noirs ont une performance moyenne, indiquant que la surface inondée est modérément importante. Ces zones présentent des risques plus important, avec des inondations qui couvrent des surfaces considérables. Les interventions dans ces zones nécessitent une attention particulière pour réduire les impacts potentiels sur la population, beaucoup plus si ces zones sont fréquentées.
- **Performance forte (44,80 %)** : Près de la moitié des points noirs présentent une performance forte, ce qui indique que la surface inondée dans ces zones est importante. Ces zones sont les plus critiques, car les inondations y couvrent de vastes superficies, affectant potentiellement de nombreuses personnes et activités. Les interventions dans ces zones sont prioritaires pour prévenir des dommages graves et coûteux, nécessitant des travaux d'aménagement et de réhabilitation importants pour atténuer les risques d'inondation.

4.4.4 Hauteur d'inondation (C₄)

Le résultat de l'évaluation des points noirs en fonction du critère "Hauteur d'inondation" montre (Tableau 4-5) que :

Tableau 4-5 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₄

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
60	Faible	<div style="text-align: center;"> <p>C₄ : Hauteur d'inondation</p> </div>
33	Moyenne	
32	Forte	

- **48.00%** des points noirs ont une performance faible, ce qui signifie que près de la moitié des zones évaluées sont peu touchées par des hauteurs d'eau significatives lors d'inondations. Dans ces zones, les inondations ont tendance à être superficielles, provoquant ainsi des dommages relativement limités. Ces sites peuvent nécessiter des interventions moins urgentes et des mesures de gestion des eaux moins intensives.
- **26.40%** des points noirs présentent une performance moyenne, indiquant que plus d'un quart des zones sont modérément affectées par des inondations. La hauteur d'eau dans ces zones est suffisante pour causer des perturbations notables, affectant potentiellement la

circulation et les structures locales. Ces zones doivent être surveillées de près et peuvent nécessiter des interventions pour limiter les impacts des inondations à l'avenir.

- **25.60%** des points noirs affichent une performance forte, signalant que ces zones sont gravement touchées par des hauteurs d'eau importantes lors d'inondations. Les risques d'inondation dans ces zones sont élevés, avec des impacts considérables sur les personnes, les biens, et les structures. Ces points noirs nécessitent une attention prioritaire pour mettre en place des mesures de protection efficaces, telles que l'implantation des techniques compensatoires et la réhabilitation des parties du réseau touché.

4.4.5 Surface (A) (C₅)

La majorité des points noirs identifiés sont gravement affectés par de grandes surfaces de bassins versants. Cette tendance est mise en évidence par l'évaluation des points noirs (PNs) selon le critère "Surface du bassin versant," présentée dans le **Tableau 4-6**.

Tableau 4-6 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₅

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
14	Faible	<p style="text-align: center;">C₅ : Surface A</p>
38	Moyenne	
73	Forte	

Ce tableau révèle que :

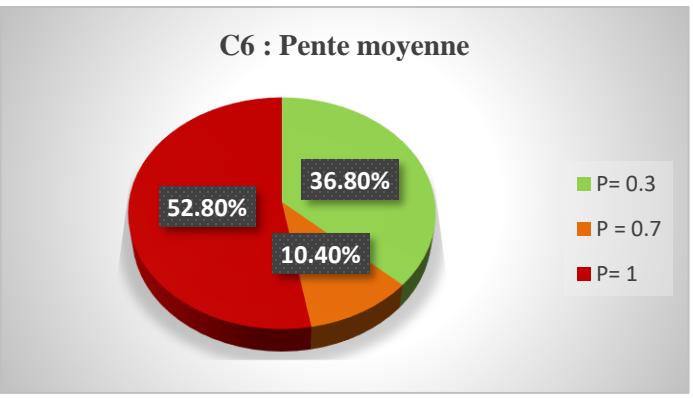
- 58.40% des points noirs ont une performance forte, ce qui signifie qu'ils se trouvent dans des zones où le bassin versant couvre une grande surface. Ces zones sont particulièrement exposées aux risques d'inondation, car de vastes bassins versants accumulent et dirigent d'importantes quantités d'eau de pluie vers des points spécifiques, augmentant ainsi la probabilité d'inondations.
- En parallèle, 30.40% des points noirs présentent une performance moyenne. Cela suggère que ces zones, bien que moins critiques, sont encore significativement influencées par la taille de leur bassin versant, nécessitant des mesures de gestion du risque adaptées pour minimiser les impacts potentiels.

- Enfin, 11.20% des points noirs ont une performance faible, indiquant que la surface du bassin versant dans ces zones est relativement petite, et que les risques d'inondation y sont moins prononcés.

4.4.6 Pente moyenne (C₆)

L'évaluation des points noirs (PNs) en fonction du critère "Pente moyenne du bassin versant" révèle que les caractéristiques de pente jouent un rôle déterminant dans le risque d'inondation dans la ville de Bejaia.

Tableau 4-7 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₆

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
46	Faible	<p style="text-align: center;">C₆ : Pente moyenne</p> 
13	Moyenne	
66	Forte	

- **Performance Forte (52.80%)** : Plus de la moitié des points noirs présentent une pente moyenne élevée, ce qui indique que ces zones sont fortement inclinées (la ville entourée par les montagnes). Dans les bassins versants avec une pente forte, les eaux pluviales s'écoulent rapidement vers le bas, augmentant la vitesse de ruissellement et la probabilité d'inondations soudaines. Ces zones sont particulièrement sensibles aux inondations rapides et aux coulées de matières solides, et nécessitent des mesures préventives telles que des systèmes de drainage efficaces et des techniques de stockages des EP.
- **Performance Moyenne (10.40%)** : Une minorité des points noirs ont une pente moyenne modérée. Ces zones, bien que moins à risque que celles à pente forte, présentent toujours des défis en termes de gestion des eaux pluviales. La gestion du ruissellement dans ces bassins versants nécessite une approche équilibrée pour ralentir l'écoulement de l'eau et prévenir les inondations.
- **Performance Faible (36.80%)** : Un peu plus d'un tiers des points noirs ont une pente faible. Dans ces zones, l'eau de pluie s'écoule plus lentement, ce qui peut réduire le risque d'inondation immédiate, mais augmente la probabilité de stagnation de l'eau, ce qui peut causer des inondations prolongées et des problèmes d'assainissement.

4.4.7 Allongement M (C₇)

L'évaluation (**Tableau 4-8**) des points noirs (PNs) par rapport au critère « Allongement du bassin versant » est la suivante :

Tableau 4-8 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₇

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
77	Faible	<p style="text-align: center;">C₇ : Allongement M</p>
0	Moyenne	
48	Forte	

- **Performance Faible (61,6%)** : La majorité des points noirs, représentant 61,6% de la liste, ont obtenu une performance faible avec une note de 0,3. Cela indique que ces bassins versants sont allongés, ce qui pourrait contribuer à augmenter le temps de réponse.
- **Performance Forte (38,4%)** : Une proportion de 38,4% des points noirs a montré une performance forte avec une note de 1. Ces bassins versants ramassés présentent des caractéristiques favorables à l'augmentation rapide des surfaces actives, ce qui pourrait indiquer une plus grande propension aux problèmes d'inondation.

4.4.8 Temps de concentration tc (C₈)

L'évaluation des points noirs (PNs) par rapport au critère « Temps de concentration (tc) » a révélé les résultats (**Tableau 4-9**) suivants :

Tableau 4-9 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₈

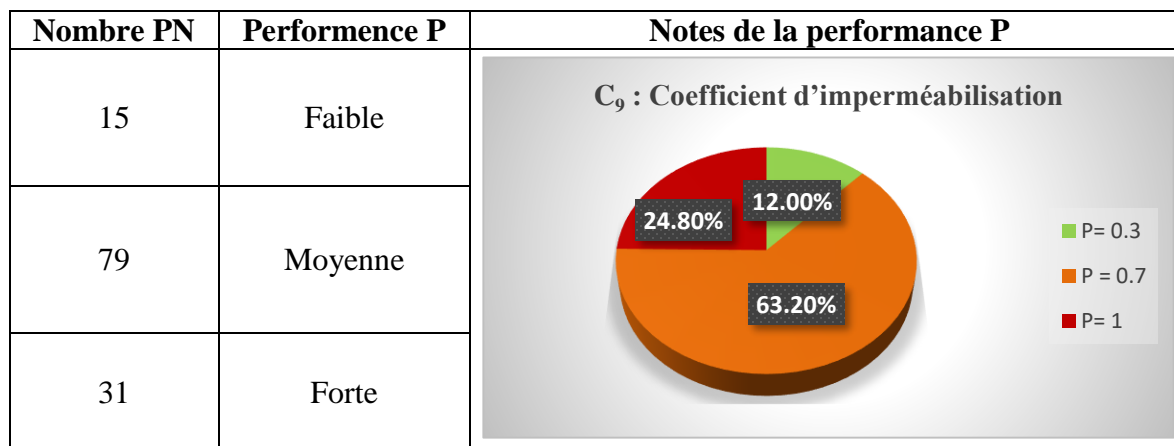
Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
25	Faible	<p style="text-align: center;">C8 : Temps de concentration tc</p>
75	Moyenne	
25	Forte	

- **Performance Faible (20%)** : Un cinquième des points noirs a obtenu une performance faible avec une note de 0,3. Cela signifie que ces bassins ont une pente I faible et un allongement E fort (temps de concentration relativement long), ce qui indique un drainage plus lent et une réaction plus tardive aux précipitations. Dans ces bassins versants, les inondations peuvent prendre plus de temps à se manifester, mais cela n'exclut pas des risques potentiels sur le long terme.
- **Performance Moyenne (60%)** : La majorité des points noirs, soit 60%, a montré une performance moyenne avec une note de 0,7. Ces zones ont une pente I faible et un allongement E faible ou une pente I forte et un allongement E fort (temps de concentration modéré), indiquant une réaction intermédiaire aux événements pluvieux. Les inondations dans ces zones peuvent survenir plus rapidement que dans celles avec une performance faible, mais elles sont moins instantanées que dans les zones avec une performance forte. Ce groupe de PN représente un risque significatif, nécessitant une surveillance continue et des mesures de prévention adéquates.
- **Performance Forte (20%)** : Un autre cinquième des points noirs a affiché une performance forte avec une note de 1. Ces zones sont caractérisées par un temps de concentration court (une pente I forte et un allongement E faible), ce qui signifie que les eaux de ruissellement atteignent rapidement les points de convergence. Cela augmente le risque d'inondation rapide, rendant ces zones particulièrement vulnérables. Les bassins versants avec une performance forte nécessitent des interventions immédiates et des stratégies d'aménagement pour réduire les impacts des inondations soudaines.

4.4.9 Coefficient d'imperméabilisation (C₉)

L'évaluation des points noirs (PN) par rapport au critère « Coefficient d'imperméabilisation » a produit les résultats (**Tableau 4-10**) suivants :

Tableau 4-10 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₉



- **Performance Faible (12.00%)** : Seulement 12% des points noirs évalués ont une faible imperméabilisation, avec une note de 0,3. Cela indique que ces zones ont un sol et une couverture terrestre qui permettent une bonne infiltration de l'eau, réduisant ainsi le risque de ruissellement excessif et d'inondation. Les surfaces dans ces bassins versants sont principalement perméables, ce qui signifie que l'eau de pluie peut pénétrer dans le sol plutôt que de s'accumuler en surface.
- **Performance Moyenne (63.20%)** : Une majorité des points noirs, soit 63,2%, présente une imperméabilisation moyenne avec une note de 0,7. Ces zones ont une balance entre surfaces perméables et imperméables, ce qui implique qu'une partie de l'eau s'infiltré tandis qu'une autre partie ruisselle, augmentant ainsi le potentiel d'inondation modérée. Ces zones pourraient nécessiter des mesures de gestion de l'eau pour valoriser l'infiltration et de faire limite au ruissellement.
- **Performance Forte (24.80%)** : Enfin, 24,8% des points noirs montrent une imperméabilisation élevée, avec une note de 1. Ces zones sont fortement imperméables, ce qui signifie que l'eau ne peut pas s'infiltrer dans le sol, entraînant un ruissellement rapide et potentiellement des inondations. Ces bassins versants sont particulièrement vulnérables aux inondations, et des interventions sur site ou des solutions alternatives verte pourraient être nécessaires pour réduire les risques.

4.4.10 Lacune observée (Cause du débordement) (C₁₀)

L'évaluation des points noirs (PNs) en fonction du critère "Lacune observée sur réseau pluvial ou l'ouvrage débordant (Cause du débordement)" a donné les résultats suivants :

Tableau 4-11 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₁₀

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
44	Faible	<p>C₁₀ : Lacune observée (Cause du débordement)</p>
69	Moyenne	
12	Forte	

- **Performance Forte (44.80%)** : Près de la moitié des points noirs ont une performance forte avec une note de 1, ce qui révèle des lacunes significatives (Encrassement total (Obturation)) dans le réseau pluvial ou des ouvrages débordants fréquents. Ces zones sont les plus vulnérables, avec des ouvrages dysfonctionnés, entraînant des débordements réguliers et des risques élevés d'inondation. Des interventions majeures sont nécessaires dans ces zones pour réhabiliter ou remplacer les ouvrages existants et réduire la fréquence et l'impact des débordements.
- **Performance Moyenne (21.60%)** : Un peu plus d'un cinquième des points noirs ont une performance moyenne avec une note de 0,7. Ces zones présentent des problèmes modérés liés à des lacunes (Sous-dimensionnement ou encrassement partiel) dans le réseau pluvial. Ici, les capacités hydrauliques des ouvrages débordants peuvent parfois être insuffisantes pour gérer les eaux de pluie, ce qui peut entraîner des débordements occasionnels. Ces zones pourraient bénéficier d'améliorations ciblées pour renforcer la capacité de drainage et réduire le risque d'inondation.
- **Performance Faible (33.60%)** : Environ un tiers des points noirs ont obtenu une note de 0,3, ce qui indique une faible présence de lacunes ou d'insuffisances dans le réseau pluvial ou les ouvrages de drainage. Dans ces zones, les parties du réseau existant sont relativement efficaces, avec peu de défaillances observées. Cela signifie que les débordements sont rares ou que les systèmes en place parviennent généralement à gérer les flux d'eau sans provoquer de problèmes majeurs. Ces zones nécessitent donc moins d'interventions correctives.

4.4.11 Tronçon amont (C₁₁)

L'évaluation des points noirs (PNs) en fonction du critère "Tronçon amont ouverts ou fermé" a montré les résultats suivants :

Tableau 4-12 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₁₁

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
65	Non vulnérable	<p style="text-align: center;">C₁₁ : Tronçon amont</p>
62	Vulnérable	

- **Performance Non Vulnérable (52.20%)** : Plus de la moitié des points noirs, soit 52.20%, ont obtenu une note de 0, ce qui signifie que ces zones ne sont pas considérées comme vulnérables. Ces points noirs sont caractérisés par des réseaux amont fermés, ce qui signifie que l'absence d'exposition directe aux flux d'eau pluvial en amont réduit considérablement le risque de débordement ou d'inondation. Ces points noirs sont donc moins préoccupants en termes de gestion des risques d'inondation.
- **Performance Vulnérable (48.00%)** : Presque la moitié des points noirs, soit 48.00%, ont une note de 0.5, indiquant une certaine vulnérabilité. Ces zones sont caractérisées par des réseaux amont ouverts, ce qui signifie que les tronçons de drainage ne sont pas entièrement fermés ou couverts. Les réseaux ouverts sont souvent plus vulnérables aux obstructions, à l'accumulation de débris, et à l'érosion, ce qui peut réduire leur efficacité et augmenter le risque de perturbations lors de fortes pluies.

4.4.12 Jonction (C₁₂)

L'évaluation des points noirs (PNs) en fonction du critère « Jonction Oui (Vulnérable) ou Non (Non vulnérable) » a montré les résultats suivants :

Tableau 4-13 : La notation de la performance P vis-à-vis critère C₁₂

Nombre PN	Performance P	Notes de la performance P
52	Non vulnérable	<p style="text-align: center;">C₁₂ : Jonction</p>
73	Vulnérable	

- **Performance Non Vulnérable (42.00%)** : Une proportion de 42% des points noirs a obtenu une note de 0, ce qui signifie qu'ils ne sont pas vulnérables selon ce critère. Ces points noirs sont caractérisés par l'absence de jonction, ce qui signifie qu'ils ne sont pas situés à l'intersection de deux ou plusieurs flux d'eau. Cette configuration réduit le risque de surcharge et de débordement, car il n'y a pas de point de convergence où les flux d'eau pourraient s'accumuler, augmentant ainsi le potentiel d'inondation.
- **Performance Vulnérable (58.00%)** : La majorité des points noirs, soit 58%, sont considérés comme vulnérables avec une note de 0.5. Ces points sont situés à des jonctions, où plusieurs flux d'eau convergent. Les jonctions sont des points critiques dans les systèmes de drainage, car elles peuvent devenir des passages de suppression si les flux convergents ne sont pas correctement gérés, entraînant une accumulation rapide de l'eau et un risque accru d'inondation.

Les **tableaux 4.14, 4.15 et 4.16** présentent respectivement : la notation des points noirs vis-à-vis des douze critères retenus, les performances associées à chacun de ces critères, ainsi que les notations attribuées aux points noirs vis-à-vis les 12 critères retenus. Ces tableaux contiennent toutes les informations nécessaires pour entamer l'application des méthodes AHP et FMECA.

