

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département d'Architecture  
Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique (LGCH)

**THÈSE**  
**En Vue de l'Obtention du Diplôme de**  
**Doctorat en Troisième Cycle LMD**

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville.

Filière : Architecture

Spécialité : Architecture durable et projet urbain

Présentée par

**LEULMI Lamia**

*Intitulé*

**Défis des risques des inondations : la résilience urbaine en question**

**Cas de la ville de Skikda**

Soutenue le : 16/04/2025

Devant le Jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Affiliation	
Mr. ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. 8 Mai 1945, Guelma	Président
Mr. LAZRI Youcef	Professeur	Univ. 8 Mai 1945, Guelma	Encadrant
Mr. MAHIMOUD Aissa	Professeur	Univ. Saleh Boubnider, CNE3	Examineur
Mr. CHERAITIA Mohammed	M.C. A	Univ. 8 Mai 1945, Guelma	Examineur
Mm. Salah-Salah Hana	M.C. A	Univ. 8 Mai 1945, Guelma	Examineur

**Année Universitaire : 2024/2025**

## ***DEDICACE***

Je dédie ce travail :

À mes chers parents SAID et DRISSI Hayet,  
dont l'amour, les sacrifices silencieux et les prières m'ont portée jusqu'à ce jour,  
je vous dois la force et la sagesse qui m'ont guidée.

À mes frères Abed El KARIM et BADER EDDINNE,  
compagnons de cœur et d'enfance, merci pour votre soutien discret mais constant.

À mon époux TEFFAHI ZINNE EDDINE,  
présent dans chaque étape, chaque doute, chaque victoire,  
merci pour ta patience, ton amour et ta foi en moi.

À mes enfants HAZEM et AYNOUR,  
lumières de ma vie, qui ont donné un sens profond à chacun de mes efforts.

À mes amis sincères,  
dont la bienveillance m'a portée dans les moments d'épuisement comme dans ceux de  
joie.

À toute ma famille,  
merci pour votre présence rassurante, vos mots d'encouragement et votre fierté  
partagée.

***LEULMI LAMIA***

***Merci à tous et à tout***

## **REMERCIEMENTS**

Je lève mes mains en direction du ciel tout en prononçant "الحمد لله"

Je remercie Allah de m'avoir donné la capacité de réfléchir et d'écrire, ainsi que la patience nécessaire pour réaliser ce rêve.

En premier lieu, je souhaite remercier chaleureusement Mon encadrant, le Professeur Youcef LAZRI, pour son soutien constant, ses conseils avisés et sa patience tout au long de ce parcours. Votre expertise, votre rigueur scientifique et vos encouragements constants ont été cruciaux pour la réussite de ce travail. Merci de m'avoir guidé avec bienveillance et de m'avoir transmis votre passion pour la recherche scientifique.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à :

L'école doctorale d'architecture à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, le professeur Djamel ALKAMA pour sa contribution, son aide précieuse, son soutien et son implication dans le bon déroulement de mes travaux de recherche.

Monsieur Brahim ABDELKBIR, MCB à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, département de génie civil et d'hydraulique, pour ses conseils éclairés et son aide précieuse, qui ont grandement enrichi cette thèse.

Monsieur Soufiane BENSANELLA, MCB à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, département d'architecture, pour sa disponibilité et ses suggestions pertinentes.

Madame Fatima Zahra Djouad, MCA à l'Université du 8 mai 1945 de Guelma, département d'architecture, pour le soutien et la patience.

Le Professeur Mohammed Saleh NOUOURIA, Directeur du laboratoire, pour sa disponibilité et son soutien.

Dr. Ibtissem LOUNIS et Dr. Amina KHALFAOUI pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail. Je suis honoré(e) par l'intérêt que vous portez à mon travail et par le temps que vous y avez consacré.

Mes remerciements sincères et ma gratitude vont à toute l'équipe de la direction des ressources en eau, à la direction de l'environnement, à la DUCH et à la protection civile de Skikda, pour leur collaboration et leur soutien.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et mes amis pour leur soutien moral tout au long de ces années de recherche. Vos encouragements et votre compréhension ont été d'un grand réconfort dans les moments difficiles. Je n'oublie pas mes collègues et collaborateurs pour leur aide, leur coopération et leur camaraderie. Vos contributions ont enrichi cette thèse de manière significative.

Merci infiniment à tous.

## Résumé

De nos jours, les territoires urbains sont confrontés à une concentration des risques des inondations qui ont exacerbé par le changement climatique, l'urbanisation rapide et le développement socio-économique, tout en impactant la gestion urbaine. La compréhension des paramètres de cet aléa et l'évaluation soutenue par la participation active des parties prenantes revêt essentielles pour améliorer les stratégies de préparation et réduire les pertes potentielles.

L'étude a été développé un paradigme multicritère (TAI) pour identifier « où sont les endroits à risque exposés aux inondations qui devraient être prioritaires pour l'intervention ? », basé sur trois indices de cause puissants : la topographie naturelle ( $T_i$ ), les activités anthropiques ( $A_j$ ) et l'infrastructure de drainage urbain ( $I_k$ ). Notre méthodologie a été testée à la ville de Skikda, qui connaît des fortes précipitations et des variations dans les modèles socio-économiques et urbains. Cependant, Vingt experts des institutions locales de la ville ont évalué dix-huit facteurs d'influence liés aux risques d'inondation par un questionnaire de neuf scores (l'échelle de Saaty). Les facteurs d'influence ont été classés à l'aide de la méthode G-DEMATEL AHP et G-DEMATEL ANP intégré au Matlab et au SIG.

Les résultats d'évaluation obtenus du modèle de susceptibilité (TAI) indiquent que des vastes zones présentent un risque des inondations élevée à très élevée aux, principalement situées dans le centre et le nord-est de, la ville, présentent un risque d'inondation élevé à très élevé, en particulier aux abords du centre-ville. La validation des résultats, utilisant les observations sur l'historique des inondations dans la ville de Skikda, a mis en évidence que le modèle de susceptibilité (TAI) a une précision satisfaisante. Aussi, l'approche Grey-DEMATEL-ANP est plus précise que l'approche Grey-DEMATEL-AHP.

Les résultats obtenus, montrent aussi que l'impact d'un mauvais état des infrastructures de drainage urbain ( $I_k$ ) est la principale cause de l'apparition des inondations urbaines dans la zone d'étude, suivi de l'impact anthropique ( $A_j$ ) qui est supérieur à celui de l'impact topographique ( $T_i$ ). Cette constatation souligne le rôle crucial des infrastructures en tant qu'indicateur efficace ayant des effets sur l'intensité des crues. Les solutions résilientes abordées dans cette étude englobant l'intégration des solutions fondées sur la nature, les infrastructures bleu-vert, telles et les systèmes de drainage durables, pour compléter les infrastructures grises conventionnelles. Ces solutions offrent une approche pratique et des avantages multiples, notamment la réduction des risques d'inondation, l'amélioration de la qualité de l'eau et l'accroissement de la biodiversité urbaine.

**MOTS- CLES :** résilience urbaine, risques des inondations, évaluation, Grey-DEMATEL- ANP, Grey-DEMATEL- AHP, Skikda.

## **Abstract**

Today's urban areas face a concentration of flood risks that have been exacerbated by climate change, rapid urbanization and socio-economic development, while also impacting urban management. Understanding the parameters of this hazard and assessment supported by active stakeholder participation is essential to improve preparedness strategies and reduce potential losses.

The study developed a multi-criteria paradigm (TAI) to identify “where are the flood-prone locations that should be prioritized for intervention?”, based on three powerful causal indices: natural topography (Ti), anthropogenic activities (Aj) and urban drainage infrastructure (Ik). Our methodology was tested in the city of Skikda, which experiences high rainfall and variations in socio-economic and urban patterns. However, twenty experts from the city's local institutions assessed eighteen influencing factors related to flood risk using a nine-score questionnaire (the Saaty scale). Influencing factors were ranked using the G-DEMATEL AHP and G-DEMATEL ANP methods integrated with Matla and GIS.

The assessment results obtained from the susceptibility model (TAI) indicate that large areas of high to very high flood risk, mainly located in the central and north-eastern parts of the city, are at high to very high risk of flooding, particularly around the city center. Validation of the results, using observations of flooding history in the city of Skikda, revealed that the susceptibility model (TAI) has satisfactory accuracy. Also, the Grey-DEMATEL-ANP approach is more accurate than the Grey-DEMATEL-AHP approach.

The results also show that the impact of poor urban drainage infrastructure (Ik) is the main cause of urban flooding in the study area, followed by anthropogenic impact (Aj), which is greater than topographical impact (Ti). This finding underlines the crucial role of infrastructure as an effective indicator affecting flood intensity. The resilient solutions addressed in this study encompass the integration of nature-based solutions, blue-green infrastructure, such as sustainable drainage systems, to complement conventional grey infrastructure. These solutions offer a practical approach and multiple benefits, including reducing flood risk, improving water quality and increasing urban biodiversity.

**Key words:** urban resilience, flood risk, assessment, Grey-DEMATEL- ANP, Grey-DEMATEL- AHP, Skikda.

## ملخص

تواجه المناطق الحضرية تزايداً في مخاطر الفيضانات، والتي تفاقمت بفعل التغير المناخي، والتوسع العمراني السريع، والتطور الاجتماعي والاقتصادي، مما يؤثر بشكل كبير على إدارة المدن. تُعدّ فهم معالم هذا الخطر والتقييم المدعوم بمشاركة فاعلة لأصحاب المصلحة أموراً ضرورية لتحسين استراتيجيات الاستعداد وتقليل الخسائر المحتملة.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير نموذج متعدد المعايير (TAI) للإجابة على سؤال جوهرى: "أين تقع المناطق الأكثر عرضة لخطر الفيضانات والتي يجب أن تُعطى الأولوية في التدخل؟"، وذلك اعتماداً على ثلاثة مؤشرات رئيسية للأسباب: التضاريس الطبيعية (Ti)، الأنشطة البشرية (Aj)، والبنية التحتية للصرف الحضري (Ik). تم اختبار هذه المنهجية في مدينة سكيكدة التي تعرف هطولاً كثيفاً للأمطار وتغيرات في الأنماط الحضرية والاجتماعية-الاقتصادية.

شارك عشرون خبيراً من مؤسسات محلية في تقييم ثمانية عشر عاملاً مؤثراً في مخاطر الفيضانات من خلال استبيان مكون من تسع درجات) مقياس (Saaty). تم ترتيب العوامل باستخدام منهجيتي G-DEMATEL AHP و G-DEMATEL ANP المدمجتين في بيئة Matlab ونظم المعلومات الجغرافية (GIS).

أظهرت نتائج نموذج القابلية للتعرض (TAI) أن مناطق واسعة من المدينة، خاصة وسطها وشمالها الشرقي، تواجه خطراً مرتفعاً إلى مرتفع جداً من الفيضانات، لا سيما في محيط وسط المدينة. وأكد التحقق من صحة النتائج، بالاعتماد على بيانات تاريخية للفيضانات في مدينة سكيكدة، أن النموذج يتمتع بدقة مرضية. كما تبيّن أن منهجية Grey-DEMATEL-ANP أكثر دقة من Grey-DEMATEL-AHP.

بيّنت النتائج أن سوء حالة البنية التحتية للصرف الحضري (Ik) هو السبب الرئيسي لحدوث الفيضانات في منطقة الدراسة، يليه التأثير البشري (Aj)، والذي فاق بدوره تأثير العامل الطبوغرافي (Ti). هذا الاستنتاج يسلط الضوء على الدور الحاسم للبنية التحتية كعامل فعال في التأثير على شدة الفيضانات.

تطرقت الدراسة إلى حلول قائمة على تعزيز المرونة، تشمل دمج الحلول القائمة على الطبيعة، والبنى التحتية الزرقاء والخضراء، وأنظمة الصرف المستدامة، كوسائل مكملية للبنية التحتية الرمادية التقليدية. وتقدم هذه الحلول فوائد متعددة، من تقليل خطر الفيضانات، وتحسين جودة المياه، إلى تعزيز التنوع البيولوجي الحضري.

**الكلمات المفتاحية:** المرونة الحضرية، مخاطر الفيضانات، التقييم، Grey-DEMATEL-AHP، Grey-DEMATEL-ANP، سكيكدة.

## Sommaire

Dedicace .....	i
Remerciements.....	ii
Résumé.....	iii
Abstract.....	iv
ملخص.....	v
Sommaire .....	vi
Liste des abréviations.....	xv
Liste des figures .....	xvi
Liste des tableaux.....	xxii

### *Introduction Générale*

Introduction générale .....	1
Importance du sujet et motivation du choix.....	3
Problématique .....	5
Questionnement .....	6
Les hypothèses .....	7
Objectifs principaux.....	7
Choix et présentation de cas d'étude .....	8
Méthodologie de la recherche.....	8
Structure de la thèse .....	9

### *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

Introduction.....	11
I.1 Le risque majeur .....	11
I.1.1 Le risque majeur comme un phénomène dangereux.....	11

I.1.2	Le risque majeur, le produit d'interaction aléas et enjeux .....	12
I.1.3	Le risque majeur, caractéristique .....	13
I.1.4	Catégories principales des risques majeurs.....	14
I.2	Le risques des inondations, concept et constat .....	14
I.2.1	L'aléa d'inondation.....	14
I.2.2	Le risques des inondations, un défi majeur omniprésent.....	15
I.2.2.1	Le risques des inondations, essai de définition.....	15
I.2.2.2	Le risque d'inondation, produit d'interaction : Aléa + Vulnérabilité + Exposition.....	17
I.2.2.3	Le risque des inondations, un risque récurrent et mortel à travers le monde.....	18
I.2.3	Les grands types des inondations.....	20
I.2.3.1	Inondations par débordement de cours d'eau.....	20
I.2.3.2	Les inondations par ruissellement.....	20
I.2.3.3	Les inondations pluviales (crue soudaine).....	21
I.2.3.4	Les inondations par remontée des eaux souterraines.....	21
I.2.3.5	Les inondations torrentielles.....	21
I.2.3.6	Tempête côtière.....	21
I.2.4	Retours d'expérience : les pires inondations urbaines de l'histoire du monde.....	22
I.2.5	Les conséquences socio-économiques des risques inondations.....	22
I.2.5.1	Mortalités causées par le risque d'inondation.....	23
I.2.5.2	L'incidence économique des répercussions du risque des inondations.....	24
I.3	Les risques inondations en Algérie, un vieux sujet de réflexion .....	25
I.3.1	Evènement historique des risques des inondations en Algérie .....	26
I.4	Les causes d'aggravation des risques des inondations, la conjonction des facteurs anthropiques et naturels .....	27
I.4.1	Le dérèglement climatique, le noyau de vulnérabilité.....	28
I.4.1.1	Changements climatiques, l'origine d'augmentation des catastrophes naturelles .....	29
I.4.1.2	La hausse des températures, le facteur clé des risques d'inondations.....	30
I.4.1.3	Impact des changements climatique sur le niveau de la mer.....	31
I.4.1.4	Impact des changements climatique sur l'intensité des précipitations.....	32

I.4.1.5	Les inondations côtières aggravent par changements climatiques.....	33
I.4.2	L'urbanisation anarchique des villes, un nouveau monde urbain.....	34
I.4.2.1	L'accroissement de la population mondiale.....	34
I.4.2.2	La croissance urbaine, le facteur clé qui fragilise les villes.....	37
I.4.2.3	L'incidence de l'imperméabilisation des surfaces sur le ruissellement.....	38
I.4.2.4	L'artificialisation des sols, une action lente a accéléré.....	40
I.4.2.5	Milieu urbain, menacé par les risques des inondations.....	41
I.4.3	La limitation de la capacité des infrastructures.....	42
I.4.3.1	Le développement des réseaux d'infrastructures.....	43
I.4.3.2	L'occupation des terres inondables, la proximité aux cours d'eau.....	43
I.4.3.3	Défaillance des dispositifs de protection face aux inondations.....	44
I.4.3.4	Mauvaise état du réseau d'assainissement, l'un des principaux freins.....	44
I.4.4	Le bas-relief, caractéristiques topographiques naturelle mieux résolus .....	45
Conclusion	.....	46

## ***Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondations***

Introduction.....	47	
II.1	Concept global de la résilience, tensions conceptuelles .....	47
II.1.1	Appréhender la résilience, un concept polysémique.....	48
II.1.2	Évolution historique, retracer les origines théoriques de la résilience.....	50
II.1.3	La résilience comme une approche interdisciplinaire.....	51
II.2	La résilience urbaine, multiples acceptions .....	53
II.2.1	La résilience urbaine comme une dynamique.....	53
II.2.2	La résilience urbaine, un processus multidimensionnel .....	55
II.2.3	L'interaction résilience urbaine /développement durable.....	55
II.2.4	La promotion de la résilience dans le contexte de la durabilité.....	57
II.2.5	Corrélation résilience urbaine / Vulnérabilité.....	59
II.3	Émergence de la résilience urbaine dans la gestion des risques .....	60
II.3.1	Définition de la résilience dans la gestion des risques, le retour de la lecture morale des catastrophes.....	61

II.3.2	Discours contemporain de la résiliente face aux risques des inondation.....	62
II.3.3	Relation milieu urbain, risques des inondation et résilience urbaine.....	63
II.4	La ville résiliente, une nécessité absolue d'adaptation en matière de risque dues aux inondations /crues .....	64
II.4.1	Ville résiliente- flexible, une tentative de définition .....	64
II.4.2	Expériences des réussites villes résilientes face aux risques inondations.....	65
II.4.2.1	Le projet de « 100 villes résilientes » .....	66
II.4.2.2	La ville éponge (SCP) – Chine .....	66
II.4.2.3	L'exemple de Rotterdam, outil sur la résilience urbaine aux inondations.....	67
II.4.2.4	Paris Résilient , <i>stratégie de la résilience de la ville de paris</i> .....	68
II.4.2.5	La communauté de St. Kjeld à Copenhague, au Danemark .....	69
II.4.2.6	La nouvelle communauté de Jiangwan, Shanghai (Chine).....	70
II.4.3	Des exemples d'aménagements résilients, façonner un monde plus équilibré ....	71
II.4.3.1	Les pratiques des LID (États-Unis).....	71
II.4.3.2	Projet cours Oasis à Paris (France) .....	72
II.4.3.3	Le réaménagement de l'ancienne zone portuaire du quartier de Zollhafen à Mayence (Allemagne) .....	72
II.4.3.4	Projet l'échelle du quartier HafenCity à Hambourg (Allemagne).....	73
II.4.3.5	Le quartier Matra à Romorantin-Lathenay (France).....	73
II.5	Principaux jalons de progression de la résilience face aux risques des inondations :	
	Outils d'urbanisme et de paysage .....	74
II.5.1	Contrôle de l'utilisation des terres et zonage des zones inondables .....	74
II.5.2	Protéger les bâtiments contre les inondations et les surélever.....	76
II.5.3	Élaboration de règlements et de procédures d'application .....	77
II.5.4	Infrastructures durables pour la gestion des eaux pluviales.....	78
II.5.4.1	Pratiques de gestion optimales (PGO) et développement à faible impact (LID)	79
II.5.4.2	Design urbain sensible à l'eau (WSUD).....	80
II.5.4.3	Système de drainage urbain durable (SUDS) .....	81
II.5.4.4	Gestion Intégrée des Eaux Urbaines (GIS).....	81
II.5.4.5	Outils d'infrastructure durable pour la gestion des eaux pluviales.....	82
	Conclusion .....	88

### ***Chapitre III : Etat de l'art : de la propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine.***

Introduction.....	90
III.1 Perspectives théoriques sur les facteurs de propagation des inondations urbaine et les méthodes d'évaluation par l'approche (MCDM).....	91
III.2 Fondements théoriques sur les stratégies d'amélioration de la résilience urbaine face aux risques des inondation. ....	103
III.3 Exploration approfondie des connaissances existantes.....	109
III.4 Positionnement scientifique et approches d'étude.....	112
III.5 Focalisation de notre étude .....	113
Etape 1 : diagnostic de base de la situation actuelle .....	113
Etape 2 : l'évaluation de la sensibilité des risques des inondations dans la Ville de Skikda.	114
Etape 3 : la proposition des stratégies de progression de la résilience face aux risques des inondations.....	114
Conclusion .....	115

### ***Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda***

Introduction.....	116
IV.1 Diagnostic de base de la situation actuelle de la ville de Skikda.....	116
IV.1.1 Le contexte géographique .....	116
IV.1.2 L'approche historique .....	119
IV.1.2.2 La Période Arabo- Musulmane.....	120
IV.1.2.3 La colonisation française 1830 -1962.....	121
IV.1.2.4 Après l'indépendance 1962-1975.....	122
IV.1.2.5 Evolution et découpage de la ville (1975-1992).....	123
IV.1.2.6 La Période Actuel .....	123
IV.1.3 L'aspect climatique.....	124
IV.1.3.1 Les Précipitations.....	124

IV.1.3.2	La Température .....	125
IV.1.3.3	L'humidité.....	125
IV.1.3.4	Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN .....	126
IV.1.3.5	Caractérisation du climat de la ville de Skikda.....	126
IV.1.4	Sources hydrographiques et relief du contour, contraintes pour l'évolution .....	127
IV.1.4.1	Relief du contour.....	127
IV.1.4.2	Le réseau hydrographique naturel.....	128
IV.2	Etat de lieu du risque des inondations à la ville de Skikda.....	129
IV.2.1	Inventaire historique de l'état des risques d'inondation .....	133
IV.2.2	Intervention des acteurs locaux de l'état.....	135
IV.3	Développement du processus d'urbanisation de la ville de Skikda par rapport à la morphologie du site (djebel Bouaala et Bouabaz) et les cours d'eaux. ....	141
IV.3.1	La restitution de l'évolution urbaine des événements politiques et de la planification des infrastructures .....	141
IV.3.1.1	Le noyau historique 1930-1962 .....	142
IV.3.1.2	L'expansion au sud de la ville .....	142
IV.3.1.3	L'expansion vers l'est et l'ouest .....	142
IV.3.1.4	L'extension urbaine dans la période (1992-2000), .....	143
IV.3.1.5	La période actuelle .....	143
IV.3.2	Changement spatio-temporelle de l'expansion urbaine par rapport à la morphologie du site et les cours d'eaux (1955- 2024) .....	143
IV.3.3	Analyse de la croissance démographique par rapport les changements spatiales dynamiques.....	146
IV.3.4	Synthèses.....	147
Conclusion	.....	149

### ***Chapitre V : Outils et méthodes***

Introduction.....	150
V.1 Méthodes d'évaluation de la susceptibilité des risques des inondations .....	150
V.1.1 Méthode MCDM (la méthode d'analyse décisionnelle multicritère) .....	151

V.1.1.1	MCDM : généralité .....	151
V.1.1.2	MCDM : approches diverses .....	152
V.1.1.3	MCDM : Processus de prise de décision typique .....	153
V.1.1.4	MCDM : limites de l'utilisation.....	154
V.1.2	Processus hiérarchique analytique (AHP) .....	154
V.1.2.1	AHP : généralité.....	154
V.1.2.2	AHP : Principes de base.....	155
V.1.2.3	L'AHP : avantages .....	157
V.1.2.4	L'AHP : limites.....	158
V.1.3	Processus de réseau analytique (ANP) .....	158
V.1.3.1	L'ANP : généralité .....	158
V.1.3.2	L'ANP : approche qualitative ou quantitative de la prise de décision .....	159
V.1.3.3	L'ANP : procédure étape par étape .....	160
V.1.3.4	L'ANP : avantages .....	163
V.1.3.5	L'ANP : limitation.....	163
V.1.4	La méthode DEMATEL (Laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel) .....	164
V.1.4.1	DEMATEL : généralité.....	164
V.1.4.2	DEMATEL : Procédure .....	165
V.1.4.3	DEMATEL : Phases d'analyse .....	165
V.1.4.4	Les applications de la technique DEMATEL .....	167
V.1.4.5	Avantages de DEMATEL.....	168
V.1.4.6	Limites de DEMATEL .....	168
V.1.5	La logique floue .....	169
V.1.5.1	La théorie grise : généralité.....	169
V.1.5.2	La théorie grise : valeurs linguistiques .....	169
V.1.5.3	La théorie grise : étapes impliquées.....	170
V.1.5.4	La théorie grise : avantages.....	170
V.1.5.5	La théorie grise : limitation.....	170
V.1.6	Système d'information géographique (SIG) .....	171
V.1.6.1	SIG : généralités.....	171
V.1.6.2	SIG : l'utilité .....	172
V.1.6.3	SIG : les composants majeurs du logiciel .....	173
V.1.6.4	SIG : les logiciels de création et d'analyse.....	174

V.1.6.5	SIG : limites .....	177
V.1.7	L'environnement EXCEL .....	178
V.1.8	Le MATLEB, un outil de des solutions de calcul.....	178
V.2	Cadre méthodologique adoptée d'étude.....	179
V.2.1	Enquête de jugement d'expert .....	181
V.2.2	La comparaison par paires .....	182
V.2.3	Description de la Méthode Grey-DEMATEL- AHP/ANP .....	183
Conclusion	.....	187

## ***Chapitre VI : Résultats et discussions***

Introduction.....	189	
VI.1	Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour cartographier la vulnérabilité aux risques des inondations dans la ville de Skikda .....	189
V.1.1	Cadre générale de l'évaluation du risque des inondations de la ville de Skikda .....	189
V.1.2	Source et préparation des données de l'évaluation dans l'étude.....	190
V.1.3	Procédure d'évaluation : facteurs multi-influence du risqué des inondations....	191
VI.1.3.1	L'indice topographique .....	192
VI.1.3.2	L'indice anthropique : .....	194
VI.1.3.3	L'indice infrastructurale .....	197
V.1.4	Pondération des facteurs d'influence multiples des inondations urbaines .....	199
VI.1.4.1	Les pondérations des facteurs d'infrastructure .....	199
VI.1.4.2	Les pondérations des facteurs anthropique .....	202
VI.1.4.3	Les pondérations des facteurs <i>topographique</i> .....	204
VI.1.4.4	Les pondérations pour les indices d'aggravation des risques des inondations selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP .....	206
V.1.5	La cartographie des niveaux de risque d'inondation des indices d'évaluation selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP .....	209
VI.1.5.1	Les niveaux de risque d'inondation sous l'impact topographie naturel .....	210
VI.1.5.2	Les niveaux de risque d'inondation sous l'impact anthropique .....	210

VI.1.5.3	Les niveaux de risque d'inondation par l'impact infrastructurelles .....	211
V.1.6	Les pondérations pour les indices d'aggravation des risques des inondations selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP .....	212
V.1.7	Résultats de la cartographie de la susceptibilité aux inondations et la validation .....	218
V.1.8	Synthèse .....	221
VI.2	Benchmark : Illustration comparative des résultats de l'évaluation .....	222
V.2.1	Interprétation de la méthode d'évaluation des risques des inondation à Skikda	222
V.2.2	Interprétation des indices de la structure d'évaluation des risques des inondation .....	225
VI.3	De l'évaluation des inondations aux le choix des mesures appropriées, une gestion fondée sur le risque .....	226
V.3.1	Renforcer la résilience de l'espace urbain de la ville de Skikda en cas d'inondation .....	227
VI.3.2	Des proposition résiliences aux inondations pour la ville de Skikda.....	228
Conclusion	.....	233

### ***Conclusion générale et perspective***

Conclusion générale.....	235
Limite de recherche.....	240
Futurs scénarios de stratégies et de politiques d'adaptation urbaine aux inondations.....	241

### ***Références bibliographiques***

### ***Annexes***

## Liste des abréviations

<b>Abréviation</b>	<b>Signification</b>	<b>Traduction</b>
<b>IPCC</b>	The Intergovernmental Panel on Climate Change	Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
<b>GIEC</b>	Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat	/
<b>UNISDR</b>	UN International Strategy for Disaster Reduction	Stratégie internationale des Nations Unies pour la prévention des catastrophes
<b>DEM</b>	Digital elevation model	Modèle numérique du terrain
<b>MNT</b>	Modèle numérique du terrain	/
<b>SRTM</b>	Shuttle Radar Topography Mission	Mission de topographie radar de la navette
<b>USGS</b>	United States Geological Survey	
<b>GIS</b>	Geographic information system	Système d'information géographique
<b>SIG</b>	Système d'information géographique	/
<b>FIM</b>	Flood inventory map	Carte d'inventaire des crues
<b>MCMD</b>	Multi-criteria making decision.	La méthode d'analyse décisionnelle multicritère
<b>DEMATEL</b>	DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory	Laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel
<b>G-DEMATEL</b>	Gray decision track and evaluation laboratory and analytical hierarchical process	Piste décisionnelle grise- Laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel grise.
<b>G-DEMATEL</b>	Gray decision track and evaluation laboratory and analytical hierarchical process.	Piste décisionnelle grise- Laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel grise.
<b>AHP</b>	Analytical hierarchical process	Processus hiérarchique analytique
<b>NBS</b>	Nature Based Solution	Solutions fondées sur la nature
<b>LID</b>	Low impact developpement	Développement à faible impact

## Liste des figures

Figure 1 : La structuration de la thèse (auteur, 2020).....	10
Figure I-1 : Configuration de variables en fait un événement difficile à anticiper et donc à juguler (Md RIHANI, 2023).....	12
Figure I-2: La courbe de Farmer (Pigeon, 2012). ....	13
Figure I-3 : Schéma conceptuel d'un risque d'inondation (CAPRE 06, 2022). ....	15
Figure I-4 : Diagramme climatique montre le processus de formation des risques d'inondation (Hussain et al., 2021). ....	16
Figure I-5 : Concepts fondamentaux des risques liés au climat (inondation cible) (IPCC AR5, 2022). ....	17
Figure I-6 : Répartition spatiale des sites d'application dans le monde par rapport à l'occurrence historique des inondations de 1980 à 2019 (Da Silva et al., 2020). ....	19
Figure I-7 : part par type de sinistre 2019 (Froment & Below, 2020). ....	19
Figure I-8 : les différents types d'inondations (Abdrabo et al., 2022).....	20
Figure I-9 : Les dix premiers pays/territoires en termes de pertes absolues des catastrophes naturels (milliards de dollars US) 1998-2017 (Heinzlef, 2020). ....	23
Figure I- 10 : Nombre de personnes affectées par les désastres climatiques de 1995 à 2017 (Heinzlef, 2019). ....	24
Figure I-11 : pertes économiques directes liées aux catastrophes (milliards \$) entre 1989 et 2020 (Analyse de l'UNDRR à partir de EM-DAT, 2021).....	25
Figure I-12 : les facteurs qui amplifiés le risque des inondations en ville (auteur, 2024). ....	27
Figure I- 13 : L'évolution de la classification mondiale du climat selon Köppen- Geiger 1980-2100 (Rubel & Kottek, 2010). ....	28
Figure I-14 : occurrence par type de catastrophe signalés : par rapport à la moyenne annuelle 2002-2021(CRED CRUNCH ,2022). ....	29
Figure I-15 : rapport catastrophe naturelle signalés (EM-DAT ,2022). ....	30
Figure I-16 : Élévation des température moyennes mondiales (AR6 du GIEC, 2021). ....	30
Figure I-17 : Variation régionale du niveau de la mer pour RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 en mètres pour les variations du niveau, de la mer. La colonne de gauche illustre la tranche de temps 2046-2065 et la colonne de droite 2081-2100 (IPCC, 2019). ....	31
Figure I-18 : Le schéma du cycle de l'eau : le voyage de l'eau à travers la terre (Le centre de l'information sur l'eau : <a href="https://www.cieau.com">https://www.cieau.com</a> ).....	32
Figure I-19 : Projections des aires urbaines 1970-2030 (United Nations, 2018).....	36

Figure I-20 : Variabilité du ruissellement avec augmentation des surfaces imperméables (Rezaei et al., 2019).....	39
Figure 21 : Synthèse de l’impact de l’artificialisation sur les flux et stocks d’eau (Hervé et al., 2018). .....	41
Figure I-22 : Le mécanisme de l’inondation de décembre 1999 au niveau du centre de Blayais (Salomon, 2002).....	45
Figure II-1 : Schéma conceptuel du processus de la résilience (Leulmi et al., 2023).....	50
Figure II-2 : représentation de la ligne du temps de l’émergence de la résilience (auteur, 2024). .....	50
Figure II-3 : La nature interdisciplinaire de la résilience (Serge Lhomme et al., 2010).....	52
Figure II-4: Événements marquants dans le débat sur la durabilité et la résilience (Kapucu et al., 2021). .....	57
Figure II-5 : exemple de bâtiments qualifiés de résilients à l’inondation, Francfort, 2009 (Damien, 2013). .....	63
Figure II-6 : Stratégies de gestion des inondations fondées sur les risques et la résilience (L. Wang et al., 2022). .....	64
Figure II-7 : the 100 Resilient Cities Framework (Heinzlef, 2020).....	66
Figure II-8 : Design urbain de la ville éponge (Kipkirui & Kageche, 2020).....	67
Figure II-9 : Conception de l'élévation pour les différentes entrées contre les inondations urbaines : (a) Entrée pour les piétons; (b) Entrée pour les véhicules; (c) Puits de ventilation (He et al., 2024). .....	76
Figure II-10 : Catégories de barrières anti-eau : (a) Sac de sable; (b) Plaque anti-eau monolithique; (c) Plaque d'arrêt d'eau modulaire; (d) Plaque d'arrêt d'eau rétractable (He et al., 2024). .....	77
Figure II-11 : Outils des infrastructures verte en ville pour la gestion des eaux pluviales (Annabelle Jaeger, 2018). .....	78
Figure II-12 : Modèle intégré de gestion de l’eau urbaine (Luna Mansour, 2019). .....	81
Figure II-13 : Infrastructure durable pour les outils de gestion des eaux pluviales (Andjelkovic, 2001). .....	82
Figure II-14 : Schéma en coupe transversale d’une rigole biologique. (1) Végétation indigène, (2) franc-bord, (3) niveau d’eau maximal, (4) tissu géotextile en option, (5) bande filtrante en option (prolongée au-delà du schéma) et (6) plate-forme existante(Hager et al., 2019) .....	83
Figure II-15 : Conception d’un planteur d’eaux pluviales d’infiltration (Cahill et al., 2011). 83	

Figure II-16 : systèmes de chaussée perméables (pavés en béton perméables, systèmes de chaussée en grille (Hoban, 2019).....	84
Figure II-17 : Section montrant comment le pavage et le paysage perméables collectent l'eau de pluie et diffusent les eaux pluviales (Kipkirui & Kageche, 2020).....	85
Figure II-18 : Un diagramme schématique en coupe transversale d'un système de biorétention typique (Hoban, 2019). ....	85
Figure II-19 : Schéma en coupe transversale d'un bâtiment avec stockage souterrain des eaux de pluie et baril de pluie en surface : (1) Zone de collecte du toit, (2) gouttière, (3) baril de pluie, (4) déviateur/filtre de première chasse, (5) citerne souterraine, (6) pompe, (7) sortie de trop-plein, (8) tuyauterie vers la résidence et (9) sortie pour l'irrigation (Hager et al., 2019).	86
Figure II-20 : Fig. 7. Schéma en coupe transversale d'une zone humide d'eaux pluviales construite. (1) Entrée, (2) eau libre et bief, (3) revêtement en option, (4) zone macrophyte, (5) écoulement souterrain horizontal, (6) zone racinaire en milieu poreux, (7) zone humide de traitement flottante, (8) sortie, (9) canal de dérivation en option et (10) plate-forme existante.(Hager et al., 2019) .....	87
Figure II-21 : Structure de toit vert (Mabrouk et al., 2023).....	87
Figure II-22 : Coupe du cycle des eaux pluviale en milieu urbain : Levées et dispositifs techniques de contrôle des crues (PIEL, 2021).....	88
Figure III-1 : Adéquation du triptyque adoptée dans cette recherche (auteur, 2021).....	90
Figure III- 2 : Les chercheurs en fonction de leur nombre de publications co-écrites sur la propagation des inondation (auteurs, 2022).....	92
Figure III-3 : le nombre de publications publiées chaque année en matière de la résilience urbaine face aux risques des inondations (auteur, 2022). ....	104
Figure III-4 : les facteurs cruciaux de stress qui amplifiés le risque des inondations urbaines (auteur, 2022).....	112
Figure III-5 : Aspect novateur de cette étude (auteur, 2022).....	113
Figure IV-1 : Situation Géographie de la ville de Skikda (auteur, 2021).....	117
Figure IV-2 : Les villes limitrophes de la wilaya de Skikda (a) ; Communes limitrophes de la ville de Skikda (b) (auteur, 2020). ....	118
Figure IV- 3 : Frise chronique de l'histoire de la ville de Skikda (auteur, 2021).....	119
Figure IV-4 : Ancien comptoir phénicien 2 000 ans av. J.-C (rapport CTC-Est Algérie,2014) .....	120

Figure IV-5 : La ville romaine de RUSICADE (CT- Est Algérie, 2014). .....	120
Figure IV-6 : L'ancien emplacement d'oued Zeramena (DUCH-Skikda, 2022). .....	122
Figure IV-7 : Phases d'évolution du tissu urbain de la ville de Skikda (rapport de protection civile Skikda, 2006). .....	124
Figure IV-8 : Diagramme Ombrothermique (auteur, 2022). .....	126
Figure IV- 9 : Le relief de la ville de Skikda (auteur, 2022). .....	128
Figure IV-10 : Réseau hydrographique de la ville de Skikda (auteur, 2023). .....	129
Figure IV- 11 : Évolution des précipitations annuelles totales à Skikda et leur proportion correspondante à la hauteur d'eau de 1957 à 2023 (auteur, 2022). .....	130
Figure IV-12 : Photos des risques des inondation à la ville de Skikda (la protection civile, 2019) .....	131
Figure IV-13 : Scénario modélisé et correspondance d'inventaire des inondations marquant depuis le XXème siècle sur la ville de Skikda (auteur, 2023). .....	134
Figure IV-14 : Carte d'inventaire des crues la ville de Skikda (auteur, 2023). .....	135
Figure IV-15 : Intervention de l'état lors une inondation à Skikda (ONA, 2011). .....	136
Figure IV-16 : Intervention de l'état lors une inondation à Skikda (protection civile, 2011). .....	137
Figure IV-17 : Intervention Office de Promotion et de Gestion Immobilière de l'état lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023).....	137
Figure IV-18 : Intervention de la lors protection civile lors d'une inondation à Skikda (protection civile, 2023). .....	138
Figure IV-19 : Intervention de l'Armée Nationale Populaire lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023). .....	138
Figure IV-20 : Intervention des médias lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023). .....	140
Figure IV-21 : Intervention des citoyens lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023). .....	141
Figure IV-22 : Résumé des événements politiques, des mandats et de la planification des infrastructures (auteur, 2021). .....	143
Figure IV-23 : Scénarios de l'utilisation des terres de la ville Skikda par rapport à la morphologie du site et les cours d'eaux (1955-2024) (auteur, 2022). .....	145
Figure IV-24: Croissance de la population de Skikda (a) ; Diagramme montrant le pourcentage de la répartition d'utilisation des terres de zone d'étude en 1985, 2005 et 2024 (b) (auteur, 2022). .....	147

Figure V-1 : principaux paramètres de prise de décision pour les problèmes de GRF liés au changement climatique et à la modélisation hydraulique (Da Silva et al., 2020).....	151
Figure V-2 : Processus de prise de décision typique (Thakkar, 2021a).....	153
Figure V-3 : Exemple d'une Matrice de comparaison par paires AHP (auteur, 2024). ....	155
Figure V-4 : Les étapes de la méthode AHP (Thakkar, 2021).....	157
Figure V-5 : Hiérarchie de réseau interdépendante pour l'analyse ANP (Thakkar, 2021).. ...	161
Figure V-6 : Procédure DEMATEL (Thakkar, 2021b). ....	165
Figure V-7 : Schéma de classification d'application de la technique DEMATEL (Si et al., 2018). ....	168
Figure V-8 : Les spécificités du SIG par rapport à d'autres outils de cartographie numérique (auteur, 2020).....	172
Figure V-9 : Les fonctions dans un SIG (auteur, 2020).....	173
Figure V-10 : Composantes d'un SIG (Fischer et al., 1993). ....	174
Figure V-11 : Classification des logiciel et les bases des données SIG (auteur, 2020). ....	177
Figure V-12 : Représentation du schéma conceptuel de la méthode utilisée (auteur, 2023). ....	180
Figure V-13 : Échelle de comparaison par paires de Saaty 1977 (auteur, 2023).....	183
Figure V I-1: Classification des différents facteurs et indices clés de la gravité des inondations urbaines dans la zone d'étude (auteur, 2023).....	192
Figure VI-2 : La distribution spatiale des facteurs d'impact topographique naturel employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023).....	194
Figure VI-3 : La distribution spatiale des facteurs d'impact anthropique (changement climatique et urbanisation) employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023). ....	196
Figure VI-4 : La distribution spatiale des facteurs d'impact d'infrastructure de drainage urbain employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023). ....	199
Figure VI-5 : Pondérations des facteurs d'évaluation calibrés selon la méthode G-DEMATEL-AHP (auteur, 2024). ....	209
Figure VI-6: La répartition spatiale du niveau de l'indice topographique naturelle (auteur, 2024). ....	210
Figure VI-7 : La répartition spatiale du niveau de l'indice anthropique (auteur, 2024).....	211
Figure VI-8 : La répartition spatiale du niveau d'indice infrastructurelle (auteur, 2024). ....	212
Figure VI-9 : Diagramme de relation causal des indices de conditionnement. ....	218

Figure VI-10 : La carte de répartition des risques des inondation dans la ville de Skikda d'après la méthode Grey-DEMATEL-AHP (auteur, 2024).....	219
Figure VI-11: La carte de répartition des risques des inondation dans la ville de Skikda d'après la méthode Grey-DEMATEL-ANP (auteur, 2024).....	220
Figure VI- 12 : les pourcentages des risques des inondation dans la ville de Skikda : (a) d'après la méthode Grey-DEMATEL-AHP ; a) d'après la méthode Grey-DEMATEL-ANP. .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure VI-13 : Synthèse de l'évaluation du risque des inondations de la ville de Skikda (auteur, 2024).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure VI-14 : propositions résilientes d'atténuation des risques des inondations dans la ville de Skikda (auteur, 2024).....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure scénario 1 : cadre de recherche proposée en matière de forme urbaine résilientes aux inondations (auteurs, 2024). 239	
Figure scénario 2 : Cadre de recherche proposée en matière résilientes aux inondations (auteurs, 2024). .....	240
Figure annexe 1-1 : Carte de localisation de la zone d'étude (la ville de Skikda, nord-est de l'Algérie) (auteur, 2023).....	
Figure annexe 1-2 : Évolution des précipitations annuelles à Skikda correspondante de la profondeur annuelle de 1957 à 2019, ANRH- Skikda (auteur, 2023).....	

## Liste des tableaux

Tableau I-1 : Typologie des risques (département française de la prévention des risques majeurs).....	13
Tableau II-1 : Concepts liée à la résilience (auteur, 2020).....	48
Tableau II-2 : Principales significations de la résilience et description de ses capacités(auteur, 2020)..	49
Tableau III-1: synthèse des facteurs employé sur la modélisation des risques des inondations (auteur, 2022).....	110
Tableau IV-1 : Moyennes mensuelles et annuelle des Précipitations 2012- 2022 (ONM, 2022). .....	125
Tableau IV-2: Moyennes mensuelles et annuelle des Températures 2012- 2022 (ONM, 2022). .....	125
Tableau IV-3 : Moyennes mensuelles et annuelle de l’humidité 2012- 2022 (ONM, 2022). .....	125
Tableau IV- 4: Classification du climat selon MARTONNE.....	127
Tableau récapitulatif IV-5:Séries historiques des inondations les plus graves enregistrées marquant depuis le XXème siècle sur la ville de Skikda (auteur, 2021). .....	131
Tableau IV-6: Analyse SWOT de la ville de Skikda (auteur, 2022). .....	147
Tableau V-1 :Échelle fondamentale pour les comparaisons par paires : échelle de valeurs (T. L. Saaty & Vargas, 1984).....	156
Tableau V-2 : Profile des répondant (auteur, 2023). .....	182
Tableau V-3 :Phrase linguistique et relation correspondante de la théorie grise (Zheng et al., 2022). .....	185
Tableau VI-1 : Données utilisées pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations (auteur, 2023).....	191
Tableau VI-2: Langage de programmation des facteurs d’infrastructure d’après le Matlab 2022a (auteur, 2024). .....	199
Tableau VI-3 : Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice d'infrastructure (auteur, 2024).....	201
Tableau VI-4: Langage de programmation des facteurs anthropiques d’après le Matlab 2022a (auteur, 2024).....	202
Tableau VI-5: Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice anthropique (auteur, 2024). .....	204

Tableau VI-6: Langage de programmation des facteurs anthropiques d'après le MATLEB 2022a (auteur, 2024).	204
Tableau VI-7 : Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice topographique (auteur, 2024).	205
Tableau VI-8 : Langage de programmation des indices d'évaluations d'après le MATLEB 2022a (auteur, 2024).	206
Tableau VI-9: Moyenne des comparaisons de critères par paire des indices d'aggravation (auteur, 2023).	208
Tableau VI-10 : Pondérations synthèses des facteurs d'évaluation calibrés selon la méthode G-DEMATEL-AHP (auteur, 2024).	208
Tableau 11 : Langage de programmation des indices d'évaluations selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP d'après le MATLEB 2022a (auteur, 2024).	212
Tableau VI-12: Les poids des critères d'évaluations selon Grey-DEMATEL-ANP.	217
Tableau VI-13 : Les réponses proposées d'adaptation des risques d'inondation dans la ville de Skikda (Eggermont et al., 2015; Ferreira et al., 2021; Mabrouk et al., 2023; Silva & Costa, 2018).	230
Tableau annexe 1-1 : Facteurs d'influence employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023).	

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

Les villes deviennent de plus en plus des points chauds pour les catastrophes naturelles (Grimm et al., 2008; Joerin & Shaw, 2010; Wamsler, 2014), affectant environ 2 milliards de personnes au cours des vingt dernières années (Ekmekcioğlu et al., 2022; UNISDR, 2015; World Health Organization, 2017).

La ville occupe ainsi un espace de plus en plus important (Alejandra Estrella Núñez et al., 2023). Ce scénario implique que les zones urbaines, en particulier, sont plus vulnérables aux risques des inondations (Salazar-Briones et al., 2020a). L'espace urbain densément peuplé et hétérogène présentant divers degrés d'exposition et de vulnérabilité, influence également la variabilité du risque d'inondation (X. Wang et al., 2024).

Les risques des inondations ont été largement reconnues comme une Menace majeure en raison de l'étendue et de l'ampleur des dommages qu'elles causent chaque année dans le monde. Leurs effets peuvent être dévastateurs, entraînant des pertes économiques directes annuelles de plusieurs dizaines de milliards de dollars (Fu et al., 2020). Au cours des 120 dernières années, les inondations ont représenté environ 42 % des pertes économiques mondiales dues aux catastrophes. Des événements catastrophiques comme Fukushima, Tianjin, Katrina ou Harvey démontrent les conséquences dévastatrices des inondations et la nécessité de stratégies efficaces plus robustes et résilientes pour prévenir et atténuer ces risques (Sebastian et al., 2022).

Les inondations urbaines catastrophiques résultent de plusieurs facteurs combinés et conjugués entre autres, tels que : les précipitations intenses, l'augmentation du niveau des cours d'eau et les systèmes de drainage inadéquat. Ces facteurs de propagations de ces aléas sont motivés par le changement climatique mondial et l'urbanisation incontrôlés ( GIEC, 2014 ; Hallegatte et al., 2013).

Actuellement, selon les Nations Unies (2017), plus de 600 millions d'individus résidant dans des agglomérations côtières situées à une altitude inférieure à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer. Les rapports établis par les nations unies montrent que la population mondiale vivant dans les villes devrait atteindre 6,7 milliards d'ici 2050 (Nations Unies, 2018). En particulier dans les zones côtières de basse altitude, la densité de population devrait être deux fois

supérieure à celle de la population densité de population actuelle (Van Coppenolle & Temmerman, 2019). Cela indique que les populations des villes Côtières se concentreront davantage à l'avenir et que Les surfaces imperméables augmenteront. Cependant, la grande incertitude sur les risques d'inondation et la croissance urbaine entraîne un manquement du potentiel en matière de gestion et de maîtrise de la part des différents acteurs de la croissance des villes et à répondre tant bien que mal aux différents aléas résultant du changement climatique.

L'identification des zones à risque d'inondation fluviale, urbaine et côtière est un processus complexe, car les causes de ces phénomènes sont diverses et complexes (Sun et al., 2022). La compréhension du risque d'inondation nécessite de Prendre en considération divers facteurs aggravants tels que l'urbanisation croissante, le changement climatique et les différentes sources potentielles d'inondations. Ainsi, il est essentiel de compiler les connaissances théoriques et empiriques afin de faire face à ces phénomènes.

Du point de vue d'adapter l'architecture (design) des villes au phénomène récurrent des inondations, la résilience aux inondations est essentielle pour améliorer la capacité d'une ville à répondre aux risques d'inondation, à se rétablir rapidement et à maintenir ses fonctions de base malgré les perturbations.

La résilience urbaine, en maintenant un double objectif de bien-être et de bien-vivre, est un état d'esprit et d'attitude à cultiver à différents niveaux pour acquérir ce potentiel et cette capacité de rebondir, en établissant un programme d'action détaillé (Y. Wang et al., 2023). D'un point de vue urbanistique, la résilience se caractérise par la capacité des territoires vulnérables, des villes ou des communautés exposées aux risques d'inondations, à faire face, à atténuer les effets de ces risques, à retrouver ONU état d'équilibre, à absorber une perturbation, à restaurer leurs fonctions après cette perturbation, à survivre, à s'adapter et à se développer de manière autonome, ainsi qu'à se rétablir rapidement, de manière efficace et socialement acceptable, en cas de perturbation (Bulti et al., 2019). La résilience urbaine nécessite l'utilisation de technologies de pointe et de nouveaux matériaux de construction verser améliorer la résistance des environnements urbains (Gralepois, 2020). Elle offre une approche proactive et globale de la gestion des risques d'inondations, transformant les défis en opportunités pour la construction de villes plus sûres, durables et résilientes (Wardekker et al., 2020).

Dans les pays en développement, l'expansion urbaine se produit souvent dans des zones sujettes aux aléas de la nature en général, et des inondations. Les plans directeurs à long terme ne tiennent pas toujours en considération des impacts des changements de formes urbaines et l'adaptabilité des usagers de la ville aux risques majeurs. En effet, à l'échelle du territoire local, l'imperméabilité des surfaces constructives due à l'urbanisation entraîne une augmentation du ruissellement et entrave le processus d'infiltration (Abdelkebir et al., 2021; Leulmi et al., 2023). En cas de fortes précipitations, cela peut provoquer localement des inondations pluviales et globalement une augmentation des débits en aval du bassin versant. Cette situation peut conduire à des inondations fluviales dues au débordement des cours d'eau.

Face à la préoccupation croissante concernant la vulnérabilité et les dysfonctionnements des villes, les autorités publiques algériennes se trouvent confrontées à la nécessité de revoir leur mode de fonctionnement en période de crise afin de remédier aux dommages et dysfonctionnements, de répondre aux besoins en services, et de se rétablir après l'événement. L'enjeu principal réside dans la garantie du bon fonctionnement de la ville pour la gestion des divers risques. Il ne s'agit pas seulement de gérer les crises, mais aussi de tirer parti des Aléas et des problèmes pour les transformer en opportunités en vue d'une nouvelle approche du développement, racoleur en tenant compte des chocs majeurs et du stress chronique.

## **Importance du sujet et motivation du choix**

*« Faire la vie en ville avec la crue »*

La résilience urbaine semble être une réponse adéquate aux incertitudes associées à l'augmentation des risques environnementaux (Toubin, 2018). Cela suggère de concevoir la ville comme un système flexible et transformable qui favorise l'innovation dans toutes ses manifestations (Lumbroso, 2020). Toutefois, cette flexibilité, cette diversité d'interprétation, finit par rendre le concept plus difficile à mettre en pratique (Batista, 2015). La ville peut être tout à la fois extrêmement vulnérable et entièrement résiliente : en effet, renforcer la résilience ne combat pas contre les catastrophes mais permet de vivre avec elles sans s'en soucier, et fait même un facteur neutre qui ne perturbe pas le fonctionnement urbain.

*Pour parler de résilience urbaine, il faut savoir : **De quel aléa on parle ? Et de ce qui a été mis en place pour ne pas compromettre le fonctionnement de l'environnement urbain ?***

Les dernières décennies ont vu une hausse importante des catastrophes naturelles liées au climat dans les zones urbaines à l'échelle mondiale (Banque mondiale, 2012). Le changement climatique mondial a entraîné une forte incidence d'événements météorologiques extrêmes, notamment les risques des inondations (Mabrouk et al., 2024).

Dans cette investigation, Le choix des risques des inondations dans le milieu urbain est important qu'ils sont l'un des phénomènes météorologiques les plus dommageables (Zhu et al., 2023), représentant la majorité des pertes économiques causées par les catastrophes naturelles à travers le globe (Arnbjerg-Nielsen, 2020; UNISDR, 2015). Les inondations urbaines sont un vieux sujet de réflexion qui devenu un phénomène hydrologique préoccupant du XXI<sup>e</sup> siècle, affectant des dégâts considérables aux villes (Bruwier et al., 2020; Lyu et al., 2018).

L'évaluation et l'adaptation des risques liés aux Inondations ont acquis une importance cruciale dans l'analyse de la vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Étant donné l'insuffisante prise en compte de la gestion des risques dans les politiques urbaines actuelles, il serait avantageux d'articuler ces deux approches Structures structurelles avec les dimensions politiques, humaines et économiques dans le but de minimiser les dommages et de promouvoir la mise en œuvre du concept de résilience face aux risques d'inondation (Serre, 2011).

L'évaluation des risques associés aux inondations urbaines est un processus complexe qui résulte de l'interaction de divers facteurs tels que le climat, les caractéristiques de surface, les aspects socio-économiques et les actions humaines (Sebastian, 2022). le défi d'évaluation des risques d'inondation est un outil de modélisation fondamentale afin prendre des connaissances sur les processus dangereux et leurs impacts (Panigrahi & Sharma, 2024; Zischg et al., 2018). Cette approche simplifie la mise en œuvre de stratégies d'adaptation efficaces, ainsi que de dispositifs de prévention et d'atténuation des dommages provoqués par différents phénomènes d'inondation (X. Wang et al., 2024).

Il est primordial de comprendre la localisation potentielle de ces événements, leur fréquence, les populations et les biens exposés, leur vulnérabilité, la planification et l'aménagement des zones à risque, ainsi que les stratégies actuelles de gestion des risques d'inondation en milieu urbain. L'ensemble de ces éléments sont cruciaux pour évaluer la pertinence et l'urgence des mesures de résilience urbaine à mettre en œuvre, ainsi que leur ordre de priorité.

## **Problématique**

*Skikda, une ville prise entre un site naturel exigü, accidenté et tourmenté et les risques croissants des inondations et des crues.*

Il est très fréquent que le milieu urbain ne puisse pas assurer la qualité de vie et provoque des conflits avec l'environnement naturel (Miguez et al., 2019; Romero-Lankao et al., 2016). La concentration croissante des enjeux urbains (humains, politiques, économiques, sociaux, démographiques, etc.) fragilise les zones urbaines. Parmi les différents risques naturels, les inondations sont les plus répandues à l'échelle mondiale, ayant un impact significatif tant sur le plan humain que sur le plan économique (Alejandra Estrella Núñez et al., 2023), dont la fréquence, la gravité et les coûts induits dans les zones urbaines basses ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies (IPPC, 2001; Mupepi & Matsa, 2023; World Economic Forum, 2017).

L'aléa pluvial, caractéristique du pourtour Méditerranéen (Deshons, 2002), est aggravé par des circonstances météorologiques, hydrologiques, géographiques et géologiques. Au niveau local, le risque d'inondation est le premier phénomène météorologique naturel préoccupant que l'Algérie ait connu ces dernières décennies, vu l'ampleur des dégâts occasionnés, en particulier après les dernières grandes crues (Abdelkebir et al., 2023; Mokhtari et al., 2023).

La ville de Skikda, l'une des villes pétro-industrielles de base du pays, dû à sa situation géographique est fréquemment sujet par l'augmentation des risques des inondations, causant des graves dommages. Malgré les solutions mises en place au fil des décennies, il semble que ces mesures soient insuffisantes pour aborder efficacement les causes sous-jacentes de ces risques, ainsi que pour prendre en compte sa faible capacité de résilience aux chocs et ses multiples vulnérabilités de plus en plus exacerbées.

Les risques liés aux inondations sont devenus, ou devraient devenir, un aspect aussi essentiel que les considérations économiques ou sociales dans la et la gestion urbaine, cependant la situation actuelle est différente. Aucune des approches classiques de gestion des risques ne parvient à résoudre de manière pérenne le défi croissant des risques en milieu urbain, notamment celui des inondations urbaines.

La gestion des risques d'inondation nécessite des connaissances sur les processus dangereux et leurs impacts (Zischg et al., 2018). C'est pourquoi certains chercheurs se sont penchés sur

l'évaluation de ce type de risque. Un accent particulier est mis sur le potentiel des expériences de modèles pour étudier la progression du risque d'inondation (Quenault, 2017).

La problématique étant de s'orienter sur l'opportunité allouée à la ville de Skikda, afin d'établir des mesures efficaces d'adaptation et d'atténuation pour faire face aux risques d'inondations. Les experts, chercheurs scientifiques et acteurs locaux, doivent donc changer de paradigme et d'opter pour la recherche de méthodes appropriées pour réduire les conséquences néfastes dus aux risques d'inondations. Les pouvoirs publics doivent faire face à leur responsabilité pour fédérer les chaînes de fonctionnement pendant la crise des inondations afin de répondre aux problématiques liées aux dommages et aux dysfonctionnements, en ajustant les services nécessaires et en favorisant la résilience post-événement.

## **Questionnement**

En présence de nombreuses approches et stratégies de gestion des inondations, il devient complexe de sélectionner la méthode de gestion des inondations la plus adaptée. Néanmoins, la détermination des zones urbaines inondables représente l'étape primordiale dans la gestion des risques d'inondation. Ainsi, des préoccupations majeures sont alors de mises

- **Est-ce que l'utilisation d'outils et de nouvelles approches expertes peuvent nous permettre d'identifier et d'anticiper sur le phénomène des risques d'inondation dans la ville de Skikda ?**
- **Et à quel niveau et moment la contribution des différents acteurs pourrait renforcer la résilience urbaine ?**

À cette étape, il est essentiel de définir la direction dans laquelle notre intention de recherche se déroule. Dans cette optique, certaines interrogations ont été posées :

- **Quels sont les différents facteurs influents aux risques d'inondation dans la ville de Skikda ?**
- **Quels sont les différents scénarios à effet résilient pour minimiser l'ampleur des risques et voire concilier risques majeurs et postures citoyennes résilientes ?**

## **Les hypothèses**

Pour répondre aux questions de recherche, les pistes de recherche seront explorées à travers l'hypothèse suivante :

Bien que l'on sache que les risque d'inondation augmente avec le changement climatique, la croissance démographique, l'urbanisation incontrôlée et la mauvaise état des infrastructure de drainages urbain, et que les aléas dus aux inondations sont dynamiques, changent et varient constamment sous les effets induits du changement climatique et la croissance démesurée des surfaces et zones urbaines imperméables.

Ainsi, expérimenter un nouveau référent conceptuel d'évaluation de la sensibilité aux risques d'inondation basé sur des indices de causes à effets (sous forme de facteurs clés) affichant par voie de conséquence l'état des lieux et les degrés de gravité dus aux risques d'inondation dans la ville de Skikda. Répertorier les zones urbaines sensibles et potentiellement inondables, afin d'introduire des mesures nécessaires sous forme de scénarios appropriés pour un environnement résilient

## **Objectifs principaux**

- Renouer et concilier les zones urbaines dites sensibles aux inondations avec le phénomène accru dû aux risques d'inondation.
- Sécuriser le bon fonctionnement de la ville avant, durant et après catastrophe naturelle majeure.
- Tester des scénarios de bonne gestion, en essayant de capitaliser et positiver tant bien que mal les effets néfastes des catastrophes.
- Sensibiliser les différents acteurs publics à la culture de la « résilience urbaine » et ces retombées comportementaux, afin de profiter des retours d'expérience.
- Initier les experts et les décideurs politiques à introduire des documents réglementaires plus pointus lors de l'élaboration des instruments de planification et de gestion urbaine.

Tout d'abord, il nous est opportun d'élucider les malentendus qui tournent autour de la compréhension intelligible des différentes caractéristiques de classification des risques dû aux inondations, et ce en effectuant une évaluation approfondie qui prenait en compte les aspects naturels et les enjeux urbains du risque d'inondation spécifiquement pour la ville de Skikda. Par conséquent, un cadre multidimensionnel d'évaluation du risque d'inondation a été introduit en modélisant des facteurs afin de concevoir un système spatial d'aide à la décision. Puis, en établissant une stratégie commune visant à renforcer la résilience, l'opportunité s'offre

aujourd'hui d'établir des mesures efficaces d'adaptation et d'atténuation pour la ville de Skikda.

## **Choix et présentation de cas d'étude**

Notre choix s'est porté sur la ville de Skikda en tant que zone d'étude et ce pour plusieurs raisons :

- Sa situation géographique « ville côtière, donnant sur la mer méditerranée) ;
- Caractérisée par un site exigü, accidenté (fortes pentes ...) et tourmenté ;
- Zones urbaines au centre d'un cul de sac et sillonnées par deux grands oueds (Oued Zerman et Oued Saf saf) côtoyant la ville et donnant sur la mer ;
- L'inventaire des dernières crises en matière de crues et d'inondations aux multiples dégâts et catastrophes naturelles qu'a subi la ville en deux décennies ;

Le territoire de la ville de Skikda est confronté à deux défis majeurs. Le premier défi réside dans l'urbanisation massive et la croissance rapide des infrastructures et des habitations, avec une planification stratégique, qui est issue et cousue sous le sillage de construire et bâtir rapide sans se préoccuper des conséquences.

Le deuxième défi est lié à la survenue d'événements imprévus en milieu urbain, entraînant divers risques pour les infrastructures exposées. Cette situation engendré plusieurs conséquences, telles que la construction sur des terrains à risque, les inégalités socio-spatiales et la prolifération des bidonvilles. Le choix de ces zones urbaines a été motivé à la fois par la densité des infrastructures de drainage urbain, les perturbations climatiques causées par les activités humaines, en particulier l'industrie, et par le contexte particulier d'accélérer l'urbanisation tous azimuts.

## **Méthodologie de la recherche**

l'instar de tous les pays du monde, l'Algérie peine à lutter contre les inondations et les crues en milieux urbains, beaucoup d'efforts ont été déployés pour développer des approches liées à un cadre institutionnel d'évaluation des effets néfastes aux risques d'inondation (Hirabayashi et al., 2013). La modélisation de la susceptibilité aux inondations est largement reconnue comme de référence de la gestion des inondations en milieu urbain.

En particulier parce que les catastrophes des inondations ont un impact important sur les individus, les villes et les pays, ce qui nécessite une collaboration plus large et quasi-répondue entre plusieurs parties prenantes (Jones, 2016). Notre approche variée qui dispense d'outils d'aide à la recherche documentaire, afin de compiler, lire, décrypter et interpréter la diversité des emprunts en matière de connaissances documentaires en rapport avec notre objet d'investigation, appuyer par une autre approche mixée (quantitative et qualitative) visant à confirmer ou infirmer les hypothèses avancées.

Les sources des données primaires sont essentielles pour défraichir et amorcer une analyse documentaire, dont les bases de données universitaires nationales et internationales qui recourent la résilience urbaine.

Les méthodes d'entrevue et d'enquête ont été également déployées pour identifier les facteurs aggravants des risques d'inondation. Les experts, les acteurs publics locaux ainsi que les décideurs politiques ont été conviés à collaborer au cours de cette enquête.

Des entretiens ont été menés parmi les résidents locaux et les institutions de gestion des risques d'inondation telles que les pompiers, l'A. C.P., les travaux publics, l'ONA, la direction des ressources en eau et la DUCH, qui ont été interrogés par le biais de questionnaires Interrogé par le biais de questionnaire (direct ou semi direct) pour recueillir leurs avis. De plus, une cartographie a été réalisée verser identifier les zones inondables et comprendre les facteurs potentiels déclenchant les risques d'inondation dans la ville de Skikda à l'aide de l'outil le plus répandu « SIG », car la cartographie est un moyen de représenter le risque et de délimiter ses limites (Salazar-Briones et al., 2020).

## **Structure de la thèse**

Cette investigation est structurée comme suit (figure 1).

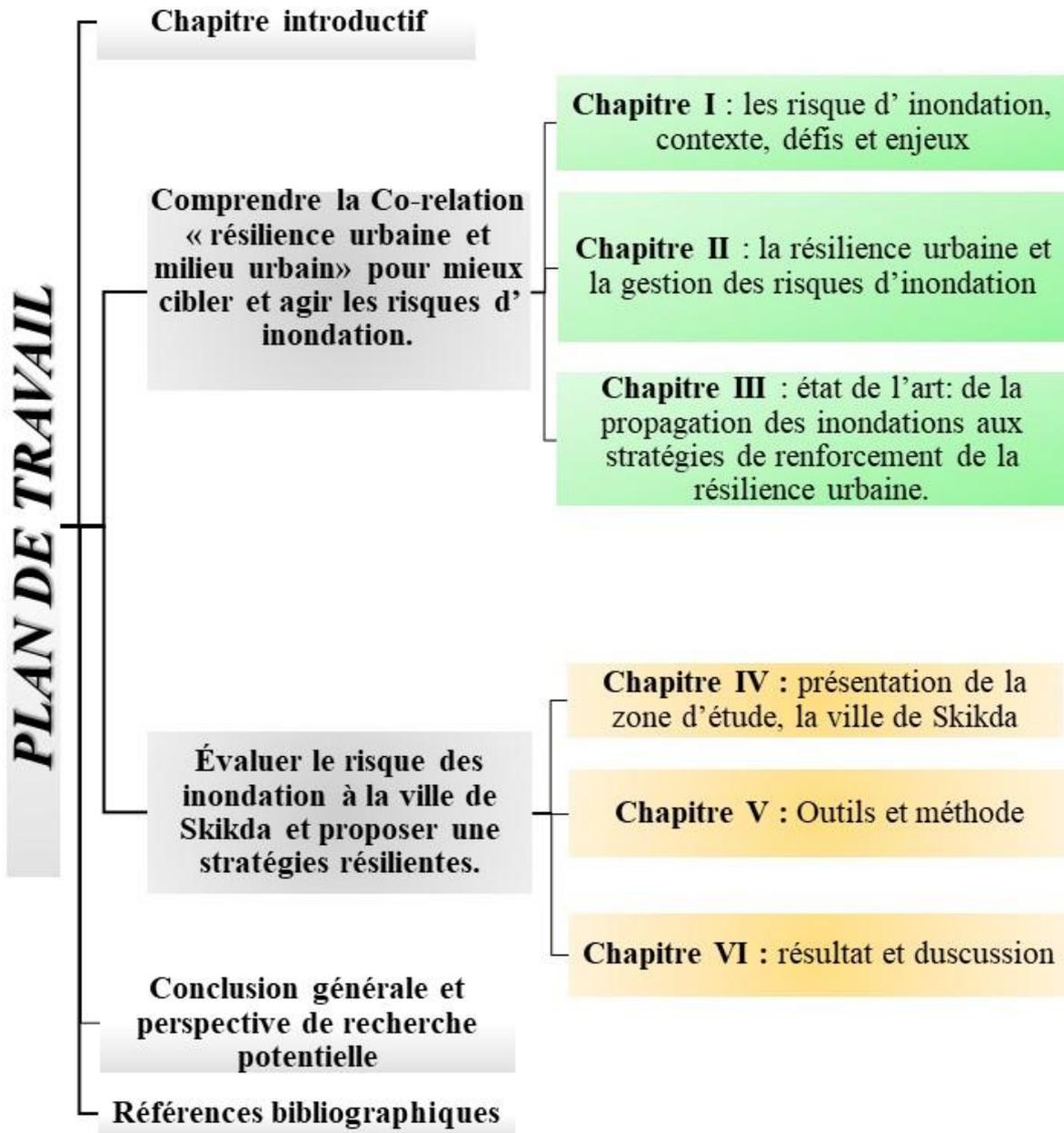


Figure 1 : La structuration de la thèse (auteur, 2020).

# *Chapitre I*

*Le risque des inondations,  
contexte, défis et enjeux.*

## **Introduction**

Notre planète est soumise à toutes sortes de catastrophes détruisant et nuisant qui ont un impact destructeur sur notre environnement. Les risques provoqués par les aléas naturelles sont en augmentation à l'échelle mondiale, mettant en lumière les rapports complexes entre l'environnement urbain et naturel (Q. Sun et al., 2022). Les impacts sur les villes sont graves et généralisés dans les domaines du développement physique, économique et social (Patrikaki et al., 2018).

Dans cette optique, il est crucial de comprendre les défis auxquels sont confrontées les villes, plus particulièrement les défis spatiaux, dus aux inondations afin d'adoucir, voire atténuer ces défis spatiaux complexes.

Ce chapitre se concentre principalement sur les risques d'inondations qui peuvent impacter les zones urbaines. L'objectif est d'examiner de manière approfondie le risque d'inondation, les principales causes d'aggravation des impacts en milieu urbain, les modifications hydrologiques et l'augmentation des enjeux dans les zones sujettes aux inondations.

### **I.1 Le risque majeur**

Une situation dite « à risque » désigne la présence simultanée d'un (ou plusieurs) aléa(s) et d'une vulnérabilité spécifique d'un espace à l'égard d'un danger. La question des « risques » se présente comme « *le problème abordé ici concerne donc des situations extrêmes, peu courantes mais ayant des conséquences graves* » et utilise divers concepts issus des directives-cadre (aléa, probabilité, gravité, risque, enjeux...) (Donze, 1996).

#### **I.1.1 Le risque majeur comme un phénomène dangereux**

« *Le risque se produit lorsque des individus sont confrontés à un danger, ce qui devient un risque important si sa fréquence est faible et si sa gravité est extrêmement importante* » D. CHAUVEAU, 2006. Il s'agit d'une menace directe pour l'homme, son environnement et ses infrastructures, dont l'ampleur du désastre dépasse la capacité de la société à y faire face, comme le souligne Haroun Tazieff (2006).

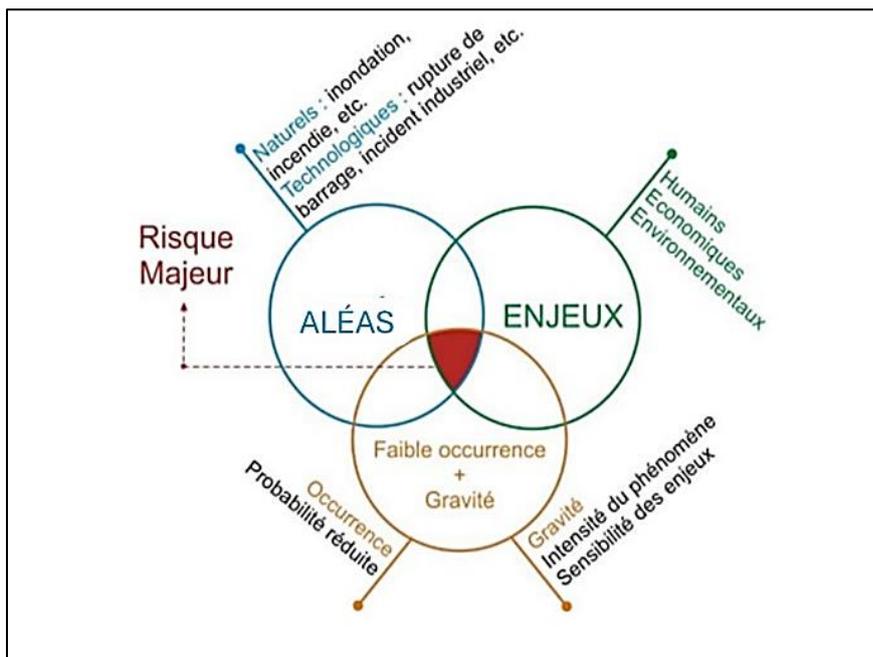
Le concept de risque majeur se réfère à la potentialité d'un événement incertain, qu'il soit d'origine naturelle ou anthropique, et dont les répercussions négatives sont significatives,

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

pouvant affecter un grand nombre d'individus. D'après Morin (2008), un risque majeur se caractérise par des décès, des blessures, des dégâts matériels, des conflits socio-économiques ou une détérioration de l'environnement. Ce danger résulte de la relation entre la probabilité d'un aléa et les conséquences potentielles sur les éléments vulnérables d'un environnement spécifique. Ces pertes peuvent être évaluées en termes de vies humaines, de dégâts aux infrastructures ou sur le plan financier (UNDRO, 1980).

### I.1.2 Le risque majeur, le produit d'interaction aléas et enjeux

La notion de "risques majeurs" a progressivement émergé en relation avec les enjeux socio-économiques (population et biens) d'une agglomération et la présence d'un événement physique ou d'une activité à risque naturel ou technologique, pouvant se produire avec une intensité donnée (aléa) dans une même zone géographique. Les conséquences se mesurent en termes de vulnérabilité qui désigne le degré d'anticipation des conséquences de l'aléa sur les enjeux (figure I-1).



**Figure I-1** : Configuration de variables en fait un événement difficile à anticiper et donc à juguler (Md RIHANI, 2023).

Il est essentiel de maîtriser l'aléa et les enjeux socio-économiques afin de mesurer les risques majeurs. Cette compréhension permet également d'appréhender la portée des mesures nécessaires et mises en œuvre pour prévenir, ou du moins atténuer, les conséquences de ces risques.

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

### I.1.3 Le risque majeur, caractéristique

Le risque majeur est défini par deux critères essentiels : une probabilité d'occurrence faible associée à une gravité élevée, ce qui entraîne des conséquences majeures et des dommages considérables. Il arrive souvent que ces dommages dépassent les capacités de réaction des autorités compétentes, affectant de nombreuses victimes et causant des dommages importants aux biens, aux infrastructures, à l'environnement et à l'économie. La relation entre l'urbanisation (courbe rouge), les risques (courbe verte) et les politiques de développement durable est illustrée dans la figure I-2, tel que présenté par la courbe de Farmer (Pigeon, 2012).

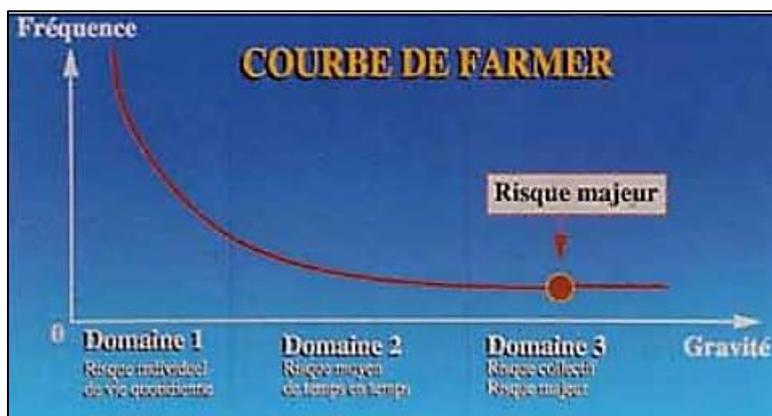


Figure I-2: La courbe de Farmer (Pigeon, 2012).

Le tableau I-1 présente de manière explicite l'échelle de gravité des dommages, allant de l'incident de niveau 0 (sans blessé, dommages minimes) à la catastrophe majeure de niveau 5 (plus de 1 000 décès, dommages matériels considérables).

Tableau I-1 : Typologie des risques (département française de la prévention des risques majeurs).

Classe	Dommages humains	Dommages matériels
0 Incident	Aucun blessé	Moins de 0,3 M€
1 Accident	1 ou plusieurs blessés	Entre 0,3 M€ et 3 M€
2 Accident grave	1 à 9 morts	Entre 3 M€ et 30 M€
3 Accident très grave	10 à 99 morts	Entre 30 M€ et 300 M€
4 Catastrophe	100 à 999 morts	Entre 300 M€ et 3 000 M€
5 Catastrophe majeure	1 000 morts ou plus	3 000 M€ ou plus

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

### **I.1.4 Catégories principales des risques majeurs**

Il y a deux principales familles :

Les risques naturels sont des phénomènes naturels anormaux qui surviennent dans des zones habitées. Les caractéristiques géographiques de ces événements, comme les inondations, les séismes, les éruptions volcaniques, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les cyclones et les tempêtes, les rendent très répandus et prévisibles à l'échelle mondiale.

Les risques technologiques, comme les accidents industriels, les risques nucléaires, les risques liés au transport de matières dangereuses (TMD) et les ruptures de barrages, sont engendrés par les actions humaines.

### **I.2 Le risque des inondations, concept et constat**

Chaque année, les inondations sont les événements les plus courants (Puechlong, 2020), les plus préjudiciables et les plus catastrophiques qui affectent le monde chaque année (Toubin, 2018). C'est un vieux sujet de réflexion qui devenu un phénomène hydrologique préoccupant du XXI<sup>e</sup> siècle dans le monde entier, affectant de manière significative diverses parties des processus hydrologiques (Brody et al., 2015; Hassaballah et al., 2017; Matheswaran et al., 2019). Elles ont provoqué près de la moitié des morts causées par les catastrophes naturelles et près du tiers des pertes économiques à l'échelle mondiale au cours des 50 dernières années.

#### **I.2.1 L'aléa d'inondation**

Les inondations représentent un risque naturel sérieux et récurrent (Bunmi Mudashiru et al., 2022). Elles se définissent comme étant « une zone habituellement exempte d'eau qui se retrouve temporairement inondée rapidement ou lentement en raison d'un débordement de cours d'eau ou d'une autre source, affectant partiellement ou totalement un espace normalement sec ». La majorité des inondations se produisent lorsque le volume d'eau dans une rivière ou un cours d'eau dépasse la capacité de leur lit. Les inondations dans les lacs et les zones riveraines surviennent également lorsque les niveaux d'eau habituels dépassent ceux des zones environnantes.

L'importance de l'aléa d'inondation repose sur trois Paramètres fondamentaux : le niveau de l'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue, lesquels sont soumis à l'influence de divers éléments tels que les précipitations, les caractéristiques du bassin versant et les propriétés des

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

canaux. Il est à souligner que ces éléments naturels peuvent être modifiés par l'interaction avec les Activités humaines.

### **I.2.2 Le risques des inondations, un défi majeur omniprésent.**

Le concept de risque d'inondation est composé de deux piliers principaux, à savoir l'aléa d'inondation et la vulnérabilité aux inondations (Skakun et al., 2014). L'aléa fait référence à la répartition géographique et à la fréquence des mesures d'intensité d'un événement naturel menaçant à un endroit particulier (Y. (Victor) Wang & Sebastian, 2021). Dans le même temps, la vulnérabilité s'explique par l'absence de résistance aux événements dommageables en fonction de diverses dimensions telles que la communauté, c'est-à-dire la densité de population et le niveau de revenu ,ou l'utilisation des terres (Masood & Takeuchi, 2012), ce qui entraîne des pertes importantes d'entités (Ekmekcioğlu et al., 2022a) (figure I-3).



*Figure I-3 : Schéma conceptuel d'un risque d'inondation (CAPRE 06, 2022).*

#### **I.2.2.1 Le risques des inondations, essai de définition**

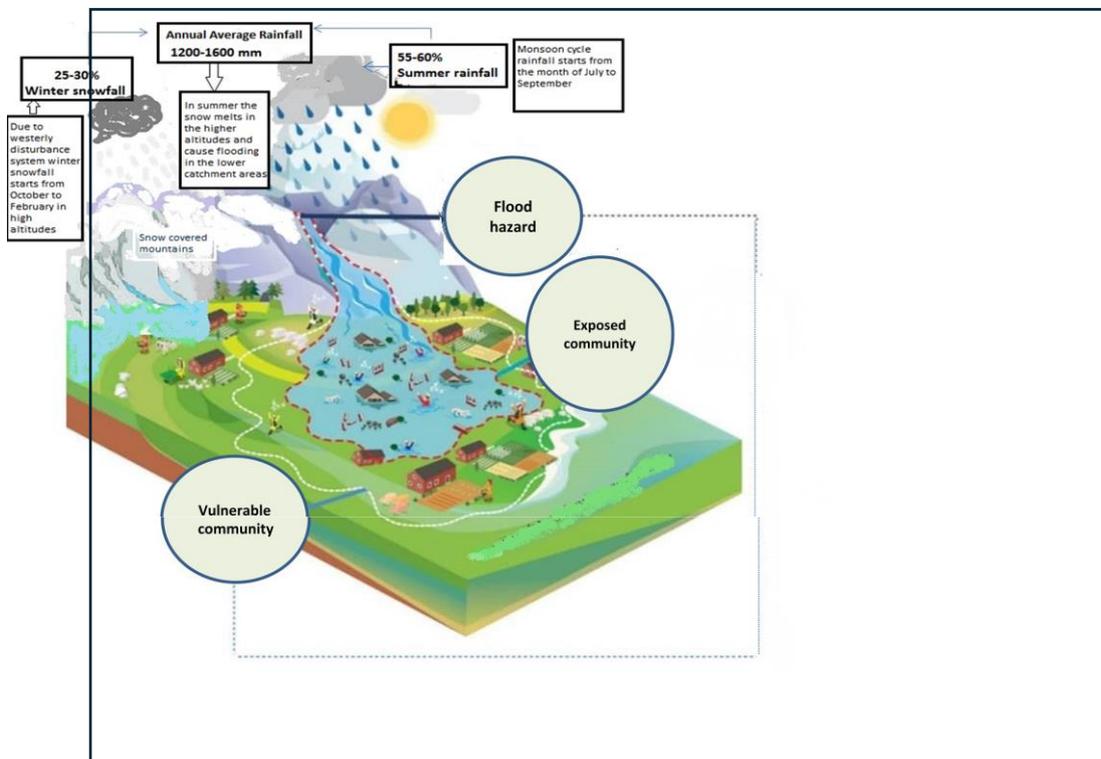
Il n'existe pas de consensus universel sur la définition du risque d'inondation, mais celle qui est très utile pour commencer dit que le risque d'inondation est lié à ce qu'on appelle un système socio-écologique hybride (Sudmeier-Rieux et al., 2021), dans lequel une ville est un système complexe comprenant des caractéristiques socioculturelles et naturelles (Battemarco et al., 2023). Le risque d'inondation affecte une région peuplée, où des infrastructures majeures sont présentes (Cutter et al., 2003). Ce risque découle de deux principaux facteurs : le débordement possible des cours d'eau de leur lit naturel et l'occupation humaine des plaines alluvions pour

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

la construction d'infrastructures, l'installation d'équipements et le développement d'activités.(Julien, 2023).

(Zischg et al., 2018) définit le risque d'inondation « en fonction de la probabilité d'un événement ou d'un scénario d'inondation, respectivement, et de l'étendue des dommages qui en découlent ». (Ali et al., 2020) considère le risque des inondations comme « des aléas naturels dynamiques intrinsèquement complexe causé par de nombreux impacts naturels et anthropiques. C'est un danger naturel dévastateur qui peut causer des dommages à l'environnement, aux infrastructures et à la société ».

Pham et al., 2021 définit le risque d'inondation comme « la synthèse de la probabilité d'occurrence d'une inondation et de ses conséquences négatives associées, qui peuvent englober divers types d'impacts. La probabilité ou la susceptibilité d'une inondation peut être intégrée aux conséquences dans l'estimation des risques ». Ekmekcioğlu et al., 2022 définit comme « un risque naturel avec des facteurs atmosphériques et météorologiques en jeu peut se métamorphoser en une catastrophe avec des facteurs anthropiques ». (Abdrabo et al., 2022) définit comme « une conséquence de la combinaison des phénomènes hydrologiques et météorologiques extrêmes en plus des activités humaines ».

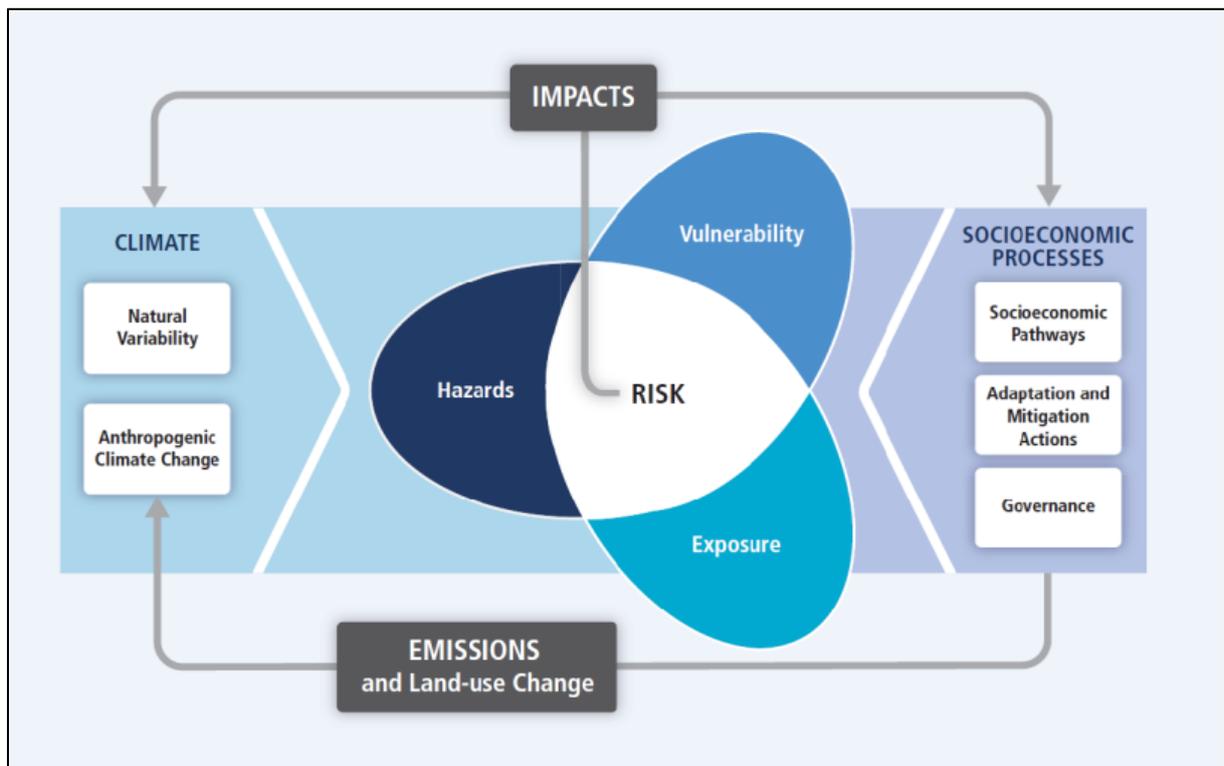


**Figure I-4 :** Diagramme climatique montre le processus de formation des risques d'inondation (Hussain et al., 2021).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

### I.2.2.2 Le risque d'inondation, produit d'interaction : Aléa + Vulnérabilité + Exposition

Dans le contexte de l'analyse des risques liés aux inondations rapides induites par des précipitations extrêmes (GAR, 2022), il est essentiel d'examiner l'interaction entre l'apparence et les conséquences potentielles de ces inondations. Selon le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (AR5), le risque lié aux impacts climatiques découle de la combinaison des dangers climatiques (incluant les événements et tendances extrêmes) et de la vulnérabilité ainsi que de l'exposition des systèmes humains et naturels, comme illustré dans la figure I-5.



**Figure I-5 :** Concepts fondamentaux des risques liés au climat (inondation cible) (IPCC AR5, 2022).

En suivant la définition fournie par l'UNISDR (2009), le GIEC (2012), (Lyu et al., 2020), et (X. Wang et al., 2024); le risque d'inondation est défini comme l'impact attendu des inondations sur la société et l'environnement, et implique l'interaction de trois composantes interconnectées : le danger, l'exposition et la vulnérabilité, ainsi que leurs processus connexes la combinaison du danger, de l'exposition et de la vulnérabilité (Eq. 1).

*Risque d'inondation = danger d'inondation × exposition à l'inondation × vulnérabilité à l'inondation .....(1)*

**L'aléa** est utilisé par certains chercheurs pour désigner la catastrophe d'inondation elle-même ou son occurrence potentielle qui identifié plus précisément par deux composantes principales - la source (ex. pluie) et la voie d'accès (par exemple, l'étendue et la profondeur de l'inondation)

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

(Balica et al., 2015). L'aléa comprennent les distributions de probabilité des caractéristiques naturelles des environnements inondables (Gillard et al., 2016; UNISDR, 2015).

**L'exposition** (c'est-à-dire les éléments à risque), représentée par les valeurs économiques et intrinsèques présentes dans la zone concernée, reflète l'état des individus, des biens et des infrastructures qui pourraient être affectés, selon le GIEC (2012). Des éléments tels que la densité de population l'investissement en capital et la valeur des Terrains de terrain ou des propriétés peuvent servir d'indicateurs pour Évaluer l'exposition aux inondations.

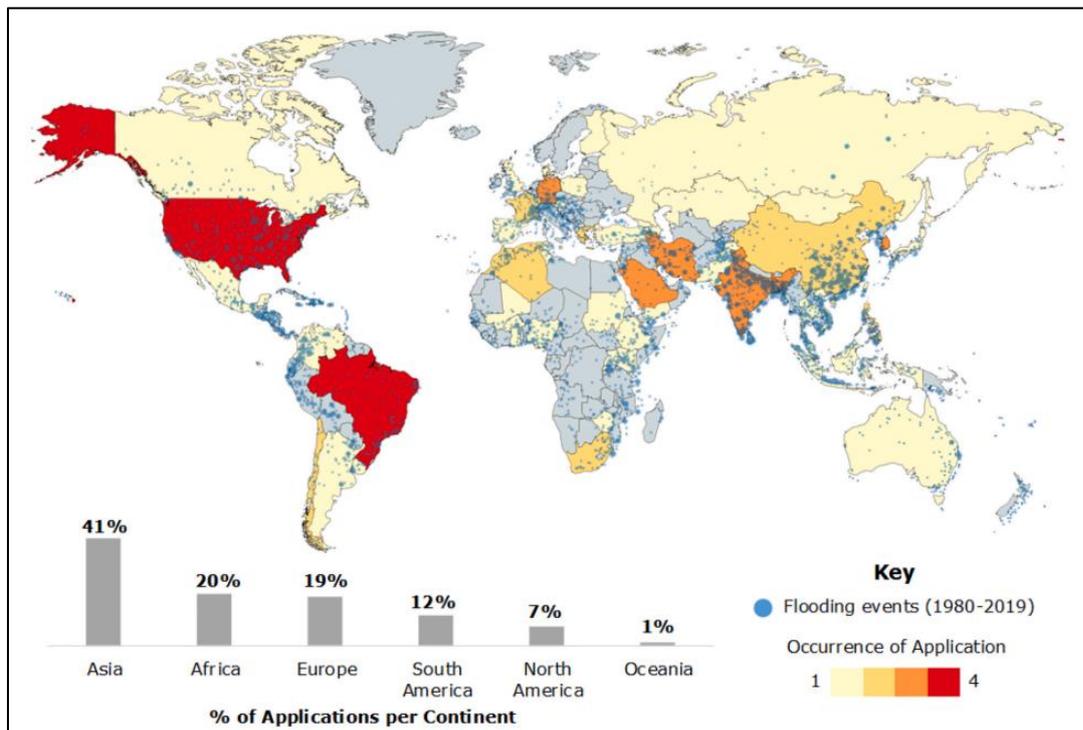
**La vulnérabilité** peut être définie comme la probabilité d'encourir des dommages ou des pertes, et peut être mesurée à l'aide de divers indicateurs tels que la densité du réseau de transport, le taux d'urbanisation et la disponibilité des services d'infrastructure locaux (X. Wang et al., 2024). Elle représente l'état de susceptibilité à des Événements indésirables, tels que les inondations dans le cadre de cette étude, qui sont associés à des changements environnementaux et sociaux, ainsi qu'à un manque de capacité d'adaptation. L'absence de mesures de protection contre les inondations, ainsi que le manque de protection des biens économiques et des vies humaines exposés aux inondations, sont des indicateurs de la vulnérabilité.

Il est clair que le produit de l'exposition et de la vulnérabilité constitue une mesure intégrée des impacts environnementaux et socio-économiques des (Anelli et al., 2022). La principale raison de l'augmentation des pertes Causes par les inondations réside dans le fait que les zones exposées et vulnérables aux inondations sont les principaux facteurs de risque associés à ce phénomène (Ceola et al., 2015).

### **I.2.2.3 Le risque des inondations, un risque récurrent et mortel à travers le monde**

Le risque d'inondation est l'un des phénomènes naturels les plus fréquents sur Terre, pouvant entraîner d'énormes dommages économiques et avoir de graves répercussions sur la vie à la fois individuelle, communautaire et territoriale (Hong et al., 2018; Kundzewicz et al., 2014). Diverses études ont démontré que les inondations parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes et les plus dévastatrices, entraînant des pertes en vies humaines et des dommages économiques considérables à l'échelle mondiale, par exemple: (Gigović et al., 2017; Jongman et al., 2015) (figure I-6).

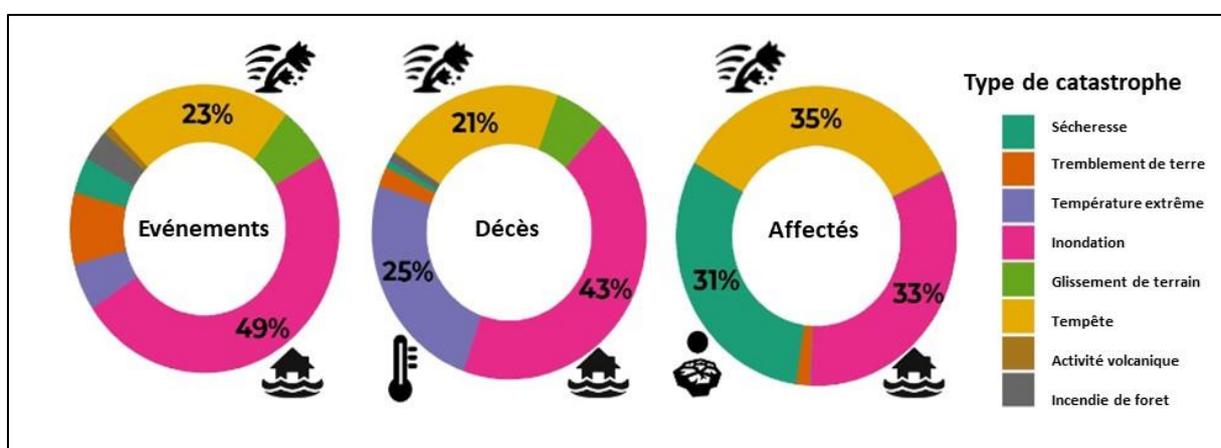
## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.



**Figure I-6 :** Répartition spatiale des sites d'application dans le monde par rapport à l'occurrence historique des inondations de 1980 à 2019 (Da Silva et al., 2020).

D'après la base de données internationale sur les sinistres à couverture mondiale CRED, les événements des inondations est au premier rang des catastrophes naturelles enregistrées depuis 1900 à 2019 dans le monde représentent 49 %.

Les inondations ont touché plus de personnes que tout autre type (Heinzlef, 2020). Ce risque spécifique est à l'origine de 43 % des décès liés aux catastrophes et Préoccupation 33 % du nombre total de personnes touchées (Abdrabo et al., 2022), suivi par les Tempêtes qui représentent 35 % (Figure I-7).

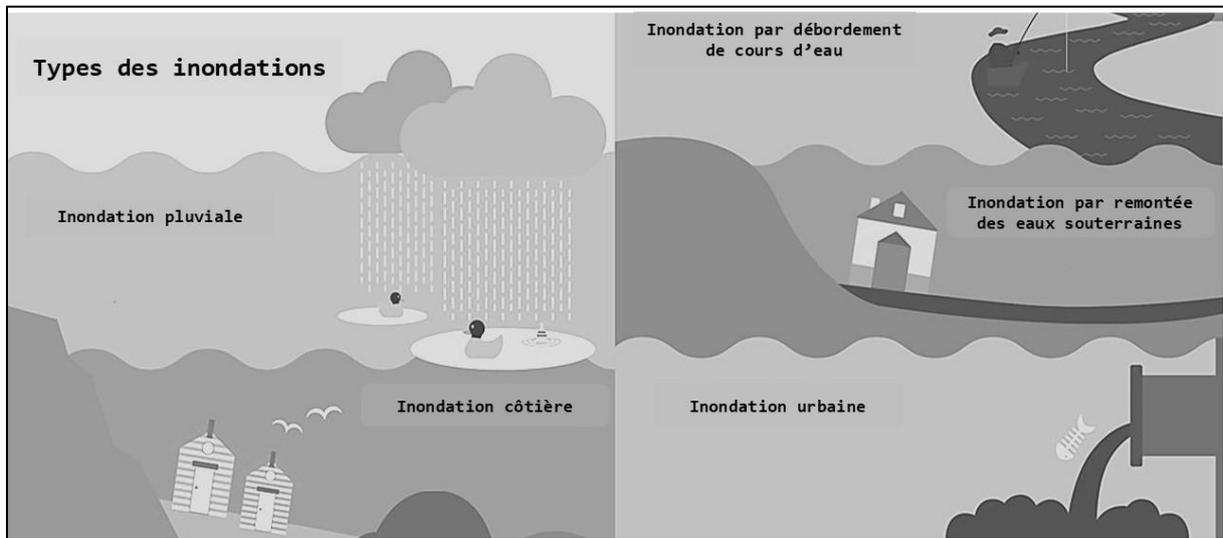


**Figure I-7 :** part par type de sinistre 2019 (Froment & Below, 2020).

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

### **I.2.3 Les grands types des inondations**

On en recense plusieurs types des inondations en zone urbaine classés d'après leurs apparences (Banque mondiale, 2012), chacun étant fonction de facteurs différents et d'un contexte particulier (figure I-8).



*Figure I-8 : les différents types d'inondations (Abdrabo et al., 2022).*

#### **I.2.3.1 Inondations par débordement de cours d'eau**

Le phénomène de débordement des cours d'eau se produit lorsqu'un cours d'eau dépasse son lit mineur, entraînant des inondations dans la plaine environnante pendant un certain laps de temps. À ce moment-là, la rivière occupe son alluvion moyen voire son lit majeur. Ces incidents sont généralement déclenchés par des précipitations intenses ou prolongées, entraînant une augmentation du débit des cours d'eau et la submersion des zones en aval, souvent situées en terrain bas et peu incliné, pour une durée significative.

#### **I.2.3.2 Les inondations par ruissellement**

Lors de périodes de fortes précipitations, les réseaux d'assainissement pluvial se retrouvent dépassés par le volume d'eau provenant des surfaces imperméables telles que les routes, les parkings et les toits. Ces réseaux, principalement présents en milieu urbain, sont fréquemment submergés par des flux d'eau rapides et importants dans les voies publiques. Les conséquences matérielles de ces situations sont souvent significatives, se manifestant par des inondations dans les sous-sols, les Grottes les rez-de-chaussée et les parkings.

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

### **I.2.3.3 Les inondations pluviales (crue soudaine)**

Ce type d'inondation, se produit par des précipitations intenses dépassant la capacité de l'infrastructure de drainage naturelle ou artificielle, devraient augmenter en fréquence et en intensité sous l'effet du changement climatique et de l'urbanisation (Wu et al., 2023). Dans de telles circonstances, l'inondation peut se matérialiser par la formation de flaques d'eau, des inondations de voirie ou des inondations structurelles lorsque les eaux de crue cherchent un exutoire en surface vers le plan d'eau ou le canal de drainage principal le plus proche. En règle générale, les inondations pluviales se produisent rapidement sur une petite zone géographique et se retirent en quelques minutes à quelques heures ; Cependant, dans les cas extrêmes, des kilomètres d'infrastructures peuvent rester inondés pendant de longues périodes, perturbant les entreprises et ayant un impact sur la reprise (Sebastian et al., 2022).