Tableau 4-14 : Notation des points noirs vis-à-vis les 12 critères retenus

N°PN	Descriptions des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
1	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Faible	Faible	Moyen	Faible	Autre	Ouvert	Fermé
2	V.P. fréquentée	Faible	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
3	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
4	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
5	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
6	V.T. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Important	Grande	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
7	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
8	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
9	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
10	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Moyenne	Faible	Grande	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
11	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
12	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Fermé
13	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
14	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Fermé
15	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Grande	Faible	Forte	Fort	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Fermé
16	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
17	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Elevée	Encrassement-Partiel	Fermé	Fermé
18	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Moyenne	Moyenne	Grande	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
19	V.M.fréquentée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Grande	Faible	Forte	Fort	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
20	V.M.fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Fermé
21	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Fermé
22	V.M.fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
23	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
24	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
25	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Ouvert
26	V.M.fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
27	V.M.fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
28	V.M.fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
29	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
30	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Ouvert
31	V.M.fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
32	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Ouvert
33	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Fermé
34	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
35	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
36	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
37	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert

Chapitre 4 : Application – cas du réseau de la ville de Bejaia

N°PN	Descriptions des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
38	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
39	V.M.fréquentée	Faible	Moyenne	Faible	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
40	V.M.fréquentée	Faible	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
41	V.M.fréquentée	Faible	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Ouvert
42	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
43	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
44	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Ouvert
45	V.P. fréquentée	Faible	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
46	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
47	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Partiel	Ouvert	Fermé
48	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Grande	Faible	Forte	Fort	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
49	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Elevée	Encrassement-Partiel	Fermé	Ouvert
50	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
51	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
52	V.M.fréquentée	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Elevée	Autre	Ouvert	Fermé
53	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
54	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
55	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
56	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
57	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Fermé
58	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
59	V.M.fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Grande	Forte	Forte	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
60	V.P. fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
61	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
62	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
63	V.T. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
64	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Petite	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
65	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
66	V.M.fréquentée	Faible	Moyenne	Faible	Grande	Moyenne	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Ouvert
67	V.M.fréquentée	Faible	Moyenne	Faible	Grande	Moyenne	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Ouvert
68	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Ouvert
69	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
70	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Ouvert	Ouvert
71	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
72	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Fermé
73	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
74	V.M.fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
75	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
76	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé

Chapitre 4 : Application – cas du réseau de la ville de Bejaia

N°PN	Descriptions des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
77	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Fermé
78	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
79	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
80	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
81	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
82	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Elevée	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
83	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Faible	Grande	Forte	Faible	Faible	Elevée	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
84	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Faible	Grande	Forte	Faible	Faible	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
85	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
86	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Fermé
87	V.P. fréquentée	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
88	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
89	V.M.fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Elevée	Autre	Fermé	Ouvert
90	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
91	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Faible	Forte	Fort	Elevée	Autre	Fermé	Fermé
92	V.T. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
93	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Faible	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
94	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
95	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
96	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Sous-dimensionnement	Fermé	Ouvert
97	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
98	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
99	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
100	V.T. fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
101	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
102	V.P. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
103	V.P. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
104	V.T. fréquentée	Faible	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
105	V.P. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
106	V.M.fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
107	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert
108	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
109	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Elevée	Encrassement-partiel	Fermé	Ouvert
110	V.P. fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
111	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Petite	Moyenne	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
112	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Total	Fermé	Ouvert
113	V.M.fréquentée	Forte ou vital	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Fort	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Fermé
114	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Autre	Fermé	Ouvert
115	V.P. fréquentée	Faible	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Encrassement-Total	Ouvert	Ouvert

N°PN	Descriptions des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
116	V.P. fréquentée	Faible	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Ouvert
117	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Faible	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
118	V.P. fréquentée	Faible	Moyenne	Moyenne	Grande	Forte	Forte	Moyen	Elevée	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé
119	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Autre	Ouvert	Ouvert
120	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Autre	Ouvert	Ouvert
121	V.P. fréquentée	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyen	Moyen	Encrassement-partiel	Fermé	Fermé
122	V.P. fréquentée	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Encrassement-Total	Fermé	Ouvert
123	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-partiel	Ouvert	Ouvert
124	V.M.fréquentée	Moyenne	Important	Moyenne	Grande	Forte	Faible	Faible	Moyen	Encrassement-partiel	Ouvert	Ouvert
125	V.T. fréquentée	Forte ou vital	Important	Important	Grande	Forte	Forte	Moyen	Moyen	Sous-dimensionnement	Ouvert	Fermé

Tableau 4-15 : Les performances des douze critères retenus

N°PN	Performances des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
1	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Forte	Moyenne	Faible	Faible	Vulnérable	No vulnérable
2	Faible	Faible	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
3	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
4	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
5	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
6	Forte	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
7	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
8	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
9	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
10	Forte	Forte	Moyenne	Faible	Forte	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
11	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
12	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
13	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
14	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
15	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Forte	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
16	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
17	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
18	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
19	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
20	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
21	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable

Chapitre 4 : Application – cas du réseau de la ville de Bejaia

N°PN	Performances des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
22	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
23	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
24	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
25	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
26	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
27	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
28	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
29	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
30	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
31	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
32	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
33	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
34	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
35	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
36	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
37	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
38	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
39	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
40	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
41	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
42	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
43	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
44	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
45	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
46	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
47	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
48	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
49	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
50	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
51	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
52	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Vulnérable	No vulnérable
53	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
54	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
55	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
56	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
57	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
58	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
59	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
60	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable

Chapitre 4 : Application – cas du réseau de la ville de Bejaia

N°PN	Performances des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
61	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
62	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
63	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
64	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
65	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
66	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
67	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
68	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
69	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Vulnérable	Vulnérable
70	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
71	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
72	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
73	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
74	Moyenne	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
75	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
76	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
77	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	No vulnérable
78	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
79	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
80	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
81	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
82	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
83	Forte	Moyenne	Forte	Faible	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
84	Moyenne	Moyenne	Forte	Faible	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
85	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
86	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	No vulnérable
87	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
88	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
89	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Faible	No vulnérable	Vulnérable
90	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
91	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Forte	Faible	No vulnérable	No vulnérable
92	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
93	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
94	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
95	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
96	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
97	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
98	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
99	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable

N°PN	Performances des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
100	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
101	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
102	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
103	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
104	Forte	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
105	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Forte	Vulnérable	Vulnérable
106	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
107	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Forte	Vulnérable	Vulnérable
108	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
109	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	No vulnérable	Vulnérable
110	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
111	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
112	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	No vulnérable	Vulnérable
113	Moyenne	Forte	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
114	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Faible	No vulnérable	Vulnérable
115	Faible	Faible	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Forte	Vulnérable	Vulnérable
116	Faible	Faible	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Faible	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
117	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
118	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Forte	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable
119	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Vulnérable	Vulnérable
120	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Faible	Vulnérable	Vulnérable
121	Faible	Faible	Faible	Faible	Moyenne	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne	No vulnérable	No vulnérable
122	Faible	Moyenne	Moyenne	Faible	Moyenne	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Forte	No vulnérable	Vulnérable
123	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
124	Moyenne	Moyenne	Forte	Moyenne	Forte	Forte	Forte	Forte	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	Vulnérable
125	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	Faible	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Vulnérable	No vulnérable

Tableau 4-16 : Notation des points noirs vis-à-vis les 12 critères retenus

N°PN	Notes des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	1.00	0.70	0.30	0.3	0.5	0
2	0.30	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
3	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0
4	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0.5
5	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0.5

N°PN	Notes des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
6	1.00	0.70	0.70	1.00	1.00	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0
7	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0.5
8	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0
9	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	0.30	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0.5
10	1.00	1.00	0.70	0.30	1.00	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0.5
11	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.70	0.70	0.3	0	0.5
12	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.7	0	0
13	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
14	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0
15	0.70	0.70	0.30	0.30	1.00	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0
16	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0
17	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	1.00	0.7	0	0
18	1.00	1.00	0.70	0.70	1.00	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0
19	0.70	0.70	0.70	0.70	1.00	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0.5
20	0.70	0.70	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.7	0	0
21	0.70	0.70	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0
22	0.70	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
23	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
24	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
25	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
26	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	1	0.5	0.5
27	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	1	0.5	0.5
28	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	1	0.5	0.5
29	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0
30	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
31	0.70	0.30	0.70	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
32	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
33	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
34	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
35	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
36	0.30	0.70	0.70	0.30	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
37	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
38	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
39	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0.5
40	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
41	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
42	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0.5
43	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0

N°PN	Notes des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
44	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
45	0.30	0.30	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	1	0.5	0.5
46	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	1	0.5	0.5
47	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
48	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.30	0.30	0.30	1.00	0.7	0	0.5
49	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	1.00	0.7	0	0.5
50	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0
51	0.70	0.70	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0.5
52	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	1.00	0.30	0.70	1.00	0.3	0.5	0
53	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
54	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
55	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
56	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
57	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0
58	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	1	0.5	0.5
59	0.70	0.70	0.70	0.30	1.00	1.00	0.30	0.70	1.00	0.3	0	0
60	0.30	0.70	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.3	0.5	0
61	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
62	0.70	0.70	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0.5
63	1.00	0.70	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
64	0.70	0.70	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0
65	0.70	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0
66	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0.5
67	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0.5
68	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0.5
69	1.00	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	1	0.5	0.5
70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
71	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0
72	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0
73	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
74	0.70	0.70	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0.5
75	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
76	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
77	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0
78	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
79	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	1.00	0.7	0	0.5
80	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
81	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.3	0	0.5

Chapitre 4 : Application – cas du réseau de la ville de Bejaia

N°PN	Notes des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
82	1.00	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.7	0.5	0.5
83	1.00	0.70	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.7	0.5	0.5
84	0.70	0.70	1.00	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.7	0	0.5
85	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.7	0	0.5
86	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0
87	0.30	0.70	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
88	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0.5
89	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	1.00	0.3	0	0.5
90	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0
91	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	1.00	0.3	0	0
92	1.00	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0.5
93	1.00	1.00	1.00	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	0.70	0.3	0	0.5
94	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
95	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0	0.5
96	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.7	0	0.5
97	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0.5
98	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
99	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0
100	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0
101	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0
102	0.30	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.7	0.5	0.5
103	0.30	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
104	1.00	0.30	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.7	0.5	0
105	0.30	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	1	0.5	0.5
106	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0
107	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	1	0.5	0.5
108	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0
109	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	1.00	0.7	0	0.5
110	0.30	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.7	0.5	0.5
111	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	0.70	0.70	0.3	0	0.5
112	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	1	0	0.5
113	0.70	1.00	0.30	0.30	0.70	0.30	0.30	0.30	0.70	0.7	0	0
114	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.3	0	0.5
115	0.30	0.30	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	1	0.5	0.5
116	0.30	0.30	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.30	0.7	0.5	0.5
117	0.70	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.7	0.5	0
118	0.30	0.30	0.70	0.70	1.00	1.00	0.30	0.70	1.00	0.7	0.5	0
119	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.3	0.5	0.5

N°PN	Notes des critères											
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂
120	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.3	0.5	0.5
121	0.30	0.30	0.30	0.30	0.70	0.30	1.00	0.70	0.70	0.7	0	0
122	0.30	0.70	0.70	0.30	0.70	1.00	0.30	0.70	0.70	1	0	0.5
123	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
124	0.70	0.70	1.00	0.70	1.00	1.00	1.00	1.00	0.70	0.7	0.5	0.5
125	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.30	0.70	0.70	0.7	0.5	0

Échelle de notation de la performance : P = 1 ; 0,7 ; 0,3 ; 0,5 et 0 pour Forte ; Moyenne ; Faible ; Vulnérable ; Non vulnérable respectivement (Plus l'impact est fort plus la performance P est élevée avec P = 0 à 1).

Une fois les performances des points noirs (PN) évaluées en fonction des critères sélectionnés, un aperçu global de ces points noirs est présenté dans le **Tableau 4-17** et illustrée dans la **Figure 4-9**.

Tableau 4-17 : Performance (Faible, Moyenne et Forte) des PNs

Critère	Performance Faible (%)	Performance Moyenne (%)		Performance Forte (%)
Perturbation du trafic	38.40%	-	40.80%	20.80%
Sensibilité de la zone touchée	40.00%	-	43.20%	16.80%
Surface inondée	33.60%	-	21.60%	44.80%
Hauteur d'inondation	48.00%	-	26.40%	25.60%
Surface (A) du bassin versant	11.20%	-	30.40%	58.40%
Pente moyenne	36.80%	-	10.40%	52.80%
Allongement M	61.60%	-	0 %	38.40
Temps de concentration (tc)	20.00%	-	60.00%	20.00%
Coefficient d'imperméabilisation	12.00%	-	63.20%	24.80%
Lacune observée	33.60%	-	21.60%	44.80%
Tronçon amont	52.20% (non vulnérable)	48.00% (vulnérable)	-	-
Jonction	42.00% (non vulnérable)	58.00% (vulnérable)	-	-

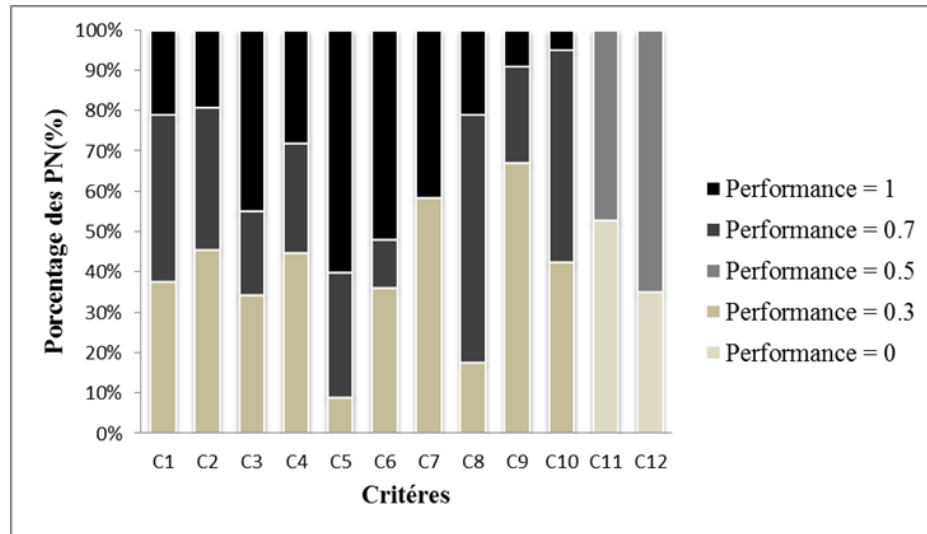


Figure 4-9 : Performances par PN

La **Figure 4-9** illustre l'influence de critères retenus (voir tableau 1) sur les PN étudiés. Plus de 50% des PN ont des surfaces et des pentes fortes (critères 5 et 6 avec $P = 1$), et plus de 40% ont des surfaces inondées importantes (critère 3 avec $P = 1$). Un temps de concentration faible et moyen (critère 8, $P = 1$ et 0,7) caractérise plus de 24 et 60% des PN respectivement (soit une influence de plus de 84% des PN). Les autres critères (1 à 5) ont une influence moindre mais sans importance ($P = 1$ pour 20 à 40% des PN et $P = 0,7$ pour 20 à 45% des PN). Ce diagramme nous servira de repérer dans le classement des PN par classes au paragraphe 4.5.3.

4.5 Résultats obtenus – discussion

4.5.1 Classement des PN de la ville de Bejaia

4.5.1.1 Classement des points noirs (PN) sur la base d'expertise

Nous avons déjà établi les cartes des points noirs (PN) du réseau pluvial, notamment les points de débordement (**Figure 4-8.a**) ainsi que des surfaces inondées (**Figure 4-9.b**). Ces cartes nous ont permis d'identifier et de caractériser les zones ayant subi des inondations, ainsi que de déterminer les causes de ces débordements, qu'il s'agisse de l'encrassement du réseau en aval, de l'incapacité hydraulique, ou d'autres défaillances éventuelles. Elles nous ont également aidés à répertorier et localiser les différents dégâts et impacts, des paramètres essentiels pour évaluer la sensibilité des zones touchées par les débordements et pour établir une échelle d'évaluation.

Nous avons enfin établi un classement des PN basé sur l'échelle de performance de la de la **Figure 4-10.a** et est illustré par la **Figure 4-10.b**.

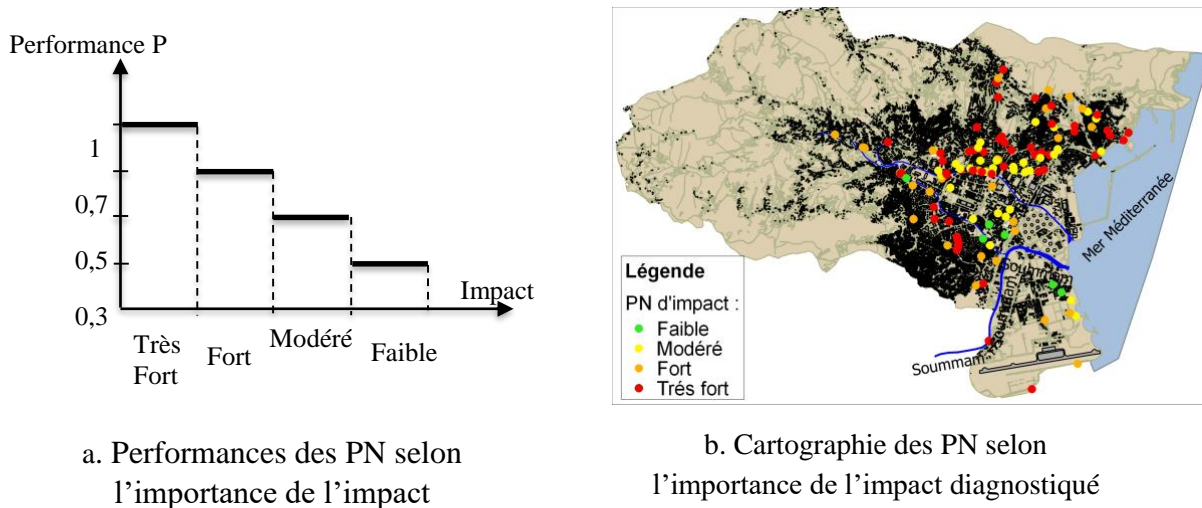


Figure 4-10 : Impacts des PN selon les données d'expertise

4.5.1.2 Résultats de l'application de la méthode AHP

Les étapes d'application de la démarche AHP sont divisées en deux parties principales : Pondération des critères et calcul du score de chaque point noir (PNi).

4.5.1.2.1 Pondération des critères

La première étape de la démarche AHP consiste à attribuer un poids relatif à chaque critère retenu pour l'évaluation des PN. Pour ce faire, on commence par hiérarchiser les 12 critères retenus. (Voir **Tableau 4-17** au-dessous).

L'attribution de notes sur une échelle de 1 à 12 pour chaque critère de jugement est utilisée dans cette phase pour établir une hiérarchisation précise des 12 critères retenus. Les données exploitées pour cette hiérarchisation sont les résultats obtenus précédemment, comme illustré dans le **Tableau 4-17** et la **Tableau 4-9**. Ces résultats permettent de comparer et de classer les critères en fonction de leur impact relatif sur l'évaluation des points noirs (PNs).

Tableau 4-18 : Hiérarchisation des critères retenus par ordre d'importance

Critères		Importance	Ordre d'importance	Notation
C₁	Perturbation du trafic	Important	3	8
C₂	Sensibilité de la zone touchée	Important	3	5
C₃	Surface inondée	Important	3	9
C₄	Hauteur d'inondation	Important	3	7
C₅	Surface (A) du bassin versant	Tris Important	4	12
C₆	Pente moyenne	Tris Important	4	11
C₇	Allongement M	Important	3	6
C₈	Temps de concentration (tc)	Tris Important	4	10
C₉	Coefficient d'imperméabilisation	Important	3	3
C₁₀	Lacune observée	Important	3	4
C₁₁	Tronçon amont	Moins Important	2	1
C₁₂	Jonction	Moins Important	2	2
- Ordre d'importance : 4 - Très Important, 3 - Important, 2 - Moins Important, 1 - Faiblement important - Notation sur une échelle de 1 à 12 l'importance chaque critère				

Aussi, la première étape consiste à attribuer un poids relatif à chacun de ces critères retenus. Cela se fait en formulant une matrice de comparaison par paires, où chaque critère est comparé aux autres pour déterminer son importance relative. Les valeurs de la comparaison varient généralement de 1 (importance égale) à 9 (importance extrême d'un critère par rapport à un autre importance extrême). Une fois la matrice remplie, les poids des critères sont calculés en normalisant les valeurs des comparaisons.

Tableau 4-19 : Poids des critères.

Critères		Poids
C₁	Perturbation du trafic	0.07
C₂	Sensibilité de la zone touchée	0.07
C₃	Surface inondée	0.10
C₄	Hauteur d'inondation	0.08
C₅	Surface (A) du bassin versant	0.16
C₆	Pente moyenne	0.14
C₇	Allongement M	0.07
C₈	Temps de concentration (tc)	0.14
C₉	Coefficient d'imperméabilisation	0.04
C₁₀	Lacune observée	0.08
C₁₁	Tronçon amont	0.02
C₁₂	Jonction	0.03
Total		$\sum_{i=1}^{n=12} w = 1$

Le test de cohérence est crucial pour garantir la fiabilité des scores pondérés qui seront utilisés dans l'évaluation finale des points noirs (PNs). Dans cet exemple d'application de l'AHP, le ratio de cohérence (Azzout et al.) a été calculé et la valeur obtenue est de 0,043. Cette valeur, étant inférieure à 0,1, est généralement considérée comme acceptable, signifiant que les jugements sont cohérents. En d'autres termes, cela indique que les comparaisons par paires ne sont pas aléatoires, et les résultats peuvent être utilisés en toute confiance pour calculer les scores les PNs.

4.5.1.2.2 Scores des points noirs (PNs)

Le score de chaque point noir (PN_i) sera alors calculé comme la somme pondérée des notes évaluées vis-à-vis chaque critère de jugement (Annexe A). Chaque critère a un poids spécifique (**Tableau 4-19**). Le calcul du score se fait en multipliant la note de performance de chaque PN_i par le poids du critère correspondant, puis en additionnant ces valeurs pour obtenir un score global.

Le Score S_i (ou note globale) d'un PN i est obtenu par la relation de pondération (3-7) suivante :

$$S_i = \sum_{j=1}^{12} w_j N_{ij} = 0.07 N_{i1} + 0.07 N_{i2} + 0.10 N_{i3} + 0.08 N_{i4} + 0.16 N_{i5} + \\ 0.14 N_{i6} + 0.07 N_{i7} + 0.14 N_{i8} + 0.04 N_{i9} + 0.08 N_{i10} + \\ 0.02 N_{i11} + 0.03 N_{i12}, N_i = P_i$$

Le résultat de calcul des scores des 125 PNs sont données dans **Tableau 4-20**. Ce score global permet de classer les PN_i en fonction de leur rang, et les scores les plus élevés indiquant les points noirs les plus prioritaires à éliminer.

Tableau 4-20 : Scores et rang des points noirs

PNi	Score Si	Rang	PNi	Score Si	Rang	PNi	Score Si	Rang	PNi	Score Si	Rang	PNi	Score Si	Rang
1	0.74	36	26	0.85	3	51	0.36	114	76	0.66	55	101	0.71	48
2	0.67	52	27	0.85	4	52	0.64	59	77	0.66	56	102	0.76	29
3	0.82	7	28	0.85	5	53	0.71	50	78	0.47	94	103	0.78	23
4	0.35	115	29	0.28	125	54	0.73	42	79	0.37	113	104	0.77	24
5	0.35	116	30	0.81	9	55	0.73	43	80	0.47	95	105	0.76	30
6	0.57	78	31	0.65	58	56	0.77	26	81	0.29	118	106	0.74	39
7	0.46	97	32	0.81	10	57	0.48	91	82	0.84	6	107	0.86	2
8	0.28	123	33	0.70	51	58	0.79	18	83	0.81	8	108	0.76	32
9	0.58	77	34	0.73	41	59	0.65	57	84	0.79	16	109	0.59	70
10	0.55	81	35	0.79	17	60	0.48	92	85	0.54	82	110	0.76	31
11	0.40	110	36	0.63	65	61	0.77	27	86	0.51	84	111	0.40	108
12	0.49	89	37	0.50	88	62	0.42	104	87	0.50	86	112	0.58	75
13	0.47	93	38	0.59	71	63	0.59	69	88	0.74	35	113	0.42	106
14	0.48	90	39	0.61	67	64	0.45	99	89	0.50	87	114	0.46	98
15	0.45	100	40	0.78	21	65	0.42	103	90	0.29	121	115	0.73	40
16	0.28	124	41	0.78	22	66	0.63	60	91	0.29	122	116	0.67	53
17	0.38	111	42	0.47	96	67	0.63	61	92	0.63	62	117	0.81	13
18	0.56	79	43	0.62	66	68	0.29	117	93	0.81	14	118	0.63	64
19	0.53	83	44	0.59	72	69	0.74	37	94	0.72	46	119	0.79	20
20	0.56	80	45	0.75	33	70	0.74	34	95	0.72	47	120	0.88	1
21	0.40	109	46	0.58	74	71	0.29	120	96	0.79	15	121	0.45	101
22	0.61	68	47	0.77	25	72	0.43	102	97	0.79	19	122	0.58	76
23	0.71	49	48	0.41	107	73	0.50	85	98	0.73	44	123	0.81	11
24	0.63	63	49	0.37	112	74	0.42	105	99	0.73	45	124	0.81	12
25	0.58	73	50	0.29	119	75	0.66	54	100	0.74	38	125	0.77	28

Après avoir classé les points noirs (PNs) en fonction de leurs scores obtenus via la méthode AHP, la prochaine étape consiste à les classer selon leur indice de criticité en appliquant la méthode FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis).

4.5.1.3 Résultats de l'application de la méthode FMECA

La méthode FMECA (Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis) permet effectivement d'évaluer la criticité des points noirs (PNs) en analysant trois principaux facteurs : le risque, la gravité, et la détection. L'association des trois paramètres permet de calculer l'indice de criticité I_{c_i} d'un PN.

4.5.1.3.1 *Risque, gravité et la détection de chaque PN_i.*

La méthode FMECA permet d'évaluer la criticité des points noirs (PNs) en analysant trois principaux facteurs : le Risque (**Ri**), la Gravité (**Gr**), et la Détection (**Dé**).

- **Risque (Ri) et Gravité (Gr) :** Risque (Ri) et Gravité (Gr) : Ces paramètres sont évalués en attribuant des notes en fonction des critères retenus pour chaque point noir (PN). Les notes moyennes de ces paramètres sont ensuite calculées en appliquant la relation spécifiée dans l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Cette approche permet de quantifier le niveau de risque et de gravité en s'appuyant sur les données d'évaluation obtenues.
- **Détection (Dé) :** Pour l'ensemble des PNs, la détection est prise égale à 0.7, car les débordements ne sont pas facilement détectables en ville de Bejaia. Cette valeur reflète une capacité limitée à identifier un problème potentiel avant qu'il ne devienne critique.

Les résultats de calcul des paramètres de risque (Ri), de gravité (Gr), et de détection (Dé) sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4-21 : Valeurs des paramètres de la méthode FMECA

PN _i	Ri	Gr	Dé	PN _i	Ri	Gr	Dé	PN _i	Ri	Gr	Dé	PN _i	Ri	Gr	Dé	PN _i	Ri	Gr	Dé
1	0.59	1.00	0.70	26	0.96	0.93	0.70	51	0.43	0.50	0.70	76	0.60	0.78	0.70	101	0.64	0.85	0.70
2	0.70	0.65	0.70	27	0.96	0.93	0.70	52	0.64	0.70	0.70	77	0.60	0.78	0.70	102	0.86	0.68	0.70
3	0.84	0.85	0.70	28	0.96	0.93	0.70	53	0.60	0.93	0.70	78	0.64	0.30	0.70	103	0.91	0.68	0.70
4	0.50	0.30	0.70	29	0.31	0.30	0.70	54	0.70	0.85	0.70	79	0.54	0.30	0.70	104	0.79	0.75	0.70
5	0.50	0.30	0.70	30	0.91	0.78	0.70	55	0.70	0.85	0.70	80	0.64	0.30	0.70	105	0.90	0.68	0.70
6	0.41	0.85	0.70	31	0.64	0.60	0.70	56	0.70	1.00	0.70	81	0.39	0.30	0.70	106	0.64	0.93	0.70
7	0.66	0.30	0.70	32	0.91	0.78	0.70	57	0.59	0.40	0.70	82	0.96	0.85	0.70	107	0.90	1.00	0.70
8	0.31	0.30	0.70	33	0.70	0.78	0.70	58	0.81	1.00	0.70	83	0.96	0.75	0.70	108	0.64	1.00	0.70
9	0.70	0.50	0.70	34	0.70	0.85	0.70	59	0.61	0.60	0.70	84	0.89	0.68	0.70	109	0.70	0.50	0.70
10	0.53	0.75	0.70	35	0.77	1.00	0.70	60	0.60	0.40	0.70	85	0.70	0.50	0.70	110	0.86	0.68	0.70
11	0.54	0.30	0.70	36	0.70	0.50	0.70	61	0.70	1.00	0.70	86	0.66	0.30	0.70	111	0.50	0.30	0.70
12	0.63	0.40	0.70	37	0.61	0.40	0.70	62	0.49	0.50	0.70	87	0.64	0.40	0.70	112	0.70	0.50	0.70
13	0.64	0.30	0.70	38	0.73	0.50	0.70	63	0.64	0.68	0.70	88	0.77	0.85	0.70	113	0.43	0.58	0.70
14	0.59	0.40	0.70	39	0.71	0.50	0.70	64	0.51	0.50	0.70	89	0.64	0.40	0.70	114	0.60	0.30	0.70
15	0.47	0.50	0.70	40	0.91	0.68	0.70	65	0.51	0.40	0.70	90	0.36	0.30	0.70	115	0.90	0.58	0.70
16	0.31	0.30	0.70	41	0.91	0.68	0.70	66	0.76	0.50	0.70	91	0.36	0.30	0.70	116	0.71	0.65	0.70
17	0.47	0.40	0.70	42	0.56	0.30	0.70	67	0.76	0.50	0.70	92	0.60	0.68	0.70	117	0.79	0.85	0.70
18	0.41	0.85	0.70	43	0.70	0.50	0.70	68	0.44	0.30	0.70	93	0.74	0.93	0.70	118	0.74	0.50	0.70
19	0.54	0.70	0.70	44	0.73	0.50	0.70	69	0.81	0.85	0.70	94	0.70	0.78	0.70	119	0.71	1.00	0.70
20	0.63	0.60	0.70	45	0.96	0.58	0.70	70	0.73	1.00	0.70	95	0.70	0.78	0.70	120	0.86	1.00	0.70
21	0.43	0.50	0.70	46	0.77	0.50	0.70	71	0.36	0.30	0.70	96	0.79	0.78	0.70	121	0.59	0.30	0.70
22	0.66	0.60	0.70	47	0.70	1.00	0.70	72	0.47	0.30	0.70	97	0.64	1.00	0.70	122	0.70	0.50	0.70
23	0.60	0.93	0.70	48	0.59	0.30	0.70	73	0.64	0.40	0.70	98	0.70	0.85	0.70	123	0.91	0.78	0.70
24	0.70	0.50	0.70	49	0.54	0.30	0.70	74	0.49	0.50	0.70	99	0.70	0.85	0.70	124	0.91	0.78	0.70
25	0.73	0.50	0.70	50	0.36	0.30	0.70	75	0.60	0.78	0.70	100	0.64	0.93	0.70	125	0.70	1.00	0.70

Ces résultats obtenus permettent d'évaluer la criticité des points noirs (PNs).

4.5.1.3.2 La criticité des points noirs (PNs)

En appliquant la relation 3-7, la méthode FMECA permet de déterminer l'indice de criticité pour chaque point noir (PNi) identifié. Les résultats de ces calculs sont synthétisés dans le tableau ci-dessous, qui regroupe les évaluations des paramètres de risque (Ri), de gravité (Gr), et de détection (Dé) pour chaque point noir (PN).

Tableau 4-22 : Indices de criticités et rangs des points noirs

PNi	Indice Ici	Rang	PNi	Indice Ici	Rang	PNi	Indice Ici	Rang	PNi	Indice Ici	Rang	PNi	Indice Ici	Rang
1	0.41	41	26	0.62	2	51	0.15	98	76	0.33	53	101	0.38	47
2	0.32	56	27	0.62	3	52	0.32	57	77	0.33	54	102	0.41	42
3	0.50	11	28	0.62	4	53	0.39	45	78	0.14	103	103	0.43	29
4	0.11	113	29	0.07	125	54	0.42	34	79	0.11	112	104	0.41	40
5	0.11	114	30	0.50	13	55	0.42	35	80	0.14	104	105	0.43	31
6	0.25	75	31	0.27	62	56	0.49	18	81	0.08	118	106	0.42	39
7	0.14	100	32	0.50	14	57	0.16	96	82	0.57	7	107	0.63	1
8	0.07	123	33	0.38	48	58	0.57	6	83	0.50	10	108	0.45	26
9	0.25	81	34	0.42	33	59	0.26	69	84	0.42	32	109	0.25	78
10	0.28	60	35	0.54	8	60	0.17	93	85	0.25	77	110	0.41	43
11	0.11	110	36	0.25	76	61	0.49	19	86	0.14	101	111	0.11	115
12	0.18	88	37	0.17	90	62	0.17	91	87	0.18	85	112	0.25	79
13	0.14	102	38	0.26	71	63	0.30	58	88	0.46	24	113	0.17	89
14	0.16	95	39	0.25	73	64	0.18	87	89	0.18	86	114	0.13	106
15	0.17	94	40	0.43	27	65	0.14	99	90	0.08	121	115	0.36	51
16	0.07	124	41	0.43	28	66	0.27	65	91	0.08	122	116	0.33	55
17	0.13	105	42	0.12	109	67	0.27	66	92	0.28	59	117	0.47	23
18	0.25	74	43	0.25	83	68	0.09	117	93	0.48	22	118	0.26	68
19	0.27	64	44	0.26	72	69	0.48	21	94	0.38	49	119	0.50	12
20	0.26	67	45	0.39	46	70	0.51	9	95	0.38	50	120	0.60	5
21	0.15	97	46	0.27	63	71	0.08	120	96	0.43	30	121	0.12	108
22	0.28	61	47	0.49	17	72	0.10	116	97	0.45	25	122	0.25	80
23	0.39	44	48	0.12	107	73	0.18	84	98	0.42	36	123	0.50	15
24	0.25	82	49	0.11	111	74	0.17	92	99	0.42	37	124	0.50	16
25	0.26	70	50	0.08	119	75	0.33	52	100	0.42	38	125	0.49	20

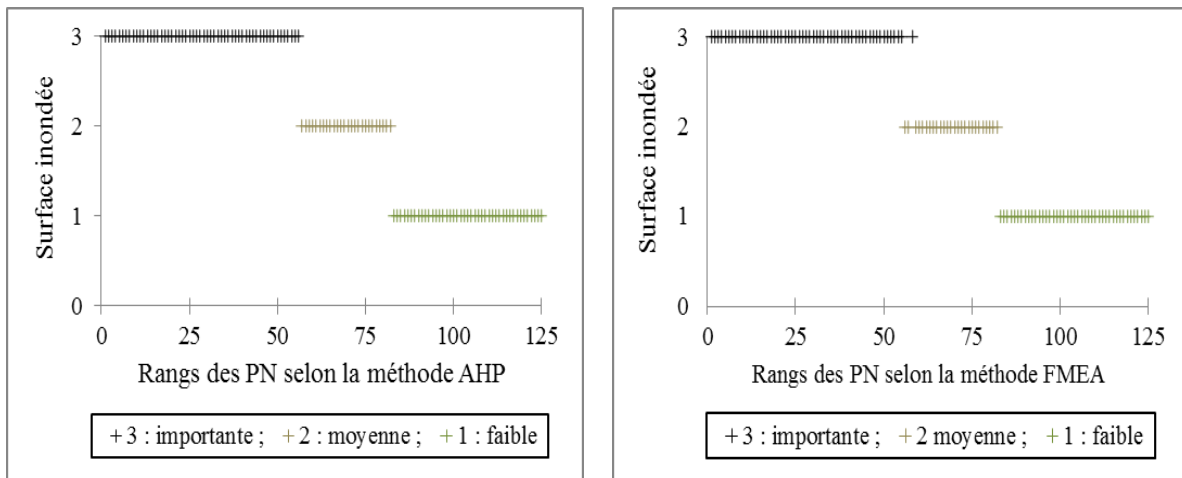
Ce tableau fournit une vue d'ensemble des indices de criticité et des rangs associés, permettant de comparer les résultats obtenus par l'application de la méthode AHP et de prioriser les interventions en fonction des niveaux de criticité identifiés. Cela facilite une analyse comparative entre les scores calculés via l'AHP et les indices de criticité issus de la méthode FMECA, offrant ainsi une base solide pour la prise de décision en matière de gestion des risques.