### **I.2.3.4 Les inondations par remontée des eaux souterraines**

Une inondation se produit lorsqu'un territoire est immergé par une élévation du niveau de l'eau au-dessus du sol. Cette élévation peut être causée par la remontée des eaux souterraines stockées dans les nappes phréatiques après des périodes pluvieuses abondantes. Les eaux de surface s'accumulent alors à la surface du sol, entraînant des inondations, en particulier dans les zones basses ou mal drainées. Ce phénomène, caractérisé par un déroulement lent, peut persister pendant plusieurs semaines.

### **I.2.3.5 Les inondations torrentielles**

Il s'agit principalement du phénomène selon lequel de fortes pluies torrentielles à court terme ou des précipitations continues dépassent la capacité de drainage d'une ville (X. Wang et al., 2024). Elle entraîne souvent de graves désastres dans les infrastructures sociales ou dans les vies humaines (Maejima, 2023).

### **I.2.3.6 Tempête côtière**

Les niveaux élevés d'eau causés par l'onde de tempête, la formation des vagues, le débordement des vagues, le ruissellement des fortes pluies et l'augmentation du débit des rivières à la suite des lâchers de barrages en amont ou aux précipitations importantes entraînent un flux vers les zones côtières de faible altitude, pouvant provoquer des inondations. En plus des volumes d'eau dommageables, les débits de crue peuvent transporter une quantité significative de sédiments. Ce phénomène est souvent moins étudié que la dynamique et la présence des eaux de crue,

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

cependant le déplacement des sédiments impacte les infrastructures, les communautés et même les débits de crue eux-mêmes (Figlus, 2022).

### **I.2.4 Retours d'expérience : les pires inondations urbaines de l'histoire du monde**

- **L'ouragan Katrina (2005)**, s'est avéré être une tempête dévastatrice aux États-Unis, se classant parmi les six tempêtes les plus puissantes jamais enregistrées à l'échelle mondiale. En août 2005, il a provoqué la rupture des digues de protection, transformant ainsi la ville de la Nouvelle-Orléans en une zone sinistrée. Les conséquences de l'ouragan Katrina ont été dramatiques, avec des pertes économiques estimées à environ 150 milliards de dollars et un bilan humain tragique de 1 833 décès. Le passage de l'ouragan Katrina à travers le golfe du Mexique a touché les régions côtières de la Louisiane, du Mississippi et de l'Alabama, mettant en évidence les conséquences dévastatrices d'une mauvaise gestion de l'eau dans les zones humides. Les analystes considèrent cet événement comme une catastrophe d'origine humaine plutôt que comme un phénomène naturel prévisible, soulignant ainsi les coûts élevés qui en découlent.
- **L'inondation soudaine d'août 2019 au Kerala, en Inde**, a été de loin l'inondation la plus importante de l'année, avec 504 décès et les deux tiers des résidents de l'État ont été touchés (plus de 23 millions d'habitants). De plus, les crues éclair qui ont touché la région ont été les pires depuis les années 1920 et ont coûté 2,85 milliards de dollars ;
- **Au Japon, en juillet 2019**, les fortes pluies ont déclenché les inondations les plus meurtrières depuis 1982, tuant 230 personnes.
- **Les inondations de juin à septembre au Pakistan (2022)** ont affecté 33 millions d'habitants, entraînant le décès de 1 739 personnes et des pertes économiques évaluées à 15 milliards de dollars.
- **Les inondations de la mousson** ont également frappé **l'Inde de juillet à octobre 2022** affectant 13 États, principalement dans le Nord et faisant de 2 035 morts et 4,2 milliards de dollars.
- **Les pluies torrentielles qui ont frappé Dubaï en avril 2024**, l'un des pays les plus arides de la planète, ont provoqué des Inondations soudaines ayant entraîné les énormes pertes. Il est envisageable que le réchauffement climatique ait contribué à cet événement.

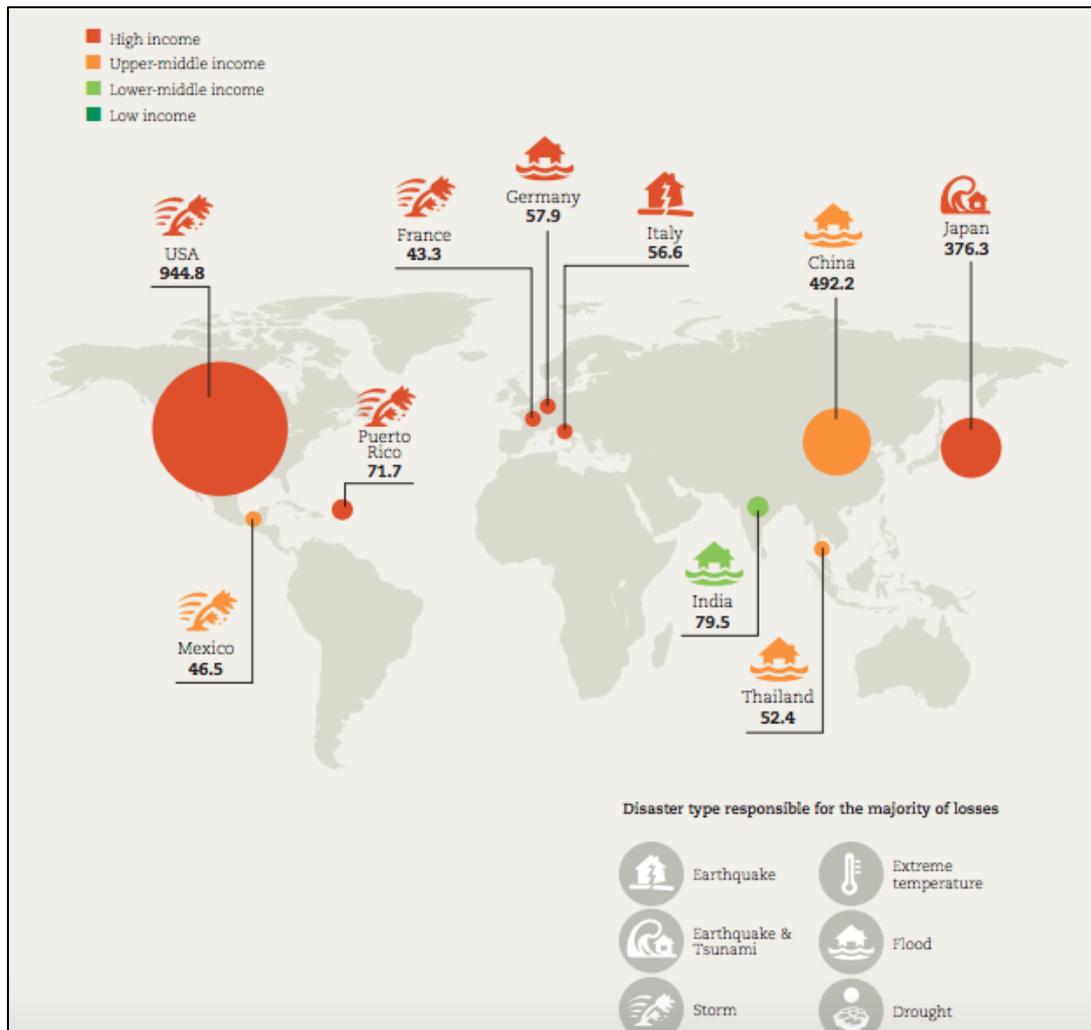
### **I.2.5 Les conséquences socio-économiques des risques inondations**

Ces derniers temps, les inondations ont pris une importance croissante à l'échelle mondiale en raison de leur nature destructrice et des pertes financières et humaines (Das, 2020). Les

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

inondations urbaines considèrent le risque le plus destructeurs dans la catégorie des catastrophes naturelles au XXI<sup>e</sup> siècle qui frappent plus durement et plus fréquemment dans de nombreuses régions, affectant d'infinis personnes, notamment les plus vulnérables. En raison de l'accroissement des risques d'inondation et de la concentration des enjeux, sur un observé une augmentation significative des pertes matérielles, immatérielles et humaines.

(Abdelgawad et al., 2024). Les résultats des inondations antérieures mettent l'accent sur le nombre de personnes tuées, les structures détruites, ainsi que les dégâts aux réseaux techniques (Froment & Below, 2020; UNISDR, 2015) (figure I-9).



**Figure I-9 :** Les dix premiers pays/territoires en termes de pertes absolues des catastrophe naturels (milliards de dollars US) 1998-2017 (Heinzlef, 2020).

### I.2.5.1 Mortalités causées par le risque d'inondation

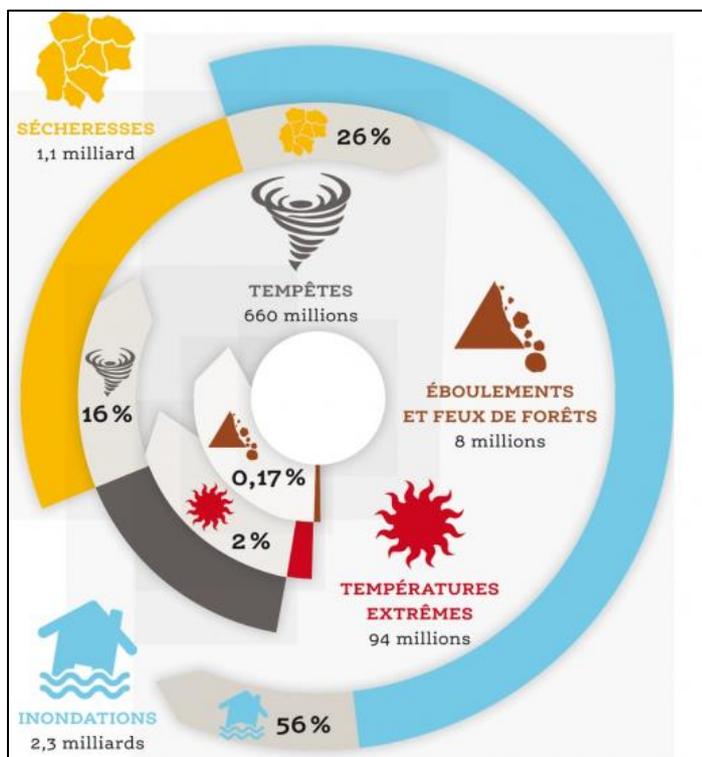
Les risques les plus préoccupants sont les inondations, qui peuvent causer entre 1 et 1000 décès par l'événement. Environ 220 000 personnes sont tuées par les inondations (Alfieri et al., 2017).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

Le nombre de décès ne cesse de croître dans de nombreuses régions du monde en raison de l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des inondations à travers le monde.

Les inondations sont plus fréquentes en Asie et en Afrique sur d'autres continents, mais elles ont un impact croissant ailleurs. À titre d'exemple, en Amérique du Sud, 560 000 personnes ont été affectées par des inondations en moyenne chaque année entre 1975 et 2004. L'année suivante (2005-2014), ce chiffre était passé à 2,2 millions, soit près de quatre fois plus.

Sur la période 1995-2017, le risque des inondations affectant 2.3 milliards de personnes dans le monde avec un pourcentage de 56% personnes affectées, vivant majoritairement en Asie (95%) (Figure I-10).



**Figure I- 10** : Nombre de personnes affectées par les désastres climatiques de 1995 à 2017 (Heinzlef, 2019).

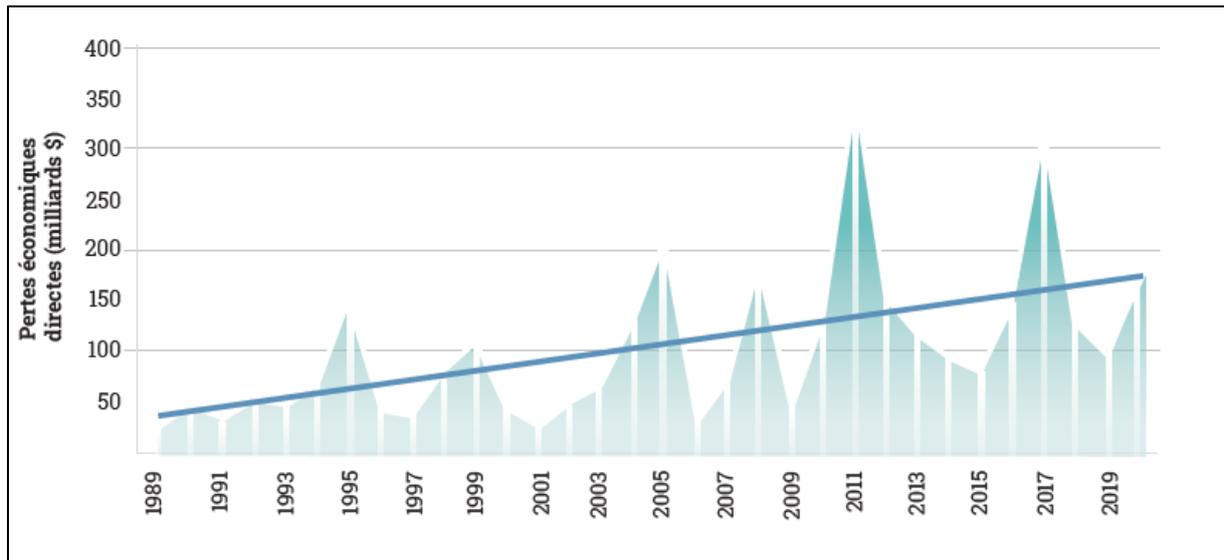
### I.2.5.2 L'incidence économique des répercussions du risque des inondations

Les inondations sont parmi les risques environnementaux Les plus onéreux, occasionnant des dégâts s'élevant à plusieurs centaines de milliards de dollars annuellement (Ward et al., 2013). Selon une recherche réalisée par l'European Environment Agency, les pertes économiques directes annuelles moyennes causées par les catastrophes météorologiques ont augmenté de manière significative au cours des trois dernières décennies. Ces transactions ont augmenté d'environ 70 milliards de dollars en moyenne dans les années 1990 à un peu plus de 170

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

milliards de dollars dans les années 2010, pour atteindre environ 300 milliards de dollars américains en 2017 (Jongman, 2018). L'augmentation de ces coûts s'explique notamment par la concentration des enjeux en milieux urbains (figure I-11).

Au cours des deux dernières décennies, les dommages dus aux inondations se sont élevés à près de 0,6 billion de dollars US, représentant ainsi 28 % du total des pertes liées à l'ensemble des catastrophes naturelles sur la période de 1992 à 2022 (Güneralp et al., 2015).



**Figure I-11 :** pertes économiques directes liées aux catastrophes (milliards \$) entre 1989 et 2020 (Analyse de l'UNDRR à partir de EM-DAT, 2021).

### **I.3 Les risques inondations en Algérie, un vieux sujet de réflexion**

l'Algérie a été confrontée à des inondations qui semblent être le plus dangereux en Afrique du Nord en raison de leur nombre et de leurs dommages humains et Matériels causés par le changement climatique (Mokhtari et al., 2023).

Les inondations en Algérie trouvent leur origine principalement dans la configuration géographique spécifique du pays au sein du bassin méditerranéen. Les précipitations intenses, caractérisées par une variabilité extrême tant sur le plan annuel que saisonnier, entraînent des variations soudaines du débit des cours d'eau, ainsi que des crues et des inondations d'envergure considérable. Les écoulements se produisent de manière rapide et violente, pouvant se déclencher en moins d'une heure après les pluies, et les débits des oueds peuvent passer de quelques m<sup>3</sup>/s à plusieurs milliers de m<sup>3</sup>/s en seulement 2 ou 3 heures. Par conséquent, les risques d'inondations en Algérie sont exacerbés en raison de la forte densité d'urbanisation et

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

de la concentration de la population le long du littoral méditerranéen. Ainsi, nos communautés sont exposées à ces catastrophes en raison de la conjonction des défis et de l'exposition aux aléas des inondations. Par conséquent, les zones urbaines sont sécurisées contre de tels événements grâce à la combinaison des enjeux et de l'exposition aux risques d'inondation. Cette observation préoccupante représente un avertissement que les experts et politique algérienne recommandent de prendre en considération avec une extrême prudence (voir : La loi n° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable) .

### **I.3.1 Evènement historique des risques des inondations en Algérie**

Ces dernières décennies, l'Algérie a été confrontée à de nombreux risques d'inondation, principalement concentrés dans les zones urbaines densément peuplées et caractérisées par une urbanisation « anarchique » et non réglementée, engendrant ainsi des risques significatifs. Chaque épisode d'inondation est associé à des pertes humaines et des dommages matériels, indépendamment de leur ampleur.

Les événements les plus décrits et les plus connus, pour la plupart encore gravés dans la mémoire des individus sont les suivantes :

- **Les inondations d'Ouest algérien** (20 octobre 1993) fait 22 morts, 14 blessés et plusieurs disparus à Oued Rhiou.
- **Les inondations de Bordj Bou Arreridj** (23/09/1994) ont entraîné la perte de seize vies humaines et des dommages matériels estimés à 10.000.000 DA.
- **Les inondations de Bab-El-Oued du 2001**, la plus marquante dans le territoire algérien qui a touché le quartier de Bab El Oued (Alger) le 10 novembre 2001 causé par des pluies exceptionnelles. Environ 800 personnes ont perdu la vie, 150 personnes ont disparu, 30 000 personnes sont sans abri, 22 400 logements ont été endommagés, 6 400 logements ont été examinés, don't : 300 logements à démolir, 2400 logements nécessitant de grandes réparations, 1000 logements jugés habitables avec des travaux de réparation minimales. Les dommages économiques nets de plus de 250 millions d'euros. Le choc psychologique est énorme.
- **Les inondations de Ghardaïa (01/09/2008)** : la deuxième plus importantes inondations qui sont causées par de fortes pluies. Les pertes sont 43 décès, blessé 50, plus de 3000 habitations détruites ou endommagées.
- **Les inondations de Béchar (08/10/ 2008)** : 13 décès, 4.300 habitations détruites.

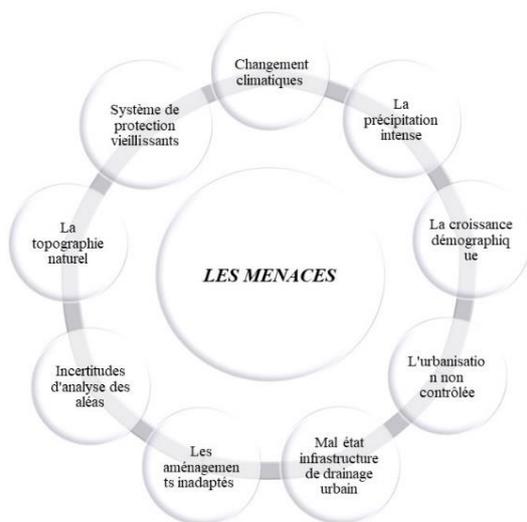
## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

- **Les inondations d'Oued Ferrane et Hai El Fidayine El Bayadh (05-06 octobre 2011),** ont entraîné la perte de 10 vies et la disparition de plusieurs dizaines de personnes.

### **I.4 Les causes d'aggravation des risques des inondations, la conjonction des facteurs anthropiques et naturels**

Depuis l'aube de l'humanité, les inondations et les tempêtes sont présentes et conforté avec l'homme. ces événements météorologiques extrême (inondations) se poursuivront à l'avenir en particulier dans les pays sous-développés, d'après la presse internationale, les statisticiens des experts (Ekmekcioğlu et al., 2022), menaçant l'humanité, en particulier ceux qui vivent déjà dans des zones à haut risque (Ibrahim et al., 2019; Nur & Shrestha, 2017). la fréquence, la gravité et les couts induits dans les zones urbaines basses ont considérablement a connu une augmentation expressive au cours des dernières décennies (IPPC, 2001; Mupepi & Matsa, 2023; World Economic Forum, 2017).

De nombreux facteurs aggravants influent sur le débit d'une rivière, et donc compliquent les risques des inondations croissant en ville (Sebastian, 2022). Ces facteurs incluent le développement des zones montagneuses, l'élévation du niveau de la mer, l'exploitation intensif des ressources naturelles liées à la croissance démographique, l'imperméabilisation des sols, la construction sur les zones riveraines, le non-respect des principes de précaution concernant la sédimentation des cours d'eau, l'utilisation inappropriée des sols et les changements dans les caractéristiques des tempêtes dus au changement climatique, entre autres (Samarasinghe et al., 2022; Yousuf & Romshoo, 2022). Ces facteurs sont présentés ci-dessous (Figure I-12).



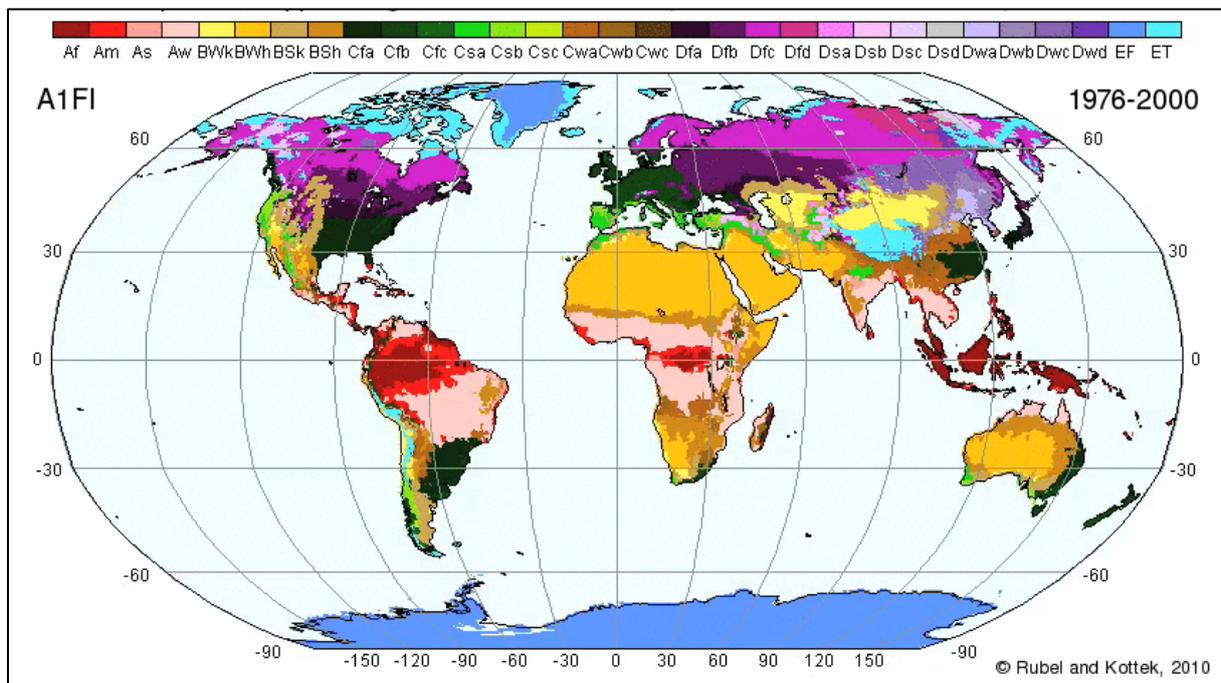
**Figure I-12 :** les facteurs qui amplifiés le risque des inondations en ville (auteur, 2024).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

### I.4.1 Le dérèglement climatique, le noyau de vulnérabilité

Depuis de nombreuses décennies, le changement climatique est devenu un sujet majeur dans les discours politiques et médiatiques (MSH-Sud - numerev, 2019), ce qui explique en grande partie le risque accru d'inondations urbaines dû à la menace croissante.

Le défi mondial du changement climatique requiert des solutions locales, étant donné le niveau actuel de réchauffement planétaire et les risques associés. Bien que la question du changement climatique d'origine humaine soit relativement récente, elle n'a été abordée qu'à partir des années 1970, malgré la reconnaissance du phénomène de l'effet de serre dès l'Aïeron XIXe siècle. Le rapport du GIEC de 2014 met en avant l'ampleur du changement climatique et des catastrophes qui en découlent à l'échelle mondiale (figure I-13).



**Figure I- 13 :** L'évolution de la classification mondiale du climat selon Köppen- Geiger 1980-2100 (Rubel & Kottek, 2010).

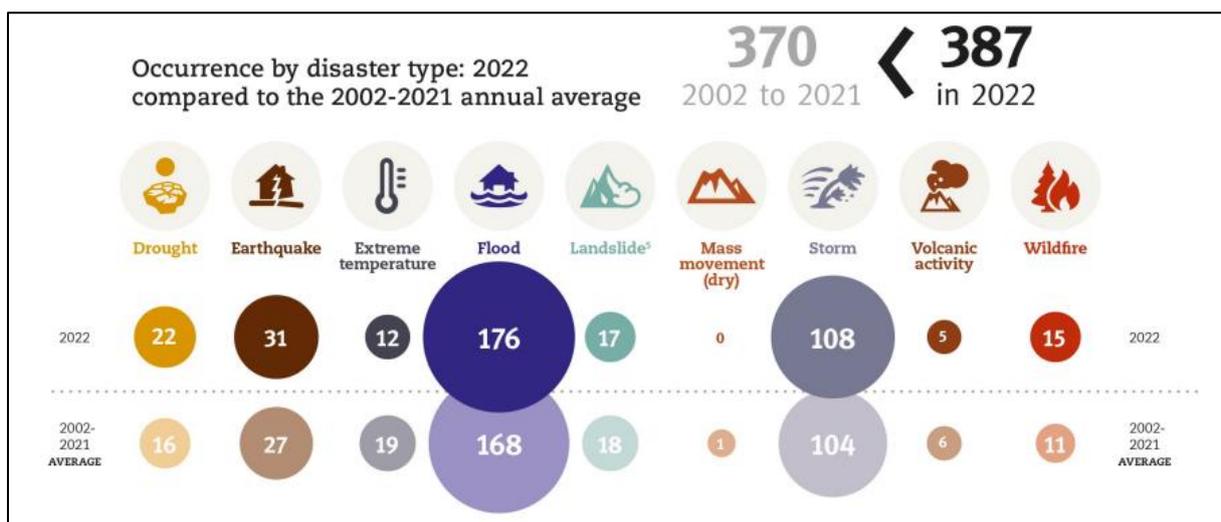
L'impact du changement climatique sur notre bien-être et la santé de la planète est de plus en plus préoccupant, et les scientifiques estiment que l'effet de serre, qui a entraîné le changement climatique, a été causé par l'homme. Face aux variations importantes des systèmes prévisionnels et aux évolutions attendues liées au changement climatique, de nombreuses incertitudes apparaissent. L'incertitude réduit considérablement la confiance dans l'enchaînement causes/effets et augmente la complexité d'une situation et donc sa gestion.

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

Selon (Walker et al., 2004), l'incertitude peut être définie par sa localisation, son degré et sa nature.

### I.4.1.1 Changements climatiques, l'origine d'augmentation des catastrophes naturelles

La variation naturelle du climat a toujours engendré des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, qui jouent également un rôle crucial dans la relation entre les précipitations et les cours d'eau (IPCC, 2014). Le phénomène du changement climatique constitue une menace pour la santé publique et la durabilité environnementale de la planète (Miller & Hutchins, 2017). Au cours de la dernière décennie, le dérèglement climatique provoqué par de les activités humaines et l'évolution des températures moyennes mondiales ont conduit à une augmentation considérablement des catastrophes naturelles liées aux conditions météorologiques, par rapport aux siècles derniers et les pertes qui en résultent seront graves » (Reghezza-Zitt, 2016a; Sachindra et al., 2016) (figure I-14).



**Figure I-14 :** occurrence par type de catastrophe signalés : par rapport à la moyenne annuelle 2002-2021 (CRED CRUNCH, 2022).

Les données de Munich Re indiquent une hausse des catastrophes climatiques de 200 par an au début des années 80 à près de 400 par an au début des années 2000. En 2018, 289 catastrophes naturelles ont touché 61,7 millions de personnes et ont causé la mort de 10 733 personnes (UNDRR, 2019). En 2022, le registre des événements d'urgence EM-DAT a comptabilisé 387 événements naturels et catastrophes qui ont touché 185 millions de personnes à travers le monde. Ces événements ont entraîné la perte de 30 704 vies humaines et ont occasionné des dommages économiques estimés à environ 223,8 milliards de Dollars (figure I-15).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.



Figure I-15 : rapport catastrophe naturelle signalés (EM-DAT ,2022).

### I.4.1.2 La hausse des températures, le facteur clé des risques d'inondations

Le rapport d'évaluation du GIEC de l'année 2021, montre que le changement climatique anthropique, qui contribue à l'augmentation des événements météorologiques et climatiques extrêmes à l'échelle mondiale, en particulier dans les pays en développement. L'augmentation sensible des catastrophes est notamment liée à l'élévation des températures moyennes mondiales. Au fur et à mesure que les températures persistent à augmenter dans l'atmosphère et les océans à 1.3 degrés Celsius. Une récente étude a alerté sur les conséquences d'une augmentation de 1.5 degrés Celsius (2,7 °F) sur la surface terrestre au cours des deux prochaines décennies (2030-2052).

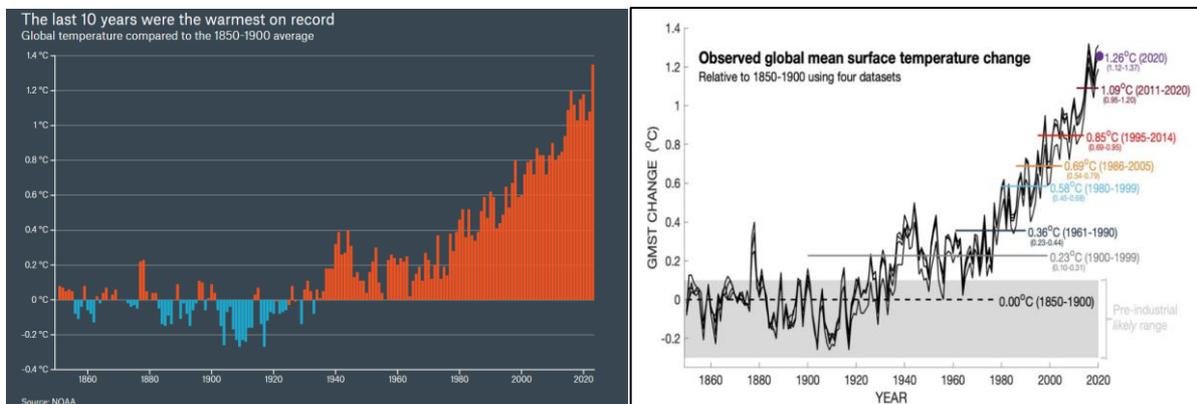


Figure I-16 : Élévation des température moyennes mondiales (AR6 du GIEC, 2021).

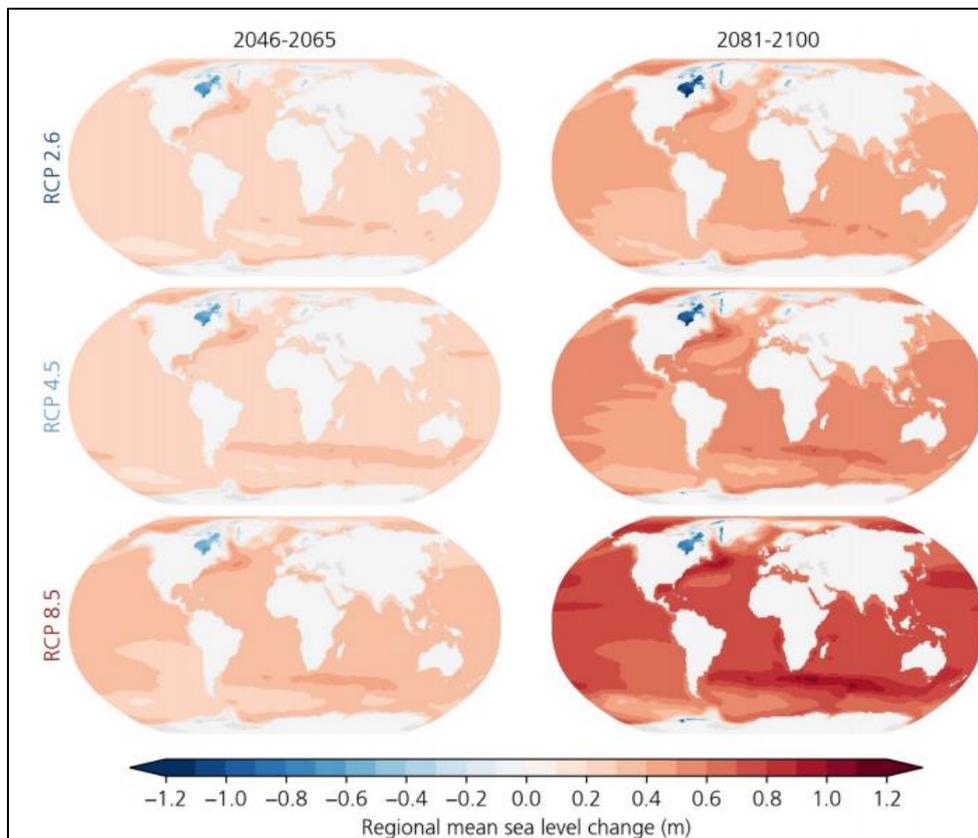
Cette augmentation devrait induire une élévation des Températures de la terre et des océans dans la plupart des régions du globe, engendrant des températures extrêmement élevées dans la plupart des zones habitées. De plus, une augmentation de l'humidité atmosphérique est observée (environ 7% par degré Celsius), ainsi que des températures minimales extrêmes la nuit, des précipitation intenses en certains endroits, et la poursuite de l'élévation du niveau de la mer (Institut pour l'économie et la paix, 2019).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

Des températures plus chaudes ont provoqué des inondations printanières plus précoces et des maxima d'humidité du sol plus précoces ont entraîné des inondations hivernales plus précoces dans le monde entier (Blöschl et al., 2017).

### I.4.1.3 Impact des changements climatique sur le niveau de la mer

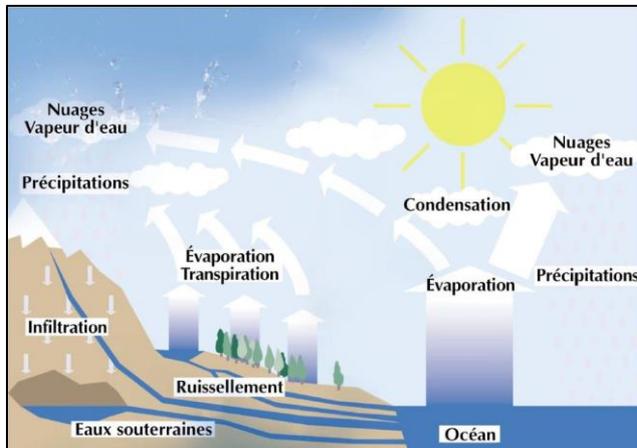
Les prévisions varient d'un scénario Représentative Concentration Pathway (RCP) à l'autre, scénarios qui sont soumis aux incertitudes évoquées précédemment. Les projections établies par le GIEC, allant du scénario RCP 2,6 considéré comme le plus optimiste, au scénario RCP 8,6 qualifié de plus catastrophique, couvrent une gamme de modèles de prévision. Des études récentes ont mis en garde contre une élévation potentielle du niveau de la mer au-delà de l'année 2100, pouvant atteindre 6 mètres selon le scénario RCP 8,5 d'ici 2150, voire des valeurs comprises entre 9 et 15 mètres selon le même scénario (Figure I-17).



**Figure I-17 :** Variation régionale du niveau de la mer pour RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5 en mètres pour les variations du niveau, de la mer. La colonne de gauche illustre la tranche de temps 2046-2065 et la colonne de droite 2081-2100 (IPCC, 2019).

#### **I.4.1.4 Impact des changements climatique sur l'intensité des précipitations**

Les vagues de chaleur estivales plus intenses et les nuits tropicales plus fréquentes aux latitudes moyennes sont des signes du réchauffement. L'air plus chaud peut renfermer davantage d'eau, produisant davantage de précipitations (figure I-18).



**Figure I-18 :** Le schéma du cycle de l'eau : le voyage de l'eau à travers la terre (Le centre de l'information sur l'eau : <https://www.cieau.com>)

Les événements météorologiques extrêmes ont la capacité de modifier les conditions météorologiques à l'échelle locale et de perturber l'équilibre naturel, notamment en après Jésus-Christ qui concerne les moyennes et les variations de température et de précipitations. Parmi les variables climatiques les plus influentes sur les processus hydrologiques en milieu urbain, on retrouve l'intensité des précipitations sur de courtes périodes. Il est envisageable que les variations d'intensité des précipitations aient un impact sur les prévisions météorologiques (Y. Wang et al., 2023).

L'augmentation des précipitations extrêmes continue d'être l'origine de risque d'inondations. Les inondations sont provoquées soit par des précipitations directes sur la plaine inondable (crues pluviales, crues par les eaux de surface), soit par des précipitations sur les bassins versants des cours d'eau, entraînant un écoulement des bassins versants (Zischg et al., 2018). Ainsi, une attention accrue a été portée à l'analyse de l'importance des précipitations extrêmes. Toutefois, la répartition spatiale, la portée, la fréquence, la durée et la gravité des précipitations extrêmes peuvent être très différentes dans différentes régions. En outre, les réactions aux fortes précipitations peuvent être très différentes d'une région à l'autre. L'étude des caractéristiques des précipitations extrêmes dans une région spécifique revêt donc une grande importance (Y. Wang et al., 2023).

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

L'été 2021 et 2022 ont fourni de nombreuses illustrations de l'impact du changement climatique. En juillet, environ 1 000 personnes ont trouvé la mort lors d'inondations provoquées par des précipitations exceptionnelles survenues en un laps de temps très court. Ces événements, survenus en Chine, en Inde, UA Pakistan, en Allemagne, en Belgique et aux États-Unis, mettent en évidence le fait que l'Europe, bien que relativement préservée jusqu'à présent, est désormais confrontée à des phénomènes météorologiques extrêmes liés au changement climatique, à l'instar de l'Asie ou de l'Afrique.

### **I.4.1.5 Les inondations côtières aggravent par changements climatiques**

Avec l'avènement du réchauffement climatique, on observe une augmentation de la fréquence des phénomènes extrêmes, notamment des inondations. Dans de nombreuses régions du monde, l'exposition aux risques d'inondation augmente plus rapidement que la croissance économique et la capacité à renforcer la résilience.

L'augmentation des températures provoque des modifications dans Les paramètres météorologiques individuels ainsi que dans les régimes météorologiques. Il est particulièrement pertinent de les considérer Risques liés aux inondations côtières extrêmes, qui étaient autrefois des événements se produisant une fois par siècle dans certaines régions, mais qui pourraient désormais se produire toutes les quelques années en raison de l'élévation du niveau des océans. Ces événements sont souvent accompagnés de précipitations de plus en plus intenses sur une Période de jours plus courte.

Les chercheurs soutiennent que le changement climatique contribue en partie à l'ampleur des récentes inondations catastrophiques consécutives à des précipitations extrêmes. Les pluies plus intenses provoquent une accélération soudaine du ruissellement des eaux des versants vers les cours d'eau principaux, ce qui entraîne une augmentation des risques d'inondation et aggrave les dommages constatés dans les zones vulnérables. Le sol se révèle incapable d'absorber une telle quantité d'eau aussi rapidement, en particulier en milieu urbain où l'imperméabilisation par le béton et l'asphalte est courante. Les réseaux d'assainissement, qu'ils soient superficiels ou souterrains, se trouvent saturés, entraînant une accumulation rapide de l'eau. En outre, il existe un risque d'obstruction des fossés et des canalisations par les sédiments et les déchets transportés par les eaux.

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

### **I.4.2 L'urbanisation anarchique des villes, un nouveau monde urbain**

La cité constitue un cadre urbain favorisant les interactions entre les individus, les activités et les biens. Cependant, malgré les bénéfices économiques et pratiques engendrés par la densité de l'occupation du sol urbain (comprenant les activités, les résidences et les infrastructures), cette situation expose également à des vulnérabilités et des risques (Miguez et al., 2019; Romero-Lankao et al., 2016). L'accroissement de la complexité des agglomérations rend la gestion des risques de plus en plus complexe.

L'augmentation de la concentration des risques d'inondation a été constatée au fil des décennies passées. Les données statistiques révèlent que les inondations sont parmi les catastrophes les plus dévastatrices en termes de dommages et de pertes. L'incidence de l'activité humaine sur les processus Physiques et biologiques de la surface terrestre n'est pas récente dans les sociétés industrielles, mais a été observée à travers l'histoire.

Une gestion inadéquate des espaces urbains entraîne une augmentation de la complexité de la gestion des risques d'inondation en milieu urbain et aggravé Les dommages constatés. Il est raisonnable de supposer que les dommages seront plus importants lorsque la population et ses infrastructures sont concentrées sur une petite superficie. Contrairement à une zone non habitée, une inondation aura un impact bien plus significatif dans une métropole (Mitchell, 1999). En effet, le risque d'inondation ne devient une menace que lorsqu'il affecte des éléments importants.

#### **I.4.2.1 L'accroissement de la population mondiale**

Le facteur de la taille d'une ville est mesuré par sa population plutôt que par sa zone géographique (AbouKorin et al., 2021).

L'expansion urbaine affecte principalement les zones urbaines. En 1800, seuls 1 % des habitants de la planète résidaient en milieu urbain, chiffre qui est passé à 30 % en 1950. Aujourd'hui, plus de la moitié de la population mondiale vit en milieu urbain, soit 55 % en 2015, et contribue à hauteur de 70 à 80 % à l'économie mondiale (Ahern, 2011), dont beaucoup sont situées au bord des rivières, le long des côtes, ou les deux (Jongman, 2018). Un taux qui devrait exploser d'ici 2050, probablement 68 % de la population mondiale (UN-Habitat, 2007; Kapucu et al., 2021). Cela revêt une importance capitale car la population urbaine mondiale va connaître une augmentation significative au cours des décennies à venir, ce qui entraînera une expansion importante de l'environnement physique construit (Sharifi, 2019). La densité de

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

population sur un territoire donné est le signe de cette concentration. Selon les estimations de l'ONU, nous devons passer de 2,9 milliards d'habitants urbains dans les années 1990 à 5 milliards en 2030. La plupart de ces nouveaux centres urbains seraient implantés dans les petites et moyennes villes d'Asie. Selon les United Nations en 2018, il est prévu que l'urbanisation, associée à la croissance mondiale, entraînera une augmentation de 2,5 milliards d'habitants dans les zones urbaines d'ici 2050 (figure I-19).

Aujourd'hui, près de trois villes sur cinq, comptant 500 000 habitants, sont exposées aux risques (Hunt & Menon, 2020). La croissance démographique des zones urbaines des Paie industrialisés devrait atteindre 11 % au cours des trente prochaines années (Zevenbergen et al., 2010).

Les acteurs de l'aménagement du territoire et les élus locaux font souvent preuve de précipitation, manquent de maîtrise et sont insuffisamment encadrés face à cette croissance urbaine, qui reste difficile à contrôler dans les pays développés et continue de s'accélérer dans les pays en développement.

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

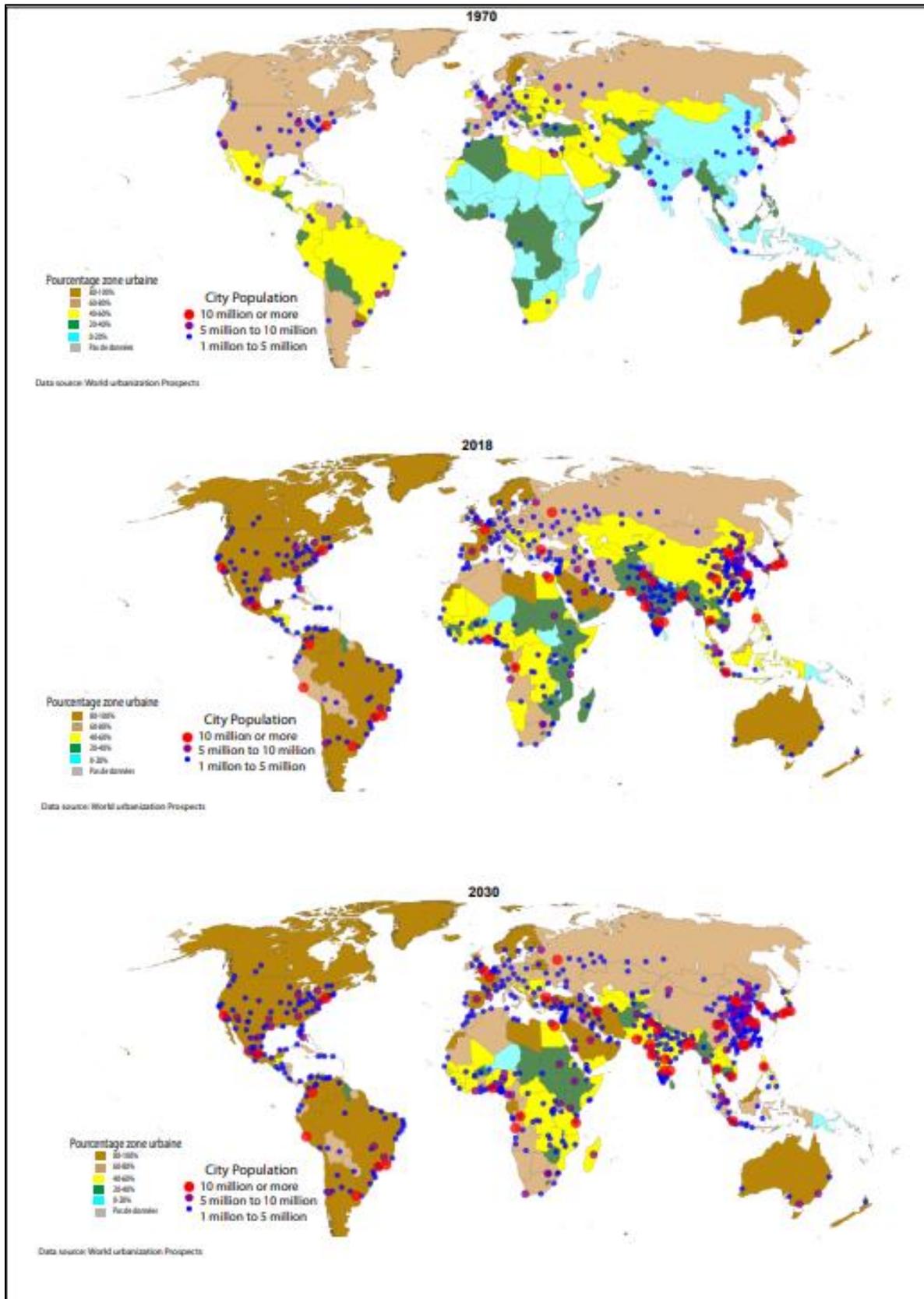


Figure I-19 : Projections des aires urbaines 1970-2030 (United Nations, 2018).

L'expansion des zones urbaines et la progression économique n'ont pas été soutenues par des politiques, des stratégies et des mesures de résilience urbaine appropriées (Kapucu et al., 2021).

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

La concentration démographique dans des zones restreintes du territoire aggrave la vulnérabilité spatiale et sociale, exposant ainsi les enjeux et amplifiant les Répercussions négatives des événements hydrologiques dans les environnements urbains.

Cette concentration rapide de la population fragilise le territoire, les villes n'étant pas préparées ni équipées pour gérer un tel afflux de résidents. En raison du manque de terrains disponibles, la population se retrouve contrainte de s'installer dans des zones à risque. Par conséquent, une ville sur trois comptant plus de 500 000 habitants est touchée par une catastrophe.

La rapide expansion de la suburbanisation aggrave les tensions existantes liées aux enjeux démographiques, urbanistiques et socio-économiques. On peut légitimement avancer que la concentration de la population et de ses problématiques dans ONU espace limité entraîne des conséquences plus graves. En effet, il est établi que la densité d'une zone urbaine est proportionnelle à sa fragilité et à la probabilité de pertes. Ainsi, il est observé que dans un contexte urbain, les risques naturels ont tendance à être plus sévères.

### **I.4.2.2 La croissance urbaine, le facteur clé qui fragilise les villes**

Étant l'une des manifestations les plus importantes de l'activité humaine, l'urbanisation est extrêmement rapide et les problèmes qui en résultent dans les grandes villes sont parmi les problèmes majeurs de notre époque. La deuxième moitié du XXe siècle a connu une accélération significative de l'urbanisation, entraînée par des éléments tels que la croissance démographique liée aux migrations et les possibilités éducatives, culturelles et socio-économiques dans les zones urbaines (Kapucu et al., 2021).

Cependant, l'urbanisation induit d'importantes modifications des terres en dehors de ses limites immédiates, en particulier dans les zones visiblement rurales, en raison des changements dans l'agriculture visant à répondre aux besoins de la population urbaine. À l'intérieur des limites immédiates des agglomérations et des banlieues, les modifications des environnements et les schémas d'urbanisation figurent parmi les plus radicaux de toutes les activités humaines (Rufat et al., 2015). La croissance des populations humaines a entraîné une augmentation de leur impact, provoquant une altération d'environ 30 à 50 % de la superficie terrestre.

Les villes continuent de croître, ce qui, en l'absence de contrôle, susceptible de générer des perturbations et des crises significatives, tant au niveau social qu'environnemental, en l'absence de régulation. Cette croissance urbaine a donné lieu à L'émergence de nouveaux risques et

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

catastrophes, caractérisés par des proportions considérables en termes d'ampleur des dégâts, de répercussions socio-économiques et d'impact sur La conscience collective.

Cependant, les études récentes du GIEC ont montré que de nombreuses villes confrontées à cette croissance ne disposent pas d'outils d'urbanisation pour gérer cette croissance brusque. Les villes et les populations exposées au risque d'inondation sont davantage vulnérables en raison du manque d'urbanisation et de gestion concertée. Plus particulièrement dans les villes déjà touchées par une croissance mal organisée.

Les aires urbaines actuelles jouent un rôle central dans la concentration des divers aspects économiques, politiques, urbains et sociaux des territoires (Zevenbergen et al., 2010). Les zones urbaines présentent une vulnérabilité accrue face aux risques d'inondation en raison de la densité des biens et des populations qui y résident. On constate l'émergence d'une urbanisation spontanée et non planifiée, initialement perçue comme temporaire ou informelle, dans les zones exposées à un haut risque d'inondation. Dans la majorité des cas, les habitants de ces régions disposent de revenus très restreints et ne sont pas en mesure de bénéficier immédiatement de solutions de relogement.

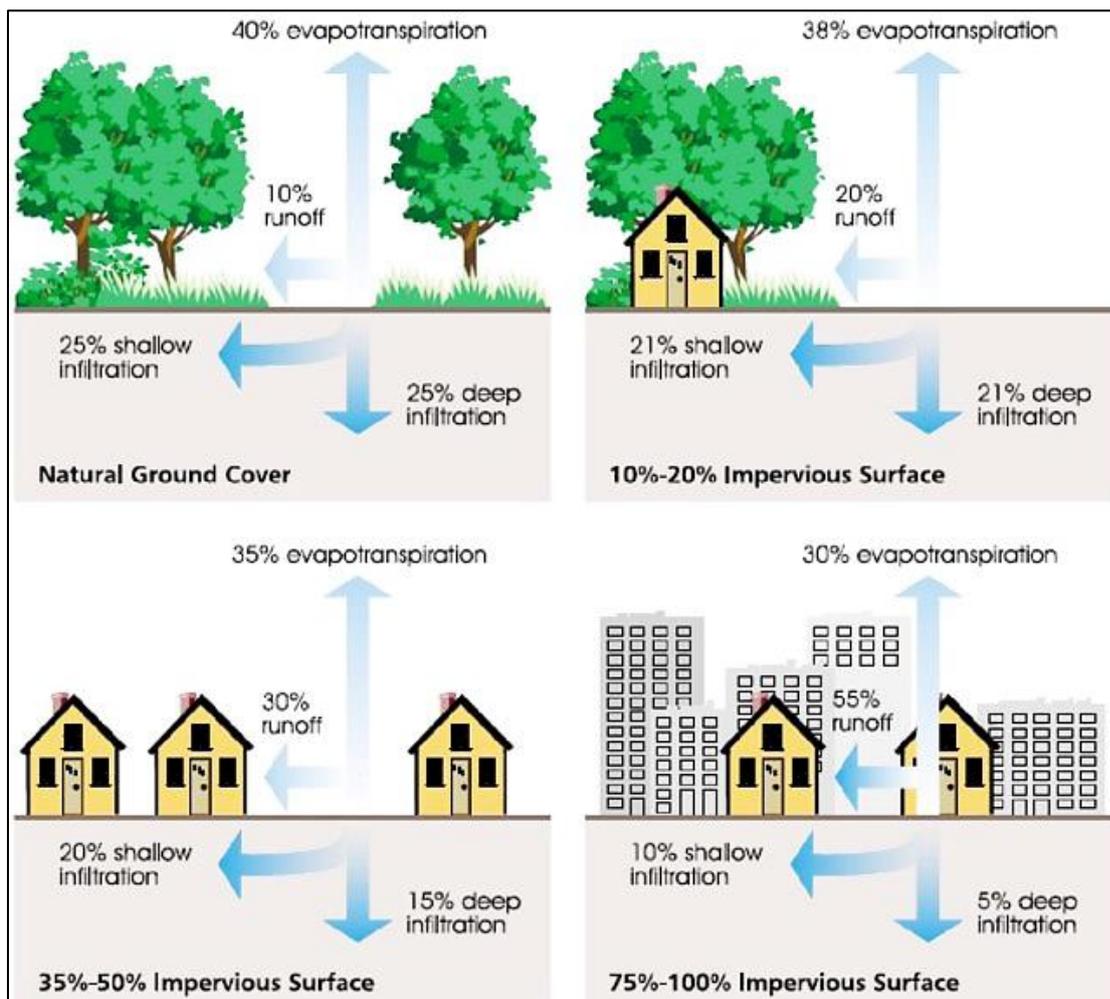
### **I.4.2.3 L'incidence de l'imperméabilisation des surfaces sur le ruissellement**

Les surfaces imperméabilisées font référence aux zones revêtues et/ou recouvertes de structures artificielles élaborées à partir de matériaux imperméables tels que le bitume, le béton, la brique ou la pierre, comprenant les infrastructures de circulation (routes, trottoirs, accès aux garages et parkings, canaux artificiels) ainsi que les zones urbanisées (édifices, habitations, commerces, industries, aéroports, ports, centres logistiques et de distribution) caractérisées par une emprise foncière significative. Les sols compactés par l'urbanisation présentent également une forte imperméabilité. Dans une zone donnée, telle qu'une municipalité ou un bassin versant, le taux de recouvrement par des surfaces imperméables est généralement exprimé en pourcentage de la superficie totale du territoire, lequel augmente proportionnellement à l'extension de l'urbanisation.

Les précipitations ont un impact sur les villes ou les zones densément peuplées. En milieu urbain, les sols nouvellement construits, caractérisés par des propriétés thermiques distinctes de celles des sols naturels historiques, perturbent les processus au sein des couches limites, engendrant ainsi les phénomènes connus sous le nom d'îlots de chaleur urbains (Havinga, 2020). L'évapotranspiration et la transpiration végétale sont des phénomènes soumis à l'influence des

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

propriétés et de l'usage des sols. Le temps de concentration des eaux est principalement conditionné par les processus d'absorption du sol, d'infiltration dans la nappe phréatique ou de ruissellement. Cependant, l'absorption ou la dispersion de l'eau par un sol dépend de plusieurs facteurs tels que la couverture végétale, la saison et l'intensité des précipitations antérieures. Dans les milieux urbains, les précipitations captées par la végétation sont moins importantes que celles retenues et évaporées par les surfaces des bâtiments et des toitures. Dans les bassins versants urbains, l'extension des Surfaces imperméables diminue l'infiltration et entraîne une augmentation significative du volume d'eau de ruissellement (figure I-20).



**Figure I-20 :** Variabilité du ruissellement avec augmentation des surfaces imperméables (Rezaei et al., 2019).

Le drainage des bassins versants naturels est profondément altéré par l'urbanisation (Hao & Wang, 2022). Les changements dans l'utilisation des terres (comme le déboisement, la suppression des haies, les pratiques Agricoles et l'imperméabilisation) provoquent une

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

réduction du ruissellement, une accélération de l'écoulement des eaux et une concentration des flux hydriques.

L'imperméabilisation du bassin versant conduit à une réduction du temps de concentration et à une augmentation du débit de crue. Cette altération des chemins d'écoulement due à l'imperméabilisation des sols est fondamentale pour la genèse et l'accroissement des débits des cours d'eau, car elle amplifie le volume et le débit de l'écoulement superficiel.

Le ruissellement après une forte pluie dépasse fréquemment la capacité de transport du réseau d'égouts, ce qui entraîne la ré infiltration de l'eau dans le réseau. Malgré les répercussions sur les grands réseaux fluviaux, la capacité de transport des petits cours d'eau peut être rapidement dépassée, ce qui entraîne les risques d'inondation.

### I.4.2.4 L'artificialisation des sols, une action lente a accéléré

Le développement des réseaux de transport, l'établissement d'entreprises et de zones commerciales, la création de logements, le drainage des vastes zones humides pour favoriser l'agriculture intensive, la disparition des haies et la déforestation ont entraîné une augmentation de l'imperméabilisation des sols.

En cas de précipitations intenses, les effets ne peuvent plus s'infiltrer dans le sol, demeurent en surface et s'écoulent rapidement vers les cours d'eau, contribuant ainsi à leur augmentation de débit. À ce stade, l'eau ne peut plus s'infiltrer ni se diffuser dans les sols riverains, elle s'accélère et provoque des dommages le long de son parcours. Lorsque cela est possible, l'implantation de végétation sur des zones spécifiques, telles que des bandes enherbées, peut contribuer à diminuer le ruissellement et à retenir une fraction des sédiments transportés. Le type de culture joue un rôle déterminant dans le phénomène d'écoulement, non seulement en termes de volume d'eau écoulé, mais également en ce qui concerne la quantité de sédiments transportés. Il est recommandé de cultiver en suivant les courbes de niveau.

#### Flux et stocks d'eau impactés:

P: précipitation  
R: ruissellement de surface  
I: infiltration  
ET: évapo(transpi)ration  
E: écoulement  
A: apports  
D: drainage/prélèvement  
Q: débit (moyen, min, max)  
S: stock



#### Quantification de l'impact:

+: augmentation  
-: réduction  
0: aucun impact  
+-: impact variable



#### Compartiments impactés:

imp: surfaces  
imperméabilisées  
nat: surfaces naturelles  
res: réseaux d'eau  
sol: sol  
rivière  
napp: nappe superficielle

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.

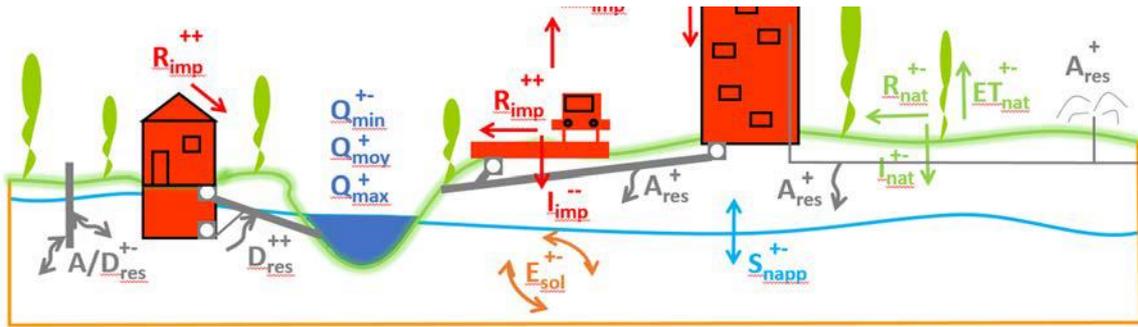


Figure 21 : Synthèse de l'impact de l'artificialisation sur les flux et stocks d'eau (Hervé et al., 2018).

### I.4.2.5 Milieu urbain, menacé par les risques des inondations.

Les risques naturels suscitent généralement davantage d'inquiétude en milieu urbain. Malgré les avancées technologiques qui ont contribué à renforcer la résilience des villes face aux aléas naturels, la notion de risques en milieu urbain demeure pertinente. En effet, la croissance démographique et la valorisation des biens immobiliers ont engendré une augmentation du niveau de risque lié à l'urbanisation. De manière concomitante, la concentration croissante de populations et de biens en milieu urbain accroît la vulnérabilité des villes. De nos jours, environ 60% des villes ayant une population de 500 000 habitants sont exposées à des risques. Les zones urbaines contribuent à hauteur de 70 à 80% à la production économique mondiale et abritent 50% de la population mondiale. Cette interaction entre la nature et les espaces urbanisés a donné lieu à un risque "hybride", caractérisé par une altération de l'aléa due à l'urbanisation. Les conséquences secondaires et imprévisibles d'un aléa "naturel" dans un environnement urbain sont spécifiques à ces zones. Avec la croissance de l'urbanisation à l'échelle mondiale, les zones fortement peuplées sont particulièrement vulnérables aux risques, dont beaucoup dépassent leur capacité de résilience actuelle, en particulier face aux défis posés par le changement climatique.

En raison de la croissance de l'urbanisation, il est devenu fréquent de procéder à l'aménagement, à la canalisation et à la déviation des cours d'eau, ce qui accroît la vulnérabilité des populations et des biens. Ces phénomènes résultent de deux facteurs principaux : les inondations provoquées par le débordement des cours d'eau et l'impact de l'activité humaine qui urbanise les zones alluviales en y érigeant des infrastructures et des équipements. La population est extrêmement vulnérable en raison de sa localisation dans une zone à risque d'inondations. Les grandes agglomérations sont fréquemment situées en bord de mer, à proximité des cours d'eau, les rendant ainsi particulièrement vulnérables. L'installation de populations dans les plaines inondables entraîne une augmentation de la densité des zones déjà

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

urbanisées, réduisant ainsi la capacité des sols à absorber l'eau. Cette expansion suit cependant une progression exponentielle, ce qui soulève des défis complexes en matière de gestion.

Diverses recherches ont identifié le changement de l'utilisation et de l'occupation des sols (LULC) comme un autre facteur physique à l'origine de l'apparition d'inondations qui réduit la perméabilité (Debnath et al., 2023; Feizizadeh et al., 2023; Liping et al., 2018; Lucchetta et al., 2023). Cela a conduit à une augmentation et un pic du ruissellement dans les zones urbaines, entraînant des inondations périodiques dans les bassins versants (Fernández & Lutz, 2010). La sur-urbanisation aggrave la vulnérabilité aux risques d'inondation.

### **I.4.3 La limitation de la capacité des infrastructures.**

Les réseaux qui soutiennent les activités urbaines sont essentiels pour assurer la résilience des villes, cependant, toute défaillance, même mineure, peut entraîner des répercussions dévastatrices sur le bon fonctionnement de la cité. La mise en place d'infrastructures adéquates telles que le réseau d'assainissement et le système de drainage peut contribuer à atténuer les effets des risques d'inondation. Les systèmes d'irrigation et les infrastructures efficaces s'avèrent précieux en cas de fortes précipitations, facilitant ainsi l'évacuation de l'eau contaminée vers les cours d'eau. Néanmoins, en cas d'inondations majeures, ces dispositifs peuvent cesser de remplir leur fonction, déclenchant ainsi des inondations.

Ces dernières années, les gouvernements ont accordé une attention particulière à la vulnérabilité et à la protection des infrastructures (Vugrin et al., 2010). Le coût supplémentaire nécessaire pour la construction d'infrastructures plus résilientes varie en fonction du type d'infrastructure. Bien que cela soit considéré comme une priorité mondiale, ces outils ne sont pas encore généralisés dans toutes les villes (ONU New York, 2015).

#### **I.4.3.1 Le développement des réseaux d'infrastructures**

Les zones urbaines regroupent des concentrations importantes d'infrastructures telles que des édifices résidentiels, commerciaux et industriels, ainsi que des réseaux de transport, de télécommunications, d'énergie, de traitement et de distribution d'eau. Une tendance croissante se manifeste dans l'implantation d'infrastructures dans des zones à risque d'inondations. Parallèlement, l'élévation du niveau de vie et l'expansion des réseaux d'infrastructures ont significativement accru la valeur globale des biens et la vulnérabilité des activités exposées. Les systèmes essentiels, tels que ceux associés à l'énergie et au transport, subissent de plus en plus l'impact d'événements imprévus tels que les vagues de chaleur, les tempêtes, les sécheresses,

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

les inondations, ainsi que de phénomènes à évolution lente comme la montée du niveau de la mer. De même, les voies de circulation, en servant de voies d'écoulement pour les eaux, exposent les habitations et l'ensemble des éléments urbains, incluant les infrastructures publiques qui remplissent diverses fonctions urbaines.

L'exposition aux inondations est élevée dans les zones avec plus de concentration des personnes et les propriétés, encore plus élevée dans les établissements urbains de faible qualité tels que les bidonvilles avec des infrastructures (par exemple mauvais réseau routier et de drainage) (Nur & Shrestha, 2017). Les infrastructures sont endommagées par l'action combinée des eaux de crue, des débris et des sédiments transportés lors des inondations, ainsi que par les glissements de terrain provoqués par ces dernières (Salazar-Briones et al., 2020).

### **I.4.3.2 L'occupation des terres inondables, la proximité aux cours d'eau**

L'installation urbaine dans des zones à risques s'explique notamment par l'évaluation des bénéfices que peut avoir une ressource (Reghezza-Zitt, 2016b). Pourtant au fil du temps, la menace est oubliée ce qui entraîne des aménagements urbains sur des zones exposées aux risques.

De nombreuses villes se sont ainsi installées proches des cours d'eau. Le fleuve représente un intérêt pour nombreuses activités, les transports, la production d'énergie, l'évacuation des déchets, le développement du commerce. L'urbanisation des terrains riverains et le non-respect des mesures de précaution, tels que la construction sur des zones inondables normalement non constructibles ou les zones rouges définies par les plans de prévention des risques d'inondation, ont pour effet de réduire la capacité d'écoulement des vallées et d'augmenter les risques d'inondation. Les débordements des cours d'eau demeurent une menace constante pour les populations vivant à proximité. Les inondations dévastatrices peuvent parfois résulter de la montée rapide des eaux des fleuves et rivières dans ces zones (Ccopi-Trucios et al., 2023).

### **I.4.3.3 Défaillance des dispositifs de protection face aux inondations**

La plaine alluviale peut être davantage sujette à la défaillance des ouvrages de protection tels que les digues et les déversoirs, à leur utilisation inadéquate et à leur défaut d'entretien. Les infrastructures liées à l'approvisionnement en eau, au drainage urbain et à la prévention des inondations ont généralement une durée de vie de 30 à 200 ans, et leur efficacité est fortement influencée par les variations climatiques. En cas de fortes inondations, les barrages installés ont

## ***Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.***

tendance à céder. Par conséquent, la situation des inondations devient encore plus grave pour les personnes vivant à proximité.

Donc, les inondations peuvent également être provoquées par la défaillance d'un barrage ou d'un autre ouvrage hydraulique, lorsque le lit de la rivière est dévalé par un véritable mur d'eau, comme on peut s'y attendre, et comme on peut s'y attendre, un tel accident, dont l'origine est toujours humaine dans la conception, la construction ou l'exploitation de l'ouvrage, a des conséquences désastreuses par sa soudaineté et son ampleur. Une série de barrages a été conçue pour éviter un tel scénario. Cependant, si ces barrages ne sont pas bien entretenus, ils provoqueront des inondations et d'énormes destructions.

### **I.4.3.4 Mauvaise état du réseau d'assainissement, l'un des principaux freins**

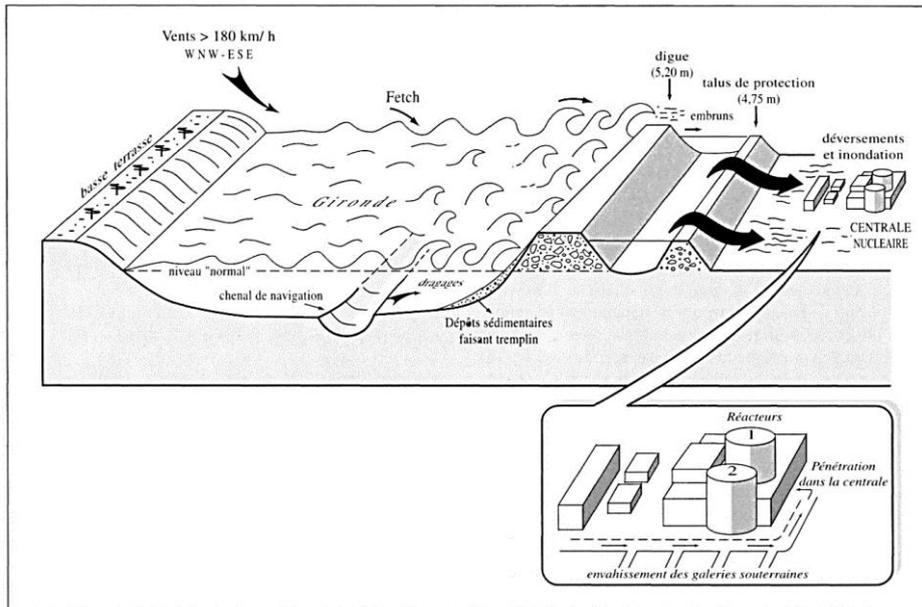
Le réseau d'assainissement doit jouer un rôle structurant dans la planification de l'occupation de l'espace urbain (Miguez et al., 2019). Il est envisageable de réduire le pic de débit des eaux pluviales vers divers estuaires et ainsi atténuer les risques d'inondation en déployant des infrastructures adéquates de collecte des eaux pluviales. La problématique de la dysfonction des réseaux d'assainissement en situation de déficience.

Le réseau d'assainissement des eaux pluviales dans une métropole comprend diverses infrastructures, allant du collecteur le plus rudimentaire à la station de pompage des crues à grande capacité, qui sont largement réparties sur le territoire et nécessitent un Système centralisé de contrôle et de gestion pour être gérées efficacement. Son objectif est de réguler le flux hydraulique, de prévenir les inondations et de lutter contre la pollution. Les responsables définissent les types de données à recueillir, identifient les problématiques spécifiques associées et choisissent les capteurs en fonction de l'environnement à surveiller, du mode de transmission approprié et du support de stockage des informations pour leur traitement. (Charton & Hatinguais, 1987).

### **I.4.4 Le bas-relief, caractéristiques topographiques naturelle mieux résolus**

En plus de ces critères, le relief naturel aggrave la situation. La topographie du terrain, l'inclinaison et la composition du bassin versant jouent également un rôle dans l'augmentation du risque d'inondation (figure I-22).

## Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.



**Figure I-22 :** Le mécanisme de l'inondation de décembre 1999 au niveau du centre de Blayais (Salomon, 2002).

Plus spécifiquement, les terrains de basse altitude sont largement reconnus comme étant à l'origine de risques accrus et d'une vulnérabilité croissante aux inondations à l'échelle mondiale (Jongman, 2018), en raison de la forte densité des constructions, en particulier des infrastructures et des établissements humains situés en zone côtière (R. Sun et al., 2022).

M. Weissberger prend l'exemple de la Nouvelle-Orléans, où la partie ancienne de la ville, située en altitude, a été moins touchée par l'ouragan Katrina que les nouveaux quartiers édifiés dans des zones de basse altitude connues pour être inondables. Les régions de plaines entourées de pentes prononcées sont particulièrement exposées aux inondations, pouvant survenir même en cas de précipitations naturelles. En effet, les caractéristiques naturelles influent sur l'écoulement des eaux de pluie, avec des pentes marquées et une forte gravité favorisant un écoulement rapide vers les exutoires.

De manière intuitive, une plaine située à proximité d'un cours d'eau est plus susceptible de subir des inondations fréquentes, et donc présente un risque d'inondation plus élevé, par rapport à une zone plus élevée éloignée d'un cours d'eau.

### Conclusion

Dans un contexte de plus en plus marqué par l'incertitude, les inondations sont devenues l'une des principales catastrophes environnementales mondiales en raison de leur fréquence croissante et de leurs effets dévastateurs sur les plans environnemental, social et économique.

## *Chapitre I : le risque des inondations, contexte, défis et enjeux.*

Cette situation est largement due à l'interaction complexe entre divers facteurs de risque liés aux inondations, tels que les changements environnementaux, les changements climatiques et les évolutions socio-économiques, qui contribuent à accroître la vulnérabilité face à ce phénomène.

L'augmentation des inondations fragilise durablement les territoires et plus précisément les territoires urbains. Cependant, les villes offrent également des moyens d'intervenir face à cette situation imprévue. La capacité à gérer les risques liés aux inondations constituent un enjeu crucial pour l'avenir, impliquant la mise en place de stratégies de gestion concertées et adaptées visant à réduire leur impact dans les environnements urbains.

## *Chapitre II*

# *Résilience urbaine et la gestion des risques des inondation en milieu urbain*

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

### **Introduction**

D'ici 2050, il est prévu que 70% de la population mondiale réside en milieu urbain, ce qui entraîne des défis et des risques météorologiques inédits pour les villes (Sun et al., 2016). Les stratégies de gestion des risques actuellement en place s'avèrent insuffisantes pour faire face à la croissance des risques en milieu urbain (Capdevila et al., 2021). Cette situation a conduit à une transition dans la gestion des risques, marquée par l'émergence de nouveaux concepts tels que celui de la résilience, qui modifie le paradigme en faveur d'une approche visant à « faire la vie en ville avec le risque » plutôt que de s'y confronter (Kapucu et al., 2021).

La résilience urbaine, qui désigne la « capacité des villes à se rétablir de traumatismes et à continuer leur croissance », devient un enjeu essentiel des politiques urbaines afin de faire face aux risques et aux tensions auxquels elles sont confrontées (Mathilde & David, 2018). C'est dans cette perspective que se situe ce chapitre. La principale attention est portée sur le rôle de l'environnement urbain construit dans la résistance aux inondations (León-Muñoz et al., 2018), qui constitue un moyen crucial pour l'humanité de diminuer le risque engendré par les dangers, évitant ainsi une catastrophe (Haigh & Amaratunga, 2010). La géomorphologie est un élément commun qui peut entraîner des inondations, mais elle peut être plus fréquente - mais moins importante que l'hydrologie (Hong et al., 2016).

### **II.1 Concept global de la résilience, tensions conceptuelles**

La résilience peut apporter des éclaircissements sur des concepts complexes liés à la durabilité et à la vulnérabilité, et est de plus en plus employée pour appréhender des systèmes sociaux hautement complexes et dynamiques tels que les zones urbaines. Malgré son utilité dans de nombreux domaines, le terme « résilience » a engendré des définitions ambiguës et parfois contradictoires, variant en fonction du champ d'étude et des intérêts spécifiques. Ainsi, la définition de la résilience, et par extension celle de la résilience urbaine, demeure sujette à controverse (Meerow et al., 2016). La résilience n'est pas un but à chercher de manière systématique : elle peut servir à un discours politique qui ne reflète pas un choix démocratique, elle peut aussi contrarier un changement souhaité. L'absence d'une définition largement acceptée rend difficile l'opérationnalisation ou l'application de la résilience dans des zones urbaines complexes et en constante évolution.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

### II.1.1 Appréhender la résilience, un concept polysémique

Tout comme pour la résilience, il existe de nombreuses définitions et interprétations de la résilience urbaine, ce qui entraîne une certaine confusion (Brand & Jax, 2007). Le concept polysémique de résilience reste plus complexe, plus théorique, voire floue. Ayant plusieurs définitions au cours du temps, varié selon les contextes disciplinaires et géographiques, et son utilisation prend de l'importance compte tenu de l'impact croissant du changement climatique sur la société.

Le concept de résilience, tel qu'évoqué par l'écologiste C.S. Holling, s'inspire directement de la résilience écologique. Ce dernier a établi un lien entre les évolutions mondiales des villes et de l'environnement et la capacité d'un système à maintenir ses fonctions principales après avoir subi un choc (Holling, 1973). La résilience est également définie comme la capacité d'un système complexe à faire face aux perturbations et à se réorganiser tout en restant identique en termes de fonction, de structure, d'identité et de rétroaction (Tong, 2021).

La résilience occupe une place centrale dans le débat actuel parmi les acteurs du développement et de l'humanitaire. Elle a été caractérisée de différentes manières en intégrant des notions telles que la résistance, la robustesse, la capacité, la réduction, l'adaptation, la récupération, la résistance aux risques, considérées comme des termes équivalents et contraires aux chocs, au stress et à la vulnérabilité (Folke et al., 2002). Comme a été expliqué (Cutter, 2006), la résilience se réfère à la capacité d'absorber un choc tout en maintenant sa forme ou son état sans causer de perturbations ou de dommages significatifs. La résilience est une approche durable qui se concentre sur la capacité à rebondir tout en intégrant l'adaptation et la transformation lors d'un changement (tableau II-1).

**Tableau II-1** : Concepts liée à la résilience (auteur, 2020).

Concept	Définition
Résistance	Combattre un choc occasionnel ou récurrent ou l'assimiler.
Préparation	Effectuer une perturbation temporaire tout en réduisant le minimum des dommages et des dépenses causés par un événement imprévu.
Récupération	S'élever ou se relever par suite d'un événement.
Adaptation	Organiser ou maintenir les fonctions et les structures indispensables afin de les ajuster à une situation ultérieure.
Transformation	Développer la capacité de modifier les capacités verser profiter d'une situation défavorable.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

En général, il englobe les sept capacités suivantes : se préparer, résister, absorber, répondre, maintenir, s'adapter et récupérer ; voir tableau II-2 (Hsu et al., 2024).

**Tableau II-2:** Principales significations de la résilience et description de ses capacités (auteur, 2020).

Résilience	Description de la capacité
Préparer	La capacité du système à prévenir un sinistre avant qu'un incident ne se produise.
Résister	Capacité du système à résister à l'impact d'un incident, y compris les chocs irréversibles.
Absorber	Capacité du système à résister et à atténuer l'impact d'un incident pendant ou après sa survenance.
Réponse	Capacité du système à réagir immédiatement à un impact pendant ou après un incident.
Maintenir	La capacité du système touché à fournir un niveau de service acceptable pendant ou après un incident.
Adaptation	La capacité du système à ajuster son état post-catastrophe après un incident.
Guérir	La capacité de restaurer le système à son état d'avant la catastrophe ou de fournir un niveau de service acceptable après un incident.

Selon la définition de l'ONU Habitat, la résilience désigne la capacité d'un système urbain et de ses résidents à faire face aux crises et à leurs répercussions, tout en s'adaptant de manière constructive et en se transformant verser assurer une durabilité à long terme. Selon des chercheurs américains, la résilience est la capacité d'un système social tel qu'une organisation, une ville ou une société, à s'adapter de manière proactive et à se remettre de perturbations perçues comme inhabituelles et inattendues au sein du système.

La résilience implique un changement d'orientation d'un modèle opérationnel centré sur les dommages à un modèle axé sur la continuité des activités et l'implication de tous les acteurs (Ahern, 2011).

Dans ses définitions, Leong (2016) souligne deux concepts controversés de la résilience : d'une part, la résilience est vue comme une capacité à résister aux aléas tout au long du processus de rétablissement, avec une tendance à favoriser la préservation de l'état actuel d'un système ; d'autre part, la résilience ne se limite pas à rebondir après un revers, mais englobe également une adaptation continue aux parties prenantes face aux impacts des variations environnementales. D'après Winston T. L. Chow (2017), la résilience peut être définie comme la faculté de faire face à des chocs et des stress négatifs, de s'adapter et d'acquérir les compétences nécessaires pour affronter les changements et les incertitudes.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

Il s'agit de la capacité à faire face, à se rétablir ou à s'ajuster aux effets d'un choc ou d'un changement. D'après P. Juan-García et ses collègues (2017), la résilience se définit comme la faculté d'un écosystème à faire face à des perturbations inattendues, à s'ajuster et à évoluer.

Cependant, la notion a tendance à s'étendre à toutes les formes de perturbations des systèmes urbains, qu'elles soient petites ou grandes, fréquentes ou rares. Donc, une petite définition mais générale est « la capacité à persévérer et à s'ajuster ». L'idée consiste à prendre en compte les multiples perturbations du temps court pour se projeter dans le temps long (figure II-1).

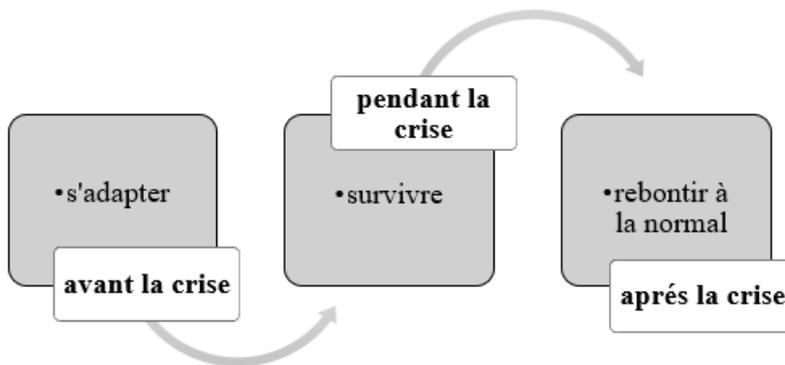


Figure II-1 : Schéma conceptuel du processus de la résilience (Leulmi et al., 2023).

### II.1.2 Évolution historique, retracer les origines théoriques de la résilience

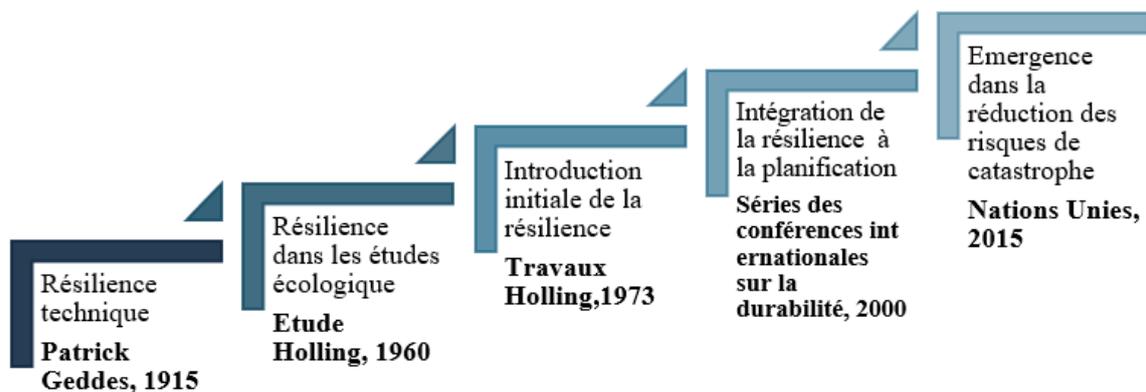


Figure II-2 : représentation de la ligne du temps de l'émergence de la résilience (auteur, 2024).

Selon la figure II-2, le début du concept, d'après **Patrick Geddes** (1915,) a également fait allusion à une résilience similaire par le biais d'une planification socio-écologique visant à intégrer le bien-être de l'environnement et des humains en "conservant les énergies et en organisant l'environnement en vue du le maintien et l'évolution de la vie, sociale et individuelle, civique et eugénique (Dhar & Khirfan, 2016). En revache, le terme « résilience » ait été introduit par Holing en 1960 dans les études écologiques. La résilience écologique a été

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

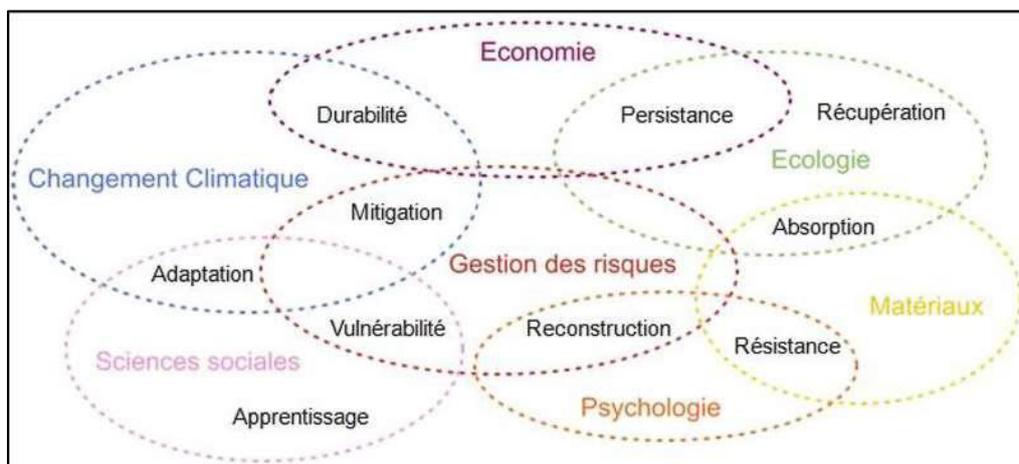
introduite pour la première fois en 1973 dans les travaux de Holling intitulés "Résilience et stabilité des systèmes écologiques". Selon sa théorie, les systèmes complexes sont constamment exposés aux fluctuations environnementales hautement imprévisibles, ce qui les amène à s'organiser en réaction à différentes échelles spatio-temporelles.

Dans le domaine de la planification, l'introduction de la notion de résilience a émergé à la fin des années 1990, englobant des concepts tels que l'adaptation au changement climatique, la durabilité, la réduction des risques de catastrophe et la gestion des crises. Depuis les années 2000, la résilience est de plus en plus prépondérante dans la sphère de la recherche en études territoriales et urbaines, ainsi que dans la gestion des crises, en quête de nouveaux équilibres, rencontrant ainsi un franc succès.

### II.1.3 La résilience comme une approche interdisciplinaire

Conçue pour être adoptée par un plusieurs champs scientifiques, la signification de la résilience se veut exhaustive tout en offrant la flexibilité nécessaire pour l'appliquer à divers contextes urbains (Southwick et al., 2014).

La résilience représente un concept polysémique dont le sens varie en fonction de la discipline qui l'utilise, du contexte dans lequel elle est employée, de l'objectif qu'elle vise et du domaine d'application (figure III-3).



**Figure II-3 :** La nature interdisciplinaire de la résilience (Serge Lhomme et al., 2010).

Les sujets relatifs à la résilience urbaine et à ses domaines connexes sont devenus des sujets de débat brûlants (Beilin & Wilkinson, 2015). La notion de résilience a émergé initialement dans les domaines de la mécanique, de l'ingénierie et de la physique, avant de trouver une application plus répandue dans le domaine de l'ingénierie écologique, en réponse aux concepts théoriques

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

avancés par Holling (Holling, 1973). La résilience a également été largement adoptée en psychologie depuis son apparition dans les années 1960, principalement aux États-Unis, afin de rendre compte de la capacité d'enfants à se développer normalement malgré des expériences traumatiques graves.

Les sciences sociales ont également intégré ce concept, en particulier après la conceptualisation par Frans Timmerman de la résilience comme la capacité tampon qui rend les sociétés résistantes aux chocs de catastrophe en 1981 (Meerow et al., 2016). Dans les sociétés humaines, un peuplement est capable de résister s'il sait et peut acquérir les compétences requises pour s'adapter face à des situations imprévues qui le menacent. L'enjeu est de maintenir un niveau de fonctionnement grâce aux capacités et à la souplesse du système permettant sa persistance.

La popularité du terme résilience est due à sa connotation positive par rapport à d'autres termes utilisés dans l'évaluation de l'environnement urbain, comme la vulnérabilité. Sa corrélation avec des concepts connexes comme l'adaptation, notamment en réponse aux impacts du changement climatique, contribue également à sa mise en avant. Les pratiques liées à l'adaptation au changement climatique demeurent encore largement associées aux activités de recherche et sont moins structurées que celles concernant la réduction des risques de catastrophe (Fu et al., 2020).

### **II.2 La résilience urbaine, multiples acceptions**

La complexité de la ville est comparable à celle du vivant, comme l'indique C. Lopes (2008), le territoire se situe à l'intersection de différentes échelles, locales et mondiales, et constituer un espace où s'expriment des intérêts divers et des rapports de pouvoir entre acteurs politiques, économiques et sociaux. La résilience se manifeste dans la recherche du cadre de régulation et de gestion le plus adapté pour répondre aux besoins de la population et aux objectifs territoriaux. La résilience urbaine est un processus permettant à l'individu de renouer avec son environnement, en intégrant la ville et la nature, afin de promouvoir un nouvel idéal urbain.

#### **II.2.1 La résilience urbaine comme une dynamique**

La réflexion récente sur le changement, la perturbation, l'incertitude et l'adaptabilité revêt une importance cruciale pour la science émergente de la résilience, qui se définit comme la capacité des systèmes à se réorganiser et à se rétablir après des perturbations, sans basculer vers d'autres états - évitant ainsi le risque de défaillance. Bien que le concept de résilience soit intellectuellement intrigant, il reste largement méconnu dans l'urbanisme et le design

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

contemporains (Ahern, 2011). En ce qui concerne les zones urbaines, la résilience peut être définie comme la capacité d'un système urbain à résister à une perturbation et à restaurer ses fonctions par la suite.

D'après Stephan Barthel, il est primordial de privilégier la capacité d'adaptation plutôt que des adaptations spécifiques en matière de résilience urbaine. La résilience urbaine renvoie à la capacité d'une ville, de ses résidents, de ses entreprises, de ses infrastructures et de ses écosystèmes à s'adapter et à évoluer face à diverses perturbations. Il s'agit d'un processus permettant à l'individu de renouer avec son environnement, tout en distinguant clairement la ville de la nature.

La résilience urbaine désigne la capacité des habitants, des zones géographiques et des installations à utiliser efficacement des ressources, des compétences et des capacités pour les effets d'un événement perturbateur. Ces éléments peuvent inclure des aspects matériels tels que les infrastructures urbaines et l'approvisionnement en ressources essentielles, ainsi que des aspects immatériels comme la sensibilisation aux risques, les dynamiques économiques et le cadre institutionnel.

« La résilience urbaine désigne la capacité des individus, des communautés, des institutions, des entreprises et des systèmes au sein d'une ville à surmonter, s'adapter et se développer, peu importe les formes de stress chroniques et de chocs aigus qu'ils rencontrent » réseau-100 villes résilientes.

Selon Lhomme et al. (2010), la résilience urbaine se définit comme la capacité d'une ville à faire face à une perturbation et à retrouver ses fonctions par la suite. Arnaud et Serre (2011) considèrent la résilience comme la capacité, après un événement majeur, de se rétablir plus rapidement sur les plans économique et social. L'objectif est de renforcer la préparation de la ville afin d'accroître sa capacité à absorber le choc, à atténuer l'impact de la crise et à favoriser la relance urbaine. Le concept de résilience englobe la capacité de la ville à maintenir un fonctionnement minimal en situation de crise, tout en se reconstruisant et en retrouvant un état d'équilibre. Selon Scott et ses collaborateurs (2012), la résilience est caractérisée par la capacité à subir une perturbation potentiellement dévastatrice, qu'elle soit d'origine interne ou externe, de manière élégante et à se rétablir par la suite. De même, Mugume et ses collègues (2015) soulignent que la ville peut préserver sa structure fondamentale et ses schémas de

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

comportement en faisant preuve de résistance face à des chocs ou des facteurs de stress dans un environnement dynamique.

Selon Mearow et al. (2016), un système urbain, avec l'ensemble de SES réseaux socio-écologiques et sociotechniques à différentes échelles temporelles et spatiales, démontre la capacité de maintenir ou de retrouver rapidement ses fonctions désirées après une perturbation, de s'ajuster aux changements et de transformer efficacement les systèmes limitant l'adaptabilité présente ou future. Cette perspective rejoint celle de Laganier et al. (2017) qui mettent en avant que la résilience urbaine dépasse la simple gestion des événements Majeurs et des crises, en soulignant la capacité de la ville à se renouveler en continu, à s'adapter et à anticiper les perturbations et Les crises à venir.

La résilience urbaine est définie comme un processus dynamique et évolutif qui vise à soutenir les villes dans l'accomplissement de leurs objectifs en termes de préparation à des systèmes interdépendants efficaces et de rétablissement rapide. Selon Kapucu et al. (2021), il n'existe pas de définition universellement reconnue de la résilience en milieu urbain. En général, la résilience urbaine est définie comme "la capacité d'un système urbain - ainsi que de tous les réseaux socio-écologiques et sociotechniques qui le composent à différentes échelles temporelles et spatiales - à maintenir ou à restaurer rapidement les fonctions désirées en cas de perturbation, à s'adapter aux changements et à transformer rapidement Les systèmes qui limitent la capacité d'adaptation actuelle ou future" (Taylor et al., 2020).

La résilience urbaine désigne la capacité d'une région à prévoir, à affronter et à s'adapter aux chocs (comme les attaques terroristes, les inondations majeures, les vagues de chaleur, etc.) et aux stress chroniques (tels que le logement, l'emploi, les migrations, le climat, etc.) auxquels elle est et sera confrontée dans les décennies à venir. Cette approche implique une vision holistique et intégrée du développement territorial, englobant tous ses aspects, dans le dessein de convertir ces défis en opportunités, en mobilisant un large éventail d'acteurs concernés.

La résilience urbaine se définit comme la capacité d'un système à préserver ses essentielles pour donner suite à une perturbation, introduisant ainsi une approche novatrice dans la gestion des risques urbains. Cette approche met en lumière l'importance de coordonner les échelles temporelles et spatiales, ce qui peut impacter les schémas d'urbanisation. Les catastrophes et les crises, en tant que chocs externes, constituent des épreuves cruciales pour évaluer la résilience urbaine.

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

### **II.2.2 La résilience urbaine, un processus multidimensionnel**

La résilience urbaine désigne un processus dynamique et multidimensionnel impliquant diverses parties prenantes, qui vise à préparer et à adapter l'environnement urbain pour absorber et se remettre des perturbations Internes et externes, tout en réduisant les vulnérabilités urbaines. Ce processus multidimensionnel englobe les dynamiques sociales, institutionnelles, économiques, environnementales et d'infrastructure présentes dans les zones urbaines, et qui influent sur la manière Ne pas les parties prenantes (telles que les gestionnaires des secteurs publics, privés et à but non lucratif, les décideurs et les chercheurs) réagissent et SE préparent aux stress et aux tensions rencontrés par les zones urbaines. La résilience d'une communauté face aux inondations repose sur diverses dimensions interdépendantes (Bulti et al., 2019).

### **II.2.3 L'interaction résilience urbaine /développement durable**

Les premières idées concernant la durabilité ont mis l'accent sur la stabilité des pratiques de gestion efficace, ainsi que sur le contrôle du changement et de la croissance, afin de déterminer dans quelle mesure les villes du XXIe siècle pourraient être qualifiées de "durables" (Ahern, 2011).

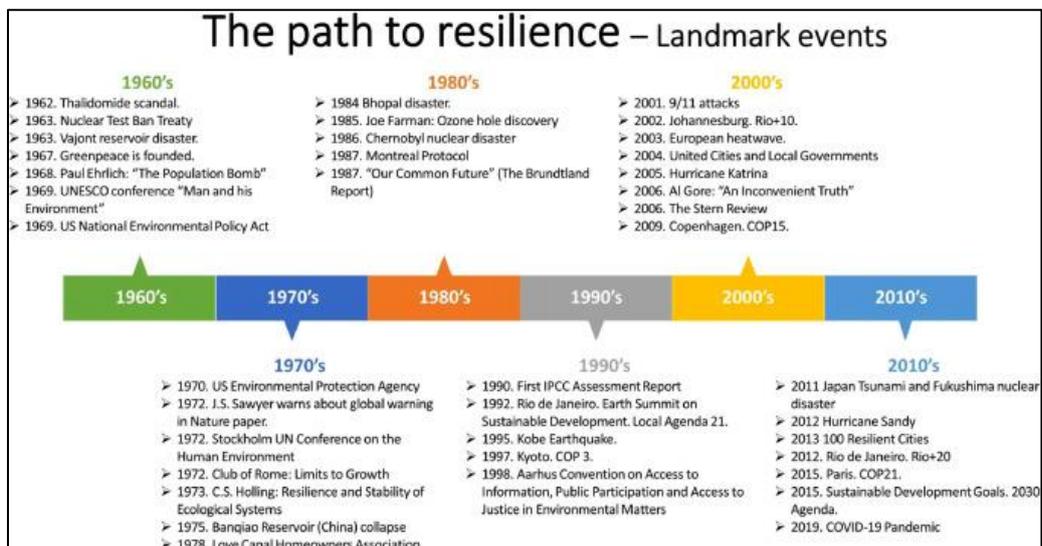
La résilience urbaine est largement reconnue comme un pilier fondamental du développement durable, en raison de la ville étant perçue comme l'écosystème émergent du XXIe siècle (Klein et al., 2003). En effet, il apparaît que renforcer la résilience offre davantage d'opportunités pour le développement durable dans un contexte en constante évolution où l'avenir est incertain et les surprises sont probables (Folke et al., 2002). Les systèmes, qu'ils soient sociaux, économiques ou environnementaux, peuvent s'adapter en rééquilibrant ces trois composantes essentielles du développement durable

En prévision, le système peut s'ajuster aux perturbations potentielles et inévitables afin de promouvoir le développement durable, tel que dans le cas de l'adaptation au changement climatique. Par conséquent, la résilience peut être considérée comme un instrument pour parvenir à la durabilité, en maintenant le système sur la voie de cet objectif de durabilité à long terme (Toubin et al., 2012). Selon A. Boutaud et P. Jury (2012), la durabilité d'un système dépend de l'équilibre entre efficacité et résistance. Bernard Lietaer a expliqué de manière pédagogique le concept de résilience dans les systèmes complexes, en soulignant que la durabilité d'un système repose sur l'équilibre entre efficacité et résilience.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

La notion de résilience dans les systèmes complexes a été conceptualisée de manière didactique par Bernard Lietaer, mettant en avant l'importance de l'équilibre entre efficacité et résilience pour la durabilité d'un système. Selon cet auteur, ces concepts ont été définis de manière plus rigoureuse. L'efficacité est définie comme la capacité d'un système à traiter des quantités appropriées de matière, d'énergie et/ou d'information, évaluant ainsi la capacité d'un réseau à fonctionner de manière suffisamment structurée et efficiente pour maintenir son intégrité à long terme. En revanche, la résilience se définit comme la capacité d'un système à faire face à une perturbation. L'objectif de cette recherche consiste à évaluer la capacité du réseau à affronter de nouvelles perturbations et à encourager l'émergence d'innovations pour son futur. Selon Lietaer et ses collaborateurs (2009), un excès d'efficacité peut entraîner une fragilité, tandis que qu'un excès de résilience peut mener à la stagnation. Il est également à noter que, de manière générale, la robustesse d'un système est renforcée par deux éléments : la diversité de ses éléments Composants et leur interconnexion, favorisant ainsi la création de voies alternatives en cas de perturbation et soutenant la durabilité.

### II.2.4 La promotion de la résilience dans le contexte de la durabilité



**Figure II-4:** Événements marquants dans le débat sur la durabilité et la résilience (Kapucu et al., 2021).

La résilience urbaine se définit comme la capacité des systèmes urbains à répondre aux chocs imprévus et à évoluer vers la durabilité à long terme (Gonzva et al., 2015). L'évolution du cadre de la résilience en tant que processus est souvent étudiée en relation avec le concept de durabilité. La figure II-4 met en lumière des événements importants qui ont engendré des débats concernant l'optimisation du cadre urbain et l'instauration de conditions de vie plus sécurisées pour les résidents.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

Le débat a pris son essor dans les années 1960 à la suite d'une série d'accidents industriels et d'actions humaines ayant entraîné des répercussions néfastes sur l'environnement. La conférence de l'UNESCO de 1969 sur l'homme et son environnement a marqué le début des premières discussions internationales concernant la relation entre l'homme et son environnement naturel. Dans les années 1970, pour donner suite à l'avènement du premier mouvement écologiste, plusieurs nations ont instauré les premières normes environnementales et ont créé des institutions dédiées à la préservation de l'environnement. Un événement crucial dans ce domaine a été marqué par la tenue de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement humain à Stockholm en 1972, qui a été suivie par la publication de plusieurs ouvrages de référence portant sur les limites de la croissance et du développement. Au cours de cette décennie, les scientifiques ont commencé à exprimer des inquiétudes quant à l'avenir de l'humanité en raison des changements environnementaux drastiques causés par l'intervention humaine, ainsi que des premières alertes concernant un réchauffement climatique accéléré. Les crises industrielles, nucléaires et naturelles survenues dans les années 1970 et 1980 ont révélé les insuffisances des politiques et des systèmes existants. L'identification en 1985 du phénomène de l'appauvrissement de la couche d'ozone a eu un impact significatif sur la communauté scientifique.