4.5.2 Fiabilité des méthodes utilisées

Après avoir classé les points noirs (PN) en utilisant les deux méthodes (AHP et FMECA), il est souvent utile de comparer les résultats obtenus avec ceux issus d'autres approches, telles que l'expérience du terrain et l'expertise locale. Cette comparaison peut fournir une validation supplémentaire des classements et aider à identifier les divergences éventuelles.

Pour tester la fiabilité des méthodes utilisées (AHP et FMECA), nous avons comparé les performances modélisées des PN à celles déduites des données d'enquête et d'observation. Le critère utilisé pour évaluer les performances observées est la « zone inondée » **Figure 4-10.a** et **Figure 4-10.b**).

Logiquement, plus la zone inondée d'un PN est grande, plus le score S (méthode AHP) et l'indice de criticité (méthode FMECA) sont élevés. Afin de clarifier cette relation dans notre étude de cas, nous avons représenté les surfaces inondées en fonction des rangs obtenus par les deux méthodes (AHP et FMECA), en utilisant trois niveaux : élevé (3 : surface importante), moyen (2 : surface moyenne), et faible (1 : surface faible). La figure 4-11 illustre les résultats obtenus.



a. Comparaison de la méthode AHP aux données observées

b. Comparaison de la méthode FMECA aux données observées

Figure 4-11 : Comparaison des performances PN observées et modélisées

Nous constatons que les deux méthodes (AHP et FMECA) donnent des résultats de classement des PN cohérents avec ceux observés par rapport aux surfaces inondées.

En outre, les deux méthodes AHP et FMECA donnent des résultats de classement très comparables.

4.5.3 Résultats de classification multicritère

Dans un premier temps, nous avons tracé le nuage par paire des rangs de chaque PN pour donner une mesure de l'intensité et de la direction linéaire de la relation entre deux rangs (**Figure 4-12.a**), puis, pour cibler les PN ayant les mêmes caractéristiques (**Figure 4-9**) et pour plus d'informations, nous avons utilisé le nuage par paire des rangs de chaque BP pour mesurer l'intensité de la relation et pour plus de précision dans leur classification finale, nous avons préféré travailler par classes de PN.

Les résultats de classement des PN obtenus par les trois méthodes sont plus au moins identiques, mais le classement par la méthode AHP est plus proche de celui déduit de l'expertise.

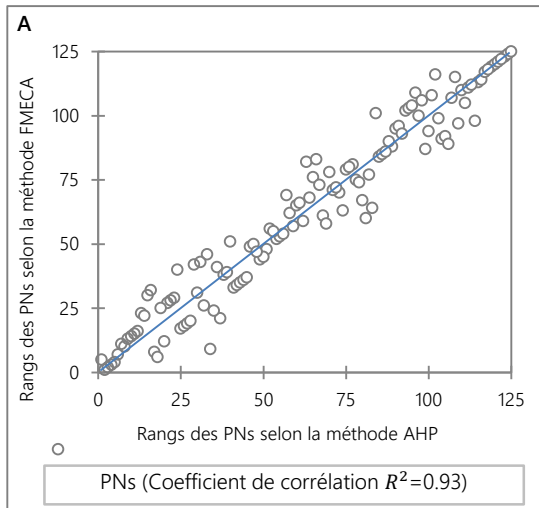
Ces différents graphiques et résultats montrent, d'une part, que les critères utilisés sont fiables et suffisants et, d'autre part, que les méthodes AHP et FMECA donnent des résultats proches et cohérents avec les données de diagnostic et l'expertise.

Le couplage des deux méthodes a été utilisé sur le réseau d'Alger pour gérer les défaillances structurelles des collecteurs d'assainissement (Benbachir et al., 2021) et les résultats obtenus sont très encourageants.

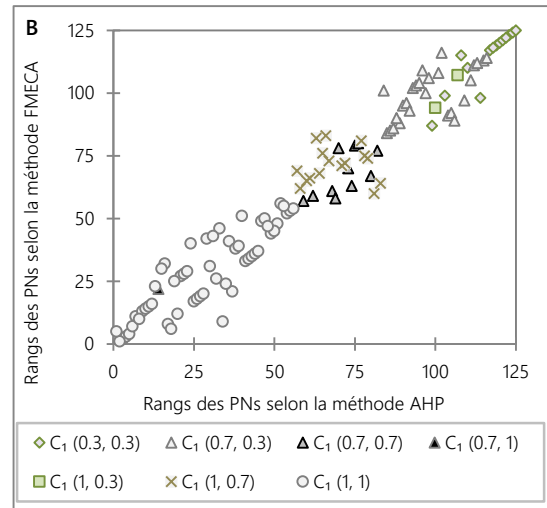
Les classes de PN étudiées pour cibler des PN de mêmes caractéristiques ont été définies sur la base des observations illustrées par la **Figure 4-9** ci-dessus.

- Classe 1 (C_5, C_3) : classes comprenant des PN avec des valeurs de critères 5 et 3 (critères de surface du BV et de surface inondée) avec des valeurs de performances fixes.
- Classe 2 (C_5, C_6) : classes comprenant des PN avec des valeurs de critères 5 et 6 (critères de surface du BV et de pente moyenne du bassin versant en amont) avec des valeurs de performances fixes.
- Classe 3 (C_5, C_{11}) : classes comprenant des PN de surface ciblées et des valeurs de performance pour les tronçons en amont.

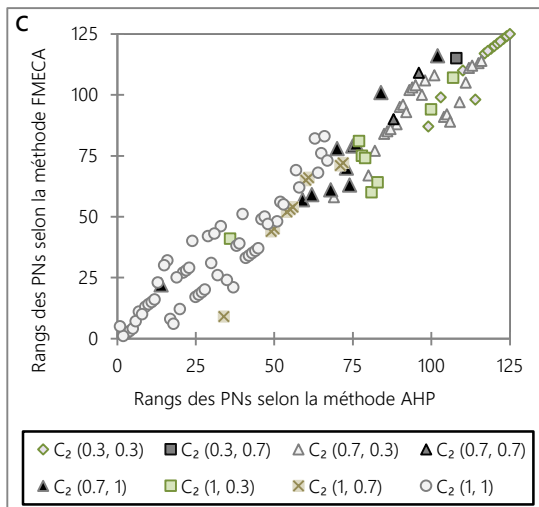
Les valeurs de performance des critères C_3, C_5, C_6 et C_{11} sont définies par le **Tableau 3-1** et la **Figure 4-9**. Par exemple : dans la **Figure 4-12.d.**, $C_3 (1, 0,5)$ présente les PN de la classe 3 (C_5, C_{11}) de performances $P = 1$ et $P = 0,5$ respectivement pour les critères C_5 et C_{11} . Sachant que les performances des PN par rapport au critère C_5 sont $P = 1 ; 0,7$ et $0,3$, et que $P = 0,5$ et 0 sont les performances des PN par rapport au critère C_{11} . Nous avons donc 6 cas possibles, $C_3 (1, 0,5)$, $C_3 (1,0)$, $C_3 (0,7, 0,5)$, $C_3 (0,7, 0)$, $C_3 (0,3, 0,5)$, et $C_3 (0,3, 0)$, mais 5 dans les classes de la **Figure 4-12.d** car aucune ne correspond à la classe $C_3 (0,3, 0,5)$.



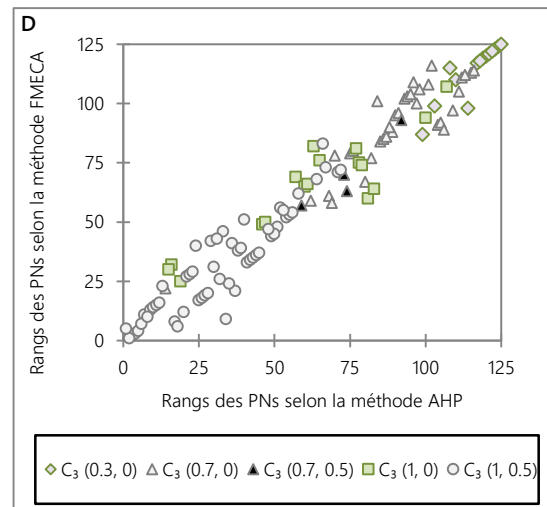
a. Coefficient R^2 est celui de droite $Y = X$



b. PNs de classe 1 (Valeurs de performance de la surface et de la surface inondée)



c. PNs de classe 2 (Valeurs de performance de la surface et la pente du bassin versant en amont)



d. PNs de classe 3 (Valeurs de performance de la surface et tronçon amont)

Figure 4-12 : Résultats de classification multicritère obtenus par les deux méthodes

L'analyse des causes de débordement et les valeurs de performance des PN permettent de définir des priorités pour classer les PN en :

- Priorité 1 : PN à gérer dans l'immédiat en remédiant aux problèmes provoquant le débordement (suppression des lacunes, Technique alternative en amont, ...).
- Priorité 2 : action à court terme ; BP à gérer dans un délai d'un à deux ans.
- Priorité 3 : action à moyen terme (à réaliser dans un délai maximum de cinq ans)
- Priorité 4 : action à long terme.

Les résultats de la classification des PN obtenus sont présentés dans la **Figure 4-12**, qui montre également que les PN classés en priorité 1 dépassent un tiers (40,8 %), puis près de la moitié des PN sont respectivement de priorité 2 (26,4%) et 3 (25,6%). Le reste est de priorité 4 (7,2%).

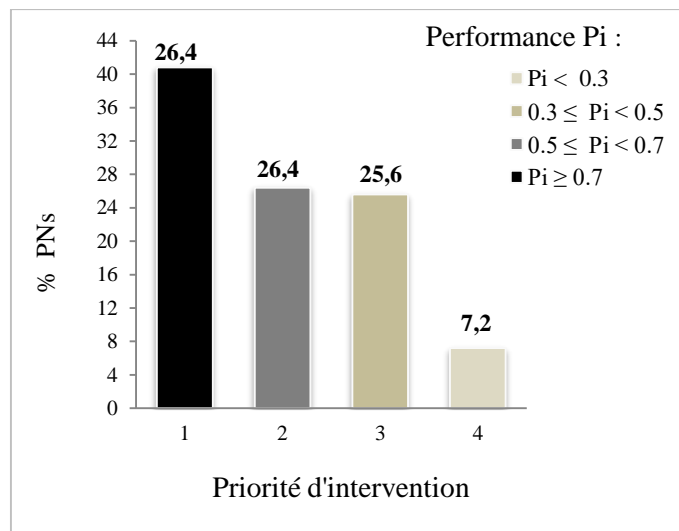


Figure 4-13 : Pourcentage (%) des PN en priorité d'intervention

Le classement des points noirs (PNs) par priorité d'intervention et par rang, selon la méthode AHP, a permis de présenter les résultats obtenus sur la **Figure 4-14** ci-dessous.

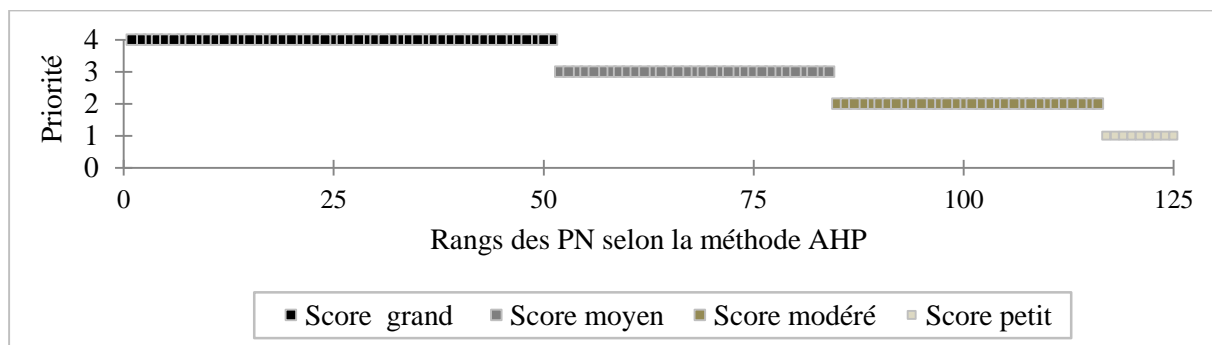


Figure 4-14 : Classement des PN par ordre de priorité d'intervention

La cartographie de ces points noirs (**Figure 4-15**), classés par ordre de priorité d'intervention, permet de les localiser et de les visualiser. Cette représentation aide à identifier clairement les zones nécessitant des actions immédiates, comme illustré dans la figure suivante.

Les PN importants sont localisés dans des endroits où l'influence de la pente est bien plus élevée (Autour de la ville). Cette carte permet également aux gestionnaires d'affiner les priorités d'intervention en tenant compte de critères d'impact tels que la « Perturbation du trafic » (critère C₁) et la « Sensibilité de la zone touchée » (critère C₂). Zone affectée » (critère C₂ ; **Tableau 3-1**).

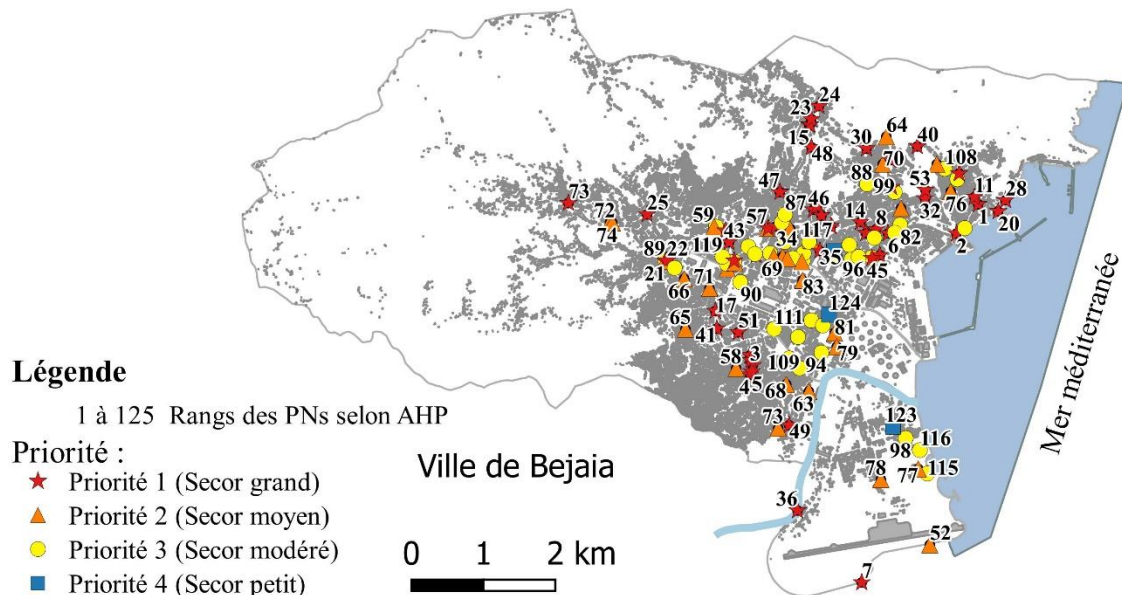


Figure 4-15 : Cartographie des PN par ordre de priorité d'intervention

4.5.4 Solutions compensatoires retenues dans le cas d'étude

Une solution compensatoire au réseau pluvial désigne une stratégie ou une mesure mise en place pour gérer les eaux pluviales en complément ou en remplacement des infrastructures traditionnelles de drainage.

La définition de la famille de solutions à retenir consiste à sélectionner un sous-ensemble contenant les techniques alternatives (TA) qui représentent les « applications et adaptations optimales » ou, à défaut, les « plus satisfaisantes » (CHAMOIX, 2003, Martin and Legret, 2005). La recherche des meilleures TA commence par la sélection de celles qui répondent aux principales conditions d'application, telles que les contraintes de terrain disponible, la surface inondée, et l'intégration au tissu urbain. Si une TA ne satisfait pas à ces critères, elle est éliminée.

Dans notre étude, la méthode AHP a été utilisée pour évaluer différentes TA adaptées à la gestion des eaux pluviales dans la ville de Bejaia (Azoune et Cherrared,2021). Les critères de sélection comprenaient des éléments quantitatifs (coût de réalisation, coût d'entretien, capacité de rétention)

et qualitatifs (probabilité de dysfonctionnement, intégration paysagère, sécurité). Les résultats obtenus peuvent également servir de base pour la mise en place de TA adaptées aux cas étudiés.

Nous avons précisé les conditions d'application pour chaque technique alternative (TA) retenue. Le **Tableau 4-23** présente les TA sélectionnées, les types des PN concernés, ainsi que les conditions d'application spécifiques et leur degré de faisabilité.

Tableau 4-23 : Techniques Alternatives retenues : définition, conditions d'application et faisabilité

Technique Alternative (TA)	Définition de la TA	Les PN concernés	Conditions d'application	Degré de faisabilité (1-10)
Réseau surdimensionnée	Réseau permettant l'écoulement et le stockage des eaux pluviales	- Type a1 : 65.08% - Type a2 : 33.33% - Type a3 : 1.59% - Impact : Niveau 3, 2 et 3	- Présence d'un réseau existant - Disponibilité d'espace - Non encombrement du sous-sol - Budget conséquent - Topographie du terrain	5
Bassin enterré	Ouvrage souterrain stockant temporairement les eaux pluviales pour réguler le ruissellement.	- Type a1 : 50% - Type a2 : 35% - Type a3 : 15% - Impact : Niveau 3, 2 et 1	- Contraintes spatiales en surface - Sol adapté pour le creusement - Disponibilité de financement - Encombrement du sous-sol ou présence d'obstacle - Topographie du terrain	2
Puits d'infiltration/ Stockage	Ouvrage ponctuel dirigeant les EP vers un sol perméable pour un stockage temporaire	- Type a1 : 20% - Type a2 : 50% - Type a3 : 30% - Impact : Niveau 1, 2 et 3	- Sol perméable - Niveau phréatique profond - Présence d'une source d'approvisionnement en eau potable - Faible risque de pollution - Topographie du terrain	1.5
Bassin à ciel ouvert	Bassin de stockage en surface qui ralentit le ruissellement et favorise l'infiltration des EP	- Type a1 : 60% - Type a2 : 25% - Type a3 : 15% - Impact : Niveau 3 et 2	- Disponibilité de terrains libres - Intégration environnementales, offre de Sécurité - hygiène et nuisance	0.5
Fossés	Ouvrage linière favorise stockage et drainage les EP.	- Type a1 : 70% - Type a2 : 20% - Type a3 : 10% - Impact : Niveau 1	- Terrain avec légère pente - Sols peu sujets à l'érosion - Faible urbanisation environnante	0.5
Noue paysagère	Ouvrage linéaire végétalisé et ralentissant le ruissellement des EP	- Type a1 : 55% - Type a2 : 30% - Type a3 : 15% - Impact : Niveau 1 et 2	- Espaces disponibles dans les zones urbaines ou périurbaines - Sols perméables - Maintenance régulière requise	0.5

L'analyse des résultats montre une variation significative dans la faisabilité des différentes techniques alternatives (TA) pour la gestion des eaux pluviales :

- Réseau surdimensionné : Bien que sa faisabilité soit modérée (5/10), cette solution est encore réalisable, mais elle est limitée par des contraintes d'espace, de budget et de topographie. Elle est adaptée aux zones ayant un réseau existant et suffisamment d'espace disponible.
- Bassin enterré : Cette solution présente une faisabilité faible (2/10), en raison de contraintes géologiques, de financement et d'encombrement du sous-sol. Elle est difficile à appliquer dans des zones où l'espace en surface est limité.
- Puits d'infiltration/Stockage : La faisabilité est très faible (1.5/10) en raison des exigences géologiques strictes (sol perméable et niveau phréatique profond). Ce système est peu adapté aux zones urbaines.
- Bassin à ciel ouvert : Cette solution est presque impraticable (0.5/10) dans les zones urbaines densément peuplées, en raison du manque d'espace. Son application est limitée à des terrains libres, mais elle présente de forts enjeux en termes de sécurité et d'hygiène.
- Fossés : Avec une faisabilité également très faible (0.5/10), cette solution est mieux adaptée aux zones rurales ou peu urbanisées avec des pentes modérées. Elle est peu applicable dans des zones urbaines denses.
- Noue paysagère : Cette technique végétalisée, bien qu'ayant des avantages écologiques, a une faisabilité très faible (0.5/10) dans les zones urbaines denses, où l'espace pour son entretien et son installation est limité.

Les solutions les plus faisables sont le réseau surdimensionné, bien qu'elles soient limitées par l'espace et les coûts, alors que toutes les autres techniques (bassins enterrés, fossés, noues paysagères, etc.) ont une faisabilité extrêmement faible dans les zones urbaines à forte densité, principalement en raison des contraintes spécifiques.

La carte de la **Figure 4-16** ci-dessous montre les solutions compensatoires (Techniques alternatives) retenues pour gérer les eaux pluviales aux points de débordement.

Cartographie des solutions compensatoires retenues dans le cas d'étude montre que la meilleure technique alternative est l'ouvrage surdimensionné, qui a été retenu dans 63 points d'inondation avec un pourcentage de 50,4 %. Elle est suivie par le 'bassin enterré' avec un pourcentage de 28 %, puis par le 'puits' avec un pourcentage de 14,4 %. Les deux premières techniques représentent plus de 88 % des solutions retenues.

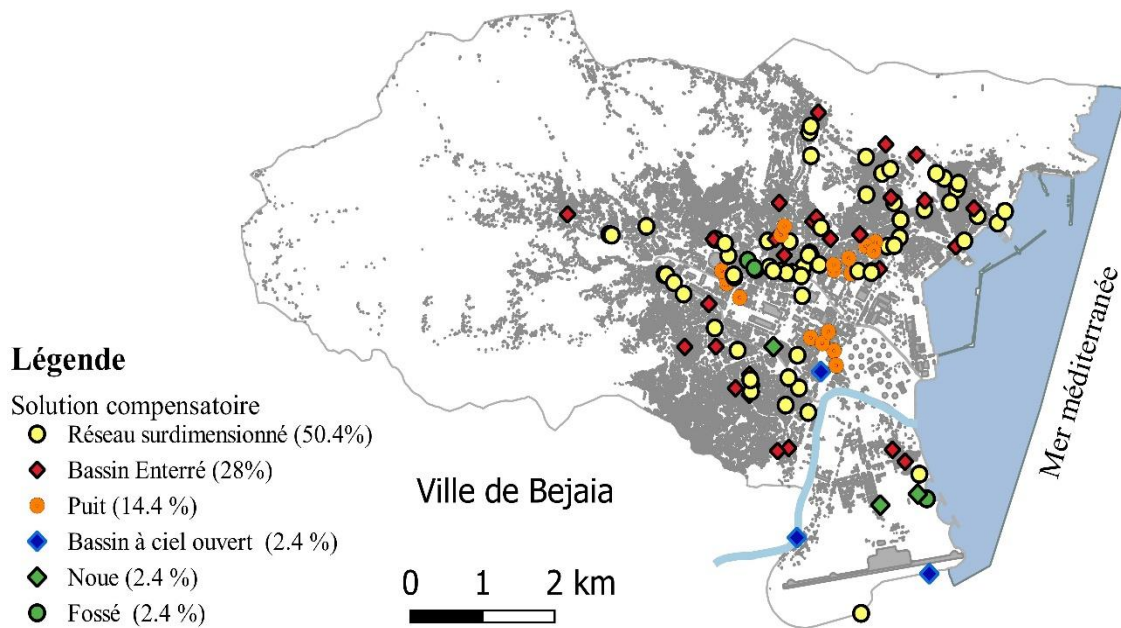


Figure 4-16 : Cartographie des solutions compensatoires retenues dans le cas d'étude

Les autres techniques, à savoir 'bassin à ciel ouvert', 'fossé' et 'noue', présentent chacune un pourcentage très faible de 2,4 %.

Avec l'expansion urbaine, la gestion des EP doit être intégrée dès la phase de planification. Les TA comme les noues paysagères et les bassins à ciel ouvert peuvent être incluses dans les plans d'urbanisme en tant qu'éléments multifonctionnels, combinant la gestion hydraulique avec des fonctions esthétiques et écologiques.

Les réseaux surdimensionnés et les bassins enterrés doivent être privilégiés dans les zones à forte densité où l'espace en surface est limité. Par ailleurs, l'utilisation de puits d'infiltration peut être encouragée pour les nouvelles constructions respectant des critères environnementaux stricts. Enfin, l'intégration des fossés et des bassins à ciel ouvert est particulièrement adaptée aux zones périphériques en expansion, favorisant la recharge des nappes phréatiques et la réduction des risques d'inondation.

L'adoption de ces solutions nécessite une collaboration interdisciplinaire, impliquant urbanistes, hydrologues, et décideurs, pour garantir une gestion durable et efficace des EP dans le cadre des développements urbains futurs.

4.6 Conclusion

La méthodologie proposée a permis d'établir une carte précise des débordements survenus sur le réseau pluvial de la ville de Bejaia. De plus, l'analyse menée dans ce travail a démontré l'efficacité des méthodes AHP et FMECA dans le classement et la gestion des points noirs (PNs) liés aux inondations urbaines. Ces deux méthodes, en combinant différents critères d'évaluation, ont permis de prioriser les interventions nécessaires pour atténuer les risques associés aux divers PNs identifiés

à Bejaia. Grâce à cette approche, les décisions d'intervention sont désormais mieux informées, ce qui est essentiel pour améliorer la gestion des eaux pluviales dans cette région.

La méthode AHP a fourni une hiérarchisation précise des PNs basée sur une évaluation multicritère, tandis que la méthode FMECA a permis de calculer les indices de criticité en intégrant les facteurs de risque, de gravité, et de détection. La comparaison des résultats obtenus par ces méthodes avec ceux dérivés de l'expérience et de l'expertise a confirmé la cohérence et la fiabilité des approches utilisées.

En outre, les cartes générées et les solutions techniques identifiées, telles que l'utilisation d'ouvrages surdimensionnés et de bassins enterrés, offrent une base solide pour la planification d'interventions efficaces. Les résultats de cette étude de cas fournissent des indications précieuses pour l'amélioration de la gestion des eaux pluviales et la réduction des risques d'inondation dans d'autres contextes urbains similaires.

Les techniques alternatives (TA) pour la gestion des eaux pluviales offrent des solutions adaptées aux défis de l'urbanisation croissante, comme le contrôle du ruissellement, la prévention des inondations et la recharge des nappes phréatiques. Elles sont conçues en fonction des spécificités locales, telles que l'espace disponible et la topographie.

Pour l'avenir, il est important d'intégrer les TA dès la phase de planification urbaine, en les considérant comme des infrastructures multifonctionnelles. Les solutions comme les réseaux surdimensionnés, les bassins enterrés, les noues paysagères, et les fossés d'infiltration répondent à des besoins variés selon les zones urbaines et rurales. La participation des différents acteurs est essentielle pour garantir leur efficacité et promouvoir une résilience face aux défis climatiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'eau est la source de la vie. C'est une composante essentielle du cycle naturel. Cet élément vital est indispensable à la survie humaine et joue un rôle crucial dans l'équilibre de notre planète, touchant de nombreux aspects de la vie. Cependant, l'eau peut aussi être à l'origine de catastrophes naturelles dévastatrices, telles que les inondations, qui entraînent d'importantes pertes en vies humaines et causent d'importants dégâts et de grandes souffrances.

Les relations entre la ville et l'eau se déploient actuellement sur plusieurs niveaux : la protection contre les inondations, l'approvisionnement en eau potable et l'alimentation des diverses activités urbaines, ainsi que l'utilisation de l'eau pour d'autres besoins. Il est essentiel d'envisager les solutions techniques adaptées aux défis actuels. L'aménagement urbain doit ainsi répondre à des exigences de plus en plus strictes en matière de préservation de l'environnement naturel.

La complexité des phénomènes hydrologiques est accentuée par les changements climatiques et les activités humaines. L'urbanisation et d'autres impacts anthropiques modifient le régime hydrologique, rendant nécessaire mais difficile l'adaptation des pratiques de gestion et des accords de partage de l'eau.

Ce travail nous a permis d'expliquer pourquoi dans une zone urbaine comme la ville de Bejaia, les phénomènes météorologiques « aléa pluviométrique » et les conditions liées au ruissellement pluvial peuvent donner naissance à des phénomènes naturels catastrophiques tels que les débordements pluviaux.

En effet, la problématique de l'assainissement ne peut pas se limiter à rechercher des solutions zone par zone. Les mesures de prévention contre le risque d'inondation, lors de la réalisation du réseau d'assainissement, sont souvent mal appliquées sur le terrain. Par ailleurs, l'imperméabilisation croissante des surfaces et l'extension des réseaux pluviaux en amont ont considérablement augmenté les ruissèlements et les volumes d'eau à évacuer. A présent, le cadre de la recherche dans notre domaine est toujours en évolutions, donc, il est important de doubler d'efforts pour développer les connaissances dans ce domaine et établir une compréhension commune de la gravité des inondations. Cela permettra aux acteurs et aux citoyens de participer activement à la protection de leurs villes en mettant en œuvre les nouvelles techniques disponibles.

Cependant, il est très important de disposer de toutes les données nécessaires, notamment celles basées sur des enquêtes et des visites de terrain. D'autre part, l'approche utilisée dans cette étude pourrait présenter des difficultés liées à la description subjective de certains critères d'évaluation (comme la quantification de la vulnérabilité d'un quartier urbain aux inondations à travers le critère d'impact) et à l'importance relative parmi les notes attribuées. Dans notre cas, le fait de construire une grille d'évaluation basée sur les impacts des inondations passées (en collaboration avec des experts locaux) a permis de surmonter ces difficultés.

Grâce aux nouvelles techniques, il est possible de mettre à jour une carte et de simplifier graphiquement les différents objets tels que maisons ou rues afin d'en améliorer la lisibilité. Il devient alors important pour les gestionnaires de se doter des outils d'aide à la décision adaptés pour améliorer sa gestion ainsi que la qualité de travail au sein de son organisation. En générale, les choix de conception d'un modèle dépendent fortement de l'objectif pour lequel il est développé.

Les douze critères d'évaluation de la performance retenus - vis-à-vis des inondations - ont été établis sur la base d'une analyse hydrologique et fonctionnelle des paramètres d'influence sur les débordements d'eaux pluviales urbains. Ensuite, une échelle d'évaluation des critères a été défini puis convertie en grille d'évaluation des performances des points de débordement (points noirs PN).

La fiabilité des deux méthodes utilisées a été testée en les calant aux données observées en utilisant le critère d'impact « surface inondée ». Les deux méthodes ont donné des résultats de classement très intéressants. La méthode AHP semble être plus performante, dans ce domaine, que la méthode FMECA.

Les résultats obtenus ont permis de :

- Valider l'approche par analyse et évaluation multicritères des performances des PN par zone de débordement, telles que les méthodes AHP et FMECA, et permettre ainsi une gestion optimisée des interventions.
- Disposer d'un outil de diagnostic prévisionnel capable d'anticiper les interventions en tenant compte des extensions futures du réseau d'assainissement de la ville
- Couvrir les difficultés d'acquisition de données de diagnostic sur terrain souvent difficiles à acquérir lorsque les inondations se produisent.

La FMECA est un outil puissant d'évaluation des risques ([Wang, 2018](#), [Severac, 2022](#)) et les résultats obtenus montrent qu'elle est adaptée à ce type d'étude. L'AHP représente un outil d'analyse et de validation hiérarchique dans le domaine de l'analyse de l'état des réseaux d'assainissement pour prendre les meilleures décisions de gestion. Ces deux méthodes sont généralement bien adaptées pour des processus de classement multicritères.

Cependant, dans un tel cas, l'analyse AHP doit être entièrement refaite, avec de nouveaux questionnaires et de nouvelles matrices de comparaison pour refléter les changements pertinents apportés au modèle ([Vladeanu and Matthews, 2019](#)).

Cependant, l'approche utilisée, fortement liée à l'utilisation d'informations brutes, à la construction d'échelles de performance et à l'évaluation de critères d'impact et d'influence, nécessite une mise à jour permanente de la base de données sur les caractéristiques des bassins versants et sur l'état et le fonctionnement du réseau. Un outil d'aide à la décision doit être basé sur un suivi régulier du réseau d'assainissement (diagnostics et enquêtes adéquats avec collecte d'informations objectives) et permettre une analyse multi-objectifs continue de la performance du réseau pluvial.

D'un point de vue global, une étude de cas permet de mieux connaître un territoire sous ses aspects urbains, hydrauliques et hydrologiques, qui avaient jusqu'alors été peu étudiés conjointement. Concernant la mesure objective du niveau de service de gestion des eaux pluviales réellement offert aux citoyens, celle-ci constitue l'une des questions centrales de la gestion de l'assainissement urbain. La constatation de points débordants inclut les cas possibles et met en lumière des situations graves qui sont peu ou pas prises en compte lors des interventions ou dans les projets visant à satisfaire les besoins d'un faible pourcentage de la population résidente.

L'ensemble de cette étude montre que la gestion des eaux pluviales en milieu urbain est un défi multidimensionnel qui nécessite des approches intégrées et adaptées aux spécificités locales. La méthodologie développée dans ce travail, combinant les techniques AHP et FMECA, offre un outil puissant pour l'aide à la décision dans la prévention des inondations urbaines. L'étude de cas de Bejaia démontre non seulement l'efficacité de cette approche, mais aussi son potentiel à être reproduite dans d'autres contextes urbains confrontés à des défis similaires.

Ainsi, cette recherche contribue de manière significative à l'amélioration des pratiques de gestion des eaux pluviales, en proposant des solutions concrètes basées sur des analyses rigoureuses pour réduire les risques et améliorer la résilience des villes face aux inondations.

Programme et conseils

Lorsque les conditions sont réunies pour que le phénomène débordement pluvial se produise, celui-ci ne peut être évité. Cependant, certaines précautions doivent être prises pour éviter des dommages récurrents plus graves.

Pour faire face à ces défis, les autorités locales de Bejaia doivent entreprendre plusieurs actions, notamment :

- Amélioration des infrastructures : Renforcer les collecteurs de drainage et d'assainissement, construire des ouvrages surdimensionnés, des bassins enterrés et des bassins de rétention, tout en sensibilisant et en éduquant les habitants sur les risques d'inondation et les mesures de prévention.
- Gestion des zones à risque : Interdire la construction dans les zones exposées au risque d'inondation et exproprier les personnes se trouvant dans les champs d'écoulement. Il est également essentiel d'améliorer l'organisation des secours et la gestion des alertes de crue, ainsi que de faire respecter les servitudes.
- Leçons tirées du passé : Adapter les habitations aux risques d'inondation en s'appuyant sur l'expérience des habitants. Ceux-ci, en constatant un débordement ou une obstruction du réseau, doivent contacter la cellule de crise. Les informations recueillies, telles que la cause

de l'anomalie (pollution, descellement, etc.) et la solution retenue, sont consignées pour un suivi efficace.

- Inspection et maintenance : Inspecter l'intérieur des canalisations à l'aide de caméras pour détecter des affaissements ou des fissures. Si un curage est nécessaire, faire appel aux gestionnaires des réseaux pluviaux et aux responsables de l'entretien. Planifier également des opérations de maintenance approfondie lors des chantiers de voirie, car les zones nécessitant ces travaux correspondent souvent à celles où les réseaux sont les plus détériorés.
- Information et communication : Fournir et diffuser des informations précises sur l'arrivée possible d'un événement aux populations et aux gestionnaires du risque. Ces informations peuvent prendre la forme de messages dans les médias (presse, météo), de cartes de vigilance, ou de bulletins d'alerte.
- Compréhension des messages d'alerte : Il est essentiel que les populations comprennent les messages d'alerte, les risques auxquels elles sont exposées, ainsi que les mesures à adopter. Les médias, les établissements d'enseignement, et la diffusion de bases de données en ligne sont autant de moyens pour transmettre cette information.
- Formation et simulation : Organiser des formations pour les citoyens et des exercices de simulation d'aléas dans le cadre de l'éducation et de l'information préventive des populations.

Effectivement, le nettoyage régulier des infrastructures urbaines (rues, caniveaux, chemins de ruissellement, canaux, etc.) est essentiel pour assurer un bon fonctionnement du réseau de gestion des eaux pluviales. Malheureusement, cette pratique est parfois négligée par les communes, ce qui peut entraîner des obstructions dans le système et des risques accrus de ruissellement et d'inondations.