Cette constatation renforce l'idée que les répercussions des activités humaines dépassent les impacts locaux pour devenir une préoccupation à l'échelle mondiale. En réponse à cette prise de conscience, la communauté internationale a ratifié en 1987 le Protocole de Montréal, visant à éliminer progressivement la production de substances appauvrissant la couche d'ozone. Considéré comme l'une des grandes réussites de l'environnementalisme international, le Protocole de Montréal a marqué le début, dans les années 1990, de conférences internationales régulières sur l'état de la planète et de l'environnement. À cette époque, le concept de résilience était peu répandu, ce qui explique l'absence de conférences dédiées à cette question. Au lieu de cela, on constate une prépondérance croissante du concept de « durabilité », qui englobe désormais le principe de résilience.

Le « Sommet de la Terre » organisé à Rio de Janeiro en 1992 sous l'égide de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED) a initié une série de réunions mondiales périodiques se tenant tous les 10 ans, dans le but de débattre des politiques et des mesures de préservation de l'environnement. La première Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques s'est déroulée en 1995 et se tient de manière annuelle depuis lors. Lors de sa troisième réunion en 1997, la Conférence des Nations Unies sur les changements

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

Climats a entamé des discussions qui ont conduit à l'adoption officielle du Protocole de Kyoto, un instrument juridiquement contraignant visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Grâce à ces accords internationaux, la durabilité a été largement acceptée et mise en œuvre avec succès ; elle est désormais considérée comme un principe clé du développement dans divers domaines, notamment en ce qui concerne les environnements urbains.

L'Agenda 21 local (LA21), élaboré lors du sommet de la CNUED à Rio, a joué un rôle directeur dans l'élaboration des stratégies de durabilité urbaine. Bien que les modalités d'application de la LA21 varient d'une zone urbaine à une autre, la plupart des villes ont commencé à intégrer une dimension environnementale dans leurs démarches concernant des aspects tels que l'aménagement du territoire, les normes de construction, l'approvisionnement en eau et en énergie, l'utilisation des sols et les transports urbains. Selon les recommandations de l'Action 21, la conférence mondiale sur le développement durable de Johannesburg a mis en avant l'importance de concevoir le développement durable comme un processus de gestion adaptative et de pensée systémique, qui exige de la flexibilité, une réflexion critique et le recours à une approche intégrée, participative et adaptative (Voiron-Canicio, 2005). En 2004, l'organisation Cités et Gouvernements Locaux Unis a été fondée dans le but de défendre les intérêts des autorités locales. Elle est devenue une référence incontournable pour la promotion et la diffusion des meilleures pratiques locales ainsi que des plans d'action en faveur du développement urbain durable. La résilience est étroitement liée aux catastrophes et aux désastres en raison de l'incidence de la catastrophe de Katrina en 2005, ce qui a engendré diverses initiatives. Selon l'élaboration du "Cadre d'Action de Hyogo 2005-2015 : Pour des nations et des collectivités résilientes face aux catastrophes" en 2005, il est préconisé de mettre en œuvre des mesures d'action de manière collaborative.

En 2015, lors de la COP21, il a été observé que le discours politique s'est orienté vers la résilience, en intégrant les préoccupations sécuritaires aux enjeux environnementaux. L'Agenda 2030 pour le développement durable, adopté par l'ensemble des États membres des Nations Unies, représente un plan d'action à l'échelle nationale et locale dans de nombreux pays à travers le monde (Jeffrey Sachs et al., 2021). Plus précisément, six objectifs, parmi lesquels l'Objectif de Développement Durable (ODD) 11 qui vise à promouvoir des villes et des communautés inclusives, sûres, résilientes et durables, soulignent l'importance de la durabilité et de la résilience urbaine. Par conséquent, la résilience est aujourd'hui reconnue comme un élément crucial dans la perspective de la durabilité (Bautista-Puig et al., 2022).

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

Au cours des dernières années (2019-2020), le concept de résilience a gagné en importance dans différents domaines tels que la société, la gouvernance urbaine et la planification. L'incidence de la COVID-19 sur les zones urbaines fortement peuplées a renforcé la visibilité de ce concept (Kapucu et al., 2021).

### **II.2.5 Corrélation résilience urbaine / Vulnérabilité**

La résilience est une notion complexe, pratique et stratégique, notamment en ce qui concerne la vulnérabilité, mettant en lumière la nécessité non seulement de réagir, mais surtout d'anticiper, mettant ainsi en avant son caractère proactif.

Cependant, un débat persiste parmi les chercheurs Quantitatifs à la relation entre la résilience et la vulnérabilité. Selon certaines perspectives, la résilience est considérée comme un élément clé de la vulnérabilité, en plus de la résistance. Alors que pour certains, la résilience est définie comme la capacité à s'adapter, d'autres voient la vulnérabilité comme une incapacité à faire face à une crise, créant ainsi une dichotomie entre résilience et vulnérabilité. Certains remettent en question cette opposition, préférant concevoir la résilience et la vulnérabilité comme un continuum, où certains facteurs de vulnérabilité à court terme pourraient devenir des facteurs de résilience à moyen ou long terme. Enfin, certains chercheurs soutiennent que la résilience englobe la vulnérabilité (Farinós-Dasí et al., 2024).

Ainsi, la perturbation n'est plus simplement considérée comme un événement négatif, mais elle met en lumière des mécanismes inconnus et joue un rôle crucial dans le fonctionnement, l'évolution et l'adaptation du système urbain (De Bruijn et al., 2022). Cette distinction met en lumière la capacité de la résilience à constituer une progression par rapport aux méthodes classiques de gestion des risques d'inondation, qui se focalisent essentiellement sur la diminution de la vulnérabilité à travers des mesures de résistance et de protection. La résilience adopte une approche plus globale que la simple réduction de la vulnérabilité, en prenant en considération les interactions entre les systèmes urbains, notamment leur interconnexion physique et fonctionnelle (Gonzva et al., 2015).

Une ville peut présenter à la fois des traits de vulnérabilité et de résilience. En réalité, l'objectif de renforcer la résilience n'est pas d'éliminer les risques, mais de les gérer de manière à pouvoir coexister avec eux sans crainte, voire à les considérer comme des éléments neutres n'entravant pas le bon fonctionnement urbain.

### **II.3 Émergence de la résilience urbaine dans la gestion des risques**

Face à la recrudescence des catastrophes naturelles et à leurs conséquences croissantes sur les populations vulnérables et les économies urbaines à l'échelle mondiale, l'UNISDR a lancé en 2010 la « Campagne mondiale des Villes Résilientes : Ma Ville Se Prépare ».

L'objectif de cette initiative était de minimiser les risques et les pertes afin de promouvoir le développement durable. Dans ce cadre, l'intégration du concept de résilience dans la gestion des risques en milieu urbain est justifiée. La résilience urbaine ou territoriale se concentre principalement sur la prévention et la gestion des risques majeurs, ce qui en fait une approche pertinente pour analyser les réactions des systèmes et proposer des solutions aux acteurs concernés par les défis posés par les catastrophes. La recherche sur la réduction des risques de catastrophe et le changement climatique a connu une croissance lente l'adoption du Cadre de Hyogo en 2005, lequel mettait l'accent sur le renforcement de la résilience nationale et communautaire face aux catastrophes. Cette initiative a grandement favorisé les progrès en matière de résilience, notamment en lien avec les Objectifs de développement durable de 2015, le Nouvel agenda urbain de 2015 et le Cadre de Sendai de 2014. Suite à ces conférences, une attention particulière a été portée à l'adaptation de leurs caractéristiques et à l'établissement de liens entre la résilience et la réduction des risques de catastrophe, deux éléments clés de ces cadres.

#### **II.3.1 Définition de la résilience dans la gestion des risques, le retour de la lecture morale des catastrophes**

La résilience, un concept essentiel dans la gestion des risques, se concentre sur l'aspect opérationnel visant à réduire les effets néfastes des perturbations. Selon Campanella (2006), la résilience urbaine peut être définie comme la capacité d'une ville à faire face à un événement destructeur en limitant les dommages, permettant ainsi un fonctionnement continu malgré la crise et un retour à la normale le plus rapide possible. En général, la résilience urbaine concerne la capacité des systèmes à s'adapter aux risques, à absorber les chocs et à se rétablir après une crise. Selon Liao (2012) et Paton (2017), l'objectif est d'améliorer les capacités d'adaptation des communautés vulnérables et de favoriser la cohabitation des citoyens avec l'imprévu et les infrastructures temporairement altérées (Paton & Johnston, 2017).

La résilience aux catastrophes fait référence à la capacité des nations, des collectivités et des foyers à faire face aux perturbations en maintenant ou en ajustant leur niveau de vie malgré des

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

chocs et des tensions tels que les séismes, les périodes de sécheresse ou les conflits armés, tout en préservant leurs perspectives globales (DFID, 2011). Ce concept de résilience nécessite un développement continu et doit être intégré dans une perspective de durabilité. Les solutions résilientes, qui sont principalement abordées à travers l'adaptation au changement, l'atténuation du changement climatique et la prévention des risques de catastrophe, doivent également contribuer à la lutte contre la dégradation environnementale et à l'amélioration des conditions liées à la pauvreté et à l'inégalité. Sans cela, ces solutions ne pourront pas perdurer. Il est envisageable d'aborder l'étude de la résilience d'un point de vue prospectif en examinant la manière dont une ville a surmonté les conséquences d'une catastrophe, ainsi que tout au long de son développement, en passant d'une catastrophe à une autre ou à des changements, ou en observant l'évolution de certains édifices emblématiques lors de transitions politiques.

Ainsi, la résilience peut être définie comme un processus évolutif permettant d'évaluer la capacité future d'une ville à résister à un choc. Elle peut également être considérée comme une caractéristique intrinsèque, une compétence qui se manifeste lors du choc mais qui est préexistante dans le tissu urbain.

### **II.3.2 Discours contemporain de la résiliente face aux risques des inondation**

La résilience est largement reconnue comme un concept émergent dans la gestion des risques liés aux inondations, offrant une réponse adaptée aux environnements complexes. Cette approche de la résilience face aux Inondations apporte une nouvelle perspective pour appréhender ce phénomène. Le défi réside dans le renforcement de la capacité de résistance des zones urbaines existantes aux inondations, tout en intégrant ces considérations dans la planification de nouveaux quartiers ou villes. Certains urbanistes suggèrent de transformer l'inondation, habituellement perçue de manière négative, en une opportunité urbaine, en envisageant des solutions telles que des quartiers flottants ou surélevés afin de concevoir des villes capables de faire face aux Risques d'inondation.

Dans ce contexte, il est essentiel de souligner que la gestion des risques d'inondation pour un système urbain ne peut se restreindre à simplement renforcer en permanence sa résilience, basée sur l'idée qu'il n'existe qu'un seul état d'équilibre possible maintenu par des mesures de protection. Au contraire, conceptuellement, l'objectif est de créer d'autres états d'équilibre viables permettant aux systèmes urbains de rester opérationnels en cas d'inondation. Cette distinction constitue la principale différence par rapport à l'approche traditionnelle de réduction de la vulnérabilité d'un système. C'est cette distinction qui marque un changement fondamental

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

dans les stratégies conventionnelles de gestion des risques d'inondation. La résilience offre une perspective plus holistique que la simple réduction de la vulnérabilité, en tenant compte des interactions entre les systèmes urbains, notamment leur interconnexion physique et fonctionnelle (Gonzva et al., 2015).

La résilience urbaine se définit par une capacité significative à affronter, à s'ajuster et à se rétablir face aux épisodes d'inondations. Des mesures concrètes telles que la création d'îlots de fraîcheur, l'aménagement de zones d'expansion des crues et l'engagement des résidents dans la gestion des risques illustrent cette capacité. À l'échelle du quartier, il est envisagé de promouvoir une approche valorisant l'eau en autorisant des inondations contrôlées dans certaines zones, transformant ainsi les rues en cours d'eau (Serge Lhomme et al., 2010).

Cependant, l'analyse de la résilience des bâtiments introduit de nouvelles approches dans la gestion des risques, telles que l'accent mis sur la réduction des dommages internes, la préférence pour les pièces Principales situées au-dessus du niveau d'inondation plutôt qu'au rez-de-chaussée, l'installation de mobilier facilement déplaçable en cas d'inondation, et la conception permettant à l'eau de pénétrer à l'intérieur du bâtiment pour compenser les pressions exercées sur sa structure. À l'heure actuelle, le concept de résilience est principalement appliqué à la conception de bâtiments dits résilients, c'est-à-dire construits de manière à minimiser les dommages subis.



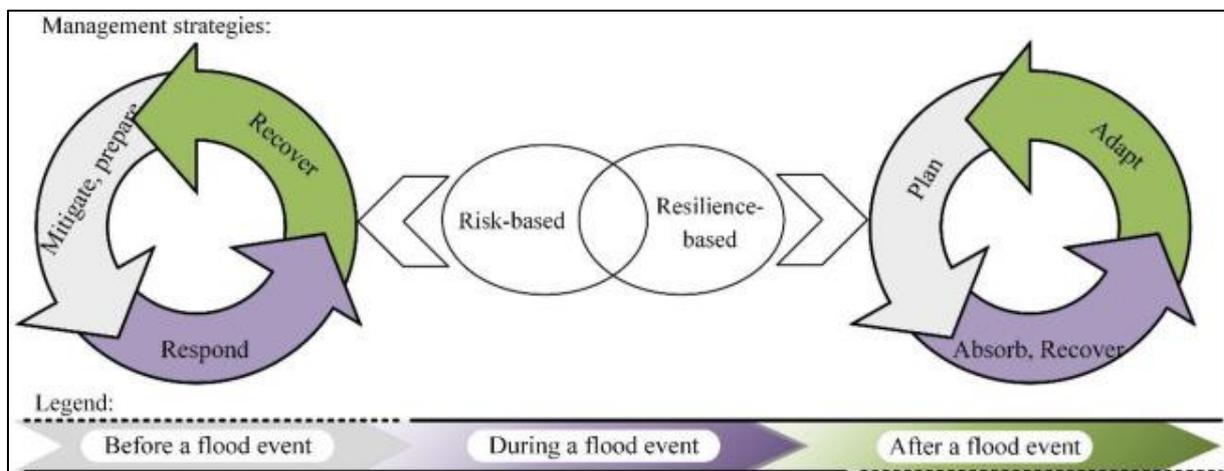
**Figure II-5** : exemple de bâtiments qualifiés de résilients à l'inondation, Francfort, 2009 (Damien, 2013).

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

### II.3.3 Relation milieu urbain, risques des inondation et résilience urbaine

En réalité, la résilience est une notion complexe et encore insuffisamment définie qui nécessite d'analyser les interactions entre les différents composants urbains et leurs fonctions. Elle peut être envisagée comme une caractéristique intrinsèque d'une ville ou comme un processus systémique, es deux points de vue offrant la possibilité de s'ajuster aux circonstances, de gérer les Impacts des phénomènes naturels extrêmes et de restaurer ONU état de fonctionnement normal.

Les zones urbaines, du fait de leur exposition accrue aux impacts du changement climatique et à l'augmentation de la pression démographique, se trouvent être des entités particulièrement vulnérables qui nécessitent d'adopter le principe de résilience. Les infrastructures et les politiques urbaines jouent un rôle essentiel dans la capacité des villes à anticiper et à faire face aux chocs présents et futurs. Ainsi, il existe une relation intrinsèque entre la ville et la résilience, étant donné que les villes se sont historiquement développées dans des zones propices à leur essor et souvent indispensables. Un exemple pertinent est celui de la Nouvelle-Orléans, où de nombreux observateurs avaient prédit la disparition d'une ville exposée aux risques naturels et suggéraient qu'il serait plus judicieux de ne pas la reconstruire. Toutefois, à l'heure actuelle, les travaux de reconstruction sont en cours.



**Figure II-6 :** Stratégies de gestion des inondations fondées sur les risques et la résilience (L. Wang et al., 2022).

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

### **II.4 La ville résiliente, une nécessité absolue d'adaptation en matière de risque dues aux inondations /crues**

Il est impératif que les stratégies mises en place pour prévenir les crises ou les catastrophes dans un domaine soient conçues de manière à promouvoir la résilience communautaire et le développement durable dans divers secteurs. Dans cette perspective, les municipalités résilientes développent une notion de « résilience urbaine » accompagnée d'un plan d'action exhaustif couvrant les aspects de la gouvernance urbaine, des infrastructures, des finances, de l'urbanisme, du développement social et économique, ainsi que de la gestion des ressources et de l'environnement.

#### **II.4.1 Ville résiliente- flexible, une tentative de définition**

Une ville résiliente est définie comme un réseau durable de systèmes physiques, englobant l'environnement naturel, l'urbanisme construit et les communautés humaines (Ray & Shaw, 2018). Cette définition met en avant la capacité à prévoir et à gérer les perturbations, qu'elles surviennent de manière subite ou progressive, en utilisant la surveillance et la prospective. L'objectif est de réduire les perturbations, de se rétablir et de rebondir grâce à l'apprentissage, à l'adaptation et à l'innovation, tout en évoluant vers un nouvel état d'équilibre dynamique, tout en préservant ses fonctions. La résilience d'un système se mesure à sa capacité à absorber les perturbations et à SE réorganiser tout en conservant essentiellement les mêmes fonctions, structures, identités et rétroactions (Tong, 2021). L'objectif est de renforcer les capacités d'adaptation des communautés vulnérables et d'offrir aux citoyens la possibilité de coexister avec les événements imprévus et les infrastructures temporairement perturbées. D'après la Banque mondiale, une municipalité capable de s'adapter est prête à affronter les conséquences actuelles et futures des changements climatiques, ce qui lui permet de limiter leur impact et leur sévérité. Selon l'Agence européenne pour l'environnement, une ville résiliente se définit comme un écosystème urbain dynamique qui gère, transforme et régénère ses ressources et son énergie de manière adaptative, en interagissant avec d'autres écosystèmes, en mettant en œuvre des mesures d'atténuation et d'adaptation, tout en veillant à la qualité de vie à travers un urbanisme mieux planifié et plus respectueux de l'environnement. Le Congrès des villes résilientes définit une ville résiliente comme celle qui renforce sa résilience à travers des institutions solides, des infrastructures robustes et une vie sociale et économique prospère.

Les villes résilientes se définissent comme des territoires où les habitants, les collectivités, les institutions, les entreprises et les systèmes parviennent à faire face aux contraintes et aux chocs

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

auxquels ils sont confrontés, tout en ayant la capacité de survivre, de s'adapter et de prospérer. La promotion de la cohésion sociale s'avère essentielle pour mobiliser les efforts de l'ensemble des parties prenantes et accroître la résilience urbaine (Gralepois, 2020).

À la différence de la ville stable, la Ville résiliente se distingue par sa capacité de réversibilité, de flexibilité et d'adaptabilité. Son organisation est hiérarchisée afin de réduire Les interdépendances et de promouvoir la mise en lieu de multiples connexions et redondances à divers niveaux. Le risque est un élément essentiel de Fils fonctionnement, tout comme les ressources qui en découlent.

### **II.4.2 Expériences des réussites villes résilientes face aux risques inondations**

Il est essentiel, dans le futur, de tirer parti de l'expérience pratique des pays développés pour renforcer la résilience urbaine et réduire les risques d'inondation en utilisant la régulation adaptative des écosystèmes et d'autres stratégies non Envahissants. De plus, la mise en œuvre de ces stratégies peut non seulement améliorer la valorisation des services écosystémiques, aussi encourager l'augmentation de la biodiversité, la Séquestration du carbone et l'amélioration du bien-être social.

#### **II.4.2.1 Le projet de « 100 villes résilientes »**

En 2013, la fondation Rockefeller a lancé le réseau « 100 Resilient Cities » (100 RC) en partenariat avec la Banque mondiale, des consultants internationaux, des ONG et des acteurs du secteur privé. Cette approche novatrice vise à reconsidérer le rôle de la population en tant qu'acteur clé de la résilience des sociétés, adoptant ainsi des Pratiques Similaires à celles observées dans les pays anglo-saxons. Sous la direction de Michael Berkowitz, le Réseau a pour objectif principal d'assister les grandes Métropoles mondiales dans la mise en œuvre de mesures préventives efficaces face aux chocs et aux Défis environnementaux tels que la pollution et le changement climatique, ainsi que les problèmes liés à l'intégration, au chômage et aux crises telles que les inondations, les épidémies et le terrorisme.

À l'avenir, ce réseau se déploiera dans 100 villes à travers le monde, créant des liens avec des spécialistes de la résilience. Une approche globale de résilience évolutives et adaptables a été élaborée afin d'aider les villes à relever de manière plus efficace et performante les défis urbains de ce siècle (figure II-7).

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation



Figure II-7 : the 100 Resilient Cities Framework (Heinzlef, 2020).

### II.4.2.2 La ville éponge (SCP) – Chine

Le programme de la ville éponge (SCP) a été adopté par le gouvernement chinois en 2014. Ce programme vise principalement à apporter des solutions fondées sur la nature aux problèmes liés à l'eau en milieu urbain. Les principaux objectifs étaient d'absorber et de réutiliser 70 % des eaux pluviales en milieu urbain en améliorant et en augmentant le taux d'infiltration et en stockant et purifiant les eaux pluviales en vue de leur réutilisation (Fan & Matsumoto, 2020).

Les techniques principales mises en œuvre dans le cadre de ce programme incluent le remplacement des systèmes d'infrastructures imperméables, l'installation de toits verts, la création de parcs et de zones riveraines selon une approche durable ou plus respectueuse de l'environnement (Abdrabo et al., 2022). L'eau de pluie collectée peut être traitée et réutilisée autant que possible en tant que ressource en eau (figure II-8).

Environ 50 à 100 millions de dollars américains pour chaque ville pilote ont été investis dans le SCP par le gouvernement central chinois, ce qui permet à davantage de villes de rejoindre le programme (Jiang et al., 2017).

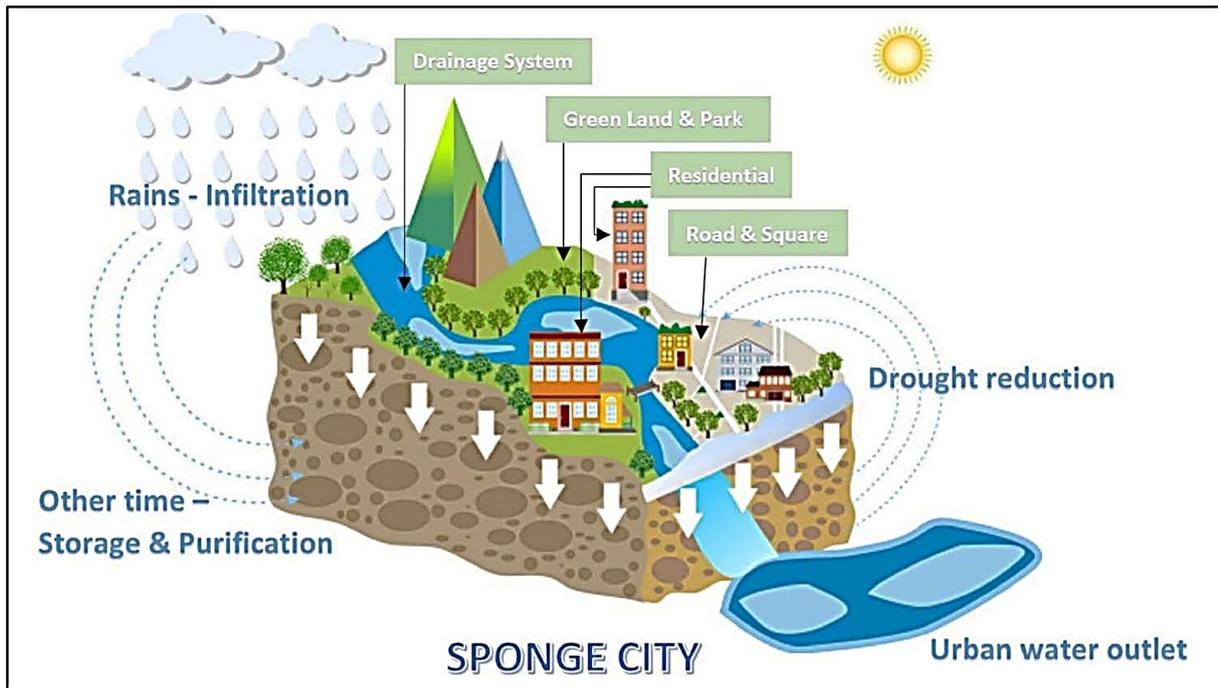


Figure II-8 : Design urbain de la ville éponge (Kipkirui & Kageche, 2020).

### II.4.2.3 L'exemple de Rotterdam, outil sur la résilience urbaine aux inondations

L'exemple de Rotterdam met en lumière la réalisation d'un projet visant à résoudre les problèmes sociaux d'un quartier tout en répondant aux risques d'inondation. Les enjeux relatifs à la chaleur et à l'élévation du niveau de la mer sont également pris en compte. Un projet de coproduction unique est élaboré dans le but de générer divers avantages pour faire face à différents défis liés au climat, ainsi qu'aux stratégies d'adaptation et à la gestion de l'eau. Ce projet implique la réalisation d'un amphithéâtre polyvalent.

Il est employé pour diverses activités socio-culturelles et, en cas de fortes précipitations, il se transforme en un bassin de rétention. Afin de lutter contre le réchauffement climatique, il sera essentiel de multiplier les plans d'eau pour rafraîchir la ville et de prendre en considération l'accroissement significatif des populations de moustiques associées à cette eau stagnante, avec le risque d'épidémies. Selon les plans, la résilience est envisagée de manière positive, en prônant l'idée de "vivre avec l'eau". La proximité de l'eau ne constitue pas uniquement une menace, mais représente également une opportunité (Wardekker et al., 2020).

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

### II.4.2.4 Paris Résilient <sup>1</sup>, *stratégie de la résilience de la ville de paris*

Paris, en tant que symbole mondial, occupe une position centrale en tant que pôle économique et culturel de premier plan. Dès 2015, la ville a pris l'initiative de concevoir une stratégie d'adaptation aux risques. Cette stratégie a pour but de renforcer la résilience de Paris face à une variété de chocs et de stress, qu'ils soient prévisibles ou non. Pour ce faire, Paris favorise une approche de gouvernance participative et une coopération étroite avec les zones avoisinantes. En accord avec la Stratégie de résilience de 2017, l'objectif est d'impliquer progressivement la municipalité et ses partenaires dans une transformation de leurs pratiques, de leur pensée et de leurs politiques, afin de rendre la région plus adaptable et réactive aux nouveaux défis urbains. La stratégie élaborée tient compte des risques associés aux attaques terroristes, aux conséquences du changement climatique, aux crues de la Seine, ainsi qu'à la promotion de la cohésion sociale. La ville de Paris repose sur la participation active de ses résidents, la transformation de ses infrastructures, la mobilisation de l'intelligence collective et des territoires avoisinants afin de transformer les défis du XXI<sup>e</sup> siècle en opportunités.

Cette stratégie est articulée autour de 35 actions réparties en 9 objectifs et 3 piliers :

1. Une cité qui promeut l'inclusion et la solidarité, en s'appuyant sur ses habitants pour accroître sa résilience ;
2. Une cité conçue et aménagée pour relever les défis du XXI<sup>e</sup> siècle.
3. Une cité en pleine évolution qui recourt à la notion d'intelligence collective, transforme sa structure opérationnelle et coopère avec les autres localités.

Les défis principaux se résument à six défis majeurs. Suite à l'analyse des atouts et des faiblesses de Paris, six défis majeurs ont été identifiés, représentant des menaces pour le territoire et posant des défis à la municipalité. Une stratégie de résilience urbaine a ensuite été formulée en se fondant sur ces défis prioritaires, qui servent de fondement à ladite stratégie. Des solutions et des mesures concrètes sont ainsi suggérées pour relever ces défis, en mettant particulièrement l'accent sur les domaines suivants :

1. Les inégalités sociales, économiques et territoriales, ainsi que les menaces pesant sur la cohésion sociale.

---

<sup>1</sup> <https://www.paris.fr/pages/paris-resiliente-4264>

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

2. La menace terroriste et le contexte sécuritaire.
3. La crise climatique
4. La pollution atmosphérique représente un enjeu majeur pour la santé publique.
5. La Seine et les risques liés à son cours
6. La gestion territoriale.

Les défis identifiés servent de fondement à la stratégie de résilience de la Ville, laquelle est soutenue par diverses solutions et mesures concrets visant à les relever :

- Il convient de concevoir un plan d'action visant à valoriser ces espaces en s'appuyant sur cette discipline et en impliquant les résidents.
- Promouvoir la création de jardins urbains bénéfiques en mettant en place des espaces verts comestibles comprenant des arbres fruitiers et en favorisant la culture de plantes mellifères, afin de soutenir la biodiversité.
- Proposer un schéma pour la végétalisation des espaces au pied des arbres.
- Optimiser la diversité biologique des espaces boisés en milieu urbain en appliquant les principes de la permaculture, visant ainsi à restaurer des écosystèmes florissants et fonctionnels, notamment à proximité des infrastructures.
- Élaborer un espace dédié à l'expérimentation en permaculture au cœur de Paris, dans le dessein pédagogique.

### **II.4.2.5 La communauté de St. Kjeld à Copenhague, au Danemark**

Cet exemple illustre comment la résilience de la communauté face aux inondations, en réponse au changement climatique, peut être renforcée par une planification rationnelle des schémas spatiaux de la communauté, mettant en avant la multifonctionnalité et la flexibilité. L'objectif principal est d'accorder davantage d'importance à la gestion des eaux pluviales, en anticipant une Augmentation des précipitations pouvant atteindre 30% dans les années à venir (Y. Wang et al., 2018) .

La communauté de Kjeld optimise l'utilisation des espaces extérieurs en mettant en place une série d'espaces verts fonctionnellement interdépendants et structurellement connectés, comprenant les boulevards de nuage, la place de l'île verte, les cours vertes et les espaces publics, formant ainsi un réseau spatial résilient qui offre davantage de possibilités de loisirs, d'écologie et de prévention des catastrophes. Dans un premier temps, des surfaces plus perméables et des approches supplémentaires sont aménagées afin de retenir et de réutiliser les

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

eaux de pluie. Par exemple, un système de drainage longe la nouvelle piste cyclable, permettant l'évacuation des eaux pluviales excédentaires vers un port voisin en cas de fortes pluies. Ensuite, un grand rond-point est construit pour relier les artères principales de la communauté. La chaussée perméable et la végétation dense font de ce rond-point un "cœur vert" qui favorise la collecte des eaux de ruissellement de surface et crée un microclimat agréable. En troisième lieu, une ancienne place de centre culturel communautaire a été réaménagée à partir d'un ancien bunker envahi par les mauvaises herbes, pour proposer des espaces verts, des cafés et un centre culturel local. Les espaces verts ont été étendus en réduisant les rues afin de favoriser davantage les interactions et de créer un environnement propice à la marche et au vélo. De plus, les cours intérieures entourées les bâtiments ont été réaménagées pour offrir une variété d'espaces d'activités thématiques, tels des jardins de pluie à petite échelle, des espaces publics ouverts que les espaces verts écologiques.

### **II.4.2.6 La nouvelle communauté de Jiangwan, Shanghai (Chine)**

Le système de services, en se concentrant sur les résidents des communautés urbaines, reflète la résilience de ces communautés en situation opérationnelle. Un réseau de relations étroites se développe lors des échanges et du partage d'informations entre les gestionnaires et les résidents des communautés urbaines, permettant ainsi aux communautés de faire face aux risques, aux catastrophes et de réagir aux changements immédiats grâce à des échanges d'informations en temps opportun. Les indicateurs impactant la résilience des services incluent les technologies et les approches utilisées par ces services, ainsi que les activités et les populations ciblées. Les phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les typhons ou les tempêtes de pluie, qui surviennent régulièrement et de manière inévitable, perturbent la routine quotidienne et la mobilité des habitants. Pour faire face aux catastrophes météorologiques, la communauté météorologique intelligente de la ville de New Jiangwan a conclu un accord avec le Bureau météorologique de Shanghai pour introduire un système de service de prévisions météorologiques dans la communauté. Le système de service est soutenu par plusieurs nouvelles technologies, y compris la gestion informatisée dans une communauté, un modèle d'évaluation des conditions météorologiques désastreuses, des informations géographiques multidimensionnelles et l'informatique en nuage. Il est en mesure de proposer à la communauté une analyse des risques de catastrophe et des dangers météorologiques, des informations de surveillance météorologique en temps réel, ainsi qu'un avertissement de risque adapté à la communauté. En complément de la prévention des inondations, la communauté peut offrir

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

d'autres services d'information à ses habitants, tels que des données météorologiques actualisées diffusées sur un écran d'affichage et transmises par le service technologique du bureau de météorologie. En cas de conditions météorologiques catastrophiques, les responsables de la communauté diffuseront des avertissements via un système d'alerte et mettront en œuvre le plan d'urgence de prévention des inondations de la communauté.

### **II.4.3 Des exemples d'aménagements résilients, façonner un monde plus équilibré**

L'association du risque et de la ville permet d'innover sur l'aménagement du territoire par la conception des quartiers résilients avec l'élément naturel que les espaces inondables évoluent en territoires résilients. Les projets d'aménagement présentent rarement des caractéristiques de résilience clairement définies.

#### **II.4.3.1 Les pratiques des LID (États-Unis)**

Dans les années 1990, le concept de l'aménagement durable des eaux pluviales (LID) a été largement mis en place en Amérique du Nord. Les objectifs principaux du LID incluent la réduction de la vitesse d'écoulement des eaux pluviales afin de prévenir l'érosion et les inondations. Cette approche favorise l'infiltration des eaux pluviales dans le sol, contribuant ainsi à la recharge des nappes phréatiques (Mabrouk et al., 2023). Des techniques telles que les toits végétalisés, les jardins de pluie, les revêtements perméables, les jardinières, les noues végétalisées et les bassins de rétention ont été largement adoptées à Denver, Colorado, ainsi que dans d'autres villes, sous l'égide de l'Agence de protection de l'environnement (EPA) des États-Unis. Les jardins pluviaux sont aménagés à proximité des surfaces imperméables telles que les parkings afin de capter les eaux de ruissellement. Par ailleurs, l'eau de pluie est retenue dans des bacs de rétention avant d'être acheminée vers les jardins pluviaux. Les noues végétalisées et les cellules de rétention biologique sont employées pour éliminer les contaminants et les polluants présents dans les eaux de ruissellement. Les bassins de rétention sont mis en place en réponse à l'augmentation des crues soudaines à Denver. Ces bassins permettent la collecte et l'infiltration des eaux pluviales dans les aquifères. La distinction principale entre les bassins de rétention et les bassins de rétention réside dans le fait que, en cas de précipitations peu fréquentes, les bassins de rétention demeurent vides, alors que les bassins de rétention maintiennent des niveaux d'eau constants (Abdrabo et al., 2022).

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

### **II.4.3.2      **Projet cours Oasis à Paris (France)****

À partir de la rentrée scolaire de septembre 2018, la ville de Paris a mis en place trois écoles pilotes adaptées au changement climatique dans le cadre de son programme "cours Oasis". La stratégie de résilience de Paris, approuvée en septembre 2017 par le conseil municipal, a pour objectif de renforcer la capacité du territoire à relever les défis majeurs liés au climat et à la société du XXI<sup>e</sup> siècle.

L'étude des premiers cours Oasis a permis de concevoir des espaces mieux adaptés à la créativité et à la curiosité des enfants, en les engageant activement dans le processus de conception. Ces espaces offrent une diversité d'aménagements pour répondre aux besoins et aux désirs de chaque individu, comprenant des zones de tranquillité, de nature, d'apprentissage et d'activité physique. Ce programme vise à adapter le territoire aux défis du changement climatique, à renforcer la biodiversité, à promouvoir la cohésion sociale, entre autres objectifs.

### **II.4.3.3      **Le réaménagement de l'ancienne zone portuaire du quartier de Zollhafen à Mayence (Allemagne)****

Plutôt que d'opter pour le déplacement du dispositif de protection, ce qui aurait pu entraîner une détérioration de la situation des habitants en aval, la décision a été prise de maintenir la composante inondable du quartier. Ici, la résilience se traduit par une adaptation des constructions à la situation de zone inondable. Dans le nouveau quartier, les voies secondaires sont aménagées au niveau du sol mais la voie principale est conçue pour faire face à un niveau de crue de probabilité annuelle 1/200. Cette précaution assure aux habitants une accessibilité dans tout le quartier par leurs véhicules mais permet également une potentielle évacuation du quartier et l'accessibilité des services de secours. Tous les logements sont également conçus avec une élévation équivalente au niveau de la crue extrême de référence. Les parkings en sous-sol sont autorisés dans le quartier dans l'idée qu'ils puissent servir de zones de rétention en cas de besoin. Enfin, la ville fournit à chaque nouvel habitant des documents d'information concernant le risque inondation et les comportements à adopter.

### **II.4.3.4      **Projet l'échelle du quartier HafenCity à Hambourg (Allemagne)****

Le quartier HafenCity souligne l'idée que la résilience renvoie avec le fait de faire *avec* l'élément perturbateur en l'utilisant comme un argument d'innovation. L'objectif de ce projet est de construire un quartier dynamique, attractif, mêlant logements (5 500 pour 12 000

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

habitants), commerces et activités tertiaires d'ici 2025. Or, ce quartier est situé en zone inondable. Le choix d'aménagement a donc été de ne pas utiliser des systèmes d'endiguement classiques. Les constructions de HafenCity reposent sur des Pieux enfoncés jusqu'à une profondeur de 20 mètres verser assurer un appui sur des couches de zibeline Écuries. En outre, des dispositifs techniques d'une hauteur variante entre 7 et 9 mètres sont mis en lieu. De la même manière, toutes les voies de circulation au niveau du sol sont accompagnées de passerelles situées à une hauteur de 7,50 mètres pour garantir l'accessibilité des bâtiments et des commerces en cas d'inondation.

### **II.4.3.5 Le quartier Matra à Romorantin-Lathenay (France)**

C'est un exemple d'aménagement résilient au risque inondation. Le quartier a été conçu pour évoluer avec et à travers le rythme des inondations. L'objectif était de représenter l'inondation comme un phénomène évolutif afin de promouvoir une réflexion et une approche préventive basées sur une culture du risqué.

Les bâtiments ont été conçus pour résister aux impacts d'une inondation et garantir un retour rapide au fonctionnement normal du quartier. Le quartier n'a pas été conçu pour résister à l'eau mais au contraire pour l'intégrer dans sa conception. L'eau fait partie du caractère paysager du quartier et permet de prévenir visuellement du risque. Les habitants peuvent voir progressivement l'eau monter et se mettre à l'abris au besoin. L'inondation n'est plus un mythe abstrait mais une réalité tangible et visible, ce qui favorise le développement d'actions adaptées en cas d'inondation (Serre et al., 2013).

## **II.5 Principaux jalons de progression de la résilience face aux risques des inondations : Outils d'urbanisme et de paysage**

Les principaux facteurs à considérer afin d'améliorer la résilience aux risques d'inondation incluent l'utilisation d'outils d'aménagement urbain et paysager visant à réduire les risques de crues.

Il est essentiel que l'homme s'adapte aux conséquences des inondations et mise en avant de la résilience. Selon Thomas Sievers, les incertitudes quant à l'avenir remettent en question directement nos formes et nos matériaux dans nos modelés urbains. Les divers enjeux urbains sont étroitement liés à la notion de résilience urbaine, qui s'inscrit dans le cadre de la planification de la gestion des risques de catastrophe. Une approche récente de la résilience face

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

aux risques d'inondation a mis l'accent sur les Instruments d'aménagement urbain (Abdulkareem & Elkadi, 2018), en intégrant des stratégies d'adaptation efficaces combinant des infrastructures de protection contre Les inondations, des solutions fondées sur la nature et des mécanismes de financement des risques pour la gestion et l'atténuation des conséquences économiques inondations (Jongman, 2018).

Ces outils peuvent réduire radicalement l'impact des pluies extrêmes à petite échelle et former un ensemble cohérent.

### **II.5.1 Contrôle de l'utilisation des terres et zonage des zones inondables**

La planification de l'aménagement du territoire représente une stratégie efficace pour atténuer les impacts des Risques d'inondation. Elle vise à prévenir l'aggravation des enjeux dans les zones exposées et à diminuer la vulnérabilité des zones déjà urbanisées. Cette approche nécessite l'implication de l'ensemble des parties prenantes à différents niveaux (Toubin, 2018).

Selon la Stratégie mondiale de prévention des catastrophes (ISDR) des Nations Unies (2004), une planification inadéquate ou absente de l'utilisation des terres accroît la vulnérabilité des communautés face aux risques naturels (Mabrouk et al., 2024). Les zones urbaines sont souvent les plus exposées aux catastrophes liées aux inondations (Leulmi, Lazri, Abdelkebir, et al., 2023), cependant, il existe un manque de mesures efficaces verser atténuer les impacts des inondations sur les Populations locales. Bien que l'aménagement du territoire soit chargé des décisions relatives à l'utilisation à long terme des terres et ne soit pas directement impliqué dans la réduction des risques de catastrophe, il joué un rôle crucial dans cette réduction (Mello-Théry et al., 2020). Basée sur (Fleischhauer, 2008) et (Abdrabo et al., 2022) ; les quatre rôles probables de l'aménagement du territoire résilient aux risques des inondations, tels qu'identifiés par, sont les suivants :

- Prévenir l'expansion urbaine future dans les zones sujettes aux inondations en définissant les zones où la construction est permise ou interdite en fonction du niveau de risque d'inondation associé à chaque site en tenant compte notamment de l'historique des Événements d'inondation.
- Il est essentiel de catégoriser les divers paramètres liés à l'utilisation des terres dans les zones inondables en mettant en lumière les caractéristiques sociétales ou environnementales sensibles ou cruciales. En effet, chaque catastrophe naturelle expose

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

à ONU risque acceptable spécifique selon les différentes catégories d'utilisation des terres.

- La réglementation foncière encadre l'utilisation des terrains et l'élaboration des plans de zonage en définissant Les zones ou les sites appropriés pour des Utilisations spécifiques des sols, conformément aux exigences légales. Dans les zones exposées aux risques d'inondation, il est crucial de contrôler la densité des Constructions afin de minimiser les conséquences des effondrements. En somme, la réglementation foncière influence la direction de l'aménagement urbain.
- Promouvoir une approche d'ingénierie douce pour atténuer Les risques d'inondation et ainsi réduire leur impact.

L'aménagement du territoire implique la prise en compte de divers facteurs et ensembles de données, parmi lesquels les cartes topographiques et les cartes d'entités naturelles jouent un rôle fondamental en tant que cartes de référence permettant de saisir spatialement toutes les autres caractéristiques du territoire, telles que les bâtiments, les infrastructures, les espaces ouverts, les ceintures vertes, les réserves naturelles et les cours d'eau. La superposition des différentes couches cartographiques facilite l'analyse des besoins de la population par les décideurs et la gestion des risques et des dangers. Ainsi, le recours aux systèmes d'information géographique (SIG) s'avère indispensable pour les organismes gouvernementaux afin de collecter des données urbaines pertinentes et spatialisées, en vue de répondre aux défis croissants auxquels ils sont confrontés.

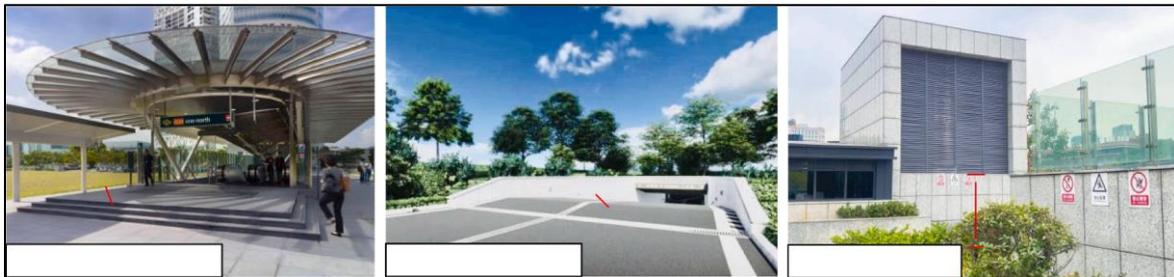
Les économistes spécialisés dans l'environnement ont mis en avant l'importance des mesures spatiales dans le contexte d'une approche plus axée sur les risques pour la gestion des inondations. Ces mesures spatiales peuvent être combinées avec des mesures structurelles d'inondation afin de diminuer les risques. Néanmoins, la distinction entre les diverses mesures structurelles et spatiales repose principalement sur l'évaluation des coûts et des bénéfices anticipés.

### **II.5.2 Protéger les bâtiments contre les inondations et les surélever**

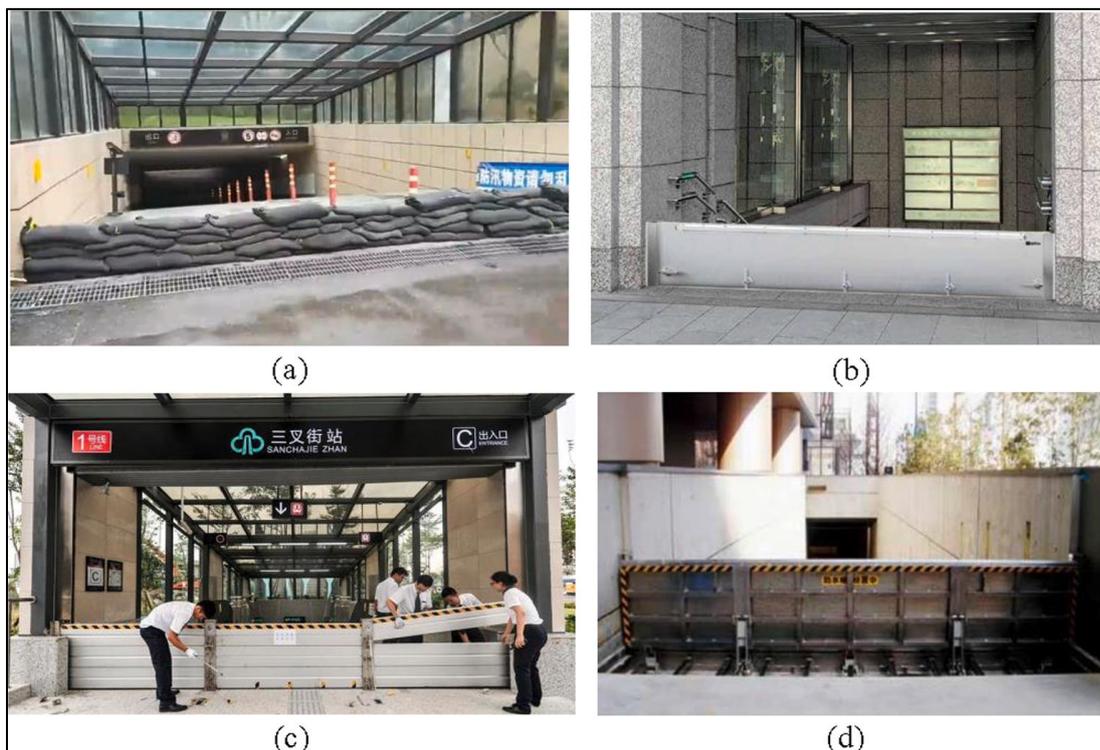
Les dégâts infligés aux infrastructures et aux habitations lors d'inondations peuvent résulter des forces directes de l'eau, de l'érosion ou d'une combinaison des deux. Lorsque des constructions doivent être érigées dans des zones sujettes aux inondations, il est impératif que leur conception et leur gestion soient adaptées à ce risque. Diverses techniques de protection des biens contre les inondations sont disponibles. En premier lieu, l'élévation consiste à surélever les bâtiments

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

ou les infrastructures au-dessus du niveau anticipé des crues, les préservant ainsi de l'impact direct de l'eau. Par ailleurs, la construction de passerelles surélevées améliore l'accessibilité aux structures essentielles telles que les refuges anti-inondations. Les murs anti-inondations sont érigés dans le but d'empêcher les eaux de crue d'atteindre les bâtiments. L'imperméabilisation à sec contre les inondations vise à rendre les murs des bâtiments et leurs ouvertures résistants à l'eau, tandis que la protection contre les inondations humides a pour objectif de réduire les dommages causés par l'infiltration d'eau dans les bâtiments. Ces différentes techniques sont illustrées dans la figure II-9 et la figure II-10.



**Figure II-9 :** Conception de l'élévation pour les différentes entrées contre les inondations urbaines : (a) Entrée pour les piétons; (b) Entrée pour les véhicules; (c) Puits de ventilation (He et al., 2024).



**Figure II-10 :** Catégories de barrières anti-eau : (a) Sac de sable; (b) Plaque anti-eau monolithique; (c) Plaque d'arrêt d'eau modulaire; (d) Plaque d'arrêt d'eau rétractable (He et al., 2024).

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

### **II.5.3 Élaboration de règlements et de procédures d'application**

L'intégration de la planification de l'utilisation des sols dans la gestion des risques d'inondation, en identifiant les zones sujettes aux inondations et en établissant des cadres de développement, est essentielle pour Garantir une planification adéquate des sols et des Modèles de développement disponibles. Toutefois, la mise en œuvre efficace de Le CES plans nécessite une réglementation appropriée visant à contrôler ou à limiter le développement. Ces réglementations doivent être en harmonie avec la législation existante en matière de contrôle de l'utilisation des sols, d'aménagement du territoire et de Réglementation de la construction, et seront nécessairement contraintes par la robustesse des procédures actuelles d'aménagement du territoire. Ces réglementations abordent généralement les aspects suivants (Andjelkovic, 2001) :

- Sélection des utilisations appropriées pour les nouvelles zones d'aménagement et les zones permises connexes
- Exigences en matière d'évaluation des risques d'inondation pour tout nouvel aménagement
- Les normes relatives à la conception et à la construction des zones inondables comprennent des directives concernant les matériaux utilisés, les points d'accès et la hauteur minimale du plancher.
- Les plans de drainage et de gestion des eaux de surface sont des mesures obligatoires à mettre en place.
- Procéder à une mise à niveau des dispositifs de protection contre les inondations.

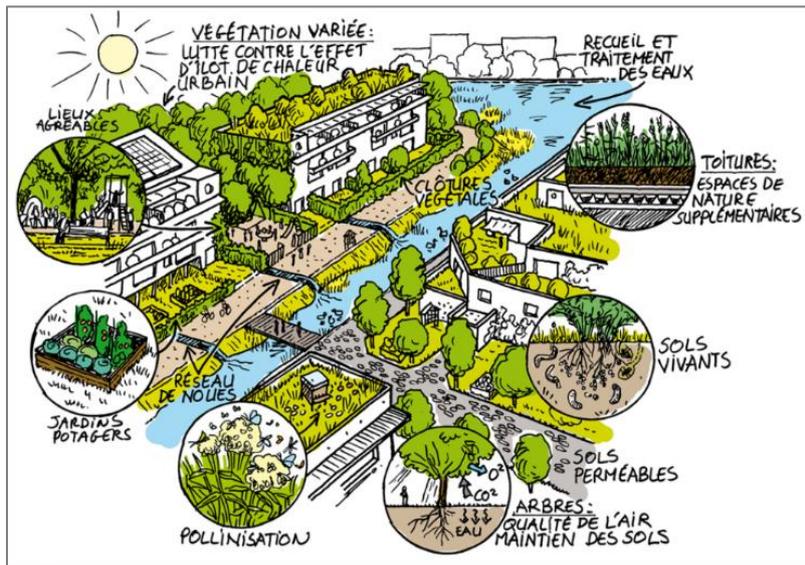
### **II.5.4 Infrastructures durables pour la gestion des eaux pluviales**

Afin de mieux prévenir les événements climatiques extrêmes, la ville " adapte" ainsi ses infrastructures. Les initiatives de la stratégie se focalisent sur la transformation des méthodes de construction des infrastructures et d'urbanisme afin de mieux gérer les inondations majeures et les vagues de chaleur récurrentes. L'objectif est de concevoir l'espace urbain avec le risque.

Le drainage durable est une stratégie généralement appliquée aux zones urbaines sujettes à différents types d'inondations dues à de fortes pluies. Dans les zones urbaines, les agglomérations et les routes goudronnées sont imperméables à l'eau, et la pluie est canalisée directement dans les réseaux de drainage qui peuvent rapidement être submergés. Le concept principal de l'infrastructure durable consiste à utiliser des éléments du paysage et à faire en

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

sorte que l'eau des toits et des routes s'écoule sous terre plutôt que d'occuper le système d'eau (figure II-11).



*Figure II-11 : Outils des infrastructures verte en ville pour la gestion des eaux pluviales (Annabelle Jaeger, 2018).*

Au cours des dernières décennies, la gestion des eaux pluviales en milieu urbain s'est progressivement complexifiée, conduisant à l'adoption de nombreux concepts, outils et techniques visant à réduire les outils risques d'inondation. Ces concepts, outils et techniques ont été mobilisés par des spécialistes de divers domaines dans diverses parties du globe. La discipline du drainage urbain, l'architecture, l'architecture de paysage, l'urbanisme et l'urbanisme, la sociologie, l'écologie et l'économie sont également intégrées à ce numéro. Certains des outils, stratégies et techniques de planification urbaine pour le FRR dans les zones urbaines seront abordés dans cette section : les pratiques de gestion optimales (PGO) et le développement à faible impact (LID) entre 1949 et 1990 aux États-Unis ; l'aménagement urbain sensible à l'eau (WSUD) dans les années 1990 en Australie ; les systèmes de drainage urbain durables (SUDS) dans les années 2000 au Royaume-Uni ; les infrastructures vertes (IG) et les infrastructures vertes-grises ; la gestion intégrée de l'eau en milieu urbain (GIE) et les villes-éponges en 2014-2015 en Chine. L'ensemble de ces outils, stratégies et techniques étaiu principalement les objectifs suivants :

- Diminuer les quantités d'eau de pluie s'écoulant et les débits provenant des surfaces imperméables.
- Évaluer l'incidence de l'urbanisation sur les phénomènes d'inondation.

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

- Proposer des opportunités pour l'utilisation de l'eau de ruissellement à son point de chute.
- Optimiser la qualité de l'eau et diminuer la pollution causée par les eaux de ruissellement.
- Sauvegarder l'intégrité du réseau hydrographique naturel.
- Offrir un environnement propice à la faune dans les cours d'eau en milieu urbain.
- Proposer des opportunités pour l'évapotranspiration de la végétation et des eaux de surface.
- Promouvoir la recharge naturelle des nappes phréatiques et des aquifères.

### **II.5.4.1 Pratiques de gestion optimales (PGO) et développement à faible impact (LID)**

Dans les premières années de la décennie 1990, le concept de Plan de Gestion des Eaux Pluviales (PGO) s'était généralisé dans la plupart des manuels de conception des infrastructures hydrauliques, émanant de divers organismes. En conséquence, des PGO ont été largement mis en place à travers l'ensemble de l'Amérique du Nord. LID est considérée comme une sous-stratégie des PGO. L'objectif principal du LID était d'obtenir un système hydrologique naturel en intégrant des mesures de contrôle. L'hydrologie naturelle fait référence aux volumes de ruissellement, d'infiltration et d'évapotranspiration avant l'aménagement qui permettent d'atteindre l'équilibre du site grâce à un paysage fonctionnellement équivalent. La disposition LID applique un système d'écoulement en cascade pour minimiser la connectivité directe entre les zones imperméables adjacentes. La gestion intégrée des eaux pluviales (GIEP) concerne principalement le contrôle de l'écoulement des eaux de ruissellement provenant des surfaces imperméables vers des zones moins perméables, telles que les zones aménagées pour l'absorption, afin de favoriser l'infiltration et d'améliorer la qualité de l'eau (Abdelkebir et al., 2021). La GIEP repose sur l'utilisation de dispositifs de traitement des eaux pluviales à petite échelle, tels que les systèmes de bio rétention, les toits végétalisés et les noues, qui sont implantés à la source du ruissellement ou à proximité.

La mise en œuvre de la Gestion Intégrée des Eaux Pluviales (GIEP) doit être étroitement coordonnée avec le plan d'urbanisme local et idéalement intégrée dans le schéma d'aménagement paysager du site. La stratégie de planification LID-BMP comprend plusieurs éléments clés : (1) la préservation du relief naturel du terrain, (2) la réduction du pourcentage de surfaces imperméables, (3) l'évitement des raccordements directs des zones imperméables, (4) le choix

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

des techniques de GIEP les plus adaptées en fonction des caractéristiques locales tant techniques que socio-économiques, et (5) l'établissement d'objectifs appropriés pour la mise en œuvre du LID-BMP. Ces approches, largement basées sur des solutions naturelles, offrent également l'avantage supplémentaire de contribuer à atténuer les impacts du changement climatique en cours.

### **II.5.4.2 Design urbain sensible à l'eau (WSUD)**

La stratégie WSUD a pour but de réguler le niveau d'eau dans les zones urbaines, de préserver et d'améliorer la qualité de l'eau, de promouvoir la conservation de la ressource hydrique et de protéger les aspects environnementaux et récréatifs liés à l'eau. Son objectif principal est de minimiser les Impacts hydrologiques du développement urbain, notamment en contrôlant les inondations, en gérant les débits, en améliorant la qualité de l'eau et en mettant en place des infrastructures de Collecte des eaux pluviales (Fletcher et al., 2015).

### **II.5.4.3 Système de drainage urbain durable (SUDS)**

Diverses techniques sont intégrées dans les Systèmes Urbains de Drainage Durable (SUDS) pour assurer un drainage efficace et durable des eaux de pluie. Ces techniques visent à reproduire au maximum Les conditions naturelles de drainage d'un site avant toute intervention, en conformité avec les principes fondamentaux du Développement Durable Intégré (LID) évoqués précédemment. Les SUDS sont généralement conçus comme un ensemble cohérent de pratiques et de technologies travaillant de concert pour gérer les eaux pluviales.

### **II.5.4.4 Gestion Intégrée des Eaux Urbaines (GIS)**

Le concept de Gestion Intégrée des Ressources en Eau Urbaine (GIREU) englobe la gestion des réseaux d'approvisionnement en eau, des eaux souterraines, des réseaux d'assainissement et du drainage des eaux pluviales, en prenant en considération les rôles et la collaboration entre les diverses entités impliquées dans la gestion de l'eau en milieu urbain. La GIREU repose sur une approche holistique du cycle de l'eau, qu'il soit naturel ou anthropique, de surface ou souterrain, en les considérant comme un système unifié, tout en répondant aux besoins en eau, tant humains qu'écologiques, et en tenant compte du contexte local. De plus, ce concept intègre les dimensions environnementales, sociales, culturelles et économiques, visant à garantir la durabilité en équilibrant ces différentes perspectives.

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

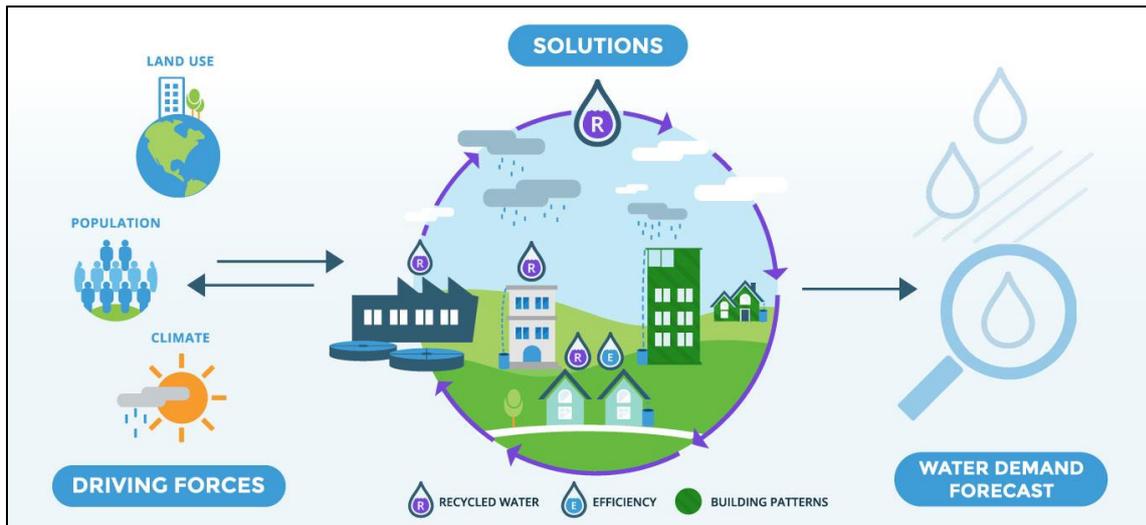
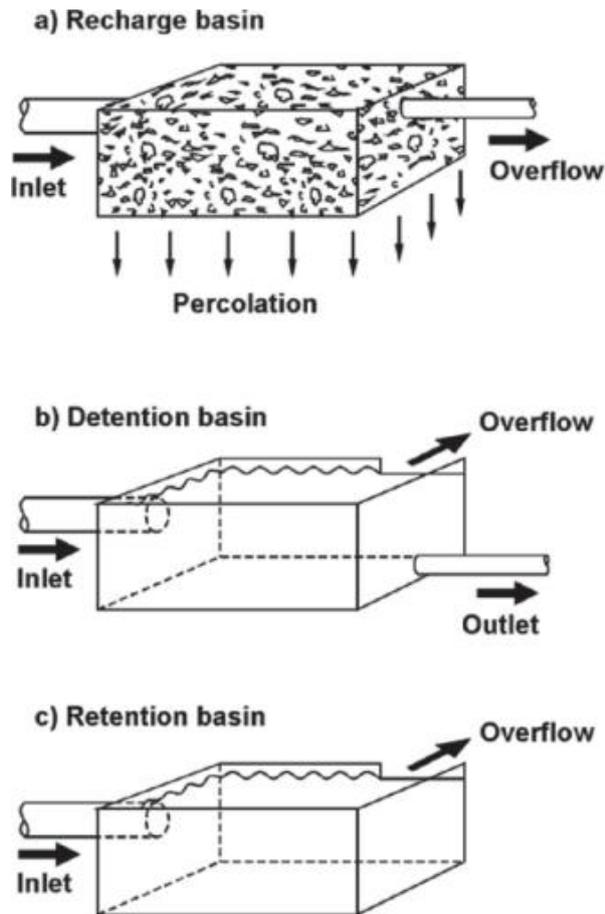


Figure II-12 : Modèle intégré de gestion de l'eau urbaine (Luna Mansour, 2019).

### II.5.4.5 Outils d'infrastructure durable pour la gestion des eaux pluviales

Pour appliquer les différentes stratégies d'infrastructure durable décrites dans la section précédente, différents outils ont été utilisés et intégrés pour atteindre l'objectif souhaité. Dans la section suivante, ces différents outils sont divisés en trois catégories : les outils de recharge (infiltration), les outils de rétention et les outils de rétention, comme le montre la Figure II-13.



*Figure II-13 : Infrastructure durable pour les outils de gestion des eaux pluviales (Andjelkovic, 2001).*

### II.5.4.5.1 Les outils d'infiltration de recharge

Les techniques d'infiltration visent à favoriser l'infiltration des eaux de ruissellement dans le sol afin de diminuer le débit de ruissellement en surface des eaux pluviales.

#### II.5.4.5.1.1 Rigoles biologiques

Les rigoles biologiques sont des chenaux végétalisés avec des sols perméables qui s'infiltrent dans les eaux de ruissellement des zones imperméables en amont (Hager et al., 2019), comme le montre la Figure II-14.

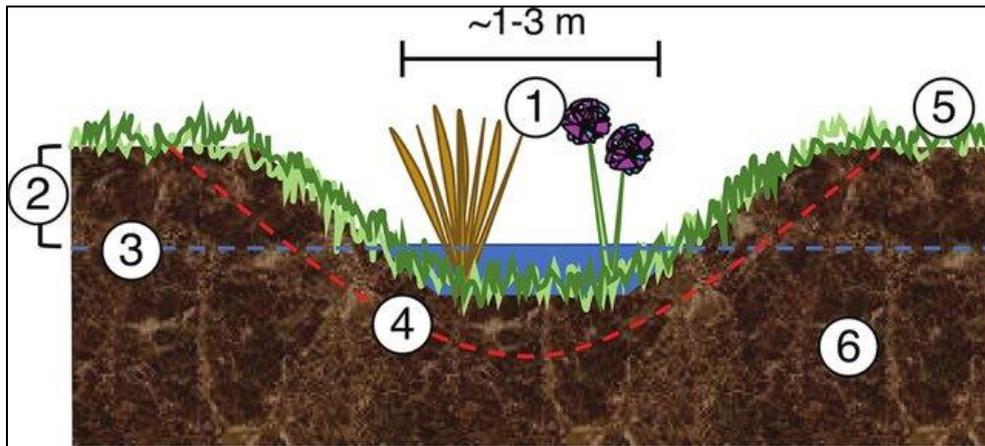


Figure II-14 : Schéma en coupe transversale d'une rigole biologique. (1) Végétation indigène, (2) franc-bord, (3) niveau d'eau maximal, (4) tissu géotextile en option, (5) bande filtrante en option (prolongée au-delà du schéma) et (6) plate-forme existante (Hager et al., 2019)

### II.5.4.5.1.2 Jardinières d'eaux pluviales

La durabilité des zones urbaines est grandement influencée par les jardinières d'eaux pluviales, qui contribuent à diminuer le ruissellement des eaux pluviales et la pollution de l'eau. Les jardinières d'eaux pluviales jouent également un rôle crucial dans la création d'un environnement bâti plus écologique et sain offrant des espaces pour la végétation à proximité des constructions et le long des voies publiques.

Les bassins de rétention des eaux pluviales sont similaires aux jardins de pluie, car ils sont conçus dans le but de recueillir les eaux de ruissellement et de filtrer les sédiments et les polluants, comme le montre la Figure II-15.

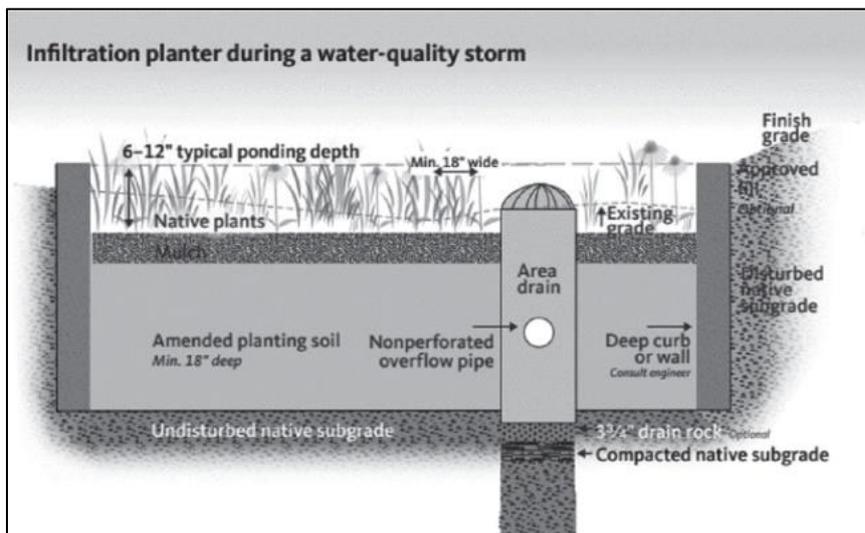


Figure II-15 : Conception d'un planteur d'eaux pluviales d'infiltration (Cahill et al., 2011)

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

### II.5.4.5.1.3 Chaussées perméables

Les chaussées perméables font référence à l'utilisation d'une technique spéciale pour paver les chemins urbains qui permet aux eaux de ruissellement de s'infiltrer à travers la surface dans les sous-couches et/ou les strates sous-jacentes. Il existe un large éventail de technologies de pavage qui permettent à l'eau de s'infiltrer à travers une surface praticable. Quatre grandes catégories de pavage perméable sont énumérées ci-dessous (Hoban, 2019), comme le montre la Figure II-16.



**Figure II-16** : systèmes de chaussée perméables (pavés en béton perméables, systèmes de chaussée en grille (Hoban, 2019).

Diverses options peuvent être envisagées pour les revêtements perméables, notamment les pavés en blocs de béton perméables, les pavés en briques, les éclats de Pierre, le gravier, le béton poreux et l'asphalte poreux. De plus, l'herbe peut être utilisée avec ou sans renforcement dans les régions présentant des conditions climatiques appropriées et une faible charge Trafic. En général, les revêtements perméables sont installés sur une couche de gravier grossier qui offre une capacité de stockage temporaire et favorise l'infiltration des eaux de ruissellement dans la couche inférieure, contribuant ainsi à la recharge de la nappe phréatique. L'eau de pluie ainsi stockée peut être réutilisée à diverses fins domestiques.



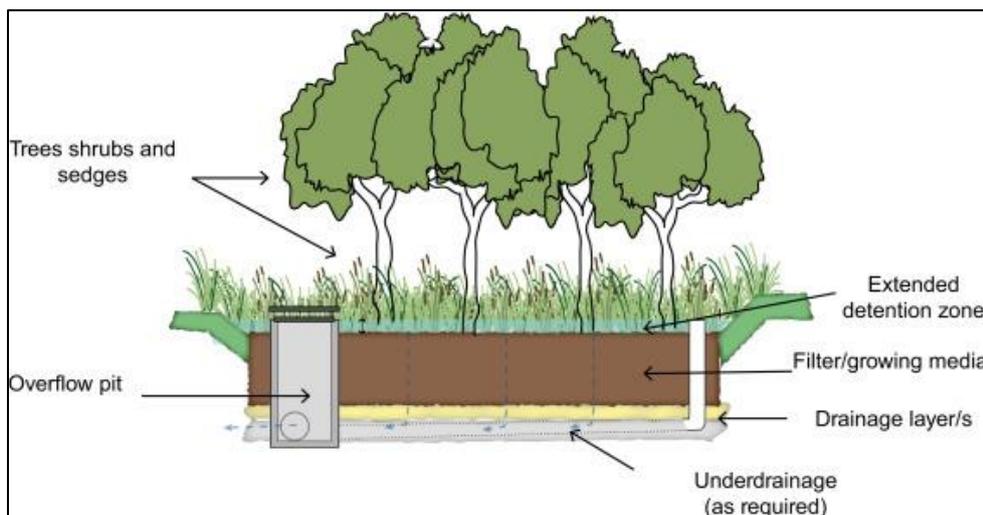
**Figure II-17** : Section montrant comment le pavage et le paysage perméables collectent l'eau de pluie et diffusent les eaux pluviales (Kipkirui & Kageche, 2020).

### II.5.4.5.2 Outils de rétention

Des dispositifs de rétention sont employés afin de freiner l'écoulement des eaux de pluie avant leur évacuation ultérieure vers l'aval.

#### II.5.4.5.2.1 Bassins de rétention

Les bassins de rétention, également appelés étangs secondaires, sont des infrastructures de grande envergure conçues verser stocker temporairement les eaux de ruissellement et Atténuer les crues. Leur principale fonction est de les réguler inondations. La détermination de la capacité de rétention des bassins dépend de l'analyse comparative des débits de ruissellement avant et après leur installation dans Les zones urbaines. Les bassins sont destinés à drainer les eaux pluviales dans un délai donné afin de rendre leurs volumes disponibles pour le prochain événement orageux (figure II-18).

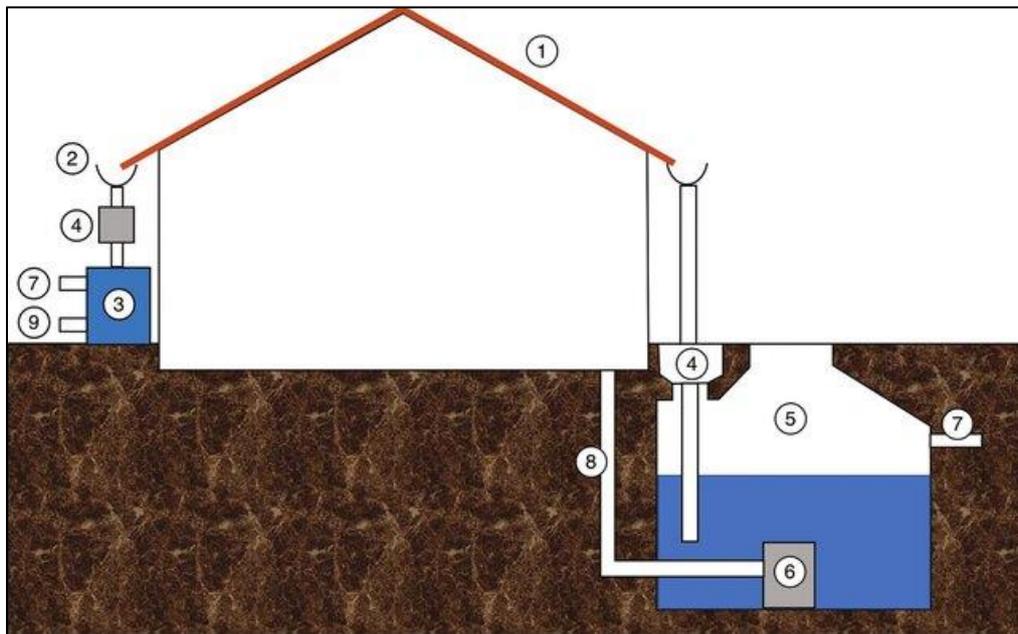


**Figure II-18** : Un diagramme schématique en coupe transversale d'un système de biorétention typique (Hoban, 2019).

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

### II.5.4.5.2.2 Stockage souterrain

Le stockage souterrain des eaux pluviales consiste en l'utilisation de structures souterraines conçues pour retenir et relâcher temporairement les eaux de pluie. Ces structures peuvent comprendre des voûtes, des Réservoirs en pierre, des conduites et des grilles en plastique. Afin d'assurer l'efficacité des plans de gestion des eaux pluviales, il est essentiel de combiner des matériaux et des conceptions adaptées à chaque site, comme illustré dans la figure II-19.



*Figure II-19 : Schéma en coupe transversale d'un bâtiment avec stockage souterrain des eaux de pluie et baril de pluie en surface : (1) Zone de collecte du toit, (2) gouttière, (3) baril de pluie, (4) déviateur/filtre de première chasse, (5) citerne souterraine, (6) pompe, (7) sortie de trop-plein, (8) tuyauterie vers la résidence et (9) sortie pour l'irrigation (Hager et al., 2019).*

### II.5.4.5.3 Outils de rétention

Des dispositifs de rétention sont mis en place pour retenir l'eau de pluie dans le but de préserver les cours d'eau en CAS d'inondations, lorsque le stockage à long terme et l'infiltration supplémentaire ne sont pas réalisables sur lieu.

#### II.5.4.5.3.1 Zone humide artificielle

La technologie des zones humides artificielles est considérée comme une approche holistique qui intègre le Traitement des eaux usées, la prévention des inondations et la gestion des eaux pluviales. Les eaux grises provenant des ménages sont recueillies, subissent un traitement primaire (généralement une fosse septique), puis sont acheminées vers la zone humide construite par le biais d'une entrée. Elles traversent ensuite un média filtrant, favorisant la sédimentation des particules solides et la capturer des populations bactériennes à la surface du

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

Médias et des tiges des plantes. Les eaux usées arrivent alors à la sortie avec une meilleure qualité et peuvent être réutilisées, comme le montre la figure II-20.

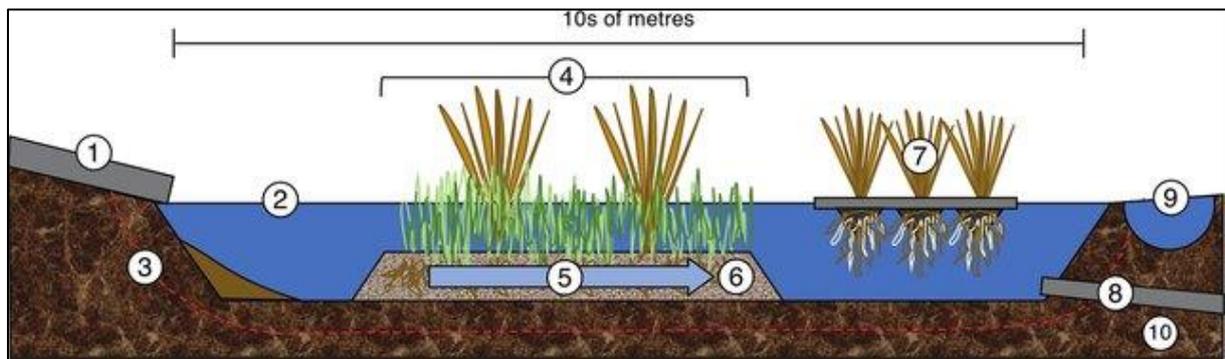


Figure II-20 : Fig. 7. Schéma en coupe transversale d'une zone humide d'eaux pluviales construite. (1) Entrée, (2) eau libre et bief, (3) revêtement en option, (4) zone macrophyte, (5) écoulement souterrain horizontal, (6) zone racinaire en milieu poreux, (7) zone humide de traitement flottante, (8) sortie, (9) canal de dérivation en option et (10) plate-forme existante.(Hager et al., 2019)

### II.5.4.5.3.2 Toits verts

Les toits verts sont une technique qui consiste à recouvrir les toits de plantes légères qui permettent l'infiltration des précipitations et récupèrent l'évapotranspiration. Comme le montre la figure II-21, les toits verts se composent essentiellement d'une couche de végétation, d'une couche de substrat importante pour retenir l'eau et dans laquelle la végétation est ancrée et d'une couche de drainage pour drainer l'excès d'eau(Mentens et al., 2006).

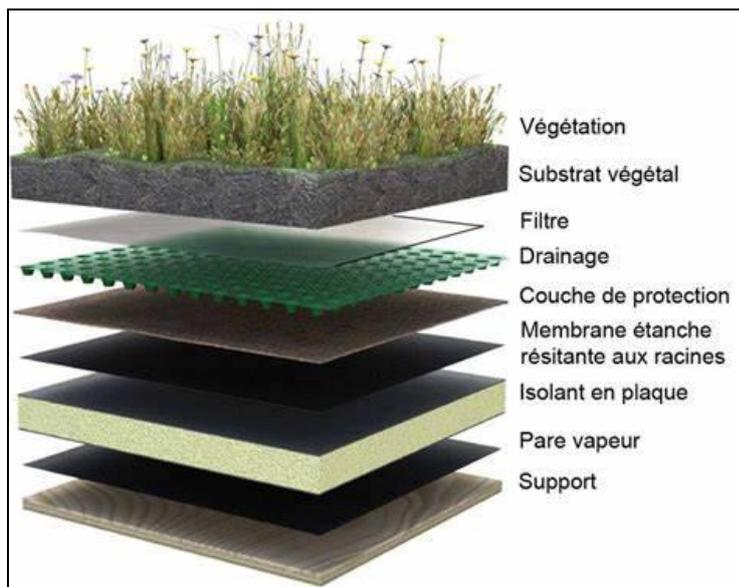


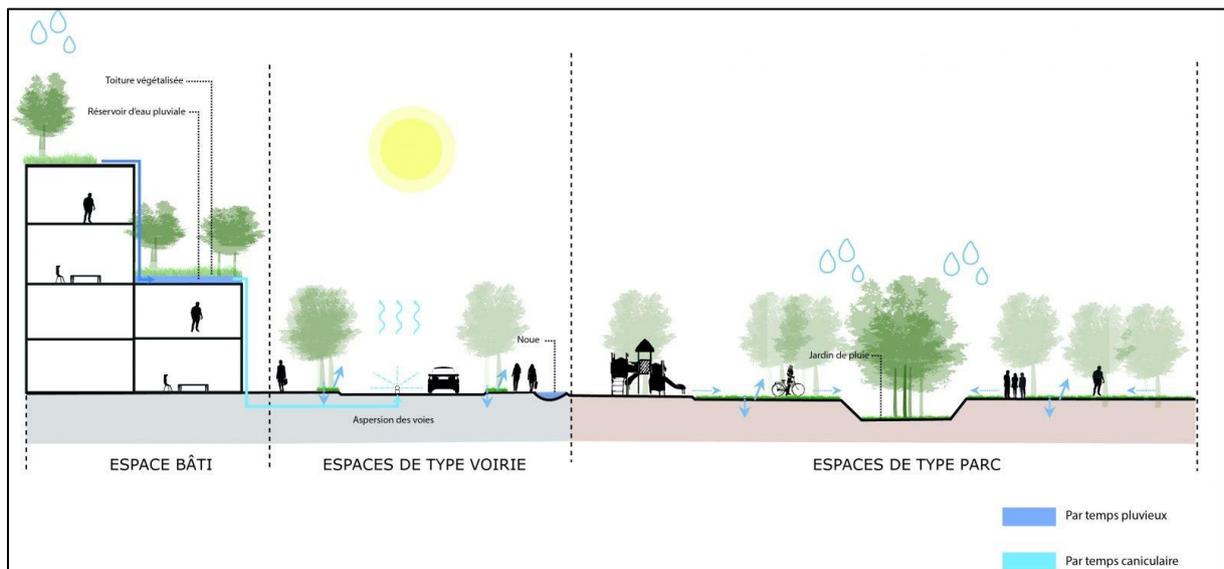
Figure II-21 : Structure de toit vert (Mabrouk et al., 2023).

## Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation

Les toits verts réduisent les eaux pluviales grâce à trois processus : retarder le temps initial de ruissellement en absorbant l'eau dans le système de toit vert ; réduire le ruissellement total en retenant une partie de l'eau de pluie ; et la répartition du ruissellement sur une longue période grâce à une libération relativement lente de l'excès d'eau.

### II.5.4.5.3 Récupération de l'eau de pluie

La récupération des eaux de pluie consiste à recueillir et à utiliser l'eau provenant de diverses surfaces telles que les toits, dans le but de limiter l'écoulement des eaux de surface sur le site, de réduire la nécessité d'aménagements de gestion des eaux pluviales, et de diminuer la dépendance aux approvisionnements en eau des services publics. La collecte de l'eau de pluie a été largement utilisée dans les régions arides. En particulier dans les zones où les populations sont dispersées, la collecte des eaux de pluie constitue une alternative peu coûteuse pour fournir l'eau nécessaire. Dans les zones climatiques humides, la collecte de l'eau de pluie est une source d'eau supplémentaire efficace (figure II-22).



**Figure II-22** : Coupe du cycle des eaux pluviales en milieu urbain : Levées et dispositifs techniques de contrôle des crues (PIEL, 2021).

## Conclusion

Face à l'augmentation des changements climatiques, à la croissance de la population urbaine et aux incertitudes croissantes, il est devenu impératif de renforcer la résilience urbaine en matière d'aménagement pour préparer et adapter les populations et les territoires urbains aux effets négatifs de l'aggravation significative des risques d'inondations. Au lieu d'être perçu comme

## **Chapitre II : la résilience urbaine et la gestion des risques des inondation**

une contrainte externe, le risque d'inondation est actuellement envisagé comme faisant partie intégrante de l'identité territoriale, mettant en évidence la nécessité de développer de nouvelles approches d'aménagement des zones inondables et de promouvoir l'innovation dans la conception de quartiers résilients.

La capacité de résilience des zones urbaines aux risques d'inondation dépend de la manière dont les espaces restreints sont exploités pour minimiser les conséquences des précipitations. En améliorant les systèmes de drainage, il est possible d'ajuster de manière flexible le parcours des eaux pluviales au fil des évolutions climatiques.

Malgré la polysémie du concept, la résilience peut faire l'objet de deux lectures. Certains chercheurs pensent que la résilience est un concept considéré comme l'opposé de la vulnérabilité et en même temps, la résilience est un facteur permettant de réduire la vulnérabilité. Pour ces chercheurs, pour augmenter la résilience, il faut diminuer la vulnérabilité.

***Chapitre III***

***Etat de l'art de la***

***propagation des inondations***

***urbaine aux stratégies de***

***renforcement de la résilience***

***urbaine.***

# Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine

## Introduction

Une revue exhaustive a été menée pour examiner les facteurs qui influent sur la propagation des risques liés aux inondations et les stratégies visant à renforcer la résilience urbaine. Cette revue s'est appuyée sur les travaux les plus marquants, les auteurs les plus influents et la production académique nationale et internationale, notamment des articles et des thèses de doctorat, parus au cours des cinq dernières années à l'échelle mondiale. Les bases de données telles que Web of Science, Google Scholar, Microsoft Academic, Science Direct et Scopus ont été consultées en utilisant des mots-clés appropriés.

L'objectif de cette étude est d'analyser la corrélation entre la résilience urbaine et l'environnement urbain afin d'améliorer la gestion des risques d'inondation. Cette analyse prend en considération les différents éléments, méthodes, outils et techniques urbains, ainsi que les principaux défis liés à l'évaluation des risques d'inondation. En outre, des recommandations avancées sont formulées pour renforcer la résilience urbaine. Cette étude examine comment ces recommandations peuvent contribuer à la préparation et à l'adaptation des zones urbaines pour faire face et se remettre des risques d'inondation.

La résilience urbaine, milieu urbain, inondation sont les notions centrales de cette étude (figure III-1).

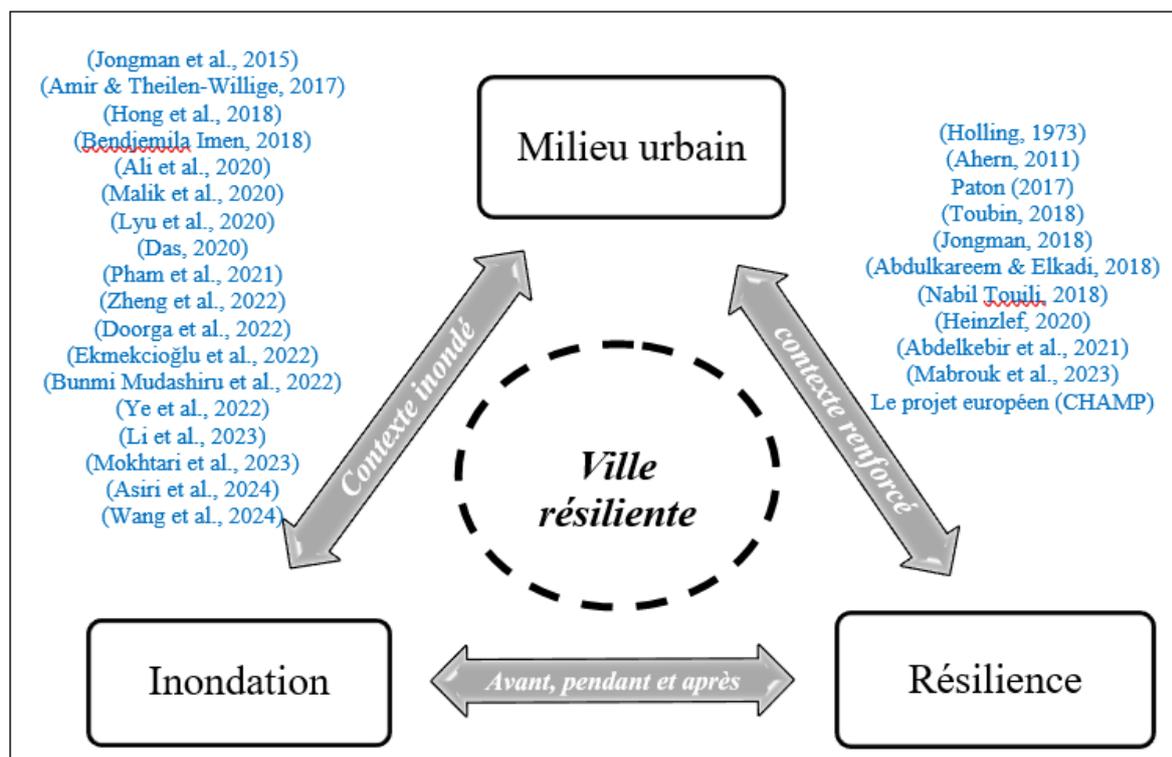


Figure III-1 : Adéquation du triptyque adoptée dans cette recherche (auteur, 2021).

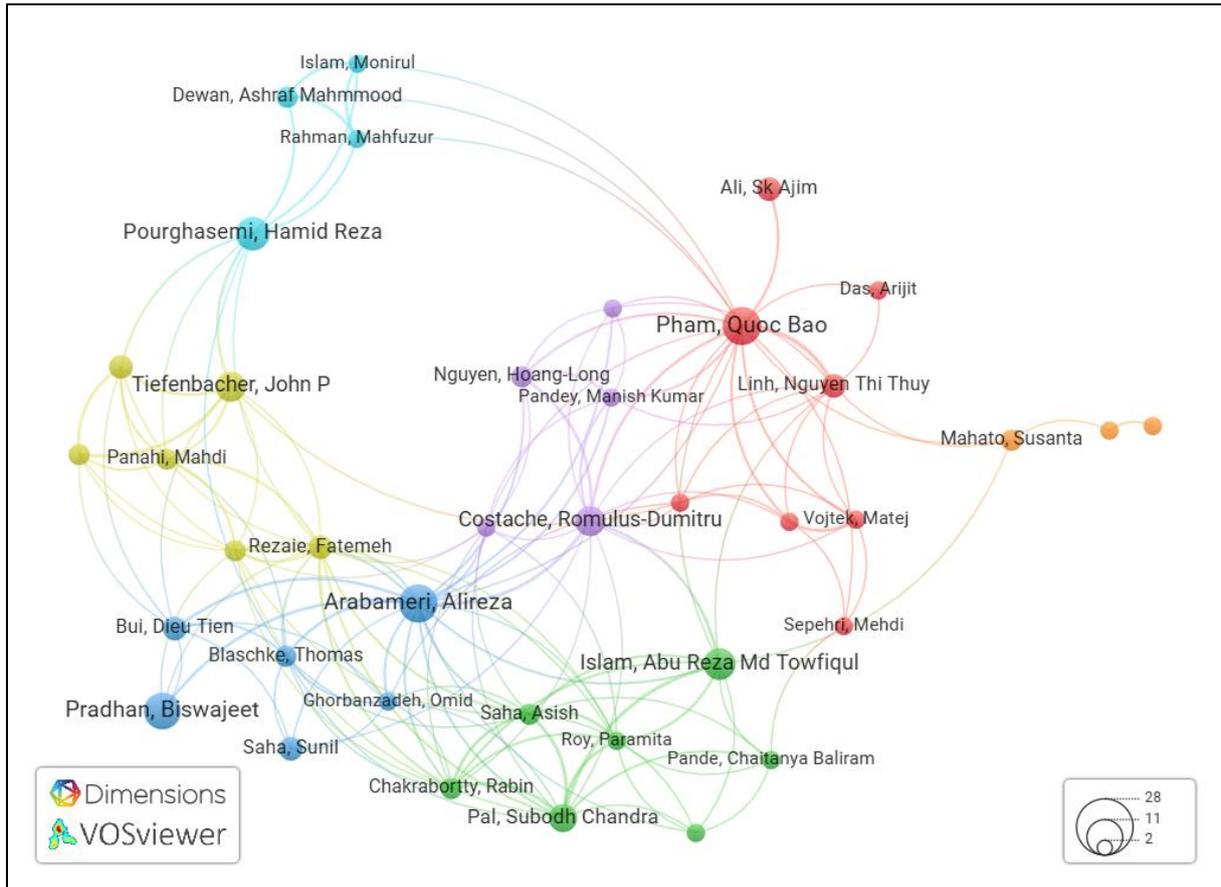
## **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

### **III.1 Perspectives théoriques sur les facteurs de propagation des inondations urbaine et les méthodes d'évaluation par l'approche (MCDM).**

L'identification des zones susceptibles d'être inondées est une tâche importante pour chaque pays afin de prévenir de telles conséquences dangereuses (Abdelgawad et al., 2024). L'occurrence du risque d'inondation est due à une combinaison de variables naturelles et anthropiques, ce qui nécessite une meilleure connaissance de sa portée spatiale (Ali et al., 2020). La modélisation de la susceptibilité aux inondations est un processus complexe qui implique la synthèse des facteurs pertinents influençant l'occurrence des inondations. Cela permet une évaluation géographique précise des caractéristiques des inondations pour les activités de gestion des inondations (Bunmi Mudashiru et al., 2022). Ainsi, afin d'examiner la problématique des risques d'inondation à l'échelle locale, il est essentiel de préciser les différentes approches utilisées et les facteurs d'évaluation pour localiser le risque des inondations (BENDJEMILA, 2018) (figure III-1).

La figure III-2 montre les auteurs les plus productive en matière de publication sur les facteurs de propagation des inondations urbaine et les méthodes d'évaluation par l'approche (MCDM)

### Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine



**Figure III- 2 :** Les chercheurs en fonction de leur nombre de publications co-écrites sur la propagation des inondation (auteurs, 2022).

**Jongman et al., 2015** ont souligné l'importance de la compréhension des tendances historiques des risques d'inondation pour élaborer des projections précises des décès et des pertes. Ils ont reconstruit l'historique des crues fluviales en se basant sur des données climatiques Quotidiennes couvrant la période de 1980 à 2010, et ont quantifié les contributions naturelles et socio-économiques aux évolutions des risques d'inondation. Leurs résultats ont mis en évidence une convergence des niveaux de vulnérabilité entre les pays à faible et à haut revenu, attribuable à une tendance marquée à la réduction de la vulnérabilité dans les pays en développement. De plus, des estimations des pertes et des décès dus aux inondations ont été fournies pour 100 combinaisons de scénarios et de modèles individuels, ainsi que pour trois scénarios Potentiels de vulnérabilité mondiale. Ces prévisions soulignent que le principal élément de risque associé aux inondations est le comportement humain, et que la hausse anticipée des risques pourrait être considérablement réduite grâce à des stratégies efficaces de prévention des catastrophes.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

**Amir & Theilen-Willige, 2017** examinent la fusion de modèles de tsunamis avec des techniques de Systèmes d'Information Géographique (SIG) afin d'évaluer le danger d'inondation le long de la côte est de l'Algérie, dans la région de la Méditerranée occidentale, en se concentrant spécifiquement sur les villes de Bejaia et Jijel comme exemples. La démarche numérique repose sur l'application de la méthode de Godunov et du solveur de Riemann pour traiter la stabilité de l'interface entre les cellules de la grille, en l'occurrence les oscillations non physiques.

La modélisation a été effectuée à l'aide logiciel Geoclaw, permettant ainsi de calculer les débits d'écoulement et les données sur les niveaux d'eau à différents points le long de la côte allant de Bejaia à Jijel. Ces simulations ont été réalisées en se basant sur un séisme de magnitude 7,6 qui s'est produit au large de la baie de Jijel. Des cartes illustrant la vulnérabilité aux inondations ont été générées dans ArcGIS en utilisant les fonctionnalités d'analyse spatiale intégrées au Système d'Information Géographique. Dans les zones côtières exposées aux risques d'inondation dus à des ondes de crue à haute énergie, il est envisageable d'agréger et de pondérer des facteurs morphométriques tels que les altitudes les plus basses et les pentes les plus douces du littoral. Les embouchures des cours d'eau sont les zones les plus susceptibles d'être inondées.

**Hong et al., 2018** aborde la création d'une évaluation de la susceptibilité aux inondations qui intègre des techniques intelligentes et des systèmes d'information géographique SIG. La modélisation spatiale des inondations a été réalisée en utilisant un système d'inférence neuro-floue adaptative (ANFIS) associé à un algorithme génétique (AG) et une évolution différentielle (DE).

Le modèle prend en compte treize paramètres hydrologiques, morphologiques et lithologiques ( la pente, l'aspect, l'altitude, la courbure, l'indice de transport de sédiments (STI), l'indice de puissance de l'indice de puissance des cours d'eau (SPI), l'indice d'humidité topographique (TWI), la pluviométrie, la distance aux rivières, la lithologie, le type de sol, l'utilisation des terres et l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)) évaluer l'évaluation de la susceptibilité aux inondations.

Pour l'application du modèle, le comté de Hengfeng en Chine a été sélectionné. Les sites d'inondation ont été divisés au hasard en deux sous-ensembles, à savoir la formation (70 % du total) et le dépistage (30 %). L'analyse des ratios d'évaluation par étapes (SWARA) un été

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

employée afin d'évaluer la corrélation entre les inondations et les facteurs d'influence. Par la suite, deux techniques d'exploration de données ont été combinées avec le modèle ANFIS, y compris l'algorithme génétique ANFIS et l'évolution différentielle ANFIS, pour être utilisées pour la modélisation spatiale des inondations et la zonation.

D'après les cartes de risque d'inondation, la superficie très inondable peut atteindre 20 km<sup>2</sup>. Leur robustesse a été vérifiée à l'aide de la courbe des caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC). Le modèle (ANFIS-DE) a obtenu la valeur d'ASC la plus élevée (0,852), suivi de l'ANFIS-GA (0,849).

D'après les critères RMSE et MSE, il apparaît que le modèle hybride ANFIS-DE se révèle plus approprié pour la modélisation de la susceptibilité aux inondations dans la région étudiée. Cette approche s'avère flexible et peut aisément être transposée à d'autres localités en vue de la gestion et de la prévention des inondations.

BENDJEMILA, 2018 se focalise sur l'évaluation de la vulnérabilité de la ville de Skikda face à trois types de risques majeurs : les inondations soudaines, Les mouvements de terrain et les accidents industriels. Cette analyse repose sur l'utilisation d'une approche d'aide à la décision hiérarchique multicritère ainsi que sur des entretiens semi-dirigés. Dans le but de réduire les risques, d'améliorer leur gestion et de contrôler la vulnérabilité urbaine, cette recherche adopte une approche globale du risque. Elle lie la vulnérabilité des zones urbaines aux différents types de dangers identifiés, en prenant en considération leur répartition spatiale. De plus, elle fait appel aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour la cartographie des risques et la diffusion des informations relatives aux dangers, en mettant à disposition une base de données pertinente pour l'évaluation et la gestion de ces risques. Cette décision permettrait de concilier les besoins des générations présentes tout en préservant leur capacité à satisfaire les besoins des générations futures.

**Ali et al., 2020** ont développé un cadre en, employant une approche décisionnelle multicritère (MCDMA), un système d'information géographique (SIG), les statistiques bivariées (rapport de fréquence (FR), indice statistique (SI)) et d'apprentissage automatique (arbre de Bayes naïf (NBT), Régression logistique (LR)) pour identifier les inondations dans le bassin de la rivière Topl'a en Slovaquie.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

L'objectif de cette étude est de faire une comparaison des capacités prédictives des quatre modèles hybrides et indépendants suivants afin d'évaluer la probabilité d'inondation dans le bassin de la rivière Topl'a : DEMATEL-ANP, NBT – FR, NBT – SI et LR. La présente étude a sélectionné 14 différents facteurs physico-géographiques de conditionnement des inondations, Sur la base de différentes études et d'avis d'experts qui sont : l'élévation (C1), le nombre de courbes (C2), la pente (C3), densité des cours d'eau (C4), indice de puissance des cours d'eau (C5), indice d'humidité topographique (C6), relief (C5), topographique (C6), Indice de rugosité du terrain (C7), Indice de transport de sédiments, (C8), Distance par rapport à la rivière (C9), Lithologie (degré de perméabilité) (C10), Indice de végétation par différence normalisée (C11), Sol (C12), pluviométrie (C13) et occupation du sol (C14) .

Sur la base des décisions des experts, le modèle DEMATEL-ANP est utilisé pour calculer les poids relatifs des facteurs et une combinaison linéaire est effectuée à base du SIG pour obtenir l'indice de sensibilité. De plus, la détermination de l'indice de risque d'inondation à l'aide des modèles hybrides NBT-FR et NBT-SI supposé dans un premier temps que le poids de chaque classe de facteur d'ajustement est estimé à travers SI et FR que ces valeurs sont intégrées dans l'algorithme NBT. L'application du LR autonome nécessite de calculer des poids des facteurs de conditionnement en analysant la relation spatiale entre les emplacements historiques des inondations. L'étude a révélé que les niveaux de susceptibilité aux inondations extrêmement élevée et élevée couvraient respectivement 20 % et 47 % de la zone d'étude.