Les techniques alternatives (TA) présentées dans le tableau offrent des solutions diverses pour la gestion des eaux pluviales, mais leur faisabilité varie considérablement selon les contraintes locales. Certaines, comme le réseau surdimensionné, sont relativement réalisables mais nécessitent un budget conséquent et un espace suffisant. D'autres, telles que le bassin enterré ou les puits d'infiltration, se heurtent à des limitations géologiques et financières qui les rendent difficiles à mettre en œuvre, en particulier dans les zones urbaines denses.

En revanche, des solutions comme les fossés et les noues paysagères sont très peu adaptées aux zones urbaines en raison du manque d'espace et des exigences d'entretien.

Il apparaît donc que la mise en œuvre de ces techniques alternatives nécessite non seulement une bonne planification, mais aussi une gestion rigoureuse des infrastructures existantes, comme le nettoyage régulier des caniveaux et autres ouvrages, pour éviter des obstructions et garantir l'efficacité des systèmes de gestion des eaux pluviales.

L'application de la méthodologie AHP-FMECA à d'autres réseaux urbains des wilayas de la région littorale de l'Algérie ouvre de nouvelles perspectives de recherche. Ces investigations permettront d'affiner l'évaluation de la hauteur d'inondation et d'élargir les solutions de gestion des eaux pluviales, de l'amont à l'aval de chaque PN.

BIBLIOGRAPHIE

- ANVARIFAR, F., VOORENDT, M. Z., ZEVENBERGEN, C. & THISSEN, W. 2017. An application of the Functional Resonance Analysis Method (FRAM) to risk analysis of multifunctional flood defences in the Netherlands. *Reliability Engineering & System Safety*, 158, 130-141.
- AOUNI, M. 2014. *Centralités urbaines et développement touristique à Bejaia (Algérie)*. Reims champagne - Ardenne - École doctorale Sciences humaines et sociales.
- ASRA ASRY. Modélisation hydrologique de l'infiltration des eaux pluviales dans les sols urbains en prenant en compte les chemins préférentiels. Génie civil. INSA de Lyon, 2023. Français. NNT: 2023ISAL0095. tel-04583706.
- AYARI, K., DJEBBI, M. & CHAKROUN, H. 2016. Flood Risk Mapping of The City of El Bab Medjez by the Overflow of the Medjerda. *LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782*, 285-307.
- AZAIEZ, N. & ALLAOUA, A. 2022. Le risque d'inondation dans le quartier d'El Mensek: de l'aléa morpho-hydro-météorologique au risque résiduel d'ordre socio-naturel (Abha, Arabie Saoudite). 5.
- AZOUNE, N., & CHERRARED, M. (2020). *Approche multicritère pour la gestion des eaux pluviales en milieu urbain – Étude de cas*. Colloque Maghrébin sur l'Eau et l'Environnement dans les Zones Arides et Semi-Arides (CMEEZASA'2020) Biskra - Algerie.
- AZZOUT, Y., BARRAUD, S., N. CRES, F. & ALFAKIH, E. 1995. Decision aids for alternative techniques in urban storm management. *Water Science and Technology*, 32, 41-48.
- BACHOC, F., ET AL 2013. Analyse multi-critères pour la gestion des risques d'inondation en zone urbaine : cas d'étude et application de la méthode AHP. *Journal de l'Eau et l'Environnement*, 20(3), 221-230.
- BENBACHIR, M., CHERRARED, M. & CHENAF, D. 2021. Managing sewerage networks using both failure modes, effects and criticality analysis (FMECA) and analytic hierarchy process (AHP) methods. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 48, 1683-1693.
- BOUCHER, I. 2010. La gestion durable des eaux de pluie, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, coll. « Planification territoriale et développement durable », 118 p.
- BOUYSSOU, D., DUBOIS, D., PIRLOT, M., & PRADE H 2003. Concepts and Methods for Decision Support. *Collective work in the IC2 Information, Command, Communication series. Hermès Edition*.

- CAMERER, C. F., LOEWENSTEIN, G., & PRELEC, D. (2005). *Neuroeconomics: How neuroscience can inform economics*. *Journal of Economic Literature*, 43(1), 9–64. <https://doi.org/10.1257/0022051053737843>
- CARADOT, N., GRANGER, D., CHAPGIER, J., CHERQUI, F. & CHOCAT, B. 2011. Urban flood risk assessment using sewer flooding databases. *Water Science and Technology*, 64, 832-840.
- CERTU 2000. La ville et son assainissement. Centre d'Études et de Recherches sur les Transports Urbains. Organiser les espaces publics pour maîtriser le ruissellement urbain, ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement. Lyon.
- CHALAUX, E., DUPONT, P., & CLAYETTE, S. 2015. *Gestion patrimoniale des réseaux d'assainissement : Bonnes pratiques – Aspects techniques et financiers*. Paris : ASTEE & ONEMA.
- CHAMOUX, C. 2003. *Techniques alternatives en assainissement pluvial : de la théorie à la pratique*. Doctorat.
- CHANG, C. W., WU, C.R., LIN, C.T. & CHEN, H.C 2007. An application of AHP and sensitivity analysis to select the best slicing machine. *Computer Science and Industrial Engineering*, 52(2), 296-307.
- CHOCAT, B. 1997. *Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement*, Paris [FRA] : Lavoisier.
- CHOCAT, B.(2001). *L'assainissement des agglomérations urbaines*. Paris : Tec & Doc – Lavoisier.ISBN : 2-7430-0415-6.
- DAUPHINÉ, A. & PROVITOLLO, D. (2013). *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Collection U. Paris : Armand Colin, 408 p. ISBN 978-2-200-2742-7.
- DARKO, A. et al. (2018) « Examen de l'application du processus de hiérarchie analytique (AHP) dans la construction », *International Journal of Construction Management*, 19(5), pp. 436-452. DOI : 10.1080/15623599.2018.1452098
- DESBORDES, M. 1997. La gestion urbaine du risque d'inondation : problématique et enjeux. *La Houille Blanche* 83 (7), 20-24.
- DESBORDES, M., RAMPEREZ, A. 1977. Extension du modèle L.H.M. aux bassins versants de taille moyenne *note L.H.M.* Université de Montpellier ; France.
- DESBORDES MICHEL. 2017. - Principales causes d'aggravation du risque d'inondation par ruissellement pluvial en milieu urbanisé. In: *Crués et inondations*. 23èmes journées de l'hydraulique. Congrès de la Société Hydrotechnique de France. Nimes (France),14-15-16 septembre 1994. Tome 2, 1994; https://www.persee.fr/doc/jhydr_0000-0001_1994_act_23_2_5387
- DIDIER, D., ET AL 2010. Les impacts des changements climatiques sur la gestion des eaux en milieu urbain. *Hydrologie et Environnement Urbain*.
- DUBOIS, D., & PRADE, H 2008. Évaluation des risques liés aux infrastructures hydrauliques : approche par la méthode FMEA. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), 59-70.

- FRANÇOIS ANCTIL, J. R., NICOLAS LAUZON 2012. *Hydrologie : cheminements de l'eau 2ed.*, Presses inter Polytechnique, .
- GAUTHIER, B. 1993. La structure de la preuve : de la problématique à la collecte de données. *Recherche sociale, Presses de l'Université du Québec, Sillery, 1993, pp. 141 à 174.*
- GRALEPOIS, M. & GUEVARA VIQUEZ, S. 2015. L'adaptation aux risques d'inondation façonnée par les métiers de la ville. *Développement durable et territoires.*
- GRANGER, D., CHOCAT, B. & CHERQUI, F. 2009. *Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines.*
- GRANGER, D., SOURDRIL, A., CHERQUI, F., ROUSSEAU, J. R., DARRIBERE, C., GARCIA-ALCUBILLA, R., PAILLOU, R., LOUBIERE, B. & LE GAUFFRE, P. 2014. Recurrent urban flooding hazard. A case study of assessment based on operating databases in Bordeaux Urban Community. *Techniques - Sciences - Methodes*, 38-48.
- GUILLAUME CHAGNAUD, GEREMY PANTHOU, THÉO VISCHEL & THIERRY LEBEL (2023). Réviser les courbes intensité-durée-fréquence dans un contexte de nouvelle donnée hydro-climatique : de la détection de tendances à l'application opérationnelle, LHB, 109:1,2293085,DOI: 10.1080/27678490.2023.2293085
- GUITON, M. 1994. Ruissellement et risque majeur, crue centennale en milieu urbanisé. Etudes de cas : le Grand-Bornand, Nîmes, Paris et Vaison-la-Romaine. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- HAMMOND, M. J., CHEN, A. S., DJORDJEVIĆ, S., BUTLER, D. & MARK, O. 2015. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. *Urban Water Journal*, 12, 14-29.
- HE, J., QIANG, Y., LUO, H., ZHOU, S. & ZHANG, L. 2021. A stress test of urban system flooding upon extreme rainstorms in Hong Kong. *Journal of Hydrology*, 597, 125713.
- Ho, William, 2008. « Processus de hiérarchie analytique intégrée et ses applications - Une revue de la littérature », *European Journal of Operational Research*, Elsevier, vol. 186(1), pages 211-228, avril.
- HUBERT, G., & LEDOUX, B. (1999). *Le coût du risque... : l'évaluation des impacts socio-économiques des inondations.* Paris : Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 240 p. ISBN : 978-2-85978-321-1. hal-01180163
- KAROL LAVOINE, M., TANOUGONG NKONDJOUA, A. D., JOVIS ARNOLD, N. & RONALD, S. 2021. *Variabilités pluviométriques et risque d'inondation dans le bassin versant beyeme-mefou dans l'arrondissement de yaounde VI.*
- LE GOFF, T., & PUECH, C 2012. Application de la méthode AHP pour la priorisation des interventions sur les réseaux d'assainissement. *Techniques - Sciences - Méthodes*, 9, 43-50.
- LOUMI, K. & REDJEM, A. 2021. Integration of GIS and Hierarchical Multi-Criteria Analysis for Mapping Flood Vulnerability: The Case Study of M'sila, Algeria. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 11, 7381-7385.
- MARION, T. 2016. *Développement d'une méthode de caractérisation et d'évaluation du risque humain lié aux inondations en milieu urbain* Université du Québec.

- MARTIN, C. & LEGRET, M. La methode multicritere ELECTRE III : Definitions, principe et exemple d'application a la gestion des eaux pluviales en milieu urbain. 2005.
- MEDDI, M., BOUABDELLI, S., HALLOUZ, F., RAHMOUNI, A., TAIBI, S., & ZEROUAL, A. (2024). Impacts du changement climatique sur la sécheresse dans le nord de l'Algérie. In A. M. El Kenawy, E. S. M. Robaa, M. M. M. Torab & M. Hereher (Éds.), *Hydroclimatic Extremes in the Middle East and North Africa* (chap. 6, pp. 101-128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824130-1.00019-9>
- MENAD, W. 2012. *Risques de crue et de ruissellement superciel en métropole mediterrannée : cas de la partie ouest du Grand Alger*. Géographie. Université Paris-Diderot - Paris VII.
- MOREL À L'HUISSIER, A. (1996). *L'assainissement des eaux pluviales en milieu urbain tropical subsaharien : Dossiers techniques*. Luxembourg : LuxDev / World Bank Regional Water and Sanitation Group for West and Central Africa. ISBN 978-2-919894-00-0. Récupéré de pS-Eau : [PDF 5,52 Mo]..
- MOREL, G., & HUMBERT, J 2011. Méthodologie FMEA appliquée à la gestion des infrastructures pluviales : identification et analyse des risques de débordement. *Revue Française de Gestion*, 37(2), 87-98.
- MUSY, A., & HIGY, C. (1998). *Hydrologie appliquée* (Bucarest : Édition HGA, 366 p.)
- NESRINE HMIDI. 2023. Entre normes internationales et pratiques locales: diagnostic et propositions pour la gestion du risque inondation dans le Grand Tunis. Géographie. Université Paul Valéry- Montpellier III, 2023. Français. NNT: 2023MON30054. tel-04627247
- NICOLAS, J.-P. 2010. La gestion des eaux pluviales en milieu urbain : méthodologies et outils de décision. *Revue des Sciences de l'Eau*, 23(4), 331-345.
- OUMA, Y. O. & TATEISHI, R. 2014. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *Water* [Online], 6.
- ONA (Office National de l'Assainissement). (2017). Études de diagnostic et de réhabilitation des réseaux d'assainissement. Lot 2 – Villes de Tizi Ouzou et Béjaïa. Rapport de mission A – sous-mission A1 : Collecte des données de base. ONA. Disponible sur : <https://ona-dz.org>
- PAULET, J.-P. 2010. Chapitre 16-La ville et l'appropriation de l'espace. *Collection U*, 175-184.
- PETRUCCI, G. 2012. *The diffusion of source control for urban stormwater management : a comparison between the current practices and the hydrological rationality La diffusion du contrôle à la source des eaux pluviales urbaines : confrontation des pratiques à la rationalité hydrologique*. Université Paris-Est.
- PHILIPPE, F., PITON, G., TACNET, J. M. & GOURHAND, A. 2018. Focus - Aide à la décision par l'application de la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) à l'analyse multicritère des stratégies d'aménagement du Grand Büech à la Faurie. *Sciences Eaux & Territoires*, 54-57.
- PRESS, D. 2003. *Guidelines for failure mode and effects analysis (FMEA), for automotive, aerospace, and general manufacturing industries*, CRC Press.

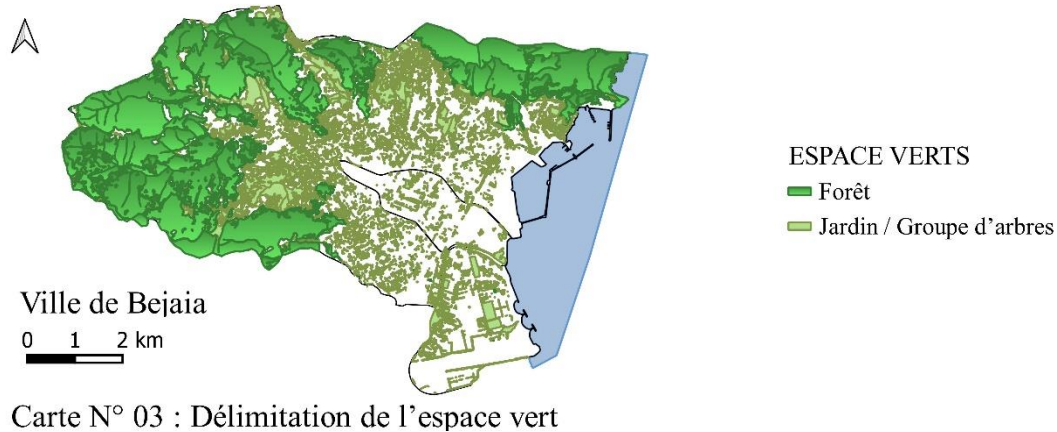
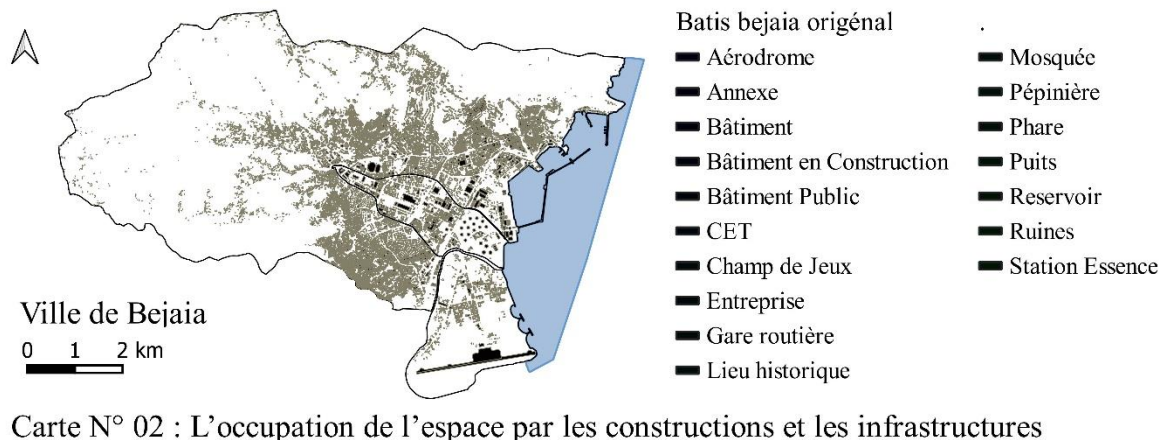
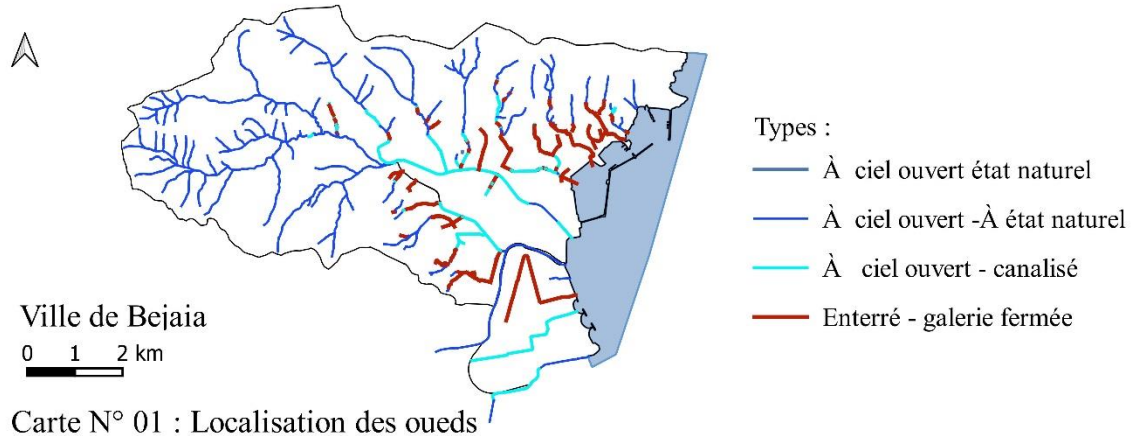
- REMENIERAS, G. 1980. *L'hydrologie de l'ingénieur. HYDRAULIQUE-HYDROLOGIE-RESSOURCES EN EAU*, Eyrolles, Paris [FRA].
- RENARD, F. & SOTO, D. 2015. Une représentation du risque à l'intersection de l'aléa et de la vulnérabilité: cartographies des inondations lyonnaises. *Geogr. Helv.*, 70, 333-348.
- ROUSSELLE, L., WAN, W.E., LATHEM, K.W., NEILL, C.R., RICHARDS, TL, 1990. *Hydrologie des crues au Canada: guide de planification et de conception*, Conseil national de recherches du Canada. Comité associé sur le Code national du bâtiment Watt, W.E. National Research Council Canada. Associate Committee on Hydrology.
- ROY, B. 1985. Méthodologie multicritères d'aide à la décision. *Economica, Paris, France*.
- SAATY, T. L. 2008. Decision Making with the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of Services Sciences*, 1, 83.
- SAATY, T. L. A. V., L.G 1991. Prediction, Projection and Forecasting. *Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 251 p.*
- SAHELY, H. R., KENNEDY, C. A., & ADAMS, B. J 2005. Developing sustainability criteria for urban infrastructure systems. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 72-85.
- SEVERAC, C., PIERRE TRISTAN HUBERT. 2022. *Risk analysis according to the FMEA method and its use in the Quality by Design approach. Application to the development of a new process for the production of radiopharmaceuticals L'analyse de risque selon la méthode AMDEC et son utilisation dans l'approche Quality by Design. Application au développement d'un nouveau procédé de production de médicaments radiopharmaceutiques.*
- SCHNEIDER, W., & SHIFFRIN, R. M. (1977). *Controlled and automatic human information processing: I. Detection, search, and attention. Psychological Review*, 84(1), 1–66. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.1.1>
- SFILIGOÏ TAILLANDIER, F. (2009). *La notion de risque comme clef du pilotage d'un parc patrimonial immobilier*. Thèse de Doctorat, Université de Savoie, soutenue le 29 septembre 2009.
- SOWMYA, K., JOHN, C. M. & SHRIVASTHAVA, N. K. 2015. Urban flood vulnerability zoning of Cochin City, southwest coast of India, using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 75, 1271-1286.
- STAMATIS, D. H. 2003. *Failure mode and effect analysis*.
- TRIANTAFILLOU, C. 1987. *LA DEGRADATION ET LA REHABILITATION DES RESEAUX D'ASSAINISSEMENT FRANCE - ANGLETERRE - ETATS-UNIS*. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- TVERSKY, A., & KAHNEMAN, D. (1974). *Judgment under uncertainty: Heuristics and biases. Science*, 185(4157), 1124–1131. <https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124>
- VALY, J. 2010. *Croissance urbaine et risque inondation en Bretagne*. Université Rennes 2; Université Européenne de Bretagne.

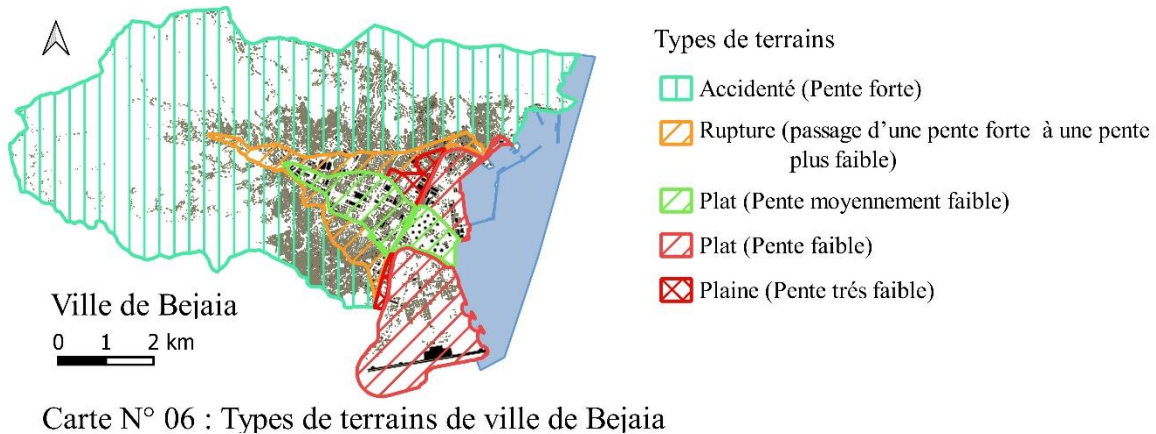
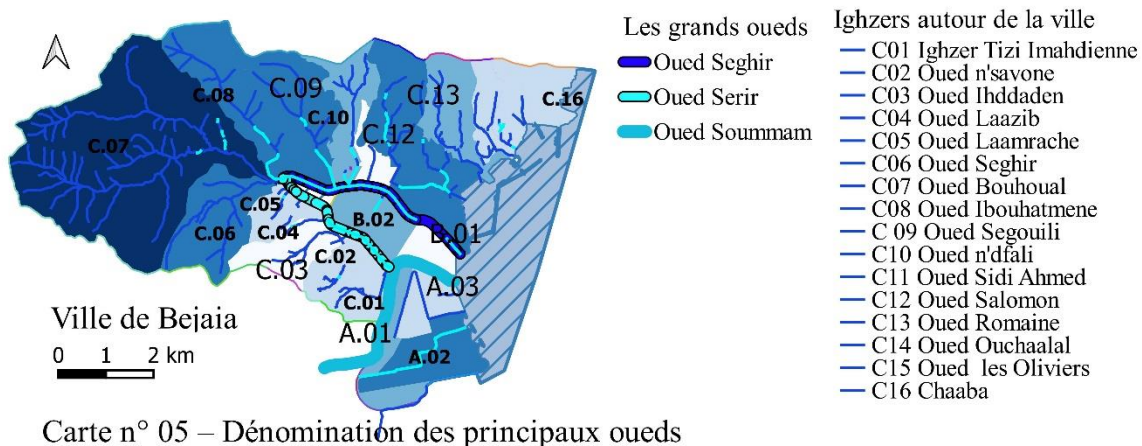
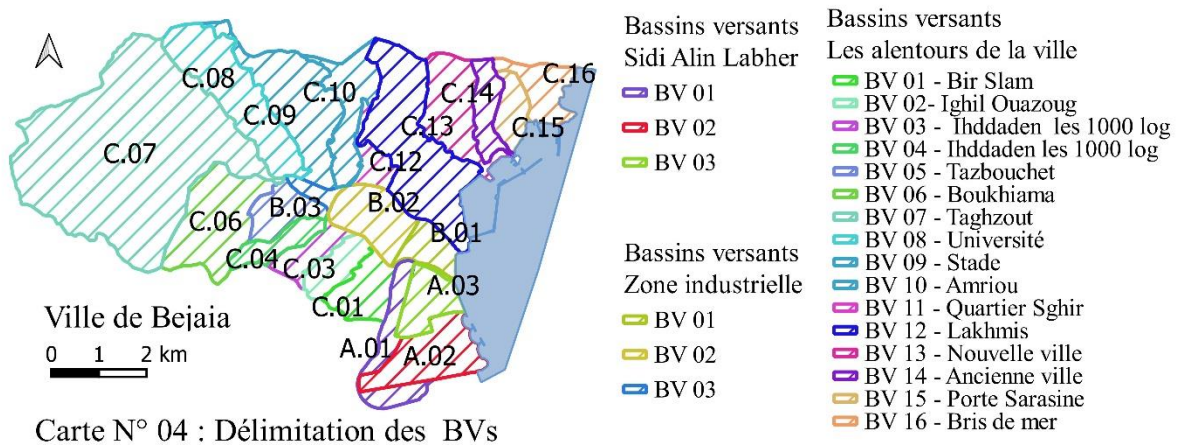
- VASCONCELOS, E. C. 2005. *Outils d'aide à la gestion du patrimoine réseau d'assainissement non visitable*.
- VERLYNDE, N. 2018. *From flood risk perception to adjustment scenarios in densely populated low-lying coastal areas : the case of the "communauté urbaine de Dunkerque". De la perception du risque d'inondation aux propositions d'adaptation en territoire de côtes basses densément peuplées : le cas de la communauté urbaine de Dunkerque*. Université du Littoral Côte d'Opale.
- VLADANU, G. & MATTHEWS, J. 2019. Consequence-of-Failure Model for Risk-Based Asset Management of Wastewater Pipes Using AHP. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 10.
- WANG, Y. H., HSU, Y. C., YOU, G. J. Y., YEN, C. L., & WANG, C. M. 2018. Flood Inundation Assessment Considering Hydrologic Conditions and Functionalities of Hydraulic Facilities. *Water*, 10(12), 1879.
- ZERROUROU, M. (1990). *Planimétrage du bassin versant de l'Oued Soummam à l'échelle 1/50 000 et détermination de ses caractéristiques morphométriques*. Étude , Algérie.
- ZHUO, L. & HAN, D. 2020. Agent-based modelling and flood risk management: A compendious literature review. *Journal of Hydrology*, 591, 125600.

ANNEXES

ANNEXE A – PRESENTATION DES CARTES

Un ensemble de cartes a été élaboré au cours de la phase préparatoire de ce travail de recherche, notamment celles représentant les principaux oueds, les limites des bassins versants (BVs) ainsi que l'occupation du sol.





ANNEXE B – LA MISE EN ŒUVRE D’UNE MULTITUDE D’OUTILS INSTITUTIONNELS ET LEGISLATIFS

ORGANISATION ADMINISTRATIVE ET FONCTIONNEMENT DE LA WILAYA BEJAIA

I. Les organes de l’administration générale de la wilaya de Bejaia

Les organes de l'administration générale de la Wilaya sont considérés comme des collaborateurs du Wali. Selon l'article 2 du décret exécutif N°94-215, ces organes comprennent :

- ❖ Le secrétariat général
- ❖ L'inspection générale
- ❖ Le cabinet
- ❖ Le chef de Daïra

De plus, un conseil de Wilaya et un délégué à la sécurité auprès du Wali sont également institués dans la Wilaya.

a. Secrétariat général et inspection générale

Dans le cadre de ses missions et prérogatives, la wilaya dispose d'un secrétariat général responsable de la coordination entre les différentes structures et organismes publics sur son territoire. Elle est également dotée d'une inspection générale, qui agit en tant qu'enquêteur et arbitre dans les affaires publiques concernant les missions des organismes placés sous la tutelle du ministère de l'Intérieur.

b. Cabinet du Wali, Conseil de la Wilaya et Délégué à la Sécurité

Le Wali est assisté dans l'exercice de ses fonctions par des organes clés de l'administration générale de la wilaya, notamment le Cabinet, le Conseil de la Wilaya et un Délégué à la Sécurité.

Le Cabinet du Wali, régi par le décret exécutif N°94-215, est une composante de l'administration générale de la Wilaya, placé sous l'autorité directe du Wali. Il est dirigé par un chef de cabinet nommé par décret présidentiel, qui reçoit délégation de signature du Wali et assure le bon fonctionnement du Cabinet à travers des attachés de cabinet.

Le Cabinet comprend de six à dix attachés, nommés par le Wali, qui occupent des postes supérieurs. La Wilaya de Bejaia en compte huit, chargés de divers domaines tels que les emblèmes nationaux, l'agriculture, les travaux publics, la jeunesse et le sport, l'ordre public, et l'éducation.

Un attaché de cabinet est également responsable de la communication, gérant les informations diffusées auprès du public via la presse et les réseaux sociaux, y compris la page Facebook officielle

de la Wilaya. Enfin, le chargé du protocole organise les rencontres avec le Wali et coordonne les événements officiels.

c. Le Conseil de la Wilaya

Sert de cadre de concertation pour les services de l'État au niveau local et assure la coordination des activités sectorielles. Il regroupe les responsables des services déconcentrés de l'État sous l'autorité du Wali. Sa mission principale est d'exécuter les décisions du gouvernement et de l'Assemblée Populaire de Wilaya (A.P.W) sur le territoire de la Wilaya.

Le Conseil examine toutes les questions soumises par le Wali ou l'un de ses membres, et est chargé de :

- ✓ Prendre les mesures nécessaires pour préserver l'autorité et la crédibilité de l'État et faire respecter les lois en vigueur.
- ✓ Veiller à la mise en œuvre des programmes et directives du gouvernement.
- ✓ Donner son avis sur tous les projets implantés sur le territoire de la Wilaya.

d. Délégué à la Sécurité auprès du Wali

Anciennement connu sous le nom de D.O.P.S, le Délégué à la Sécurité auprès du Wali est un fonctionnaire supérieur nommé sur proposition du ministre de l'Intérieur. Ses missions, définies par le décret exécutif N°93-314, incluent :

- Assister le Wali dans la conception, la mise en œuvre et l'évaluation des mesures de sécurité préventive.
- Animer et coordonner l'activité des chargés de mission et des assistants de sécurité au niveau des Daïras et des Communes.

Dans la Wilaya de Bejaia, le Délégué à la Sécurité dispose de quatre bureaux :

- ✓ Bureau des victimes du terrorisme et de la réconciliation nationale.
- ✓ Bureau des enquêtes d'habilité pour les demandes de licences (débit de boissons, mariage mixte, transport d'armes, etc.).
- ✓ Bureau de la sûreté interne.
- ✓ Bureau d'information pour le commandement militaire concernant la situation des sociétés de gardiennage, de transport de fonds, des étrangers, et l'établissement de rapports hebdomadaires sur les expatriés liés à des entreprises spécifiques.

II. Les Services de la Réglementation, des Affaires Générales et de l'administration Locale

Les services de la réglementation, des affaires générales et de l'administration locale sont régis par le décret exécutif N°95-26521. Leur mission principale est de garantir l'application de la réglementation générale et de fournir un soutien logistique pour le bon fonctionnement des services communs de la Wilaya. Selon l'article 03 du décret, ces services sont divisés en deux directions : la direction de la réglementation et des affaires générales (D.R.A.G.) et la direction de l'administration locale (D.A.L.).

a. La Direction de la Réglementation et des Affaires Générales (D.R.A.G)

A pour mission principale de garantir l'application de la réglementation générale, en assurant le contrôle de légalité des mesures réglementaires locales. Elle organise les opérations électorales, gère l'administration des élus communaux et de Wilaya, et veille à la notification des actes administratifs. La D.R.A.G. suit également le contentieux de l'État et de la Wilaya, supervise la publication des actes communaux, et engage des procédures d'expropriation. Pour accomplir ces missions, elle est divisée en trois services : affaires juridiques et contentieux, réglementation générale, et circulation des personnes.

b. La Direction de l'Administration Locale (D.A.L)

A pour mission principale de soutenir le fonctionnement des services communs de la Wilaya, en préparant et en exécutant les budgets de fonctionnement et d'équipement. Elle s'occupe également de la gestion du personnel des services communs, développe des actions de formation, et collecte des documents nécessaires au bon fonctionnement des services. La D.A.L. analyse et propose des solutions pour optimiser les ressources financières de la Wilaya et des Communes, et approuve les budgets et comptes administratifs. Pour mener à bien ses missions, elle est organisée en trois services : budget et patrimoine, animation locale, et personnel.

AGENTS DU SYSTÈME D'ASSAINISSEMENT EN ALGÉRIE

Comme d'autres Wilaya, la ville de Bejaia son système d'assainissement est géré par l'ONA et commandé par deux services d'assainissement de la DRE et de l'APC, la Figure 4 17 montre ces agents.

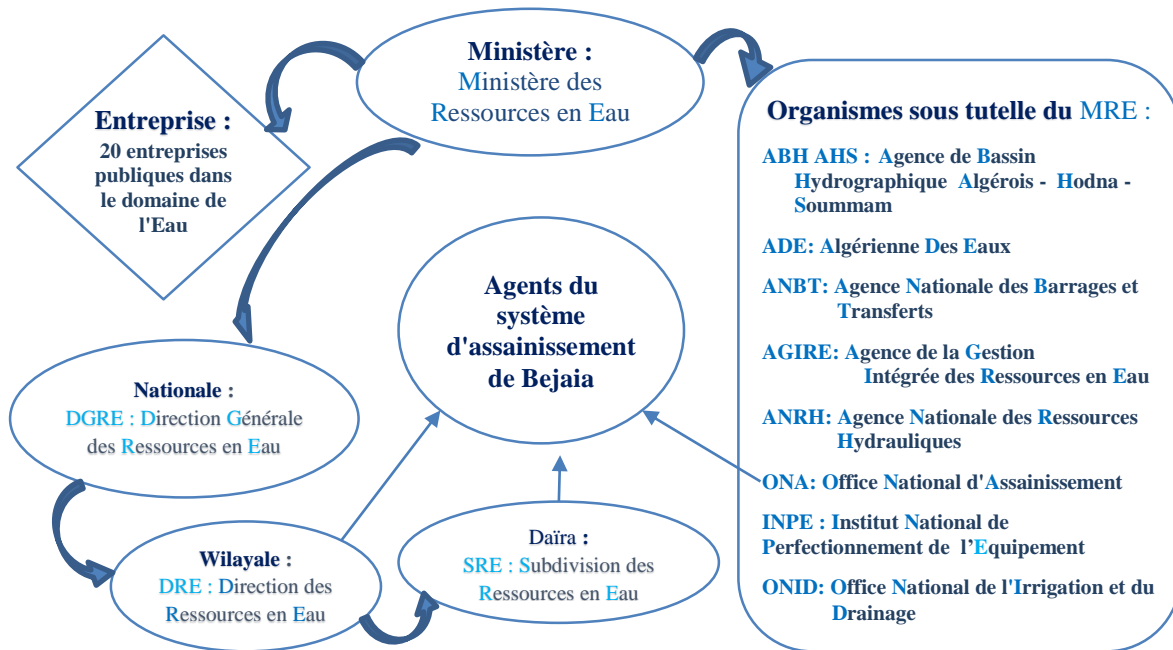


Figure 4-17 : Agents du système d'assainissement en Algérie

i. Direction des ressources en eau de Bejaia

Nous avons des DRE dans toutes les villes du pays et ces directions sont supervisés par MRE. La tâche fondamentale de chaque DRE est de mettre en œuvre les prérogatives de son ministère relevant au niveau provincial, notamment la mission de puissance publique et les prérogatives liées au développement et à l'amélioration du bien-être des populations. La population est principalement concentrée dans l'approvisionnement en eau potable (AEP), l'assainissement et le traitement des eaux usées à l'intérieur de la ville et de grands bassin au long mo.

ii. Assemblée Populaire communale :

L'assemblée nationale communauté (communale)élit un président parmi ses membres pour un mandat de cinq ans. Le PAPC est assisté de deux (2) ou plusieurs Vice-présidents dont le nombre est déterminé par le nombre de sièges. Exercer le pouvoir au nom des collectivités locales qu'il représente et au nom du pays. Sa signature peut être confiée au Vice-Président dans la limite des

missions qui lui sont confiées. Les services techniques, la planification et l'urbanisme font partie des services d'APC. Le service est notamment chargé de s'assurer du respect de la réglementation en vigueur, et que les citoyens effectuent eux-mêmes leurs formalités en matière d'assainissement, de voirie, d'éclairage public et de réseaux divers.

iii. Office Nationale d'Assainissement

L'Office National de l'Assainissement (ONA) est un établissement public national à caractère industriel et commercial (E.P.I.C), créé en 2001. Il assure des services d'assainissement, pour le compte de l'État, la maîtrise d'ouvrage et d'œuvre déléguée concernant les projets d'étude, de réalisation, de réhabilitation et de diagnostic de stations d'épuration, des stations de relevage, des réseaux d'assainissement

La gestion du réseau d'assainissement urbain est à la charge de l'état. Les services publics consacrent à la gestion du réseau d'assainissement, l'ONA, l'APC et l'DRE sont toujours aux services des citoyens et les établissements de l'états. Le fait que les surfaces des villes deviennent de plus en plus imperméables a amené la construction de nombreuses structures et infrastructures pour être exposés aux inondations, ce qui vient augmenter considérablement la facture liée à la gestion des points noirs.