La validation des résultats, à partir des points d'inondation passés, a montré que le modèle hybride DEMATEL-ANP était le plus efficace sous courbe ROC supérieure à 0,97, une précision de 0,922 et une valeur de HSS de 0,844. La précision des modèles appliqués a également été évaluée en mesurant la fréquence des points d'inondation dans catégories finales de l'indice de susceptibilité aux inondations, en construisant le taux de réussite et de prédiction des courbes ROC et en calculant plusieurs paramètres statistiques. Concernant sa portée, cette étude pourrait être utilisée pour effectuer une évaluation préliminaire des risques d'inondation dans la région étudiée. De plus, la méthodologie employée pourrait être reproduit dans d'autres zones sujettes aux inondations afin d'élaborer des stratégies de prévention. Ces résultats pourraient s'avérer bénéfiques pour les autorités locales et les urbanistes.

**Malik et al., 2020** ont évalué la vulnérabilité aux inondations de la rivière Dwarkeswar et ont comparé les résultats à ceux de la rivière Koiya dans le bassin du Bengale, en Inde. Quatorze

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

paramètres liés aux crues tels que l'Indice Différentiel Normalisé de Végétation (NDVI), les précipitations, l'Indice de Puissance des Cours d'Eau (IPS), l'Utilisation et la Couverture des Sols (LULC), l'Indice d'Humidité Topographique (TWI), la géologie, le sol, la pente, l'altitude, la densité de drainage, la courbure du plan, la courbure du profil, l'exposition et la distance aux rivières ont été identifiés pour les deux bassins afin d'évaluer la vulnérabilité aux inondations. Quatre modèles, à savoir l'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP), les Processus Basés sur les Connaissances (KD), la Logique Floue (FL) et la Régression Logistique, ont été utilisés pour modéliser la vulnérabilité aux inondations. Les données empiriques et la courbe ROC ont confirmé la validité des cartes de vulnérabilité aux inondations.

L'analyse de l'aire sous la courbe (ASC) a révélé que dans la rivière Dwarkeswar, le taux de reconnaissance (ASC = 0,916) est significativement supérieur à celui de l'AHP (ASC = 0,869), du KD (ASC = 0,841) et du FL (ASC = 0,893). En revanche, dans la rivière Koiya du bassin du Bengale, le taux de reconnaissance de LR (ASC = 0,902) s'avère plus élevé que celui du FL (ASC = 0,879), de l'AHP (ASC = 0,861) et du KD (ASC = 0,828). Ces résultats pourraient être utiles aux planificateurs et aux décideurs politiques pour élaborer des stratégies de gestion prenant en considération les spécificités environnementales locales.

**Lyu et al. (2020)** ont évalué le risque d'inondation du système de métro de Shenzhen, en Chine, en se basant sur trois phases principales. La première phase consiste à établir la structure de l'évaluation en combinant les indices de danger, d'exposition et de vulnérabilité. Chaque indice est composé de différents facteurs d'évaluation tels que les tempêtes de pluie avec DR>200 mm (H1), les tempêtes de pluie avec DR>150 mm (H2), les tempêtes de pluie avec DR>100 mm (H3), les précipitations journalières maximales (H4) et les précipitations moyennes annuelles (H5) ; l'élévation (E1) et la pente (E2), le tampon des points de sortie (E3), la densité (E4) et la proximité (E5) ; le type d'utilisation du sol (V1), la densité de population (V2), la densité des lignes de métro (V3) et leur proximité (V4), la densité du réseau routier (V5) et leur proximité (V6), respectivement. Les facteurs de chaque indice sont analysés dans la deuxième phase à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Enfin, dans la troisième phase, les poids des facteurs d'évaluation sont calculés en utilisant des méthodes telles que le processus original de l'analyse hiérarchique (AHP) et l'AHP triangulaire basé sur les nombres flous (TFN-AHP). Les pourcentages des niveaux de risque les plus élevés et les plus élevés du système de métro, calculés à l'aide du TFN-AHP,

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

surpassent ceux obtenus par l'AHP. Le résultat comparatif indique que la méthode TFN-AHP permet d'évaluer le risque d'inondation de manière plus distincte que la méthode AHP d'origine.

**Das, 2020** ont été appliqué une multitude de facteurs environnementaux influençant les inondations ont été pris en compte, telles que l'altitude, la pente, la distance par rapport aux cours d'eau, la densité de drainage, l'accumulation des écoulements, l'indice d'humidité topographique, les précipitations, l'occupation des sols, la texture du sol, l'indice de rugosité topographique et la géologie, ainsi que des paramètres socio-économiques incluant la densité de population, le taux d'alphabétisation, la densité de population alphabétisée et la densité routière. Cette étude a utilisé l'Approche du processus de hiérarchie analytique pour élaborer des cartes de susceptibilité, de vulnérabilité et de risque d'inondation pour la région côtière du Ghât occidental, en Inde.

Les principales conclusions de cette étude démontrent qu'un pourcentage critique de la superficie présente une vulnérabilité élevée (28 %) et très élevée (22 %) aux inondations. Environ 25 % de la zone présente un risque élevé d'inondation et ces régions ont besoin d'une attention immédiate. Les tests d'efficacité de la carte de susceptibilité aux inondations indiquent une grande précision, en utilisant l'aire sous la courbe (ASC) à une valeur considérablement élevée (0,84). La carte des risques d'inondation en sortie peut être utile aux planificateurs, aux gestionnaires et aux organismes de réglementation pour gérer et atténuer les incidents d'inondation le long des rivières du Ghât occidental. Même si la méthodologie appliquée dans cette étude est très simple, elle fait preuve d'une grande précision et, par la suite, peut être utilisée dans d'autres régions pour une cartographie des inondations basée sur les connaissances d'experts.

**Pham et al., 2021** ont été proposé un cadre pour évaluer les risques d'inondation en utilisant la méthode d'analyse décisionnelle multicritère (MCDA) dans la province de Quang Nam, Vietnam. Le cadre d'étude combine d'une part l'évaluation de la susceptibilité aux inondations. D'autre part, Facteurs des conséquences des inondations (santé humaine et impact financier) y compris (la densité de la population, densité des routes, taux de pauvreté, et la capacité médicale de la zone) et (la densité des installations industrielles, des services et des commerces et l'utilisation des terres) ; respectivement.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

Deux modèles hybrides d'intelligence artificielle (IA), à savoir ABMDT (AdaBoost-DT) et BDT (Bagging-DT) ont été développés avec Decision Table (DT) comme classificateur de base pour la création d'une carte de susceptibilité aux inondations. 847 lieux d'inondation d'événements d'inondation majeurs dans les années 2007, 2009 et 2013 dans la zone d'étude ont été utilisés. Diverses mesures statistiques ont été utilisées pour valider les modèles, y compris la courbe de la zone sous les caractéristiques de fonctionnement du récepteur (ROC) appelée ASC. Les résultats montrent que tous les modèles proposés ont bien fonctionné, mais que la performance du modèle BDT (ASC = 0,96) est la meilleure par rapport aux autres modèles ABMDT (ASC = 0,953) et DT simple (ASC = 0,929). Par conséquent, la carte de susceptibilité aux inondations produite par le modèle BDT a été utilisée pour être combinée à une carte des conséquences des inondations afin d'élaborer une carte fiable d'évaluation des risques d'inondation pour la zone d'étude. Les conclusions de cette étude permettent au gouvernement et aux organismes de réduire au minimum les dégâts engendrés par les inondations.

**Zheng et al., 2022** ont proposé une nouvelle approche combinant la méthode du laboratoire d'essais et d'évaluation de la prise de décision grise (Grey-DEMATEL) dans le processus hiérarchique analytique (AHP) (simplifié en G-DEMATEL-AHP) pour étudier le risque d'inondation à la ville de Zhengzhou, en Chine. L'étude avec différents scénarios de précipitations, y compris la catastrophe d'inondation induite par une forte tempête le 20 juillet 2021 (c'est-à-dire la « tempête 7,20 ») et les précipitations moyennes de cinq ans (c'est-à-dire la « moyenne sur 5 ans »). La répartition des risques a été cartographiée à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Les auteurs ont sélectionné deux couches des indices pour évaluer le risque des inondations, d'une part l'environnement naturel qui comprennent six facteurs d'influence : l'élévation (N1), pente (N2), River densité de la rivière (N3), proximité de la rivière (N4), précipitation (N5), Ruissellement de Surface (N6). D'autre part, la vulnérabilité comprennent sept facteurs d'influence des inondations urbaine : type d'utilisation des terres (V1), densité de population (V2), densité de la ligne de métro (V3), proximité densité de la ligne de métro (V4), Localisation de la station de métro (V5), densité du réseau routier (V6), proximité du réseau routier (V7).

Un questionnaire à neuf scores a été adopté dans Grey-DEMATEL auprès des experts de la ville étudiée. Les résultats ont démontré que la méthode suggérée permet d'évaluer de manière efficace la répartition des risques d'inondation à Zhengzhou. La comparaison entre les

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

résultats de différents scénarios a montré que l'impact de la « tempête 7,20 » était beaucoup plus fort que celui du scénario « moyenne sur 5 ans ». De plus, une méthode existante, l'AHP floue (FAHP), a également été utilisée pour évaluer le même scénario. Les résultats ont indiqué que la méthode G-DEMATEL-AHP pourrait identifier plus efficacement les zones de risque les plus critiques par rapport à la FAHP.

**Ye et al., 2022** a développé une méthode visant à étudier le risque d'inondation de la zone d'étude (ville de Fuzhou, Chine) pour différents types d'inondations urbaines. Tout d'abord, un modèle couplé hydrologique-hydrodynamique a été mis au point pour obtenir les principaux facteurs d'inondation dynamiques forcés par des tempêtes de pluie typiques avec débordement des digues fluviales et transport par pipeline. Deuxièmement, un cadre intégré a été élaboré pour évaluer la vulnérabilité des zones urbaines aux inondations dans le cadre de différents scénarios d'aléas d'inondation. Quinze caractéristiques ont été sélectionnées et leur importance relative a été analysée à l'aide du modèle XGBoost. Enfin, un modèle de nuage a été utilisé pour réaliser une caractérisation qualitative à quantitative des sous-régions de risque d'inondation urbaine. Les résultats ont révélé que les zones inondées et les nœuds d'inondation ont connu une augmentation avec l'augmentation des périodes de retour.

Le degré d'inondation a été divisé en quatre catégories en fonction du degré d'inondation, pour lequel la zone inondable était respectivement de 324,30, 177,81, 43,42 et 20,93 ha. Six variables explicatives ayant une plus grande importance ont été reconnues dans tous les schémas. Le niveau de risque des sous-régions a changé dynamiquement, lorsque l'intensité des précipitations a augmenté, le niveau de risque des sous-régions a montré une tendance à la hausse.

**Bunmi Mudashiru et al., 2022**, ont été appliquées Deux méthodes de prise de décision multicritères, à savoir le processus hiérarchique analytique (AHP) et la méthode Fuzzy-AHP (F-AHP) pour identifier les zones à risque d'inondation en utilisant deux groupes de facteurs d'influence des inondations (FIF). Treize FIF non corrélés ont été sélectionnés et divisés en deux groupes, à savoir le groupe des facteurs de susceptibilité aux inondations (FSFG) et le groupe des facteurs de vulnérabilité aux inondations (FVFG).

La méthodologie a été évaluée à l'aide de trois scénarios d'essai ; a) Groupe FSFG uniquement ; b) Groupe FVFG uniquement ; c) Groupe des facteurs de susceptibilité et de

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

vulnérabilité aux inondations (FSVFG). Les méthodes AHP et F-AHP ont été appliquées pour évaluer l'influence de chaque groupe de facteurs sur les cartes des risques d'inondation.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'impact prépondérant du FVFG en fonction de l'étendue spatiale de la région, pour chaque classe de risque d'inondation (de faible à très élevé) sur les cartes de risques d'inondation produites. Une similitude de résultats a été observée lors de l'analyse de sensibilité effectuée avec les méthodes AHP et F-AHP, ce qui confirme la fiabilité de ces méthodes. L'évaluation de la compatibilité des méthodes AHP et F-AHP avec l'historique des crues a révélé une forte concordance, validant ainsi l'utilisation pertinente du Le FSVFG. La méthodologie adoptée dans cette étude pourrait Servir d'outil de soutien robuste pour l'analyse et la gestion des risques d'inondation, facilitant ainsi le processus décisionnel et contribuant à la résilience urbaine.

**Doorga et al., 2022**, ont mis en place un modèle multicritère basé sur les Systèmes d'Information Géographique (SIG), en se basant sur trois scénarios : les impacts physiques, sociaux et économiques, dans le but d'identifier les zones fortement vulnérables aux inondations dans la capitale, Port-Louis.

Les variables clés prises en considération dans cette analyse englobent l'altitude, la proximité des cours d'eau, l'usage des sols, la densité de drainage, la pente, la nature du sol, la proximité des canaux d'évacuation, la courbure du terrain, le taux de pauvreté et la proximité des zones économiques. Afin d'accroître la résilience de la ville aux inondations, des stratégies de gestion basées sur la localisation et ancrées dans des politiques sont recommandées. Ces stratégies comprennent l'installation d'un réservoir souterrain pour le stockage des eaux pluviales au Champion de Mars, la mise en place de camps pour les individus déplacés par les inondations dans les zones de la vallée Pitot et de la cité La Cure, des ajustements dans la réglementation de la construction et de l'urbanisme, le remplacement du passage souterrain du Caudan par un pont surélevé, ainsi que la revitalisation écologique.

**Ekmekcioğlu et al., 2022** a été élaborée pour produire des cartes de l'aléa d'inondation, de la vulnérabilité aux inondations et des risques d'inondation pour la métropole d'Istanbul à l'échelle du district en combinant plusieurs méthodes de prise de Décision multicritère (MCDM) telles que l'Analyse Hiérarchique (AHP), le Processus Analytique en Réseau (ANP), le Laboratoire d'Essai et d'Évaluation Décisionnel (DEMATEL) et les méthodes VIKOR. L'objectif de cette recherche est d'identifier les facteurs déclencheurs les plus

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

significatifs liés aux aspects de danger et de vulnérabilité du risque d'inondation, afin d'apporter des implications pour la prévention des incidents d'inondation potentiels en permettant une prise de décision stratégique précoce pour renforcer la résilience et la réponse face aux effets en cascade des inondations, ainsi que pour améliorer les opérations de rétablissement.

Le processus de hiérarchisation analytique (AHP) a été utilisé pour évaluer les critères de danger en raison de l'absence d'interrelations entre ces critères, tandis que les critères de vulnérabilité ont été soumis au processus de réseau analytique (ANP) en raison de leurs relations interdépendantes. La structure de l'ANP a été ajustée en utilisant la technique du laboratoire d'essais et d'évaluation décisionnelle (DEMATEL). La méthode VIKOR (Visekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) a été appliquée pour calculer les scores des districts. Les résultats ont mis en évidence l'influence des critères de revenu, d'éducation et de densité de population sur le groupe de vulnérabilité, tandis que la période de retour d'un événement orageux, le réseau de canalisations d'eaux pluviales et l'imperméabilité ont été identifiés comme les critères de danger les plus significatifs. L'analyse de sensibilité de la méthode VIKOR a démontré la robustesse de la méthodologie utilisée et la stabilité des résultats obtenus dans des contextes variés. Le modèle générique suggéré pourrait être appliqué dans d'autres agglomérations métropolitaines fortement urbanisées, et les directives associées pourraient assister les responsables politiques dans la réalisation des objectifs de développement durable.

**Mokhtari et al., 2023** localise et cartographie les régions inondables du bassin versant de Cheliff-Ghrib à l'aide d'un processus de hiérarchie analytique. L'étude utilise un système de 14 critères d'évaluation des risques d'inondation à base de données en libre accès et gratuite. Neuf critères (altitude, pente de surface, densité de drainage, distance aux rivières, indice d'humidité topographique, indice d'eau normalisé modifié, précipitations, indice de végétation par différence normalisée et lithologie) sont utilisés pour évaluer le danger et les cinq autres (population totale, densité de population, utilisation et couverture des sols, distance à l'hôpital et distance à la route) sont utilisés pour obtenir la carte de vulnérabilité. La carte des risques d'inondation du AHP révèle que les zones à risque élevé et extrêmement élevé d'inondation couvrent 22,5 % de la zone d'étude. Selon les résultats, le bassin versant de Cheliff Ghrib est extrêmement vulnérable aux inondations.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

(Li et al., 2023), ont été évalués la susceptibilité aux inondations urbaines d'après une analyse du modèle spatial des inondations urbaines en utilisant l'ellipse de déviation standard (SDE) et trouver la zone d'intérêt (AOI) ; en utilisant les informations des réseaux sociaux qui ont été collectées dans la ville de Chengdu, en Chine. Ils ont utilisé les données des médias sociaux comme variable de réponse et sélectionné 10 facteurs d'influence des inondations urbaines comme variables indépendantes : l'élévation (E), l'aspect (As), la pente (S), courbure (C), précipitations moyennes/jour (P), types d'occupation du sol (LC), l'indice de différence de construction normalisé (NDBI), la fraction de la couverture végétation (FVC), la distance à la rivière (DR) et la densité de population (PD). Les facteurs d'influence des inondations urbaines divisés en trois catégories : les facteurs topographiques, les facteurs de précipitations et les facteurs de surface.

Le modèle de susceptibilité a été estimé à l'aide de la méthode Naïve Bayes (NB). Les résultats montrent que les inondations urbaines sont concentrées dans la partie nord-est-centrale de la ville de Chengdu, en particulier autour du centre-ville. Les résultats du modèle de susceptibilité ont été vérifiés par la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), montrant que l'aire sous la courbe (AUC) était égale à 0,5 %. (AUC) était égale à 0,8299. Ce résultat de validation confirme que le modèle de susceptibilité peut prédire les inondations urbaines avec une précision satisfaisante. La carte de susceptibilité aux inondations urbaines dans la zone du centre-ville fournit une référence réaliste pour la surveillance des inondations et l'alerte précoce.

**Asiri et al., 2024** ont été appliqués le modèle innovant de prise de décision multicritère (MCDM) appelé processus hiérarchique analytique (AHP) par des ensembles avec une machine à vecteurs de support (AHP-SVM) et un arbre de décision (AHP-DT) pour évaluer les risques d'inondation côtière à Bandar Abbas, en Iran. Ce modèle combine deux scénarios de voie de concentration de représentation (RCP) tels que RCP 2.6 et RCP 8.5. Les facteurs influençant les inondations côtières identifiés grâce à la cartographie de la susceptibilité aux inondations. La prise de décision multicritère (MCDM) a été appliquée pour évaluer les facteurs de conditionnement des inondations côtières, et des approches d'apprentissage automatique (ML) d'ensemble sont utilisées pour la prédiction et la classification des facteurs de risque côtiers (CRF). Les variances statistiques sont mesurées à l'aide de tests de classement signés de Friedman et Wilcoxon et de mesures statistiques. Parmi les modèles, AHP-DT a obtenu une valeur d'ASC améliorée de ROC à 0,95. Après l'application des

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

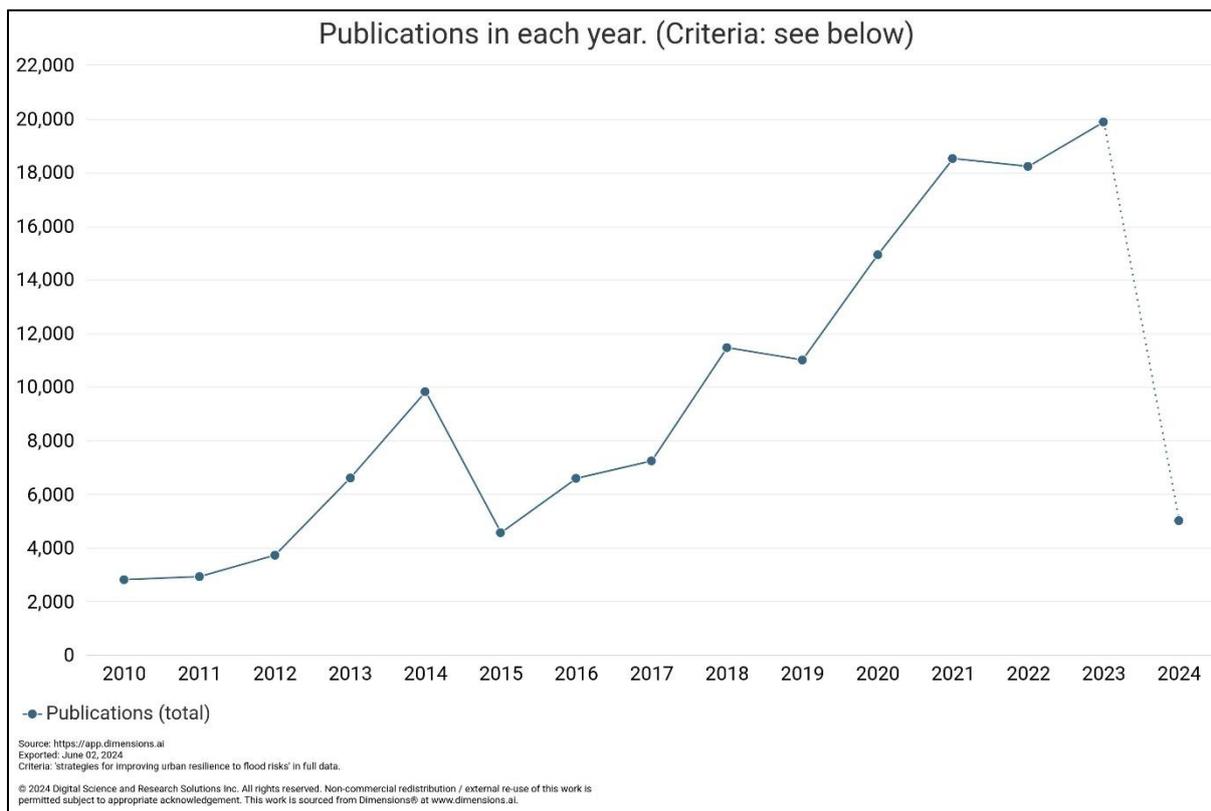
modèles ML, le parc nord et ouest de la rivière Raidak Basin reconnaît une très faible et faible susceptibilité aux inondations en raison de leurs caractéristiques topographiques. La partie orientale de la section centrale est tombée très haut et très haut CFSM. D'après l'analyse des résultats, les personnes vivantes plus près du littoral sont réparties en fonction de l'exposition faible à moyenne dans la région de l'ouest et du centre de la zone d'étude considérée. Ce modèle fournit une solution efficace pour l'évaluation des risques d'inondation côtière, ce qui aide les décideurs et les planificateurs côtiers pour les prévisions futures.

**X. Wang et al., 2024** présentent un modèle spatial multi-indicateurs développé pour évaluer le risque d'inondation à l'échelle de l'agglomération urbaine, comme un ajout crucial au modèle est l'intégration d'une capacité d'adaptation dans le cadre de risque du GIEC. Le modèle prend systématiquement en compte divers indicateurs de risque d'inondation liés aux environnements économiques, sociaux et géographiques de l'agglomération urbaine du Liaoning central et méridional (CSLN). Il génère une carte de distribution spatiale du risque d'inondation intégré pour plusieurs combinaisons de scénarios. De plus, la relation complexe entre les différents indicateurs de risque et le risque d'inondation a été analysée à l'aide de l'analyse des corrélations et du modèle Light Gradient Boosting Machine (Light GBM). Les résultats révèlent des variations notables du risque d'inondation selon différents scénarios. L'inclusion d'indicateurs de vulnérabilité a augmenté le risque d'inondation de 33 %, tandis que l'inclusion ultérieure d'indicateurs adaptatifs a réduit le risque d'inondation de 45 %. La densité des populations et des actifs contribue à un risque élevé d'inondation, tandis que la capacité d'adaptation atténue considérablement le risque d'inondation urbaine. Le cadre adopté dans le présent document peut être appliqué à d'autres régions où une évaluation des risques d'inondation à l'échelle de l'agglomération urbaine est nécessaire, et peut contribuer à faire progresser la recherche scientifique sur la prévision et l'atténuation des inondations.

#### **III.2 Fondements théoriques sur les stratégies d'amélioration de la résilience urbaine face aux risques des inondation.**

Renforcer la résilience urbaine présente des avantages indéniables en termes de réduction de l'impact des catastrophes urbaines sur le nombre de vies perdues. Il est essentiel d'analyser le statut des études sur la résilience urbaine pour explorer les bases et les fronts de la recherche (figure III-3).

### Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine



**Figure III-3** : le nombre de publications publiées chaque année en matière de la résilience urbaine face aux risques des inondations (auteur, 2022).

La publication initiale de Holling en 1973 a engendré un grand nombre d'études et de discussions qui, loin d'aboutir à un consensus, ont permis d'élargir les perspectives sur la résilience. Holling (1996), conscient des limites de la résilience basée sur l'ingénierie, a introduit le concept de « résilience écologique », définie comme la capacité d'un système écologique à absorber les perturbations et à maintenir sa structure et ses fonctions malgré son instabilité.

**Ahern, 2011** traite de la théorie de la résilience telle qu'elle s'applique aux conditions urbaines. Cinq stratégies ont été recommandées afin de renforcer la résilience urbaine pour les planificateurs et les intervenants à considérer, discuter, et illustrer par des politiques, des projets et des programmes novateurs choisis à partir d'exemples internationaux. Ce sont des principes utiles à appliquer dans les villes aux conditions environnementales changeantes :

Développer la *multi* - fonctionnalité des espaces. Il est possible d'améliorer la polyvalence des espaces en planifiant stratégiquement les éléments de peuplement qui intègrent plusieurs fonctions entrelacées ou combinées dans des espaces urbains, qu'ils soient horizontaux ou

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

verticaux. Cette approche vise à optimiser la connectivité hydraulique, à gérer les inondations et à améliorer la qualité de l'eau en intégrant des éléments.

La répartition des risques par la redondance et la modularisation consiste à mettre en place des structures et des politiques visant à assurer une protection centralisée ou unifiée contre les risques. Habituellement, la redondance urbaine est une caractéristique plus élevée dans les grandes villes, comme dans l'Ouest industrialisé, qui ont plus de ressources et pratiquent une planification décentralisée. Par exemple, une seule digue peut être efficace pour protéger une petite colonie contre les inondations du canal, mais peut entraîner un « effet de digue » du développement accru des bâtiments qui multiplie les risques d'inondation. Résilience accrue à des inondations extrêmes peuvent par la suite résulter de plusieurs digues redondantes ou d'autres systèmes alternatifs de gestion des inondations en amont, à mesure qu'ils grandissent.

Maximiser la *biodiversité* et la *diversité sociale* des mesures de développement d'adaptation. Cette approche augmente la fourniture de services écosystémiques urbains offerts avec des outils adaptatifs appropriés. Un exemple pertinent est l'utilisation d'espaces verts urbains multi-échelles (par exemple, les arbres de rue et les parcs) pour réduire la chaleur urbaine, qui est une caractéristique répandue dans la plupart des grandes villes. Ceux-ci incluent (1) une infiltration accrue qui augmente le contrôle des inondations, (2) la fourniture d'espaces de refuge potentiels pour la faune et (3) des espaces récréatifs pour les visiteurs du parc.

De même, les villes avec des niveaux plus élevés de diversité économique et sociale ont une diversité de réponses plus complexe qui leur permet d'être mieux placés pour s'adapter au changement. Par exemple, une ville économiquement et socialement diversifiée peut soutenir les services sociaux et les programmes culturels qui assurent le dynamisme économique, l'équité et un lieu de vie et de travail attrayant pour les gens, malgré les perturbations économiques et sociales. Dans En revanche, les communautés moins diversifiées socialement ont souvent du mal à se remettre des perturbations et caractéristiques de la résilience, en basculant vers d'autres conditions.

*Amélioration des réseaux multi - échelles et augmentation de la connectivité des systèmes.* Un seul élément urbain (tel qu'un parc ou un espace vert) a un impact relativement limité sur la réduction des risques globaux de danger pour le système. Cependant, un réseau de parcs connectés à des échelles spatiales plus grandes permet une résilience accrue en reliant les

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

canaux de drainage reliant les cours d'eau d'ordre inférieur et d'ordre supérieur pour améliorer le contrôle des inondations. Ces caractéristiques réduisent les inefficacités résultant de la fragmentation et peuvent être illustrées dans le réseau insulaire de corridors verts de Singapour.

*Conception et planification adaptatives anticipatives* pour tenir compte des connaissances imparfaites. En règle générale, les politiques urbaines appliquent de manière réactive les enseignements tirés des aléas passés pour restaurer les infrastructures de manière à rendre ces structures légèrement plus sûres qu'auparavant (Olshansky, 2009). Une ville plus résiliente dépasse la simple notion de « résilience comme persistance » en élaborant des plans, des projets et des politiques visant à accroître la flexibilité pour s'adapter aux changements environnementaux. Ces initiatives pilotes ou projets pilotes permettent aux acteurs impliqués d'acquérir de nouvelles connaissances à partir des données de surveillance et d'analyse.

**Toubin (2018)** a exposé une méthodologie visant à accroître la résilience urbaine à Paris, en partenariat avec les responsables des services urbains, en prenant en considération les interactions entre La ville, les infrastructures et les menaces telles que les inondations. Cette coopération met en lumière la nécessité d'incorporer ces relations interdépendantes et repère des occasions d'amélioration afin de renforcer la résilience des services urbains. Cette aptitude repose sur des compétences d'apprentissage à long terme qui visent à atténuer Les conséquences néfastes de la dégradation des services et à adapter de manière continue les Infrastructures à ces conditions changeantes.

**Jongman, 2018** aborde la question de l'élévation du risque d'inondation et de l'adaptation efficace à des solutions fondées sur la nature, telles que l'infrastructure verte.

**Abdulkareem & Elkadi, 2018** met en avant le potentiel de l'intégration des principes écologiques dans la planification urbaine afin de réduire les impacts des inondations et de progresser d'un état de catastrophe vers un état d'équilibre. L'objectif principal de cette étude consiste à élaborer une mesure concrète de la résilience des infrastructures urbaines. Pour ce faire, une analyse théorique a été menée dans deux domaines complémentaires : le design urbain et la réflexion sur la résilience, afin d'identifier forme urbaine la plus essentielle et d'explorer les perspectives de résilience qui pourraient lui être associées pour aboutir à une forme urbaine résiliente. L'objectif de cette étude est de créer un terrain commun où ces deux

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

domaines pourraient éventuellement converger. Il propose également des approches futures efficaces en se basant sur les principes de la résilience écologique et évolutive.

**Nabil Touili ,2018** proposée une approche qui vise à prendre en considération les multiples risques et à améliorer la résilience globale des territoires urbains pour prévenir les événements catastrophiques. Le modèle qualitatif DPRC-R, qui intègre des analyses multirisques, est assimilé à une plateforme transversale d'analyse et d'actions. Il permet de favoriser la convergence des Réflexions et des synergies entre les professionnels de L'urbanisme et de la gestion des risques.

**Heinzlef, 2020** Heinzlef (2020) a avancé une proposition visant à répondre aux défis posés par les changements climatiques et l'augmentation des inondations en milieu urbain, à travers la mise en place d'un système spatial d'aide à la décision. Cette approche a pour objectif de clarifier et de promouvoir l'intégration du concept de résilience urbaine face au risque d'inondation dans les pratiques urbaines. Selon cette perspective, la résilience urbaine englobe les compétences et les capacités d'une ville et de sa population à anticiper, gérer et se remettre d'un événement perturbateur, afin de minimiser les impacts négatifs. Ainsi, cette approche scientifique offre la possibilité d'appréhender la résilience urbaine de manière holistique, en mettant en lumière les capacités proactives que le système urbain doit développer pour faire face aux inondations.

L'étude a été menée en partenariat socio-économique avec la municipalité d'Avignon et son Service SIG (Système d'Information Géographique). Trois indicateurs ont été élaborés dans le cadre de cette approche afin d'évaluer la résilience urbaine, technique et sociale du territoire avignonnais. Ces indicateurs ont permis de recueillir des données sur les variables influençant les capacités de résilience, ce qui pourrait faciliter l'élaboration d'une réponse adéquate en cas de catastrophe naturelle, notamment une inondation urbaine. Par le biais de techniques de géo-visualisation, il a été possible de représenter graphiquement les processus et les résultats afin d'expliquer la méthodologie aux décideurs urbains. Parallèlement, des séances de discussion ont été organisées pour présenter et discuter des résultats obtenus grâce à ces indicateurs avec les responsables et les gestionnaires des infrastructures critiques. La collaboration entre ces indicateurs a permis de mener une analyse approfondie de la résilience urbaine, tout en organisant des ateliers avec les parties prenantes locales pour soutenir le processus de décision territoriale. Cette démarche a favorisé l'émergence d'une culture de résilience, renforcée par un système spatial d'aide la décision qui a facilité le partage des

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

connaissances théoriques et pratiques sur les risques urbains et la résilience. Cette approche a contribué à instaurer un consensus essentiel pour la prise de décisions et la mise en œuvre de mesures de résilience.

**Abdelkebir et al., 2021** ont essayé d'investir des méthodes qui peuvent réduire les pics de ruissellement et le volume du bassin versant de Guelma situé dans le nord-est de l'Algérie en intégrant les eaux pluviales des ordinateurs personnels un modèle de gestion (PCSWMM) et un système d'information géographique (SIG). L'étalonnage du PCSWMM est effectué à l'aide de l'outil d'étalonnage de la syntonisation radio basé sur la sensibilité. Le Nash–Efficacité de Sutcliffe (NSE) (0,70–0,88), coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) (0,76–0,96) et l'erreur relative (RE) (0,018–0,23) indiquait un bon rendement du modèle dans cette bassin versant. La mise en œuvre de cinq pratiques de LID, dont les chaussées perméables, les bio rétentions, les jardins pluviaux, tranchées d'infiltration et systèmes de collecte des eaux de pluie, dans les scénarios explorés, pourraient réduire le ruissellement de pointe de 54,7 % et réduire le volume total des eaux de ruissellement de 75,2 %. Les recherches actuelles aideront les décideurs à améliorer et à choisir les conceptions de LID les plus appropriées qui sont efficaces compte tenu des changements climatiques futurs et des changements dans les LULC. Cette étude peut contribuer à d'autres applications de la pluviométrie–modèles de ruissellement.

**Mabrouk et al., 2023** ont été évalué l'efficacité des mécanismes de planification urbaine renforcés par les solutions fondées sur la nature pour former des villes résilientes aux inondations et Proposer des mécanismes de planification urbaine appropriés pour améliorer la résilience aux inondations et atteindre la durabilité urbaine. L'étude a examiné l'influence prédictive de l'intégration de l'une des stratégies NBS les plus courantes appelées outils de développement à faible impact (LID) (tels que les jardins pluviaux, les cellules de bio-rétention, les toits verts, les tranchées d'infiltration, les chaussées perméables et les baissières végétales) lors de la planification urbaine d'Alexandrie, en Égypte, qui connaît les précipitations les plus sévères chaque année et comprend divers modèles urbains. 14 scénarios de LID dépendant des caractéristiques de la ville ont été simulés avec des intervalles de récurrence allant de 2 à 100 ans à l'aide de l'outil de train de traitement LID (LID TTT), en fonction des données calibrées de 2015 à 2020, par l'indice d'efficacité de Nash-Sutcliffe et le coefficient déterministe, et l'erreur quadratique moyenne avec des valeurs de 0,97, 0,91 et 0,31, respectivement. Nos résultats ont confirmé l'efficacité significative des outils combinés

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

de LID sur l'ensemble des ruissellement des inondations Réduction du volume de 73,7 %, ce qui révèle que différents modèles urbains peuvent être utilisés dans les villes sujettes aux inondations, à condition que les outils de LID soient pris en compte dans la planification urbaine en plus des infrastructures grises pour obtenir une atténuation optimale. Ces résultats, qui combinent plusieurs disciplines et n'ont pas été explicitement mentionnés dans des études similaires dans les pays en développement, peuvent aider les décideurs politiques des municipalités à planifier des villes durables et résistantes aux inondations.

**Le projet européen CHAMP** (réponses locales au changement climatique) a mis en place un dispositif permettant la réalisation d'études sur la résilience en cinq étapes principales : Analyser la situation initiale des paramètres de durabilité urbaine en vue d'élaborer un référentiel d'analyse qui facilitera par la suite l'identification des priorités et des objectifs, ainsi que le suivi des avancées. ♣ Définir les objectifs en élaborant un programme stratégique et un plan d'action à partir de l'analyse initiale et de l'évaluation des priorités (il doit s'agir d'un processus). L'engagement politique dans l'élaboration d'objectifs climatiques contraignants et dans l'évaluation des résultats à la fin du cycle ; La conception et le suivi du programme stratégique et du plan d'action ; L'évaluation et la communication des résultats.

#### **III.3 Exploration approfondie des connaissances existantes.**

Une adaptation résiliente aux risques des inondations croissants nécessite une compréhension approfondie du niveau de risque, des processus dangereux et des facteurs physiques et socio-économiques du risque (Jongman, 2018; Jongman et al., 2015). Un accent particulier est mis sur le potentiel des expériences de modèles pour l'analyse de l'évolution du risque d'inondation (X. Wang et al., 2024). Le défi de l'évaluation des risques d'inondation réside dans le choix des indicateurs d'influence (Mobley & Blessing, 2022), que les risques des inondations sont généralement dues à une complexification de combinaison de causes qui tiennent à la conjugaison de facteurs météorologiques et hydrologiques extrêmes (Banque mondiale, 2012).

Divers facteurs naturels et anthropiques sciemment liés influencent l'évolution spatio-temporelle du risque d'inondation dans les plaines inondables, qui sont présentés une variabilité d'une région à l'autre en raison des différences dans les environnements socio-économiques et écologiques (Zischg et al., 2018).

### Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine

En se basant sur la revue de la littérature existante, les variables indépendantes clés d'ordre physique, anthropique et météorologique ont été identifiées en tenant compte des caractéristiques morphologiques complexes des zones urbaines qui influent sur l'incidence des inondations à l'échelle mondiale. Conformément à la conceptualisation du risque d'inondation, ces variables ont été classées en deux Catégories distinctes : les facteurs naturels représentant l'aléa d'inondation et les enjeux reflétant la vulnérabilité (cf. tableau III-1). L'analyse et la représentation graphique des données ont été réalisées au sein d'un système d'information géographique (SIG).

**Tableau III-1:** synthèse des facteurs employé sur la modélisation des risques des inondations (auteur, 2022).

Catégories	Facteur de cause	Sources	Référence
Naturel (Aléa des inondations)	L'altitude	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Résolution%20spatiale%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Résolution spatiale (30 m)</a> .	(Costache, 2019; Shadmehri Toosi et al., 2019)
	La pente	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Résolution%20spatiale%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Résolution spatiale (30 m)</a> .	(Fenglin et al., 2023; Hammami et al., 2019)
	Précipitation	Données météorologiques, National Aeronautics and Space Administration (NASA).	(Hong et al., 2018; Zheng et al., 2022)
	Température	Données satellitaires (LANDSAT), <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (30 m), Raster.	(Erdem et al., 2021)
	L'exposition	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Résolution%20spatiale%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Résolution spatiale (30 m)</a> .	(Hosseini et al., 2020)
	La courbure	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Résolution%20spatiale%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Résolution spatiale (30 m)</a> .	(Doorga et al., 2022; Hong et al., 2018)
	Densité de drainage	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Résolution%20spatiale%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Résolution spatiale (30 m)</a> .	(Abdelgawad et al., 2024; Das, 2020)

### Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine

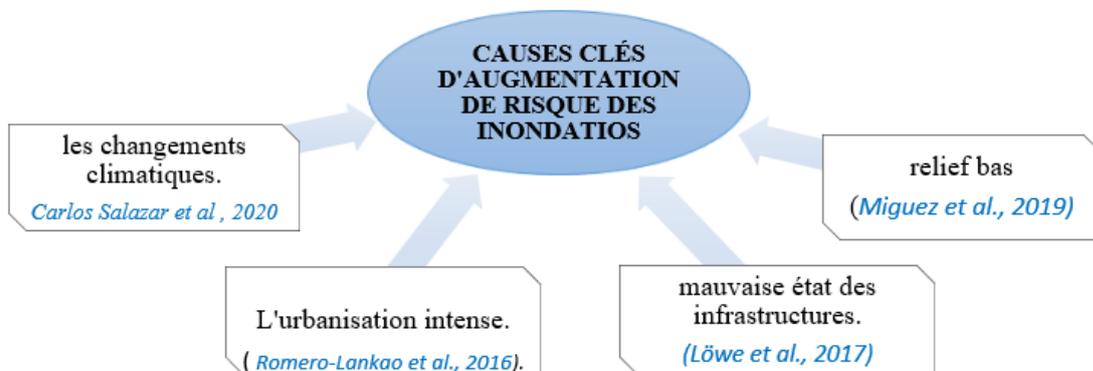
	La densité de la rivière	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Shafizadeh-Moghadam et al., 2018)
	Distance de la rivière	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Malik et al., 2020)
	L'indice de transport de sédiments (STI),	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Edamo et al., 2022)
	L'indice de puissance de l'indice de puissance des cours d'eau (SPI),	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Y. Wang et al., 2019)
	L'indice d'humidité topographique (TWI),	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Mind'je et al., 2019)
	La lithologie	world geologic maps usgs, <a href="https://certmapper.cr.usgs.gov/">https://certmapper.cr.usgs.gov/</a> , Vecteur	(Bunmi Mudashiru et al., 2022)
	Le type de sol	world geologic maps usgs, <a href="https://certmapper.cr.usgs.gov/">https://certmapper.cr.usgs.gov/</a> , Vecteur	(Sarmah et al., 2020; Wu et al., 2023)
	La direction du flux	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Edamo et al., 2022)
	L'accumulation du flux	Modèle numérique du terrain (MNT) - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) : <a href="http://www.usgs.gov">www.usgs.gov</a> /Raster/Résolution spatiale (30 m).	(Mabrouk et al., 2024; Pham et al., 2021)
Enjeux	L'utilisation des terres et la couverture des sols urbains	Données satellitaires (LANDSAT), <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (30 m), Raster.	(Abdelkebir et al., 2021)
	Nombre de Population	Données du recensement	(Leta & Adugna, 2023; X. Wang et al., 2024)
	Densité de population	Données du recensement	(Sun et al., 2022; Zhang et al., 2020)
	Indice bâti par différence normalisée (NDBI)	Données satellitaires (LANDSAT), <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (30 m), Raster.	(Mokhtari et al., 2023)
	L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)	Données satellitaires (LANDSAT), <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (30 m), Raster.	(Arabameri et al., 2019)
	La densité des routes	Données Geofabric open street map (OSM).	(Kittipongvises et al., 2020)
	Distance aux routes	Données Geofabric open street map (OSM).	(Kamel & Hafez, 2021)
	Distance aux hôpital	Données Geofabric open street map (OSM).	(Ye et al., 2022)

## Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine

### III.4 Positionnement scientifique et approches d'étude

L'analyse du contexte et de l'état de l'art permet maintenant d'affiner le positionnement scientifique et la démarche méthodologique adaptée à notre contexte d'étude. Grâce à son positionnement original, il se distingue des publications liées aux sciences du risque (cindyniques) ou à la géographie des risques (humaine ou physique) qui sont encore trop axées sur la vulnérabilité des pratiques (changements d'affectation des sols et urbanisation) sur la prévision des crues, en négligeant la modélisation des causes d'aggravation et les stratégies d'atténuation des risques des inondations. Notre positionnement se concentre sur la question des noyaux de cause de la sensibilité des risques des inondations et la contribution de ce résultat à la proposition des stratégies résilientes d'atténuations face aux ces causes dans la ville de Skikda.

Notre étude examine la compréhension de la gravité du risque des inondations, en se focalisant sur la détermination des origines et les composites globaux à travers l'aggravation de l'aléa et l'accroissement de la vulnérabilité exposé (figure III-4), puis développé des stratégies de résilience, des différentes solutions et actions concrètes pour l'atténuation de ce type de risque. Ce travail assez bien couvert à l'échelle de la ville de Skikda.



**Figure III-4** : les facteurs cruciaux de stress qui amplifiés le risque des inondations urbaines (auteur, 2022).

En considérant à la fois l'évolution des risques liés aux inondations et celle des territoires, l'approche MCDM apparaît comme essentielle pour l'évaluation de ces risques. Dans un premier temps, nous exposons la méthode exploratoire qui consiste en une analyse historique fondée sur une enquête sur plusieurs décennies sur les risques d'inondation dans la zone d'étude, complétée par des cartes d'inventaire des inondations sur plusieurs années.

### Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine

L'étude met en œuvre une méthodologie innovante récemment développée, qu'est une nouvelle combinaison de la théorie grise, la méthode DEMATEL et la méthode ANP (G-DEMATEL - AHP) pour classer le risque des inondation et définir les priorités d'intervention (Saaty, 1977; Zheng, 2023). Aussi comparer la méthode AHP at ANP pour identifier la force des méthodes MCDM

#### III.5 Focalisation de notre étude

Afin d'atteindre cet objectif, trois phases séquentielles et ordonnées ont été suggérées. La figure III-5 illustre le processus d'évaluation de la vulnérabilité et d'amélioration de la résilience, et approfondit de manière plus détaillée l'explication des étapes appliquées.

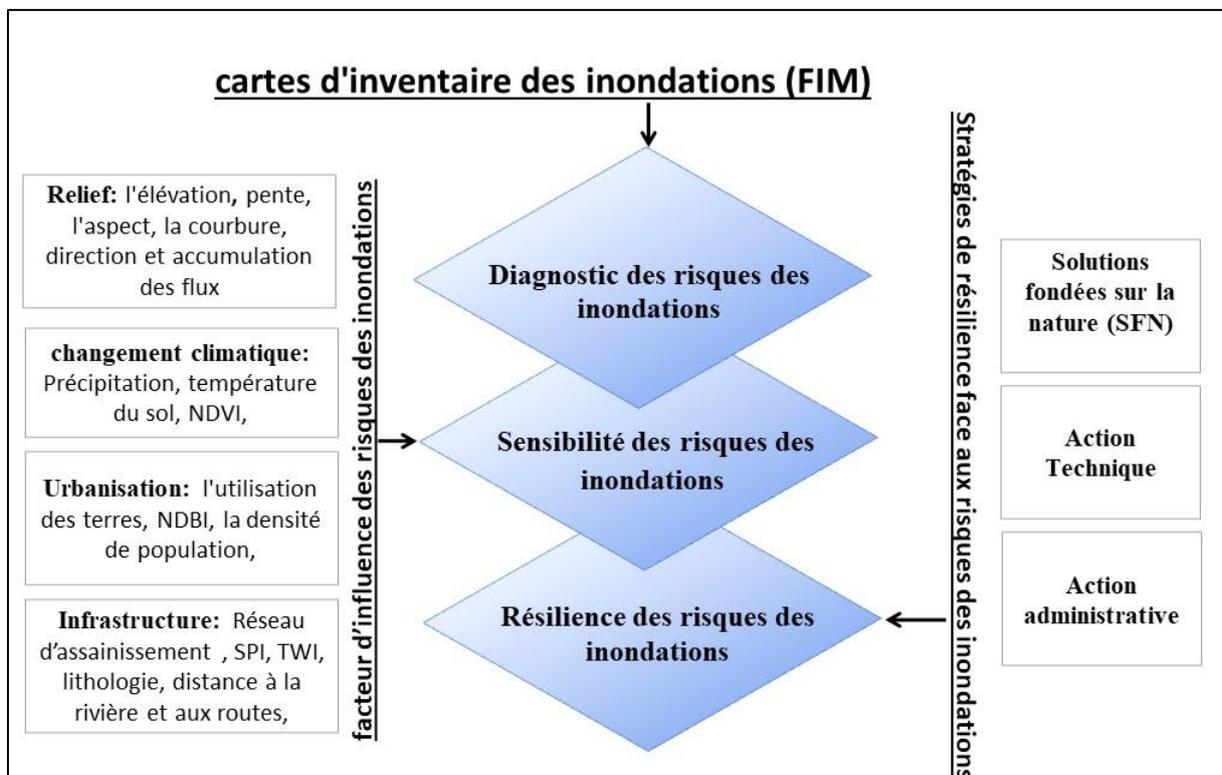


Figure III-5 : Aspect novateur de cette étude (auteur, 2022).

#### Étape 1 : diagnostic de base de la situation actuelle

Une analyse approfondie de la situation actuelle met en lumière les vulnérabilités et les opportunités liées aux risques d'inondation, permettant ainsi de mieux appréhender la complexité des enjeux qui affectent le territoire. Il est essentiel d'examiner les interrelations existantes et les points sensibles face aux risques d'inondation dans la ville de Skikda.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

L'objectif de l'étude est d'examiner de manière exhaustive les conditions géoenvironnementales, météorologiques et anthropogéniques, en tenant compte de la typologie des inondations dans la région étudiée.

Le réseau de drainage du territoire, c'est-à-dire l'ensemble des éléments naturels et artificiels qui drainent l'eau de façon constante. Il est important de considérer que l'eau peut se propager loin en analysant le microclimat, le relief du contour et les ouvrages hydrauliques (digues ou barrages). De plus, la progression des modifications terrestres (l'urbanisation) et la quantité de pluie.

Une analyse historique des événements centennaux liés au risque d'inondation est accompagnée et, comprenant des cartes d'inventaire des inondation vécus (FIM) pour poursuivre vers une meilleure compréhension des aléas.

#### **Etape 2 : l'évaluation de la sensibilité des risques des inondations dans la Ville de Skikda.**

L'élément essentiel de cette étude réside dans l'élaboration d'un modèle conceptuel robuste permettant d'expliquer la sensibilité des risques d'inondation standardisés, afin d'obtenir une vision exhaustive des risques d'inondation dans la ville de Skikda.

Dans cet essai, nous avons développé les facteurs dynamiques physiques vécus se retrouvent fréquemment dans la littérature relative à la propagation inondations, eux-mêmes divisés en variables spécifiques en fonction des causes principales d'aggravation : changement climatique, relief bas, urbanisation et mauvaise état des infrastructures afin d'étudier à la fois les vulnérabilités inhérentes dans la zone d'étude.

#### **Etape 3 : la proposition des stratégies de progression de la résilience face aux risques des inondations**

Cette étape portera à anticiper la capacité de fonctionnement continu des futures des risques inondations à Skikda en proposant des lignes directrices pour une adaptation résiliente face à cet aléa.

### **Chapitre III : Etat de l'art, facteurs de propagation des inondations aux stratégies de renforcement de la résilience urbaine**

#### **Conclusion**

Ce chapitre fournit un état d'art complet et présente principalement

- (1) Les éléments et la méthode utilisés pour évaluer les risques d'inondation permettent de déterminer avec précision les zones sujettes aux inondations et d'identifier les stratégies à adopter en matière de gestion des risques à une échelle géographique.
- (2) Les stratégies de la résilience appliquées aux contextes urbains et propose une série destinée à renforcer la capacité de résilience urbaine.

Cela contribue à élaborer une méthodologie et des outils d'évaluation des risques d'inondation dans la région étudiée afin de mieux appréhender cette menace croissante.

## *Chapitre IV*

### *Présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

### **Introduction**

Skikda, une ville côtière (donnant de dos à la mer) et son armature urbaine est soumise à un tiraillement entre deux collines (Djebel Bouaabas au nord -est et Djebel Bouyaala au sud-ouest), la rendant ainsi plus sujette aux catastrophes hydrologiques. Une analyse approfondie, incluant la confrontation et la superposition des données avec des références spatiales, permet de mettre en évidence les interactions en jeu.

Ce chapitre est divisé en deux parties distinctes dans deux corpus différents. La première partie consiste en un diagnostic de base visant à analyser les risques d'inondation présents dans la ville de Skikda. La seconde se concentre sur une étude approfondie de l'évolution de la ville en relation avec les cours d'eau. Pour collecter les données de base, une variété de sources a été utilisée, telles que des images de télédétection et des entretiens avec des informateurs clés parmi les habitants locaux et les organismes chargés de la gestion des risques d'inondation (pompiers, A.P.C., travaux publics, ONA, direction des ressources en eau et DUCH). Les changements dans les caractéristiques spatiales dynamiques des inondations urbaines ont été examinés dans divers contextes, tout comme les différentes approches pour anticiper l'impact des changements d'utilisation des urbains sur le risque d'inondation.

### **IV.1 Diagnostic de base de la situation actuelle de la ville de Skikda**

En utilisant Skikda comme étude de cas exploratoire, la première étape se réfère à un état de lieu sur la situation actuelle et le risque des inondations dans la ville de Skikda.

#### **IV.1.1 Le contexte géographique**

Située au nord de la wilaya de Skikda, dans le nord-est de l'Algérie, la ville de Skikda est une commune littorale bordant la mer Méditerranée, à 345 km à l'est de la capitale "Alger". Son emplacement est situé à 37° 52' 00'' Nord et 7° 54' 00'' Est (Figure IV-1).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

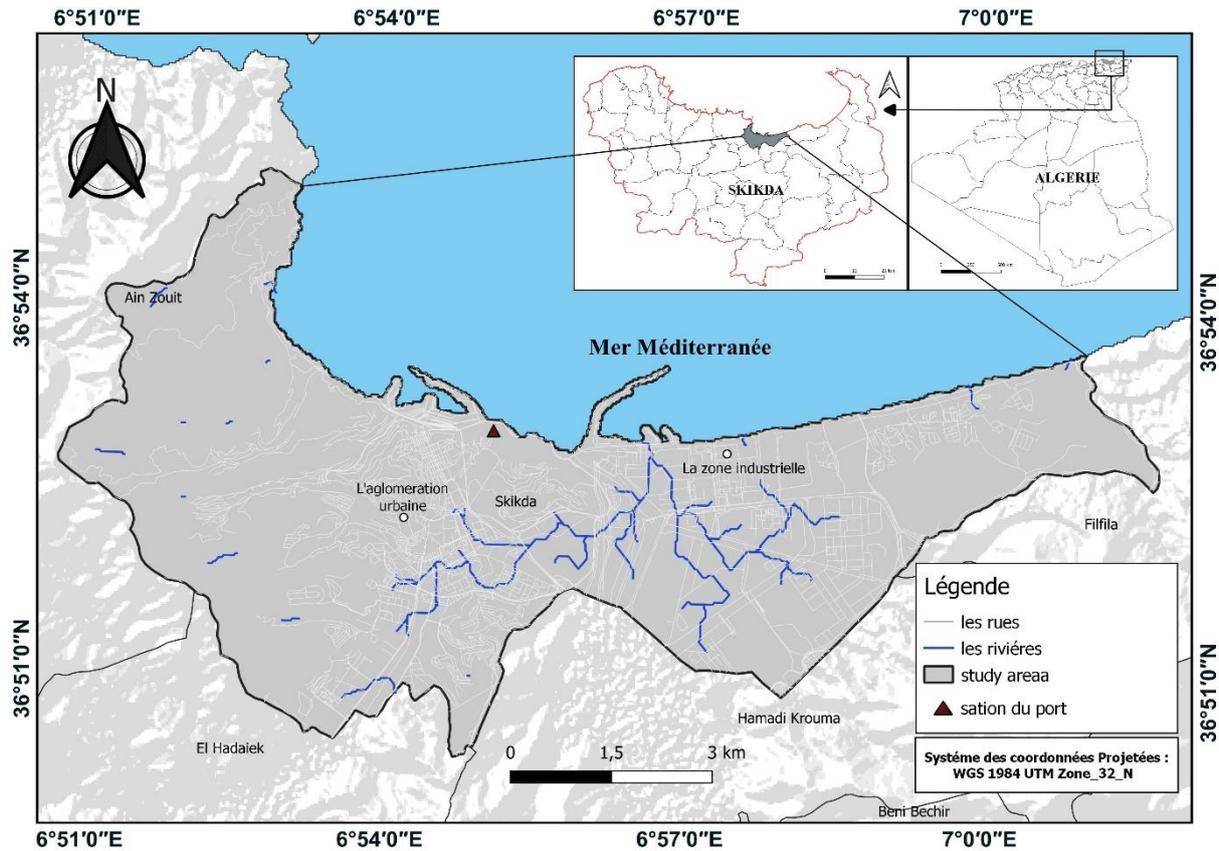
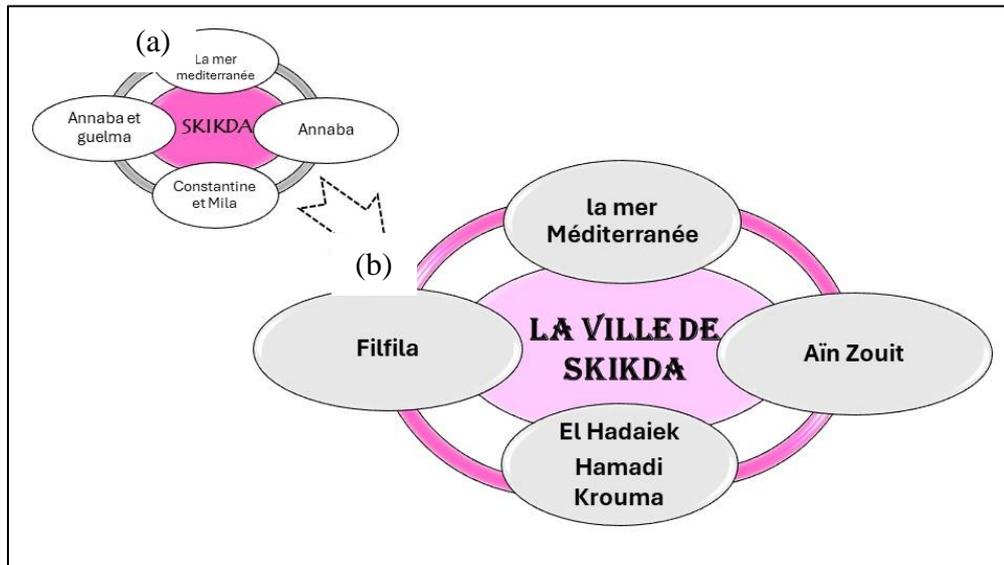


Figure IV-1 : Situation Géographie de la ville de Skikda (auteur, 2021).

Skikda s'étend sur une superficie de 52 km<sup>2</sup> et est située au cœur de la région. Elle est bordée au nord par la mer Méditerranée et partage ses frontières avec les communes de Filfila à l'est, d'El Hadaiek et Hamadi Krouma au sud, et d'Aïn Zouit à l'ouest et au sud-ouest. La population municipale s'élève à 209 920 habitants, représentant ainsi plus de 19% de la population totale de la Wilaya. Cette concentration démographique entraîne une densité de population élevée, même après avoir pris en compte les zones non constructibles et boisées (ONS, 2023).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV-2 :** Les villes limitrophes de la wilaya de Skikda (a) ; Communes limitrophes de la ville de Skikda (b) (auteur, 2020).

En raison de son statut de port et de son importance économique en tant que zone industrielle majeure du Nord-est de l'Algérie, la ville de Skikda occupe une position privilégiée dans l'organisation urbaine. Grâce à un réseau de communication efficace comprenant des voies maritimes (l'Entreprise Portuaire de Skikda), routières et ferroviaires, Skikda joue un rôle crucial en tant que point de départ maritime pour les wilayas voisines, notamment Constantine et Annaba.

Le principal port commercial autonome de la ville est stratégiquement situé en plein cœur du centre-ville, facilitant ainsi les liaisons maritimes de transport de passagers vers les côtières avoisinantes et l'Europe. En outre, la municipalité abrite un terminal pétrolier ainsi qu'un port de pêche, ce dernier étant localisé à Stora. De plus, la ville est pourvue d'une gare ferroviaire à proximité immédiate du port commercial. Autrefois dotée d'un aéroport, la ville a dû interrompre son activité aérienne en raison de considérations de sécurité industrielle, les pistes étant implantées au sein de la vaste zone pétrochimique.

La ville côtière en question possède des plages paradisiaques typiques du sud méditerranéen, ce qui la rend particulièrement animée pendant la saison estivale. De plus, l'accueil chaleureux de la population.

L'un des principaux promontoires de la ville de Skikda est situé sur le golfe de Stora, anciennement connu sous le nom de sinus numidien, s'ouvrant directement sur la mer. Le nom de la commune, Skikda, trouve Fils origine dans Rusicada, un ancien toponyme phénicien signifiant « Cap des Cigales » ou « promontoires du feu » à l'époque romaine.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

### IV.1.2 L'approche historique

Skikda occupe une position géostratégique et son Passé est marqué par l'influence de diverses civilisations. Cette localité et ses environs ont ainsi été le cadre d'événements majeurs qui ont laissé une empreinte indélébile dans l'histoire (cf. figure IV-3). Son expansion urbaine a connu des transformations significatives, tout en étant influencée par le relief, Les cours d'eau et la zone industrielle (Bendjemila, 2018).

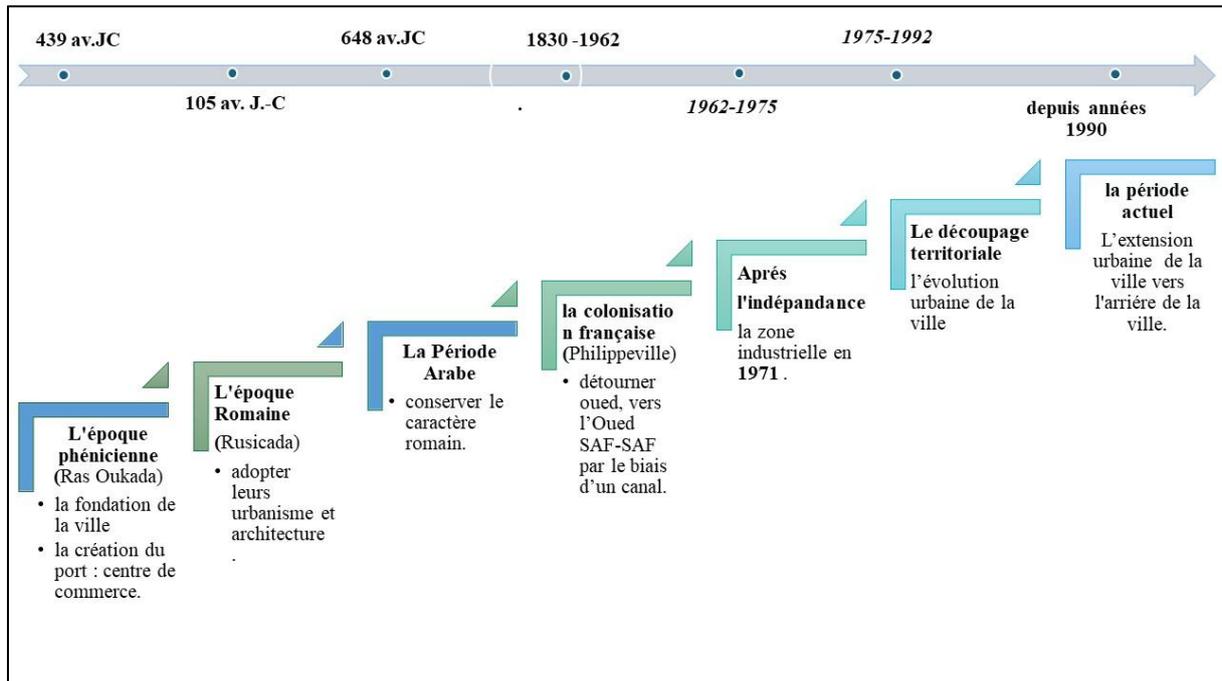
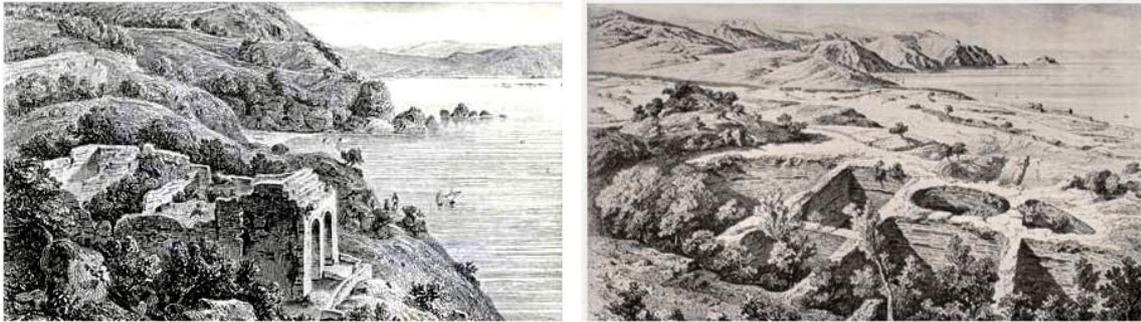


Figure IV- 3 : Frise chronique de l'histoire de la ville de Skikda (auteur, 2021).

#### IV.1.2.1.1 L'époque phénicienne

La fondation de la cité remonte à une époque lointaine, probablement entre le XIIe et le VIIIe siècle avant J.-C., durant l'expansion de la civilisation phénicienne au-delà de ses frontières d'origine. Un ancien poste de commerce phénicien, érigé en surplomb de la mer, fut choisi pour abriter un phare perpétuel destiné à guider leurs navires dans le golfe de Numidie, où les Phéniciens excellaient en navigation maritime, conscients que la prospérité, l'accroissement de leurs richesses et le développement économique résidaient au-delà des frontières maritimes. Malgré cette prospérité commerciale, la période numide se caractérisa par une lacune en matière de réseau routier (figure IV-4).

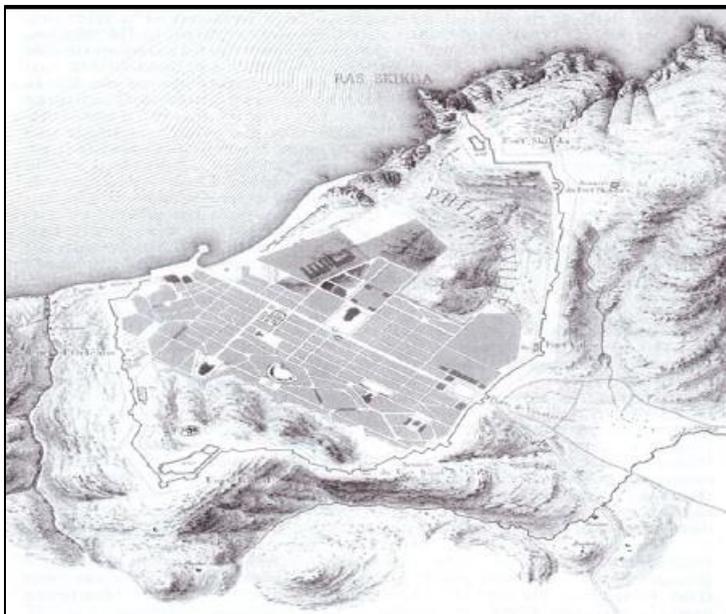
## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



*Figure IV-4 : Ancien comptoir phénicien 2 000 ans av. J.-C (rapport CTC-Est Algérie,2014)*

### IV.1.2.1.2 L'époque Romaine

À cette époque, le port d'Astora était devenu le point de départ des exportations céréalières de la Confédération. En l'an 47 avant J.-C., Rusicade a vu son réseau routier s'étendre rapidement et son port s'agrandir pour soutenir les échanges commerciaux intenses avec les villes avoisinantes, faisant de Rusicade un centre commercial prospère. Dans le cas de Rusicade, le Cardomaximus s'étend du nord au sud le long du lit du Tsaf-Tsaf ou Thapsus (actuellement Zeramna, plus précisément la rue Didouche Mourad), tandis que le Decumanus s'étend d'est en ouest le long de l'actuelle rue Boudjemâa Lebardi, croisant la rue nationale en direction du siège de la direction de l'élève (voir figure IV-5).



*Figure IV-5 : La ville romaine de RUSICADE (CT- Est Algérie, 2014).*

### IV.1.2.2 La Période Arabo- Musulmane

L'arrivée des musulmans dans le Maghreb à partir du VIIe siècle a permis de libérer cette région du contrôle colonial.

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

### **IV.1.2.3 La colonisation française 1830 -1962**

Avec l'arrivée des colons français, la ville de Skikda a été rétablie et la commune de Philippeville a été érigée par décret en date du 09 février 1843. Les Français ont eu l'opportunité d'occuper initialement l'une des deux rives de l'oued Saf-Saf (l'ancienne Thapsus) qui divise les deux vallées où la ville se situe actuellement.

- Au début de la période coloniale, l'habitat civil dans la partie occidentale du Djebel Bouyala était distinct des installations militaires situées dans la partie orientale du Djebel Mouader (Bouabaz), séparées par l'artère principale qu'était le boulevard Didouche Mourad. Depuis 1860, la population civile a progressivement commencé à s'implanter aux côtés des installations militaires.
- À la fin du XIXe siècle, on a observé une augmentation significative de la superficie construite, un développement des infrastructures et une multiplication des équipements publics.
- Entre 1896 et 1936, la population en Algérie a enregistré une croissance démographique significative, passant de 2000 habitants à habitants, en raison d'un taux d'accroissement naturel élevé et d'une forte attractivité pour l'emploi. Par suite de l'occupation presque complète de l'enceinte de l'ancienne Russicade et à la multiplication des constructions dans les faubourgs de l'Espérance et du Beni Malek, une nouvelle voie a été aménagée, à savoir l'avenue Raymond Barrot, actuellement connue sous le nom des allées du 20/08/1955.
- En 1886, la ville mono-axiale a connu une transformation vers une configuration multiaxiale s'étendant dans trois directions distinctes, à savoir : Le parcours allant de la porte de Constantine au faubourg de l'Espérance a pour objectif de réaménager une urbanisation illégale érigée en dehors des frontières de la cité. L'axe vertical reliant le Port de Skikda à Stora et Filfila, déjà établi, a bénéficié d'un nouvel élan grâce à la construction d'infrastructures publiques majeures. Des édifices tels que l'hôtel de ville, la gare routière, la Banque d'Algérie, l'école de Filfila en 1934, la grande poste en pour commémorer le centenaire de l'occupation de la ville, ainsi que le boulevard du front de mer, le palais Bengana ou Meriem Azza en 1937, ont contribué à cette dynamique. Dans les années 1950, l'expansion urbaine a été planifiée à travers des initiatives municipales et privées, telles que le plan de Constantine, qui a donné lieu à la création de nouveaux quartiers pour

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

la population autochtone dans la partie méridionale, incluant les cités Cobra, Namous et les Oliviers.

- En 1957, en conjonction avec le plan de Constantine, la municipalité de Skikda a collaboré avec la Compagnie Immobilière Algérienne (C.I.A) pour ériger un quartier de 1200 logements dans la partie méridionale. Le tracé des rues de Philippeville est en harmonie avec celui de l'ancienne cité romaine de RUSICADE. À la suite de sa déviation de son cours initial par les autorités françaises vers le Saf-Saf à travers un canal, l'oued ZERAMNA a été transformé en une artère principale, donnant naissance à l'actuelle rue nationale, connue sous le nom de rue Didouche Mourad (figure IV-6).

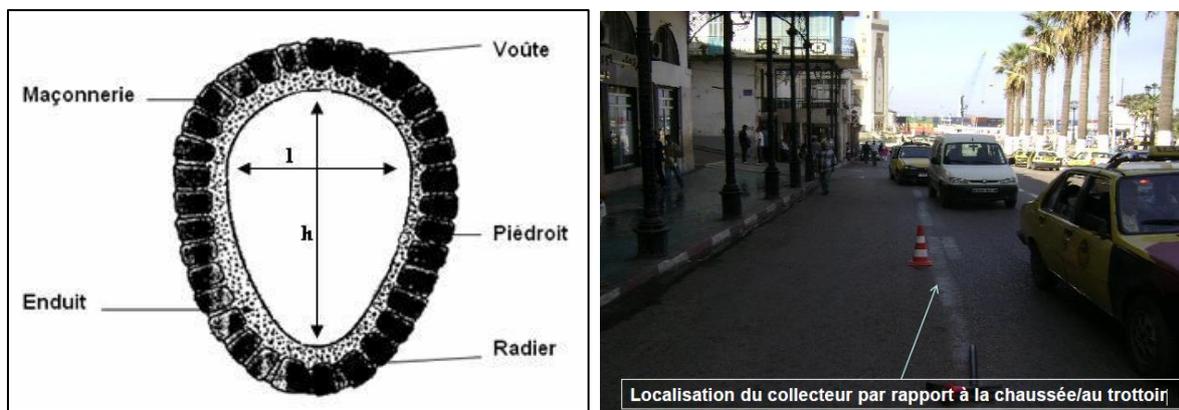


Figure IV-6 : L'ancien emplacement d'oued Zeramena (DUCH-Skikda, 2022).

### IV.1.2.4 Après l'indépendance 1962-1975

Entre 1962 et 1970, la ville de Skikda n'a pas enregistré de changements significatifs sur le plan spatial. La question du logement n'a pas été une préoccupation majeure, car l'exode massif des colons a libéré plus de 6000 logements vacants, suffisants pour accueillir la première vague migratoire vers la ville. Aucun progrès notable n'a été observé dans la localité jusqu'à l'établissement de la vaste zone industrielle en 1971, dans le cadre de la politique nationale d'industrialisation visant à promouvoir l'équilibre régional et le développement de l'axe Est-Ouest. Cette zone, s'étendant sur plus de 1400 hectares de terres agricoles, a été mise en place pour répondre aux besoins de l'industrie. L'afflux migratoire vers la ville a engendré une hausse de la demande en infrastructures, équipements et logements, conduisant ainsi à la formation de cités informelles à Bouabaz et Salah Boulkeroua.

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

### **IV.1.2.5 Evolution et découpage de la ville (1975-1992)**

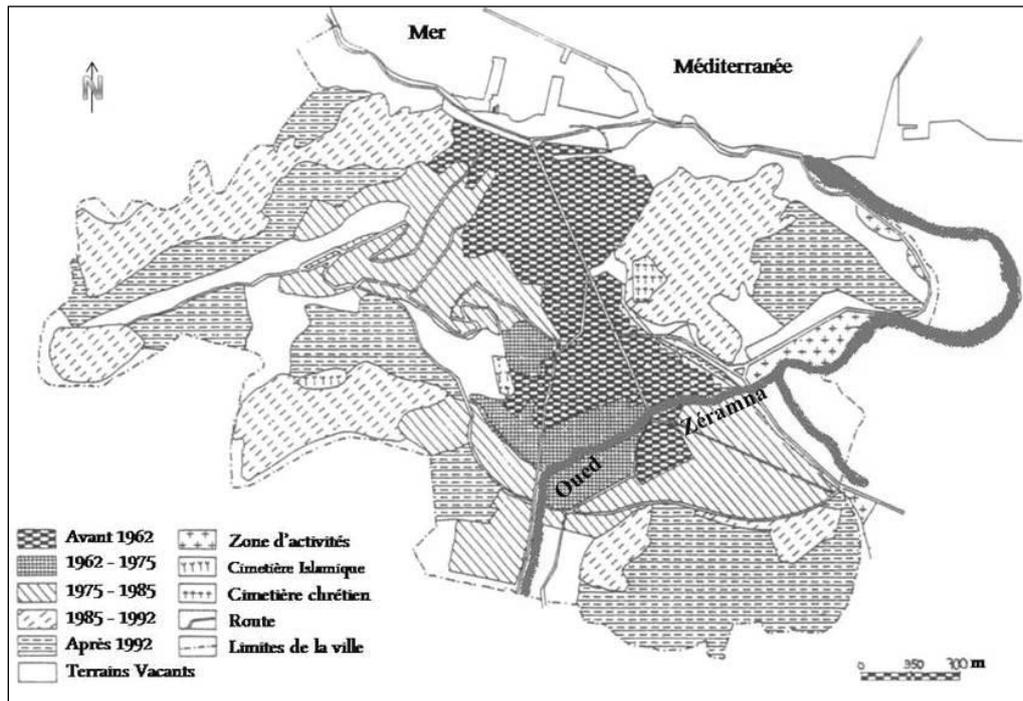
La phase la plus significative du développement urbain de la ville a été marquée par une augmentation de la demande en infrastructures, équipements et logements à la suite de la restructuration administrative et à l'établissement de la zone industrielle. De plus, en raison de l'arrivée continue de travailleurs immigrés à Skikda, d'importants projets de construction de logements ont été lancés pour faire face à cette demande croissante. Parmi ces initiatives, on peut citer les Projets suivants : L'Espoir, comprenant 700 habitations, et 500 autres habitations. Toutefois, la demande étant si forte, de Nouvelles zones d'habitat urbain (ZHUN) ont été créées, telles que la ZHUN de Beni Malek Bouyala s'étendant sur 106,5 hectares, la ZHUN de la briqueterie couvrant 89,84 hectares et la ZHUN d'EzeraMNA s'étalant sur 145 hectares.

### **IV.1.2.6 La Période Actuel**

À partir de 1985, le pays a enregistré une baisse des prix du pétrole, ce qui a eu un impact négatif sur l'urbanisme. L'ingérence de l'État dans les projets d'urbanisation a été supprimée, entraînant l'adoption de la loi sur la propriété (90-25) qui autorise l'acquisition de terrains et la construction de maisons individuelles par les particuliers.

Après 1992, la croissance urbaine entre 1992 et 2000 a principalement été axée sur l'implémentation de mesures d'urgence en matière de logement et sur le développement de logements évolutifs qui se sont développés de manière anarchique, notamment dans le plateau de Après l'année 2000, de nouvelles formes d'habitat ont émergé, telles que les logements de l'agence AADL, les logements sociaux participatifs disséminés dans diverses zones urbaines, ainsi que les logements locatifs situés à deux endroits, à savoir Boulkeroua et MerdjEddib, totalisant 500 logements.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV-7 :** Phases d'évolution du tissu urbain de la ville de Skikda (rapport de protection civile Skikda, 2006).

### IV.1.3 L'aspect climatique

Selon la classification de Köppen-Geiger, le climat de Skikda est catégorisé comme étant de type Csa ce qui correspond à un climat méditerranéen. Ce dernier se caractérise par des étés Chauds et humides, ainsi que des hivers pluvieux Marqués par des précipitations intenses. La température moyenne à Skikda s'élève à 17,2 °C, tandis que les précipitations annuelles moyennes s'élèvent 767 mm.

#### IV.1.3.1 Les Précipitations

Les données mensuelles concernant les précipitations, exposées dans le tableau, révèlent l'existence d'une période de sécheresse s'étalant de juin à août, marquée par ONU niveau de précipitations minimal enregistré en août (0,3 mm) et d'une saison humide couvrant Les autres mois de l'année, avec un pic mensuel en décembre de 178,8 mm. L'analyse de la répartition mensuelle des précipitations révèle clairement que les mois les plus pluvieux s'étendent de septembre à avril, concentrant à eux seuls plus de 80% des précipitations. En contraste, les mois d'été présentent un déficit significatif, avec moins de 5% des précipitations. La moyenne annuelle des précipitations dans cette région est de 647,1 mm (tableau IV-1).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

**Tableau IV-1 : Moyennes mensuelles et annuelle des Précipitations 2012- 2022 (ONM, 2022).**

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M.A
Quintile inférieur	51,3	43,3	26,2	28,2	8,3	0,7	0,0	0,3	30,7	22,7	38,8	92,2	342,7
Médiane	95,9	83,5	55,0	52,1	26,4	5,8	0,7	5,6	53,8	54,0	83,6	130,7	647,1
Quintile supérieur	161,5	143,7	95,9	86,9	62,1	18,4	3,7	19,9	86,5	106,7	155,0	178,8	1119,1
	<p><b>Quintile inférieur</b> : c'est la quantité de pluie qu'on peut dépasser en moyenne quatre années sur cinq.  <b>Quintile supérieur</b> : c'est la quantité de pluie qu'on peut dépasser en moyenne une année sur cinq.  <b>La médiane</b> : c'est la quantité de pluie qu'on peut obtenir en moyenne une année sur deux.</p>												

### IV.1.3.2 La Température

D'après les données du tableau IV-2, on peut observer que la température minimale moyenne enregistrée au mois de février s'élève à environ 8,5°C, tandis que la température maximale moyenne enregistrée en août est de 30,1°C. En ce qui concerne la température moyenne annuelle, elle est de 19,02°C.

**Tableau IV-2: Moyennes mensuelles et annuelle des Températures 2012- 2022 (ONM, 2022).**

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	M.A
T min (°C)	8,9	8,5	10,3	13,1	15,8	19,2	22,6	23,0	20,4	17,6	13,3	10,3	15,25
T moy (°C)	12,6	12,3	14,2	16,9	19,6	23,0	26,1	26,5	24,1	21,6	17,2	14,1	19,02
Tmax (°C)	16,2	15,9	18,1	20,6	23,4	26,8	29,6	30,1	27,7	25,5	21,1	17,5	22,71
Ecart (°C)	7,2	7,4	7,9	7,5	7,7	7,6	7,0	7,1	7,4	7,8	7,8	7,2	7,4

### IV.1.3.3 L'humidité

L'humidité représente le rapport exprimé en pourcentage de la tension de vapeur d'eau observée, à la tension de vapeur de saturation pour une température donnée.

Dans la zone côtière, les valeurs moyennes mensuelles d'humidité relative sont élevées toute l'année et leurs amplitudes saisonnières sont relativement faibles. La moyenne annuelle étant de 71,5% (tableau IV-3).

**Tableau IV-3 : Moyennes mensuelles et annuelle de l'humidité 2012- 2022 (ONM, 2022).**

Mois	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M.A
Humidité (%)	73,8	71,5	72,1	72,4	72,1	72,7	70,1	69,9	71,5	70,8	70,8	70,4	71,5

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

### IV.1.3.4 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Ce diagramme consiste à présenter les précipitations mensuelles avec les températures moyennes, il en résulte la détermination de la période la moins arrosée de la zone d'étude (figure IV-8).

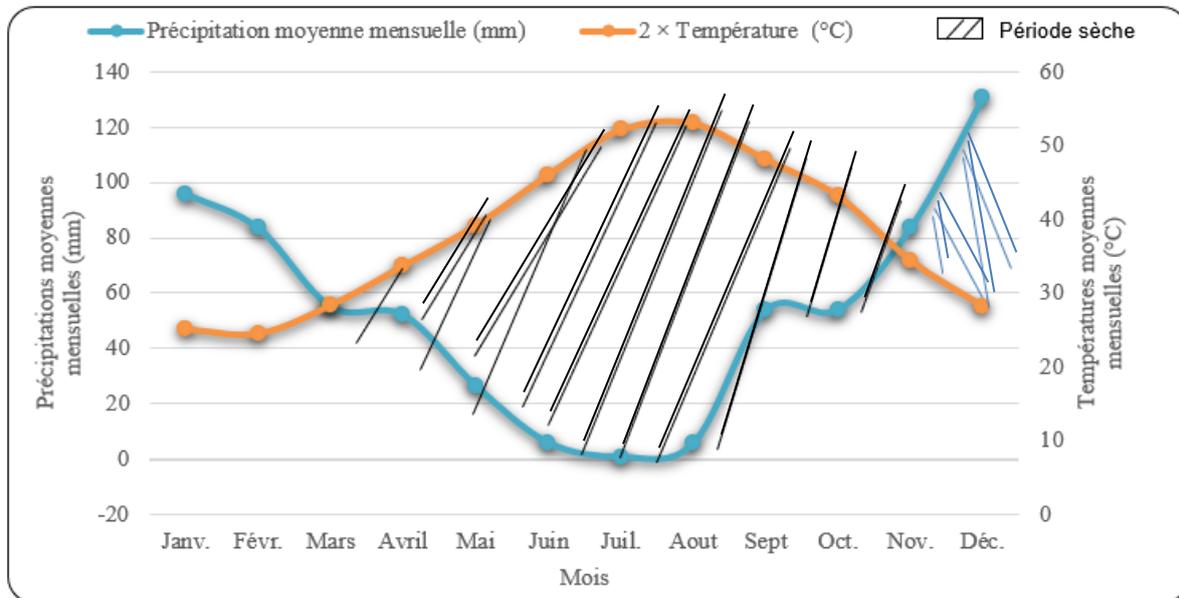


Figure IV-8 : Diagramme Ombrothermique (auteur, 2022).

D'après les relevés climatiques effectués à la station météorologique du port de Skikda et les analyses précédemment mentionnées, il a été observé que le climat de la zone d'étude de Skikda est classé comme Subhumide, caractérisé par un hiver doux et pluvieux, ainsi qu'un été chaud et aride. La saison des pluies s'étend d'octobre à mars, tandis que la saison sèche prévaut le reste de l'année. Les températures maximales demeurent modérées, culminant en août à 30,1°C, avec une moyenne annuelle de 19,02°C. Les précipitations dans la région étudiée sont considérées comme modérées, avec un pic mensuel de 178,8 mm en décembre et un minimum de 0 mm en juillet, pour une moyenne annuelle de 647,1 mm. Selon le schéma, il est clairement observable que la saison sèche s'étale de la mi-mars à la mi-octobre, tandis que la saison des pluies couvre la période de septembre à avril.

### IV.1.3.5 Caractérisation du climat de la ville de Skikda

Skikda est située dans une région bioclimatique caractérisée par des conditions humides, chaudes et douces. La variante chaude prédomine le long du littoral tandis que la variante douce est présente dans les zones montagneuses. La température moyenne à Skikda s'élève à 17,2 °C, avec une moyenne annuelle de précipitations de 767 millimètres.

## **Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda**

Pour caractériser le climat régnant dans la zone d'étude, nous nous sommes basés sur les indices résultants de combinaisons d'éléments météorologiques recueillis (Indice d'aridité de MARTONNE « Ia » (tableau IV-4).

$Ia = P/(T+10)$ , Avec : Ia : Indice de MARTONNE, P : Précipitation cumulée de l'année (mm), T : température moyenne annuelle (°C). Donc : **Ia = 28.20**.

**Tableau IV- 4:** Classification du climat selon MARTONNE.

Type de climat	Hyperaride (Désert absolu)	Aride (Désertique)	Semi-Aride	Sub-Humide (tempéré)	Humide
Ia	$Ia < 5$	$5 < Ia < 10$	$10 < Ia < 20$	$20 < Ia < 30$	$Ia > 30$

En se référant au tableau ci-dessus, notre zone d'étude est caractérisée par un climat subhumide (tempéré) et une tendance vers les inondations.

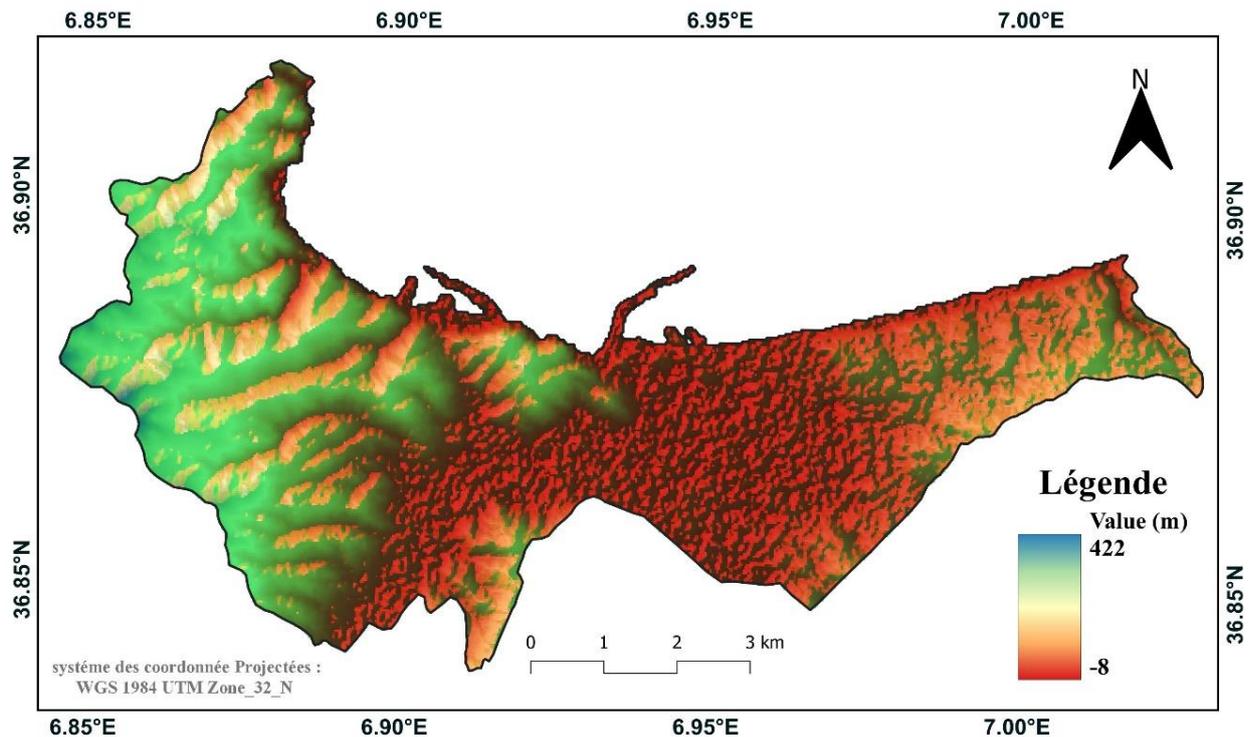
### **IV.1.4 Sources hydrographiques et relief du contour, contraintes pour l'évolution**

La situation géographique de la ville de Skikda est extrêmement complexe, elle est limitée par un ensemble de contraintes naturelles, principalement constituées de montagnes et d'oueds.

#### **IV.1.4.1 Relief du contour**

L'aléa pluvial, caractéristique du pourtour Méditerranée, est aggravé par la topographie des villes (Laplace & Deshons, 2009). La topographie de la zone d'étude est complexe, caractérisée par une pente douce entourée par des terres relativement les hautes montagnes (figure IV-9).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV- 9 :** Le relief de la ville de Skikda (auteur, 2022).

La plupart des terrains plats avec des pentes douces se trouvent principalement au centre de la ville, en direction de la plaine de l'oued Saf-Saf et de la plaine de Zeramna. Ces secteurs sont occupés par la zone industrielle, l'agglomération de Skikda et celle de Hammadi Krouma, ce qui conduit à la formation de Vallées et de plaines sujettes aux inondations, favorisant ainsi Les crues lors des périodes de fortes pluies. Ces zones représentent environ un tiers de la superficie totale de la ville de Skikda, caractérisées par des pentes très abruptes dépassant les 15 %, principalement situées dans les parties Ouest et Sud-Ouest de la ville, avec des altitudes Atteignant 422 au-dessus du niveau de la mer.

### IV.1.4.2 Le réseau hydrographique naturel

Les deux cours d'eau permanents qui coulent à travers la ville de Skikda prennent leur origine à proximité de la mer Méditerranée, à quelques kilomètres de là. À l'est, l'oued Saf-saf divise la zone industrielle en deux parties distinctes, tandis qu'à l'ouest, l'oued Zramena traverse la partie basse et plate de l'agglomération urbaine (voir figure IV-10).

Les deux cours d'eau évacuent rapidement les eaux de pluie vers la mer et les zones basses des pentes avoisinantes. En raison des fortes précipitations, la ville de Skikda est exposée à un risque élevé d'inondation, ce qui a entraîné des niveaux critiques et des mesures de protection renforcées, causant ainsi d'importantes pertes dans divers secteurs.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

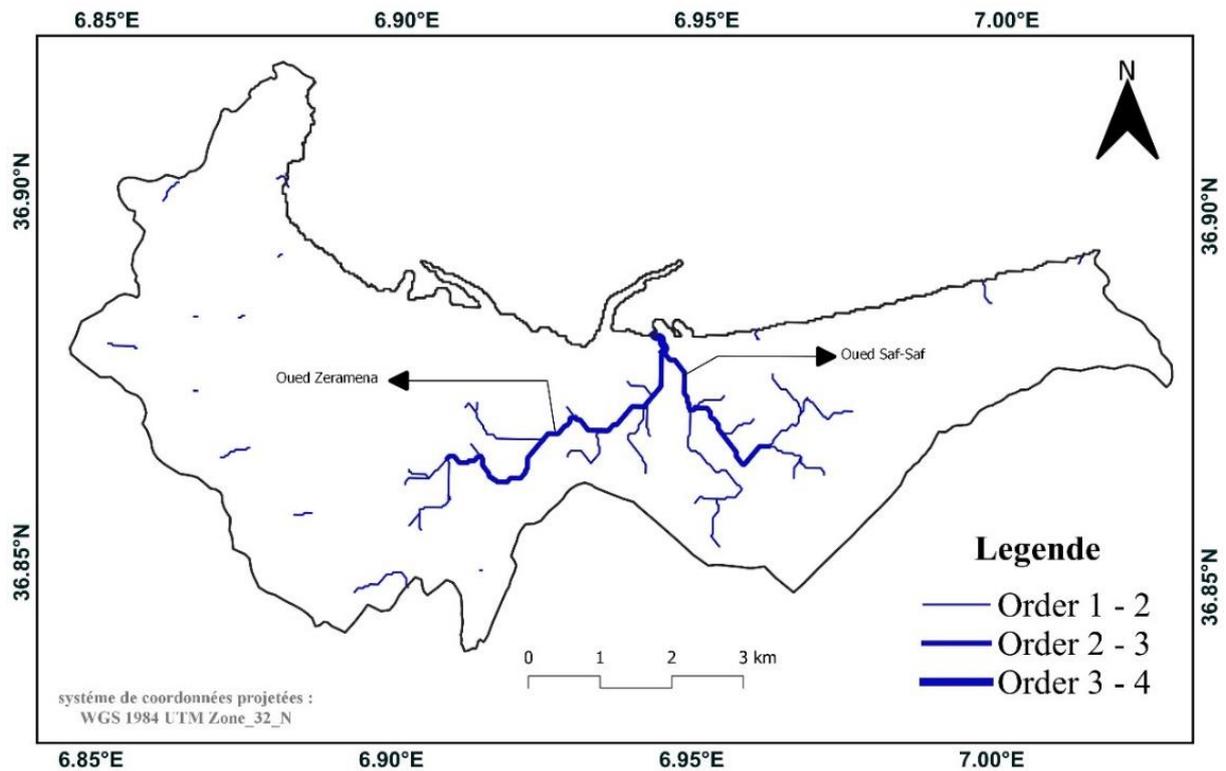
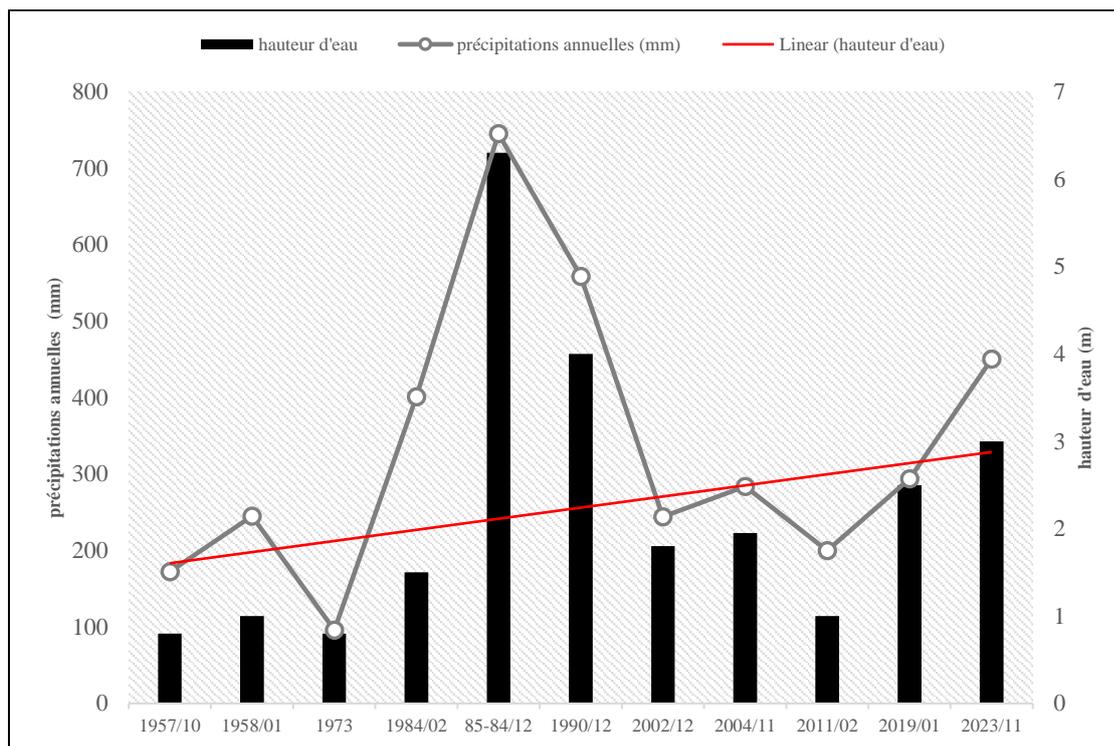


Figure IV-10 : Réseau hydrographique de la ville de Skikda (auteur, 2023).

### IV.2 Etat de lieu du risque des inondations à la ville de Skikda

En raison de sa position géographique et de la pluviométrie importante, la ville de Skikda est l'une des régions les plus arrosées de l'Algérie. Cette pluviométrie s'abat sur la région sous forme d'averses très concentrées dans le temps et dans l'espace provoquant des pluies torrentielles ne pouvant être absorbées par infiltration. Cependant, la plaine inondable a reçu un débit beaucoup plus important. Ce trop-plein est difficile à évacuer et a provoqué une submersion importante. Ce qu'engendrent souvent des inondations à travers la région (figure IV-11).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV- 11** : Évolution des précipitations annuelles totales à Skikda et leur proportion correspondante à la hauteur d'eau de 1957 à 2023 (auteur, 2022).

Malgré des améliorations significatives, la ville de Skikda est fréquemment sujette aux risques d'inondation fluviale, à l'image d'écoulements extrêmes qui se génèrent en amont d'un bassin étendu, actif et de grandes capacités à la mobilisation hydraulique. Les quartiers sensibles sont toujours régulièrement concernés par les inondations qui répète annuellement entre l'automne et l'hiver. Ils ont affecté gravement la vie, les biens et les conditions socio-économiques ; par exemple : pertes humaines et économiques, destruction de bâtiments et d'infrastructures, inondation de la zone industrielle pétrochimique, isolement de la ville de Skikda pendant les jours du risque (figure IV-12).



## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV-12** : Photos des risques des inondation à la ville de Skikda (la protection civile, 2019)

A travers l'histoire des catastrophes, plus de onze inondations ont touché la ville (figure frise technologique des inondations à Skikda), ayant provoqués des dommages importants. Les événements les plus destructeurs ont eu lieu en : 21-23 novembre 1957, 11-17 janvier 1958, 1973, 04 février 1984, 30 décembre 1984/1985 (5 jours ont été célibataire), 23- 25 décembre 1990 (11 jours), décembre 2002, 13- 14 novembre 2004, 2-3 février 2011, 09 janvier. 2019, et celle du novembre 2023 (tableau IV-5). En particulier, les années 1984/1985 a été célibataire d'une inondation qui constitue la plus grande inondation survenue par ses records de précipitations : annuelles, mensuelles et journalières. En 10 jours, Le bassin a reçu une pluviométrie cumulée de 401,3 mm, qui générant un débit de pointe exceptionnel de 404 m<sup>3</sup>/s – 741,3 m<sup>3</sup>/s (Agence nationale des ressources en eau, ANRH). Les impacts ont été graves : pertes humaines et économiques, destruction de bâtiments et d'infrastructures, inondation de la zone industrielle pétrochimique, isolement de Skikda pendant les jours du risque.

**Tableau récapitulatif IV-5**: Séries historiques des inondations les plus graves enregistrées marquant depuis le XXème siècle sur la ville de Skikda (auteur, 2021).

Date	Ordre de pluviométrie	Hauteur d'eau	Zone inonde	Dommages indemnisés
21- 23 Nov. 1957	172.5 mm	0.80 à 1.0 m.	La R.N N° 3, EL Hadaiek et Skikda, les terres agricoles de l'oued Zeramna, l'école d'agricole, le stade du 20 aout 1955. La RN 03 entre SKIKDA et EL HADAIEK, les terres agricoles de part et d'autre de l'oued, l'école de l'agriculture, le stade du 20 Aout 55.	Inondation de 4700 Ha de terres agricoles, les routes SKIKDA-CONSTANTINE et SKIKDA-H/KROUMA Inondation de 4700 Ha de terres agricoles, les routes Skikda Constantine et Skikda-H/Krouma ont été coupé

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

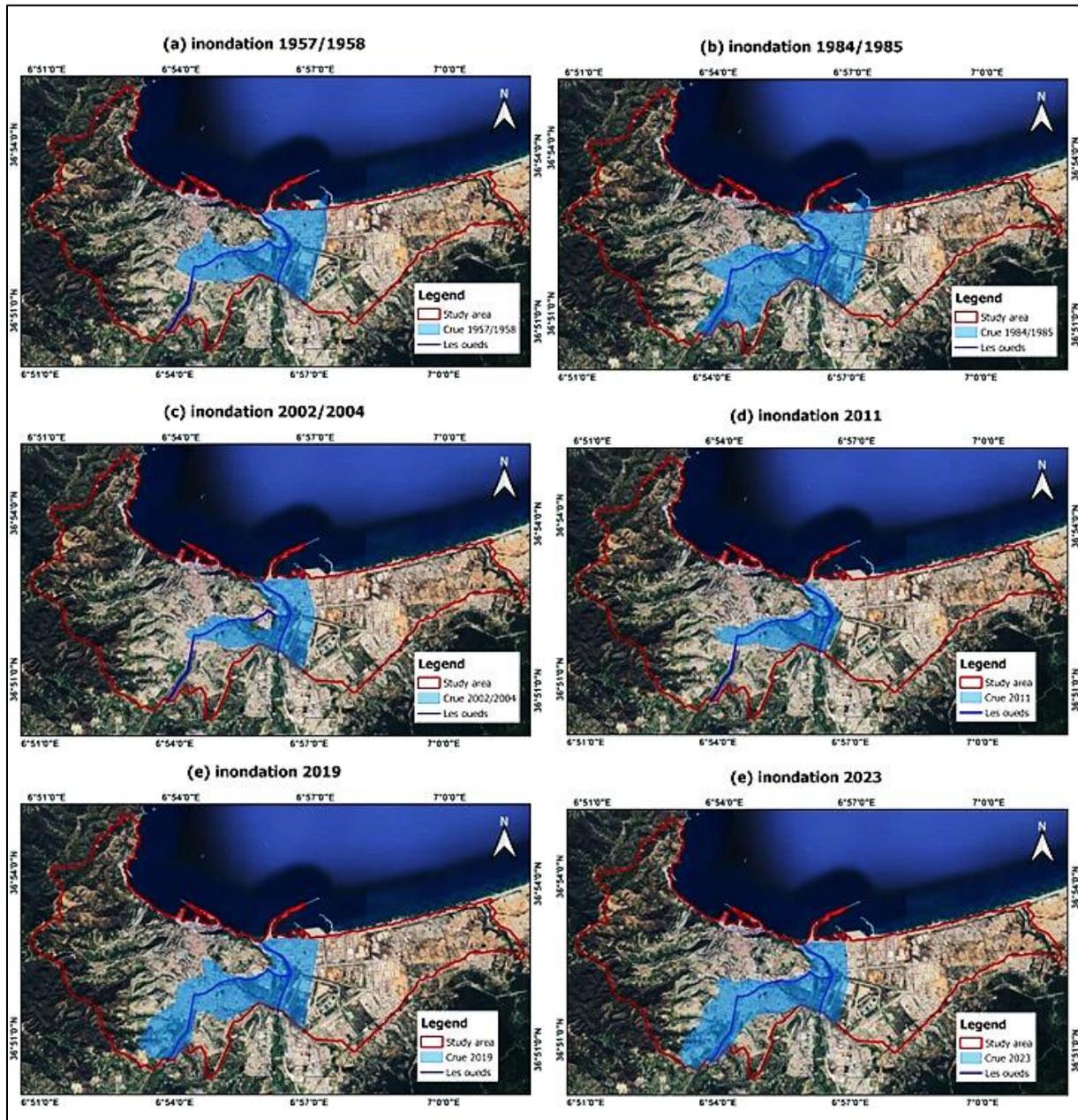
<b>11-17 Janv. 1958</b>	245 mm	1.0 m.	Comparables à celle de l'année 1957.	Les dégâts ont été aussi importants qu'en 1957
<b>03/1972</b>	96 mm	0.80 m	La zone basse se Skikda	Les dégâts ont été aussi importants
<b>04 Fév. 1984</b>	401.3 mm	1.5 m	La zone basse se Skikda	Endommagement de : 450 ha de fourrages, 300 ha d'agrumes et 850 ha de céréales, 174 maisons démolies et 500 familles sinistrées.
<b>30 déc. 84/85  5 jours</b>	Fortes pluies :  190,5 mm – 745,1 m <sup>3</sup> /s)	6.30 m NGA	La zone basse se Skikda	174 habitations détruites et 500 ménages touchés. Détérioration de : 450 hectares de fourrages, 300 hectares d'agrumes et 850 hectares de céréales. 7500 familles touchées, 11 corps retrouvés, destruction de routes, de ponts et de voies ferrées, dégradation d'infrastructures économiques telles que la station d'électricité et le centre téléphonique, et enclavement de la ville de Skikda pendant plus de 10 jours.
<b>23- 25 Déc 1990  11 jours</b>	401,3 mm – 558,6 m <sup>3</sup> /s)	4 m	La zone basse se Skikda	Mort de 11 individus. Dégradation de routes, de ponts et de chemin de fer. Dégradation de structures économiques telles que les stations d'électricité et les centres téléphoniques...  Toute la ville de Skikda a été enclavée pendant plus de 10 jours. 152 familles touchées, trois corps retrouvés, 450 hectares endommagés.
<b>déc. 2002</b>	244 mm	1.8	Les zones basses de Skikda	Endommagées de plusieurs habitations
<b>13- 14 Nov. 2004</b>	284.7 mm	1.95	La zone basse se Skikda	Endommagées de plusieurs habitations
<b>2-3 Fév. 2011</b>	200 mm	2	- Cité Aissa Boukarma - Cité Hamada Boulesnane (ex 700 logement)-Cité des frères Saker, la cité des allées du 20/08/1955- Cité 20 aout 1955	Les ciltés des frères saker, merdjeddibe et hammada boulesnane, sont totalement isolées, avec 490 logements, 700 et 500 logements. De nombreuses administrations et établissements éducatifs ont été fermés.
<b>09 janv. 2019</b>	294 mm	2.5 m	La zone basse se Skikda Cité	Endommagées de plusieurs habitations et la zone industrielle, fermeture des routes principale de la ville.
<b>Nov 2023</b>	460.3 mm	3 m	La zone basse se Skikda	Endommagées de plusieurs habitations

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

### **IV.2.1 Inventaire historique de l'état des risques d'inondation**

Une carte d'inventaire des inondations indique l'emplacement précis des zones inondées lors d'inondations historiques (Wang et al., 2019). Lorsqu'une collecte de données détaillée est effectuée de manière rigoureuse, elle peut fournir des informations essentielles sur la fréquence des inondations. Les données d'inventaire des inondations révèlent une importance significative pour la création de jeux de données et l'évaluation de la précision des Modèles de susceptibilité aux inondations (Merz et al., 2007). Les inondations se manifestent de diverses manières sur le territoire, en fonction de variables telles que les précipitations (leur quantité, leur intensité et leur durée) et les caractéristiques de l'échelle spatiale (comme la nature du sol, la pente, la présence de végétation, la perméabilité, etc.). Étant donné l'absence de données précises sur l'ampleur des inondations en fonction des zones à faible, moyenne et forte exposition, toutes les zones inondables des cours d'eau Oued Safsaf et Oued Zeramna, ainsi que des Chaabat qui découlent de ces cours d'eau, ont été incluses. Par ailleurs, dans le cadre de notre étude, nous avons développé des cartes d'inventaire des inondations (FIM) pour cartographier les zones sujettes aux inondations en recueillant des données sur les événements d'inondation antérieurs, en interprétant des images aériennes et en analysant les données de télédétection à l'aide d'une série d'outils. Ces cartes sont basées sur l'historique des crues de (1957/1958, 1984/1985, 2002/2004, 2011, 2019, 2023) (voir figure IV-13 ; figure IV-14).

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



*Figure IV-13 : Scénario modélisé et correspondance d'inventaire des inondations marquant depuis le XXème siècle sur la ville de Skikda (auteur, 2023).*

On recense plusieurs quartiers affectés par les inondations à Skikda. Ces quartiers inondables exposent la population, les habitations, ainsi que la zone industrielle à des risques importants : **Cité merdj edib**- cité Aïssa Boukarma – cité des oliviers – cité 08 mai 45 – cité hamada boulesnane – **cité les frères Saker** –**cité 20 août 55** – cité les allés – oued el Ouahch – **cité Salah Boulkaroua (gourbis)** – route Zefzaf – place l'abattoir – route inférieur Stora – la petite zone industriel – cité les frères ayachi – route ilots des chèvres – sous boulevard - RN 44 – RN 44 AB .

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

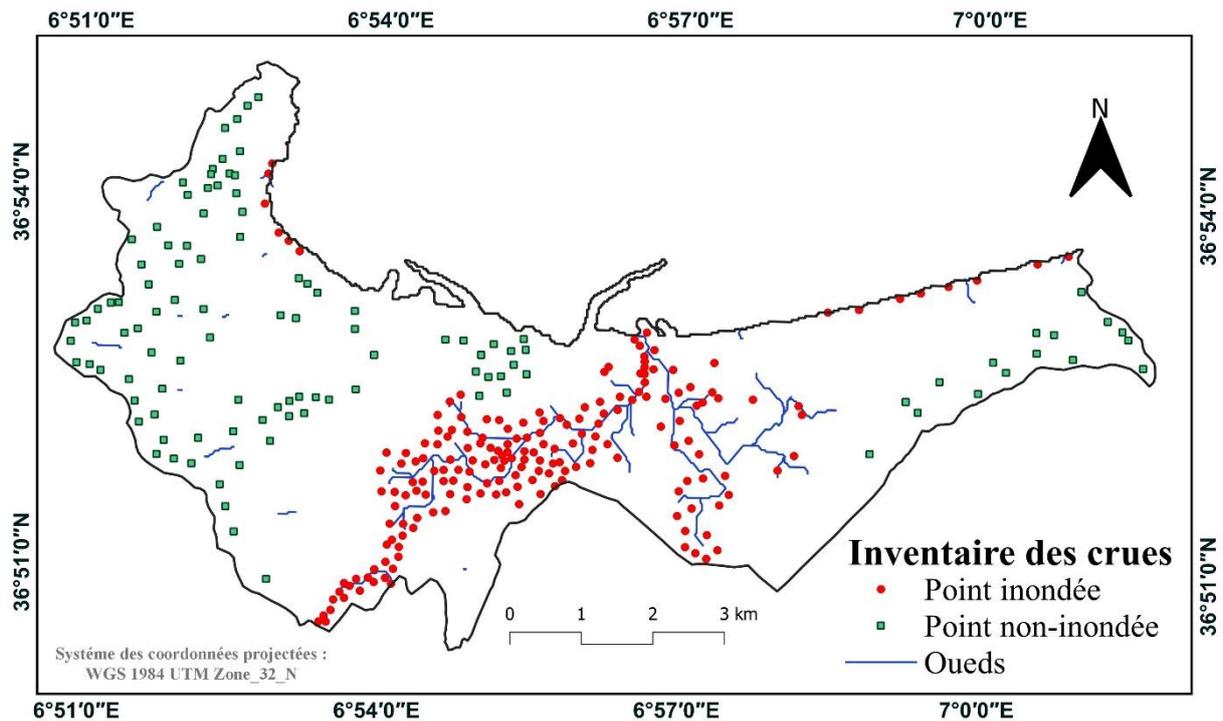


Figure IV-14 : Carte d'inventaire des crues la ville de Skikda (auteur, 2023).

### IV.2.2 Intervention des acteurs locaux de l'état

La gestion des risques urbains est devenue un défi majeur pour les acteurs de la ville, nécessitant l'adoption de nouvelles approches dans la planification et la gestion urbaine. En effet, toute perturbation des fonctions urbaines par un événement aléatoire a des répercussions sur le fonctionnement global de la ville, soulignant ainsi l'interconnexion entre les causes et les conséquences. Après la survenance d'une situation d'urgence, les acteurs urbains impliqués dans les mesures de prévention collaborent en groupes de travail pour coordonner les opérations de secours. Cette implication des acteurs requiert un investissement à la fois personnel et institutionnel. Divers ministères, collectivités locales et organismes publics de la ville de Skikda sont activement engagés dans la prévention des risques majeurs. Le tableau ci-dessous met en lumière les principaux intervenants impliqués.

### Rôles et devoirs des municipalités

Nettoyage des égouts - canaux d'évacuation des eaux - collecteurs - bords de route pour les routes municipales - petits ponts pour les routes municipales - endroits où la saleté est déposée - empêcher le dépôt de matériaux de construction sur les routes, en particulier dans les endroits menacés d'inondation.

## ***Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda***

La vulgarisation des informations et sensibilisation élargie des différents acteurs sur les conséquences en cas de risques d'inondation sont assurées par le greffier général de la commune, qui est le seul responsable des activités de collecte, d'analyse et d'exploitation des informations transmises depuis le lieu du sinistre.

Il complète également les publications officielles envoyées par le Centre de Commandement Opérationnel depuis le lieu de la catastrophe.

### **Direction de l'irrigation de l'état**

Réinitialisation et épuration des cours d'eau des vallées, épuration des barrières d'eau des boues, évacuation des boues des barrages.



**Figure IV-15 :** *Intervention de l'état lors une inondation à Skikda (ONA, 2011).*

**Officier de la grange municipale (Engins et équipements divers), Assigné à :**

- Fournir et armer le dispositif d'intervention par des moyens divers et particuliers, en dehors des missions dévolues à d'autres normes et à ce titre, et selon la nature de l'alerte donnée.
- Effectuer un processus de comptage des moyens différents et spéciaux munis d'une garantie de trafic
- Processus d'intervention.
- Création d'une station de ravitaillement près de la zone touchée afin de stocker du matériel et des équipements variés.
- Assurer un contact permanent avec les différentes structures intervenantes.

Fournir des moyens d'orientation rapide et dans de bonnes conditions des différents équipements et ravitaillements vers la zone sinistrée.

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*



*Figure IV-16 : Intervention de l'état lors d'une inondation à Skikda (protection civile, 2011).*

### **Direction des travaux publics de l'État**

Préparation des bords des routes nationales et nationales, ponts, installations techniques, petits ponts pour les routes nationales et nationales.

### **Office de Promotion et de Gestion Immobilière de l'état**

Vidange des couloirs des immeubles, les différents réseaux, Ambulance et sauvetage.



*Figure IV-17 : Intervention Office de Promotion et de Gestion Immobilière de l'état lors d'une inondation à Skikda (protection civile, 2023)*

### **La protection civile**

Responsable des opérations de recherche, d'ambulance et de sauvetage, et responsable de prendre toutes les mesures nécessaires pour assurer la protection des individus et des biens.

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*



**Figure IV-18 :** *Intervention de la protection civile lors d'une inondation à Skikda (protection civile, 2023).*

### **L'armée**

La loi N°91-23 du 6 décembre 1991 précise le rôle attribué à l'Armée Nationale Populaire en cas de catastrophe, en particulier en ce qui concerne son implication dans des Missions de maintien de l'ordre public, à l'exception des situations exceptionnelles. En effet, l'intervention de l'armée est soumise à une demande préalable du Wali territorialement compétent, conformément à l'article 05 de ladite loi, et ce, dans les circonstances énumérées à l'article 03 de ce même texte, notamment en vue de la protection et de l'assistance aux Populations. Les récentes catastrophes survenues dans notre pays ont mis en lumière l'efficacité de l'Armée Nationale Populaire, notamment à travers la mobilisation répétée de moyens de transport aériens et terrestres, ainsi que d'autres ressources logistiques, lors d'événements tels que ceux de Chlef en 1980, de Bab El-Oued en 2001, de Boumerdès en 2003 et plus récemment de Ghardaïa en 2008.



**Figure IV-19 :** *Intervention de l'Armée Nationale Populaire lors d'une inondation à Skikda (protection civile, 2023).*

## ***Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda***

### **Sûreté Nationale /Gendarmerie Nationale**

Dans le cadre des lois applicables, son rôle consiste à garantir la sécurité des individus et des biens, à préserver la Sécurité publique et à réguler la circulation des individus et des biens dans la zone concernée.

Elle est également chargée d'identifier les personnes et les victimes des criminels et des défunts, et est responsable de la récupération et de la conservation des archives.

### **Secteur de l'hygiène et de la santé, assigné à :**

- Assurer toutes les opérations liées à la santé des personnes.
- Prise de précautions préventives contre les maladies et les épidémies, surveillance sanitaire des denrées alimentaires.
- Propreté environnementale, hygiène individuelle et générale.
- Évacuation médicale.
- En cas d'avertissement, il désignera les points des places disponibles dans les différents centres hospitaliers.
- Mettre en place des équipes médicales pour recevoir les cas urgents.

Tout le matériel médical nécessaire doit être mobilisé pour assurer les soins et limiter la propagation des maladies infectieuses.

### **Télécommunications (Chargée de communication algérienne)**

- Chargé de fournir le dispositif d'intervention et d'organiser les premiers secours avec moyens de communication, et cela dépend de la nature de l'alerte communiquée.
- Organiser et mettre en œuvre rapidement les moyens de communication à la fois filaire et sans fil entre le poste de Commandement et les diverses structures.
- Réinitialisez si possible le réseau.
- Assure le bon fonctionnement de tous les réseaux de communication.
- En charge d'assurer la circulation de l'information et de la sensibilisation des habitants de la zone sinistrée.
- Il est le seul chargé de coordonner, d'analyser et d'exploiter les informations liées à la catastrophe.
- Il simplifie les échanges entre le centre de commandement et la zone concernée.

### **Le service du transport**

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

Responsable de mettre en œuvre un système de sécurité afin d'interférer avec les capacités de transport, il doit :

- Établir une base pour recevoir et fournir des moyens de transport.
- Réaliser un processus d'inventaire continu et assurer la bonne gestion des possibilités de mobilité à notre disposition.
- Compléter une carte des routes et des voies de circulation possibles et mener à bien le processus de création de cette carte.
- Assurer le transport des équipes mobilisées dans les opérations d'intervention.
- Assurer l'évacuation des personnes et des biens de la zone sinistrée vers les abris.
- Le transport des divers équipements et matériels doit être assuré.

### **Médias**

Des publications officielles visant à sensibiliser les citoyens aux risques des inondation auxquels ils sont exposés, aux mesures de protection qui les concernent et aux moyens de se protéger contre eux. Cette information doit contribuer à l'adoption de comportements adaptés aux menaces par la population. Il s'agit d'un des moyens les plus performants de prévention.



*Figure IV-20 : Intervention des médias lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023).*

### **Les citoyens**

D'après les retours d'expérience, de nombreuses opérations de sauvetage ont été effectuées par des voisins et des membres de la famille afin de promouvoir l'engagement des habitants. Les résidents sont préparés à réagir en CAS d'urgence en favorisant leur participation. Afin de les aider à élaborer leurs propres stratégies de protection, il est essentiel de leur offrir des conditions telles qu'un réseau de communication améliorée, un environnement propice aux

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

échanges et à la concertation. Cette formation leur permettra de renforcer leurs compétences citoyennes et de pouvoir prendre soin de leur famille immédiatement en cas de situation critique. Parallèlement, il convient de promouvoir diverses formes d'intervention et de communication.



*Figure IV-21 : Intervention des citoyens lors une inondation à Skikda (protection civile, 2023).*

### **IV.3 Développement du processus d'urbanisation de la ville de Skikda par rapport à la morphologie du site (djebel Bouaala et Bouabaz) et les cours d'eaux.**

La croissance urbaine non maîtrisée, conjuguée à une forte croissance démographique, a eu des répercussions néfastes sur les ressources naturelles, en particulier l'eau et l'utilisation des terres, notamment les ressources rares et précieuses telles que les terres agricoles. Cette situation a conduit à une dépendance alimentaire du pays et a également exacerbé son déficit commercial.

Une attention particulière est portée à la dynamique spatio-temporelle de l'évolution du risque d'inondation, en mettant en lumière les endroits où les changements se produisent dans les composants du système et où ils deviennent pertinents pour l'évolution du risque d'inondation.

#### **IV.3.1 La restitution de l'évolution urbaine des événements politiques et de la planification des infrastructures**

La ville peut être divisée en quatre grands anneaux :

## ***Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda***

### **IV.3.1.1 Le noyau historique 1930-1962**

Le schéma urbain du centre-ville colonial de "Philippeville", caractérisé par sa disposition régulière et hiérarchisée, était implanté dans une vallée orientée selon un axe Nord-Sud, héritée de l'ancienne cité romaine de "Rusicade". La cité s'est développée sur deux collines escarpées, Bouabaz à l'Est et Béni Malek à l'Ouest, séparées par le ravin de "oued ZERAMNA" d'une largeur de 30 mètres. Un boulevard a été aménagé sur l'ancien lit de l'oued Zeramena, principal exutoire des eaux provenant des bassins versants avoisinants, formant ainsi l'axe structurant de la ville. Des interventions telles que la rectification du cours d'eau (par la suppression de méandres pour créer un canal rectiligne) et son approfondissement ont été réalisées pour maîtriser les crues mineures en régulant le niveau de l'eau. Ces altérations du cours d'eau ont pour effet d'aggraver les crues soudaines pour les résidents situés en aval.

### **IV.3.1.2 L'expansion au sud de la ville**

L'expansion représentée par les grandes structures des Allées remonter au 20 août 1955. Ces espaces ont fait l'objet de réorganisations et d'aménagements significatifs. La période allant de 1962 à 1980 a été caractérisée par une augmentation de la demande en infrastructures, équipements et logements par suite de la division administrative et à l'établissement de la zone industrielle en 1971 (occupant une superficie de 1400 hectares sur des terres agricoles à haute valeur), en accord avec la politique d'industrialisation du pays visant à assurer un équilibre régional. En 1975, en raison de l'afflux de main-d'œuvre vers Skikda, d'importants programmes de logements ont été mis en place pour répondre à la demande croissante. Parmi ces initiatives, on peut mentionner les projets suivants : L'espoir, comprenant 700 habitations, et 500 autres habitations. Toutefois, en raison de la forte demande, de nouvelles zones d'habitat urbain (ZHUN) ont été établies, notamment la ZHUN de Beni Malek Bouyala couvrant une superficie de 106,5 hectares, la ZHUN de la briqueterie s'étendant sur 89,84 hectares et la ZHUN d'EZERAMNA occupant une superficie de 145 hectares.

### **IV.3.1.3 L'expansion vers l'est et l'ouest**

Les terrains difficiles d'accès, principalement occupés par des habitations individuelles, constituant un tissu urbain datant de la période 1980-1992, marquée par la promotion des lotissements visant à encourager l'ensemble de la Population algérienne à participer à l'effort national de construction de logements. L'urbanisation croissante a été alimentée par l'immigration vers les zones urbaines, entraînant une demande accrue en infrastructures, équipements et logements, ce qui a conduit à l'émergence de cités spontanées telles que

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

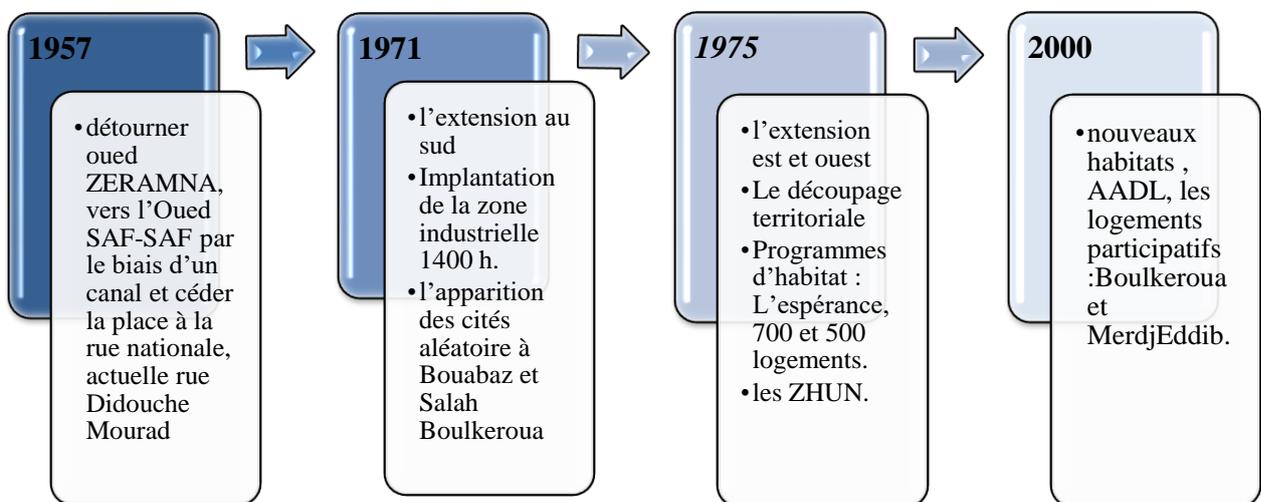
Bouabaz et Salah Boulkeroua. À partir de 1985, la chute des prix du pétrole a eu des répercussions négatives sur le secteur de l'urbanisme. L'intervention de l'État dans les projets d'urbanisation a été progressivement abandonnée, aboutissant à l'adoption de la loi sur la propriété (90-25) qui autorise chaque individu à acquérir un terrain et à y construire une maison individuelle.

### IV.3.1.4 L'extension urbaine dans la période (1992-2000),

La mise en place de solutions d'urgence en matière de logement a été une caractéristique marquante. Cela s'est notamment manifesté à travers la construction de logements évolutifs connaissant une croissance anarchique, comme c'est le cas dans le plateau de Boulkeroua.

### IV.3.1.5 La période actuelle

Après l'an 2000, de nouvelles formes d'habitat ont été développées, notamment les logements de l'agence AADL, les logements sociaux participatifs (répartis de manière dispersée à la recherche de terrains disponibles) et les logements locatifs sur 2 sites (500 logements) à Boulkeroua et MerdjEddib.



**Figure IV-22** : Résumé des événements politiques, des mandats et de la planification des infrastructures (auteur, 2021).

### IV.3.2 Changement spatio-temporelle de l'expansion urbaine par rapport à la morphologie du site et les cours d'eaux (1955- 2024)

L'urbanisation, une cause anthropique, évolue rapidement et a été considérée comme un élément non négligeable dans l'altération de l'utilisation et de l'occupation des sols LULC (Liping et al., 2018).

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

Les modèles LULC sont capables d'analyser les changements passés et de simuler efficacement les changements futurs, simplifiant ainsi la complexité de LULC. La combinaison des techniques de télédétection (RS) et de système d'information géographique (SIG) a été une approche puissante pour la quantification des phénomènes spatiaux et temporels, une vue large, une couverture étendue, un temps de répétition court et une collecte de données en temps réel, à moindre coût et avec une meilleure précision (Kantakumar & Neelamsetti, 2015; Kordelas et al., 2018; Lo & Choi, 2004; Notti et al., 2018). L'évaluation de l'occurrence des changements dans les modèles d'expansion urbaine nécessite de procéder à une classification d'images afin d'améliorer les intensités spectrales des caractéristiques de la carte (Mabrouk et al., 2024). Pour saisir le processus de l'urbanisation de Skikda et les contraintes qui y sont liées Aux différentes phases de la construction de la ville, les images Landsat ont été catégorisées à différents moments en fonction de l'évolution de l'occupation du sol (1955, 1985, 2005 et 2024) à l'aide de la méthode de classification d'images superficielle et de la plate-forme Google Earth Engine. Grâce au traitement des images Landsat, trois aspects de l'utilisation sols, à savoir les terrains bâtis, la végétation et les terrain nues, ont été analysés.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

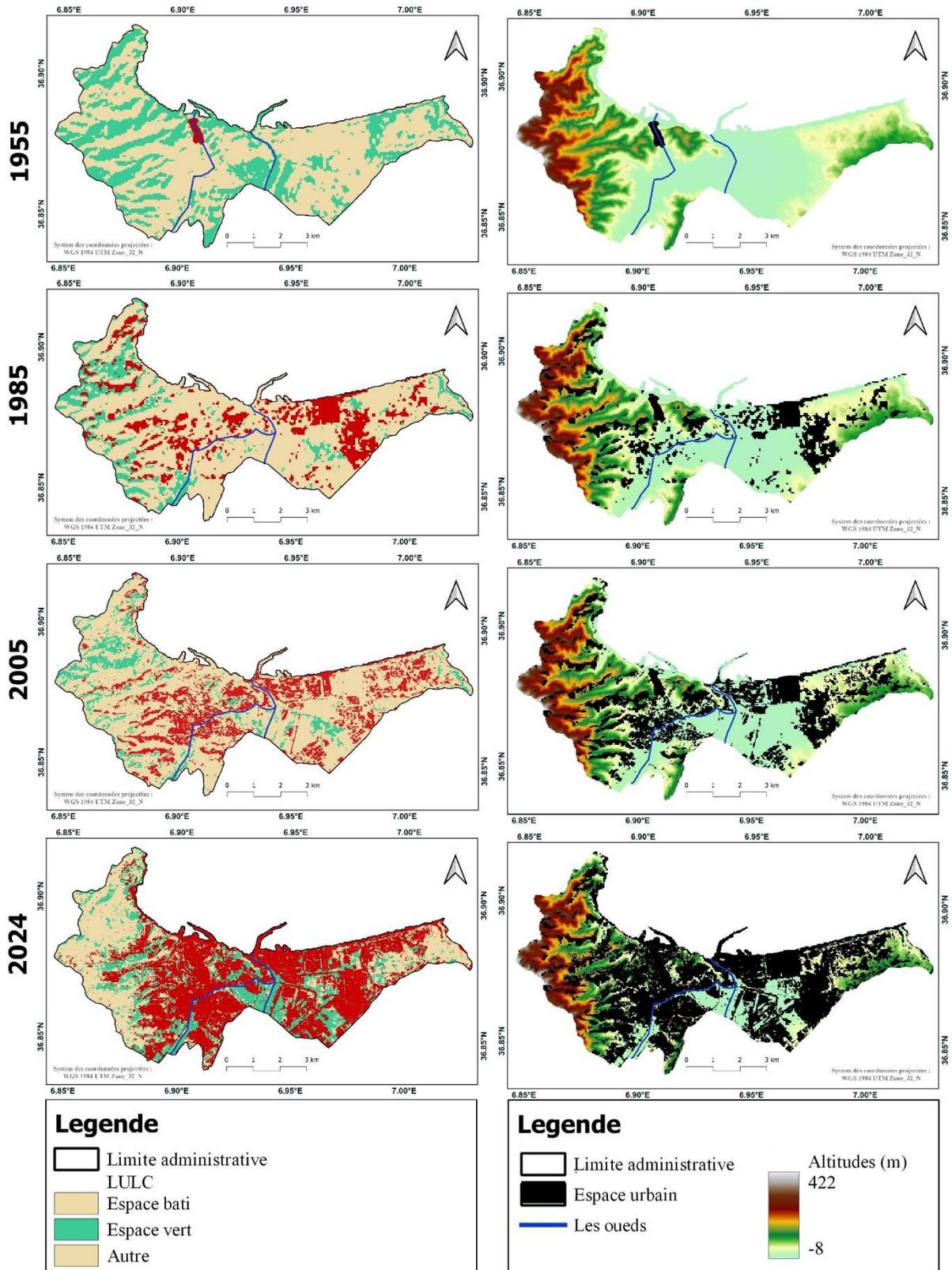


Figure IV-23 : Scénarios de l'utilisation des terres de la ville Skikda par rapport à la morphologie du site et les cours d'eaux (1955-2024) (auteur, 2022).

## ***Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda***

En raison de l'augmentation de la population des communes de la wilaya et extra-wilaya, ainsi que de l'augmentation naturelle de la population intra-muros, la ville de Skikda continue de progresser en consommant rapidement les terres agricoles. La ville est entourée de trois côtés : À l'Est, on peut observer la zone pétrochimique et son port, ainsi que l'Oued Saf-saf. À l'Ouest : les reliefs, Au Sud : grâce à des terres cultivées. Cependant, en raison des difficultés rencontrées, l'expansion urbaine s'est concentrée sur une seule option au sud de la ville dans la plaine et vers les terrains plats de la vallée des Oueds (Saf-saf et Zeramna), autrefois utilisés pour l'agriculture. Les changements dans les paysages naturels et l'utilisation et l'occupation des sols sont liés à l'urbanisation.

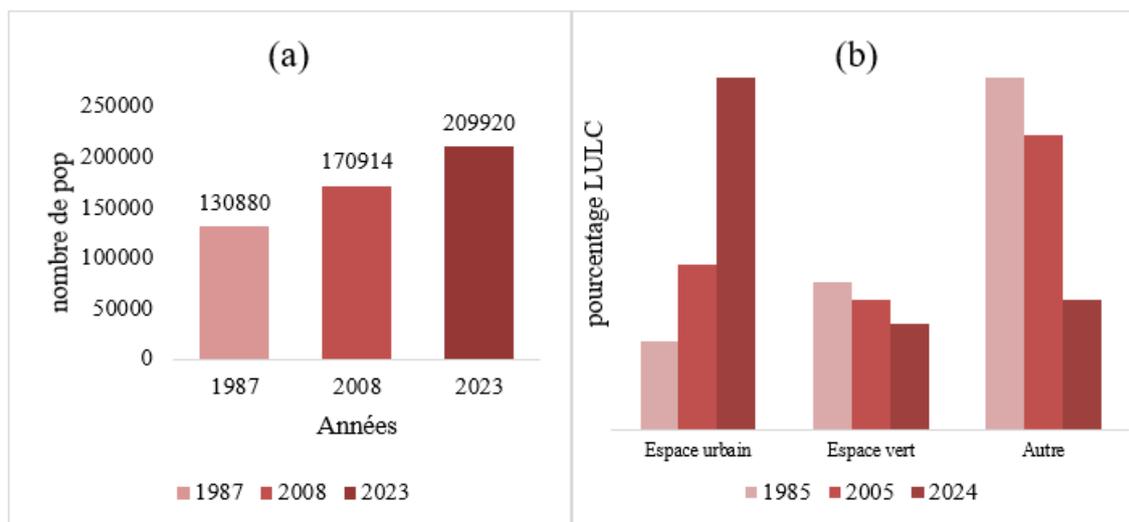
### **IV.3.3 Analyse de la croissance démographique par rapport les changements spatiales dynamiques**

En ce qui concerne la répartition de la population au sein des territoires examinés, on observe une concentration importante à Skikda, ce qui se traduit par une densité de population élevée avec une moyenne de 3287 habitants par km<sup>2</sup> pour la ville de Skikda. La population de Skikda a connu une croissance significative au cours des vingt dernières années, entraînant ainsi une augmentation notable de sa population actuelle.

La croissance démographique est principalement attribuable à son rôle central dans la région, où la majorité de la population rurale et des districts avoisinants se concentre dans la ville en d'un niveau de vie, d'opportunités d'emploi et d'infrastructures universitaires améliorés. Cette croissance démographique entraîne également la conversion de terres naturelles et ouvertes en un environnement urbain. Cependant, malgré cette augmentation de la population au cours des dix dernières années, les contraintes et les risques inhérents à un espace urbain demeurent inchangés.

La croissance démographique est responsable de la conversion des espaces naturels et ouverts en environnements urbains. Parallèlement, la population croissante des dix dernières années demeure concentrée dans un espace à la fois périlleux et restreint.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda



**Figure IV-24:** Croissance de la population de Skikda (a) ; Diagramme montrant le pourcentage de la répartition d'utilisation des terres de zone d'étude en 1985, 2005 et 2024 (b) (auteur, 2022).

### IV.3.4 Synthèses

La ville de Skikda est plus exposée aux tempêtes de pluie désastreuses en raison de sa situation géographique spécifique, de l'accélération de l'urbanisation actuelle, de la consommation des meilleures terres agricoles et de l'occupation des plaines inondables. Les zones où les personnes et les propriétés sont plus concentrées présentent une exposition plus élevée aux inondations.

**Tableau IV-6:** Analyse SWOT de la ville de Skikda (auteur, 2022).

SWOT	Atouts	Faiblesses	Opportunités	Menaces
<b>Infrastructure</b>	Importantes infrastructures grise et techniques, lui permettant jouer un rôle majeur dans l'économie nationale.	<p>Dommages et manque d'entretien aux infrastructures grises.</p> <p>Manque au niveau d'infrastructure verte qui réduise le ruissellement.</p>	L'intégration des infrastructures grises avec la nature (infrastructure vertes).	<p>Les infrastructures ne sont pas encore adaptées à l'augmentation du ruissellement des ruisseaux venant des montagnes et aux précipitations extrêmes.</p> <p>Débordement des infrastructures de drainage urbain dû au manque de drainage adéquat</p>

## *Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda*

				dans les zones urbaines.
<b>Conditions topographiques</b>	Skikda, Ville tellienne, possède une diversité aux conditions topographiques.	L'agglomération urbaine bâti sur une pente douce entourée par des terres relativement hautes montagnes.	Facilité des interventions de planifications futures grâce à la topographie plate.	La nature du relief procure des inconvénients pour l'extension de la ville vers les zones basses et les terres agricole, qui aggrave les risques des inondations.
<b>L'accumulation des eaux</b>	Un réseau hydrographique dense, les rivières de surface et les canalisations souterraines constituent le principal système de drainage urbain.	Ces deux oueds canalisent rapidement l'eau de pluie vers la mer et le bas de ces pentes.	Implantation d'une ceinture interconnectée d'espaces vert le long des rivières traversant le milieu urbain.	Jet des déchets ménagers et industriels (Embâcle) dans les oueds de la ville. Les oueds est traversé l'agglomération urbaine basse et plate.
<b>L'intensité pluviométrique</b>	La ville caractérise par les fortes intensités des précipitations hivernales.	Les précipitations plus intenses ont un effet direct sur la capacité ruissellement. La pluviométrie s'abat sur la région sous forme d'averses très concentrées dans le temps et dans l'espace provoquant des pluies torrentielles ne pouvant être absorbées par infiltration.	La forte précipitation a davantage sur l'agriculture et le stockage des eaux pluviales pour d'autres utilisations.	La plaine inondable a reçu un débit beaucoup plus important. Ce trop-plein est difficile à évacuer et a provoqué une submersion importante, causant de lourdes pertes dans les bas endroits.
<b>Occupation du sol</b>	Variation de l'utilisation des terres et l'occupation des sols, ce qui aide aux développements de l'économie de la ville.	Les terrains constructibles imperméables sont la principale utilisation et la couverture de verdissement sont faibles.  L'utilisation concurrente des terres en bordure les	La maîtrise de l'urbanisation rapide et l'intégration du développement urbain durable.	L'occupation des plaines inondables, la population relativement dense et la consommation des meilleures terres agricoles rendent la ville vulnérable aux risques des inondations.

## Chapitre IV : présentation de la zone d'étude, la ville de Skikda

		deux rivières.		
<b>Planification future</b>	Fournissant des solutions naturelles, flexibles et adaptables basées sur la nature.	Le cout relativement élevé des travaux. Un délai plus long par rapport aux solutions grises. La limitation des législations existantes.	Une situation future avec la même infrastructure et les mesures de contrôle des inondations envisagées.	L'espace physique limité dans la ville à cause de la consommation d'espace.

### Conclusion

La ville de Skikda, objet de notre analyse, a été confrontée, à l'instar de nombreuses autres localités du pays, à un processus d'urbanisation non contrôlé, à la perte de Terres agricoles et à la dégradation environnementale causée par l'expansion rapide de divers secteurs industriels, contribuant ainsi à l'aggravation du problème des Inondations urbaines ces dernières années.

En raison de sa localisation, la ville de Skikda est fréquemment exposée à divers niveaux de risques d'inondation fluviale, allant de faibles à très élevés. Cela est illustré par des écoulements extrêmes qui se produisent en amont d'un bassin hydrographique étendu, actif et d'une grande capacité de mobilisation hydraulique. Cependant, ces crues se propagent en aval vers des zones urbaines mal aménagées et fortement susceptibles aux inondations. L'analyse hydrologique rétrospective a été utilisée pour délimiter les zones inondables, révélant que de vastes zones abritant d'importantes activités socioéconomiques sont exposées de manière significative au risque d'inondation.

# *Chapitre V*

## *Outils et méthodes*

## **Introduction**

Le choix d'une méthode pour étudier un objet scientifique est déterminé par la problématique, les objectifs visés et la perspective adoptée pour examiner le phénomène (Voiron-Canicio, 2005). L'évaluation de la vulnérabilité aux inondations est perçue dans le domaine de l'aménagement du territoire comme un système complexe qui requiert une approche systémique. Les interactions complexes entre ces divers facteurs engendrent un degré élevé d'incertitude, ce qui complique la prise de décisions (Toubin, 2018). Pour appréhender cette complexité de manière approfondie, il est crucial d'analyser de façon exhaustive les causalités circulaires et l'incertitude intrinsèque liée au contexte des inondations et aux enjeux locaux.

L'objectif de la cartographie des risques est de repérer les zones risquées, d'évaluer la sécurité des établissements ou encore de favoriser le développement local. Par conséquent, elle joue un rôle essentiel en sensibilisant principalement les autorités locales aux menaces et aux conséquences graves des inondations (Cerri et al., 2021).

### **V.1 Méthodes d'évaluation de la susceptibilité des risques des inondations**

L'évaluation précise des risques d'inondation constitue une tâche complexe et fondamentale dans le processus de réduction des conséquences des phénomènes naturels (Rincón et al., 2018; UNISDR, 2019), et a été abordée à travers diverses approches (Mudashiru et al., 2021; Hassan et al., 2019; Yu et al., 2023). Diverses méthodes ont été mises en œuvre pour évaluer la vulnérabilité d'une région aux inondations (Pham et al., 2021). Tehrany et Kumar (2018) ont identifié quatre catégories principales de modèles pouvant être utilisées, à savoir les modèles quantitatifs (Dodangeh et al., 2020; Youssef et al., 2016), qualitatives (Stefanidis & Stathis, 2013), hydrologiques et l'apprentissage automatique.

Les méthodes MCDM de plus en plus utilisées pour évaluer des risques d'inondation en vue de gérer les activités de gestion des catastrophes dans les zones inondables. L'utilisation du modèle de prise de décision à critères multiples (MCDM) en conjonction avec les SIG conduit à l'identification de solutions de décision spatiale optimales (Benaïche et al., 2024; Fernández & Lutz, 2010; Mokhtari et al., 2024) ( figure V-1).

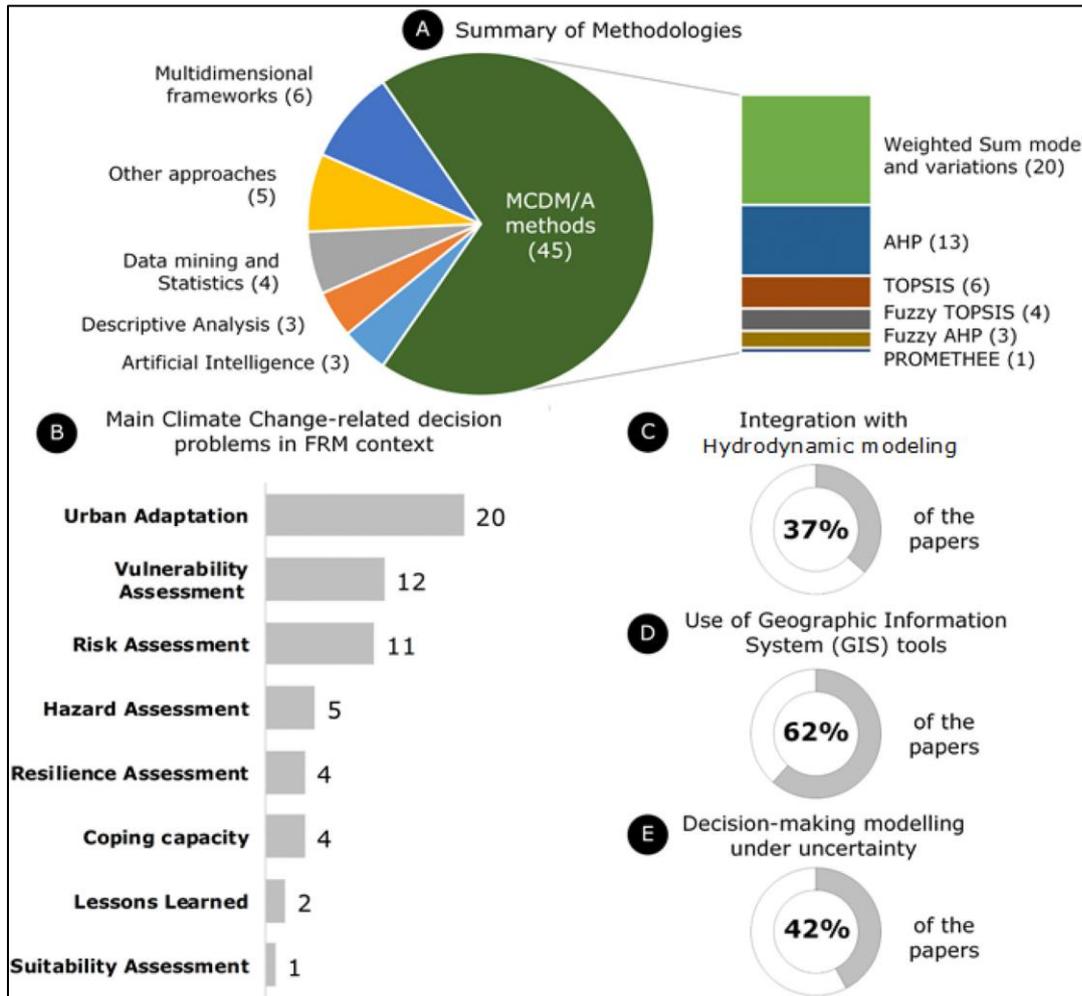


Figure V-1 : principaux paramètres de prise de décision pour les problèmes de GRF liés au changement climatique et à la modélisation hydraulique (Da Silva et al., 2020).

## V.1.1 Méthode MCDM (la méthode d'analyse décisionnelle multicritère)

### V.1.1.1 MCDM : généralité

En tant qu'approche importante, la méthode d'analyse décisionnelle multicritère (MCDM) a été appliquée dans les domaines d'évaluation des risques d'inondation. L'analyse MCDM permet d'identifier les priorités des risques des inondations en effectuant de multiples comparaisons par paires. Cette évaluation relative des risques basée sur l'opinion subjective des experts permet de mieux comprendre la gravité des risques et, partant, d'élaborer des plans d'atténuation des risques appropriés (J. S. Jeong et al., 2023).

Au cours des dernières années, le domaine de la prise de décision multicritère a fait l'objet d'une attention considérable dans l'évaluation de la susceptibilité aux inondations. Pour ces

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

raisons, de nouvelles méthodes MCDM se développent et que les anciennes méthodes s'améliorent. Cela crée de la confusion pour le décideur dans le choix d'une technique appropriée pour les caractéristiques typiques du problème auquel il est confronté. Il existe plusieurs approches chaque approche a ses propres aspects positifs et négatifs, il est devenu assez déroutant de reconnaître les meilleures méthodes appropriées et acceptables à l'échelle mondiale pour l'étude de la susceptibilité aux inondations (Malik et al., 2020). Les processus hiérarchiques analytiques (AHP), processus de réseau analytique (ANP), technique de préférence d'ordre par similitude avec la solution idéale (TOPSIS), élimination et traduction de la réalité par choix (ELECTRE), VIsekriterijumska optimizacijai KOMPromisno Resenje (VIKOR), méthode d'organisation de classement des préférences pour les évaluations d'enrichissement (PROMETHEE), pondération additive simple (SAW), optimisation multi-objectifs sur la base de l'analyse des ratios (MOORA), Évaluation proportionnelle complexe (COPRAS), Évaluation proportionnelle complexe avec relations de gris (COPRAS-G), Analyse du rapport d'évaluation du poids par étapes (SWARA) sont peut-être les méthodes les plus largement acceptées.

### **V.1.1.2 MCDM : approches diverses**

Plusieurs recherches ont exposé dans ce contexte leurs stratégies de réduction de la vulnérabilité aux inondations. Il y a plusieurs perspectives sur les avancées dans le domaine des techniques MCDM. Des techniques comme ISM, DEMATEL et GTA prennent en considération les relations entre les critères, tandis que la plupart des autres techniques comme AHP, LINMAP, VIKOR, etc. se focalisent sur les relations linéaires. Les méthodes comme ELECTRE, PROMETHEE et TOPSIS reposent sur le surclassement des critères et peuvent être considérées comme des techniques appartenant à un seul groupe. SAW est la méthode la plus basique et elle est utilisée dans d'autres techniques MCDM plus avancées. Au cours des deux dernières décennies, de nombreuses techniques MCDM ont été développées, notamment VIKOR, DEMATEL, LINMAP, SWARA, WASPAS, ce qui peut être considéré comme des avancées récentes dans le domaine des techniques MCDM.

Certaines techniques ont des similitudes en ce qui concerne l'analyse des critères et des alternatives. À titre d'exemple, TOPSIS et VIKOR se servent du concept de solutions idéales positives et négatives afin de trier les différentes options. De la même manière, GTA et ISM peuvent être perçus comme les méthodes qui permettent principalement aux décideurs de visualiser la solution sous forme graphique. Les méthodes comme PROMETHEE et

## Chapitre V : Outils et méthodes

ELECTRE ont des similitudes en ce qui concerne la hiérarchisation des alternatives en utilisant un processus de sur-classement. La technique comme LINMAP intègre les propriétés de certaines techniques comme AHP et TOPSIS/VIKOR pour combiner l'utilisation de la comparaison par paires avec la mesure de distance euclidienne (idéal positif et négatif). La technique comme WASPAS est une combinaison unique de modèle de somme pondérée (WSM) et de modèle de produit pondéré (WPM) et peut être considérée comme utilisant les propriétés de la méthode SAW (J. S. Jeong et al., 2023).

### V.1.1.3MCDM : Processus de prise de décision typique

Le processus de prise de décision devient complexe lorsqu'il exige l'évaluation de plusieurs critères qui sont de nature conflictuelle et qui ont des poids différents. Pour ce faire, il faut mettre au point des méthodes capables de concilier les critères et les questions et préoccupations alternatives et réelles des décideurs. Un processus de prise de décision typique peut être visualisé comme le montre la Figure V-2.

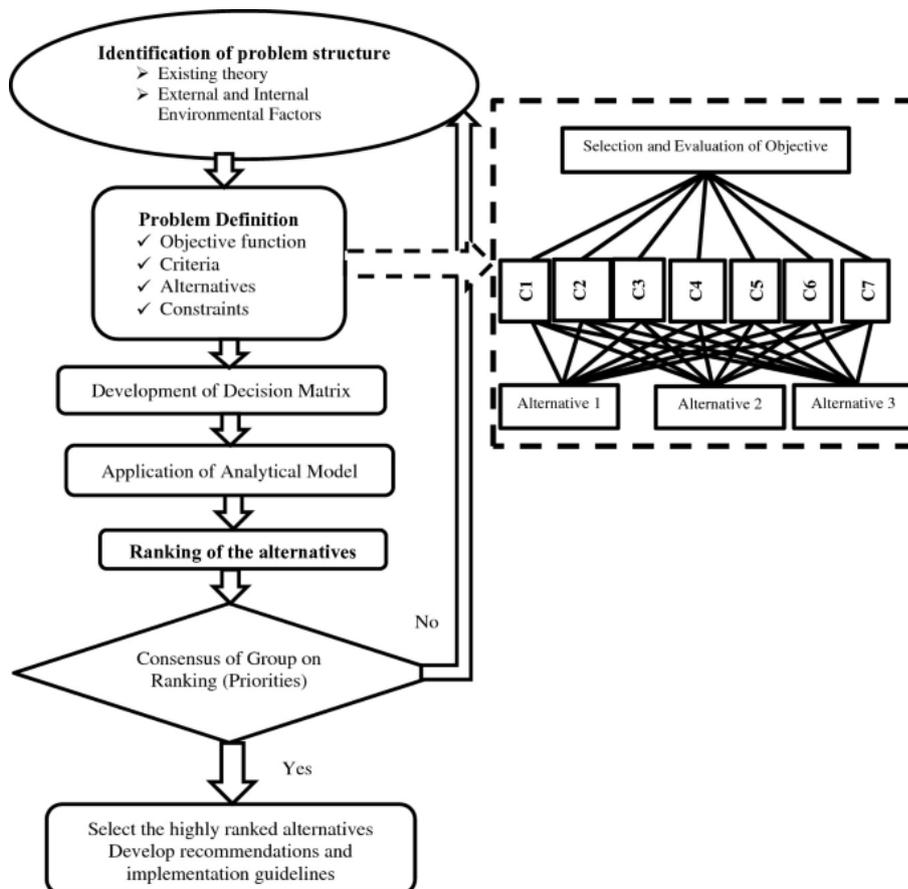


Figure V-2 :Processus de prise de décision typique (Thakkar, 2021a).

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

Les problèmes liés à l'évaluation de critères multiples et de solutions de rechange sont généralement considérés comme faisant partie du domaine de la prise de décision multicritère (MCDM). Les problèmes dans ce domaine peuvent être classés en deux grandes catégories : (i) la prise de décision à attributs multiples (MADM) qui prend en compte un nombre limité d'alternatives prédéterminées et de cotes de préférence discrètes et (ii) la prise de décision à objectifs multiples (MODM) qui tient compte des problèmes liés à la conception et à la planification pour en tirer une solution optimale d'un ensemble d'objectifs pour un ensemble d'interactions prévalant entre les contraintes. Le processus d'analyse MCDM est régi par trois étapes :

- (1) Identification des critères pertinents et des alternatives à partir de la théorie et de la pratique existantes.
- (2) Attribution de valeurs numériques aux critères afin d'indiquer leur importance relative et de quantifier les impacts des alternatives sur ces critères.
- (3) Utilisation d'une procédure mathématique formelle d'analyse des valeurs numériques afin de déterminer le classement (priorités) des alternatives.

### **V.1.1.4 MCDM : limites de l'utilisation**

Les approches MCDM sont principalement régies par les opinions subjectives des experts et leurs intuitions et, par conséquent, les biais dans le jugement et l'incohérence limitent l'acceptabilité des résultats MCDM. Aussi, La difficulté à structurer une hiérarchie appropriée conduira à une sélection ou à une hiérarchisation erronée des alternatives et la principale limite de l'utilisation de la technique MCDM.

Les résultats avec la technique MCDM alternative sont difficile de valider, car les propriétés clés et les étapes suivies par les différentes techniques MCDM sont différentes. Cela crée un problème dans la généralisation des résultats.

### **V.1.2 Processus hiérarchique analytique (AHP)**

#### **V.1.2.1 AHP : généralité**

L'AHP est une technique de prise de décision multicritère (MCDM ) et multi-objectifs développée en 1970 par Thomas L. Saaty (T. L. Saaty, 1977). La technique du processus hiérarchique analytique (AHP) est bien connue et très populaire, elle a fait l'objet d'une

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

attention considérable dans divers domaines, notamment l'évaluation des risques (R. W. Saaty, 1987).

L'AHP est un modèle basée sur une évaluation quantitative des poids relatifs ( $W_i$ ) des facteurs influents à l'aide d'une matrice de préférence (comparaison par paires), en raison de leurs avantages de fonctionnement simple et de leur précision relative (Torfi et al., 2010).

### **V.1.2.2 AHP : Principes de base**

La technique s'adapte à la structure hiérarchique linéaire des problèmes. Il peut inclure les intrants sous les deux formes, comme la mesure réelle de critères et l'évaluation subjective par des experts qui capture leur satisfaction, leurs opinions, leurs croyances et leurs priorités liées à toute décision. AHP tente d'identifier l'importance relative de chaque élément d'une décision en comparant chaque paire d'alternatives à chaque niveau hiérarchique. La technique permet donc d'examiner de multiples alternatives et de fournir au décideur des priorités relatives des différentes alternatives envisagées. Un décideur a une facilité à convertir son opinion subjective en opinion objective tout en mettant en œuvre l'AHP pour un problème réel. Cela donne confiance au décideur que ses intuitions et son expérience ne sont pas négligées pour arriver au classement final des alternatives (Lyu et al., 2020).

L'AHP commence par la construction d'une matrice de décision représentant l'importance relative de divers « attributs » les uns par rapport aux autres (figure V-3).

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & a_{1j} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{21} & 1 & a_{23} & a_{2j} & \dots & \dots \\ 1/a_{13} & 1/a_{12} & 1 & 1/a_{12} & \dots & \dots \\ 1/a_{1j} & 1/a_{2j} & 1/a_{3j} & 1 & \dots & a_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 1 & \dots \\ 1/a_{1n} & \dots & \dots & 1/a_{jn} & \dots & 1 \end{bmatrix}$$

**Figure V-3 :** Exemple d'une Matrice de comparaison par paires AHP (auteur, 2024).

Il est effectué ces comparaisons par paires à l'aide de l'avis d'experts pour tous les critères comme « beaucoup plus important », « plus important », etc., comme l'indique le tableau.

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

**Tableau V-1 :** Échelle fondamentale pour les comparaisons par paires : échelle de valeurs (T. L. Saaty & Vargas, 1984).

Degrés d'importance	Définitions	Description
<b>1.0</b>	Importance égale : importance égale des deux éléments.	Deux éléments fournissent une influence similaire à l'objectif.
<b>3.0</b>	Importance modérée : un élément est un peu plus important que l'autre.	La connaissance et la décision favorisent quelque peu un facteur par rapport à un autre.
<b>5.0</b>	Forte importance : un élément est plus important que l'autre.	La connaissance et la décision favorisent fortement un facteur par rapport à un autre.
<b>7.0</b>	Un élément est beaucoup plus important que l'autre.	Un facteur est très fortement préféré et est mesuré plus qu'un autre ; sa domination est démontrée dans la pratique.
<b>9.0</b>	Un élément est absolument plus important que l'autre.	La capacité et la découverte aident difficilement un facteur par rapport à un autre.
<b>2, 4, 6, 8</b>	La même importance.	Quand un compromis est nécessaire.

Par la suite, les pondérations relatives des facteurs sont calculées pour le problème considéré. Cela aide un décideur à comprendre les priorités relatives des alternatives et à sélectionner celle ou l'ensemble des alternatives qui se classent en tête de liste (Wang et al., 2024).

Enfin, il est très important de calculer un ratio de cohérence (CR) dans l'analyse AHP. Ce ratio fournit une mesure de la cohérence du jugement pris en compte dans le cadre de l'AHP par rapport à celle d'échantillons de jugement complètement aléatoires. Si la valeur de CR dépasse significativement 0,1, le jugement est considéré comme étant très proche d'être purement aléatoire, ce qui peut nécessiter la répétition de l'ensemble du processus ou l'abandon comme futile. Il est en fait plus facile d'obtenir une cohérence parfaite par le biais de calculs du reste du jugement lorsqu'un nombre minimum requis de jugements a été effectué (Zhou et al., 2018). Un processus typique de l'AHP est illustré à la Figure V-4.

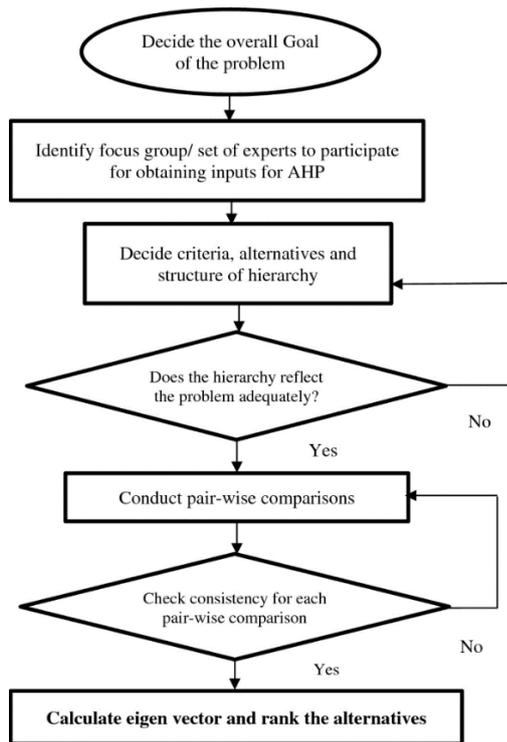


Figure V-4 : Les étapes de la méthode AHP (Thakkar, 2021).

### V.1.2.3 L’AHP : avantages

L’AHP est la préférée parmi de nombreuses approches MCDM en raison de l’éligibilité et de la commodité de la méthode (Mokhtari et al., 2023). La structure simple et la faible complexité mathématique de cette technique en font la technique la plus préférée dans divers secteurs, notamment l’ingénierie, les soins de santé, la finance, les politiques publiques et les environnements commerciaux (Hussain et al., 2023). Au cours des deux dernières décennies, les chercheurs et les praticiens ont mis en œuvre avec succès cette technique pour une variété de prises de décision qui impliquent la « sélection », « l’évaluation », « l’analyse avantages-coûts », « les allocations », « la planification et le développement », « la priorité et le classement », « la prise de décision », « la prévision » et « la santé et les domaines connexes ». En raison de sa simplicité et de sa flexibilité dans la prise en compte de divers critères contradictoires, cette technique est intégrée avec succès à d’autres approches telles que la « programmation en nombres entiers », le « déploiement de fonctions de qualité (QFD) », la « méta-heuristique », l’« analyse SWOT » et « l’analyse d’enveloppement des données (DEA) » pour améliorer le pouvoir de prise de décision.

## ***Chapitre V : Outils et méthodes***

L'AHP est utilisé avec succès dans de nombreux problèmes de prise de décision multicritères, elle est très utile lorsque le problème de décision a des hiérarchies linéaires. Elle permet aux décideurs de tenir compte de leur expérience et de leurs intuitions en termes d'importance relative d'un attribut par rapport à un autre et de développer une meilleure confiance dans les résultats obtenus grâce à la technique.

Aussi, Sa force réside dans l'exécution du processus de prise de décision basé sur le consensus sur les différents facteurs d'évaluation et leur importance sur les décisions globales de hiérarchisation. Cela aide les décideurs à faire converger leur décision avec une compréhension partagée et commune très rapidement. Une structure hiérarchique de AHP offre un attrait intuitif et un moyen de mieux comprendre la complexité du problème. Cela permet au décideur de réfléchir aux diverses conséquences associées à la prise de décision.

### **V.1.2.4 L'AHP : Limites**

La technique a une limitation inhérente qu'il n'est pas possible de s'adapter à la structure non linéaire du problème, en raison de l'absence d'interrelation entre les critères (Thakkar, 2021b). Il est parfois difficile d'obtenir un consensus sur les opinions des experts, car cela implique un grand nombre de comparaisons par paires. Cependant, il est difficile d'éviter le biais qui existe dans les jugements humains et les comparaisons par paires des facteurs d'évaluation. Elle a besoin de données fiables basées sur l'expérience, les connaissances et le jugement qui sont assez subjectifs pour chaque décideur.

l'AHP est contrainte par la subjectivité dans la détermination de l'importance relative de chaque indicateur (Wang et al., 2024), elle ne tient pas compte de l'incertitude. En revache, le problème de l'incertitude et incapacité de faire face à l'existence d'interdépendances entre les critères est resté non résolu dans la plupart des recherches (Guo & Wu, 2023). Ces lacunes ont motivé les chercheurs à améliorer l'AHP traditionnel pour atteindre l'objectif souhaité de manière plus efficace.

### **V.1.3 Processus de réseau analytique (ANP)**

#### **V.1.3.1 L'ANP : généralité**

Avec les progrès dans les domaines de l'ingénierie et de la gestion de projet, il y a eu un Les concepts de base de l'AHP servent de point de départ à l'ANP. L'ANP, en tant que forme générale de AHP, traite de décisions complexes où il y a une interdépendance dans le modèle

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

de décision. Dans le processus de réseau analytique, un réseau est conçu pour traiter la dépendance et les rétroactions au sein d'un même groupe (interdépendances) ou entre les différents clusters (interdépendances). Le réseau qui en résulte ne repose pas sur l'approche hiérarchique mais donne la solution avec plus de précision et avec une plus grande flexibilité compte tenu de la relation mutuelle des éléments.

L'AHP structure un problème de décision en une hiérarchie avec un objectif, des critères de décision et des alternatives, tandis que l'ANP le structure en réseau. Les deux techniques utilisent ensuite un système de comparaisons par paires pour mesurer les poids des composants de la structure et enfin classer les alternatives dans la décision. L'AHP est une théorie générale de la mesure. Il est utilisé pour dériver des priorités relatives sur des échelles absolues. Dans sa forme générale, l'AHP est un cadre non linéaire et effectue à la fois une pensée déductive et inductive sans utiliser le syllogisme. Cela est rendu possible en prenant en compte plusieurs facteurs simultanément, en tenant compte de la dépendance et de la rétroaction, et en faisant des compromis numériques pour arriver à une synthèse ou à une conclusion. Les jugements de comparaison appariés dans l'AHP/ANP sont appliqués à des paires d'éléments homogènes.

La structure de base n'a pas de hiérarchie séquentielle mais ressemble à un réseau avec différents cycles reliant les différents composants interdépendants tandis que les boucles connectent les interdépendants. Il se compose également de sources et de puits.

### **V.1.3.2 L'ANP : approche qualitative ou quantitative de la prise de décision**

L'approche ANP comporte des formes à la fois qualitatives et quantitatives.

#### **Approche qualitative de la prise de décision**

L'approche qualitative comporte quatre grandes étapes :

- La première étape consiste à identifier le problème de décision. C'est la fonction principale de l'objectif pour laquelle la décision doit être prise.
- La deuxième étape consiste à s'assurer que le problème de décision peut être résolu avec l'ANP en tant que problèmes de réseau. Les problèmes basés sur la hiérarchie peuvent être résolus simplement par AHP.

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

- La troisième étape consiste à décomposer le problème en formes gérables et mesurables. La partie supérieure comprend le problème de décision, tandis que l'étape la plus basse comprend les alternatives et le scénario global.
- La dernière étape consiste à déterminer l'organe de décision. Cela varie d'une organisation à l'autre. Dans certains cas, c'est un groupe de hauts fonctionnaires qui décide, tandis que dans d'autres cas, le travail est réparti à parts égales entre les cadres supérieurs et intermédiaires.

### **Approche quantitative de la prise de décision**

Après avoir décidé des variables qualitatives, l'approche quantitative doit être adoptée pour résoudre davantage le problème. Les étapes à cet égard sont les suivantes :

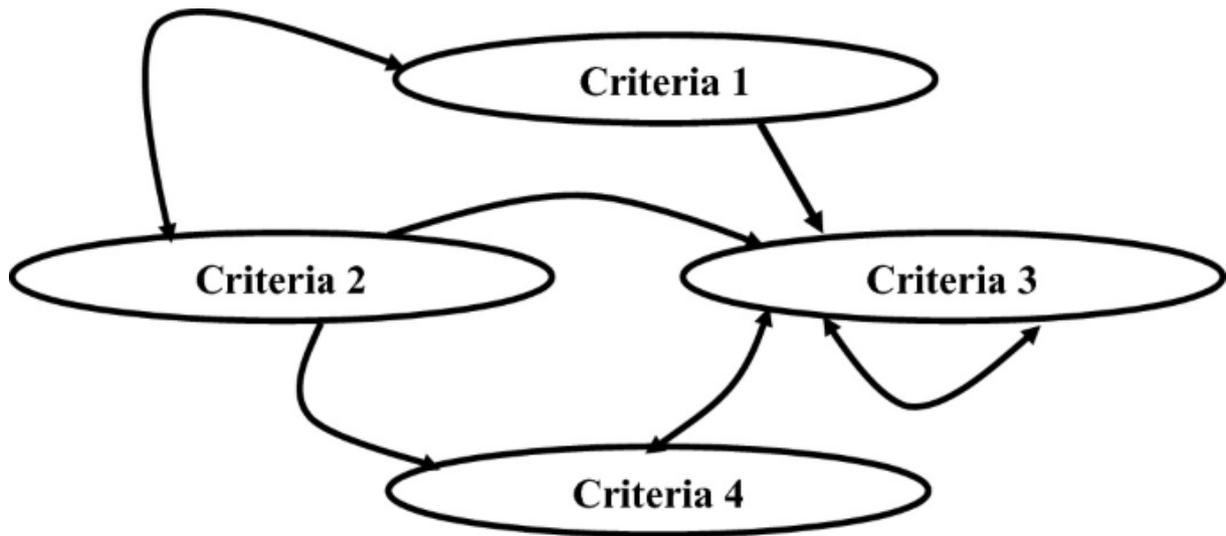
- Une échelle de priorité en neuf points est donnée ci-dessous. Les décideurs doivent faire une comparaison par paires du questionnaire quantitatif et attribuer les points en conséquence

#### **V.1.3.3 L'ANP : procédure étape par étape**

1. Décrivez le problème de décision au point d'intérêt, y compris ses objectifs, ses critères et sous-critères, les acteurs et leurs cibles et les résultats concevables de ce choix. Donnez des points d'intérêt ou des impacts qui décident de la façon dont cette décision peut se dérouler.
2. Décidez des critères et sous-critères de contrôle dans les quatre hiérarchies de contrôle, une pour les avantages, les opportunités, les dépenses et les dangers de ce choix et obtenez leurs besoins à partir de grilles de corrélations appariées. Dans le cas où un standard ou un sous-critère de contrôle a un besoin mondial de 3 % ou moins, vous pouvez envisager de le supprimer pour une analyse plus approfondie. Le produit négocie naturellement, pour ainsi dire, avec ces critères ou sous-critères qui ont des sous-réseaux en dessous d'eux. Pour les avantages et les opportunités, demandez ce qui donne le plus d'avantages ou montre la meilleure chance d'avoir un impact sur la satisfaction de cette règle de contrôle. Pour les coûts et les risques, demandez ce qui entraîne le plus de coûts ou ce qui fait face au risque le plus grave. Ici et là (de temps en temps), les corrélations se font essentiellement par rapport aux avantages, aux opportunités, aux coûts et aux risques dans leur ensemble sans utiliser de critères et sous-critères de contrôle. La figure V-

## Chapitre V : Outils et méthodes

5 représente une structure de réseau d'interdépendance de la hiérarchie généralement évaluée à l'aide de la méthode ANP. Dans les relations structurelles de la hiérarchie non linéaire, il existe des relations à double sens entre les critères 1 et 2, et les critères 3 et 4. Il existe des relations de dépendance unidirectionnelle (externe) entre les critères 1 et 3, les critères 2 et 3 et les critères 2 et 4. Il existe également une boucle automatique du critère 3.



**Figure V-5 :** Hiérarchie de réseau interdépendante pour l'analyse ANP (Thakkar, 2021).

3. Décider du système le plus large de groupes (ou de parties) et de leurs composants qui s'appliquent à tous les critères de contrôle, afin de mieux trier l'avancement du modèle. De plus, vous pouvez numéroté et orchestrer les groupes et leurs composants de manière avantageuse (peut-être dans une section). Utilisez le nom indiscernable pour parler au même groupe et aux mêmes composants pour tous les critères de contrôle.
4. Pour chaque modèle ou sous-critère de contrôle, décidez des groupes du cadre général de critique avec leurs composantes et interfacez-les en fonction de leurs impacts de confiance externe et interne.
5. Décidez de la méthodologie que vous devez suivre dans l'examen de chaque groupe ou composant, en influençant (la méthodologie privilégiée) différents groupes et composantes avec l'appréciation d'une norme. Le sens (être affecté où impacter) doit s'appliquer à chacun des critères pour les quatre systèmes progressifs de contrôle.

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

6. Pour chaque règle de contrôle, construisez la supermatrice en disposant les paquets dans la demande, ils sont numérotés avec chacun des composants de chaque paquet à la fois verticalement à gauche et sur un plan de niveau en haut. Entrez dans la bonne position les besoins obtenus, à partir des corrélations appariées en tant que sous-colonnes du segment correspondant de la super matrice.
7. Effectuez des examens combinés sur les composants à l'intérieur des grappes elles-mêmes en fonction de leur impact sur chaque composante d'une autre grappe à laquelle elles sont associées (dépendance externe) ou sur les composantes de leur propre groupe particulier (dépendance vers l'intérieur). Lorsque vous établissez des corrélations, vous devez avoir un critère à l'esprit. Corrélations d'éléments en fonction de quel composant a un impact de plus en plus important sur un autre composant et comment il est opposé à un critère de contrôle ou à un sous-critère de l'ordre hiérarchique de contrôle comme priorité principale.
8. Effectuez des comparaisons par paires sur les clusters car ils ont un impact sur chaque groupe auquel ils sont associés concernant la règle de contrôle donnée. Les poids déterminés sont utilisés pour peser les composants des carrés de segment de comparaison de la supermatrice. Distribuez un zéro lorsqu'il n'y a pas d'impact et obtenez la supermatrice stochastique de section pondérée.
9. Calculez les besoins en points de rupture de la supermatrice stochastique selon qu'elle est irréductible (primitive ou imprimitive [cyclique]) ou qu'elle est réductible, l'une étant une racine de base ou une racine variée et que le cadre soit cyclique ou non. Deux types de résultats sont envisageables. Dans le premier, chaque section du réseau est indiscernable et chacune donne les besoins relatifs des composants à partir desquels les besoins des composants de chaque paquet sont standardisés à un. Dans le second, le point de confinement des cycles en carrés dans la mesure du possible est additionné et arrivé au point médian, puis à nouveau normalisé à un pour chaque groupe. Malgré le fait que les vecteurs de besoin sont entrés dans la super matrice dans la structure standardisée, les besoins les plus éloignés sont placés dans une structure romancée à la lumière du fait que les critères de contrôle ne reposent pas sur les choix.
10. Combinez les besoins contraignants en pesant chaque vecteur limite romancé par le poids de son paradigme de contrôle et en incluant les vecteurs suivants pour chacun des quatre

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

mérites : Avantages (B), Opportunités (O), Coûts (C) et Risques (R). Il existe actuellement quatre vecteurs, un pour chacun des quatre avantages. Une réponse contenant des estimations mineures des avantages est obtenue en façonnant la proportion BO/RC pour chaque option à partir des quatre vecteurs. L'option avec la plus grande proportion est décidée pour quelques choix.

11. Décrivez des critères clés et de leurs besoins pour évaluer chacun des quatre avantages. Normalisez les quatre évaluations et utilisez-les pour déterminer la combinaison générale des quatre vecteurs. Pour chaque option, soustrayez les dépenses et les dangers de l'ensemble des avantages et des opportunités. À différents moments, on peut soustraire les dépenses d'une option et les dangers d'une autre, puis les ajouter à la pondération formelle et aux opportunités.
12. Effectuez un examen d'affectabilité sur le dernier résultat et déchiffrez les séquelles de l'affectabilité en montrant l'étendue ou la faiblesse de ces proportions. Les priorités dérivées des matrices de comparaison par paires sont saisies comme parties des colonnes d'une super matrice. La super matrice traite du besoin d'impact d'un composant à gauche du réseau sur un composant situé au point le plus élevé du cadre, par respect pour une

### **V.1.3.4 L'ANP : avantages**

- L'AHP n'utilise que les relations hiérarchiques pour la prise de décision, ne tient pas compte de l'interaction entre les différents composants et n'accepte pas l'inversion des rangs alors que l'ANP s'occupe de toutes ces questions.
- L'ANP aide à comprendre les interrelations, a une vision claire et est une technique simple.
- Les facteurs quantitatifs et qualitatifs sont pris en compte dans l'ANP et facilitent donc une prise de décision efficace.
- Dans le cas de plusieurs parties prenantes, il aide à trouver une solution commune en raison de sa structure et peut également être utile comme outil de recherche de consensus.
- L'ANP est l'outil idéal pour mieux comprendre un problème spécifique et son association avec des facteurs connexes.

### **V.1.3.5 L'ANP : limitation**

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

- Le principal défi rencontré dans cette méthode de prise de décision est qu'il devient difficile de hiérarchiser les éléments du réseau et les alternatives de décision.
- Le processus implique des cycles et, comme le cycle est un processus infini, les opérations nécessaires au calcul des priorités sont complexes.
- La présence de boucles de rétroaction rend difficile le processus d'obtention du consensus souhaité.
- La vérification des résultats en raison des boucles de rétroaction et des interrelations est difficile.

### **V.1.4 La méthode DEMATEL (Laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel)**

#### **V.1.4.1 DEMATEL : généralité**

Des recherches tiennent compte à peine de l'incertitude par l'intégration de la méthode DEcision-MAking Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) ( Hosseini et al., 2021; Sahraei et al., 2023). Plusieurs études ont montré que la technique DEMATEL possède des avantages uniques dans pour améliorer les étapes d'évaluation et les résultats (Azareh et al., 2021; Kanani-Sadat et al., 2019).

DEMATEL est une technique suggérée par l'Institut Battelle de Genève en 1971 pour résoudre des problèmes complexes à l'échelle de la planète, tels que la race, la protection de l'environnement et la conservation de l'énergie (Oh et al., 2023). La technique DEMATEL a été utilisée pour la première fois par Fontela et Gabus en 1976. L'institut BMI a appliqué la méthode DEMATEL pour exécuter des projets importants et complexes dans le domaine de la GRC et du programme « Science et Affaires Humaines de l'Institut Mémorial Battelle de Genève » (Fontela, E. and Gabus, A., 1972).

La technique DEMATEL est une méthode d'analyse systématique qui peut cartographier efficacement les relations et interactions directes/indirectes entre les composants du système étudié en fonction de son intensité et de son type (Pinto et al., 2023).

Le DEMATEL est une forme extensive de l'AHP qui examine les interdépendances entre les critères, les relations causales entre eux, et le poids de chacune des relations dans une situation de prise de décision (Falatoonitoosi et al., 2013). Cette méthode sépare les éléments en deux groupes nommés « Cause » et « Effet » et visualise la structure des relations causales

et des interactions entre eux à l'aide de la théorie des graphes orientés et des outils matriciels (Xing et al., 2023).

#### V.1.4.2 DEMATEL : Procédure

DEMATEL est un type d'approche de modélisation structurelle utile pour analyser les relations de cause à effet entre les constituants d'un système. DEMATEL peut être appliqué pour confirmer l'existence d'une relation/interdépendance entre les composants ou pour refléter le niveau relatif des relations au sein de celles-ci. Ainsi, il peut être utilisé pour s'attaquer à des problèmes compliqués qui impliquent beaucoup d'interdépendances ou de relations. La méthode DEMATEL transforme non seulement les relations entre les facteurs en un groupe de causes et d'effets, mais trouve également les facteurs critiques d'un système complexe à l'aide d'un diagramme de relations d'impact (Shahedi et al., 2023). Une procédure de DEMATEL est illustrée à la Figure V-6.

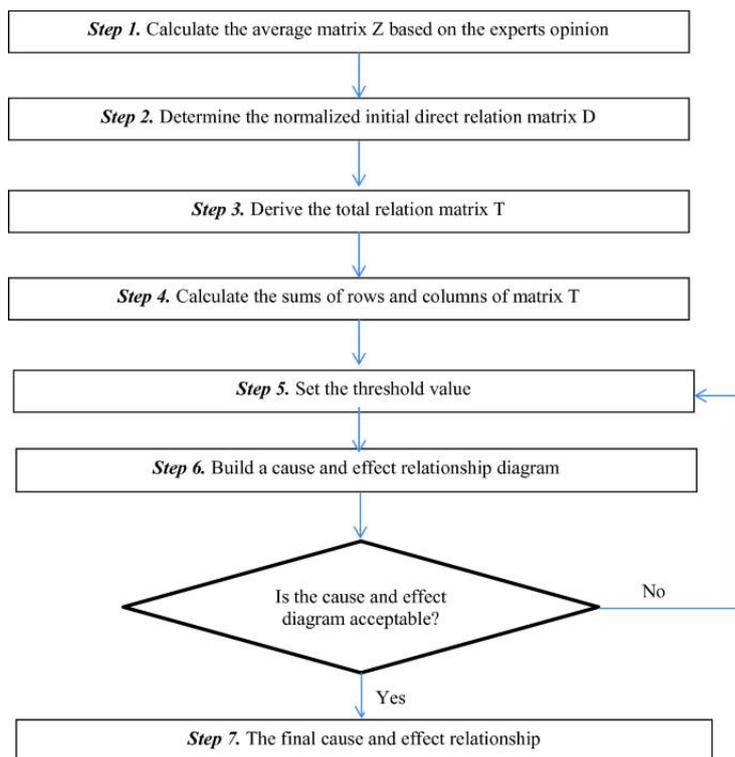


Figure V-6 : Procédure DEMATEL (Thakkar, 2021b).

#### V.1.4.3 DEMATEL : Phases d'analyse

DEMATEL adopte la théorie des graphes et les outils matriciels pour effectuer une analyse des systèmes. La méthode DEMATEL typique permet de calculer le degré d'influence ( $D_{Je}$ ) et

## Chapitre V : Outils et méthodes

le degré d'influence ( $R_{Je}$ ) de chaque élément d'un système d'évaluation par le biais d'une relation logique et de la matrice des relations d'influence. Selon ces deux paramètres ( $D_{Je}$  et  $R_{Je}$ ), la relation entre les éléments du système d'évaluation peut être définie (Si et al., 2018a; Zheng et al., 2022). Dans cette étude, DEMATAL a été utilisé pour calculer le degré d'influence des facteurs dans chaque couche d'évaluation (Oh et al., 2023). Les étapes spécifiques de l'utilisation de la méthode DEMATEL typique peut être comme suit :

### Étape 1 : Le panel d'experts et les dimensions/critères sont déterminés.

Au cours de cette étape, un panel d'experts est sélectionné pour recueillir des opinions subjectives. Sur la base de la littérature et de l'avis d'experts, les défis sont déterminés et discutés.

### Étape 2 : Création de la matrice des relations d'influence directe.

La matrice des relations d'influence directe ( $C_k$ ) peut être obtenue par paires ( $C_{ij, k}$ ) du questionnaire de  $k$ ème expert. Les experts ont donné la mesure de chaque défi dans la colonne de la matrice au défi de la ligne. Les experts ont été invités à estimer l'influence directe entre les défis sur la base des contrastes par paires, à l'aide d'une échelle entière de « aucune influence (0) », « faible influence », « influence moyenne », « influence élevée » et « influence très élevée ». Ensuite, la matrice individuelle d'influence directe fournie par le  $th$  expert peut être formée, où toutes les diagonales principales sont égales à zéro et représentent le jugement du décideur sur la mesure dans laquelle le facteur influe sur le facteur.

### Étape 3 : Initialisation de la matrice des relations d'influence directe.

Lorsque la matrice d'influence directe de groupe est acquise, une matrice normalisée ( $M_k$ ) des relations initiales peut être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$M_k = \frac{1}{\max_j \sum_i C_{ij, k}} \times C_k$$

**Étape 4 : Matrice de relations moyennes.** Une matrice de calcul de la moyenne ( $N$ ) peut être obtenue à partir de la matrice de relation influente complète  $\Sigma(M_k)$  divisé par le nombre d'experts ( $k$ ).

### Étape 5 : Calcul de la matrice de relation totale.

## Chapitre V : Outils et méthodes

La matrice de relations totales ( $T$ ) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :  
 $T=N \cdot (1-N) -1$ .

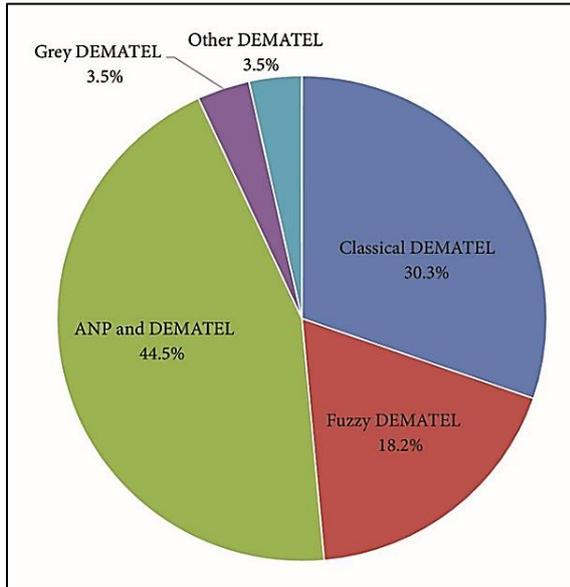
### Étape 6 : Générer le degré d'influence ( $D_{Je}$ ) et le degré d'influence ( $R_{Je}$ ).

$D_{Je}$  et  $R_{Je}$  sont la somme de  $J_{e\text{ième}}$  ligne et la somme de  $j_{\text{ième}}$ , respectivement.

#### V.1.4.4 Les applications de la technique DEMATEL

Au cours de la dernière décennie, un grand nombre d'études ont été réalisées sur l'application de DEMATEL et de nombreuses variantes différentes ont été proposées dans la littérature. Selon les approches utilisées, ces applications sont regroupées en cinq catégories : DEMATEL classique, DEMATEL flou, DEMATEL gris, DEMATEL de processus de réseau analytique (ANP-) DEMATEL, et autres DEMATEL. La plupart des études sur l'hybridation ANP et DEMATEL sont inclus dans un article de synthèse des approches DEMATEL pour la gestion de l'interaction des critères avec l'ANP (figure V-7).

Selon l'utilisation distincte de la méthode DEMATEL, les recherches classiques actuelles de DEMATEL peuvent être classées en trois types : le premier type consiste simplement à clarifier les interrelations entre les facteurs ou les critères ; le deuxième type consiste à identifier les facteurs clés en fonction des relations de cause à effet et des degrés d'interrelation entre eux ; Le troisième type consiste à déterminer les pondérations des critères en analysant les interrelations et les niveaux d'impact des critères (Si et al., 2018a).



**Figure V-7 :** Schéma de classification d'application de la technique DEMATEL (Si et al., 2018).

#### V.1.4.5 Avantages de DEMATEL

En raison de sa maîtrise des données qualitatives et de ses capacités, l'approche de DEMATEL a reçu beaucoup d'attention au cours de la dernière décennie et de nombreux chercheurs l'ont appliquée pour résoudre des problèmes de systèmes complexes dans divers domaines (Efrimidou & Spiliotis, 2024). De plus, le DEMATEL a été étendu pour une meilleure prise de décision dans différents environnements, car de nombreux systèmes du monde réel incluent des informations imprécises et incertaines.

Cependant, Il s'agit d'évaluer les relations d'interdépendance entre les facteurs et de trouver les relations critiques à l'aide d'un modèle structurel visuel, reflétant en détail les caractéristiques du système complexe et leurs tendances de transformation. Il est utile pour visualiser la structure de relations causales complexes avec des matrices ou des digraphes (Kanani-Sadat et al., 2019).

#### V.1.4.6 Limites de DEMATEL

La technique DEMATEL n'est pas adaptée pour déterminer des facteurs tels que la hiérarchie et l'importance relative des facteurs. Aussi, Le jugement subjectif du décideur est présenté comme une valeur nette qui reflète de manière inadéquate l'imprécision du monde réel (Thakkar, 2021b).

### **V.1.5 La logique floue**

Pour tenir compte de l'incertitude inhérente aux opinions des experts, il y a un intérêt croissant pour l'utilisation de la logique floue avec les approches MCDM. Les questions prédominantes dans le cadre d'un problème de prise de décision multiple concernent l'évaluation efficace des poids des critères, la précision des alternatives par rapport à ces critères, ainsi que les évaluations globales estimées par le décideur. Un problème MCDM typique qui n'est pas défini correctement avec les paramètres requis créera toujours de l'incertitude dans l'esprit du décideur. Pour faire face à ce type d'ambiguïté développée par la non-disponibilité d'informations ou de données appropriées d'un problème MCDM, la théorie des ensembles flous peut être mieux utilisée.

Une autre approche qui aide à prendre en compte l'incertitude dans les intrants est la théorie grise.

#### **V.1.5.1 La théorie grise : généralité**

La théorie grise a été développée par Deng en 1982. Dans le système gris, tous les messages peuvent être divisés en trois catégories : les parties blanche, grise et noire. La partie blanche affiche des messages clairs dans un système complètement, la partie noire a des caractéristiques totalement inconnues et la partie grise se trouve entre les deux et couvre à la fois les messages connus et inconnus (Meng Lu & Kees Wevers, 2007). Cette théorie a trouvé des applications dans Plongeurs domaines tels que l'économie, la prise de décision, l'optimisation, la gestion, la sécurité des systèmes de navigation, la performance opérationnelle, la modélisation des défaillances, les facteurs critiques de succès, la gestion de la relation client et l'analyse des effets.

L'analyse des relations grises est un moyen efficace d'aborder l'analyse décisionnelle avec des informations incomplètes et des données discrètes face à l'incertitude du processus de prise de décision (Govindan et al., 2016).

#### **V.1.5.2 La théorie grise : valeurs linguistiques**

La théorie du gris utilisant des nombres d'intervalle gris pour remplacer le score d'influence dans les comparaisons par paires. Le nombre d'intervalle gris peut se transformer en valeurs nettes « blanchiment » (Zheng, 2023).

## Chapitre V : Outils et méthodes

Un numéro d'intervalle gris a été défini  $x \rightarrow = [x_{en\ bas}, x_{en\ haut}]$ , dans lequel  $x_{en\ bas}$  est la limite inférieure de  $x$ , et  $x_{en\ haut}$  est la limite haute.

L'algorithme de fonctionnement des nombres gris est le suivant :

$$\begin{aligned} x_1 \rightarrow \pm x_2 \rightarrow &= [x_1, \downarrow, \downarrow x_2, \downarrow, x_1, \uparrow, \uparrow x_2, \uparrow] \quad (4) \\ x_1 \rightarrow \times x_2 \rightarrow &= [\text{Min}(x_1, \downarrow x_2, \downarrow, x_1, \uparrow x_2, \uparrow, x_1, \uparrow x_2, \uparrow), \text{max}(x_1, \downarrow x_2, \downarrow, x_1, \uparrow x_2, \uparrow, x_1, \uparrow x_2, \uparrow)] \quad (5) \\ x_1 \rightarrow \div x_2 \rightarrow &= [x_1, \downarrow, x_1, \uparrow] \times [x_2, \downarrow, x_2, \uparrow] \end{aligned}$$

### V.1.5.3 La théorie grise : étapes impliquées

La théorie grise transforme le langage d'évaluation en nombre gris d'intervalle en combinant des variables de langage pour remplacer le score d'influence dans les comparaisons par paires afin obtenir le résultat souhaité (Zhu et al., 2012). Les nombres gris peuvent être facilement convertis en nombres nets en utilisant un processus en trois étapes :

Étape 1. Transformer les nombres gris en nombres nets,

Étape 2. Calculer la valeur nette normalisée totale,

Étape 3. Calculer la valeur nette finale

### V.1.5.4 La théorie grise : avantages

Le processus de prise de décision devient clair et défini en utilisant la théorie grise. Elle peut modéliser la nature discrète des données, en particulier s'il n'y a pas suffisamment d'informations. Dans le cas, où le niveau d'incertitude est élevé et qu'il est difficile d'identifier les fonctions d'appartenance, la théorie des systèmes gris est souvent un meilleur choix. La technique de la relation de gris flou permet de résoudre les défis liés à la taille réduite et à la distribution inconnue des échantillons lors de la prise de décision.

### V.1.5.5 La théorie grise : limitation

Le résultat de cette méthode dépend beaucoup des critères retenus pour l'évaluation. Une attention particulière est nécessaire lors de la sélection des critères.

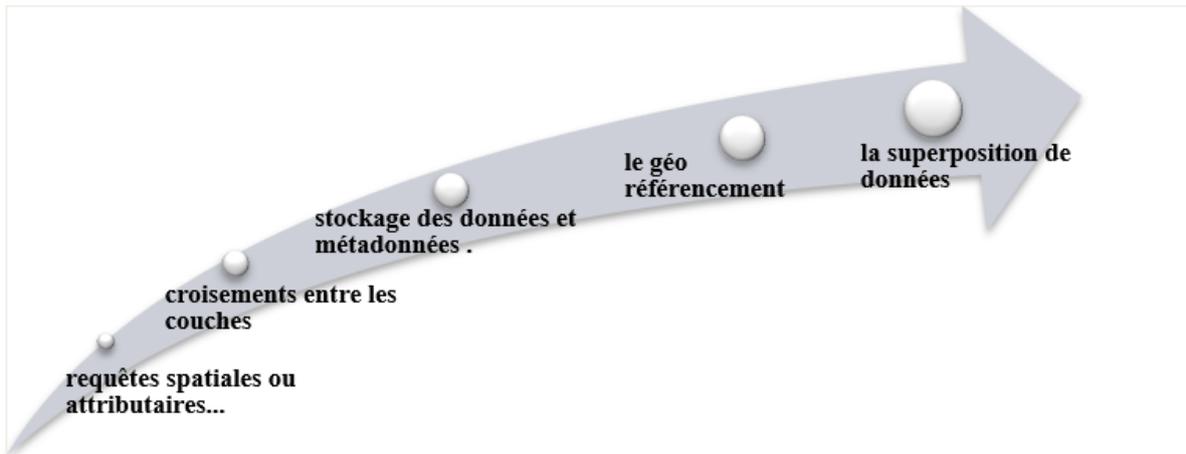
## **V.1.6 Système d'information géographique (SIG)**

### **V.1.6.1 SIG : généralités**

L'essor de la cartographie numérique dans la société actuelle s'explique en grande partie par la popularité croissante des systèmes d'information géographique (SIG), des logiciels conçus pour faciliter la visualisation et la gestion des données spatiales.

L'une des premières définitions du Système d'Information Géographique (SIG) à l'ère numérique a été formulée en 1986 par Peter A. Burrough. Selon cet auteur, un SIG se compose d'un ensemble de logiciels permettant d'acquérir, de stocker, d'extraire, de traiter et d'afficher des données spatiales du monde réel. En effet, un SIG est défini comme un système de base de données spécifiquement conçu pour capturer, stocker, manipuler, analyser et visualiser des données géoréférencées en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) se distinguent par leurs capacités spécifiques, ce qui les rend uniques et accessibles à un large éventail d'utilisateurs pour diverses applications. Ils représentent une approche novatrice pour analyser les données afin de soutenir la prise de décision, la concertation, la compréhension et la résolution des problèmes. Les SIG jouent un rôle essentiel dans la gestion des crises en permettant d'évaluer de manière quantitative la nature et l'ampleur des catastrophes, ainsi qu'en envisageant des mesures de protection des populations (cf. figure V-8).



**Figure V-8 :** Les spécificités du SIG par rapport à d'autres outils de cartographie numérique (auteur, 2020).

### V.1.6.2 SIG : l'utilité

L'utilisation la plus répandue des SIG est la création de présentations cartographiques, telles que les cartes thématiques ou statistiques descriptives. Un système d'information géographique (SIG) doit offrir les fonctionnalités suivantes :

- L'acquisition de données géographiques concerne à la fois les données brutes et les informations géographiques.
- La gestion des bases de données spatiales est l'objet de l'archivage.
- Analyse : opérations spatiales, fonctions élémentaires et fonctions complexes.
- L'affichage concerne la mise en forme et la visualisation.
- Abstraction et cartographie sont des processus essentiels pour représenter de manière précise et efficace le monde réel.

La technologie des Systèmes d'Information Géographique (SIG) se concentre sur le traitement des images aériennes et sur l'extraction automatisée d'informations (figure V-9).

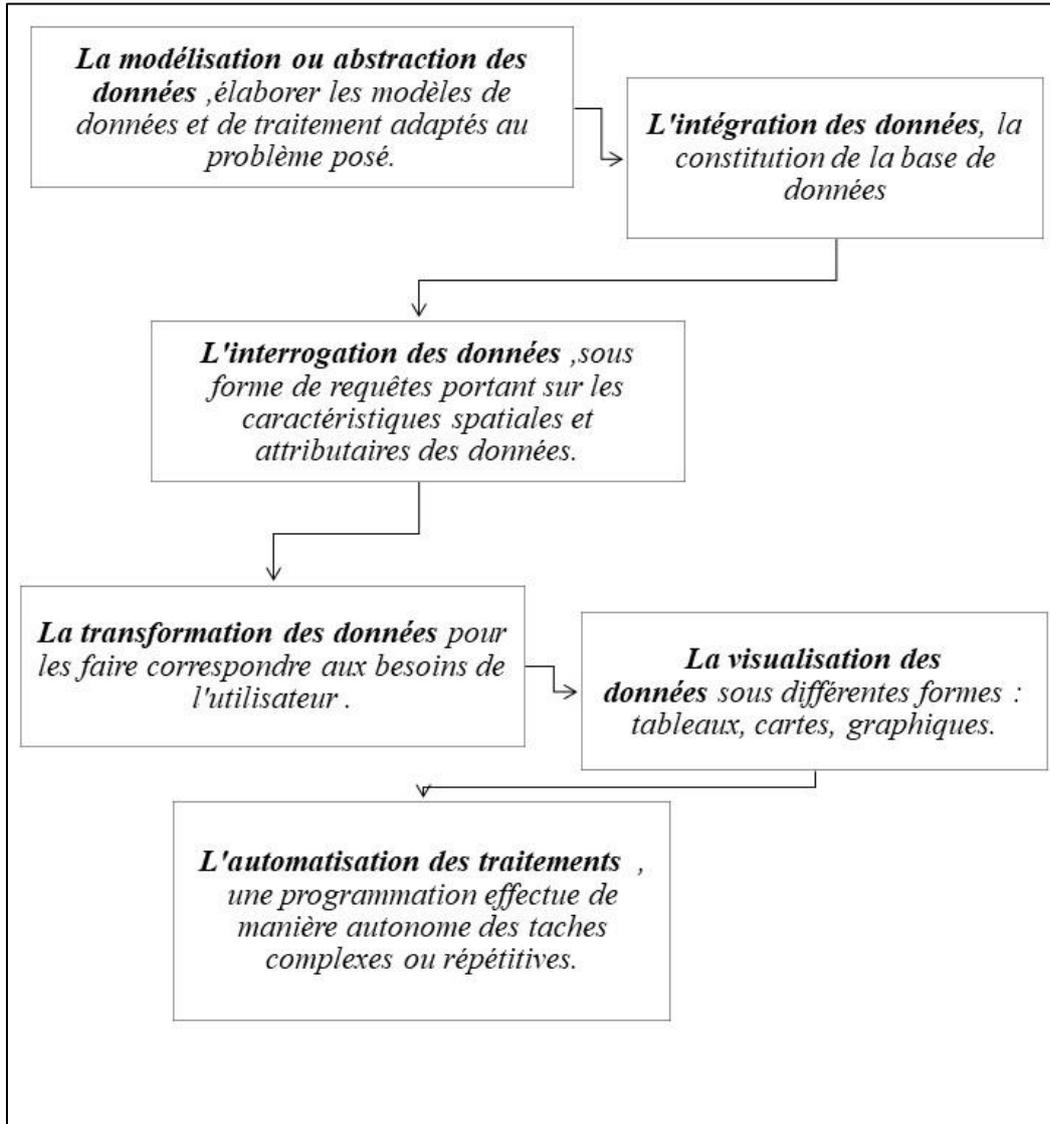


Figure V-9 : Les fonctions dans un SIG (auteur, 2020).

### V.1.6.3 SIG : les composants majeurs du logiciel

Ce système sophistiqué comprend plusieurs composantes : l'acquisition des données de départ, leur stockage, leur Récupération et leur gestion dans des bases de données, le traitement et l'analyse des données géographiques, la visualisation et la production de produits, ainsi qu'une interface utilisateur conviviale (schéma V-10).