Nous distinguons quatre principaux moyens de financement du service d'assainissement en vigueur aujourd'hui :

- La redevance d'assainissement que l'usager paie en échange du service précis dont il bénéficie.
- Les impôts communaux que le contribuable verse en fonction de l'assiette fiscale à laquelle il est soumis. Les impôts perçus alimentent.
- Le budget général des communes, destiné à toute sorte d'opérations assurées par ces dernières, dont le service d'assainissement.
- Les subventions de l'état ou des autres organismes publics (par exemple les Agences Financières de Bassin, pour le cas de la France, les Agences de gestion de réseau d'assainissement, ONA pour le cas de l'Algérie). Il s'agit des aides financières, non remboursables, allouées aux instances locales et destinées à la réalisation des projets spécifiques. Le plus souvent, elles concernent la réalisation de nouveaux investissements. Il existe aussi des formes de subventions accordées à des projets plus généraux.

ANNEXE C – QUELQUES TERMES TRES EMPLOYES DANS LE PRESENT OUVRAGE

ALÉA désigne un événement incertain ou imprévisible qui peut influencer un résultat. Il est souvent utilisé dans des contextes tels que les statistiques, la gestion des risques ou la planification, où il fait référence à des facteurs ou des circonstances qui échappent à notre contrôle. En Hydrologie urbaine, l'aléa correspond à ce qui caractérise la submersion, indépendamment du mode d'occupation des sols. Il est lié à la fois à des paramètres naturels (pluie, ruissellement, formation de la crue) et à des facteurs anthropiques (gestion des ouvrages hydrauliques existants, modification de la morphologie des cours d'eau et de l'occupation des sols dans les lits majeurs, modification des processus d'érosion et de ruissellement naturel...).

APD c'est l'Avant-Projet Détaillé permet de préciser les caractéristiques du projet approuvé suite à l'APS. L'APD fournit les plans définitifs et des estimations précises du coût et de la durée des travaux.

APS c'est l'Avant-Projet Sommaire est l'étude qui, réalisée par le maître d'œuvre, présente sous la forme de plans le projet envisagé par le maître d'ouvrage. Il fournit une estimation du coût et de la durée des travaux. L'APS permet au maître d'ouvrage de préciser ses choix et de décider des solutions à retenir. Tout cela est ensuite approfondi lors de l'APD.

AUTOCURAGE c'est le phénomène de nettoyage des égouts ou des conduites d'assainissement qui se produit grâce aux seuls effets des écoulements, où les matières solides sont entraînées par les eaux usées.

CONFORMITE HYDRAULIQUE c'est la capacité de la canalisation à acheminer les débits existants ou prévus.

DOMMAGE c'est une valeur anthropocentrique qui reflète les conséquences économiques négatives d'une inondation sur les biens, les activités et les personnes. On distingue les dommages directs, liés à la destruction matérielle ou corporelle causée par l'inondation, et les dommages indirects, résultant des impacts des dommages directs sur les activités et les échanges dans et en dehors de la zone inondée.

EAU DE PLUIE c'est une eau issue des précipitations atmosphériques non encore chargée de matières de surface.

EAU PARASITAIRE c'est une eau étrangère pénétrant dans un réseau de collecte d'eaux usées au niveau des regards, par les raccordements de drains agricoles ou de descentes pluviales, ou par les joints ou les fissures dans les conduites..

EAUX USÉES sont des eaux issues de n'importe quelle combinaison d'activités domestiques, industrielles ou commerciales, eaux de ruissellement de surface ou introduites accidentellement dans les égouts par déversement ou infiltration, y compris les eaux pluviales non collectées, rejetées dans l'environnement ou dans un égout.

ENDOMMAGEMENT d'un bien exprime le rapport entre la valeur des dommages et la valeur totale du bien exposé (immobilier et mobilier).

ENJEU correspond à une caractérisation physique, économique ou financière des éléments (biens, activités, personnes) exposés à un événement d'inondation donné ou concernés par celui-ci

ÉQUIPEMENT composant associé à un ouvrage, par installation, montage, liaison ou mise en œuvre pour son exploitation afin d'assurer la fonction qui lui est dévolue.

ÉTAT STRUCTUREL c'est l'état d'un branchement ou d'un collecteur en ce qui concerne l'intégrité de sa structure.

ÉVALUATION est un procédé utilisé (après achèvement de l'examen) pour déterminer les mesures correctives nécessaires à l'amélioration de l'état ou de la performance d'un élément de réseau au meilleur rapport qualité-prix pour la collectivité.

EXAMEN est un procédé utilisé pour décrire l'état ou le comportement d'un élément de réseau.

GESTIONNAIRE MUNICIPAL est tout employé du secteur public ou privé travaillant au niveau technique ou administratif pour une municipalité ou une entreprise de service public, soit directement, soit à titre de consultant (également appelé « décideur »).

GESTION DE BIENS est un processus permettant à un service public d'orienter, de contrôler et d'optimiser la fourniture, la maintenance et la mise hors service des biens liés aux infrastructures, y compris les coûts nécessaires pour les performances spécifiées, au cours de leur cycle de vie.

GESTION DU RESEAU D'ASSAINISSEMENT PLUVIAL est la gestion coordonnée et planifiée, de la conception, de la construction, de la réhabilitation, du fonctionnement et de l'entretien de tous les réseaux d'évacuation et d'assainissement d'un bassin versant qui prenant en compte tous les aspects de leurs performances.

GRAND COLLECTEUR est le collecteur principal ordinairement utilisé pour intercepter les égouts ordinaires ainsi que pour recevoir et transporter les eaux d'égout à quelques places centrales, telles qu'une station d'épuration ou un point d'évacuation sur la berge d'une rivière.

INTEGRITE FONCTIONNELLE est l'aptitude d'une canalisation à acheminer les débits de manière opérationnelle. Les défauts sont généralement corrigés dans le cadre des activités opérationnelles ou d'entretien.

INTEGRITE STRUCTURALE est l'aptitude d'une canalisation à maintenir sa section pendant toute sa vie utile. Les défauts sont généralement corrigés par des méthodes de construction qui prévoient l'introduction de nouveaux matériaux.

INTERPOLATION est l'estimation ou le calcul de valeurs intermédiaires dans une série de valeurs connues.

LIEN STRATEGIQUE désigne le tronçon du réseau dont la défaillance a des conséquences importantes, comme un grand collecteur, un passage de cours d'eau ou un égout situé dans l'emprise d'une artère de circulation (également appelé « canalisation critique »).

MAILLAGE désigne la surface ou le volume généré par un ensemble de nœuds et de lignes de contrôle, dont les caractéristiques sont définies par les points ou les courbes ayant servi à la création de l'élément.

MAITRE D'ŒUVRE c'est une personne ou entité choisie par le maître d'ouvrage pour réaliser un ouvrage ou un projet en respectant des délais, des coûts et des critères de qualité fixés par le mandataire dans un contrat

MAITRE D'OUVRAGE c'est une personne morale responsable du service d'assainissement (développement et fonctionnement). Il a pour rôle de planifier et de faire financer le développement des services d'assainissement sur son territoire de compétence et d'assurer la bonne coordination des différents acteurs, en accord avec les réglementations et la stratégie nationale.

METHODE DES ELEMENTS FINIS c'est la méthode des éléments finis est une technique d'interpolation qui consiste à discrétiser le domaine de calcul en un ensemble de sous domaines de géométrie simple, les éléments. Sur chaque élément, on définit une fonction d'interpolation qui prend en compte la disposition des nœuds de l'élément (géométrie) et les valeurs qu'ils portent.

NŒUD ou regard ou endroit où se trouve la jonction de deux tronçons d'égout ou plus.

OPERATEUR c'est une personne ou organisation qui met en œuvre les processus et les activités quotidiennes nécessaires à la fourniture du service. Il peut être public (distinct ou non de l'autorité organisatrice) ou privé.

OUVRAGE c'est une réalisation destinée à remplir une fonction.

PLAN D'ACTION c'est un outil de pilotage de l'action publique traduisant les orientations stratégiques en objectifs d'action et permettant la définition des moyens nécessaires (fonctionnement et investissement) à l'atteinte de ces objectifs.

REGARD c'est un élément d'un réseau de collecte d'eaux pluviales ou d'eaux usées qui permet d'accéder à une conduite enfouie (également appelé « ouvrage d'accès, trou d'accès ou cheminée de visite »).

REGLEMENTATION Dans le domaine de l'assainissement, il s'agit d'un corpus de règles élaborées par le législateur pour encadrer le secteur dans le but d'assurer l'hygiène publique et la protection de l'environnement. La réglementation peut être élaborée à un niveau national et local. La régulation permet de faire respecter la réglementation.

REHABILITATION c'est toutes mesures entreprises pour restaurer ou améliorer les performances d'un élément d'actif en vue d'en prolonger la vie utile.

REPLACEMENT, remplacement d'un élément d'actif qui a atteint la fin de sa vie utile.

RENOUVELLEMENT, rétablissement ou amélioration de l'état ou de la capacité d'un élément d'actif par réhabilitation ou remplacement/reconstruction en vue de respecter les objectifs en matière d'intégrité structurale, d'intégrité fonctionnelle et de conformité hydraulique.

RESEAU PRIMAIRE c'est un réseau situé le long des routes principales.

RESEAU SECONDAIRE c'est un réseau situé dans les rues secondaires.

RESEAU TERTIAIRE c'est un réseau d'égouts situé dans l'espace privé, au niveau des ménages ou du voisinage (le diamètre des canalisations décroît de primaire vers tertiaire).

RISQUE est défini comme la résultante de deux facteurs : l'aléa et la vulnérabilité. Pour désigner les inondations, on parle de risque naturel majeur. Il n'y a pas de risque sans aléa naturel ni sans élément de vulnérabilité exposé.

SECTEUR fait référence à une région, un district, une zone ou un quartier, et est lié à des attributs qui aident à définir les caractéristiques spécifiques d'un réseau, tels que les conditions du sol, le matériau des conduites, l'âge des conduites et le mode de construction.

SECTEUR CRITIQUE désigne une zone où les canalisations d'égout pluvial ou sanitaire sont stratégiquement importantes ou présentent un taux de défaillance élevé. Ces secteurs nécessitent une attention particulière en raison de leur impact potentiel sur l'infrastructure et la sécurité publique.

TAXE D'ASSAINISSEMENT est une imposition destinée à financer les services d'assainissement. Elle contribue à couvrir les coûts liés à la collecte, au traitement des eaux usées et à la préservation de l'environnement.

TECHNIQUES DE REHABILITATION se classifient en trois catégories : rénovation, réparation et remplacement. La rénovation englobe des méthodes comme le tubage par tuyau continu et le chemisage polymérisé, qui visent à moderniser les infrastructures. La réparation se concentre sur des actions ciblées, telles que l'injection de résines pour colmater les fissures et le chemisage partiel. Enfin, le remplacement inclut des techniques sans tranchée, telles que l'éclatement et l'extraction de tuyaux, ainsi que le micro-tunnellage et le remplacement traditionnel par tranchée. Ces approches s'adaptent aux besoins spécifiques des projets d'infrastructure.

VULNÉRABILITÉ décrit le lien entre les aléas, la nature et les enjeux exposés, ainsi que les ressources disponibles pour y faire face, comme le temps d'intervention, la capacité physique des individus, et les moyens financiers. Traditionnellement, elle est perçue comme une mesure des conséquences dommageables des inondations, se traduisant par une évaluation des dommages. Cependant, cette vision restrictive est de plus en plus remise en question. Aujourd'hui, la vulnérabilité est vue comme la fragilité d'un système socioéconomique face au risque, visant à évaluer sa propension à subir des dommages ou sa capacité à résister aux impacts d'un événement.

Résumé

Dans le choix d'une approche de gestion des Eaux Pluviales (EP) urbaines, il est important de tenir compte des aspects ayant rapport avec les EP et la méthode pratiquée au milieu qu'on essaie d'atteindre. Cette étude vise à aider les gestionnaires du Système de Drainage des Eaux Pluviales (SDEP) d'une ville à gérer les problèmes des EP urbaines, c'est-à-dire, à leur fournir des outils pour une meilleure organisation de l'information sur le SDEP combinée à une meilleure optimisation de ses interventions sur le réseau. Notre étude de cas (Bejaia) est basée sur une analyse multicritère du système "SDEP - inondation - Impact". Nous avons utilisé une approche multicritère et avons classé les points de débordement appelés Points Noirs (PN) en utilisant deux méthodes : Le processus de hiérarchie analytique (AHP : Analytic Hierarchy Process) et la méthode FMECA (Failure Mode, Effects and Criticality Analysis). Les critères et l'échelle d'évaluation ont été définis sur la base d'observations passées, d'avis d'experts et de retours d'expérience. La carte des anciennes zones inondées a été réalisée et utilisée pour calibrer les deux modèles. Nous avons cartographié les PN en fonction des priorités d'intervention (1 à 4). Les résultats des deux modèles sont largement comparables à ceux de l'évaluation de l'impact des inondations passées (données observées). L'approche proposée peut également réduire les risques d'inondation en intégrant certains des facteurs d'influence (causant les inondations) et l'application peut être adaptée et mise en œuvre dans d'autres villes. Les deux méthodes sont fiables, en particulier l'AHP pour les PN les plus débordants. Elles pourraient être avantageusement combinées pour améliorer la prise de décision.

Mots clés : Systèmes de drainage d'eaux pluviales ; débordements ; approche multicritère ; AHP, FMECA

Abstract

To choose an approach, it is important to consider the aspects to do with stormwater and the urban used method that we are trying to reach. This study aims to help managers of Stormwater Drainage System (SDS) to manage urban flood problems, i.e., to provide them with tools for a better organization of information on SDS combined with a better optimization of its interventions on the network. Our study (Bejaia) is based on a multicriteria analysis of the "SDS-inundation-Impact" system. We used multicriteria approaches and classified the overflow points called Black Points (BPs) using two methods: Analytic Hierarchy Process (AHP) and Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA). The criteria and the evaluation scale were defined on the basis of past observations, expert opinions, and feedback experience. The map of the past flooded areas was made and used to calibrate the two models. We mapped the BPs according to intervention priorities (1 to 4). The results of both models are greatly comparable to those of the impact assessment of past floods (observed data). The proposed approach can also reduce flood risks by integrating some influencing factors (causing floodings) and the application can be adapted and implemented in other cities. Both methods are reliable, particularly the AHP for the most overflowing BPs. They could be advantageously combined to improve decision-making.

Keywords: Stormwater drainage systems; overflow; multicriteria approach; AHP, FMECA

ملخص

عند اختيار نهج إدارة مياه الأمطار في المناطق الحضرية، من المهم مراعاة الجوانب المتعلقة بهذه المياه والطريقة المستخدمة في البيئة التي نحاول الوصول إليها. تهدف هذه الدراسة إلى مساعدة مسيري نظام تصريف مياه الأمطار لمدينة ما على إدارة مشاكل الفيضانات الحضرية، أي لتزويدهم بأدوات لتنظيم أفضل للمعلومات الملتقطة عن النظام إلى جانب تحسين تدخلاتها لتسيير الشبكة. تعتمد دراستنا (المطبقة على مدينة بجاية) على تحليل متعدد المعايير للعلاقة النظامية "تصريف مياه الأمطار - الفيضانات - التأثير". استخدمنا نهجاً متعدد المعايير وصنقنا النقاط السوداء (نقاط التدفق) باستخدام طريقتين: عملية التسلسل الهرمي التحليلي وأنماط الفشل والتأثيرات وتحليل الأهمية. تم تحديد المعايير ومقياس التقييم على أساس الملاحظات السابقة (المعطيات الملتقطة) وآراء الخبراء وردود الدراسات السابقة. تم إنتاج خريطة بيانية للمناطق القديمة التي غمرتها المياه سابقاً واستخدامها لمعايرة النموذجين. قمنا بتعيين النقاط السوداء وفقاً لأولويات التدخل (من 1 إلى 4). نتائج النموذجين قابلة للمقارنة على نطاق واسع بنتائج تقييم تأثير الفيضانات السابقة (المعطيات الملتقطة). يمكن للمنهجية المقترحة أيضاً أن تقلل من مخاطر الفيضانات من خلال دمج بعض العوامل المؤثرة (المسببة للفيضانات) ويمكن تكيف التطبيق وتنفيذه في مدن أخرى. كلتا الطريقتين موثوقتان، خاصةً عملية التسلسل الهرمي التحليلي لمعظم النقاط السوداء المتدفقة. يمكن دمجها بشكل مفيد لتحسين عملية صنع القرار.

الكلمات الرئيسية : أنظمة تصريف مياه الأمطار؛ تدفق؛ منهجية متعددة المعايير؛ طرق التحليل المتعدد المعايير؛ AHP, FMECA