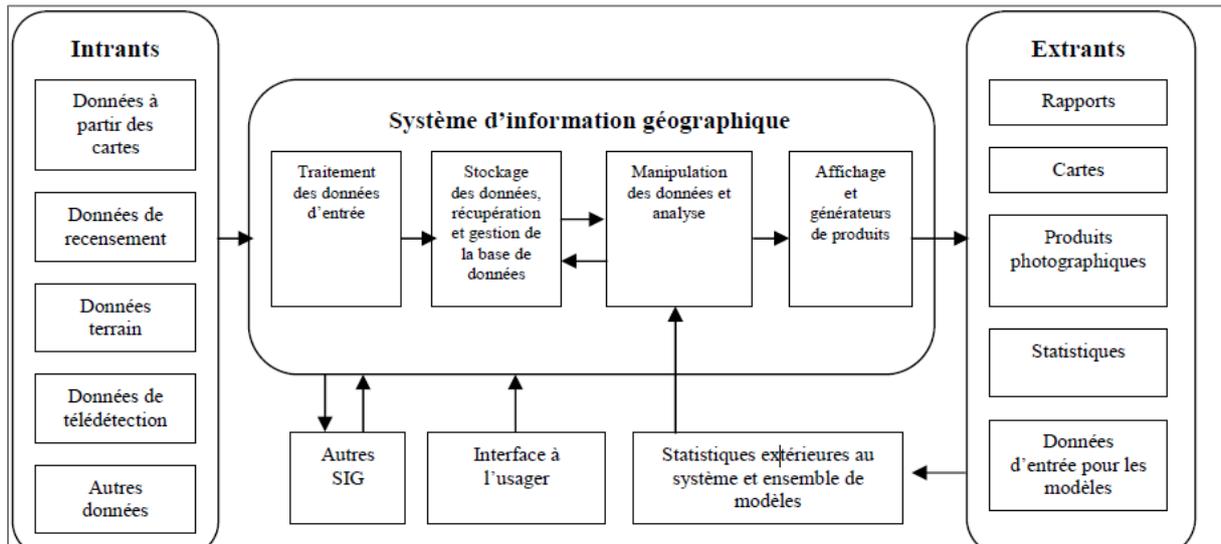


Figure V-10 : Composantes d'un SIG (Fischer et al., 1993).

#### V.1.6.4 SIG : les logiciels de création et d'analyse

Le processus de sélection d'un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) peut s'avérer complexe étant donné la multitude d'options disponibles sur le marché. Les logiciels les plus populaires et largement utilisés dans le monde se répartissent en deux catégories distinctes. D'une part, on retrouve les logiciels commerciaux tels que ArcGIS, Grass GIS, MapInfo, GéoConcept, Manifold, Caedop, GeoMap, MacMap, GéoMedia, Aigles Tech, Bentley Map et TATUKIS. D'autre part, il existe des logiciels libres accessibles gratuitement en ligne tels que OpenJUMP, WinTopo, QGIS, Grass GIS, PostGIS et MapWindow. Malgré cette diversité, le principe fondamental de tout logiciel SIG demeure constant : la superposition de différentes couches d'informations spatiales dans un référentiel spécifique.

Les distinctions entre ces logiciels résident dans leur convivialité d'utilisation ainsi que dans leurs fonctionnalités, avantages et inconvénients respectifs.

## Chapitre V : Outils et méthodes

*les logiciel commerciaux*



**ARC GIS**

SIG très connu, comprend une suite d'applications cartographiques(logiciels aux besoins de la géomatique tel que : ArcView, ArcEditor, ArcInfo.), c'est collecter et partager des informations, et faire une analyse spatiale pour identifier et mesurer les implications, les conséquences et l'impact des décisions.

Éditeur : ESRI  
 Dernière version : Version 10.2  
 Version Française : Oui  
 Prix : 60 jours d'essai gratuit  
 Compatible avec : Windows  
 Site Officiel : [www.esri.com](http://www.esri.com)





**MAPINFO**

Un SIG conçu autour d'un moteur d'édition de cartes. Avec des fonctionnalités d'intelligence géo spatiale, afin d'analyser les tendances géographiques, et prendre des décisions critiques avec une meilleure connaissance des risques et des opportunités.

Éditeur : Pitney Bowes Software  
 Dernière version : Version 12.5  
 Version Française : Oui  
 Prix : 30 jours d'essai gratuit  
 Compatible avec : Windows  
 Site Officiel: [web.pb.com/mipro-fr](http://web.pb.com/mipro-fr)





**GÉO CONCEPT**

SIG européen Simple et facile, permettant la création, la gestion, et l'analyse de données géographiques .

Fonctionnalités : Calculer une zone tampon, créer une sectorisation, comparer un phénomène dans le temps, générer des distances, calculer des itinéraires ,personnaliser le rendu cartographique...

Éditeur :Géo Concept SA.  
 Dernière version:  
 Langue: français





**BENTLEY MAP**

(de Bentley Systems)

SIG en 3D compactant de nombreuses fonctionnalités.

C'est un logiciel complet pour les infrastructures du monde entier et qui doivent les : cartographier, planifier , concevoir , réaliser ,exploiter.



*les logiciel commerciaux*



**MANIFOLD GIS**

Un logiciel puissant ,très complets ,avant-gardiste et stable , caractérisé pa sa facilité de connexion .

Dernière version: version 9 .  
 Langue: anglais  
 Prix : pad gratuit , version payante à partir de 95.00 \$





**GEOMEDIA**  
**GEOMEDIA**

navigateur d'Intergraphe afin de lire directement des fichiers MapInfo, Shapefile ou Access. L'application dispose d'outils élémentaires de requêtes et de cartographie.

Prix : gratuit





chez l'ENJ

**AIGLES TECHNOLOGIES**

(de Business Geografic)

Générateur d'applications SIG full web, et de solutions métiers packagées ,,grand public et mobiles , solutions géo-décisionnels

Langue: français  
 Prix : gratuit





**TATUKIS**

d'origine polonaise avec accès à une multitude de formats du marché SIG et DAO

Editor : TatukGIS Company  
 Langue: anglais  
 Prix : disponible en version Editor payante et en version Viewer gratuit .



## Chapitre V : Outils et méthodes

**les logiciel libres**



**OPEN JUMP**

SIG modulaire en Java, analyses spatiales limitées, l'affichage et l'analyse de données cartographiques, la prise en charge des données géo référencées depuis une base PostGIS.

**le développement :** 2002 grâce à des fonds du ministère des ressources naturelles de Colombie-Britannique, et se poursuit depuis 2007 sous le nom d'**Open JUMP** grâce aux efforts d'une communauté internationale.

**Dernière version :** 1.10.0 (27 janvier 2017)

**Langues :** Multilingue (CZ, EN, FR, DE, ES, FI, IT, JP, PT).

**Multiplateforme :** (Windows, Linux, Macintosh).

**Prix :** Gratuit au téléchargement et à l'utilisation.

**Licence :** Open Source : [GPL](#).

**Site web :** [www.jump.net](http://www.jump.net)





**WIN TOPO**

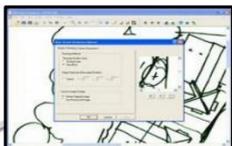
logiciel libre et simple permettant de vectoriser des cartes, transformer des images au format BMP, TIFF, JPG, PNG dans un format vecteur et de les enregistrer au format DXF, SHP, MIF, WMF.

**Éditeur :** Soft Soft

**Dernière version :** 1.7.6

**Langue :** anglais.

**Prix :** gratuit.





**POST GIS**

Extension libre, robuste et fiable pour la base de données Postgre SQL qui permet de faire des requêtes spatiales et active la manipulation d'information géographique.

**Éditeur :** refractions research

**Dernière version :** 3 (octobre 2019)

**Site internet :** [www.postgis.org](http://www.postgis.org)





**MAP WINDOW**

SIG bureautique libre, facile et extensible, s'adapter aux besoins des utilisateurs avancés et rehaussant ses performances en traitements numériques. Mais Il n'habille pas une carte *facilement*, ni des symboles proportionnels.

**Fonctionnalités principales :** base de données, dessin, traitement de données, visualisation

**Éditeur :** Idaho State University, 2004.

**Version évaluée :** 4.8

**Langue :** français

**Coût :** gratuit

**Site :** <http://lmapwindow.codeplex.com>



**les logiciel libres**



**GRASS GIS**  
(Geographic Resource Analyses Support System)

Application libre conception modulaire, le plus gros projet géomatique, regroupe les fonctionnalités raster et vecteur.

**Éditeur :** GRASS Development Team.

**Dernière version :** 7.4.2 (octobre 2018)

**Langue :** multilingue.

**Prix :** gratuit

**Disponible pour :** Linx, Mac OSX, Unix et window.

**Site web :** [grass.osgeo.org](http://grass.osgeo.org)





**SAGA GIS**  
(System for Automated Geoscientific Analyses)

Sig libre de multiple -forme développée en Allemagne, c'est un outil puissant facile à utiliser destiné aux traitements spatiaux de type raster que vecteur

**Éditeur :** jurgen boher et olaf Conrad.

**Dernière version :** 7.2.0 (février 2019)

**Langue :** anglais

**Prix :** gratuit

**Disponible pour :** Linx et window.





**Q-GIS**  
(Quantum GIS)

visualisation et manipulation de données vectorielles et raster, installation facile, interface conviviale en français et simple d'utilisation, connexion WMS, POST GIS, mais pas toujours fiable.

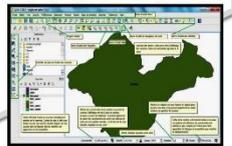
**Éditeur :** Open Source Geospatial (OSGeo)

**Dernière version :** version 0.7.4

**Prix :** gratuit

**Disponible pour :** Linx, Mac OSX, et window.

**Site :** <http://qgis.sourceforge.net>





**GV-SIG**

Application libre, permettant d'accéder à multiples données en SIG, application bureautique, le plus complet de l'offre et multi-systèmes

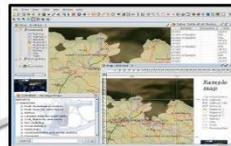
**Éditeur :** java

**Dernière version :**

**Langue :** français et 13 autres langues

**Prix :** gratuit

**Disponible pour :** linx, Windows et Mac OS X..



## Chapitre V : Outils et méthodes

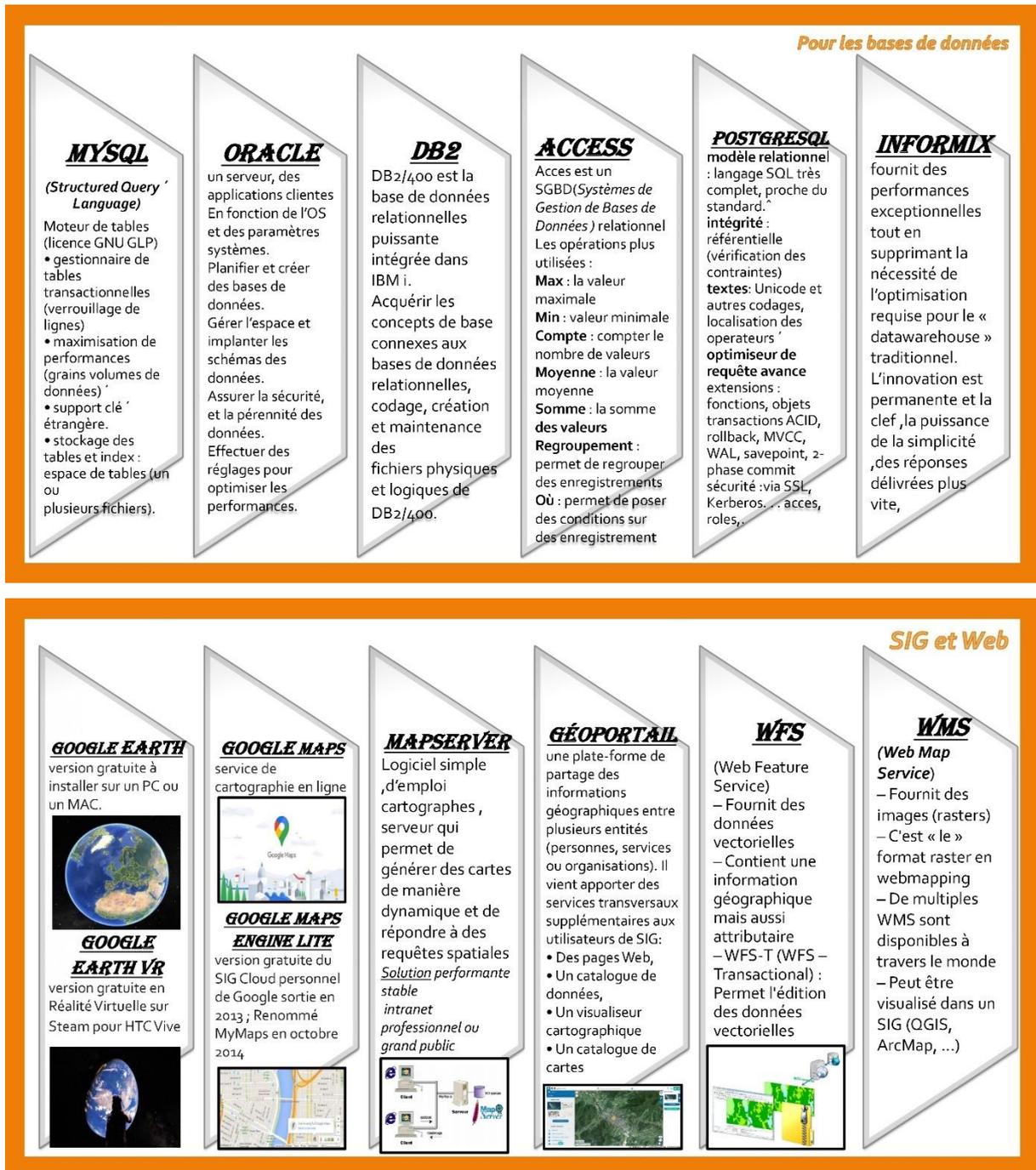


Figure V-11 : Classification des logiciel et les basses des données SIG (auteur, 2020).

### V.1.6.5 SIG : limites

Le contenu des limites majeures des SIG affiche l'absence des capacités à modéliser et à s'adapter de manière flexible aux évolutions du contexte ou du processus de prise de décision spatiale (Heinzlef, 2020).

### **V.1.7 L'environnement EXCEL**

Un outil logiciel gratuit et opensource est décrit dans le but de simplifier l'analyse et la visualisation des données en sciences de la vie fondamentales. Excel, en tant que tableur puissant, offre la possibilité d'effectuer des calculs mathématiques et statistiques. L'emploi de feuilles de calcul informatiques, notamment Microsoft Excel, met en lumière la manière dont les modèles et les feuilles de calcul peuvent être exploités pour automatiser les opérations statistiques (Kraus, 2014).

L'objectif des modèles statistiques et des feuilles de calcul Excel mentionnés est de lier les prévisions de construction, les courbes d'apprentissage, les séries chronologiques, l'échantillonnage des travaux, l'analyse des risques et la stratégie d'appel d'offres (Storm, 2019)

### **V.1.8 Le MATLAB, un outil de des solutions de calcul**

Le MATLAB® est un progiciel produit par The MathWorks, Inc. ([www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)). Il est disponible sur des systèmes allant des ordinateurs personnels aux superordinateurs, y compris le calcul parallèle (Lindfield & Penny, 2012).

MATLAB est probablement le progiciel commercial d'analyse numérique le plus performant au monde. Son nom est dérivé du terme « laboratoire matriciel ». Il fournit un outil de développement interactif pour les problèmes scientifiques et d'ingénierie et, plus généralement, pour les domaines dans lesquels des calculs numériques importants doivent être effectués. Le progiciel peut être utilisé pour évaluer directement des instructions individuelles ou une liste d'instructions appelée script peut être préparée. Une fois nommé et sauvegardé, un script peut être exécuté en tant qu'entité. Le progiciel était à l'origine basé sur le logiciel produit par les projets LINPACK et EISPACK, mais il comprend actuellement les bibliothèques LAPACK et BLAS, qui représentent l'état actuel de la technique en matière de logiciels numériques pour les calculs matriciels. En règle générale, MATLAB travaille avec des tableaux de données rectangulaires ou carrés (matrices) ? dont les éléments peuvent être réels ou complexes. Une quantité scalaire est donc une matrice contenant un seul élément. Il s'agit d'une notion élégante et puissante, mais qui peut poser à l'utilisateur une difficulté conceptuelle initiale.

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

La programmation mathématique avec MATLAB aborde les fondements de la programmation et de l'utilisation de MATLAB, en illustrant divers exemples mathématiques. MATLAB fournit à l'utilisateur.

- Manipulation aisée des structures matricielles,
- Un grand nombre de routines intégrées puissantes qui s'enrichissent et se développent en permanence en constante évolution,
- De puissantes possibilités de représentation graphique en deux et trois dimensions,
- Un système de script permet aux utilisateurs de personnaliser et modifier le logiciel en fonction de leurs besoins spécifiques.
- Un ensemble de fonctions, connus sous le nom de boîtes à outils, qui peuvent être intégrés aux fonctions du noyau MATLAB.

La popularité croissante de MATLAB découle de sa convivialité et de sa facilité d'utilisation. En outre, il propose des boîtes à outils optionnelles, particulièrement bénéfiques dans des domaines spécifiques tels que l'optimisation, le traitement du signal et de l'image, l'apprentissage (notamment les réseaux de neurones), l'automatique (comme Simulink), etc. Ce logiciel est largement répandu à la fois dans l'industrie et dans le milieu universitaire. (M. Jeong et al., 2024).

### **V.2 Cadre méthodologique adoptée d'étude**

Les méthodes de prise de décision à critères multiples (MCDM) sont largement utilisées pour résoudre les problèmes complexes liés aux incertitudes (Hammami et al., 2019; Sahraei et al., 2023; Zhang et al., 2020) et adopter dans de nombreuses études de cartographie pour évaluer le risque d'inondation dans les centres urbains.

La méthodologie proposée est la Méthode d'intégration de la théorie grise, DEMATEL, AHP et ANP (T. L. Saaty, 1977; Zheng, 2023); appliquées à l'évaluation des risques d'inondation. C'est une approche combinatoire intégrant la théorie grise afin de réduire l'ambiguïté dans le processus décisionnel par le système d'incertitude, ainsi le laboratoire d'essais et d'évaluation de prise de décision (DEMATEL) pour reflète la relation entre les facteurs au sein d'une seule couche, le processus analytique hiérarchique (AHP) et le processus de réseau analytique qui se concentrent sur la relation entre les différentes couches (Zheng et al., 2022); basée sur les données obtenues à partir d'un questionnaire à neuf scores et le SIG. Ce remplacement

## Chapitre V : Outils et méthodes

conduira à des résultats plus précis et pratiques. Le processus d'évaluation comprend grandes phases pour atteindre l'objectif de l'étude, comme illustré à la figure V-12.

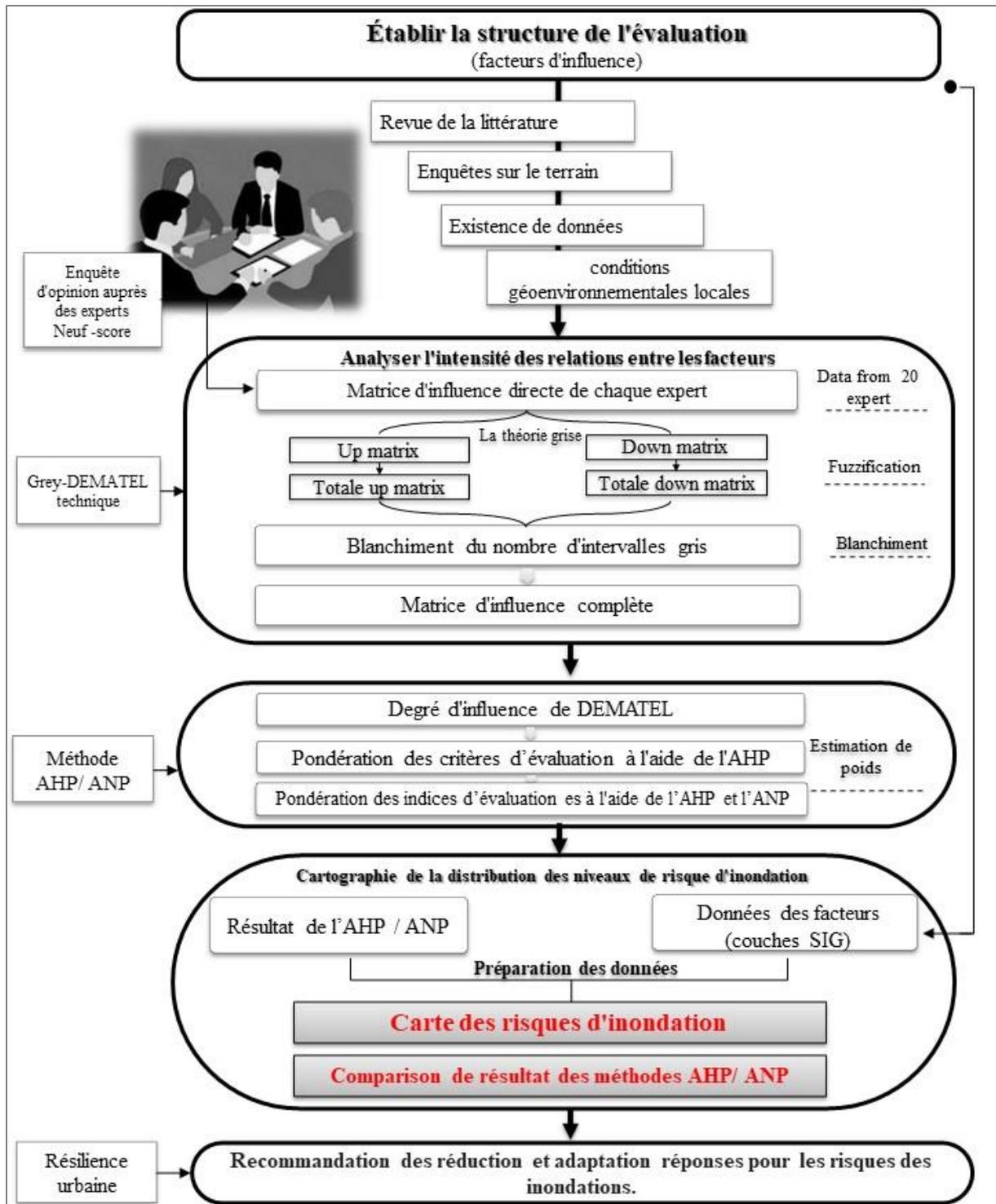


Figure V-12 : Représentation du schéma conceptuel de la méthode utilisée (auteur, 2023).

L'étape initiale établit la structure d'évaluation. Le risque d'inondation est défini comme la combinaison des indices d'impacts et de causes dans la ville de Skikda, sous trois

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

composantes de vulnérabilité, contribuant aux inondations urbaines: topographie (T), anthropique (A) (changement climatique /urbanisation) et infrastructure (I) ; comprennent respectivement 6 facteurs indépendants; en tenant compte des caractéristiques urbaines complexes.

La procédure d'évaluation pour les indices et les facteurs d'impact comprenait quatre parties : (1) la réalisation d'un questionnaire d'expert, (2) l'établissement de la matrice influente Grey-DEMATEL d'une comparaison par paires pour chaque expert transféré du questionnaire à 9 notes, (3) le calcul des pondérations finaux AHP et ANP des facteurs d'évaluation, (4) La cartographie de la distribution des niveaux de risque des inondations urbaines par SIG. Sur cette base, les zones à haut risque sont explorées plus avant et des réponses de gestion d'atténuation les impacts des inondations sont suggérés.

### **V.2.1 Enquête de jugement d'expert**

Cette approche préside à la méthodologie qualitative qui s'appuie sur des avis de spécialistes. Le questionnaire traditionnel conçu dans DEMATEL recueille l'avis et les priorités des experts sur les facteurs. Vingt participants du domaine de l'hydrologie, en géologie et l'ingénierie de la construction ont été invités; sur la base de leurs connaissances de base et de leur expérience des pratiques de gestion des risques d'inondation à Skikda pour discuter de l'importance et les préférences d'un critère par rapport à un autre dans cette enquête par questionnaire, qui se produit certainement dans un environnement d'incertitude (Fernández & Lutz, 2010) (tableau V-2).

Selon l'échelle fondamentale de Saaty, l'agrégation de l'opinion d'experts utilise des scores (1 = importance la plus faible, 9 = importance la plus élevée) pour présenter l'importance des facteurs dans la structure d'évaluation. Pour assurer l'efficacité des comparaisons par paires, dans la même couche, les facteurs ne peuvent pas être remplis avec les mêmes scores (lorsque le nombre de facteurs est supérieur à celui des facteurs, inférieur ou égal à 9).

La comparaison par paires est pratiquée pour connaître le poids de chaque critère, dans lesquelles tous les critères pertinents sont comparés les uns aux autres pour arriver à une échelle de préférence (Rimba et al., 2017). Les réponses des experts recueillies à partir du questionnaire sont utilisées pour déterminer des nombres flous et établir une matrice de jugement cohérente.

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

**Tableau V-2 : Profile des répondant (auteur, 2023).**

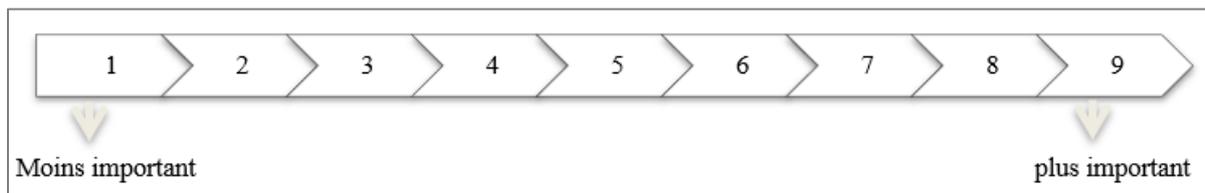
<b>No. expert</b>	<b>Research area/ Occupation Rôle</b>	<b>Work experience (year)</b>	<b>Division</b>
1.	Ingénieur en hydrogéologie	10	Hydraulique
2.	Ingénieur en biologie et environnement	12	La biodiversité/ environnement
3.	Architect	14	Urbanisme/ DUCH
4.	Ingénieur en ressource en eau	14	Assainissement/ DRE
5.	Ingénieur en hydraulique	12	Assainissement/ DRE
6.	Chef bureau de la cartographie et risques spéciaux	33	Protection civile
7.	Chef bureau des appareils de la sécurité pour la protection.	15	Protection civile
8.	Ingénieur en géotechnique	13	Urbanisme/ DUCH
9.	Ingénieur en hydro ménage	22	Hydraulique/ DRE
10.	Ingénieur en hydraulique urbaine	13	Assainissement/ DRE
11.	Ingénieur en biotechnologie	25	La biodiversité/ environnement
12.	Ingénieur en hydrogéologie	04	Service technique / APC
13.	Ingénieur en génie civil	09	Service technique / APC
14.	Ingénieur en aménagement	35	Service technique / APC
15.	Ingénieur en géographie	09	Hydraulique
16.	Chercheur	03	Architecture
17.	Chercheur	15	Projet urbain
18.	Chercheur	10	Hydrogéologie
19.	Chercheur	25	Environnement
20.	Chercheur	07	Hydraulique urbaine

### **V.2.2 La comparaison par paires**

L'importance et la préférence d'un facteur par rapport à un autre a été discutées, ce qui se produit bien entendu dans un environnement incertain. L'agrégation de l'opinions d'experts

## Chapitre V : Outils et méthodes

utilise des scores (1 = importance la plus faible, 9 = importance la plus élevée) pour présenter l'importance des facteurs dans la structure d'évaluation, sur la base de l'échelle de base de Saaty (tableau ). Afin assurer la validité des comparaisons par paires, les facteurs d'une même couche ne peuvent pas être remplis avec le même score (lorsque le nombre de facteurs est supérieur au nombre de facteur, il est inférieur ou égal à 9).



**Figure V-13** : Échelle de comparaison par paires de Saaty 1977 (auteur, 2023).

La comparaison par paires est pratiquée pour connaître le poids de chaque critère, ou tous les critères pertinents sont comparés les uns aux autres pour obtenir un classement de préférence (Rimba et al., 2017). Les réponses d'experts recueillies à partir du questionnaire ont été utilisées pour déterminer des nombres flous et construire une matrice de jugement cohérente. Les résultats des jugements des experts sur le questionnaire à neuf scores sont résumés dans l'annexe.

### V.2.3 Description de la Méthode Grey-DEMATEL- AHP/ANP

Dans cette étude, la structure des relations de cause à effet et les interactions entre elles sont visualisées par la méthode DEMATEL avec l'aide de la théorie des graphes dirigés et des outils matriciels (Fontela, E. and Gabus, A., 1972). Bien que DEMATEL s'appuie sur les notations d'expertes pour déterminer les interactions entre les facteurs (Si et al., 2018b), il ne peut pas résoudre l'incertitude du langage des évaluations par les experts. Par conséquent, la théorie grise est introduite au DEMATEL classique pour mettre en œuvre un cadre MCDM fiable et surmonter les incertitudes et les ambiguïtés dans le processus de prise de décision avec des données discrètes (Haleem et al., 2019). En combinant des variables linguistiques pour remplacer les scores d'influence dans des comparaisons par paires, la théorie de Gray transforme le langage d'évaluation en nombres gris d'intervalle (Govindan et al., 2016). Cela donne les résultats souhaités. Le processus de la méthode grise DEMATEL a été combiné au processus de hiérarchie analytique (AHP) et le processus de réseau analytique pour obtenir les poids des facteurs (Zheng, 2023).

## Chapitre V : Outils et méthodes

La méthodologie de l'étude a été divisée en sept étapes, qui sont répertoriées ci-dessous. Le fichier supplémentaire 1 contient des informations détaillées sur le processus de calcul.

**Étape 1.** Construction de la matrice des relations influentes directes ( $C'_k$ ) à l'aide de l'équations (3), basées sur les données de l'enquête par questionnaire à 9 scores et les équations (1) et (2).

$$x_{ij,k} = \theta_k \frac{x_{i,k}}{x_{j,k}}, x_{i=j,k} = 0 \quad (1)$$

$x_{i,k}, x_{j,k} \in [1, 9]$ , où  $k$  est le  $k$ ème expert, et  $\theta_k$  est le coefficient d'importance, Eg. 2:

$$\theta_k = \frac{\max(x_{ik})}{9}; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$C'_k = \begin{bmatrix} 0 & x_{12,k} & \dots & x_{1n,k} \\ x_{21,k} & \ddots & \dots & x_{2n,k} \\ \vdots & \dots & 0 & \vdots \\ x_{1n,k} & x_{2n,k} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (3)$$

**Étape 2.** Normaliser la matrice des relations influentes directes, par l'équation (4) :

$$C_k = \frac{1}{\max(x_{ij,k})} \times C'_k = \begin{bmatrix} 0 & c_{12,k} & \dots & c_{1n,k} \\ c_{21,k} & \ddots & \dots & c_{2n,k} \\ \vdots & \dots & 0 & \vdots \\ c_{1n,k} & c_{2n,k} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4)$$

**Étape 3.** Utilisation de la théorie de Grey pour la fuzzification. La table 3 montre que les scores d'influence du questionnaire se situaient tous dans une fourchette de 0 à 1. Les éléments de la matrice  $c_{ij,k}$  a été convertis en nombre d'intervalles de gris, selon l'équation (4)

$$C_k \rightarrow [C_k^{down}, C_k^{up}]$$

$$[C_k^{down}, C_k^{up}] = \begin{bmatrix} 0 & c_{12,k}^{down} & \dots & c_{1n,k}^{down} & 0 & c_{12,k}^{up} & \dots & c_{1n,k}^{up} \\ c_{21,k}^{down} & \ddots & \dots & c_{2n,k}^{down} & c_{21,k}^{up} & \ddots & \dots & c_{2n,k}^{up} \\ \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots & \dots & 0 & \vdots \\ c_{1n,k}^{down} & c_{2n,k}^{down} & \dots & 0 & c_{1n,k}^{up} & c_{2n,k}^{up} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (5)$$

Tableau V-3 :Phrase linguistique et relation correspondante de la théorie grise (Zheng et al., 2022).

Niveaux linguistique	Numéro d'intervalle gris
Sans impact	[0, 0]
Faible impact	[0, 0,25]
Impact moyen faible	[0,25, 0,5]
Impact moyen élevé	[0,5, 0,75]
Fort impact	[0,75, 1]
Impact très élevé	[1, 1]

**Étape 4.** La création de la matrice de relation nette se fait en se basant sur la matrice de relation grise moyenne, ainsi que sur la matrice de limite supérieure (N up) et la matrice de limite inférieure (N down), qui sont constituées de la valeur moyenne  $c_{ij}$  des limites supérieures et inférieures des scores d'influence de tous les experts ( $c_{ij,k}$ ), respectivement, ont été calculées pour déterminer la moyenne de la matrice d'influence globale des relations d'influence (N) ; comme indiqué dans Équation (6).

$$\begin{aligned}
 N=[N^{down}, N^{up}] &= \begin{bmatrix} 0 & \bar{c}_{12}^{down} & \dots & \bar{c}_{1n}^{down} & 0 & \bar{c}_{12}^{up} & \dots & \bar{c}_{1n}^{up} \\ \bar{c}_{21}^{down} & \ddots & \dots & \bar{c}_{2n}^{down} & \bar{c}_{21}^{up} & \ddots & \dots & \bar{c}_{2n}^{up} \\ \vdots & \dots & 0 & \vdots & \vdots & \dots & 0 & \vdots \\ \bar{c}_{1n}^{down} & \bar{c}_{2n}^{down} & \dots & 0 & \bar{c}_{1n}^{up} & \bar{c}_{2n}^{up} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (6) \\
 &= \begin{pmatrix} [0,0] & [\bar{c}_{12}^{down}, \bar{c}_{12}^{up}] & \dots & [\bar{c}_{1n}^{down}, \bar{c}_{1n}^{up}] \\ \bar{c}_{21}^{down} & \ddots & \dots & [\bar{c}_{2n}^{down}, \bar{c}_{2n}^{up}] \\ \vdots & \dots & [0,0] & \vdots \\ [\bar{c}_{n1}^{down}, \bar{c}_{n1}^{up}] & [\bar{c}_{n2}^{down}, \bar{c}_{n2}^{up}] & \dots & [0,0] \end{pmatrix}_{n \times n}
 \end{aligned}$$

$$\bar{c}_{ij}^{down} = \frac{\sum_{k=1}^k c_{ij,k}^{down}}{k}, \bar{c}_{ij}^{up} = \frac{\sum_{k=1}^k c_{ij,k}^{up}}{k}, (7) ;$$

k représente le nombre total d'experts.

**Étape 5 :** Blanchement de la matrice complète des relations d'influence [N down, N up]. Le nombre d'intervalles de gris a été transféré en valeurs nettes (Dou et al., 2014), en utilisant les équations, (9), (10), et (11).

$$\bar{c}_{ij,nor}^{up} = \frac{\bar{c}_{ij}^{up} - \min_j(\bar{c}_{ij}^{up})}{\Delta_{min}^{max}} \quad (8)$$

$$\bar{c}_{ij,nor}^{down} = \frac{\bar{c}_{ij}^{down} - \min_j(\bar{c}_{ij}^{down})}{\Delta_{min}^{max}} \quad (9)$$

$$\Delta_{min}^{max} = \min_j(\bar{c}_{ij}^{up}) - \min_j(\bar{c}_{ij}^{down}) \quad (10)$$

$$S_{ij} = \min_j(\bar{c}_{ij}^{down}) + \frac{\bar{c}_{ij,nor}^{down}(1 - \bar{c}_{ij,nor}^{down}) + (\bar{c}_{ij,nor}^{up} \times \bar{c}_{ij,nor}^{up})}{1 - \bar{c}_{ij,nor}^{down} + \bar{c}_{ij,nor}^{up}} \quad (11)$$

L'équation (8) à (11) peuvent être simplifiées en équation (15) à (17), respectivement, car La valeur minimale de la matrice supérieure de relation d'influence doit être nulle.

$$\bar{c}_{ij,nor}^{up} = \frac{\bar{c}_{ij}^{up}}{\max_j(\bar{c}_{ij}^{up})} \quad (12)$$

$$\bar{c}_{ij,nor}^{down} = \frac{\bar{c}_{ij}^{down}}{\max_j(\bar{c}_{ij}^{up})} \quad (13)$$

$$\Delta_{min}^{max} = \min_j \bar{c}_{ij}^{up} \quad (14)$$

L'équation (15) a été utilisée pour déterminer les valeurs nettes ( $S_{ij}$ ) :

$$S_{ij} = \frac{\bar{c}_{ij}^{down} - \bar{c}_{ij}^{down} \times \bar{c}_{ij,nor}^{down} + \bar{c}_{ij}^{up} \times \bar{c}_{ij,nor}^{up}}{\max_j \bar{c}_{ij}^{up} - \bar{c}_{ij,nor}^{down} + \bar{c}_{ij,nor}^{up}} \quad (15)$$

**Étape 6 :** Le degré d'influence de DEMATEL.

Une nouvelle matrice influente nette a été obtenue ( $S$ ) à partir de  $S_{ij}$ , qui peut être exprimée par l'équation. (16) .

$$S = \begin{bmatrix} 0 & s_{12} & \dots & s_{1n} \\ s_{21} & \ddots & \dots & s_{2n} \\ \vdots & \dots & 0 & \vdots \\ s_{1n} & s_{2n} & \dots & 0 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (16)$$

La matrice de relation totale (T) peut ensuite être trouvée par l'équation (17).

## Chapitre V : Outils et méthodes

$$T = S_{nor}(E - S_{nor})^{-1} \quad (17)$$

$$S_{nor} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_j s_{ij}} \times S, i, j = 1, \dots, n. \quad (18)$$

Comme indiqué dans l'équation (19), le degré d'influence ( $D_i$ ) et le degré d'influence ( $R_i$ ) du facteur  $i$  ont été obtenue à l'aide de la matrice ( $T$ ).

$$D_i = \sum_{j=1}^n T_{ij}, R_i = \sum_{j=1}^n T_{ji} \quad (19)$$

### Étape 7 : Pondération des facteurs par le processus hiérarchique analytique (AHP).

La matrice de comparaison ( $A$ ) de l'AHP a été obtenue en comparant de  $D_i$  deux à deux. Chaque facteur a reçu son poids final ( $W_i$ ).

#### ▪ Mesurer la cohérence pour compléter l'analyse DEMATEL

Pour vérifier la fiabilité des comparaisons par paires, le rapport de cohérence ( $CR$ ) a été calculé que la valeur est égale ou inférieure au niveau affable (10 %) (R. W. Saaty, 1987). Cela est démontré par les équations (20) et (21).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \quad (20); \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (21)$$

Où  $CI$  l'indice de cohérence,  $RI$  est la valeur standard en fonction du nombre de critères.

### Étape 8 : Pondération des facteurs par le processus de réseau analytique (ANP).

Les poids des indices d'évaluation obtenue à l'aide de l'équation suivantes :

$$W_{ANP} = (D - R) / (D + R) \quad (22)$$

Dans le cadre de notre recherche, la méthode G-DEMATEL a été exécutée dans l'Excel 2023 l'AHP et l'ANP dans le MATLAB R2022a. Quant au montage cartographique, il a été élaboré dans le sillage du logiciel Open Source Q-GIS3.18.

## Conclusion

L'approche systémique offre des méthodes et des outils pour une compréhension approfondie du risque d'inondation, en mettant en évidence les interactions pertinentes et en quantifiant les rétroactions au sein des systèmes de risque d'inondation. Les décideurs et les gestionnaires locaux peuvent se référer de l'approche systémique pour l'élaboration des stratégies globales

## *Chapitre V : Outils et méthodes*

de réduction des risques. Afin de tenir compte de la complexité et de la nature dynamique du risque d'inondation, il est suggéré d'adopter une approche systémique pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation à grande échelle (MCDM), dans le but de soutenir la prise de décision concernant les investissements dans les programmes de gestion des inondations.

La méthode sélectionnée a d'abord simplifié les étapes du questionnaire expert de DEMATEL et AHP en utilisant un questionnaire à neuf points qui nous ont permis d'avoir un accès à la relation et aux interdépendances entre l'ensemble des critères, ainsi au laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel. De plus, l'AHP et l'ANP peuvent détecter les conflits potentiels en évaluant la cohérence de la matrice de comparaison par paire. La combinaison des deux (2) méthodes MCDM à la théorie de Gray pour prendre en compte toutes les opinions des experts afin calculer les pondérations des facteurs d'influence. La prise de décision est un processus systématique et formel qui a la capacité d'évaluer la localisation des critères et sous-critères des risques associés aux inondations.

*Chapitre VI*  
*Résultats et discussions*

### **Introduction**

Le retour d'expérience hydrologique a servi d'outil à la délimitation des zones et ce en dévoilant que des larges étendus comportant d'importantes activités socioéconomiques sont industrieusement exposées au risque. L'évaluation du risque des inondations est moins facile à appréhender (Rincón et al., 2018; UNISDR, 2019). La littérature examinée a servi pour impliquer l'approche de l'évaluation multi-échelles de la sensibilité au risque d'inondation afin de mieux appréhender la situation. Les différents scénarios et les indices de risque sont les principaux outils d'évaluation des risques identifiés (R. Sun et al., 2022).

Plusieurs études montrent que l'évaluation des risques d'inondation est cruciale pour comprendre le niveau de risque d'un lieu donné (Hassan et al., 2019; Mudashiru et al., 2021; Yu et al., 2023). Principalement réalisée au moyen d'un cadre ou d'un modèle, d'un système d'indicateurs et d'une simulation de scénario (R. Sun et al., 2022).

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer la sensibilité aux risques des inondations à l'aide d'un modèle conceptuel basé sur trois indices clés qui reflètent l'état de la gravité des inondations urbaines : topographique naturel, activité anthropique (changement climatique et urbanisation) et infrastructure de drainage urbain, observée dans la ville de Skikda, et ce afin d'ouvrir un champ de recherche potentiel pour atténuer les conséquences et d'amorcer des solutions résilientes.

### **VI.1 Conception d'un système spatial d'aide à la décision pour cartographier la vulnérabilité aux risques des inondations dans la ville de Skikda**

#### **V.1.1 Cadre générale de l'évaluation du risque des inondations de la ville de Skikda**

Les risques d'inondation ont été évalués à l'aide d'une nouvelle combinaison de la théorie grise, la méthode DEMATEL et la méthode AHP (Saaty, 1977; Zheng, 2023). C'est une approche combinatoire intégrant la théorie grise afin de réduire l'ambiguïté dans le processus décisionnel par le système d'incertitude, ainsi le laboratoire d'essais et d'évaluation de prise de décision (DEMATEL) pour asseoir la relation entre les facteurs au sein d'une seule couche, le processus analytique hiérarchique (AHP) qui se concentre sur leurs pondérations et le processus analytique en réseau (ANP) qui se concentre sur les relations causales des indices d'évaluation

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

; basée sur les données obtenues à partir d'un questionnaire à neuf scores et le SIG. Ce remplacement conduira à des résultats plus précis et pratiques.

La première étape, était d'élaborer la structure d'évaluation. Le risque d'inondation à Skikda est caractérisé par la combinaison des indices d'impacts et de Causes regroupés en trois composantes de sensibilité qui contribuent aux inondations urbaines : **topographie naturel (Ti), anthropique (Aj) (changement climatique /urbanisation) et infrastructure (Ik)**. Elles comprennent 6 facteurs indépendants ; en tenant compte des caractéristiques urbaines complexes.

La procédure d'évaluation pour les indices et les facteurs d'impact comprenait quatre parties : (1) la réalisation d'un questionnaire d'expert, (2) l'établissement de la matrice influente Grey-DEMATEL d'une comparaison par paires pour chaque expert transféré du questionnaire à 9 notes, (3) La détermination des pondérations finales des facteurs d'évaluation par AHP, (4) La cartographie de la répartition des niveaux de risque des inondations Urbaines à l'aide d'un SIG.

### **V.1.2 Source et préparation des données de l'évaluation dans l'étude**

Pour réaliser cette étude, les données de base couvrant la topographie, le microclimat, l'hydrologie, les changements terrestres (urbanisation) et l'infrastructure. Les données utilisées ont été collectées par plusieurs sources qui ont été préparées pour construire des couches thématiques géospatiales liées en occurrence aux risques d'inondation ; affichées par les techniques analytiques des SIG (le logiciel Quantum GIS version 3.28.).

Données géographiques incluses Digital Elevation Model (DEM) de la Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) à 1 seconde d'arc; au format raster avec une résolution de 30 m a été acquis sur le portail Web officiel de United States Geological Survey (USGS): <https://www.usgs.gov/>. Le DEM a été traité dans Q-GIS pour la numérisation et la délimitation des cours d'eau et préparer plusieurs couches telles que la pente, l'extraction de l'élévation et d'autres facteurs de sensibilité (l'aspect, la courbure du plan, direction du flux, l'accumulation de flux, Topographic Wetness Index (TWI), SPI et la distance aux rivières). D'autre part, des données de télédétection **RS** (LANDSAT-8 OLI/TIRS, Path/Row : 139/041) à une résolution spatiale de 30 m pour effectuer une analyse de densité de population, LULC, LST, Indice bâti par différence normalisée (NDBI), Indice végétalisé par différence normalisée (NDVI). Les données relatives aux précipitations ont été obtenues à partir d'une source ouverte en ligne de National Aeronautics and Space Administration (NASA), sur le site Web

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> et ont été analysées pour la variabilité des précipitations dans la zone d'étude. La carte lithologique a été créée à l'aide des informations obtenues auprès de site Web officiel world geologic maps USGS: <https://www.usgs.gov/media/images/world-geologic-maps>. Les données du recensement de la population ont été recueillies du Bureau des statistiques du Skikda (ONS), le réseau d'assainissement principal a été recueillies du DRE. Enfin, le jeu de données d'Open Street Map a été utilisé pour construire la couche spatiale de distance à la route.

Les jeux de données utilisés et leurs sources dans la formulation des modèles étudiés sont présentés dans le **Tableau VI-1**.

*Tableau VI-1 : Données utilisées pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations (auteur, 2023).*

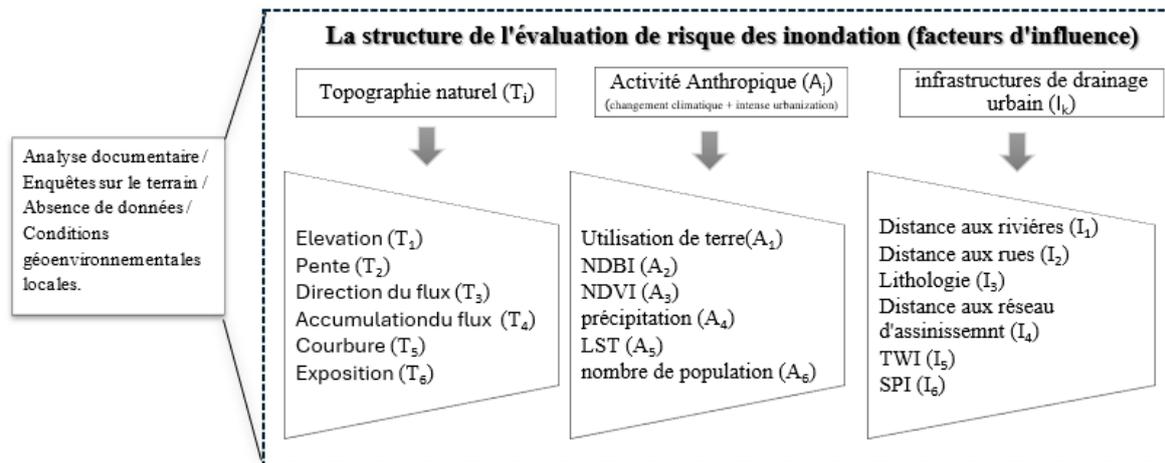
<b>Données utilisées</b>	<b>Type et source</b>	<b>Période</b>	<b>Résultats de la cartographie</b>
ASTER DEM	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): <a href="http://www.usgs.gov/Raster/Resolution%20spatial%20(30%20m)">www.usgs.gov/Raster/Resolution spatial (30 m)</a> .	2023	Élévation, pente, aspect, courbure, direction du flux, accumulation du flux, TWI, SPI, distance de la rivière.
Landsat series (L- 8) OLI	<a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> (30 m), Raster.	2023	LULC, LST, NDBI, NDVI.
Precipitation.	Texte, National Aeronautics and Space Administration (NASA).	2023	Precipitation.
Recensement	Texte, Bureau des statistique (ONS, Skikda)	2023	Densité de population.
Geofabric OSM data	(Shapefile-Polygone) Vecteur (30m).	2023	Distance aux rues.
world geologic maps USGS	<a href="https://certmapper.cr.usgs.gov/">https://certmapper.cr.usgs.gov/</a> , Vecteur	2023	Lithologie.
Réseau d'assainissement	(Shapefile-Polygone) Vecteur (30m) DRE		Réseau d'assainissement principal.
Inondation historique	Texte (protection civile)	1957-2023	Inondation historique

### **V.1.3 Procédure d'évaluation : facteurs multi-influence du risqué des inondations**

Les indices d'évaluation ont une influence très importante sur la précision du résultat d'évaluation (J. Zhang et al., 2018). Au cours du processus d'étude, la susceptibilité aux

## Chapitre VI : Résultats et discussions

inondations est généralement déterminée à l'aide d'un certain nombre de facteurs de décision mesurables et comparables. Cette étude se fonde sur une revue de la littérature scientifique portant sur les recherches antérieures en modélisation de la sensibilité aux Inondations publiées mondialement au cours des cinq dernières années (par exemple: Costache, 2019; Doorga et al., 2022; Edamo et al., 2022; Fenglin et al., 2023; Li et al., 2023; Lyu et al., 2020) , les conditions géoenvironnementales locales et la disponibilité des données dans la localité cible. Au total, nous avons initialement incorporé dix-huit variables indépendantes physiques, topographique, anthropiques, météorologiques et infrastructurelles ; choisis en fonction sur ces liens qui affectent l'occurrence des inondations dans la zone d'étude. Ces variables d'influence ont été regroupées en trois indices clés d'aggravation : les facteurs topographiques, les facteurs anthropiques et les facteurs infrastructurels. Une description des facteurs utilisés dans la modélisation des risques d'inondation pour la ville de Skikda est présentée ci-dessous.



**Figure V I-1:** Classification des différents facteurs et indices clés de la gravité des inondations urbaines dans la zone d'étude (auteur, 2023).

### VI.1.3.1 L'indice topographique

Les caractéristiques topographiques naturelles ont un effet important physique sur les occurrences d'inondations urbaines ; qu'a été dérivée sur la base du SRTM DEM ; et a été construite à l'aide de l'outil d'analyse spatiale Q-GIS 3.28 ; illustrés à la figure VI-2. Nous n'avons considéré les paramètres suivants :

**Élévation (E) :** L'élévation joue un rôle crucial dans le déclenchement des inondations urbaines (Li et al., 2023), influençant à la fois la direction et la profondeur des zones inondées (Choubin et Al. 2019). Les zones de basse altitude sont plus vulnérables aux inondations que

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

les zones plus élevées en raison de l'accumulation du ruissellement vers Les Zones Les plus basses (Towfiqul Islam et al., 2021). Ce paramètre constitue l'un des déterminants de la propagation des inondations dans la région étudiée, avec des altitudes variant du niveau de la mer à environ 400 mètres.

**Pente (P) :** Un facteur important pour la sensibilité aux inondations qui représente le taux de changement d'altitude (Kassogué et al., 2017). La pente affecte la vitesse de ruissellement et donc le temps disponible pour l'infiltration, ainsi que la vitesse de concentration du ruissellement et donc d'accumulation (Li et al., 2023). Des pentes plus raides peuvent provoquer des écoulements rapides, tandis que les inondations ont tendance à se produire sur des pentes douces (Patrikaki et al., 2018). Le Pourcentage de pente dans la zone d'étude a été varié de <1% à > 20%, a été distinguée en 5 catégories : (1) 0-4 ; (2) 4-8 ; (3) 8- 12 ; (4) 12-16 ; et (5) 16-20.

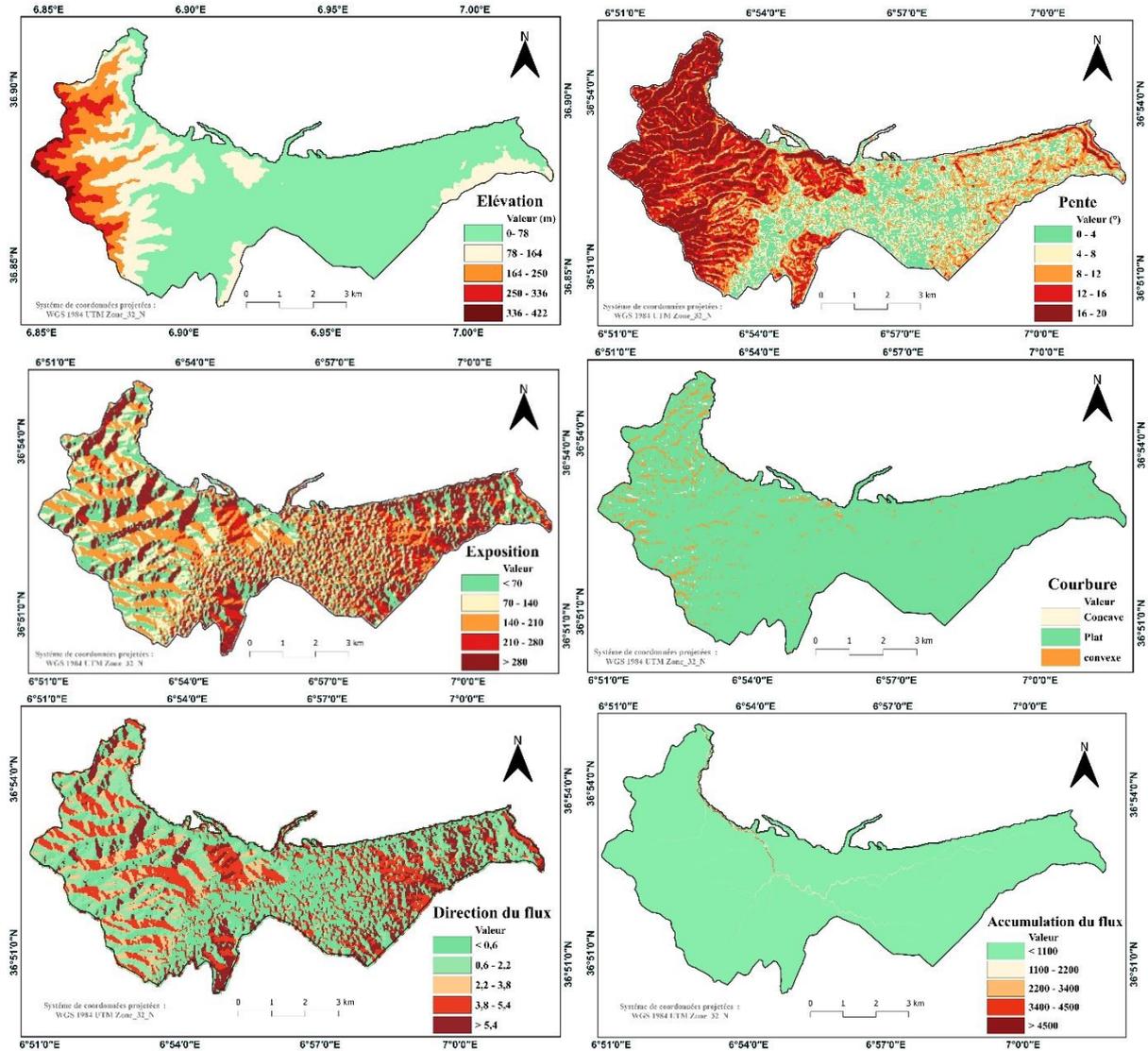
**Exposition (E) :** L'aspect indique la direction de la pente maximale qui affecte les processus hydrologiques et l'humidité du sol, cela peut exercer une influence indirecte sur les inondations.

**La courbure (C) :** La courbure représente les changements d'inclinaison de la pente (Wilson & Gallan, 2000). La courbure représente des surfaces convexes, concaves et plates indiquant respectivement des surfaces positives, négatives et nulles (Chapi et al., 2017). L'eau de crue a tendance à se retenir dans les surfaces concaves, augmentant potentiellement la susceptibilité aux inondations (Rejith et al., 2019).

**Direction du flux :** Une fois le parcours d'écoulement connu, le parcours avec le plus grand volume d'eau sera déterminé comme direction d'écoulement.

**Accumulation de débit :** La densité des canaux de drainage est représentée par le raster d'accumulation de débit, où les cellules présentant des valeurs élevées d'accumulation de débit témoignent d'une concentration importante du débit d'eau en ces endroits. Cela montre également que les zones avec une pente plus faible et un débit accumulé plus important entraîneront une grande susceptibilité aux inondations.

## Chapitre VI : Résultats et discussions



**Figure VI-2 :** La distribution spatiale des facteurs d'impact topographique naturel employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023).

### VI.1.3.2 L'indice anthropique :

L'impact des activités humaines sur l'hydrologie est énorme, principalement exacerbées avec l'apparition du : changement climatique accéléré et l'urbanisation intense (IPCC, 2014; Wang et al., 2022). C'est la raison pour laquelle nous l'avons identifié comme un paramètre crucial pour évaluer la vulnérabilité aux inondations dans la ville de Skikda. Les facteurs qui y contribuent sont les suivants :

**Land use and land cover (LULC) :** La couverture des sols est un facteur lié aux progrès de l'urbanisation. L'impact de l'expansion urbaine sur le ruissellement et les inondations a été étudié par plusieurs chercheurs (Hammi et al., 2019 ; Souissi et al., 2020 ; Luu et al., 2021), mettant en évidence la diminution du taux d'infiltration et du temps de concentration. La

## Chapitre VI : Résultats et discussions

cartographie de l'occupation des sols a été réalisée en classifiant une image aérienne de Skikda avec une résolution de 30 mètres. Cinq classes d'occupation du sol ont été distinguées : i) urbain ; ii) espace vert ; iii) Plan d'eau ; iv) agriculture ; et v) Terrains nues.

**Normalized Difference Built Index (NDBI)** : Les valeurs NDBI plus élevées correspondent à une densité de construction plus élevée. La zone bâtie est les plus susceptibles d'être inondées en raison de leur surface imperméable avec sols compactés, qui entraînent un ruissellement rapide lors des fortes pluies. Dans la zone d'étude, les surfaces bâties imperméables sont dominantes. Les valeurs NDBI ont été obtenues par Eq. (1) :

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \dots \dots \dots (1)$$

Où SWIR est la bande infrarouge à ondes courtes et NIR est la bande proche infrarouge.

**Indice de végétation par différence normalisée (NDVI)** : est un indicateur révèle le degré de verdure d'une zone spécifique (Guo & Wu, 2023). La perte de végétation induite par l'urbanisation rapide a un lien établi avec l'exercice d'une pression sur la terre et l'eau limitées (Garg et al., 2017); aggravant les problèmes d'inondation dans les villes. Les valeurs NDVI ont été obtenues de l'imagerie satellite pendant la saison des crues en 2023, en utilisant la formule suivante :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \dots \dots \dots (2)$$

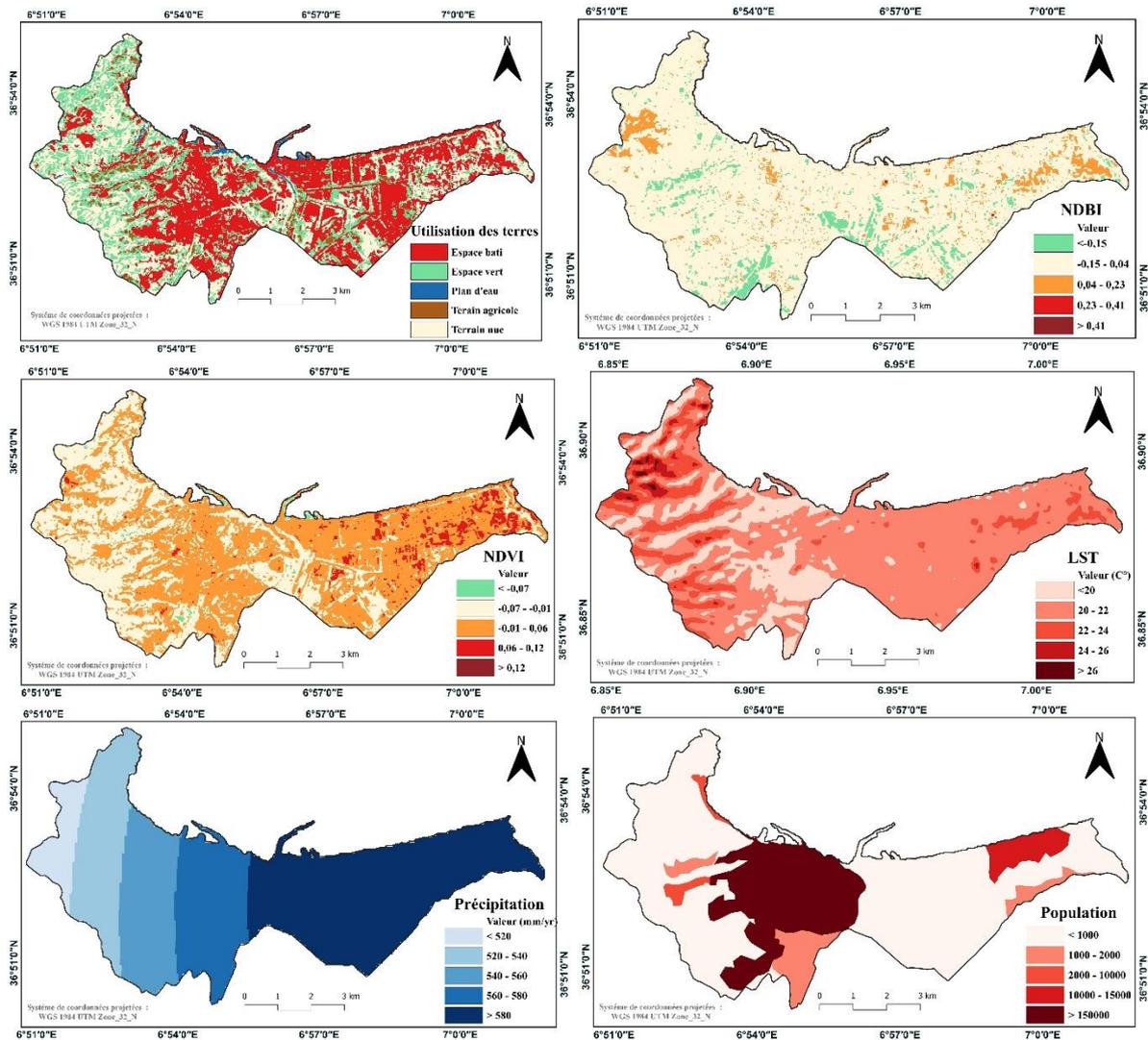
Où la bande rouge (R) et la bande proche infrarouge (NIR).

**Précipitation (P)** : sont définies en hydrologie comme l'eau frappant la surface de la terre sous forme liquide ou solide, sont l'élément clé du cycle hydrologique. L'intensité et la durée des précipitations sont essentielles pour la production du ruissellement (H. Singh et al., 2023). C'est la cause directe des inondations urbaines dans la ville de Skikda. Par conséquent, les précipitations ont été choisies comme indicateur, mesurées par les précipitations maximales dans l'histoire (Wu et al., 2023). Les inondations à Skikda se produisent le plus souvent lors de fortes intensité précipitations dans une courte durée (DRE Skikda ; 2023). La quantité de pluie annuelle dans la zone d'étude varie de 520 à 580 mm et la zone reçoit en moyenne plus de 1100 mm de pluie.

**Land surface temperature (LST)** : Les valeurs LST ont été obtenues de l'imagerie satellite pendant la saison des crues en 2023 (Erdem et al., 2021).

## Chapitre VI : Résultats et discussions

**Population (P) :** Le facteur de taille de la ville est mesuré par sa population (AbouKorin et al., 2021). En tant qu'élément essentiel du système de risques naturels, l'exposition aux inondations est significativement accrue dans les zones à forte densité de population et de biens (Nur & Shrestha, 2017), après Jésus-Christ qui se traduit par des pertes en Eddv humaines plus importantes dans les régions densément peuplées. Entre-temps, la population de la ville Skikda qui double de décennie en décennie continue de vivre dans les mêmes limites d'un environnement hostile et dangereux ; ce qui il exacerbe les inondations dans la ville.



**Figure VI-3 :** La distribution spatiale des facteurs d'impact anthropique (changement climatique et urbanisation) employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023).

### VI.1.3.3 L'indice infrastructurelle

**Distance aux rivières** : l'un des paramètres significatifs influençant l'occurrence et l'ampleur des inondations (Bunmi Mudashiru et al., 2022 ; O'Neill et al., 2016; Fernandez et Lutz, 2010). Cette distance est définie comme la distance euclidienne entre un point donné et le cours d'eau le plus proche (Fang et al., 2021). Dans le cadre de cette recherche, il est observé que les zones riveraines, telles que l'oued Saf-Saf et l'oued Zermena, présentent un risque accru d'inondation en raison de la submersion des berges lors de précipitations intenses, causée par une capacité de transport insuffisante. Les édifices et les entreprises situés à proximité des cours d'eau sont davantage exposés aux risques d'inondation.

**Distance aux rues** : la distance euclidienne entre un point donné et l'axe routier le plus proche. Les zones contiguës aux infrastructures routières présentent une probabilité accrue d'être exposées à des inondations.

(P. Singh et al., 2017). Le réseau routier imperméable réduisent la capacité d'infiltration d'une zone (Shafapour Tehrani et al., 2019). La zone d'étude est traversée par un réseau routier plus dense dans la partie centrale à l'inverse des zones montagneuses et un réseau ferroviaire pour les échanges avec la région nord – est et le reste du pays, augmentant ainsi sa sensibilité aux inondations.

**Lithologie** : un élément géomorphologique essentiel verser évaluer la capacité d'infiltration dans le cadre de la cartographie des risques d'inondation (D. Zhang et al., 2020). Nous avons indiqué 3 catégories géologiques différentes dans la zone d'étude : *Jurassic* à l'est, *precambrian* dans la partie centrale et l'ouest, *Sea* au nord.

**Distance au réseau d'assainissement** : Le système d'assainissement urbain joue un rôle essentiel dans la planification de l'aménagement du territoire urbain et la modélisation des inondations (Miguez et al., 2018). Ce réseau assure le drainage et réduire le niveau des eau pluviales vers divers estuaires. Le réseau d'assainissement s'étend sur toute la zone d'étude, avec un diamètre de canal Q 600 mm. Une enquête sur le réseau d'assainissement a montré qu'il souffre du problème d'entretien par les autorités locales et du colmatage des égouts, dont l'effet apparaît fortement et clairement lors de pluies, ce qui conduit à la stagnation des eaux pluviales et l'amplification des inondations. Les zones proches des réseaux d'assainissement sont les plus susceptibles d'être inondées.

## Chapitre VI : Résultats et discussions

**Indice topographique d'humidité (TWI) :** est une combinaison de deux paramètres, y compris la surface du bassin en amont et la pente (Shahabi et al., 2021). Plus l'humidité de la zone est élevée, plus le potentiel d'inondation est important (Olaya & Conrad, 2009).

Ainsi, TWI est calculé à l'aide de l'équation :

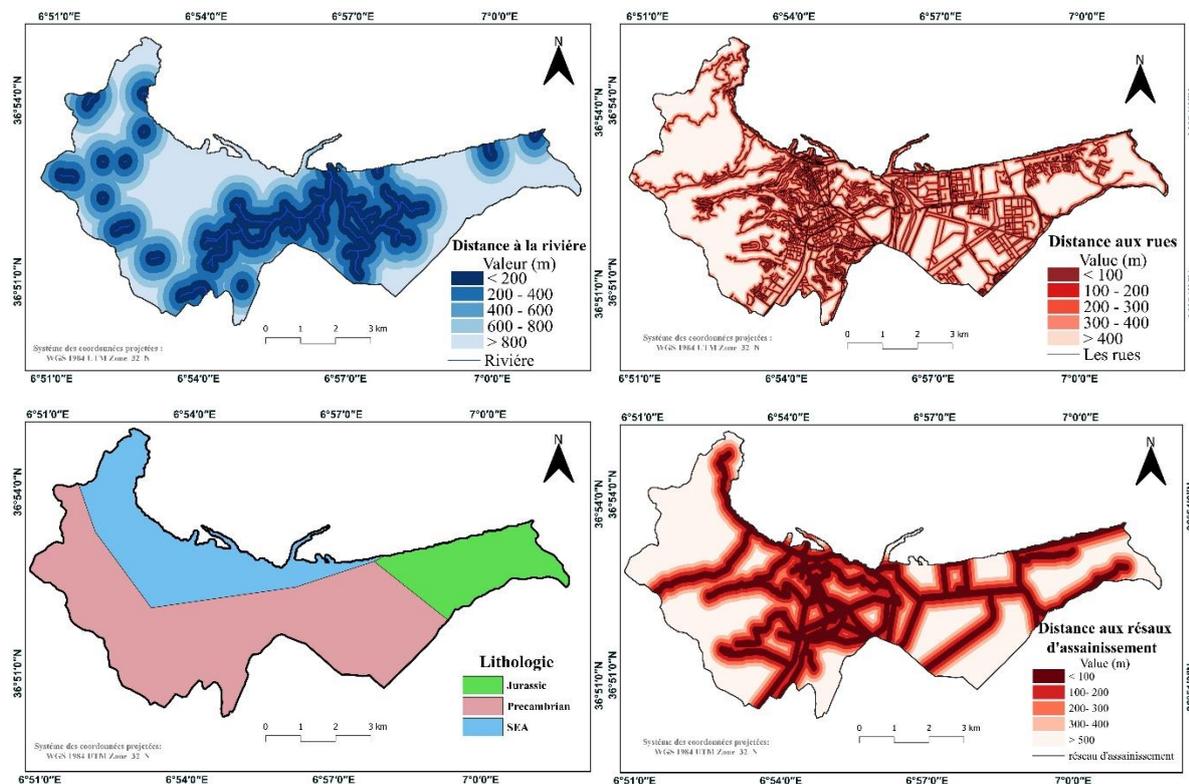
$$TWI = \ln \left( \frac{As}{\tan \beta} \right) \dots\dots\dots (3)$$

Où  $A_s$  est la superficie du bassin amont ( $m^2 / m$ ) et  $\beta$  est l'angle de pente gradient (degrés).

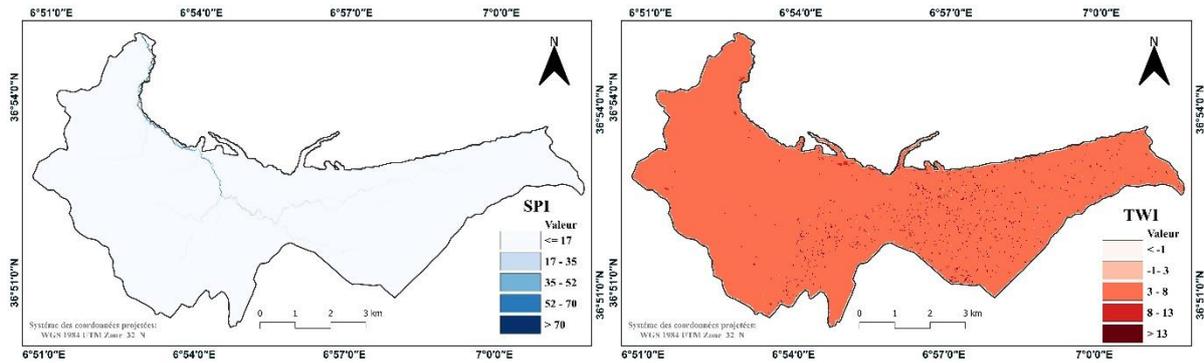
**Indice de puissance des cours d'eau (SPI) :** est facteur hydrologique qui affecte la variation spatiale des inondations. Le SPI a tendance à être plus élevé pour les canaux confinés et conduit souvent à une transformation des canaux et donc à une probabilité plus élevée d'inondation. Les zones avec un SPI très faible sont les plus sujettes aux inondations et sont classées comme très élevées (Ouma & Omai, 2023). SPI est calculé à l'aide de l'équation :

$$SPI = A_s * \tan \beta \dots\dots\dots (4)$$

Où  $A_s$  est la superficie du bassin amont et  $\beta$  est l'angle de pente.



## Chapitre VI : Résultats et discussions



**Figure VI-4 :** La distribution spatiale des facteurs d'impact d'infrastructure de drainage urbain employés dans la modélisation cartographique de risque d'inondation à Skikda (auteur, 2023).

### V.1.4 Pondération des facteurs d'influence multiples des inondations urbaines

L'importance des critères et interdépendances (18 facteurs de susceptibilité aux inondations) a été jugée à l'aide de la méthode ci-dessus. Cette méthode utilise les caractéristiques DEMATEL pour refléter la relation entre les facteurs au sein d'une couche. La théorie de Gray réduit l'ambiguïté dans le processus de prise de décision. Méthode d'analyse hiérarchique (AHP) pour déterminer l'importance pondérale des facteurs d'influence.

Les pondérations pour les indices de topographie naturelle, d'anthropique et d'infrastructure de drainage urbain peuvent être calibrées. Le tableau 6 répertorie les poids des facteurs d'évaluation calibrés dans la zone d'étude. Le rapport de cohérence (CR) a été examiné ( $CR < 0,1$ ) ; les valeurs CR résultante obtenues étaient respectivement de 0,017; 0,016 et 0,023; cela indique que la cohérence des jugements des experts est satisfaisante (Saaty et Vargas, 1980).

#### VI.1.4.1 Les pondérations des facteurs d'infrastructure

Comme le montre le tableau, dans la couche d'indice d'infrastructure ( $I$ ), le facteur ( $I_4$ ) (réseau d'assainissement) a la plus grande influence sur les autres critères avec un poids de 0,198, tandis que TWI ( $I_5$ ) est le facteur le plus faible d'un poids de 0,130. En effet, en cas de fortes pluies, le mauvais état du réseau d'assainissement rend les eaux pluviales stagnantes au sol imperméable et dépasse la limite.

**Tableau VI-2:** Langage de programmation des facteurs d'infrastructure d'après le Matlab 2022a (auteur, 2024).

1	<code>clear all, close all, clc</code>
2	<code>% Example 6x6 pairwise comparison matrix</code>
3	<code>pairwise_matrix = [1.000 1.041 1.321 0.931 1.416 1.071;</code>
4	<code>0.961 1 1.269 0.895 1.361 1.030;</code>

## Chapitre VI : Résultats et discussions

5	0.757 0.788 1 0.705 1.072 0.811;
6	1.074 1.118 1.419 1 1.521 1.151;
7	0.706 0.735 0.933 0.658 1 0.757;
8	0.933 0.971 1.233 0.869 1.321 1.000];
9	
10	<code>% Call the AHP function</code>
11	<code>[priority_vector, CR] = ahp(pairwise_matrix);</code>
12	
13	<code>% Display results</code>
14	<code>disp('Priority Vector (Weights):');</code>
15	<code>disp(priority_vector);</code>
16	<code>disp('Consistency Ratio (CR):');</code> <code>disp(CR);</code>
1	Pairwise Comparison Matrix (A):
2	1.0000 1.0410 1.3210 0.9310 1.4160 1.0710
3	0.9610 1.0000 1.2690 0.8950 1.3610 1.0300
4	0.7570 0.7880 1.0000 0.7050 1.0720 0.8110
5	1.0740 1.1180 1.4190 1.0000 1.5210 1.1510
6	0.7060 0.7350 0.9330 0.6580 1.0000 0.7570
7	0.9330 0.9710 1.2330 0.8690 1.3210 1.0000
8	
9	Normalized Pairwise Comparison Matrix (A_normalized):
10	0.1841 0.1842 0.1841 0.1841 0.1841 0.1840
11	0.1769 0.1769 0.1769 0.1769 0.1770 0.1770
12	0.1394 0.1394 0.1394 0.1394 0.1394 0.1393
13	0.1978 0.1978 0.1978 0.1977 0.1978 0.1978
14	0.1300 0.1300 0.1300 0.1301 0.1300 0.1301
15	0.1718 0.1718 0.1718 0.1718 0.1718 0.1718
16	
17	Priority Vector (Weights):
18	0.1841
19	0.1769
20	0.1394
21	0.1978
22	0.1300
23	0.1718
24	
25	Consistency Vector:
26	6.0003
27	6.0003
28	6.0003
29	6.0003
30	6.0003
31	6.0003
32	
33	Lambda max:
34	6.0003
35	

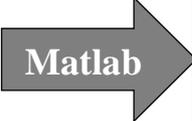
**Chapitre VI : Résultats et discussions**

```

36 Consistency Index (CI):
37     6.1535e-05
38
39 Consistency Ratio (CR):
40     4.8837e-05
41
42 The pairwise comparison matrix is consistent.
43 Priority Vector (Weights):
44     0.1841
45     0.1769
46     0.1394
47     0.1978
48     0.1300
49     0.1718
50
51 Consistency Ratio (CR):
52     4.8837e-05
53
54 >>
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66

```

**Tableau VI-3 :** Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice d'infrastructure (auteur, 2024).

	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I <sub>4</sub>	I <sub>5</sub>	I <sub>6</sub>	<b>OUTPUT</b>		w <sub>i</sub>	w <sub>i</sub> '
I <sub>1</sub>	1,000	1,041	1,321	0,931	1,416	1,071		1,130	0,184	0,070
I <sub>2</sub>	0,961	1,000	1,269	0,895	1,361	1,030		1,086	0,177	0,067
I <sub>3</sub>	0,757	0,788	1,000	0,705	1,072	0,811		0,855	0,139	0,053
I <sub>4</sub>	1,074	1,118	1,419	1,000	1,521	1,151		1,214	0,198	0,075
I <sub>5</sub>	0,706	0,735	0,933	0,658	1,000	0,757		0,798	0,130	0,049
I <sub>6</sub>	0,933	0,971	1,233	0,869	1,321	1,000		1,055	0,172	0,065
<b>Totale</b>							6,109	$\lambda_{\max}$	6,137	

## Chapitre VI : Résultats et discussions

### VI.1.4.2 Les pondérations des facteurs anthropique

Dans la couche d'indice anthropique (A), le facteur A<sub>5</sub> (précipitations) rend également compte de la relation ou de l'importance d'un critère particulier par rapport à d'autres critères ; il a le poids le plus élevé (0,203), tandis que le LST (A<sub>1</sub>) a le poids le plus faible, avec un poids de 0,14. En fait, de fortes précipitations sur une courte durée peuvent entraîner un excès d'eau pluviale conduisant à des inondations catastrophiques; en raison de l'effet du changement climatique actuel et des activités d'urbanisation incontrôlées.

**Tableau VI-4:** Langage de programmation des facteurs anthropiques d'après le Matlab 2022a (auteur, 2024).

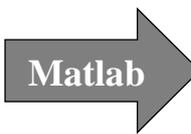
1	clear all, close all, clc
2	% Example 6x6 pairwise comparison matrix
3	pairwise_matrix =[1.000 0.999 1.094 0.792 1.153 0.862;
4	1.001 1.000 1.096 0.793 1.155 0.863;
5	0.914 0.913 1.000 0.724 1.054 0.788;
6	1.236 1.261 1.381 1.000 1.456 1.088;
7	0.867 0.866 0.949 0.687 1.000 0.748;
8	1.160 1.159 1.269 0.919 1.338 1.000];
9	
10	% Call the AHP function
11	[priority_vector, CR] = ahp(pairwise_matrix);
12	
13	% Display results
14	disp('Priority Vector (Weights):');
15	disp(priority_vector);
16	
17	disp('Consistency Ratio (CR):');
18	disp(CR);
19	
1	Pairwise Comparison Matrix (A):
2	1.0000    0.9990    1.0940    0.7920    1.1530    0.8620
3	1.0010    1.0000    1.0960    0.7930    1.1550    0.8630
4	0.9140    0.9130    1.0000    0.7240    1.0540    0.7880
5	1.2360    1.2610    1.3810    1.0000    1.4560    1.0880
6	0.8670    0.8660    0.9490    0.6870    1.0000    0.7480
7	1.1600    1.1590    1.2690    0.9190    1.3380    1.0000
8	
9	Normalized Pairwise Comparison Matrix (A_normalized):
10	0.1619    0.1612    0.1611    0.1611    0.1611    0.1612
11	0.1620    0.1613    0.1614    0.1613    0.1614    0.1613
12	0.1479    0.1473    0.1473    0.1473    0.1473    0.1473
13	0.2001    0.2035    0.2034    0.2035    0.2035    0.2034
14	0.1403    0.1397    0.1398    0.1398    0.1397    0.1398
15	0.1878    0.1870    0.1869    0.1870    0.1870    0.1870
16	

## Chapitre VI : Résultats et discussions

```
17 Priority Vector (Weights):
18     0.1613
19     0.1615
20     0.1474
21     0.2029
22     0.1399
23     0.1871
24
25 Consistency Vector:
26     5.9967
27     5.9967
28     5.9967
29     5.9968
30     5.9967
31     5.9967
32
33 Lambda max:
34     5.9967
35
36 Consistency Index (CI):
37     -6.5056e-04
38
39 Consistency Ratio (CR):
40     -5.1632e-04
41
42 The pairwise comparison matrix is consistent.
43 Priority Vector (Weights):
44     0.1613
45     0.1615
46     0.1474
47     0.2029
48     0.1399
49     0.1871
50
51 Consistency Ratio (CR):
52     -5.1632e-04
53 >>
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
```

## Chapitre VI : Résultats et discussions

**Tableau VI-5:** Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice anthropique (auteur, 2024).

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	OUTPUT		w <sub>i</sub>	w <sub>i</sub> '
A <sub>1</sub>	1,00 0	0,99 9	1,09 4	0,79 2	1,15 3	0,86 2		0,983	0,161	0,052
A <sub>2</sub>	1,00 1	1,00 0	1,09 6	0,79 3	1,15 5	0,86 3		0,985	0,161	0,052
A <sub>3</sub>	0,91 4	0,91 3	1,00 0	0,72 4	1,05 4	0,78 8		0,899	0,147	0,047
A <sub>4</sub>	1,26 3	1,26 1	1,38 1	1,00 0	1,45 6	1,08 8		1,242	0,203	0,066
A <sub>5</sub>	0,86 7	0,86 6	0,94 9	0,68 7	1,00 0	0,74 8		0,853	0,140	0,045
A <sub>6</sub>	1,16 0	1,15 9	1,26 9	0,91 9	1,33 8	1,00 0		1,141	0,187	0,060
<b>Totale</b>							6,109	λ <sub>max</sub>	6,109	

### VI.1.4.3 Les pondérations des facteurs topographique

Dans la couche d'indice topographique (*T*), le facteur de pondération le plus élevé est l'accumulation des débits (*T*<sub>6</sub>), tandis que la courbure (*T*<sub>5</sub>) est le facteur de pondération le plus faible. L'eau s'écoule vers les zones inférieures, présentées l'agglomération urbaine.

**Tableau VI-6:** Langage de programmation des facteurs anthropiques d'après le MATLEB 2022a (auteur, 2024).

```

1 clear all, close all, clc
2
3 % Example 6x6 pairwise comparison matrix
4 pairwise_matrix =[1.000 1.047 1.184 1.111 1.274 0.836;
5                   0.955 1      1.131 1.062 1.217 0.798;
6                   0.845 0.884 1      0.939 1.076 0.706;
7                   0.9   0.942 1.065 1      1.146 0.752;
8                   0.785 0.822 0.929 0.872 1      0.656;
9                   1.197 1.253 1.416 1.330 1.525 1.000];
10
11 % Call the AHP function
12 [priority_vector, CR] = ahp(pairwise_matrix);
13
14 % Display results
15 disp('Priority Vector (Weights):');
16 disp(priority_vector);
17
18 disp('Consistency Ratio (CR):');
19 disp(CR);
20

```

**Chapitre VI : Résultats et discussions**

```

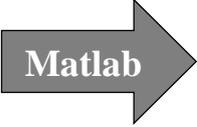
1 pairwise_matrix =
2
3     1.0000    0.9230    0.7870
4     1.0830    1.0000    0.8520
5     1.2700    1.1730    1.0000
6
7 Pairwise Comparison Matrix (A):
8     1.0000    0.9230    0.7870
9     1.0830    1.0000    0.8520
10    1.2700    1.1730    1.0000
11
12 Normalized Pairwise Comparison Matrix (A_normalized):
13    0.2982    0.2981    0.2982
14    0.3230    0.3230    0.3228
15    0.3788    0.3789    0.3789
16
17 Priority Vector (Weights):
18    0.2982
19    0.3229
20    0.3789
21
22 Consistency Vector:
23    2.9995
24    2.9995
25    2.9995
26
27 Lambda max:
28    2.9995
29
30 Consistency Index (CI):
31    -2.5085e-04
32
33 Consistency Ratio (CR):
34    -4.8240e-04
35
36 The pairwise comparison matrix is consistent.
37 Priority Vector (Weights):
38    0.2982
39    0.3229
40    0.3789
41
42 Consistency Ratio (CR):
43    -4.8240e-04
44
45 >>

```

**Tableau VI-7 : Moyenne des comparaisons de critères par paire d'indice topographique (auteur, 2024).**

	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	OUTPUT	w <sub>i</sub>	w <sub>i'</sub>
--	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	--------	----------------	-----------------

**Chapitre VI : Résultats et discussions**

T <sub>1</sub>	1,000	1,047	1,184	1,111	1,274	0,836		1,075	0,176	0,052
T <sub>2</sub>	0,955	1,000	1,131	1,062	1,217	0,798		1,027	0,168	0,050
T <sub>3</sub>	0,845	0,884	1,000	0,939	1,076	0,706		0,908	0,149	0,044
T <sub>4</sub>	0,900	0,942	1,065	1,000	1,146	0,752		0,968	0,158	0,047
T <sub>5</sub>	0,785	0,822	0,929	0,872	1,000	0,656		0,844	0,138	0,041
T <sub>6</sub>	1,197	1,253	1,416	1,330	1,525	1,000		1,287	0,211	0,063
<b>Totale</b>								6,109	$\lambda_{max}$	6,109

**VI.1.4.4 Les pondérations pour les indices d'aggravation des risques des inondations selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP**

Les résultats indiquent que l'impact du mauvais état des infrastructures de drainage urbain ( $I_k$ ) est identifié comme la principale origine des inondations urbaines dans la zone d'étude, avec un poids de 0,379. Ensuite, l'impact anthropique ( $A_j$ ) est également significatif, avec un poids de 0,323, dépassant celui de l'impact topographique ( $T_i$ ) qui a un Poids de 0,298.

**Tableau VI-8 :** Langage de programmation des indices d'évaluations d'après le MATLAB 2022a (auteur, 2024).

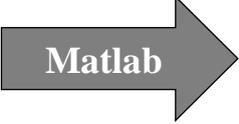
1	<code>clear all, close all, clc</code>
2	<code>% Example 3x3 pairwise comparison matrix</code>
3	<code>pairwise_matrix3 =[1.000 0.923 0.787;</code>
4	<code>                  1.083 1.000 0.852;</code>
5	<code>                  1.270  1.173 1.000];</code>
6	
7	<code>% Call the AHP function</code>
8	<code>[priority_vector, CR3] = ahp(pairwise_matrix);</code>
9	
10	<code>% Display results</code>
11	<code>disp('Priority Vector (Weights):');</code>
12	<code>disp(priority_vector);</code>
13	
14	<code>disp('Consistency Ratio (CR):');</code>
15	<code>disp(CR) ;</code>
16	
1	<code>pairwise_matrix =</code>
2	
3	<code>      1.0000      0.9230      0.7870</code>
4	<code>      1.0830      1.0000      0.8520</code>
5	<code>      1.2700      1.1730      1.0000</code>
6	
7	
8	<code>Pairwise Comparison Matrix (A):</code>

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

9	1.0000	0.9230	0.7870
10	1.0830	1.0000	0.8520
11	1.2700	1.1730	1.0000
12			
13			
14	Normalized Pairwise Comparison Matrix (A_normalized):		
15	0.2982	0.2981	0.2982
16	0.3230	0.3230	0.3228
17	0.3788	0.3789	0.3789
18			
19	Priority Vector (Weights):		
20	0.2982		
21	0.3229		
22	0.3789		
23			
24			
25	Consistency Vector:		
26	2.9995		
27	2.9995		
28	2.9995		
29			
30			
31	Lambda max:		
32	2.9995		
33			
34	Consistency Index (CI) :		
35	-2.5085e-04		
36			
37			
38	Consistency Ratio (CR):		
39	-4.8240e-04		
40			
41	The pairwise comparison matrix is consistent.		
42	Priority Vector (Weights):		
43	0.2982		
44	0.3229		
45	0.3789		
46			
47			
48	Consistency Ratio (CR):		
49	-4.8240e-04		
50			
51			
52	>>		

**Tableau VI-9:** Moyenne des comparaisons de critères par paire des indices d'aggravation (auteur, 2023).

## Chapitre VI : Résultats et discussions

	T <sub>i</sub>	A <sub>j</sub>	I <sub>k</sub>	OUTPUT	w <sub>i</sub>	w <sub>i'</sub>
T <sub>i</sub>	1,000	0,923	0,787		0,903	0,298
A <sub>j</sub>	1,083	1,000	0,852		0,978	0,323
I <sub>k</sub>	1,270	1,173	1,000		1,148	0,379
Totale					3,029	1,000

Ces variations suggèrent une modification du poids de chaque facteur en réponse à l'intensification de l'impact des risques d'inondations urbaines.

**Tableau VI-10 :** Pondérations synthèses des facteurs d'évaluation calibrés selon la méthode G-DEMATEL-AHP (auteur, 2024).

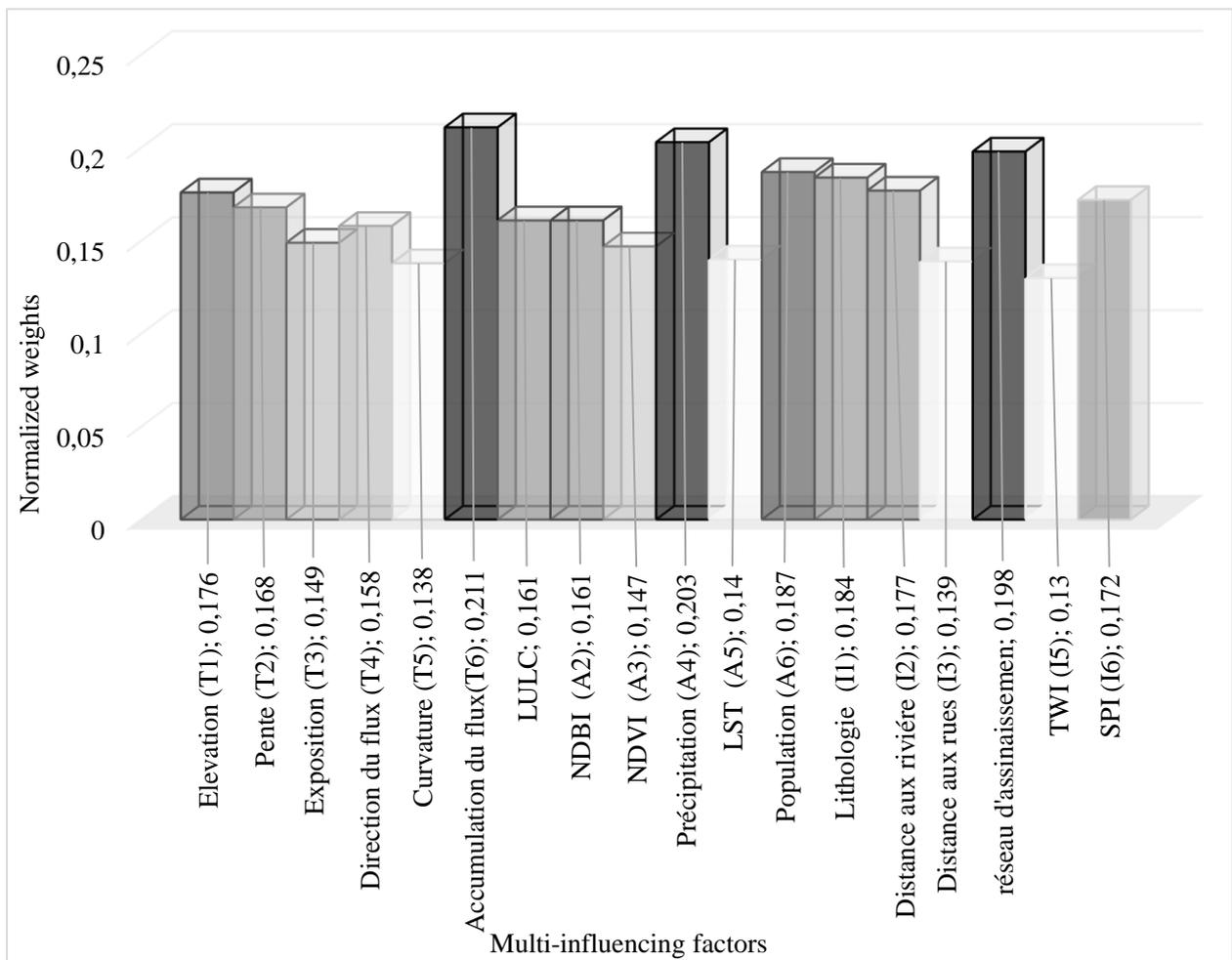
<b>G-DEMATEL-AHP</b>				
Indices d'évaluation	w <sub>i</sub>	Facteurs d'influence	Poids (w <sub>i</sub> )	Poids (w <sub>i'</sub> )
Topographie naturelle (T <sub>i</sub> )	0,298	Elévation (T <sub>1</sub> )	0,176	0,052
		Pente(T <sub>2</sub> )	0,168	0,050
		Exposition (T <sub>3</sub> )	0,149	0,044
		Direction du flux (T <sub>4</sub> )	0,158	0,047
		curvature (T <sub>5</sub> )	0,138	0,041
		Accumulation du flux(T <sub>6</sub> )	0,211	0,063
Activité anthropique (A <sub>j</sub> )	0,323	Utilisation des terres (A <sub>1</sub> )	0,161	0,052
		NDBI (A <sub>2</sub> )	0,161	0,052
		NDVI (A <sub>3</sub> )	0,147	0,047
		Précipitation (A <sub>4</sub> )	0,203	0,066
		LST (A <sub>5</sub> )	0,140	0,045
		Nombre de population (A <sub>6</sub> )	0,187	0,060
Infrastructure (I <sub>k</sub> )	0,379	Lithologie (I <sub>1</sub> )	0,184	0,070
		Distance aux rivière (I <sub>2</sub> )	0,177	0,067
		Distance aux rues(I <sub>3</sub> )	0,139	0,053
		Réseau d'assainissement (I <sub>4</sub> )	0,198	0,075

## Chapitre VI : Résultats et discussions

		TWI (I <sub>5</sub> )	0,130	0,049
		SPI (I <sub>6</sub> )	0,172	0,065

### V.1.5 La cartographie des niveaux de risque d'inondation des indices d'évaluation selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP

Sur la base des facteurs normalisés et de leurs pondérations correspondantes répertoriées dans La figure VI-5, les auteurs fournit une évaluation approfondie des impacts d'influence des inondations urbaine à Skikda qui a obtenue à l'aide de la méthode G-DEMATEL-AHP et l'analyse superposée dans un environnement SIG.



**Figure VI-5 :** Pondérations des facteurs d'évaluation calibrés selon la méthode G-DEMATEL-AHP (auteur, 2024).

Les indices d'impact d'aggravation d'inondation mis en œuvre sont : à impact topographique naturel, à impact anthropique et à impact infrastructurelle. Les cartes de susceptibilité aux

## Chapitre VI : Résultats et discussions

inondations à grande échelle ont été continuellement mises à jour et réorganisées en cinq niveaux distincts, permettant ainsi de différencier les zones à haut et très haut risque de susceptibilité des zones à risque modéré, faible et très faible.

### VI.1.5.1 Les niveaux de risque d'inondation sous l'impact topographie naturel

La répartition spatiale des niveaux de risque d'inondation à impact topographique naturel dans la ville de Skikda est illustrée dans la figure VI-6. Les zones à risque élevé se situent principalement dans les secteurs du centre, du nord-ouest et du nord-est. Ces zones se distinguent des zones environnantes, telles que les montagnes, par leur topographie plate, leur altitude basse et leurs pentes douces. Les sites les plus vulnérables aux inondations par l'impact topographique correspondent aux régions de surfaces concaves et proches des points d'accumulation du débit.

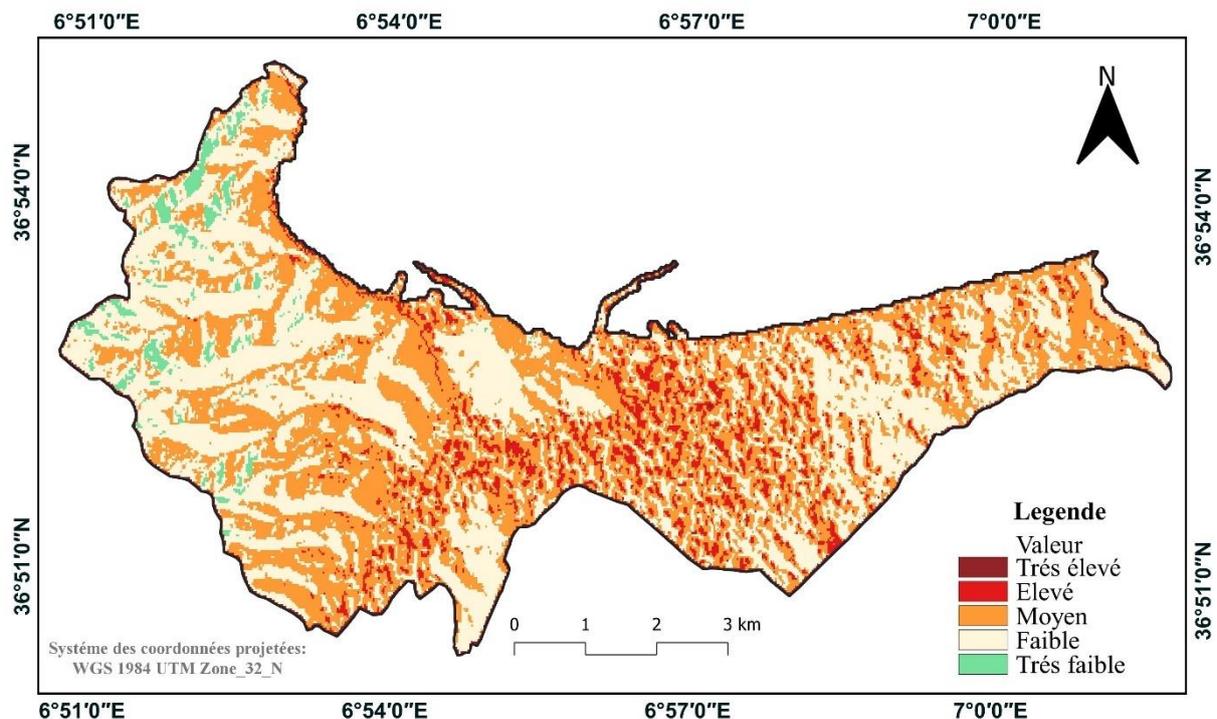


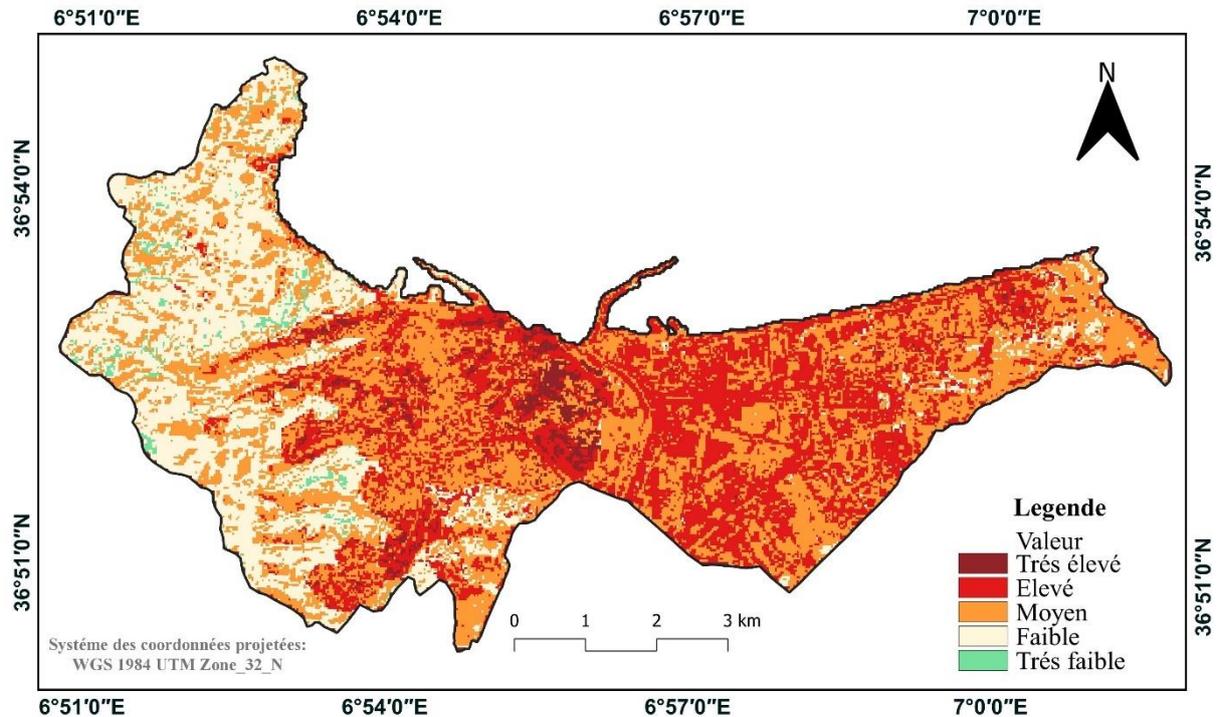
Figure VI-6: La répartition spatiale du niveau de l'indice topographique naturelle (auteur, 2024).

### VI.1.5.2 Les niveaux de risque d'inondation sous l'impact anthropique

La figure VI-7 montre la répartition spatiale des niveaux de risque d'inondation sous l'impact anthropique. Dans le contexte d'accélération du changement climatique et l'urbanisation, les zones inondables identifiées sont concentrées les zones du centre et de l'est (les agglomérations urbaines sont principalement des terrains bâtis imperméable) ; les taux de précipitations hivernales et le nombre de population sont relativement élevés. En raison d'un développement

## Chapitre VI : Résultats et discussions

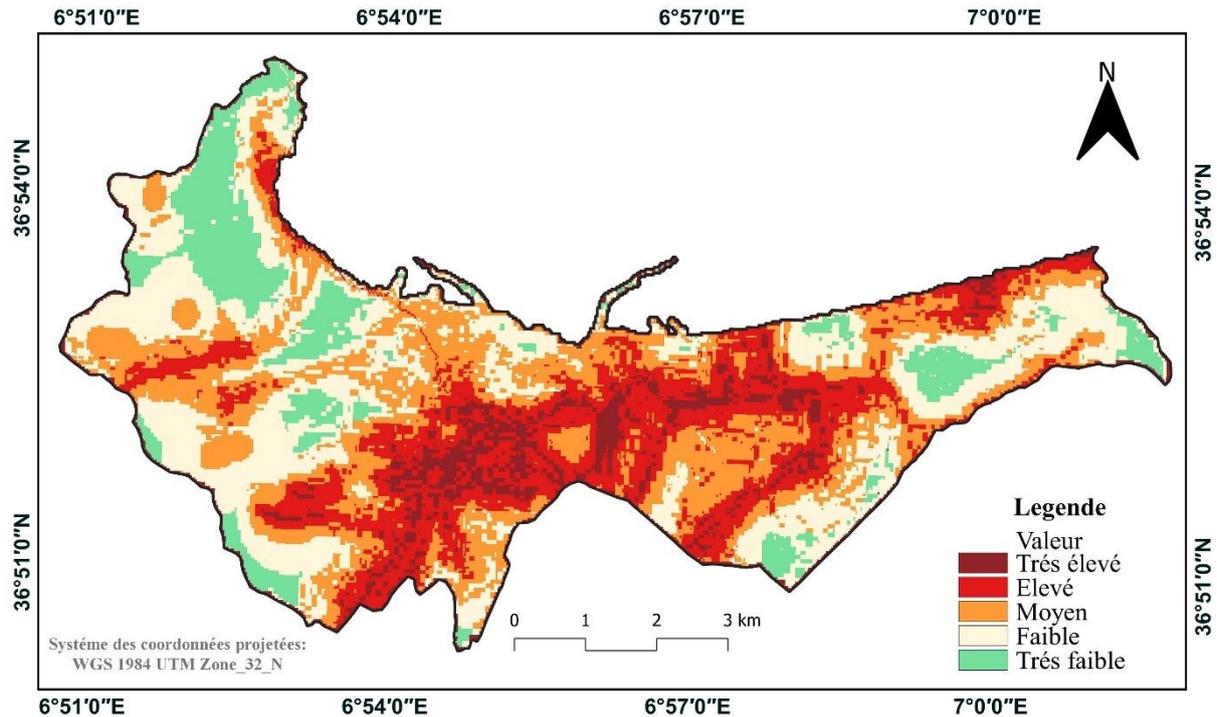
urbain incontrôlé, ces zones ont un NDVI plus faible et un NDBI plus élevé ; ayant ont de faibles taux d'infiltration. La perte de végétation et de terres agricoles augmente la sensibilité aux inondations et réduit leur capacité à faire face aux impacts continus de l'aggravation des risques d'inondation dans les villes et à s'en remettre.



### VI.1.5.3 Les niveaux de risque d'inondation par l'impact infrastructurales

La figure VI-8 représente la répartition spatiale des niveaux de risque d'inondation par l'impact infrastructurales. Les zones fortement exposées aux risques se trouvent dans les parties centrales et orientales de la ville, le long des cours d'eau caractérisés par des indices SPI et TWI élevés, ainsi qu'une lithologie des sols jurassique et précambrien. Cela peut entraîner une pression importante, notamment un assainissement sous-dimensionné pour évacuer les grands volumes d'eau écoulés pendant les périodes de fortes précipitations. Par ailleurs, la forte répartition du réseau routier exerce une influence significative sur les résultats obtenu dans les zones à haut risque d'inondation.

## Chapitre VI : Résultats et discussions



**Figure VI-8** : La répartition spatiale du niveau d'indice infrastructurelle (auteur, 2024).

### V.1.6 Les pondérations pour les indices d'aggravation des risques des inondations selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP

Après avoir appliqué la méthode Grey DEMATEL-ANP sur les données fournies par un questionnaire à neuf scores, nous avons obtenu les pondérations des indices d'évaluation comme la montre le code Matlab suivant :

**Tableau 11** : Langage de programmation des indices d'évaluations selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP d'après le MATLAB 2022a (auteur, 2024).

1	% Step 1: Données des experts (scores d'après l'échelle
2	de Saaty 1977)
3	data = [
4	4, 4, 9;
5	3, 4, 9;
6	6, 4, 8;
7	5, 4, 9;
8	4, 4, 10;
9	6, 4, 9;
10	3, 4, 10;
11	5, 4, 9;
12	6, 4, 9;
13	4, 4, 8;
14	5, 4, 10;
15	3, 4, 9;

## Chapitre VI : Résultats et discussions

```
16     6, 4, 10;
17     5, 4, 9;
18     4, 4, 8;
19     6, 4, 9;
20     3, 4, 9;
21     5, 4, 8;
22     6, 4, 10;
23     4, 4, 9
24 ];
25
26 % Valeur maximale pour la normalisation
27 max_val = 9;
28
29 % Step 2 : Normalisation
30 C = data / max_val;
31
32 % Step 3 : Fuzzification
33 grey_intervals = [
34     0, 0;           % Sans impact
35     0, 0.25;       % Faible impact
36     0.25, 0.5;    % Impact moyen faible
37     0.5, 0.75;    % Impact moyen élevé
38     0.75, 1;      % Fort impact
39     1, 1           % Impact très élevé
40 ];
41
42 % Fuzzification des données
43 C_fuzzified = zeros(size(C,1), size(C,2), 2);
44 for i = 1:size(C,1)
45     for j = 1:size(C,2)
46         value = C(i,j);
47         for k = 1:size(grey_intervals, 1)
48             interval = grey_intervals(k,:);
49             if value >= interval(1) && value <=
50 interval(2)
51                 C_fuzzified(i,j,1) = interval(1);
52                 C_fuzzified(i,j,2) = interval(2);
53                 break;
54             end
55         end
56     end
57 end
58
59
60 % Step 4: Given N_up and N_down matrices
61 N_up = [
62     0.000, 0.338, 0.250;
63     0.550, 0.000, 0.325;
64     0.550, 0.563, 0.000
65 ];
```

## Chapitre VI : Résultats et discussions

```
66
67 N_down = [
68     0.000, 0.088, 0.000;
69     0.300, 0.000, 0.075;
70     0.300, 0.313, 0.000
71 ];
72
73 % Step 5: Display N_up and N_down matrices
74 disp('Matrix N_up:');
75 disp(N_up);
76 disp('Matrix N_down:');
77 disp(N_down);
78
79 % Step 6: Calculate S_ij using Grey theory
80 S = min(N_down(:)) + (N_down .* (1 - N_down) + N_up .*
81 N_up) ./ (1 - N_down + N_up);
82
83 % Display S matrix
84 disp('Matrix S:');
85 disp(S);
86
87 % Step 7: Normalize S_ij to get Snor
88 max_S = max(sum(S, 2));
89 Snor = S / max_S;
90
91 % Display Snor matrix
92 disp('Normalized Matrix (Snor):');
93 disp(Snor);
94
95 % Step 8: Calculate the total relationship matrix T
96 E = eye(size(Snor));
97 T = Snor / (E - Snor);
98
99 % Display T matrix
100 disp('Total Relationship Matrix (T):');
101 disp(T);
102
103 % Step 9: Calculate the degree of influence (D) and degree
104 of dependence (R)
105 D = sum(T, 2);
106 R = sum(T, 1)';
107
108 % Display D and R values
109 disp('Degree of Influence (D):');
110 disp(D);
111 disp('Degree of Dependence (R):');
112 disp(R);
113
114 % Calculate (Di + Ri) and (Di - Ri)
115 Di_plus_Ri = D + R;
```

## Chapitre VI : Résultats et discussions

```
116 Di_minus_Ri = D - R;
117
118 % Display (Di + Ri) and (Di - Ri)
119 disp('Di + Ri:');
120 disp(Di_plus_Ri);
121 disp('Di - Ri:');
122 disp(Di_minus_Ri);
123
124 % ANP Calculation
125 W_ANP = (D - R) ./ (D + R);
126
127 % Display final weights and other details in a table
128 disp('Les poids des critères selon DEMATEL-ANP sont :');
129 if length(indicators) == length(W_ANP)
130     T_final = table(indicators', D, R, Di_plus_Ri,
131 Di_minus_Ri, W_ANP, ...
132     'VariableNames', {'Indicateurs',
133 'D', 'R', 'D_plus_R', 'D_minus_R', 'Poids_DEMATEL_ANP'});
134     disp(T_final);
135 else
136     disp('Error: The length of indicators and W_ANP do
137 not match.');
```

```
138 end
139
140 % Visualization and Comparison
141 figure;
142 bar(W_ANP);
143 set(gca, 'xticklabel', indicators);
144 title('Poids des critères selon DEMATEL-ANP');
145 xlabel('Indicateurs');
146 ylabel('Poids');
147 grid on;
148
149 % Relationship Network
150 figure;
151 G = digraph(Snor, indicators);
152 plot(G, 'Layout', 'layered');
153 title('Réseau des relations causales entre les
154 indicateurs');
155 xlabel('Indicateurs');
156 ylabel('Relations');
157
158 % Causal relationship diagram
159 figure;
160 h = plot(G, 'Layout', 'force', 'EdgeLabel',
161 G.Edges.Weight);
162 title('Causal relationship diagram of vulnerability
163 criteria');
164 xlabel('Indicateurs');
165 ylabel('Relations');
```

**Chapitre VI : Résultats et discussions**

166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178	<pre> % Add annotations for prominence (D + R) and net effects (D - R) hold on; for i = 1:length(indicators)     text(h.XData(i), h.YData(i), sprintf('D+R: %.2f\nD- R: %.2f', D(i) + R(i), D(i) - R(i)), ...         'VerticalAlignment', 'bottom',         'HorizontalAlignment', 'right'); end hold off; </pre>
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37	<pre> Matrix N_up:     0    0.3380    0.2500     0.5500    0    0.3250     0.5500    0.5630    0 Matrix N_down:     0    0.0880    0     0.3000    0    0.0750     0.3000    0.3130    0 Matrix S:     0    0.1556    0.0500     0.4100    0    0.1400     0.4100    0.4256    0 Normalized Matrix (Snor):     0    0.1862    0.0598     0.4907    0    0.1675     0.4907    0.5093    0 Total Relationship Matrix (T):     0.1977    0.2837    0.1192     0.7502    0.2710    0.2578     0.9698    0.7866    0.1898 Degree of Influence (D):     0.6007     1.2790     1.9462 Degree of Dependence (R):     1.9176     1.3414     0.5669 Di + Ri:     2.5183     2.6204     2.5130 Di - Ri: </pre>

## Chapitre VI : Résultats et discussions

38	-1.3170
39	-0.0624
40	* 1.3793
41	

**Tableau VI-12:** Les poids des critères d'évaluations selon Grey-DEMATEL-ANP.

Indices	D (influence)	R (dépendance)	D + R (prominence)	D - R (net effect)	Poids_DEMATEL_ANP
{'Ti'}	0.60067	1.9176	2.5183	-1.317	-0.52295
{'Aj'}	1.279	1.3414	2.6204	-0.062351	-0.023795
{'Ik'}	1.9462	0.56686	2.513	1.3793	0.54886

Le tableau VI-12 présente l'importance relative de chaque indice en fonction des poids obtenus avec la méthode DEMATEL-ANP. Les valeurs de D+R montrent la prominente (importance) des indices, et les résultats semblent raisonnables. Les valeurs de D-R montrent les rôles des indices en tant que facteurs d'influence ou influencés, ce qui est cohérent avec la méthode DEMATEL.

T<sub>i</sub> (topographie naturel), la valeur de D-R négative indique que cet indicateur est principalement influencé par les autres indicateurs. A<sub>j</sub> (Activity anthropique), les valeurs proches de zéro pour D-R indiquent que cet indicateur a un rôle équilibré d'influence et d'être influencé.

I<sub>k</sub> (Infrastructure de drainage urbain : 0.54886), la valeur positive de D-R indique que cet indicateur est principalement un facteur d'influence.

I<sub>k</sub> (Infrastructure : 0.54886) a le plus grand impact global. Cela signifie que l'infrastructure joue un rôle crucial dans le système évalué et exerce une forte influence sur les autres indicateurs. La valeur D - R : 1.1865, ce qui signifie qu'I<sub>k</sub> est un indicateur net influent, ayant plus d'influence sur les autres indicateurs qu'il n'est influencé par eux.

A<sub>j</sub> (Activité Anthropique : -0.023795) a un impact moyen dans le système. Son poids est proche de zéro, indiquant qu'il a une influence et une dépendance équilibrées. La valeur D - R : 0.0090014, ce qui confirme que cet indicateur a un impact modéré, influençant et étant influencé de manière quasi égale par les autres indicateurs.

## Chapitre VI : Résultats et discussions

Ti (Topographie : -0.52295) a le poids le plus faible, indiquant un impact relativement faible dans le système. Il est principalement influencé par les autres indicateurs plutôt que d'exercer une influence. La valeur D - R : -1.317, ce qui montre que Ti est un indicateur principalement dépendant, recevant plus d'influences des autres indicateurs qu'il n'en exerce sur eux.

Les résultats montrent que l'Infrastructure ( $I_k$ ) est l'indice le plus influent et critique dans le système, suivi par l'Activité Anthropique ( $A_j$ ) avec un impact moyen, et enfin la Topographie ( $T_i$ ) qui a un faible impact. Cette analyse permet de prioriser les efforts et les ressources sur l'infrastructure pour maximiser l'efficacité et la performance du système évalué. La figure VI-9 montre un graphique de type réseau montrant les relations entre les critères.

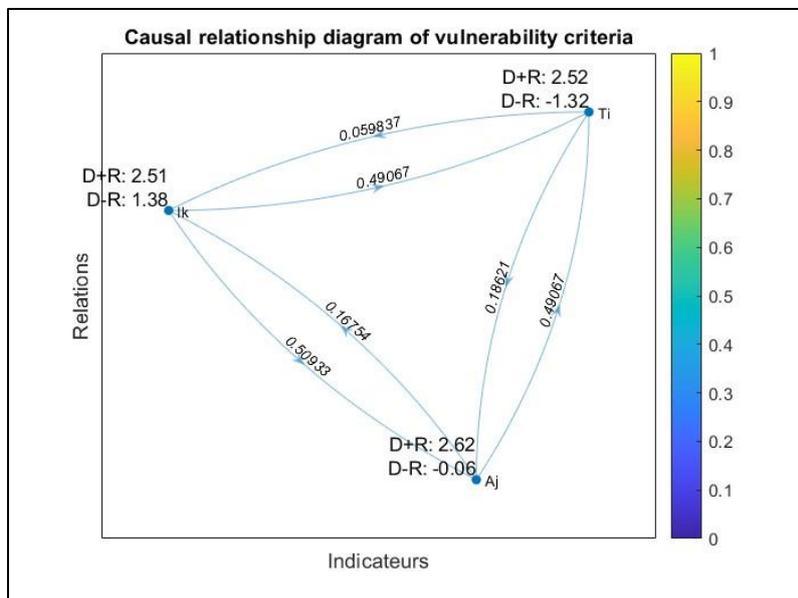


Figure VI-9 : Diagramme de relation causal des indices de conditionnement.

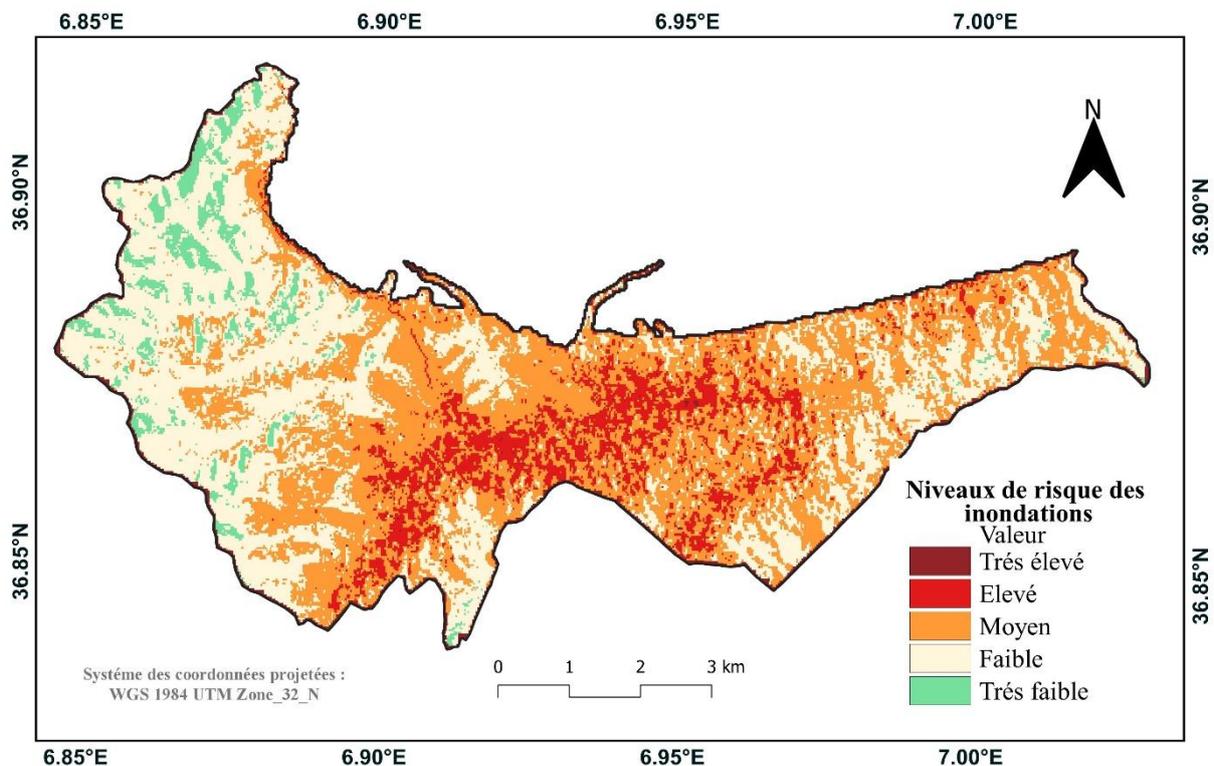
### V.1.7 Résultats de la cartographie de la susceptibilité aux inondations et la validation

L'analyse de la susceptibilité de la ville de Skikda aux inondations urbaines est établie en tenant compte les causes d'aggravation (Figure VI-9).

D'après ; Les zones à risque le plus élevé et l'élevé dans ce scénario sont respectivement de 2,1 % et 20,4 % dans les zones centrales et du nord-est selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP ; 17.5 % et 31.2 % selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP. Ces deux niveaux de vulnérabilité sont situés à proximité des cours inférieurs des rivières saf-saf et Zeramenan, car de fortes précipitations se produisent et s'écoulent dans ces rivières ; correspondant à une forte densité de population, une utilisation résidentielle des terres et un fort réseau routier. Par

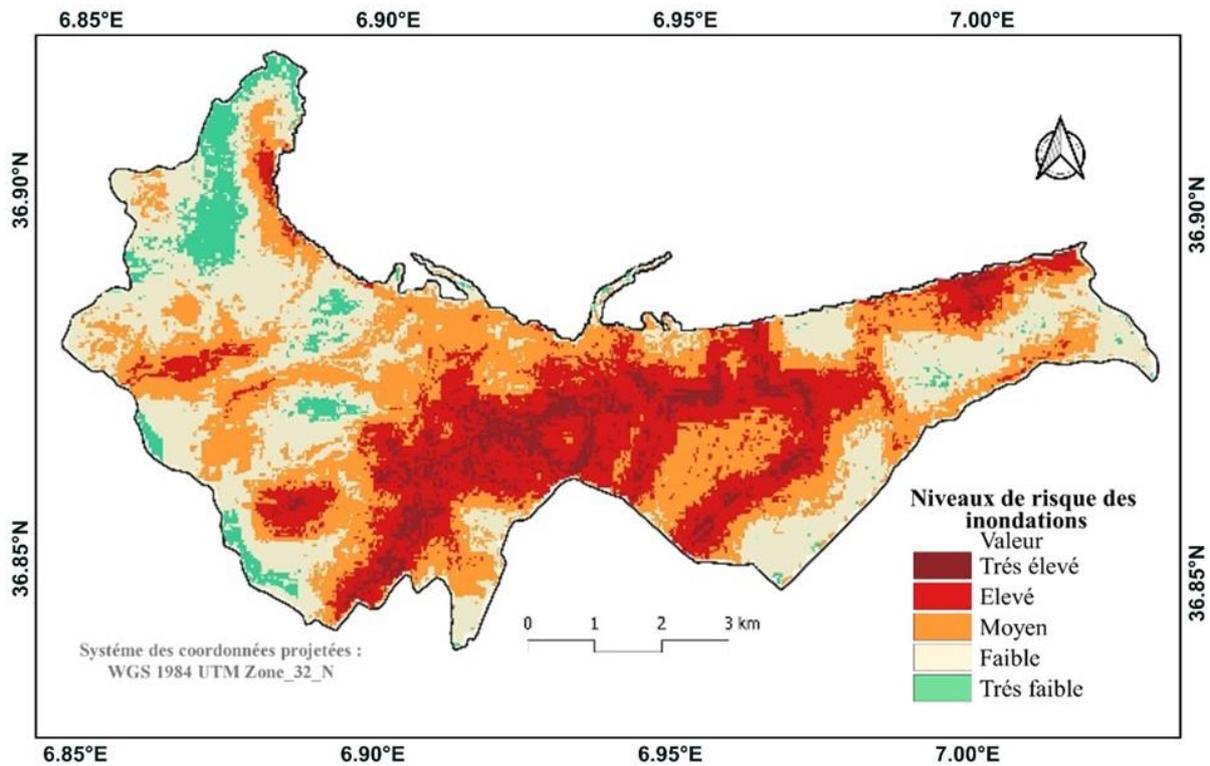
## Chapitre VI : Résultats et discussions

ailleurs, la dégradation des réseaux d'assainissement exposer la ville à des niveaux de risque élevés, représentant ainsi une menace pour son infrastructure. Cela entraîne des inondations urbaines liées aux eaux pluviales dans le centre urbain. Les quartiers résidentiels telles que merdh edib, hamadi krouma et les allées sont les plus touchée. Les zones touchées modérément sont de 34,1 % selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP ; 29.4 % selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP. Les autres niveaux de risque faible et très faible (28,2 % et 11,6%) selon la méthode Grey-DEMATEL-AHP ; 13.3 % et 8.6 % selon la méthode Grey-DEMATEL-ANP sont principalement répartis dans les zones montagneuses à plus faible densité de population ou dans les parcs à végétation luxuriante au sud-est, nord-ouest et à l'ouest de la ville ( voir figure VI-10, figure VI-11 et figure VI-12).



**Figure VI-10 :** La carte de répartition des risques des inondation dans la ville de Skikda d'après la méthode Grey-DEMATEL-AHP (auteur, 2024).

## Chapitre VI : Résultats et discussions

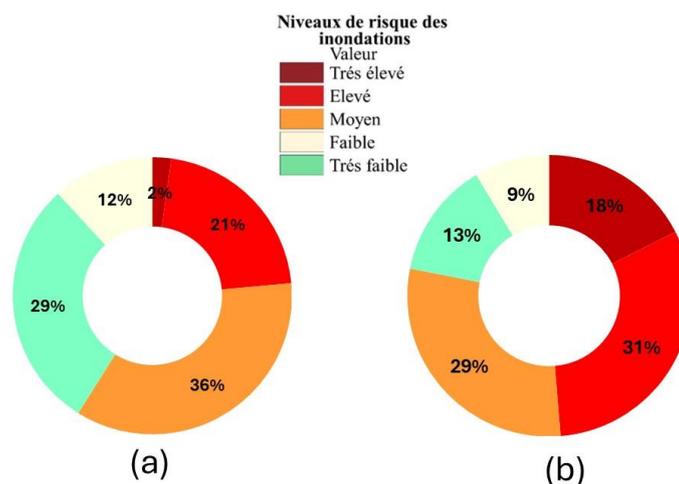


**Figure VI-11:** La carte de répartition des risques des inondation dans la ville de Skikda d'après la méthode Grey-DEMATEL-ANP (auteur, 2024).

La méthode G-DEMATEL-ANP (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory - Analytic Network Process) est préférée à la méthode G-DEMATEL-AHP (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory - Analytic Hierarchy Process) dans ce contexte pour plusieurs raisons importantes liées à la précision et à son aptitude à modéliser Les relations causales complexes et les dépendances mutuelles entre les critères. Cela permet une compréhension plus approfondie des dynamiques du système et conduit à des décisions mieux informées et plus robustes. L'utilisation de G-DEMATEL-ANP est donc justifiée et recommandée dans des contextes où les interrelations entre les critères jouent un rôle crucial dans le processus décisionnel.

Ci-dessous illustre également la localisation des sites inondés dans la zone d'étude. Les observations sur l'historique des inondations à Skikda indiquent que la distribution évaluée des niveaux de risque est cohérente avec ce qui se passe sur le terrain. Étant donné que la grande majorité des inondations, se sont produisent dans les limites de zones à risque élevé à très élevé, ce qui implique l'efficacité l'approche appliquée pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations ( voir figure VI-13).

## Chapitre VI : Résultats et discussions



**Figure VI- 12 : les pourcentages des risques des inondation dans la ville de Skikda : (a) d'après la méthode Grey-DEMATEL-AHP ; a) d'après la méthode Grey-DEMATEL-ANP.**

### V.1.8 Synthèse

Le modèle urbain de susceptibilité aux inondations urbaines lié à trois causes d'aggravation (TAI) : la topographie naturelle, les activités anthropiques et les infrastructures tente d'évaluer la répartition du risque des inondations dans la ville de Skikda (Algérie). L'approche utilisée est la méthode Grey-DEMATEL-AHP et la méthode Grey-DEMATEL-ANP. Les résultats principaux sont :

(1) Dix-huit facteurs déclenchants la propagation du risque des inondations ont été adoptés. DEMATEL utilise un questionnaire en neuf scores qui a recueilli les avis des experts des institutions locales pour identifier les indépendances entre ces facteurs d'influences et les corrèle avec la théorie des nombres gris afin de réduire l'incertitude dans le processus décisionnel. L'AHP a été déterminé l'importance pondérale et l'ANP a été déterminée les relations causales entre les indices d'influence afin d'estimer les niveaux de risque d'inondation dans la ville de Skikda.

(2) Les poids indiquent que l'incidence du mauvais état des infrastructures de drainage urbain est la principale raison de l'émergence des inondations urbaines dans la région étudiée, suivi par l'impact anthropique qui dépasse l'impact topographique naturel.

Les résultats indiquent que les niveaux de risque élevés et très élevés situent dans le centre urbain inférieurs de la zone d'étude, avec un pourcentage de risque de 48.7 %.

## Chapitre VI : Résultats et discussions

(3) Les résultats du modèle de sensibilité (TAI) ont été validés à l'aide de l'observations sur l'historique des inondations du site. La comparaison démontre l'efficacité de la méthode Grey-DEMATEL- AHP/ANP et du modèle urbain de susceptibilité aux inondations (TAI).

L'analyse de la vulnérabilité aux risques d'inondation contribuer à atténuer de manière progressive l'impact des Inondations en identifiant les zones à risque d'inondation dans la municipalité de Skikda. Elle a montré que la ville de Skikda est mal équipée pour réduire les risques des inondations.

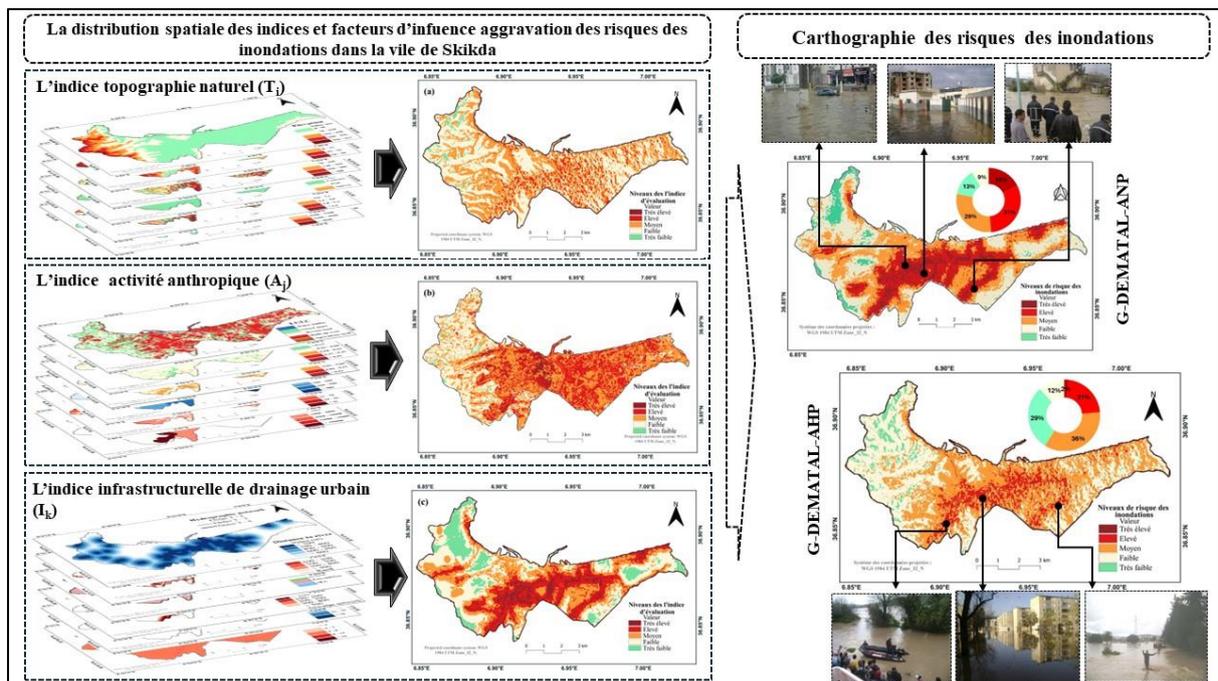


Figure VI-13 : Synthèse de l'évaluation du risque des inondations de la ville de Skikda (auteur, 2024).

### VI.2 Benchmark : Illustration comparative des résultats de l'évaluation

Les défis majeurs liés à l'évaluation des risques d'inondation persistant à de nombreux égards, notamment en ce qui concerne l'amélioration de la représentation et de la modélisation précises des sources d'incertitudes futures, la prise en compte de l'interdépendance des systèmes et la compréhension des impacts des comportements humains et des Interactions avec les parties prenantes (Fu et al., 2020). Notre analyse actuelle de l'occurrence des inondations repose principalement sur les facteurs aggravants et les stratégies de résilience envisageables pour l'avenir.

### **V.2.1 Interprétation de la méthode d'évaluation des risques des inondation à Skikda**

Les conclusions de l'analyse des risques d'inondation de la municipalité de Skikda sont en adéquation avec celles observées dans de nombreuses autres villes à l'échelle mondiale. Cette recherche a opté pour une approche MCDM en plusieurs phases afin d'évaluer les risques d'inondation à Skikda, en combinant la théorie de Gris au sein des méthodes DEMATEL et AHP.

Le SIG a permis de cartographier efficacement la distribution du risque d'inondation dans les zones urbaines. Les méthodes G-DEMATEL-AHP et G-DEMATEL-ANP intègre la priorité de chaque méthode dans la MCDM. Cependant que les méthodes traditionnelles comprennent une méthode d'évaluation des probabilités basée sur des données historiques, une évaluation complète des risques d'inondation, une évaluation des risques d'inondation intégrant la télédétection et un système d'information géographique (SIG).

En confrontant nos résultats à ceux de villes inondables à l'échelle mondiale, comme indiqué par Doorga et al. (2019), Ekmekcioğlu et al. (2022) et Zheng et al. (2022), il est possible de constater une cohérence. Cette approche adoptée permet de pallier les limites des méthodes AHP classiques dans l'évaluation des Risques liés aux inondations.

Les résultats révèlent que le risque des inondations élevé et très élevé produit sur environ 23 % dans la ville de Skikda. Ainsi que Costache et al., 2020 ont été calculé l'indice de potentiel d'inondation (FPI) en considérant un certain nombre de 10 facteurs de conditionnement d'inondation dans le bassin de la rivière Prahova, en Roumanie. Les résultats montrent que le potentiel d'inondation élevé et très élevé apparaît sur environ 25 % du bassin versant.

Areu-Rangel et al., 2019 effectuent une analyse quantitative pour Villahermosa, Tabasco (Mexique), qui montre que le changement d'utilisation des terres et l'urbanisation rapide peut augmenter la profondeur des inondations de 7 % à 22 % et que la croissance urbaine (jusqu'en 2050) peut augmenter le niveau d'inondation jusqu'à 0,7 m. Les résultats de cette analyse de cas ont confirmé l'idée largement acceptée selon laquelle le modèle de développement urbain actuel souffre d'un manque de durabilité et de résilience en matière de gestion des inondations.

Bunmi Mudashiru et al., (2022) ont identifié les zones à risque d'inondation en utilisant deux méthodes de prise de décision multicritères, à savoir le processus de hiérarchie analytique (AHP) et les méthodes Fuzzy-AHP (F-AHP). Les résultats de l'analyse de sensibilité des

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

risques d'inondation ont révélé des résultats similaires entre les méthodes AHP et F-AHP, soit respectivement 34 % et 32,65 %, sur les de risque d'inondation générées, ce qui confirme la précision des méthodes. La validation des méthodes AHP et F-AHP à l'aide des enregistrements historiques des crues a démontré une excellente concordance.

L'administration d'un questionnaire aux experts, tel que présenté dans l'approche G-DEMATEL-AHP, représente une méthode fondamentale et fiable. Barria et al. (2019) ont analysé le risque naturel lié aux inondations et aux tsunamis dans deux villes côtières chiliennes présentant des lacunes en termes de données, en utilisant une méthodologie d'évaluation multirisque basée sur une matrice.

La méthode proposée peut soutenir la planification urbaine et l'atténuation des inondations. Les parties prenantes sont étroitement impliquées dans l'élaboration de l'évaluation des risques, qui est un aspect important pour améliorer la résilience locale aux inondations.

(Zheng et al., 2022) a intégré la théorie grise, DEMATEL et AHP pour évaluer le risque d'inondation du système de circulation à Zhengzhou. Les résultats montrent que la méthode peut cartographier efficacement la distribution du risque d'inondation du système de métro. Les résultats de l'évaluation ont été vérifiés en utilisant deux scénarios de précipitations deux scénarios de précipitations « tempête de 7,20 » et « tempête de 7,20 » à Zhengzhou. Les résultats calculés ont montré que le système de métro, qui a été le plus touché dans la situation réelle, était à un niveau de risque élevé. Les sites de forte inondation correspondent à la zone à haut risque, ce qui indique la précision et l'efficacité de la méthode.

(Ekmekcioğlu et al., 2022) ont souligné que lorsque de nombreux experts sont invités et que l'indice de consistance ne peut pas satisfaire aux exigences de l'évaluation de la qualité 0,1, le questionnaire de comparaison par paire doit être rempli plusieurs fois.

L'AHP traditionnelle n'ont pas abordé une question cruciale, à savoir comment sélectionner les scores de préférence pour la matrice de comparaison par paire, lorsque plusieurs experts donnent leur avis sur la question. Malgré l'utilisation par Ekmekcioğlu et al. (2022) de la méthode DEMATEL en association avec l'Analytic Network Process (ANP), ils n'ont pas Abouti à une résolution directe du problème. En effet, cette approche a principalement servi à établir la relation entre deux facteurs d'impact en vue de l'application ultérieure de la méthode L'ANP. En outre, DEMATEL et AHP/ANP ont été utilisés conjointement avec la méthode ANP, DEMATEL et AHP/ANP ont toujours suivi le questionnaire de comparaison par paire,

## ***Chapitre VI : Résultats et discussions***

de comparaison par paire, ce qui entraîne un travail plus long que la procédure de la présente étude. D'autre part, dans cette étude, l'utilisation de DEMATEL permet de calculer les nombres gris (flous) à partir du questionnaire à neuf scores, ce qui évite l'incertitude liée à la détermination manuelle des nombres flous.

### **V.2.2 Interprétation des indices de la structure d'évaluation des risques des inondation**

Une compréhension précise du risque d'inondation et de ses déterminants est essentielle pour une gestion efficace des risques. Cette étude met en évidence que l'aggravation de l'occurrence des inondations est due à des facteurs tels que les infrastructures de drainage urbain, les activités anthropiques (changement climatique et urbanisation) et la topographie naturelle. L'analyse des résultats d'autres études de cas confirme les défis auxquels est confrontée la structure d'évaluation des risques d'inondation dans la ville de Skikda. La plupart des paramètres liés à la propagation des risques d'inondation ont été sélectionnés à partir de la littérature existante ou d'enquêtes menées auprès d'experts. Selon Moges et al. (2019), les agglomérations urbaines des nations en voie de développement sont affectées par les effets conjugués de l'urbanisation croissante et des conséquences du changement climatique. L'étude aborde les défis liés à la rapide évolution du régime d'inondation causée par l'urbanisation croissante dans les villes des pays en développement, en se concentrant sur le cas d'Addis-Abeba. Une analyse hydrologique a été réalisée sur la ville en se basant sur trois cartes d'occupation des sols d'Addis-Abeba, issues des plans de la ville de 1984, 1986 et 2002. Les résultats de l'étude révèlent une augmentation du coefficient de ruissellement moyen de la ville, passant de 28 % en 1984 à 45 % en 2002. Cette augmentation suggère que le volume annuel des eaux de ruissellement a augmenté de plus de 60 % en 2002 par rapport à celui de 1984.

(Malik et al., 2020) ont évalué la sensibilité aux inondations de la rivière Dwarakeswar en se basant sur le terme linguistique flou hésitant et ont souligné que le système d'indices de sensibilité aux inondations comprend Quatorze paramètres de conditionnement des inondations : tels que l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI), les précipitations, l'indice de puissance des cours d'eau (SPI), l'utilisation des terres et la couverture terrestre (LULC), l'indice topographique d'humidité (TWI), la géologie, le sol, la pente, l'altitude, la densité de drainage, la courbure du plan, la courbure du profil, l'exposition et la distance par rapport à la rivière, etc. Les résultats de cette étude

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

L'évaluation des risques est aujourd'hui largement reconnue comme un élément essentiel de la gestion des Inondations dans de nombreuses nations à travers le globe (Q. Sun et al., 2022). Ces conclusions revêtent une importance capitale pour orienter les processus de planification et de gestion en vue de renforcer la résilience face aux inondations. Les planificateurs et les décideurs politiques ont la possibilité d'utiliser les résultats de cette recherche afin de concevoir des stratégies de gestion adaptées aux spécificités environnementales locales.

### **VI.3 De l'évaluation des inondations au choix des mesures appropriées, une gestion fondée sur le risque**

Une analyse des risques liés aux inondations permet de se concentrer sur les résultats, facilitant ainsi la sélection des mesures de gestion des inondations les plus adaptées. La gestion basée sur les risques vise à évaluer les projets afin de réduire au minimum sans toutefois les éliminer complètement, les risques d'inondation.

L'évaluation de la sensibilité a montré que la ville de Skikda est mal équipée pour réduire les inondations. Elle dépend d'une utilisation des terres concurrente et de fortes infrastructures grises le long des deux rivières qui traversent le centre urbain. Les précipitations plus intenses chaque année ont un effet direct sur la capacité ruissellement. Ces mesures se sont révélées inefficaces face à l'augmentation des inondations annuelles et montrent des lacunes importantes en termes de résistance aux inondations.

La notion de "gestion des inondations" englobe l'ensemble des stratégies mises en œuvre pour prévenir les inondations et limiter les dommages qui en découlent. En revanche, la "gestion des inondations basée sur les risques" consiste à coordonner toutes les mesures visant à renforcer la résilience globale d'une zone sujette aux inondations.

La gestion des inondations fondée sur les risques justifie les ressources consacrées aux options de gestion des inondations. Les ressources peuvent être dépensées proportionnellement au risque encouru. Le risque d'inondation découle des répercussions environnementales, sociales et économiques combinées des inondations. Par conséquent, l'approche de la gestion des inondations axée sur les risques permet de sélectionner de manière efficiente parmi les diverses options disponibles.

La ville de Skikda devrait mettre en place une stratégie de gestion des risques pour assurer une coexistence harmonieuse avec les inondations. En effet, il est impossible d'éliminer

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

complètement le risque d'inondation. Néanmoins, des actions et des comportements appropriés peuvent atténuer les conséquences des inondations. L'abandon complet des plaines inondables ou le contrôle complet des inondations pourraient être des réactions extrêmes aux inondations, mais ces réactions pourraient être pratiquement impossibles ou catégoriquement non rentables. Les paramètres de vulnérabilité et/ou de danger peuvent être ajustés pour améliorer les fonctions des plaines inondables. La gestion des inondations n'est pas une question de réduction ou d'atténuation, mais un défi d'adaptation et de transformation. Cette problématique implique non seulement l'amélioration des paramètres, des facteurs et des modèles, mais aussi l'intégration de l'incertitude liée à chaque variable d'entrée. Plutôt que constituer systématiquement un obstacle, l'incertitude offre l'opportunité de réévaluer la gouvernance des risques et d'améliorer la gestion des inondations (Gralepois, 2020).

### **V.3.1 Renforcer la résilience de l'espace urbain de la ville de Skikda en cas d'inondation**

L'adaptation aux inondations côtières représente un enjeu crucial pour la municipalité de Skikda, tout comme verser de nombreuses autres villes côtières. La réduction des risques de catastrophes (RRC) est aujourd'hui considérée comme un pilier fondamental du développement durable (Leulmi et al., 2023); pour renforcer la sensibilisation aux inondations et concevoir des stratégies appropriées d'atténuation des menaces posées. Cette préoccupation renvoie l'adoption de la résilience. La réponse de la population aux conséquences des inondations est largement conditionnée par la manière les infrastructures urbaines sont affectées et gérées, ainsi que par la planification des futurs aménagements urbains (Farinós-Dasí et al., 2024). Ainsi, il est impératif de mettre en place des stratégies d'adaptation aux risques d'inondation dans la ville de Skikda. Ces mesures visent à améliorer la compréhension de la répartition des inondations en fournissant une base de référence pour la planification future des stratégies urbaines d'atténuation et d'adaptation aux inondations, telles que l'aménagement de zones tampons végétalisées, de zones non constructibles et de la hauteur du sol par rapport au plancher des bâtiments.

L'augmentation du risque d'inondation est corrélée au changement climatique et à l'évolution socio-économique. Ainsi, les stratégies actuelles de mitigation des Risques d'inondation s'avèrent insuffisantes pour contrer efficacement le risque d'inondation prévalant dans la municipalité de Skikda.

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

Les chercheurs ont souligné l'importance de la résilience communautaire dans plusieurs études sur l'atténuation des catastrophes, en accordant une plus grande importance à la capacité de la communauté plutôt qu'au soutien externe (Bosher & Dainty, 2011; Joerin et al., 2012).

### **V.3.2 Des proposition résiliences aux inondations pour la ville de Skikda**

Une stratégie résiliente peut être définie comme une combinaison des mesures et des ressources nécessaires pour les mettre en œuvre.

Afin de résoudre le problème des risques liés aux inondations, les ingénieurs se concentrent fréquemment sur des mesures structurelles, telles que des dispositifs de protection, des projets publics de grande envergure nécessitant l'approbation officielle d'une ou plusieurs entités gouvernementales, ainsi que des efforts de planification et de conception conséquents. Ces mesures impliquent des investissements en immobilisations, des engagements en termes d'exploitation et de maintenance. Par exemple, la construction d'ouvrages de rétention, de digues, de barrages, ainsi que des Travaux de stockage et de dérivation en amont, la modification ou l'enclos des canaux, les digues anti-inondations, les ponts, l'amélioration des canaux, et la modification ou le remplacement de ponceaux sont des exemples de mesures structurelles visant principalement à contrôler le volume d'eau de surface en milieu urbain. En ce qui concerne le contrôle de la qualité des eaux de surface urbaines, des mesures structurelles telles que les bassins de sédimentation, les zones humides artificielles ou restaurées, ainsi que les systèmes d'infiltration sont utilisés.

Cela soulève la question des mesures de résilience aux inondations pour la ville de Skikda, visant à renforcer sa capacité à faire face à des inondations majeures plus importantes à l'avenir, comme suit :

**Les corridors fluviaux**, la protection et la planification adéquate des risques des corridors fluviaux sont importantes, en particulier le cas de la ville de Skikda. En effet, l'urbanisation croissante de cette agglomération encerclant les corridors fluviaux peut entraîner une utilisation fragmentée des espaces, mettant en péril la durabilité des habitats et la biodiversité régionale. Il est important de permettre l'installation de l'homme en identifiant des sites sûrs et habitables le long des corridors fluviaux afin de créer une relation équilibrée et symbiotique avec la biodiversité et les conditions de la terre.

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

En lisière d'un cours d'eau, ces espaces naturels revêtent une importance capitale en ce qui concerne la préservation des biens et des personnes. En situation d'inondation, il est possible que le cours d'eau déborde, s'étende et soit momentanément retenu dans ces zones.

Ces espaces naturels agissent comme des réservoirs, absorbant l'eau pour réduire l'ampleur des crues, limiter les débordements en aval de la rivière et atténuer les dommages potentiels. En l'absence de toute infrastructure, la rivière peut déborder librement dans ce qu'on appelle le lit majeur. Toutefois, lorsque ces espaces naturels sont transformés en surfaces imperméables par la construction de routes de zones urbaines, l'infiltration de l'eau dans le sol est entravée, ce qui entraîne une accumulation en surface. Cette eau accumulée prend de la vitesse et peut causer des dommages considérables, dont l'intensité ne cesse de nous étonner. Il est essentiel que les cours d'eau conservent la capacité de déborder et de se réguler naturellement. Par conséquent, la préservation ou la restauration de ces zones naturelles est d'une importance primordiale.

**La planification de l'utilisation des terres** englobe Plongeurs aspects tels que les plans d'aménagement foncier, Les plans de gestion des parcs et des zones boisées, l'acquisition de terrains et les plans de délocalisation. Elle inclut également des mesures de planification architecturale telles que l'élévation des bâtiments, les techniques de protection contre les inondations, l'entretien des installations, la rénovation des structures, la végétalisation des bâtiments et la mise en place de revêtements de chaussées perméables.

**Rendre la ville perméable en milieu urbain**, c'est tout l'enjeu du concept de ville éponge, dont s'inspirent aujourd'hui de nombreuses mégapoles, telles que Wuhan, qui fut pionnière en la matière, mais aussi Berlin ou New York. Le principe s'agit de rendre à la ville sa perméabilité. Un objectif d'autant plus important que le dérèglement climatique ne fait qu'accentuer les événements météorologiques violents.

Pour faire de la ville éponge une réalité, le béton dispose de sérieux atouts, à l'image de ses solutions drainantes. C'est ce qu'a démontré la dernière édition du concours Génie Civil organisé par le SNBPE (Syndicat national du béton prêt à l'emploi) et Cimbéton, dont le thème était « Béton : une pluie de solutions pour créer la ville éponge de demain ».

**Des espaces verts tampons**, parmi les propositions imaginées est la création d'espaces verts tampons, vers lesquels l'eau pluviale serait acheminée depuis les routes et les trottoirs des villes. L'eau pluviale s'infiltrerait directement dans le sol grâce à une couche de roulement en

## ***Chapitre VI : Résultats et discussions***

béton poreux, avant de rejoindre des canalisations souterraines, puis les fameuses zones tampons. Mais pour que l'idée soit viable, encore faut-il que l'eau de pluie rejetée dans la nature soit dépolluée des hydrocarbures avec lesquels elle se mélange en tombant sur la chaussée. Ainsi, l'eau de pluie récupérée dans les zones tampons ne nuirait pas à l'environnement.

**Parois réservoirs et champignons urbains**, consiste en un stockage vertical de l'eau pluvial. Selon eux, l'eau ruisselant des toitures pourrait être récupérée dans des parois réservoirs installées sur le bâti existant des villes : les parois internes seraient en béton hydrofuge et les parois externes en béton faiblement poreux, pour alimenter la végétation en façade. De la même manière, des châteaux d'eau miniaturisés pourraient être construits en béton poreux végétalisée. L'eau stockée, aussi bien dans ces parois réservoirs que dans ces champignons urbains, pourrait, par ailleurs, servir au rafraîchissement des villes, ainsi qu'aux consommations des foyers ne nécessitant pas d'eau potable.

**Les pratique développement à faible impact (LID)**, spécifiquement adaptées aux sites hautement vulnérables précédemment identifiés dans la ville de Skikda, visent à intégrer de manière synergique les infrastructures grises et les solutions naturelles pour renforcer la résilience de la ville aux inondations. L'étude préconise la mise en place de normes de base pour la conception des pratiques de LID, en les envisageant comme des éléments paysagers comprenant diverses mesures, telles que: (1) les chaussées perméables PP , (2) les bio-rétentions (le verdissement des quartiers résidentiels avec dépressions linéaires adjacentes, dans lesquels les eaux de ruissellement générées lors des précipitations sont canalisées), (3) les jardins pluviaux RG, (4) les tranchées d'infiltration IT (implantation des excavations linéaires par un revêtement de gravier), et (5) toiture végétalisée GR (les toits végétalisés pour capter les eaux pluviales qui tombe sur les bâtiments); pour augmenter l'infiltration des eaux de ruissellement pluviales dans les zones sujettes aux inondations à court et à long terme.

**Tableau VI-13** : *Les réponses proposées d'adaptation des risques d'inondation dans la ville de Skikda (Eggermont et al., 2015; Ferreira et al., 2021; Mabrouk et al., 2023; Silva & Costa, 2018).*

## Chapitre VI : Résultats et discussions

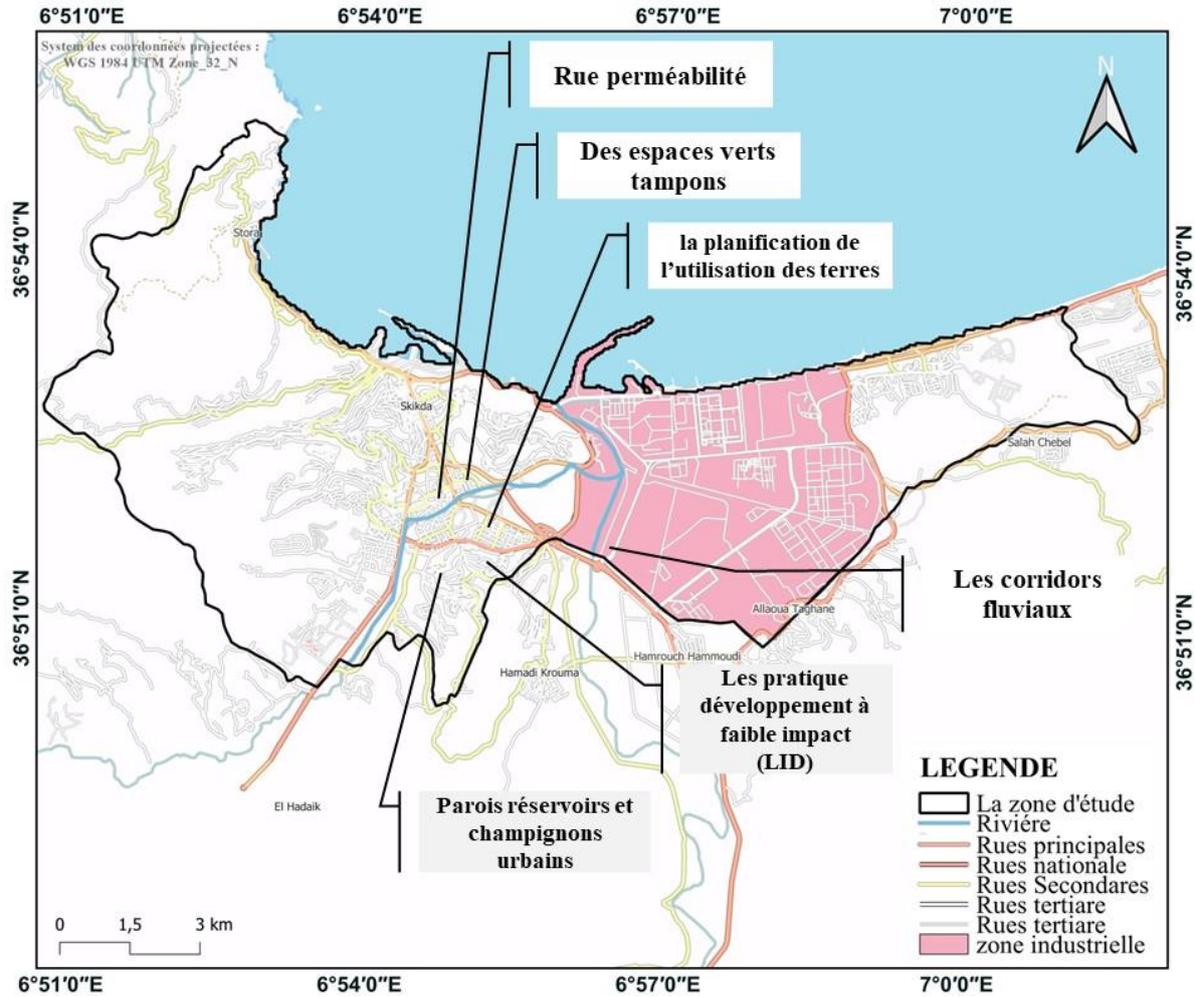
Action	À l'échelle de la ville	À l'échelle du quartier	À l'échelle du bâtiments
<b>Action Technique /spatial</b>	<p>Implantation d'une ceinture interconnectée d'espaces vert le long des rivières traversant le milieu urbain.</p> <p>La prise en compte des infrastructures grises (bâtiments et routes) dans la mise en œuvre dans des zones récréatives dans les zones inondables.</p> <p>Améliorer les corridors des cours d'eau par des plantations riveraines pour ralentir le débit.</p> <p>Des plans d'eau à la frontière de la ville pour stocker l'eau de crue.</p> <p>Impliquer les habitants dans le plan d'urbanisme et montrer les avantages de la NBS car il existe des compensations pour la démolition de certains bâtiments.</p>	<p>Utilisation de matériaux tels que du gravier, des copeaux de bois, des pavés de gazon, etc. pour créer une chaussée perméable</p> <p>Augmentation des distances entre les bâtiments.</p> <p>Pour la rétention des eaux pluviales dans toutes les zones résidentielles, fournir une variété de systèmes naturels.</p>	<p>Verdir les toits pour récupérer les eaux pluviales provenant des bâtiments</p> <p>Dans les bâtiments neufs et existants, maintenez des jardins verticaux, des façades extérieures végétalisées et des plantes sur les balcons.</p> <p>De nouveaux bâtiments doivent avoir des toits qui peuvent supporter des charges.</p> <p>Récupération de l'eau de pluie sur le toit du bâtiment et combinée dans la citerne.</p>
<b>Obstacle Technique /spatial</b>	<p>L'espace physique limité dans la ville à cause de la consommation d'espace.</p> <p>L'utilisation concurrente des terres en bordure les deux rivières.</p>	<p>Un délai plus long par rapport aux solutions grises.</p> <p>L'installation et la maintenance des LID dans une zone urbaine densément peuplée sont coûteuses et parfois inefficaces.</p>	<p>La construction de toits verts est confrontée à un problème de surcharge de poids, en particulier dans les bâtiments qui n'ont pas été conçus pour supporter le poids d'un toit vert saturé au départ.</p> <p>Les toits et murs verts ont un effet limité sur les débits de pointe.</p>
<b>Action administrative</b>	<p>L'utilisation des terres et l'étalement urbain non planifié nécessiteront des réglementations restreintes, des normes institutionnalisées et une législation.</p> <p>Assurer une collaboration étroite entre les habitants et les organisations urbaines de la ville.</p> <p>Proposer des programmes de formation pour les dirigeants locaux, des programmes d'éducation pour les communautés et des plateformes de partage de connaissances.</p>	<p>Les gouvernements locaux devraient éviter la construction dans ces zones sujettes aux inondations.</p> <p>Soutenir la tenue des NBS en tirant parti des ressources et de l'expertise par participations du secteur privé et public.</p> <p>Encourager les promoteurs et les propriétaires fonciers en offrant des motivants Financiers incluant infrastructures vertes dans leurs projets.</p>	<p>Les lois de zonage peuvent être mises à jour pour donner la priorité à l'aménagement d'espaces verts, ou les codes du bâtiment peuvent être mis à jour pour exiger des toits ou des murs verts (Qin, 2020).</p> <p>Lois de zonage peuvent être mises à jour pour donner la priorité à l'aménagement des espaces verts, ou les codes de bâtiment peuvent être mis à jour pour exiger des murs verts.</p> <p>Actuellement, il n'y a pas de murs verts.</p> <p>Établir des normes minimales pour l'entretien des structures.</p>

## *Chapitre VI : Résultats et discussions*

<b>Obstacle administrative</b>	<p>Conflit d'intérêts entre les citoyens et les acteurs urbain de la ville qui peut influencer les politiques du projet proposé.</p> <p>Retard de la préparation des lignes directrices de conception et des innovations spécifiques au site.</p> <p>La limitation des législations existantes.</p>	<p>Insuffisance de ressources humaines pour coordonner associer et convaincre les parties prenantes.</p> <p>Manque des lois régissant les distances de retrait nécessaires des plans d'eau et empêcher la construction dans les zones susceptibles d'être inondées.</p> <p>Il n'existe pas de lois régissant l'aménagement urbain et rural pour respecter</p>	<p>Le manque de capacité de sensibilisation des propriétaires.</p> <p>La difficulté de l'application de la légalisation, qui rend la construction de bâtiments dans des zones susceptibles d'être inondées interdite.</p>
--------------------------------	---	---	---

La figure VI-14 montre un cadre qui a été proposé afin d'explorer toutes les options disponibles en matière de résilience urbaine pour réduire le risque d'inondation, plus précises pour orienter la planification urbaine de demain et s'appuyer sur les nouvelles technologies et les nouveaux équipements pour fournir un support de données.

## Chapitre VI : Résultats et discussions



## Conclusion

La délimitation de la zone d'étude est influencée par une concurrence dans l'utilisation des terres et par la présence importante d'infrastructures urbaines le long des deux cours d'eau traversant le centre-ville. Les précipitations annuelles plus intenses ont un impact direct sur la capacité de ruissellement. Les résultats des évaluations de la vulnérabilité aux risques d'inondation de la ville de Skikda ont révélé une incapacité à faire face à l'augmentation des inondations annuelles et ont mis en évidence des lacunes importantes en termes de résilience aux inondations.

Les auteurs ont mis en évidence diverses propositions concernant la stratégie de résilience urbaine, telles que la Planification et l'aménagement du territoire, la perméabilité en milieu urbain, les corridors fluviaux, les espaces verts tampons, les parois réservoirs et les

## ***Chapitre VI : Résultats et discussions***

champignons urbains, ainsi que les pratiques de développement à faible impact (LID), dans le but de s'adapter à cette menace et de réduire les dommages qui en découlent.

*Conclusion générale et  
perspective de recherche  
potentielle*

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

### **Conclusion générale**

L'humain possède des facultés inouïes en matière d'adaptation aux situations conflictuelles face aux aléas naturels, notamment les crues et les inondations comme en présente dans notre travail.

Dans un contexte de plus en plus marqué par l'incertitude, les risques liés aux inondations constituent un phénomène complexe, dynamique et récurrent en raison de leur fréquence croissante et de leurs effets dévastateurs sur les plans environnemental, social et économique. Cette situation est exacerbée par divers facteurs de risque liés aux inondations, tels que les changements environnementaux, le changement climatique, l'urbanisation, l'élévation du niveau de la mer, l'affaissement des sols, et l'insuffisance des infrastructures de drainage et les évolutions socio-économiques. Ces éléments contribuent à accroître l'intensité des inondations en milieu urbain, ce qui souligne la nécessité d'une évaluation continue des stratégies de gestion des risques.

L'augmentation des inondations fragilise durablement les territoires et plus précisément les milieux urbains. Cependant, les villes offrent également des moyens d'intervenir face à cette situation imprévue. La capacité à gérer les risques liés aux inondations constituent un enjeu crucial pour l'avenir, impliquant la mise en place de stratégies de gestion concertées et adaptées visant à réduire leur impact dans les environnements urbains. D'ici 2050, il est prévu que 70% de la population mondiale réside en milieu urbain, ce qui entraîne des défis et des risques météorologiques inédits pour les villes. Les stratégies de gestion des risques actuellement en place s'avèrent insuffisantes pour faire face à la croissance des risques en milieu. Cette situation a conduit à une transition dans la gestion des risques, marquée par l'émergence de nouveaux concepts tels que celui de la résilience, qui modifie le paradigme en faveur d'une approche visant à « faire la vie en ville avec le risque » plutôt que de s'y confronter.

La résilience urbaine, qui désigne la « capacité des villes à se rétablir de traumatismes et à continuer leur croissance », devient un enjeu essentiel des politiques urbaines afin de faire face aux risques et aux tensions auxquels elles sont confrontées. Malgré la polysémie du concept, la résilience peut faire l'objet de deux lectures. Certains chercheurs pensent que la résilience est un concept considéré comme l'opposé de la vulnérabilité et en même temps, la résilience est un facteur permettant de réduire la vulnérabilité. Pour ces chercheurs, pour augmenter la

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

résilience, il faut diminuer la vulnérabilité. La capacité de résilience des zones urbaines aux risques d'inondation dépend de la manière dont les espaces restreints sont exploités pour minimiser les conséquences des précipitations. En améliorant les systèmes de drainage, il est possible d'ajuster de manière flexible le parcours des eaux pluviales au fil des évolutions climatiques.

La compréhension du risque d'inondation nécessite de prendre en considération les divers facteurs aggravants et les différentes sources potentielles d'inondations. Ainsi que, l'identification des zones à risque d'inondation fluviale, urbaine et côtière est un processus complexe, car les causes de ces phénomènes sont diverses et complexes. L'évaluation de la vulnérabilité aux inondations est perçue dans le domaine de l'aménagement du territoire comme un système complexe qui requiert une approche systémique. Les interactions complexes entre ces divers facteurs engendrent un degré élevé d'incertitude, ce qui complique la prise de décisions. Pour appréhender cette complexité de manière approfondie, il est crucial d'analyser de façon exhaustive les causalités circulaires et l'incertitude intrinsèque liée au contexte des inondations et aux enjeux locaux.

L'évaluation des risques liés aux inondations exige une méthodologie stricte qui intègre les différents éléments influençant leur survenue. La gestion des risques doit progresser vers des stratégies résilientes qui intègrent des approches fondées sur la nature et des infrastructures vertes. Les politiques doivent adopter une perspective de résilience, en tenant compte des dimensions physiques et sociales de l'environnement urbain pour répondre aux perturbations climatiques inattendues.

L'approche systémique offre des méthodes et des outils pour une compréhension approfondie du risque d'inondation, en mettant en évidence les interactions pertinentes et en quantifiant les rétroactions au sein des systèmes de risque d'inondation. Les décideurs et les gestionnaires locaux peuvent se référer de l'approche systémique pour l'élaboration des stratégies globales de réduction des risques. Afin de tenir compte de la complexité et de la nature dynamique du risque d'inondation, il est suggéré d'adopter une approche systémique pour l'évaluation et la gestion des risques d'inondation à grande échelle (MCDM), dans le but de soutenir la prise de décision concernant les investissements dans les programmes de gestion des inondations.

La méthode sélectionnée a d'abord simplifié les étapes du questionnaire expert de DEMATEL et AHP en utilisant un questionnaire à neuf points qui nous ont permis d'avoir un accès à la

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

relation et aux interdépendances entre l'ensemble des critères, ainsi au laboratoire d'essai et d'évaluation décisionnel. De plus, l'AHP et l'ANP peuvent détecter les conflits potentiels en évaluant la cohérence de la matrice de comparaison par paire. La combinaison des deux méthodes MCDM à la théorie de Gray pour prendre en compte toutes les opinions des experts afin de calculer les pondérations des facteurs d'influence. La prise de décision est un processus systématique et formel qui a la capacité d'évaluer la localisation des critères et sous-critères des risques associés aux inondations.

La cartographie des risques d'inondation est un outil essentiel pour évaluer de manière précise les caractéristiques géographiques des inondations, ce qui permet une meilleure compréhension des caractéristiques et des impacts potentiels des inondations en milieu urbain. L'objectif de la cartographie des risques est de repérer les zones risquées, d'évaluer la sécurité des établissements ou encore de favoriser le développement local. Par conséquent, elle joue un rôle essentiel en sensibilisant principalement les autorités locales aux menaces et aux conséquences graves des inondations.

Les modèles d'évaluation des risques d'inondation en milieu urbain sont des outils de modélisation fondamentale qui ont été utilisés pour éclairer la prise de décision en matière de gestion des inondations, afin de comprendre les processus dangereux et leurs impacts, facilitant la mise en œuvre de stratégies d'adaptation. Ces modèles peuvent estimer approximativement la situation réelle d'inondation avec la complexité des impacts sur systèmes urbains.

Ce travail vise à concilier les zones urbaines dites sensibles aux inondations avec les risques accrus, tout en assurant le bon fonctionnement de la ville face aux catastrophes. Il teste des scénarios de gestion pour tirer des enseignements positifs, sensibilise à la résilience urbaine et encourage l'intégration de documents réglementaires plus précis dans la planification urbaine.

Notre étude met en lumière l'importance cruciale de comprendre les risques d'inondation et d'adopter des mesures d'adaptation et de résilience efficaces. L'étude a identifié les principales causes d'inondation qui sont la topographie naturelle, l'urbanisation intense, le changement climatique, et met en avant l'impact des infrastructures de drainage urbain défectueuses à l'aide de la méthode MCDM.

La ville de Skikda, objet de notre analyse, a été confrontée, à l'instar de nombreuses autres localités du pays, à un processus d'urbanisation non contrôlé, à la perte de terres agricoles et

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

à la dégradation environnementale causée par l'expansion rapide de divers secteurs industriels, contribuant ainsi à l'aggravation du problème des Inondations urbaines ces dernières années.

En raison de sa localisation, la ville de Skikda est fréquemment exposée à divers niveaux de risques d'inondation fluviale, allant de faibles à très élevés. Cela est illustré par des écoulements extrêmes qui se produisent en amont d'un bassin hydrographique étendu, actif et d'une grande capacité de mobilisation hydraulique. Cependant, ces crues se propagent en aval vers des zones urbaines mal aménagées et fortement susceptibles aux inondations. L'analyse hydrologique rétrospective a été utilisée pour délimiter les zones inondables, révélant que de vastes zones abritant d'importantes activités socioéconomiques sont exposées de manière significative au risque d'inondation.

Les résultats montrent une sensibilité aux risques des inondations à l'aide d'un modèle conceptuel basé sur trois indices clés qui reflètent l'état de la gravité des inondations urbaines : topographique naturel, activité anthropique (changement climatique et urbanisation) et infrastructure de drainage urbain, observée dans la ville de Skikda, et ce afin d'ouvrir un champ de recherche potentiel pour atténuer les conséquences et d'amorcer des solutions résilientes.

Le modèle urbain de susceptibilité aux inondations urbaines lié à trois causes d'aggravation (TAI) : la topographie naturelle, les activités anthropiques et les infrastructures tente d'évaluer la répartition du risque des inondations dans la ville de Skikda (Algérie). L'approche utilisée est la méthode Grey-DEMATEL-AHP et la méthode Grey-DEMATEL-ANP. Les résultats principaux sont :

(1) Dix-huit facteurs déclenchant la propagation du risque des inondations ont été adoptés. DEMATEL utilise un questionnaire en neuf scores qui a recueilli les avis des experts des institutions locales pour identifier les indépendances entre ces facteurs d'influences et les corrèle avec la théorie des nombres gris afin de réduire l'incertitude dans le processus décisionnel. L'AHP a été déterminé l'importance pondérale et l'ANP a été déterminée les relations causales entre les indices d'influence afin d'estimer les niveaux de risque d'inondation dans la ville de Skikda.

(2) Les poids indiquent que l'incidence du mauvais état des infrastructures de drainage urbain est la principale raison de l'émergence des inondations urbaines dans la région étudiée, suivi par l'impact anthropique qui dépasse l'impact topographique naturel.

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

Les résultats indiquent que les niveaux de risque élevés et très élevés situent dans le centre urbain inférieurs de la zone d'étude, avec un pourcentage de risque de 48.7 %.

Les résultats présentent des vastes qui présentent un risque des inondations élevée à très élevée aux, concentrées dans le centre urbain de la ville. Nos résultats soulignent l'importance d'une approche de gestion des inondations intégrée, axée sur la diminution de la vulnérabilité et le renforcement de la résilience.

La délimitation de la zone d'étude est influencée par une concurrence dans l'utilisation des terres et par la présence importante d'infrastructures urbaines le long des deux cours d'eau traversant le centre-ville. Les précipitations annuelles plus intenses ont un impact direct sur la capacité de ruissellement. Les résultats des évaluations de la vulnérabilité aux risques d'inondation de la ville de Skikda ont révélé une incapacité à faire face à l'augmentation des inondations annuelles et ont mis en évidence des lacunes importantes en termes de résilience aux inondations.

Afin d'améliorer la résilience urbaine aux inondations, il est recommandé d'intégrer des solutions naturelles basées sur la nature, telles que les infrastructures bleu-vert et les techniques LID, en complément des Infrastructures grises traditionnelles, dans les zones inondables. De plus, la mise en place d'une planification de l'utilisation des terres peut considérablement renforcer la capacité des villes à gérer les crues et à réduire leur vulnérabilité.

L'évaluation des risques liés aux inondations et la promotion de la résilience urbaine représentent des Défis majeurs dans la gestion des catastrophes naturelles en milieu urbain. Malgré les avancées dans la compréhension des Risques et l'élaboration de stratégies d'adaptation, des obstacles persistants. Il est impératif de mener des recherches supplémentaires afin d'intégrer de manière exhaustive le concept de résilience dans la gestion des risques, en tenant compte de la complexité des environnements urbains et des multiples dimensions de la résilience communautaire. Cette démarche implique l'amélioration des cadres d'évaluation de la résilience, l'adoption de méthodes participatives et la reconnaissance de l'importance de mesurer la résilience dans des contextes d'incertitude.

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

### **Limite de recherche**

Malgré l'adoption par l'étude d'un cadre d'évaluation et de gestion des risques d'inondation pour faire visage à l'occurrence de ces risques, le travail rencontrèrent en évidence certaines limites :

- La méthode d'évaluation proposée n'est comparée qu'aux d'autres résultats des méthodes MCDM. Néanmoins, d'autres évaluations du risque d'inondation basées sur la théorie des probabilités ont été réalisées en recueillant des données sur des événements pluviométriques historiques pour étudier la répartition du risque.
- Il y a encore de la place pour combiner la méthode MCDM et l'apprentissage automatique, comme Saravi et al. 2019 utilisent des techniques d'apprentissage automatique (intelligence artificielle) pour étudier l'impact de différents types d'inondations sur la base d'une grande base de données aux États-Unis.
- En ce qui concerne la configuration de l'évaluation, il est d'abord pertinent de souligner une lacune au niveau de la dimension sociale, à savoir la sensibilisation citoyenne. Cela implique de façonner les attitudes et la culture des acteurs publics face aux divers risques d'inondation afin de favoriser des comportements résilients et citoyens. Par exemple, les Critères de vulnérabilité de la population tels que le niveau d'éducation, le niveau de revenu, les moyens de subsistance, etc., ainsi que les sous-critères, tels que les groupes d'âge et de sexe, sont intégrés dans le cadre d'évaluation de l'étude menée par Ekmekcioğlu et al., 2022.
- Dans cette étude, il est possible d'intégrer efficacement les facteurs aggravants dans le processus d'évaluation des risques d'inondation, alors que les mesures des conséquences demeurent incertaines. Selon Koks et al. (2015), l'évaluation des risques d'inondation consiste en une estimation des pertes humaines et des dommages économiques.
- L'application de stratégies de résilience urbaine est Confrontée à divers défis, tels que les contraintes financières, le défaut de coordination entre les divers acteurs impliqués, ainsi que les incertitudes liées au climat, qui constituent des obstacles significatifs.

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

### **Futurs scénarios de stratégies et de politiques d'adaptation urbaine aux inondations**

Cette étude explore différents scénarios potentiels concernant la résilience des inondations urbaines, en examinant d'autres perspectives. Chaque scénario exige un processus d'évaluation sur mesure et obtenir des résultats plus nuancés, comme présente ci-dessous.

#### **Scénario 1 : forme urbaine résiliente s'adaptant à la croissance urbaine pour atténuer les risques des inondations**

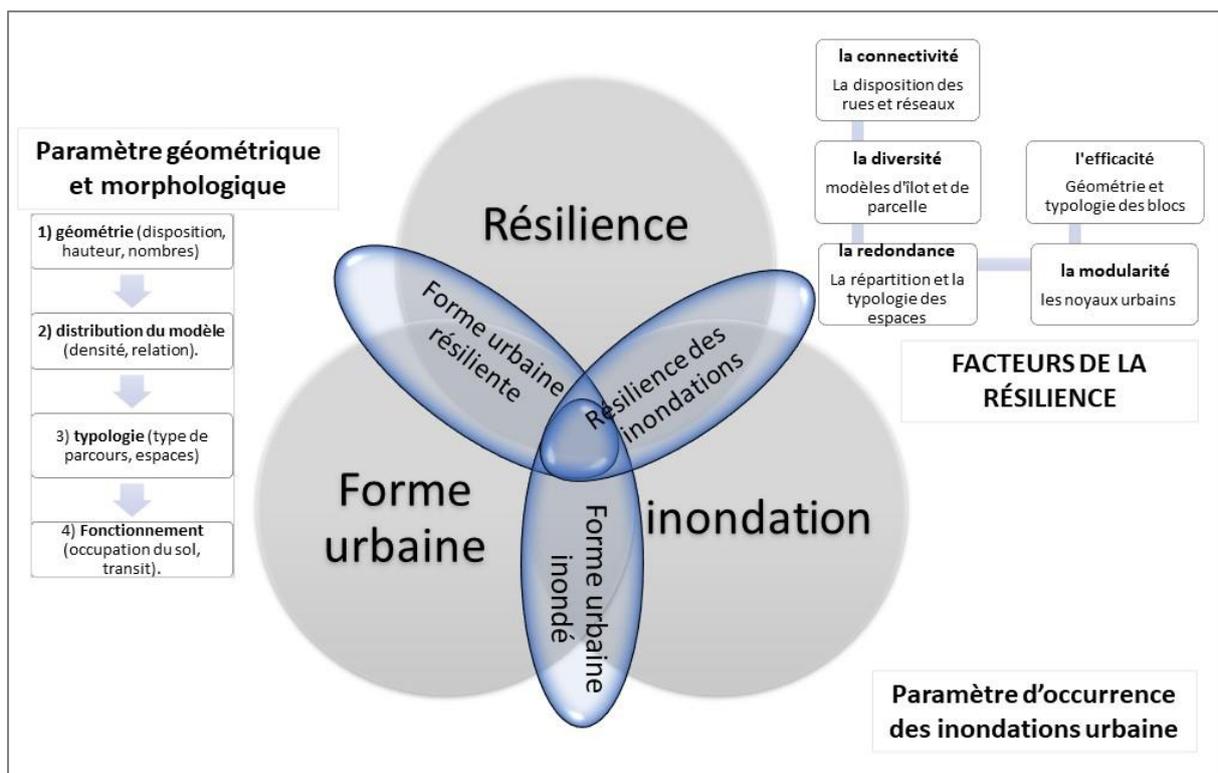
La forme urbaine, en général, représente l'environnement physique d'une ville et les caractéristiques morphologiques uniques qui en constituent la physionomie ou le paysage urbain (Dhar & Khirfan, 2016). C'est la représentation spatiale d'un ensemble complexe et dynamique d'interactions entre de multiples facteurs sociaux, économiques, géographiques, , culturels, physiques et technologiques (Sharifi, 2019), bien que la forme urbaine influence grandement les aspects environnementaux, sociaux et économiques dans les villes. Elles influencent de manière significative à la qualité de vie dans les zones urbaines, ainsi que leurs conditions environnementales et domaines de la gestion des risques climatiques. L'environnement bâti peut atténuer ou aggraver la propagation des risques (AbouKorin et al., 2021) et peut accroître les capacités des communautés à faire face aux catastrophes en cours et les aider à atteindre la résilience.

La transformation de la morphologie urbaine, qui englobe la masse, la densité et l'orientation des structures immobilières en milieu urbain, est largement reconnue comme une stratégie efficace pour atténuer les conséquences des événements extrêmes. Cette préoccupation est étroitement liée au concept de résilience. Dans ce contexte, l'importance des disciplines liées à l'environnement bâti, telles que l'urbanisme, la conception urbaine, la planification et l'aménagement urbain, a été soulignée. Face à ces situations de crise, il est essentiel que les configurations urbaines intègrent des caractéristiques favorisant la résilience, afin de renforcer la capacité des communautés à réagir de manière autonome, rapide et efficace.

Les cinq attributs les plus couramment liés à la configuration urbaine ont été identifiés et reconnus comme des caractéristiques résilientes de la résilience des formes urbaines : la connectivité, la diversité, la redondance, la modularité et l'efficacité (Alawneh & Rashid, 2022 ; Alessandra Feliciotti, 2018).

## ***Conclusion générale et perspective de recherche potentielle***

Les discours théoriques sur la résilience ont rarement abordé la question de l'adaptation au changement climatique et/ou le lien entre la résilience et la conception des formes urbaines. La résilience des villes est rarement discutée en tant que question de forme urbaine, cependant, malgré l'abondance d'études sur la résilience urbaine, la recherche sur le lien entre la forme urbaine et la résilience est limitée et fragmentée. À cet égard, une grande partie de la recherche actuelle reste concentrée sur les éléments à grande échelle de la configuration urbaine (rues, places, parcs, etc.) par lesquels les gens se déplacent en cas d'urgence. Une majorité d'études ont développé l'évaluation de la résilience urbaine à l'échelle de la ville, tandis que quelques publications examinées impliquent l'évaluation à plusieurs échelles (Tong, 2021). Il est urgent d'encadrer l'évaluation multi-échelles afin d'optimiser la résilience urbaine face aux inondations. Si le rôle de l'environnement urbain bâti à favoriser la résilience aux catastrophes, qu'offre un moyen important par lequel l'humanité peut réduire le risque posé par les dangers, évitant ainsi une catastrophe (Haigh & Amaratunga, 2010), voir figure scénario1.



**Figure scénario 1 :** cadre de recherche proposée en matière de forme urbaine résilientes aux inondations (auteurs, 2024).

## **Scénario 2 : Appréhender la ville résiliente dans une perspective de durabilité.**

La durabilité est un objectif lointain dans les villes en développement. Il est très fréquent de voir des villes dégradées, où l'environnement bâti n'est pas en mesure de garantir la qualité de

## ***Conclusion générale et perspective de recherche potentielle***

vie et génère des conflits avec l'environnement naturel (Romero-Lankao et al., 2016) . En revanche, de Jong et al. (2015) soulignent que plusieurs concepts de la littérature scientifique actuelle (comme la ville durable, l'éco-ville, la ville résiliente et la ville intelligente) tentent de relier la configuration urbaine à ses dynamiques écologiques, économiques et sociales, reliant la vie urbaine et l'environnement naturel (Miguez et al., 2019).

Cependant, la croissance urbaine est inévitable, répondre aux exigences de la croissance urbaine est l'un des moyens d'assurer un développement urbain durable. Le développement durable des villes est consacré au renforcement de la résilience urbaine et à l'amélioration de la santé et du bien-être humains.

La littérature sur la résilience urbaine aux dimensions traditionnelles de la durabilité (économique, environnementale et sociale) et des ODD, une lacune que les études prochaines doivent combler en intégrant les principes de développement durable dans le processus de l'évaluation et la progression de la résilience des inondations urbaines, comme la montre la figure scénario 2.



*Figure scénario 2 : Cadre de recherche proposée en matière résilientes aux inondations (auteurs, 2024).*

**Scénario 3 : la performance de l'approche de développement à faible impact (LID) pour l'adaptation face aux inondations.**

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

Récemment, le concept de « solutions fondées sur la nature », « adaptation écosystémique », « éco-RRC » ou « l'infrastructure » est apparue comme une bonne alternative ou Complément aux approches grises traditionnelles. Les solutions basées sur la nature font appel aux processus naturels et à l'écosystème services à des fins fonctionnelles, comme la réduction des inondations l'amélioration de la qualité de l'eau. L'approche de développement à faible impact (LID) est une technique parmi les solutions fondées sur la nature. C'est un ensemble de pratiques de gestion des eaux pluviales composées d'éléments naturels et semi-naturels qui vise à retarder le ruissellement produit par les zones urbaines et à créer un système hydrologique naturel en incorporant des mesures de contrôle (Abdelkebir et al., 2021; Leimgruber et al., 2019). Ainsi, les techniques LID sont des solutions assez économiques et faciles à mettre en œuvre pour la restauration hydraulique et l'amélioration de l'efficacité des réseaux de drainage urbain existants.

Les futures chercheurs doivent aborder la stratégie de solution fondée sur la nature (NBS), les plus courantes appelées outils de développement à faible impact (LID). , telles que: (1) les chaussées perméables PP , (2) les bio-rétentions (le verdissement des quartiers résidentiels avec dépressions linéaires adjacentes, dans lesquels les eaux de ruissellement générées lors des précipitations sont canalisées), (3) les jardins pluviaux RG (Les eaux pluviales sont recueillies dans des petites bassins et des conteneurs plantés de végétation résistante aux inondations pour les réutiliser ou les infiltrer dans le sol), (4) les tranchées d'infiltration IT (implantation des excavations linéaires par un revêtement de gravier), et (5) toiture végétalisée GR (les toits végétalisés pour capter les eaux pluviales qui tombe sur les bâtiments); pour augmenter l'infiltration des eaux de ruissellement pluviales dans les zones sujettes aux inondations à court et à long terme. Les cinq principes et leur mise en œuvre des conseils pour la planification face aux risques d'inondation en tant qu'alternative ou complémentaire à mesures d'ingénierie conventionnelles

### **Scénario 4 : perception du risque des inondations**

Les citoyens peuvent acquérir des connaissances sur les inondations après en avoir fait l'expérience ou après avoir été informés des événements liés aux inondations. Par conséquent, l'amélioration de la sensibilisation des citoyens aux risques d'inondation pourrait réduire efficacement la vulnérabilité de la gestion de la communauté locale, par exemple en comprenant la procédure d'évaluation des risques. Ceci est particulièrement important pour les habitants des villes inondables (De Bruijn et al., 2022). Par le passé, ils ont été moins exposés

## *Conclusion générale et perspective de recherche potentielle*

à des précipitations intenses et à des inondations, ce qui les a laissés peu préparés en termes de gestion des risques. Pour les études à venir, il pourrait être intéressant d'explorer la combinaison entre le risque d'inondation et l'implication des citoyens.

### **Scénario 5 : modélisation d'un indice de résilience pour les zones urbaines sujettes aux inondations**

La résilience globale du système urbain est une tâche complexe qui aborde des éléments complets ou des combinaisons de sous-éléments dans le processus d'évaluation. Bien que difficile, cette approche globale est nécessaire pour réaliser toutes les phases de résilience de manière détaillée. En revanche, tous les autres éléments ont été principalement considérés d'un point de vue technologique et technique (Prashar et al., 2023). Cependant, un résultat définitif nécessite l'amalgame d'éléments avec toutes les dimensions. Compte tenu de cette perspective, les auteurs recommandent des orientations futures par le biais du cadre proposé et d'une liste combinée de dimensions et d'indicateurs pour continuer à évaluer la résilience des zones urbaines aux inondations (Prashar et al., 2023). Il est essentiel que les chercheurs à venir élaborent des indicateurs de résilience aux inondations pour évaluer de manière globale la capacité des communautés à faire face aux inondations, en leur fournissant les instruments appropriés pour une mise en œuvre pratique.

## *Références bibliographiques*

## *Références bibliographiques*

### **Crédits Bibliographiques**

- Abdelgawad, A. G., Helal, E., Sobeih, M. F., & Elsayed, H. (2024). Flood hazard mapping using a GIS-based morphometric analysis approach in arid regions, a case study in the Red Sea Region, Egypt. *Applied Water Science*, 14(4), 81. <https://doi.org/10.1007/s13201-024-02130-5>
- Abdelkebir, B., Guesri, M., Mokhtari, E., & Engel, B. (2023). Simulation of Rainfall-Runoff process using SWAT model in Bouhamdane watershed, Algeria. *Glasnik Srpskog Geografskog Društva*, 103(2), 279-292. <https://doi.org/10.2298/GSGD2302279A>
- Abdelkebir, B., Maoui, A., Mokhtari, E., Engel, B., Chen, J., & Aboelnour, M. (2021). Evaluating Low-Impact Development practice performance to reduce runoff volume in an urban watershed in Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(9), 814. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07178-0>
- Abdulkareem, M., & Elkadi, H. (2018). From engineering to evolutionary, an overarching approach in identifying the resilience of urban design to flood. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 176-190. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.02.009>
- AbouKorin, S. A. A., Han, H., & Mahran, M. G. N. (2021). Role of urban planning characteristics in forming pandemic resilient cities – Case study of Covid-19 impacts on European cities within England, Germany and Italy. *Cities*, 118, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103324>
- Ahern, J. (2011). From fail-safe to safe-to-fail : Sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*, 100(4), 341-343. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.021>
- Alawneh, S. M., & Rashid, M. (2022). Revisiting Urban Resilience : A Review on Resilience of Spatial Structure in Urban Refugee Neighborhoods Facing Demographic Changes. *Frontiers in Sustainable Cities*, 4, 806531. <https://doi.org/10.3389/frsc.2022.806531>
- Alejandra Estrella Núñez, M., Firtinidou-Stergiou, A., Rago, M., Jonathan Yee, C., Barontini, A., Miguel Ferreira, T., & V. Oliveira, D. (2023). Flood Risk Assessment in Urban Areas : The Historic City Centre of Aveiro as a Case Study. In T. Miguel Ferreira & H. Shi (Éds.), *Flood Risk in a Climate Change Context—Exploring Current and Emerging Drivers*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.109867>
- Alessandra Feliciotti. (2018). *RESILIENCE AND URBAN DESIGN: A SYSTEMS APPROACH TO THE STUDY OF RESILIENCE IN URBAN FORML EARNING FROM THE CASE OF GORBALS*. Urban Design Studies Unit Department of Architecture Faculty of Engineering University of Strathclyde.

## Références bibliographiques

- Alfieri, L., Bisselink, B., Dottori, F., Naumann, G., De Roo, A., Salamon, P., Wyser, K., & Feyen, L. (2017). Global projections of river flood risk in a warmer world. *Earth's Future*, 5(2), 171-182. <https://doi.org/10.1002/2016EF000485>
- Ali, S. A., Parvin, F., Pham, Q. B., Vojtek, M., Vojteková, J., Costache, R., Linh, N. T. T., Nguyen, H. Q., Ahmad, A., & Ghorbani, M. A. (2020). GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression : A case of Topľa basin, Slovakia. *Ecological Indicators*, 117, 106620. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620>
- Alves, R., Branco, J. C., & Baptista, J. S. (2023). Flood Risk Assessment and Emergency Planning—A Short Review. In P. M. Arezes, J. S. Baptista, R. B. Melo, J. Castelo Branco, P. Carneiro, A. Colim, N. Costa, S. Costa, J. Duarte, J. C. Guedes, & G. Perestrelo (Éds.), *Occupational and Environmental Safety and Health IV* (Vol. 449, p. 615-629). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-031-12547-8_49)
- Amir, L. A., & Theilen-Willige, B. (2017). Coastal Risk and Water Flow Analysis in Eastern Algeria (Western Mediterranean). *Universal Journal of Geoscience*, 5(4), 99-111. <https://doi.org/10.13189/ujg.2017.050403>
- Anelli, D., Tajani, F., & Ranieri, R. (2022). Urban resilience against natural disasters : Mapping the risk with an innovative indicators-based assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, 371, 133496. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133496>
- Arabameri, A., Rezaei, K., Cerdà, A., Conoscenti, C., & Kalantari, Z. (2019). A comparison of statistical methods and multi-criteria decision making to map flood hazard susceptibility in Northern Iran. *Science of The Total Environment*, 660, 443-458. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.021>
- Arnbjerg-Nielsen, K. (2020). Discussion of “How to improve attribution of changes in drought and flood impacts”. *Hydrological Sciences Journal*, 65(3), 487-488. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1701192>
- Asiri, M. M., Aldehim, G., Alruwais, N., Allafi, R., Alzahrani, I., Nouri, A. M., Assiri, M., & Ahmed, N. A. (2024). Coastal Flood risk assessment using ensemble multi-criteria decision-making with machine learning approaches. *Environmental Research*, 245, 118042. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.118042>
- Azareh, A., Rafiei Sardooi, E., Choubin, B., Barkhori, S., Shahdadi, A., Adamowski, J., & Shamshirband, S. (2021). Incorporating multi-criteria decision-making and fuzzy-value functions for flood susceptibility assessment. *Geocarto International*, 36(20), 2345-2365. <https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1695958>

## Références bibliographiques

- Balica, S. F., Dinh, Q., & Popescu, I. (2015). Vulnerability and Exposure in Developed and Developing Countries. In *Hydro-Meteorological Hazards, Risks and Disasters* (p. 125-162). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00005-9>
- Banque mondiale. (2012). *Villes et inondations Guide de gestion intégrée du risque d'inondation en zone urbaine pour le XXIe siècle*. Banque mondiale Washington. [www.worldbank.org](http://www.worldbank.org)
- Batica, J. (2015). *Methodology for flood resilience assessment in urban environments and mitigation strategy development*. Université de Nice-Sophia Antipolis.
- Battamarco, B. P., Veról, A. P., & Miguez, M. G. (2023). Methodological framework for quantitative assessment of urban development projects considering flood risks and city responses. *Urban Water Journal*, 20(10), 1695-1712. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2134804>
- Bautista-Puig, N., Benayas, J., Mañana-Rodríguez, J., Suárez, M., & Sanz-Casado, E. (2022). The role of urban resilience in research and its contribution to sustainability. *Cities*, 126, 103715. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103715>
- Beilin, R., & Wilkinson, C. (2015). Introduction : Governing for urban resilience. *Urban Studies*, 52(7), 1205-1217. <https://doi.org/10.1177/0042098015574955>
- Benaiche, M., Mokhtari, E., Berghout, A., Abdelkebir, B., & Engel, B. (2024). Identification of soil erosion-susceptible areas using revised universal soil loss equation, analytical hierarchy process and the fuzzy logic approach in sub-watersheds Boussellam and K'sob Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 83(1), 34. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11339-7>
- BENDJEMILA, imen. (2018). *L'ESTIMATION DE LA VULNERABILITE URBAINE, CLE DE LA GESTION DES RISQUES, CAS DE SKIKDA*. UNIVERSITE SALAH BOUBNIDER CONSTANTINE 3 FACULTE D'ARCHITECTURE ET D'URBANISME.
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R. A. P., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., ... Živković, N. (2017). Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), 588-590. <https://doi.org/10.1126/science.aan2506>
- Bosher, L., & Dainty, A. (2011). Disaster risk reduction and 'built-in' resilience : Towards overarching principles for construction practice. *Disasters*, 35(1), 1-18. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2010.01189.x>

## *Références bibliographiques*

- Brand, F. S., & Jax, K. (2007). Focusing the Meaning(s) of Resilience : Resilience as a Descriptive Concept and a Boundary Object. *Ecology and Society*, 12(1), art23. <https://doi.org/10.5751/ES-02029-120123>
- Brody, S. D., Highfield, W. E., & Blessing, R. (2015). An Analysis of the Effects of Land Use and Land Cover on Flood Losses along the Gulf of Mexico Coast from 1999 to 2009. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(6), 1556-1567. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12331>
- Bruwier, M., Maravat, C., Mustafa, A., Teller, J., Piroton, M., Erpicum, S., Archambeau, P., & Dewals, B. (2020). Influence of urban forms on surface flow in urban pluvial flooding. *Journal of Hydrology*, 582, 124493. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124493>
- Bulti, D. T., Girma, B., & Megento, T. L. (2019). Community flood resilience assessment frameworks : A review. *SN Applied Sciences*, 1(12), 1663. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1731-6>
- Bunmi Mudashiru, R., Sabtu, N., Abdullah, R., Saleh, A., & Abustan, I. (2022). Optimality of flood influencing factors for flood hazard mapping : An evaluation of two multi-criteria decision-making methods. *Journal of Hydrology*, 612, 128055. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128055>
- Burrough, P. A. (1986). *Principles of geographical information systems for land resources assessment*.
- Capdevila, P., Stott, I., Oliveras Menor, I., Stouffer, D. B., Raimundo, R. L. G., White, H., Barbour, M., & Salguero-Gómez, R. (2021). Reconciling resilience across ecological systems, species and subdisciplines. *Journal of Ecology*, 109(9), 3102-3113. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13775>
- Ccopi-Trucios, D., Barzola-Rojas, B., Ruiz-Soto, S., Gabriel-Campos, E., Ortega-Quispe, K., & Cordova-Buiza, F. (2023). River Flood Risk Assessment in Communities of the Peruvian Andes : A Semiquantitative Application for Disaster Prevention. *Sustainability*, 15(18), 13768. <https://doi.org/10.3390/su151813768>
- Ceola, S., Laio, F., & Montanari, A. (2015). Human-impacted waters : New perspectives from global high-resolution monitoring: NEW PERSPECTIVES FROM NIGHTLIGHTS IN HUMAN-IMPACTED WATERS. *Water Resources Research*, 51(9), 7064-7079. <https://doi.org/10.1002/2015WR017482>
- Cerri, M., Steinhausen, M., Kreibich, H., & Schröter, K. (2021). Are OpenStreetMap building data useful for flood vulnerability modelling? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(2), 643-662. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-643-2021>

## Références bibliographiques

- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 95, 229-245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>
- Charton, S., & Hatinguais, P. (1987). Diagnostic et gestion des réseaux d'assainissement pluviaux et unitaires : La mesure, outil de base de la gestion en matière de lutte contre les inondations. *La Houille Blanche*, 73(4-5), 373-380. <https://doi.org/10.1051/lhb/1987033>
- Choubin, B., Moradi, E., Golshan, M., Adamowski, J., Sajedi-Hosseini, F., & Mosavi, A. (2019). An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines. *Science of The Total Environment*, 651, 2087-2096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.064>
- Costache, R. (2019). Flood Susceptibility Assessment by Using Bivariate Statistics and Machine Learning Models—A Useful Tool for Flood Risk Management. *Water Resources Management*, 33(9), 3239-3256. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02301-z>
- Cutter, S. L. (2006). *Hazards Vulnerability and Environmental Justice* (0 éd.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781849771542>
- Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social Vulnerability to Environmental Hazards \*. *Social Science Quarterly*, 84(2), 242-261. <https://doi.org/10.1111/1540-6237.8402002>
- Das, S. (2020a). Flood susceptibility mapping of the Western Ghat coastal belt using multi-source geospatial data and analytical hierarchy process (AHP). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20, 100379. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100379>
- De Bruijn, K. M., Jafino, B. A., Merz, B., Doorn, N., Priest, S. J., Dahm, R. J., Zevenbergen, C., Aerts, J. C. J. H., & Comes, T. (2022). Flood risk management through a resilience lens. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 285. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00613-4>
- Debnath, J., Sahariah, D., Lahon, D., Nath, N., Chand, K., Meraj, G., Kumar, P., Kumar Singh, S., Kanga, S., & Farooq, M. (2023). Assessing the impacts of current and future changes of the planforms of river Brahmaputra on its land use-land cover. *Geoscience Frontiers*, 14(4), 101557. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101557>
- Deshons, P. (2002). Prévision et suivi des crues urbaines Expérience de la ville de Marseille. *La Houille Blanche*, 88(2), 56-59. <https://doi.org/10.1051/lhb/2002022>

## *Références bibliographiques*

- DFID. (2011). *Defining Disaster Resilience : A DFID Approach Paper 2 Defining Disaster Resilience : A DFID Approach Paper*. Department for International Development.
- Dhar, T. K., & Khirfan, L. (2016). Community-based adaptation through ecological design : Lessons from Negril, Jamaica. *Journal of Urban Design*, 21(2), 234-255. <https://doi.org/10.1080/13574809.2015.1133224>
- Dodangeh, E., Choubin, B., Eigdir, A. N., Nabipour, N., Panahi, M., Shamshirband, S., & Mosavi, A. (2020). Integrated machine learning methods with resampling algorithms for flood susceptibility prediction. *Science of The Total Environment*, 705, 135983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135983>
- Donze, J. (1996). Editorial : Le risque : Une nouvelle approche des rapports entre la ville et l'industrie / Editorial : Hazards : A new approach to the links between urban areas and industry. *Géocarrefour*, 3-6. Persée <https://www.persee.fr>.
- Doorga, J. R. S., Magerl, L., Bunwaree, P., Zhao, J., Watkins, S., Staub, C. G., Rughooputh, S. D. D. V., Cunden, T. S. M., Lollchund, R., & Boojhawon, R. (2022a). GIS-based multi-criteria modelling of flood risk susceptibility in Port Louis, Mauritius : Towards resilient flood management. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 67, 102683. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102683>
- Doorga, J. R. S., Rughooputh, S. D. D. V., & Boojhawon, R. (2019). Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites : A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, 133, 1201-1219. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.105>
- Dou, Y., Zhu, Q., & Sarkis, J. (2014). Evaluating green supplier development programs with a grey-analytical network process-based methodology. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 420-431. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.03.004>
- Edamo, M. L., Ukumo, T. Y., Lohani, T. K., Ayana, M. T., Ayele, M. A., Mada, Z. M., & Abdi, D. M. (2022). A comparative assessment of multi-criteria decision-making analysis and machine learning methods for flood susceptibility mapping and socio-economic impacts on flood risk in Abela-Abaya floodplain of Ethiopia. *Environmental Challenges*, 9, 100629. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100629>
- Efraimidou, E., & Spiliotis, M. (2024). A GIS-Based Flood Risk Assessment Using the Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory Approach at a Regional Scale. *Environmental Processes*, 11(1), 9. <https://doi.org/10.1007/s40710-024-00683-w>
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., Van Ham, C., Weisser, W. W., & Le Roux, X. (2015). Nature-based Solutions : New Influence for Environmental Management and Research in Europe. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 24(4), 243-248. <https://doi.org/10.14512/gaia.24.4.9>

## *Références bibliographiques*

- Ekmekcioğlu, Ö., Koc, K., & Özger, M. (2022a). Towards flood risk mapping based on multi-tiered decision making in a densely urbanized metropolitan city of Istanbul. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103759. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103759>
- Erdem, U., Cubukcu, K. M., & Sharifi, A. (2021). An analysis of urban form factors driving Urban Heat Island : The case of Izmir. *Environment, Development and Sustainability*, 23(5), 7835-7859. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00950-4>
- Falatoonitoosi, E., Leman, Z., Sorooshian, S., & Salimi, M. (2013). Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 5(13), 3476-3480. <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.4475>
- Fan, X., & Matsumoto, T. (2020). Comparative Analysis on Urban Flood Countermeasures Based on Life Cycle Thinking : A Comparison between Enhancing of Drainage Capacity Project and Sponge City. *Environments*, 7(7), 51. <https://doi.org/10.3390/environments7070051>
- Fang, Z., Wang, Y., Peng, L., & Hong, H. (2021). Predicting flood susceptibility using LSTM neural networks. *Journal of Hydrology*, 594, 125734. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125734>
- Farinós-Dasí, J., Pinazo-Dallenbach, P., Peiró Sánchez-Manjavacas, E., & Rodríguez-Bernal, D. C. (2024). Disaster risk management, climate change adaptation and the role of spatial and urban planning : Evidence from European case studies. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06448-w>
- Feizizadeh, B., Omarzadeh, D., Kazemi Garajeh, M., Lakes, T., & Blaschke, T. (2023). Machine learning data-driven approaches for land use/cover mapping and trend analysis using Google Earth Engine. *Journal of Environmental Planning and Management*, 66(3), 665-697. <https://doi.org/10.1080/09640568.2021.2001317>
- Fenglin, W., Ahmad, I., Zelenakova, M., Fenta, A., Dar, M. A., Teka, A. H., Belew, A. Z., Damtie, M., Berhan, M., & Shafi, S. N. (2023). Exploratory regression modeling for flood susceptibility mapping in the GIS environment. *Scientific Reports*, 13(1), 247. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27447-0>
- Fernández, D. S., & Lutz, M. A. (2010a). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Engineering Geology*, 111(1-4), 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- Ferreira, C. S. S., Potočki, K., Kapović-Solomun, M., & Kalantari, Z. (2021). Nature-Based Solutions for Flood Mitigation and Resilience in Urban Areas. In C. S. S. Ferreira, Z. Kalantari, T. Hartmann, & P. Pereira (Éds.), *Nature-Based Solutions for Flood Mitigation* (Vol. 107, p. 59-78). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/698\\_2021\\_758](https://doi.org/10.1007/698_2021_758)

## *Références bibliographiques*

- Figlus, J. (2022). Modeling the movement of water and sediment in coastal environments. In *Coastal Flood Risk Reduction* (p. 33-45). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00004-4>
- Fleischhauer, M. (2008). *THE ROLE OF SPATIAL PLANNING IN STRENGTHENING URBAN RESILIENCE*.
- Fletcher, T. D., Shuster, W., Hunt, W. F., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, J.-L., Mikkelsen, P. S., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., & Viklander, M. (2015). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 12(7), 525-542. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- Folke, C., Carpenter, S., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C. S., & Walker, B. (2002). Resilience and Sustainable Development : Building Adaptive Capacity in a World of Transformations. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(5), 437-440. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.5.437>
- Fontela, E. and Gabus, A. (1972). *World Problems an Invitation to Further Thought within the Framework of DEMATEL*.
- Fu, G., Meng, F., Rivas Casado, M., & Kalawsky, R. S. (2020). Towards Integrated Flood Risk and Resilience Management. *Water*, 12(6), 1789. <https://doi.org/10.3390/w12061789>
- Garg, V., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Srivastav, S. K., & Senthil Kumar, A. (2017). Assessment of land use land cover change impact on hydrological regime of a basin. *Environmental Earth Sciences*, 76(18), 635. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6976-z>
- Gigović, L., Pamučar, D., Bajić, Z., & Drobňjak, S. (2017). Application of GIS-Interval Rough AHP Methodology for Flood Hazard Mapping in Urban Areas. *Water*, 9(6), 360. <https://doi.org/10.3390/w9060360>
- Gillard, R., Gouldson, A., Paavola, J., & Van Alstine, J. (2016). Transformational responses to climate change : Beyond a systems perspective of social change in mitigation and adaptation. *WIREs Climate Change*, 7(2), 251-265. <https://doi.org/10.1002/wcc.384>
- Gonzva, M., Balsells, M., & Barroca, B. (2015). Mobilisation de l'analyse fonctionnelle pour l'étude de la résilience des quartiers et des systèmes de transport guidé face au risque inondation. *Techniques Sciences Méthodes*, 7-8, 64-75. <https://doi.org/10.1051/tsm/201507064>

## Références bibliographiques

- Govindan, K., Khodaverdi, R., & Vafadarnikjoo, A. (2016). A grey DEMATEL approach to develop third-party logistics provider selection criteria. *Industrial Management & Data Systems*, 116(4), 690-722. <https://doi.org/10.1108/IMDS-05-2015-0180>
- Gralepois, M. (2020). What Can We Learn from Planning Instruments in Flood Prevention? Comparative Illustration to Highlight the Challenges of Governance in Europe. *Water*, 12(6), 1841. <https://doi.org/10.3390/w12061841>
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X., & Briggs, J. M. (2008). Global Change and the Ecology of Cities. *Science*, 319(5864), 756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Güneralp, B., Güneralp, İ., & Liu, Y. (2015). Changing global patterns of urban exposure to flood and drought hazards. *Global Environmental Change*, 31, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2015.01.002>
- Guo, R., & Wu, Z. (2023). Social sustainable supply chain performance assessment using hybrid fuzzy-AHP-DEMATEL-VIKOR : A case study in manufacturing enterprises. *Environment, Development and Sustainability*, 25(11), 12273-12301. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02565-3>
- Guoyi, L., Liu, J., & Shao, W. (2023). Urban flood risk assessment under rapid urbanization in Zhengzhou City, China. *Regional Sustainability*, 4(3), 332-348. <https://doi.org/10.1016/j.regsus.2023.08.004>
- Haigh, R., & Amaratunga, D. (2010). An integrative review of the built environment discipline's role in the development of society's resilience to disasters. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 1(1), 11-24. <https://doi.org/10.1108/17595901011026454>
- Haleem, A., Khan, S., & Khan, M. I. (2019). Traceability implementation in food supply chain : A grey-DEMATEL approach. *Information Processing in Agriculture*, 6(3), 335-348. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2019.01.003>
- Hallegatte, S., Green, C., Nicholls, R. J., & Corfee-Morlot, J. (2013). Future flood losses in major coastal cities. *Nature Climate Change*, 3(9), 802-806. <https://doi.org/10.1038/nclimate1979>
- Hammami, S., Zouhri, L., Souissi, D., Souei, A., Zghibi, A., Marzougui, A., & Dlala, M. (2019). Application of the GIS based multi-criteria decision analysis and analytical hierarchy process (AHP) in the flood susceptibility mapping (Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 12(21), 653. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4754-9>
- Hao, H., & Wang, Y. (2022). Disentangling relations between urban form and urban accessibility for resilience to extreme weather and climate events. *Landscape and Urban Planning*, 220, 104352. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104352>

## *Références bibliographiques*

- Hassaballah, K., Mohamed, Y., Uhlenbrook, S., & Biro, K. (2017). Analysis of streamflow response to land use and land cover changes using satellite data and hydrological modelling : Case study of Dinder and Rahad tributaries of the Blue Nile (Ethiopia–Sudan). *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(10), 5217-5242. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5217-2017>
- Hassan, S. S., Ajmal, M., Khan, A. A., Goheer, M. A., Khattak, M. S., Ali, S., Ijaz, M., & Adnan, M. (2019). Multi-criteria decision analysis for flood risk on the Chenab River. *Weather*, 74(S1). <https://doi.org/10.1002/wea.3490>
- Havinga, H. (2020). Towards Sustainable River Management of the Dutch Rhine River. *Water*, 12(6), 1827. <https://doi.org/10.3390/w12061827>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816-821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- Hong, H., Chen, W., Xu, C., Youssef, A. M., Pradhan, B., & Tien Bui, D. (2016). Rainfall-induced landslide susceptibility assessment at the Chongren area (China) using frequency ratio, certainty factor, and index of entropy. *Geocarto International*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1130086>
- Hong, H., Panahi, M., Shirzadi, A., Ma, T., Liu, J., Zhu, A.-X., Chen, W., Kougiyas, I., & Kazakis, N. (2018). Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. *Science of The Total Environment*, 621, 1124-1141. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.114>
- Hosseini, F. S., Choubin, B., Mosavi, A., Nabipour, N., Shamshirband, S., Darabi, H., & Haghghi, A. T. (2020). Flash-flood hazard assessment using ensembles and Bayesian-based machine learning models : Application of the simulated annealing feature selection method. *Science of The Total Environment*, 711, 135161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135161>
- Hosseini, F. S., Sigaroodi, S. K., Salajegheh, A., Moghaddamnia, A., & Choubin, B. (2021). *Towards a Flood Vulnerability Assessment of Watershed Using Integration of Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, Analytical Network Process, and Fuzzy Theories* [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-276992/v1>
- Hunt, K. M. R., & Menon, A. (2020). The 2018 Kerala floods : A climate change perspective. *Climate Dynamics*, 54(3-4), 2433-2446. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05123-7>

## *Références bibliographiques*

- Hussain, M., Tayyab, M., Ullah, K., Ullah, S., Rahman, Z. U., Zhang, J., & Al-Shaibah, B. (2023). Development of a new integrated flood resilience model using machine learning with GIS-based multi-criteria decision analysis. *Urban Climate*, 50, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101589>
- Ibrahim, M. G., Elboshy, B., & Mahmood, W. E. (2019). Integrated Approach to Assess the Urban Green Infrastructure Priorities (Alexandria, Egypt). In H. I. Chaminé, M. Barbieri, O. Kisi, M. Chen, & B. J. Merkel (Éds.), *Advances in Sustainable and Environmental Hydrology, Hydrogeology, Hydrochemistry and Water Resources* (p. 413-415). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5\\_97](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01572-5_97)
- IPCC. (2014a). *AR5 Synthesis Report : Climate Change 2014*.
- IPCC. (2014b). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC. (2001). *TAR Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. The Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Jeffrey Sachs, Guido Schmidt-Traub, Christian Kroll, Guillaume Lafortune, Grayson Fuller, & Finn Woelm. (2021). *The sustainable development goals and Covid-19 : Includes the SDG index and dashboards*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/97811089922411>
- Jeong, J. S., González-Gómez, D., & Yllana-Prieto, F. (2023). Multi-criteria Decision Analysis and Fuzzy-Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory (MCDA and F-DEMATEL) Method for Flipped and Sustainable Mathematics Teaching as a Real-Life Application. In L. Sahoo, T. Senapati, & R. R. Yager (Éds.), *Real Life Applications of Multiple Criteria Decision Making Techniques in Fuzzy Domain* (Vol. 420, p. 105-123). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-4929-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-4929-6_5)
- Jeong, M., Kim, C., & Kim, D.-H. (2024). Flood prediction using nonlinear instantaneous unit hydrograph and deep learning : A MATLAB program. *Environmental Modelling & Software*, 175, 105974. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105974>
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Fu, D. (2017). Can “Sponge Cities” Mitigate China’s Increased Occurrences of Urban Flooding? *Aquademia: Water, Environment and Technology*, 1(1). <https://doi.org/10.20897/awet.201703>
- Joerin, J., & Shaw, R. (2010). Chapter 9 Climate change adaptation and urban risk management. In R. Shaw, J. M. Pulhin, & J. Jacqueline Pereira (Éds.), *Community, Environment and Disaster Risk Management* (Vol. 4, p. 195-215). Emerald Group Publishing Limited. [https://doi.org/10.1108/S2040-7262\(2010\)0000004015](https://doi.org/10.1108/S2040-7262(2010)0000004015)

## *Références bibliographiques*

- Joerin, J., Shaw, R., Takeuchi, Y., & Krishnamurthy, R. (2012). Assessing community resilience to climate-related disasters in Chennai, India. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 1, 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2012.05.006>
- Jones, E. C. (2016). *Social network analysis of disaster response, recovery, and adaptation* (1st edition). Elsevier.
- Jongman, B. (2018). Effective adaptation to rising flood risk. *Nature Communications*, 9(1), 1986. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04396-1>
- Jongman, B., Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., Coughlan De Perez, E., Van Aalst, M. K., Kron, W., & Ward, P. J. (2015). Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(18). <https://doi.org/10.1073/pnas.1414439112>
- Julien, C. (2023). *Le document d'information communal sur les risques majeurs (DICRIM)*. <https://www.georisques.gouv.fr/communiquer-aupres-de-mes-administres/dicrim>
- Kamel, M., & Hafez, E. A. F. (2021). GIS-Based Bivariate Statistical Model Prediction of Groundwater Potential Mapping for Sustainable Developments in Suez Governorate, Egypt. *Beni-Suef University International Journal of Humanities and Social Sciences*, 3(2), 155-199. <https://doi.org/10.21608/buijhs.2021.285936>
- Kanani-Sadat, Y., Arabsheibani, R., Karimipour, F., & Nasser, M. (2019). A new approach to flood susceptibility assessment in data-scarce and ungauged regions based on GIS-based hybrid multi criteria decision-making method. *Journal of Hydrology*, 572, 17-31. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.034>
- Kantakumar, L. N., & Neelamsetti, P. (2015). Multi-temporal land use classification using hybrid approach. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(2), 289-295. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.09.003>
- Kassogué, H., Bernoussi, A., Maâtouk, M., & Amharref, M. (2017). A two scale cellular automaton for flow dynamics modeling (2CAFDYM). *Applied Mathematical Modelling*, 43, 61-77. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2016.10.034>
- Kittipongvises, S., Phetrak, A., Rattanapun, P., Brundiers, K., Buizer, J. L., & Melnick, R. (2020). AHP-GIS analysis for flood hazard assessment of the communities nearby the world heritage site on Ayutthaya Island, Thailand. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101612. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101612>
- Kordelas, G., Manakos, I., Aragonés, D., Díaz-Delgado, R., & Bustamante, J. (2018). Fast and Automatic Data-Driven Thresholding for Inundation Mapping with Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, 10(6), 910. <https://doi.org/10.3390/rs10060910>

## *Références bibliographiques*

- Kraus, D. (2014). Consolidated data analysis and presentation using an open-source add-in for the Microsoft Excel<sup>®</sup> spreadsheet software. *Medical Writing*, 23(1), 25-28. <https://doi.org/10.1179/2047480613Z.000000000181>
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change : Global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- Laplace, D., & Deshons, P. (2009). De la pluie aux risques : Courbes cumul intensité danger. *La Houille Blanche*, 95(6), 30-34. <https://doi.org/10.1051/lhb/2009074>
- Leimgruber, J., Krebs, G., Camhy, D., & Muschalla, D. (2019). Model-Based Selection of Cost-Effective Low Impact Development Strategies to Control Water Balance. *Sustainability*, 11(8), 2440. <https://doi.org/10.3390/su11082440>
- León-Muñoz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1330. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- Leta, B. M., & Adugna, D. (2023). Characterizing the level of urban Flood vulnerability using the social-ecological-technological systems framework, the case of Adama city, Ethiopia. *Heliyon*, 9(10), e20723. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20723>
- Leulmi, L., Lazri, Y., & Abdelkebir, B. (2023). The resilient city : What urban form characteristics to adapt to flood risks? (Case of the city of Skikda-Algeria). *6th International Conference of Contemporary Affairs in Architecture and Urbanism – Full paper proceedings of ICCAUA2023, 14-16 June 2023*, 537-544. <https://doi.org/10.38027/iccaua2023en0380>
- Li, Y., Osei, F. B., Hu, T., & Stein, A. (2023). Urban flood susceptibility mapping based on social media data in Chengdu city, China. *Sustainable Cities and Society*, 88, 104307. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104307>
- Lindfield, G. R., & Penny, J. E. T. (2012). An Introduction to Matlab<sup>®</sup>. In *Numerical Methods* (p. 1-66). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-386942-5.00001-1>
- Liping, C., Yujun, S., & Saeed, S. (2018). Monitoring and predicting land use and land cover changes using remote sensing and GIS techniques—A case study of a hilly area, Jiangle, China. *PLOS ONE*, 13(7), e0200493. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200493>
- Lo, C. P., & Choi, J. (2004). A hybrid approach to urban land use/cover mapping using Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) images. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2687-2700. <https://doi.org/10.1080/01431160310001618428>

## Références bibliographiques

- Lucchetta, B. C., Watanabe, F. S. Y., & do Carmo, N. M. R. B. (2023). A spatiotemporal classification approach to evaluate the impacts of land use and land cover changes before and after the Três Irmãos reservoir formation in the Tietê River, Brazil. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-023-01757-8>
- Lumbroso, D. (2020). Flood risk management in Africa. *Journal of Flood Risk Management*, 13(3), e12612. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12612>
- Luu, C., Pham, B. T., Phong, T. V., Costache, R., Nguyen, H. D., Amiri, M., Bui, Q. D., Nguyen, L. T., Le, H. V., Prakash, I., & Trinh, P. T. (2021). GIS-based ensemble computational models for flood susceptibility prediction in the Quang Binh Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 599, 126500. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126500>
- Lyu, H.-M., Xu, Y.-S., Cheng, W.-C., & Arulrajah, A. (2018). Flooding Hazards across Southern China and Prospective Sustainability Measures. *Sustainability*, 10(5), 1682. <https://doi.org/10.3390/su10051682>
- Lyu, H.-M., Zhou, W.-H., Shen, S.-L., & Zhou, A.-N. (2020a). Inundation risk assessment of metro system using AHP and TFN-AHP in Shenzhen. *Sustainable Cities and Society*, 56, 102103. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102103>
- Mabrouk, M., Han, H., Abdrabo, K. I., Mahran, M. G. N., AbouKorin, S. A. A., Nasrallah, S., Shen, G., Fan, C., Yousry, A., & Hafez, H. M. (2024). Spatial congruency or discrepancy? Exploring the spatiotemporal dynamics of built-up expansion patterns and flood risk. *Science of The Total Environment*, 915, 170019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170019>
- Maejima, Y. (2023). On the Use of the Ensemble Kalman Filter for Torrential Rainfall Forecasts. In T. Miguel Ferreira & H. Shi (Éds.), *Flood Risk in a Climate Change Context—Exploring Current and Emerging Drivers*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107916>
- Malik, S., Chandra Pal, S., Chowdhuri, I., Chakraborty, R., Roy, P., & Das, B. (2020). Prediction of highly flood prone areas by GIS based heuristic and statistical model in a monsoon dominated region of Bengal Basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 19, 100343. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100343>
- Masood, M., & Takeuchi, K. (2012). Assessment of flood hazard, vulnerability and risk of mid-eastern Dhaka using DEM and 1D hydrodynamic model. *Natural Hazards*, 61(2), 757-770. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0060-x>
- Matheswaran, K., Alahacoon, N., Pandey, R., & Amarnath, G. (2019). Flood risk assessment in South Asia to prioritize flood index insurance applications in Bihar, India.

## Références bibliographiques

- Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1), 26-48.  
<https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1500495>
- Mathilde, M.-M., & David, M. (2018). *LES VILLES RÉSILIENTES (LA REVUE DE L'INSTITUT VEOLIA FACTS REPORTS)*. institut Veolia.
- Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016). Defining urban resilience : A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38-49.  
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.11.011>
- Mello-Théry, N. A. D., Théry, H., Sato, D. P., & Tozato, H. D. C. (2020). Vulnérabilité, risques et conflits liés à l'eau : La zone de protection environnementale de la plaine inondable du Tietê. *IdeAs*, 15. <https://doi.org/10.4000/ideas.8197>
- Meng Lu & Kees Wevers. (2007). Grey System Theory and Applications : A Way Forward. *Journal of Grey System*, 10(1). <https://doi.org/10.30016/JGS.200706.0007>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217-226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Merz, B., Thielen, A. H., & Gocht, M. (2007). Flood Risk Mapping At The Local Scale : Concepts and Challenges. In S. Begum, M. J. F. Stive, & J. W. Hall (Éds.), *Flood Risk Management in Europe* (Vol. 25, p. 231-251). Springer Netherlands.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4200-3_13)
- Miguez, M. G., Veról, A. P., Battemarco, B. P., Yamamoto, L. M. T., De Brito, F. A., Fernandez, F. F., Merlo, M. L., & Queiroz Rego, A. (2019). A framework to support the urbanization process on lowland coastal areas : Exploring the case of Vargem Grande – Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1281-1293.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.187>
- Miller, J. D., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality : A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345-362.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
- Mind'je, R., Li, L., Amanambu, A. C., Nahayo, L., Nsengiyumva, J. B., Gasirabo, A., & Mindje, M. (2019). Flood susceptibility modeling and hazard perception in Rwanda. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 38, 101211.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101211>
- Mitchell, V. (1999). Consumer perceived risk : Conceptualisations and models. *European Journal of Marketing*, 33(1/2), 163-195. <https://doi.org/10.1108/03090569910249229>

## Références bibliographiques

- Mobley, W., & Blessing, R. (2022). Using machine learning to predict flood hazards based on historic damage. In *Coastal Flood Risk Reduction* (p. 61-75). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00006-8>
- Moges, S. A., Gebrie, G. S., Habtamu, G., & Raschid-Sally, L. (2019). Built Environment, flooding regime change, and its effect on adaptation to climate change in the cities of developing countries : Learning a lesson from Addis Ababa City, Ethiopia. In *Extreme Hydrology and Climate Variability* (p. 445-456). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00035-X>
- Mokhtari, E., Abdelkebir, B., Djenaoui, A., & Hamdani, N. E. H. (2024). Integrated analytic hierarchy process and fuzzy analytic hierarchy process for Sahel watershed flood susceptibility assessment, Algeria. *Water Practice & Technology*, wpt2024012.  
<https://doi.org/10.2166/wpt.2024.012>
- Mokhtari, E., Mezali, F., Abdelkebir, B., & Engel, B. (2023a). Flood risk assessment using analytical hierarchy process : A case study from the Cheliff-Ghrib watershed, Algeria. *Journal of Water and Climate Change*, 14(3), 694-711.  
<https://doi.org/10.2166/wcc.2023.316>
- MSH-Sud - numerev. (2019). *Transformations organisationnelles, développement durable, et multiplicité des temporalités d'action*. [https://doi.org/10.34745/NUMEREV\\_1551](https://doi.org/10.34745/NUMEREV_1551)
- Mudashiru, R. B., Sabtu, N., Abustan, I., & Balogun, W. (2021). Flood hazard mapping methods : A review. *Journal of Hydrology*, 603, 126846.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126846>
- Mupepi, O., & Matsa, M. M. (2023). A comparative analysis of changes in surface water resources in dry and wet areas of Zimbabwe between 1990 and 2020. In *Water, Land, and Forest Susceptibility and Sustainability, Volume 2* (p. 123-146). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15847-6.00012-4>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s. d.).  
<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
- Notti, D., Giordan, D., Caló, F., Pepe, A., Zucca, F., & Galve, J. (2018). Potential and Limitations of Open Satellite Data for Flood Mapping. *Remote Sensing*, 10(11), 1673.  
<https://doi.org/10.3390/rs10111673>
- Nur, I., & Shrestha, K. K. (2017). An Integrative Perspective on Community Vulnerability to Flooding in Cities of Developing Countries. *Procedia Engineering*, 198, 958-967.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.141>
- Oh, M., Jang, H., Kim, S., & Yoon, B. (2023). Main path analysis for technological development using SAO structure and DEMATEL based on keyword causality. *Scientometrics*, 128(4), 2079-2104. <https://doi.org/10.1007/s11192-023-04652-2>

## Références bibliographiques

- Olaya, V., & Conrad, O. (2009). Chapter 12 Geomorphometry in SAGA. In *Developments in Soil Science* (Vol. 33, p. 293-308). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00012-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00012-3)
- Ouma, Y. O., & Omai, L. (2023). Flood Susceptibility Mapping Using Image-Based 2D-CNN Deep Learning : Overview and Case Study Application Using Multiparametric Spatial Data in Data-Scarce Urban Environments. *International Journal of Intelligent Systems*, 2023, 1-23. <https://doi.org/10.1155/2023/5672401>
- Panigrahi, M., & Sharma, A. (2024). Flood Vulnerability Mapping and Resilience in Urban Setting : A Review of Conceptual Frameworks and Assessment Methods. In B. Biswas & B. B. Ghute (Éds.), *Flood Risk Management* (p. 235-270). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-2688-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-97-2688-2_11)
- Paton, D., & Johnston, D. M. (Éds.). (2017). *Disaster resilience : An integrated approach* (Second edition). Charles C Thomas, Publisher, Ltd.
- Patrikaki, O., Kazakis, N., Kougias, I., Patsialis, T., Theodossiou, N., & Voudouris, K. (2018). Assessing Flood Hazard at River Basin Scale with an Index-Based Approach : The Case of Mouriki, Greece. *Geosciences*, 8(2), 50. <https://doi.org/10.3390/geosciences8020050>
- Pham, B. T., Luu, C., Phong, T. V., Nguyen, H. D., Le, H. V., Tran, T. Q., Ta, H. T., & Prakash, I. (2021). Flood risk assessment using hybrid artificial intelligence models integrated with multi-criteria decision analysis in Quang Nam Province, Vietnam. *Journal of Hydrology*, 592, 125815. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125815>
- PIEL. (2021). *La gestion de l'eau pluviale en milieu urbain, une contrainte réglementaire et technique, une opportunité et un outil pour réintégrer une réelle nature dans la ville*. anabf.org
- Pinto, B. M. B., Ferreira, F. A. F., Spahr, R. W., Sunderman, M. A., & Pereira, L. F. (2023). Analyzing causes of urban blight using cognitive mapping and DEMATEL. *Annals of Operations Research*, 325(2), 1083-1110. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04614-6>
- Prashar, N., Lakra, H. S., Shaw, R., & Kaur, H. (2023). Urban Flood Resilience : A comprehensive review of assessment methods, tools, and techniques to manage disaster. *Progress in Disaster Science*, 20, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100299>
- Puechlong, C. (2020). *Etude des facteurs de risque au développement d'un trouble de stress post-traumatique après une inondation*. l'école doctorale 583 « Risque et Société ».
- Quenault, B. (2017). La vulnérabilité, un concept central de l'analyse des risques urbains en lien avec le changement climatique. *Ville et vulnérabilités*.

## *Références bibliographiques*

- Ray, B., & Shaw, R. (2018). Changing built form and implications on urban resilience : Loss of climate responsive and socially interactive spaces. *Procedia Engineering*, 212, 117-124. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.01.016>
- Reghezza-Zitt, M. (2016a). Penser la vulnérabilité dans un contexte de globalisation des risques grâce aux échelles spatiales et temporelles. *Espace populations sociétés*, 2016/3. <https://doi.org/10.4000/eps.6641>
- Reghezza-Zitt, M. (2016b). Penser la vulnérabilité dans un contexte de globalisation des risques grâce aux échelles spatiales et temporelles. *Espace populations sociétés*, 2016/3. <https://doi.org/10.4000/eps.6641>
- Rejith, R. G., Anirudhan, S., & Sundararajan, M. (2019). Delineation of Groundwater Potential Zones in Hard Rock Terrain Using Integrated Remote Sensing, GIS and MCDM Techniques : A Case Study From Vamanapuram River Basin, Kerala, India. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science* (p. 349-364). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815413-7.00025-0>
- Rimba, A., Setiawati, M., Sambah, A., & Miura, F. (2017). Physical Flood Vulnerability Mapping Applying Geospatial Techniques in Okazaki City, Aichi Prefecture, Japan. *Urban Science*, 1(1), 7. <https://doi.org/10.3390/urbansci1010007>
- Rincón, D., Khan, U., & Armenakis, C. (2018). Flood Risk Mapping Using GIS and Multi-Criteria Analysis : A Greater Toronto Area Case Study. *Geosciences*, 8(8), 275. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080275>
- Romero-Lankao, P., Gnatz, D., Wilhelmi, O., & Hayden, M. (2016a). Urban Sustainability and Resilience : From Theory to Practice. *Sustainability*, 8(12), 1224. <https://doi.org/10.3390/su8121224>
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G., & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods : Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 14, 470-486. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.09.013>
- Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—What it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161-176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty, T. L. (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(77\)90033-5](https://doi.org/10.1016/0022-2496(77)90033-5)
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (1984). Inconsistency and rank preservation. *Journal of Mathematical Psychology*, 28(2), 205-214. [https://doi.org/10.1016/0022-2496\(84\)90027-0](https://doi.org/10.1016/0022-2496(84)90027-0)

## Références bibliographiques

- Sachindra, D. A., Ng, A. W. M., Muthukumaran, S., & Perera, B. J. C. (2016). Impact of climate change on urban heat island effect and extreme temperatures : A case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694), 172-186. <https://doi.org/10.1002/qj.2642>
- Sahraei, R., Kanani-Sadat, Y., Homayouni, S., Safari, A., Oubennaceur, K., & Chokmani, K. (2023). A novel hybrid GIS -based multi-criteria decision-making approach for flood susceptibility analysis in large ungauged watersheds. *Journal of Flood Risk Management*, 16(2), e12879. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12879>
- Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J. M., Lomelí-Banda, M. A., & Mungaray-Moctezuma, A. (2020a). An Integrated Urban Flood Vulnerability Index for Sustainable Planning in Arid Zones of Developing Countries. *Water*, 12(2), 608. <https://doi.org/10.3390/w12020608>
- Salazar-Briones, C., Ruiz-Gibert, J. M., Lomelí-Banda, M. A., & Mungaray-Moctezuma, A. (2020b). An Integrated Urban Flood Vulnerability Index for Sustainable Planning in Arid Zones of Developing Countries. *Water*, 12(2), 608. <https://doi.org/10.3390/w12020608>
- Samarasinghe, J. T., Gunathilake, M. B., Makubura, R. K., Arachchi, S. M. A., & Rathnayake, U. (2022). Impact of Climate Change and Variability on Spatiotemporal Variation of Forest Cover; World Heritage Sinharaja Rainforest, Sri Lanka. *Forest and Society*, 6(1). <https://doi.org/10.24259/fs.v6i1.18271>
- Sarmah, T., Das, S., Narendr, A., & Aithal, B. H. (2020). Assessing human vulnerability to urban flood hazard using the analytic hierarchy process and geographic information system. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101659. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101659>
- Scarwell, H.-J. (2014). Géraldine Djament-Tran et Magali Reghezza-Zitt : Résiliences urbaines, les villes face aux catastrophes: 2012, Éditions du manuscrit, 360 pages. *Territoire en mouvement*, 22. <https://doi.org/10.4000/tem.2496>
- Sebastian, A. (2022). Compound flooding. In *Coastal Flood Risk Reduction* (p. 77-88). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00007-X>
- Sebastian, A., Juan, A., & Bedient, P. B. (2022). Urban flood modeling : Perspectives, challenges, and opportunities. In *Coastal Flood Risk Reduction* (p. 47-60). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85251-7.00005-6>
- Serre, D. (2011). *La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation*. Université Paris - Est.
- Serre, D., Barroca, B., & Laganier, R. (Éds.). (2013). *Resilience and urban risk management*. CRC Press.

## *Références bibliographiques*

- Shadmehri Toosi, A., Calbimonte, G. H., Nouri, H., & Alaghmand, S. (2019). River basin-scale flood hazard assessment using a modified multi-criteria decision analysis approach : A case study. *Journal of Hydrology*, 574, 660-671. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.072>
- Shafapour Tehrany, M., Kumar, L., & Shabani, F. (2019). A novel GIS-based ensemble technique for flood susceptibility mapping using evidential belief function and support vector machine : Brisbane, Australia. *PeerJ*, 7, e7653. <https://doi.org/10.7717/peerj.7653>
- Shafizadeh-Moghadam, H., Valavi, R., Shahabi, H., Chapi, K., & Shirzadi, A. (2018). Novel forecasting approaches using combination of machine learning and statistical models for flood susceptibility mapping. *Journal of Environmental Management*, 217, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.089>
- Shahabi, H., Shirzadi, A., Ronoud, S., Asadi, S., Pham, B. T., Mansouripour, F., Geertsema, M., Clague, J. J., & Bui, D. T. (2021). Flash flood susceptibility mapping using a novel deep learning model based on deep belief network, back propagation and genetic algorithm. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101100. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.10.007>
- Shahedi, A., Nazari-Shirkouhi, S., Bozorgi-Amiri, A., Amirkhalili, Y. S., & Shahedi, M. (2023). Application of hybrid ISM-DEMATEL approach for analyzing the barriers of automotive remanufacturing : A real-world case study. *Journal of Remanufacturing*, 13(1), 67-98. <https://doi.org/10.1007/s13243-022-00121-w>
- Sharifi, A. (2019). Resilient urban forms : A macro-scale analysis. *Cities*, 85, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.11.023>
- Silva, M. M., & Costa, J. P. (2018). Urban Floods and Climate Change Adaptation : The Potential of Public Space Design When Accommodating Natural Processes. *Water*, 10(2), 180. <https://doi.org/10.3390/w10020180>
- Singh, H., Nielsen, M., & Greatrex, H. (2023). Causes, impacts, and mitigation strategies of urban pluvial floods in India : A systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 93, 103751. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103751>
- Singh, P., Kikon, N., & Verma, P. (2017). Impact of land use change and urbanization on urban heat island in Lucknow city, Central India. A remote sensing based estimate. *Sustainable Cities and Society*, 32, 100-114. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.018>
- Skakun, S., Kussul, N., Shelestov, A., & Kussul, O. (2014). Flood Hazard and Flood Risk Assessment Using a Time Series of Satellite Images : A Case Study in Namibia. *Risk Analysis*, 34(8), 1521-1537. <https://doi.org/10.1111/risa.12156>

## Références bibliographiques

- Southwick, S. M., Bonanno, G. A., Masten, A. S., Panter-Brick, C., & Yehuda, R. (2014). Resilience definitions, theory, and challenges : Interdisciplinary perspectives. *European Journal of Psychotraumatology*, 5(1), 25338. <https://doi.org/10.3402/ejpt.v5.25338>
- Stefanidis, S., & Stathis, D. (2013). Assessment of flood hazard based on natural and anthropogenic factors using analytic hierarchy process (AHP). *Natural Hazards*, 68(2), 569-585. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0639-5>
- Storm, K. (2019). Introduction to construction statistics using Excel. In *Industrial Process Plant Construction Estimating and Man-Hour Analysis* (p. 1-21). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818648-0.00001-6>
- Sudmeier-Rieux, K., Arce-Mojica, T., Boehmer, H. J., Doswald, N., Emerton, L., Friess, D. A., Galvin, S., Hagenlocher, M., James, H., Laban, P., Lacambra, C., Lange, W., McAdoo, B. G., Moos, C., Mysiak, J., Narvaez, L., Nehren, U., Peduzzi, P., Renaud, F. G., ... Walz, Y. (2021). Scientific evidence for ecosystem-based disaster risk reduction. *Nature Sustainability*, 4(9), 803-810. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00732-4>
- Sun, Q., Fang, J., Dang, X., Xu, K., Fang, Y., Li, X., & Liu, M. (2022). Multi-scenario urban flood risk assessment by integrating future land use change models and hydrodynamic models. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(11), 3815-3829. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-3815-2022>
- Sun, R., Shi, S., Rehemani, Y., & Li, S. (2022). Measurement of urban flood resilience using a quantitative model based on the correlation of vulnerability and resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 82, 103344. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103344>
- Sun, Y., Song, H., Jara, A. J., & Bie, R. (2016). Internet of Things and Big Data Analytics for Smart and Connected Communities. *IEEE Access*, 4, 766-773. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2529723>
- Taylor, F. E., Millington, J. D. A., Jacob, E., Malamud, B. D., & Pelling, M. (2020). Messy maps : Qualitative GIS representations of resilience. *Landscape and Urban Planning*, 198, 103771. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103771>
- Tong, P. (2021). Characteristics, dimensions and methods of current assessment for urban resilience to climate-related disasters : A systematic review of the literature. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 60, 102276. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102276>
- Torfi, F., Farahani, R. Z., & Rezapour, S. (2010). Fuzzy AHP to determine the relative weights of evaluation criteria and Fuzzy TOPSIS to rank the alternatives. *Applied Soft Computing*, 10(2), 520-528. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2009.08.021>

## *Références bibliographiques*

- Toubin, M. (2018). *Améliorer la résilience urbaine par un diagnostic collaboratif, l'exemple des services urbains parisiens face à l'inondation* [Thèse, l'Université Paris Diderot – spécialité « dynamique des milieux et risques »]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00958279v2>
- Toubin, M., Lhomme, S., Diab, Y., Serre, D., & Laganier, R. (2012). La Résilience urbaine : Un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ? *Développement durable et territoires, Vol. 3, n° 1*. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9208>
- Towfiqul Islam, A. R. M., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K. U., Pham, Q. B., Kuriqi, A., & Linh, N. T. T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers, 12*(3), 101075. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.006>
- UNDRO. (1980). *Natural disasters and vulnerability analysis : Report of Expert Group Meeting, 9-12 July 1979*. Library assigned symbol added for ODS loading purpose. UNDRO\_ExpGrp\_1-EN -
- UNISDR. (2015). *Global assessment report on disaster risk reduction 2015*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- UNISDR. (2019). *Global assessment report on disaster risk reduction 2019*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction.
- United States Geological Survey (USGS). (s. d.). <https://www.usgs.gov/>
- Van Coppenolle, R., & Temmerman, S. (2019). A global exploration of tidal wetland creation for nature-based flood risk mitigation in coastal cities. *Estuarine, Coastal and Shelf Science, 226*, 106262. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106262>
- Voiron-Canicio, C. (2005). Pour une approche systémique du développement durable. *Développement durable et territoires, Dossier 4*. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.261>
- Vugrin, E. D., Warren, D. E., Ehlen, M. A., & Camphouse, R. C. (2010). A Framework for Assessing the Resilience of Infrastructure and Economic Systems. In K. Gopalakrishnan & S. Peeta (Éds.), *Sustainable and Resilient Critical Infrastructure Systems* (p. 77-116). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11405-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11405-2_3)
- Walker, B., Holling, C. S., Carpenter, S. R., & Kinzig, A. P. (2004). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems. *Ecology and Society, 9*(2), art5. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>

## Références bibliographiques

- Wamsler, C. (2014). *Cities, Disaster Risk and Adaptation* (0 éd.). Routledge.  
<https://doi.org/10.4324/9780203486771>
- Wang, X., Chen, W., Yin, J., Wang, L., & Guo, H. (2024). Risk assessment of flood disasters in the Poyang lake area. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 100, 104208. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.104208>
- Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Panahi, M., Khosravi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Panahi, S., & Costache, R. (2019a). Flood susceptibility mapping in Dingnan County (China) using adaptive neuro-fuzzy inference system with biogeography based optimization and imperialistic competitive algorithm. *Journal of Environmental Management*, 247, 712-729. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.102>
- Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Panahi, M., Khosravi, K., Shirzadi, A., Shahabi, H., Panahi, S., & Costache, R. (2019b). Flood susceptibility mapping in Dingnan County (China) using adaptive neuro-fuzzy inference system with biogeography based optimization and imperialistic competitive algorithm. *Journal of Environmental Management*, 247, 712-729. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.102>
- Wang, Y., Liu, S., Zhou, Z., & Shi, H. (2023). Threshold Recognition Based on Non-Stationarity of Extreme Rainfall in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin. In T. Miguel Ferreira & H. Shi (Éds.), *Flood Risk in a Climate Change Context—Exploring Current and Emerging Drivers*. IntechOpen.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.109866>
- Wang, Y., Shen, J., Xiang, W., & Wang, J.-Q. (2018). Identifying characteristics of resilient urban communities through a case study method. *Journal of Urban Management*, 7(3), 141-151. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2018.11.004>
- Wang, Y. (Victor), & Sebastian, A. (2021). Community flood vulnerability and risk assessment : An empirical predictive modeling approach. *Journal of Flood Risk Management*, 14(3), e12739. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12739>
- Wang, Y., Ye, A., Peng, D., Miao, C., Di, Z., & Gong, W. (2022). Spatiotemporal variations in water conservation function of the Tibetan Plateau under climate change based on InVEST model. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41, 101064.  
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101064>
- Wang, Y., Zhang, C., Chen, A. S., Wang, G., & Fu, G. (2023). Exploring the relationship between urban flood risk and resilience at a high-resolution grid cell scale. *Science of The Total Environment*, 893, 164852. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164852>
- Ward, P. J., Jongman, B., Weiland, F. S., Bouwman, A., Van Beek, R., Bierkens, M. F. P., Ligtoet, W., & Winsemius, H. C. (2013). Assessing flood risk at the global scale : Model setup, results, and sensitivity. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044019.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044019>

## Références bibliographiques

- Wardekker, A., Wilk, B., Brown, V., Uittenbroek, C., Mees, H., Driessen, P., Wassen, M., Molenaar, A., Walda, J., & Runhaar, H. (2020). A diagnostic tool for supporting policymaking on urban resilience. *Cities, 101*, 102691. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102691>
- Wilson, J. P., & Gallant, J. (2000). *C. Attributs topographiques primaires. Dans Analyse de terrain : Principes et applications* (John Wiley&Sons : Hoboken, NJ, États).
- World Economic Forum. (2017). *Annual Report 2017-2018*. World Economic Forum.
- world geologic maps usgs. (s. d.). <https://www.usgs.gov/media/images/world-geologic-maps>
- World Health Organization. (2017). *World health statistics 2017 : Monitoring health for the SDGs, sustainable development goals*.
- Wu, D., Zheng, L., Wang, Y., Gong, J., Li, J., & Chen, Q. (2023). Urban expansion patterns and their driving forces analysis : A comparison between Chengdu-Chongqing and Middle Reaches of Yangtze River urban agglomerations. *Environmental Monitoring and Assessment, 195*(9), 1121. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11720-w>
- Wu, W., Jamali, B., Zhang, K., Marshall, L., & Deletic, A. (2023). Water Sensitive Urban Design (WSUD) Spatial Prioritisation through Global Sensitivity Analysis for Effective Urban Pluvial Flood Mitigation. *Water Research, 235*, 119888. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119888>
- Xing, M., Luo, X., Zan, Y., Yang, L., Jin, H., & Luo, J. (2023). Identification of factors affecting hoisting quality of large offshore structures and analysis of their coupling relationship based on grey-DEMATEL-ISM-MICMAC. *Ocean Engineering, 280*, 114805. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114805>
- Ye, C., Xu, Z., Lei, X., Liao, W., Ding, X., & Liang, Y. (2022). Assessment of urban flood risk based on data-driven models : A case study in Fuzhou City, China. *International Journal of Disaster Risk Reduction, 82*, 103318. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103318>
- Youssef, A. M., Sefry, S. A., Pradhan, B., & Alfadail, E. A. (2016). Analysis on causes of flash flood in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) of 2009 and 2011 using multi-sensor remote sensing data and GIS. *Geomatics, Natural Hazards and Risk, 7*(3), 1018-1042. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1012750>
- Yousuf, A., & Romshoo, S. A. (2022). Impact of Land System Changes and Extreme Precipitation on Peak Flood Discharge and Sediment Yield in the Upper Jhelum Basin, Kashmir Himalaya. *Sustainability, 14*(20), 13602. <https://doi.org/10.3390/su142013602>

## *Références bibliographiques*

- Yu, J., Zou, L., Xia, J., Chen, X., Wang, F., & Zuo, L. (2023). A multi-dimensional framework for improving flood risk assessment : Application in the Han River Basin, China. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *47*, 101434. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101434>
- Zevenbergen, C., Cashman, A., Evelpidou, N., Pasche, E., Garvin, S., & Ashley, R. (2010). *Urban Flood Management* (0 éd.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781439894330>
- Zhang, D., Shi, X., Xu, H., Jing, Q., Pan, X., Liu, T., Wang, H., & Hou, H. (2020). A GIS-based spatial multi-index model for flood risk assessment in the Yangtze River Basin, China. *Environmental Impact Assessment Review*, *83*, 106397. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106397>
- Zhang, J., He, P., Xiao, J., & Xu, F. (2018). Risk assessment model of expansive soil slope stability based on Fuzzy-AHP method and its engineering application. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, *9*(1), 389-402. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1445664>
- Zheng, Q. (2023). Method for a new risk assessment of urban inundation : G-DEMATEL–AHP. *MethodsX*, *10*, 101997. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.101997>
- Zheng, Q., Shen, S.-L., Zhou, A., & Lyu, H.-M. (2022). Inundation risk assessment based on G-DEMATEL-AHP and its application to Zhengzhou flooding disaster. *Sustainable Cities and Society*, *86*, 104138. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104138>
- Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. (2012). Examining the effects of green supply chain management practices and their mediations on performance improvements. *International Journal of Production Research*, *50*(5), 1377-1394. <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.571937>
- Zhu, S., Li, D., Feng, H., & Zhang, N. (2023). The influencing factors and mechanisms for urban flood resilience in China : From the perspective of social-economic-natural complex ecosystem. *Ecological Indicators*, *147*, 109959. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109959>
- Zischg, A. P., Hofer, P., Mosimann, M., Röthlisberger, V., Ramirez, J. A., Keiler, M., & Weingartner, R. (2018). Flood risk (d)evolution : Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Science of The Total Environment*, *639*, 195-207. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.056>

## Références bibliographiques

### Crédits Photographiques

Md RIHANI. (2023). *COURS: NOTION DE RISQUES. L6 GEOLOGIE APPLIQUEE*.

Pigeon, P. (2012). Apports de la résilience à la géographie des risques : L'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France). *Vertigo*, Volume 12 Numéro 1.  
<https://doi.org/10.4000/vertigo.12031>

CAPRE 06. (2022). *Risques majeurs Risques naturels, technologiques, miniers et nucléaire majeurs (RNTMN)*. <https://capre06.e-monsite.com/pages/capre06/>

Hussain, M., Tayyab, M., Zhang, J., Shah, A. A., Ullah, K., Mehmood, U., & Al-Shaibah, B. (2021). GIS-Based Multi-Criteria Approach for Flood Vulnerability Assessment and Mapping in District Shangla : Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Sustainability*, 13(6), 3126. <https://doi.org/10.3390/su13063126>

IPCC AR5. (2022). *The Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.ipcc.ch/>

Da Silva, L. B. L., Alencar, M. H., & De Almeida, A. T. (2020a). Multidimensional flood risk management under climate changes : Bibliometric analysis, trends and strategic guidelines for decision-making in urban dynamics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101865. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101865>

Froment, R., & Below, R. (2020). *CRED Crunch 58—Disaster Year in Review 2019*.  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31624.24329>

Abdrabo, K. I., Kantosh, S. A., Saber, M., Sumi, T., Elleithy, D., Habiba, O. M., & Alboshy, B. (2022). The Role of Urban Planning and Landscape Tools Concerning Flash Flood Risk Reduction Within Arid and Semiarid Regions. In T. Sumi, S. A. Kantoush, & M. Saber (Éds.), *Wadi Flash Floods* (p. 283-316). Springer Singapore.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4_11)

Heinzlef, C. (2020). *Modélisation d'indicateurs de résilience urbaine face au risque d'inondation : Coconstruction d'un système spatial à la décision pour contribuer à l'opérationnalisation du concept de résilience*. [Etudes de l'environnement. Université d'Avignon; Université de Mons, 2019]. <https://theses.hal.science/tel-02893161>

Heinzlef, C. (2019). *Recettes de résilience urbaine : Faire face aux inondations*. Éditions Universitaires d'Avignon. <https://doi.org/10.4000/books.eua.6762>

Rubel, F., & Kotteck, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorologische Zeitschrift*, 19(2), 135-141. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2010/0430>

Rezaei, A. R., Ismail, Z. B., Niksokhan, M. H., Ramli, A. H., Sidek, L. M., & Dayarian, M. A. (2019). Investigating the effective factors influencing surface runoff generation in

## Références bibliographiques

- urban catchments – A review. *DESALINATION AND WATER TREATMENT*, 164, 276-292. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24359>
- Hervé, A., Emmanuel Berthier, Fabrice Rodriguez, Véronique Ruban, & Cathy Wery. (2018). Chapitre 5. Impact de l'urbanisation sur l'hydrologie urbaine et la gestion des eaux pluviales. In *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*. <https://hal.science/hal-01930668>
- Salomon, J.-N. (2002). L'inondation dans la basse vallée de la Garonne et l'estuaire de la Gironde lors de la « tempête du siècle » (27-28 décembre 1999) / Flooding in the Garonne valley and the Gironde estuary caused by the « storm of the century » (27-28 December 1999). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.
- Leulmi, L., Lazri, Y., Abdelkebir, B., & Bensehla, S. (2023). Assessment of the effect of land use and land cover (LULC) change on depth runoff: Case study of Skikda floods event. *Glasnik Srpskog Geografskog Drustva*, 103(2), 145-160. <https://doi.org/10.2298/GSGD2302145L>
- Serge Lhomme, Damien Serre, Youssef Diab, & Richard Laganier. (2010). Les réseaux techniques face aux inondations, ou comment définir des indicateurs de performance de ces réseaux pour évaluer la résilience urbaine (Urban networks and floods : How to define performance indicators to evaluate urban resiliency). *Les grandes métropoles au risque de l'eau, mise en risque et résilience spatiale au Nord et au Sud*.
- Kapucu, N., Ge, Y. 'Gurt', Martín, Y., & Williamson, Z. (2021). Urban resilience for building a sustainable and safe environment. *Urban Governance*, 1(1), 10-16. <https://doi.org/10.1016/j.ugj.2021.09.001>
- Damien, S. (2013). *La ville résiliente aux inondations Méthodes et outils d'évaluation* [MEMOIRE présenté En vue de l'obtention de L'Habilitation à Diriger des Recherches]. Université Paris - Est.
- Wang, L., Cui, S., Li, Y., Huang, H., Manandhar, B., Nitivattananon, V., Fang, X., & Huang, W. (2022). A review of the flood management : From flood control to flood resilience. *Heliyon*, 8(11), e11763. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11763>
- Kipkirui, E., & Kageche, K. D. (2020). Developing Towards flood Resilient Cities; Opportunities for Sponge Infrastructure. *International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP)*, 10(2), p9888. <https://doi.org/10.29322/IJSRP.10.02.2020.p9888>
- He, R., Tiong, R. L. K., Yuan, Y., & Zhang, L. (2024). Enhancing resilience of urban underground space under floods : Current status and future directions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 147, 105674. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105674>

## Références bibliographiques

- Annabelle Jaeger. (2018). « LA NATURE EN VILLE »/"NATURE IN TOWN", THE OUTCOME OF OUR TECHNICAL MEETING.
- Luna Mansour. (2019). *IUWM Integrated Urban Water Management*. Sustainable Water Management Techniques Summer.
- Andjelkovic, I. (2001). *GUIDELINES ON NON-STRUCTURAL MEASURES IN URBAN FLOOD MANAGEMENT*. INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME.
- Hager, J., Hu, G., Hewage, K., & Sadiq, R. (2019). Performance of low-impact development best management practices : A critical review. *Environmental Reviews*, 27(1), 17-42. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0048>
- Hoban, A. (2019). Water Sensitive Urban Design Approaches and Their Description. In *Approaches to Water Sensitive Urban Design* (p. 25-47). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812843-5.00002-2>
- Mabrouk, M., Han, H., Fan, C., Abdrabo, K. I., Shen, G., Saber, M., Kantoush, S. A., & Sumi, T. (2023). Assessing the effectiveness of nature-based solutions-strengthened urban planning mechanisms in forming flood-resilient cities. *Journal of Environmental Management*, 344, 118260. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118260>
- Thakkar, J. J. (2021a). Introduction. In J. J. Thakkar, *Multi-Criteria Decision Making* (Vol. 336, p. 1-25). Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8_1)
- Thakkar, J. J. (2021b). *Multi-Criteria Decision Making* (Vol. 336). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-4745-8>
- Si, S.-L., You, X.-Y., Liu, H.-C., & Zhang, P. (2018a). DEMATEL Technique: A Systematic Review of the State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-33. <https://doi.org/10.1155/2018/3696457>

## Crédits Webographies

- CRED CRUNCH (2024). Bulletin d'information CRED Crunch, numéro 74 (avril 2024) Bilan de l'année 2023. <https://reliefweb.int/report/world/cred-crunch-newsletter-issue-no-74-april-2024-disaster-year-review-2023>
- CRED Crunch (Bulletin d'information) (emdat.be) depuis 1988. <https://www.emdat.be/categories/newsletter/>
- EM-DAT (2023) : base de données internationale sur les catastrophes (europa.eu). <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/metadata/portals/em-dat-the-international-disaster-database-year-of-launch>
- Le centre de l'information sur l'eau : <https://www.cieau.com>

## ***Références bibliographiques***

L'ONU | Nations Unie (2018) : La majorité des villes du monde fortement exposées aux catastrophes naturelles. <https://www.un.org/fr/desa/world-cities-day-2018>.

# *Annexes*

## Annexes

### ANNEXE 01

#### Questionnaire DEMATEL

Nom de l'étude : **Enquête auprès les acteurs locaux du risque inondation sur la ville de Skikda.**

Date de l'enquête : .....

Nom de la Commune : Skikda.

**Objectif :** La présente étude a été réalisé auprès les fonctionnaires de l'administration locale, vise à établir une cartographie des aléas des inondations à Skikda et de mesurer l'état actuel du niveau de sensibilisation du ce risque.

#### ▪ Description de la zone d'étude

Cette étude a été utilisé Skikda comme étude de cas exploratoire (Figure 1). Une commune littorale est située au nord de la wilaya de Skikda ( $36^{\circ} 52' 00''$  Nord et  $6^{\circ} 54' 00''$  Est). Le climat de la zone d'étude est généralement de type méditerranéen, pluvieux et humide, La topographie de Skikda est complexe, constituée une pente douce se localise principalement dans la partie centrale de la ville, entourée par des terres relativement les hautes montagnes avec une altitude d'environ 350 m. Deux cours d'eau permanent (Saf-saf à l'est et Zramena à l'ouest) traversent le milieu urbain formant une plaine inondable.

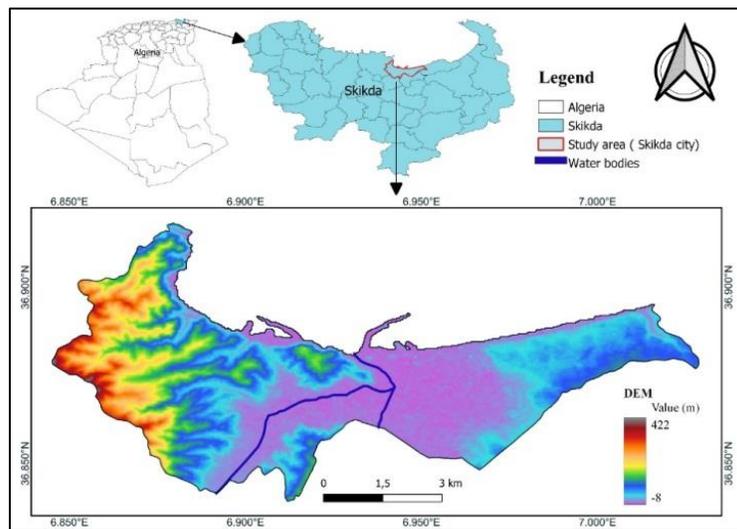


Figure annexe 1-1 : Carte de localisation de la zone d'étude (la ville de Skikda, nord-est de l'Algérie) (auteur, 2023).

## Annexes

La ville de Skikda avait été touchée des inondations majeures entre 1957 et 2019 ; ils ont affecté gravement la vie, les biens et les conditions socio-économiques ; par exemple : pertes humaines et économiques, destruction de bâtiments et d'infrastructures, inondation de la zone industrielle pétrochimique, isolement de Skikda pendant les jours du risque..... Etc. (Figure 2).

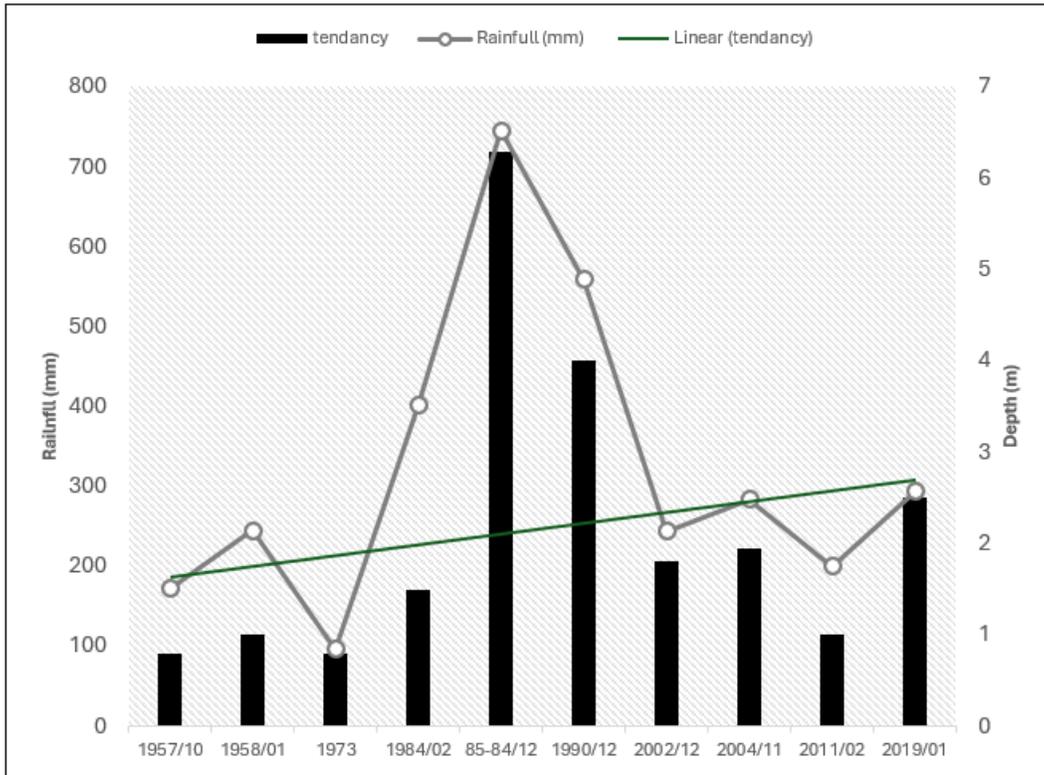


Figure annexe 1-2 : Évolution des précipitations annuelles à Skikda correspondante de la profondeur annuelle de 1957 à 2019, ANRH- Skikda (auteur, 2023).

**ENQUÊTEUR1** (acteur peut trouver un intérêt dans la démarche)

**Domaine de recherche/profession :** .....

**Division :** .....

**Expérience professionnelle (année) :** .....

...





## *Annexes*

### *ANNEXE 02*

#### **Fonction AHP. MATLEB.2022a**

```
1  function [priority_vector, CR] = ahp(pairwise_matrix)
2      % AHP - Analytic Hierarchy Process
3      % Input:
4      %   pairwise_matrix - nxn matrix of pairwise
5  comparisons
6      % Output:
7      %   priority_vector - vector of criteria weights
8      %   CR - consistency ratio
9
10     % Number of criteria
11     n = size(pairwise_matrix, 1);
12
13     % Calculate the sum of each column
14     col_sum = sum(pairwise_matrix);
15
16     % Normalize the pairwise comparison matrix
17     A_normalized = pairwise_matrix ./ col_sum;
18
19     % Calculate the priority vector (weights)
20     priority_vector = mean(A_normalized, 2);
21
22     % Calculate the consistency vector
23     consistency_vector = (pairwise_matrix * priority_vector)
24     ./ priority_vector;
25
26     % Calculate the consistency index (CI)
27     lambda_max = mean(consistency_vector);
28     CI = (lambda_max - n) / (n - 1);
29
30     % Random Consistency Index (RI) values for matrices of
31 order 1 to 10
32     RI = [0 0 0.52 0.89 1.12 1.26 1.36 1.41 1.46 1.49];
33
34     % Calculate the consistency ratio (CR)
35     CR = CI / RI(n);
36
37     % Display results
38     disp('Pairwise Comparison Matrix (A):');
39     disp(pairwise_matrix);
```

## *Annexes*

```
40
41     disp('Normalized Pairwise Comparison Matrix
42 (A_normalized):');
43     disp(A_normalized);
44
45     disp('Priority Vector (Weights):');
46     disp(priority_vector);
47
48     disp('Consistency Vector:');
49     disp(consistency_vector);
50
51     disp('Lambda max:');
52     disp(lambda_max);
53
54     disp('Consistency Index (CI):');
55     disp(CI);
56
57     disp('Consistency Ratio (CR):');
58     disp(CR);
59
60     % Check if the consistency ratio is acceptable (CR <
61 0.1)
62     if CR < 0.1
63         disp('The pairwise comparison matrix is
64 consistent.');
```

```
65     else
66         disp('The pairwise comparison matrix is not
67 consistent. Consider revising the judgments.');
```

```
68     end
69 end
70 end
```

*Annexes*

**ANNEXE 03**

***Le calcul des indépendances des facteurs d'influence d'après la méthode DEMATEL et la théorie grise***

No. Expert	Research area/ Occupation	Work experience (year)	Division	Index layer			Factor layer: T <sub>i</sub>						Factor layer: A <sub>j</sub>						Factor layer: I <sub>k</sub>					
				topography natural	Activity Anthropiq	Infrastructure (I <sub>i</sub> )	Elevation (T <sub>1</sub> )	Slope (T <sub>2</sub> )	Aspect (T <sub>3</sub> )	Flow directions	curvature (T <sub>5</sub> )	Flow accumulati	Land use type (A <sub>1</sub> )	NDBI(A <sub>2</sub> )	NDVI(A <sub>3</sub> )	Precipitation (A <sub>4</sub> )	LST (A <sub>5</sub> )	Population (A <sub>6</sub> )	Lithology (I <sub>1</sub> )	Distance river (I <sub>2</sub> )	Distance road (I <sub>3</sub> )	Sewage network (I <sub>4</sub> )	TWI (I <sub>5</sub> )	SPI (I <sub>6</sub> )
1	Hydrogeology engineer	10	Hydraulics	4	6	8	4	8	2	5	3	6	7	8	5	9	4	6	9	8	5	6	4	7
2	Biology and environment engineer	12	Biodiversity / environment	2	9	7	7	3	6	9	2	8	5	8	3	7	2	9	9	8	5	9	2	7
3	Architect	14	Urban planning/ DUCH	7	4	9	7	6	4	3	5	8	4	5	7	6	2	3	3	6	2	9	1	7
4	Water resources engineer	14	Sanitation/ DRE	6	5	8	6	7	1	8	2	9	6	8	3	9	1	5	7	6	2	9	1	8
5	Hydraulics engineer	12	Sanitation/ DRE	6	9	5	2	7	3	8	4	9	2	3	4	9	5	8	6	8	7	9	2	5

## Annexes

6	Head of cartography and special risks office	33	Civil protection	5	6	9	6	3	5	7	4	9	5	4	6	9	8	7	3	6	7	8	5	9
7	Head of safety equipment office for protection	15	Civil protection	5	7	9	7	8	6	5	4	9	8	7	3	9	6	5	5	8	4	9	7	6
8	<del>Geotechnical engineer</del>	13	Urban planning/ DUCH	7	6	8	7	5	3	4	2	6	4	5	7	8	6	9	6	8	9	4	7	5
9	<del>Household water engineer</del>	22	Hydraulics / DRE	9	7	8	8	9	5	6	3	7	9	6	7	8	2	5	8	5	2	9	1	3
10	<del>Urban hydraulics engineer</del>	13	Sanitation/ DRE	5	7	4	7	5	4	6	3	8	3	2	4	9	6	8	8	6	7	9	1	5
11	<del>Biotechnology engineer</del>	25	Biodiversity / environment	7	8	9	9	7	8	6	4	5	4	9	6	5	7	8	5	6	7	8	9	4
12	<del>Hydrogeology engineer</del>	4	Technical service / APC	5	7	6	7	6	3	9	5	8	6	3	7	8	4	9	8	7	3	4	2	9
13	<del>Civil engineer</del>	9	Technical service / APC	5	7	9	8	7	4	6	5	9	7	9	8	6	3	5	6	7	9	4	5	8
14	<del>Planning engineer</del>	35	Technical service / APC	5	3	4	4	3	2	7	6	5	6	4	7	8	2	9	8	7	5	2	1	4

## Annexes

15	<del>Geography engineer</del>	9	<del>Hydraulics</del>	9	6	7	6	9	5	7	4	8	7	6	5	9	4	8	7	8	6	9	4	5
16	<del>Researcher</del>	5	<del>Architecture</del>	7	5	8	7	4	1	2	5	8	9	4	6	8	1	7	8	9	5	7	1	3
17	<del>Researcher</del>	15	<del>Urban planning</del>	9	7	8	7	8	2	4	1	6	8	4	2	9	1	7	8	3	2	7	5	9
18	<del>Researcher</del>	10	<del>Hydrogeology</del>	6	8	5	7	5	8	1	3	4	3	8	6	7	1	9	7	5	4	9	8	6
19	<del>Researcher</del>	25	<del>Environment</del>	9	4	8	7	4	5	2	1	9	8	7	6	5	2	9	8	9	3	7	4	6
20	<del>Researcher</del>	7	<del>Urban hydraulics</del>	6	9	8	8	7	4	6	3	9	9	6	5	8	2	7	7	9	1	8	2	6
<b>Totale</b>				124	130	147	131	121	81	111	69	150	120	116	107	156	69	143	136	139	95	146	72	122

















## Annexes

0,229	0,235	0,345	0,280	0,252	0,218	1,558		
0,306	0,325	0,549	0,399	0,599	0,198	2,376		
AHP						OU TPU T	%	
1,000	1,047	1,184	1,111	1,274	0,836	1,075	0,176	6,109
0,955	1,000	1,131	1,062	1,217	0,798	1,027	0,168	6,109
0,845	0,884	1,000	0,930	1,070	0,706	0,908	0,149	6,109
0,900	0,942	1,065	1,000	1,146	0,752	0,968	0,158	6,109
0,785	0,822	0,929	0,872	1,000	0,656	0,844	0,138	6,109
1,197	1,253	1,416	1,330	1,525	1,000	1,287	0,211	6,109

## Annexes

### Activité anthropique

N. E	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>	A <sub>5</sub>	A <sub>6</sub>	θ <sub>k</sub>	Σ <sub>k=1</sub> <sup>6</sup> θ <sub>k</sub>
1	7	8	5	9	4	6	1,00	0,00
								0,87
2	5	8	3	7	2	9	1,00	1,40
								1,66
3	4	5	7	6	2	3	0,77	0,57
								1
4	6	8	3	9	1	5	1,00	2,00
								0
5	2	3	4	9	5	8	1,00	0,50
								0
6	5	4	6	9	8	7	1,00	0,83
								3
7	8	7	3	9	6	5	1,00	2,66
								7
8	4	5	7	8	6	9	1,00	0,57
								1
9	9	6	7	8	2	5	1,00	1,28
								6
10	3	2	4	9	6	8	1,00	0,75
								0
11	4	9	6	5	7	8	1,00	0,66
								7
12	6	3	7	8	4	9	1,00	0,85
								7
13	7	9	8	6	3	5	1,00	0,87
								5



















# Annexes

## Indices d'influence (TAI)

No. expert	topograph r (Ti)	activity Anthropique (Ai)	Infrastruct ure (Ii)	$X_{ik} \cdot X_{jk}$							$\theta_k$	$C_k \cdot X_{ijk} \cdot B_{ij}$																											
				0	0,667	0,500	1,500	0	0,750	2,000		1,333	0	0,889	0	0,593	0,444	1,333	0	0,667	1,778	1,185	0																
1	4	6	8	0	0,667	0,500	1,500	0	0,750	2,000	1,333	0	0,889	0	0,593	0,444	1,333	0	0,667	1,778	1,185	0																	
2	2	9	7	0	0,222	0,286	4,500	0	1,286	3,500	0,778	0	1,000	0	0,222	0,286	4,500	0	1,286	3,500	0,778	0																	
3	7	4	9	0	1,750	0,778	0,571	0	0,444	1,286	2,250	0	1,000	0	1,750	0,778	0,571	0	0,444	1,286	2,250	0																	
4	6	5	8	0	1,200	0,750	0,833	0	0,625	1,333	1,600	0	0,889	0	1,067	0,667	0,741	0	0,556	1,185	1,422	0																	
5	6	9	5	0	0,667	1,200	1,500	0	1,800	0,833	0,556	0	1,000	0	0,667	1,200	1,500	0	1,800	0,833	0,556	0																	
6	5	6	9	0	0,833	0,556	1,200	0	0,667	1,800	1,500	0	1,000	0	0,833	0,556	1,200	0	0,667	1,800	1,500	0																	
7	5	7	9	0	0,714	0,556	1,400	0	0,778	1,800	1,286	0	1,000	0	0,714	0,556	1,400	0	0,778	1,800	1,286	0																	
8	7	6	8	0	1,167	0,875	0,857	0	0,750	1,143	1,333	0	0,889	0	1,037	0,778	0,762	0	0,667	1,016	1,185	0																	
9	9	7	8	0	1,286	1,125	0,778	0	0,875	0,889	1,143	0	1,000	0	1,286	1,125	0,778	0	0,875	0,889	1,143	0																	
10	5	7	4	0	0,714	1,250	1,400	0	1,750	0,800	0,571	0	0,778	0	0,556	0,372	1,089	0	1,361	0,622	0,444	0																	
11	7	8	9	0	0,875	0,778	1,143	0	0,889	1,286	1,125	0	1,000	0	0,875	0,778	1,143	0	0,889	1,286	1,125	0																	
12	5	7	6	0	0,714	0,833	1,400	0	1,167	1,200	0,857	0	0,778	0	0,556	0,648	1,089	0	0,307	0,333	0,667	0																	
13	5	7	9	0	0,714	0,556	1,400	0	0,778	1,800	1,286	0	1,000	0	0,714	0,556	1,400	0	0,778	1,800	1,286	0																	
14	5	3	4	0	1,667	1,250	0,600	0	0,750	0,800	1,333	0	0,556	0	0,326	0,634	0,333	0	0,417	0,444	0,741	0																	
15	9	6	7	0	1,500	1,286	0,667	0	0,857	0,778	1,167	0	1,000	0	1,500	1,286	0,667	0	0,857	0,778	1,167	0																	
16	7	5	8	0	1,400	0,875	0,714	0	0,625	1,143	1,600	0	0,889	0	1,244	0,778	0,635	0	0,556	1,016	1,422	0																	
17	9	7	8	0	1,286	1,125	0,778	0	0,875	0,889	1,143	0	1,000	0	1,286	1,125	0,778	0	0,875	0,889	1,143	0																	
18	6	8	5	0	0,750	1,200	1,333	0	1,600	0,833	0,625	0	0,889	0	0,667	1,067	1,185	0	1,422	0,741	0,556	0																	
19	9	4	8	0	2,250	1,125	0,444	0	0,500	0,889	2,000	0	1,000	0	2,250	1,125	0,444	0	0,500	0,889	2,000	0																	
20	6	9	8	0	0,667	0,750	1,500	0	1,125	1,333	0,889	0	1,000	0	0,667	0,750	1,500	0	1,125	1,333	0,889	0																	
													<b>Max(x<sub>ijk</sub>): 4,50</b>																										
Linguistic phrase	Grey interval number					No. expert	$C_k$							$C_k^{max}$																									
	0	0,25	0,5	0,75	1		0	0,132	0,099	0,296	0	0,148	0,395	0,263	0	0	0,25	0,25	0,5	0	0,25	0,5	0,5	0	0	0	0	0,25	0	0	0,25	0,25	0						
Without impact	0				0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,049	0,063	1,000	0	0,286	0,778	0,773	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0					
Low impact	0				0	0	0	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0,237	0,148	0,165	0	0,123	0,263	0,316	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0			
Medium low impact	0,25				0,25	0,25	0,25	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0,148	0,267	0,333	0	0,400	0,185	0,123	0	0	0	0	0	0,25	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0			
Medium high impact	0,5				0,5	0,5	0,5	0,75	0	0	0	0	0	0	0	0,185	0,123	0,267	0	0,148	0,400	0,333	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0			
High impact	0,75				0,75	0,75	0,75	1	0	0	0	0	0	0	0	0,159	0,123	0,311	0	0,173	0,400	0,286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0			
Very high impact	1				1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0,230	0,173	0,169	0	0,148	0,226	0,263	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0		
									0	0	0	0	0	0	0	0,286	0,250	0,173	0	0,194	0,198	0,254	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0		
									0	0	0	0	0	0	0	0,123	0,216	0,242	0	0,302	0,138	0,099	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0	
									0	0	0	0	0	0	0	0,194	0,173	0,254	0	0,198	0,286	0,250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0	
									0	0	0	0	0	0	0	0,123	0,144	0,242	0	0,202	0,207	0,148	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,159	0,123	0,311	0	0,173	0,400	0,286	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,206	0,154	0,074	0	0,093	0,099	0,165	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,333	0,286	0,148	0	0,190	0,173	0,259	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,277	0,173	0,141	0	0,123	0,226	0,316	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,286	0,250	0,173	0	0,194	0,198	0,254	0	0	0	0	0,25	0,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,148	0,237	0,263	0	0,316	0,165	0,123	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0	
									0	0	0	0	0	0	0	0,500	0,250	0,099	0	0,111	0,198	0,444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0
									0	0	0	0	0	0	0	0,148	0,167	0,333	0	0,250	0,296	0,198	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	0,25	0

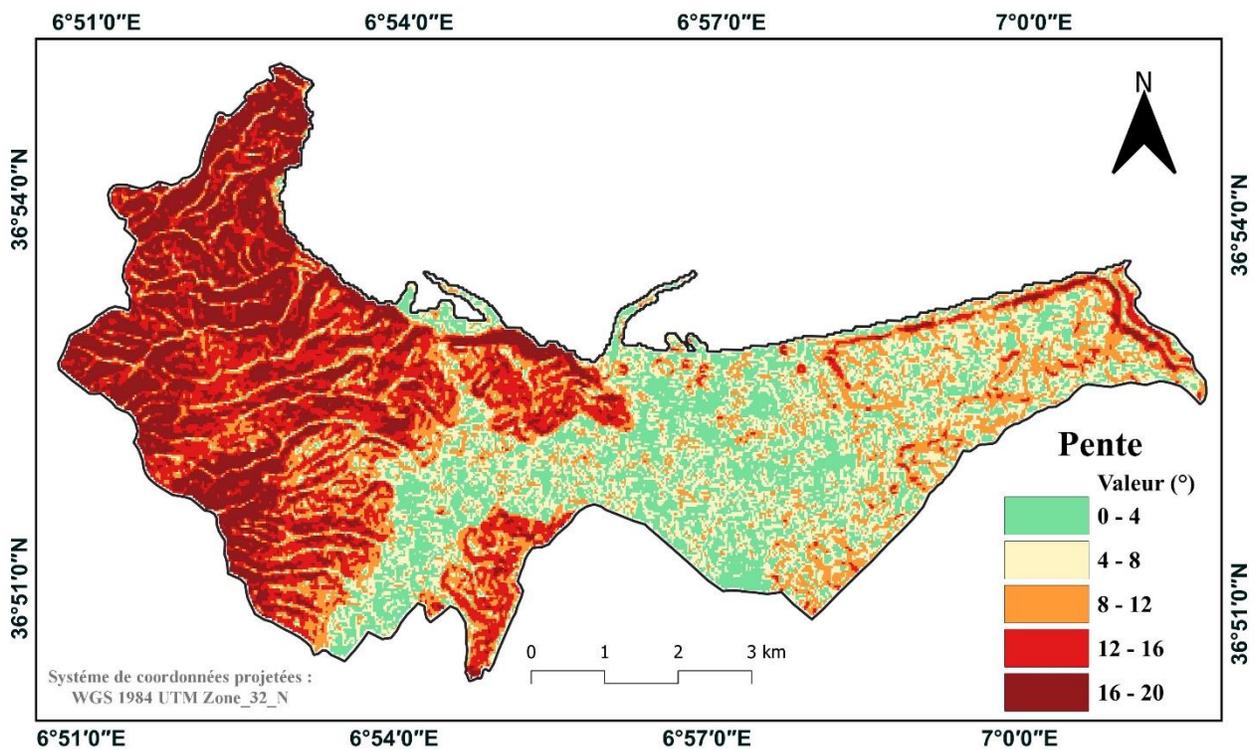
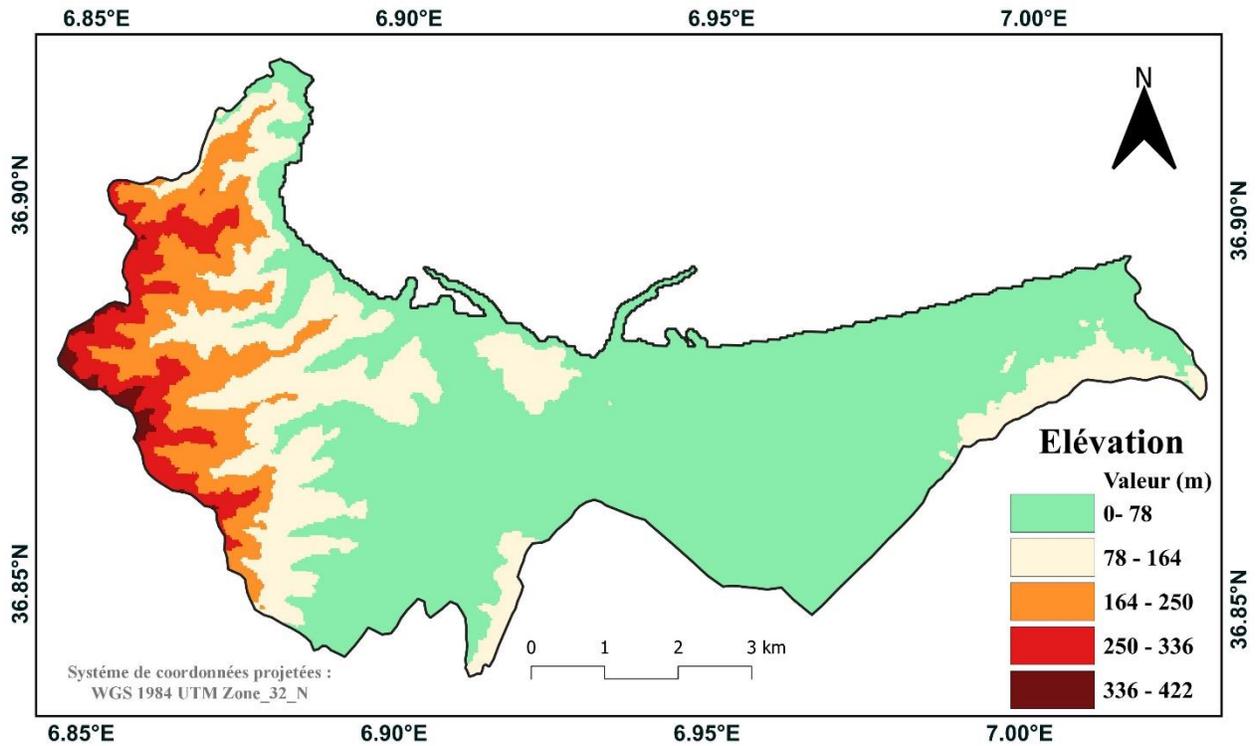
## Annexes

$N^{up}$								$N^{down}$			
0,000	0,338	0,313	0,338					0,000	0,088	0,063	
0,352	0,000	0,300	0,352					0,150	0,000	0,063	
0,330	0,425	0,000	0,425					0,318	0,159	0,000	
$S_{ij}$											
0,000	0,214	0,150	0,364								
0,282	0,000	0,141	0,423								
0,329	0,237	0,000	0,787								
0,611	0,451	0,291	0,787								
$S_{nor}$											
0,000	0,506	0,355									
0,666	0,000	0,334									
0,777	0,560	0,000									
$E$											
1,000	0,000	0,000									
0,000	1,000	0,000									
0,000	0,000	1,000									
$E-S_{nor}$											
1,000	-0,506	-0,355									
-0,666	1,000	-0,334									
-0,777	-0,560	1,000									
$(E-S_{nor})^{-1}$											
1,508	0,763	-12,851	-12,851	-11,132	-8,2761						
1,005	1,508	-12,851	-14,627								
-12,851	-12,851	-12,851	-12,851								
$S_{nor}(E-S_{nor})^{-1}$				$D_i$							
0,508	0,763		1,271								
1,005	0,508		1,514								
		0,508	0,508								
$AHP$				<b>OUTPUT</b>		$w_i$	$w_i'$				
1,000	0,923	0,787		0,903	0,298						
1,083	1,000	0,852		0,978	0,323						
1,270	1,173	1,000		1,148	0,379						
				3,029	1,000						

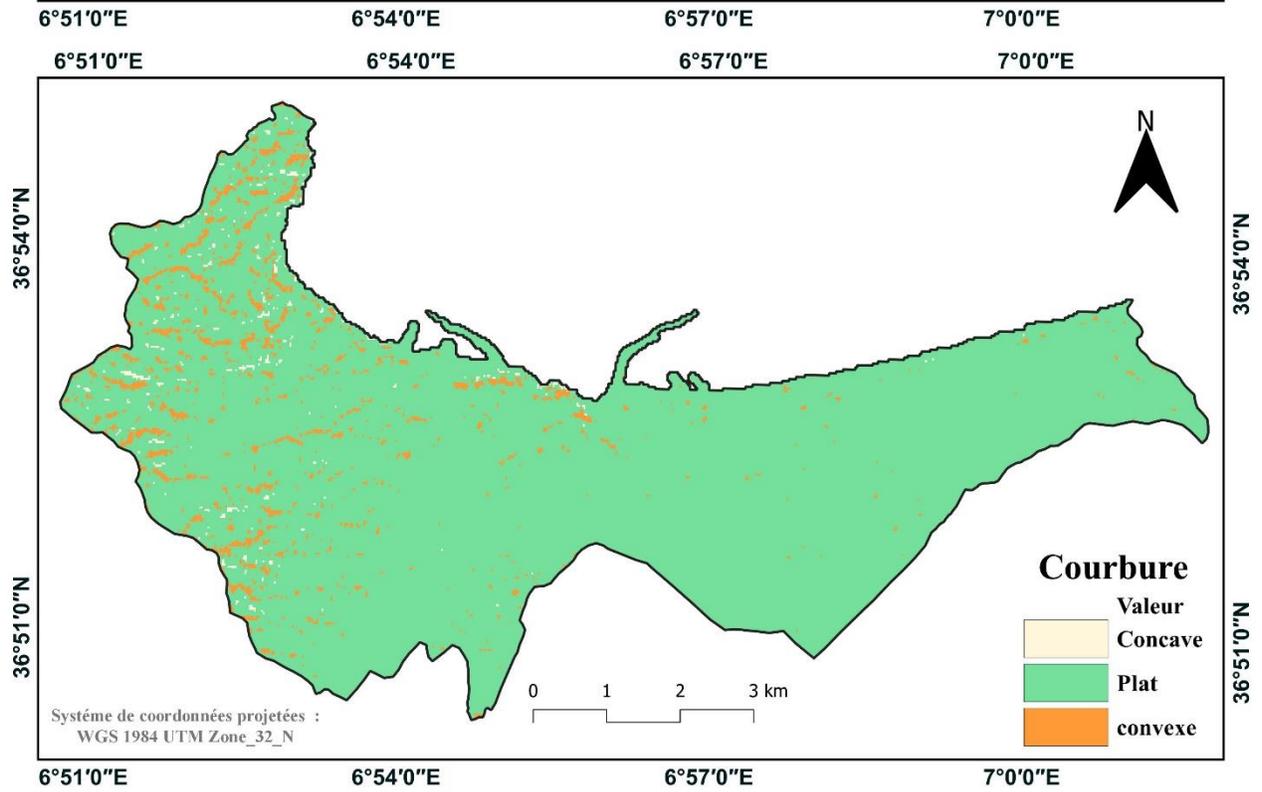
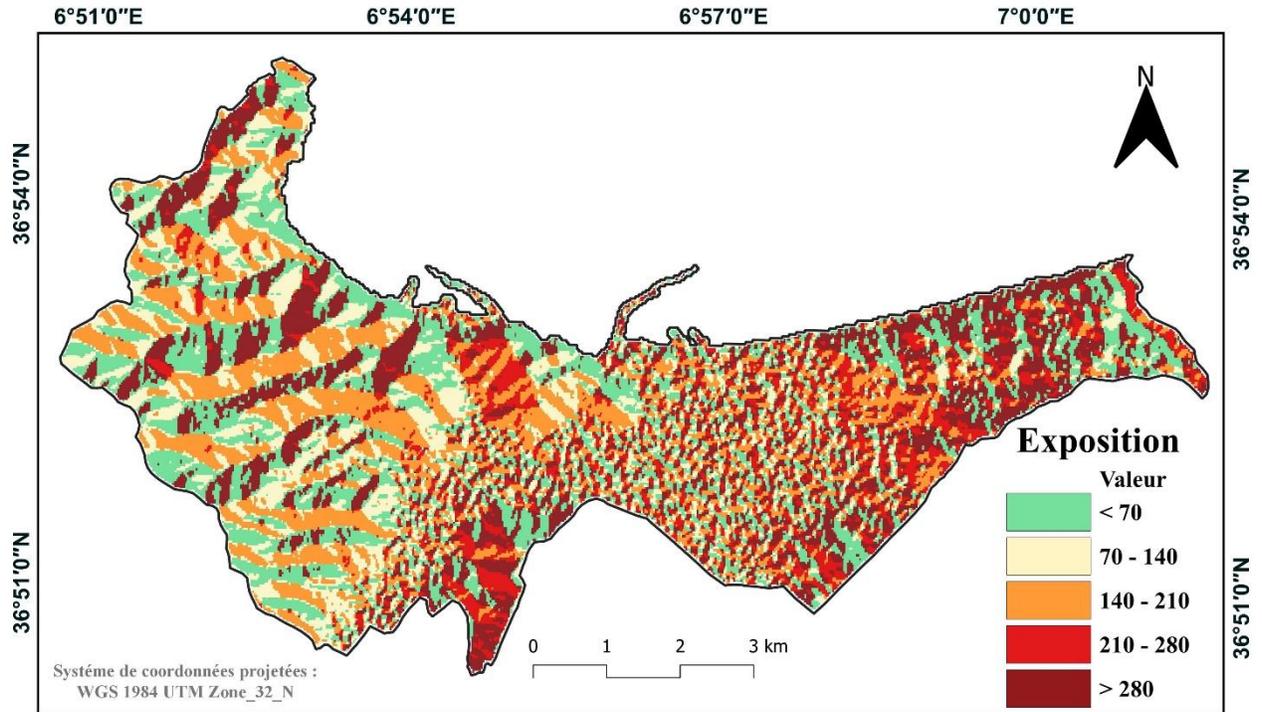
*Annexes*

**ANNEXE 04**

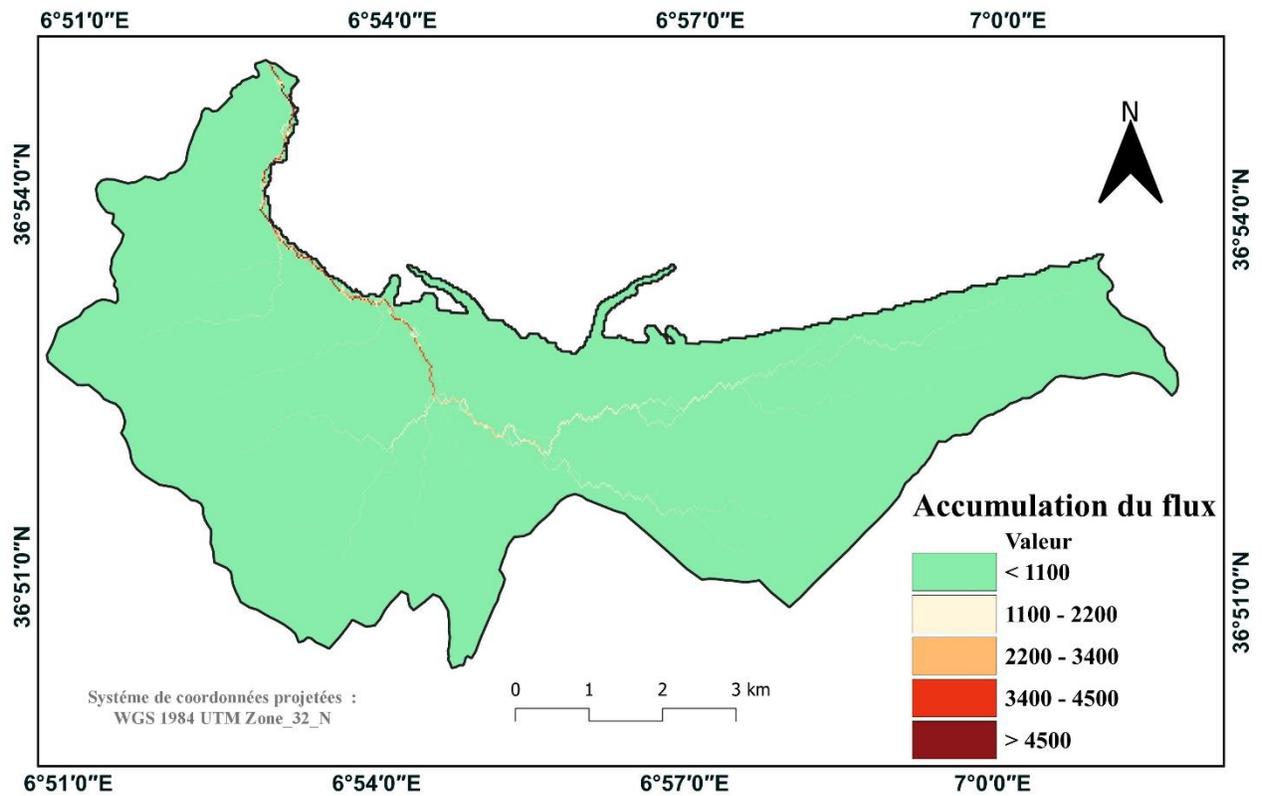
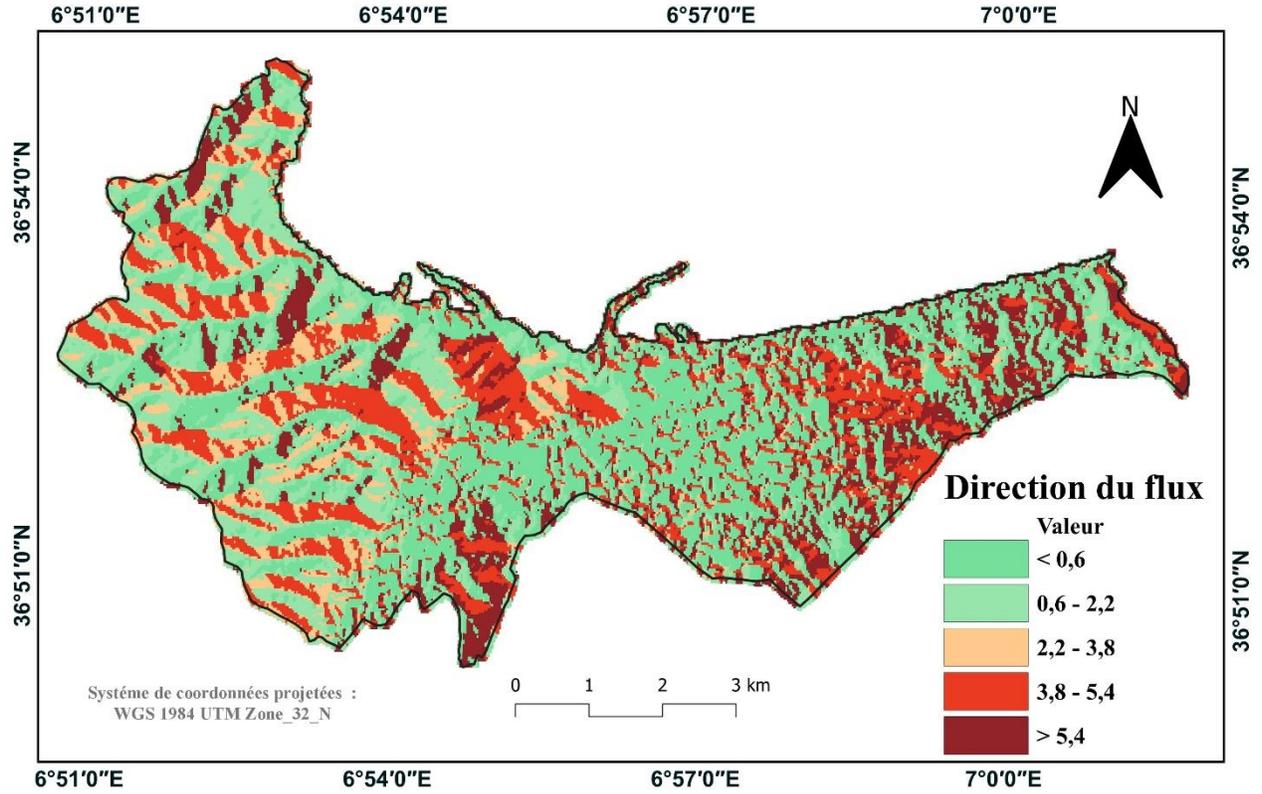
***La cartographie des facteurs d'influences des risques des inondations***



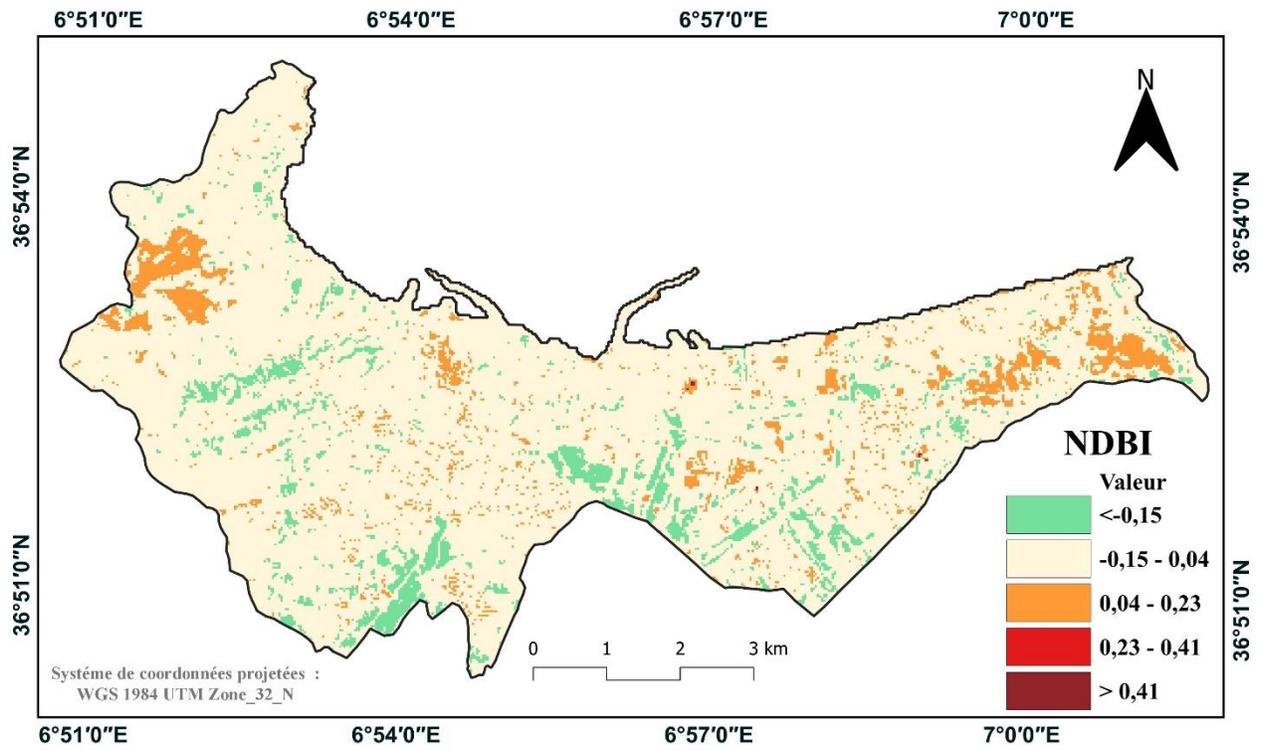
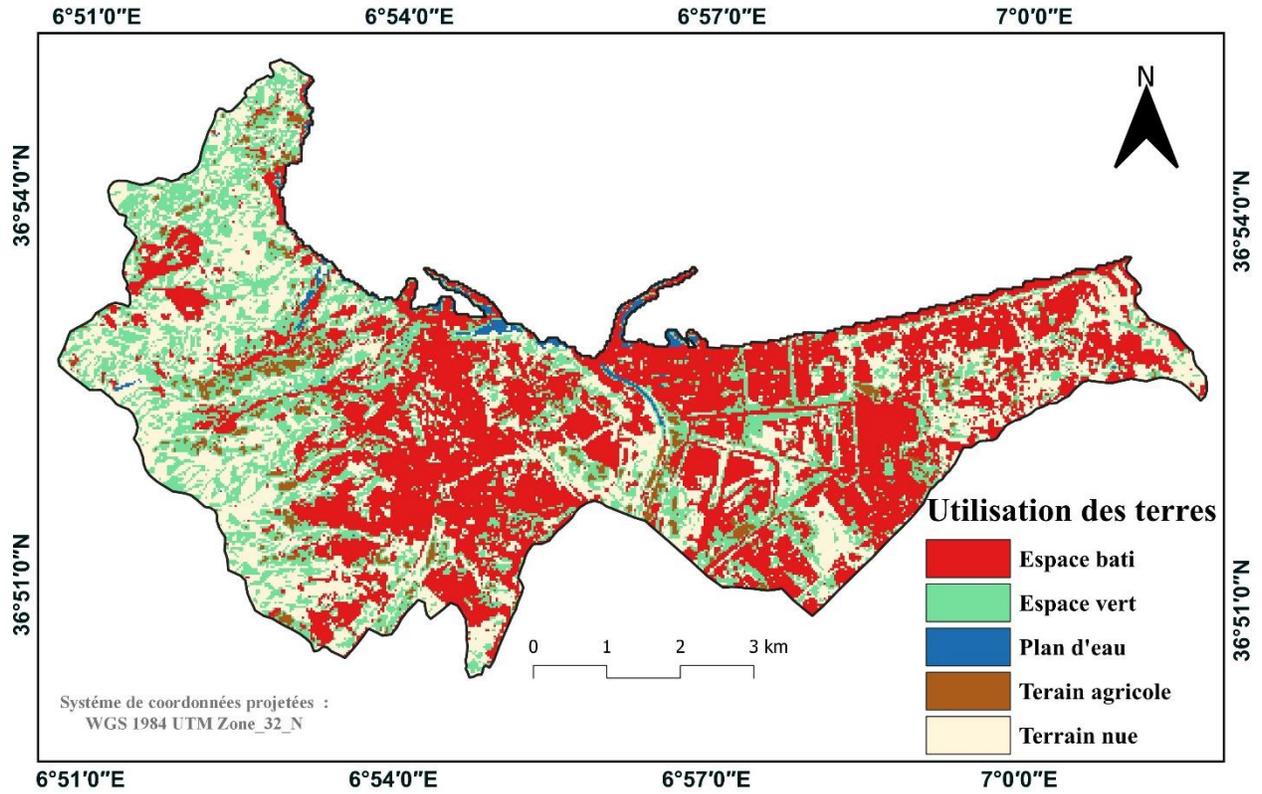
# Annexes



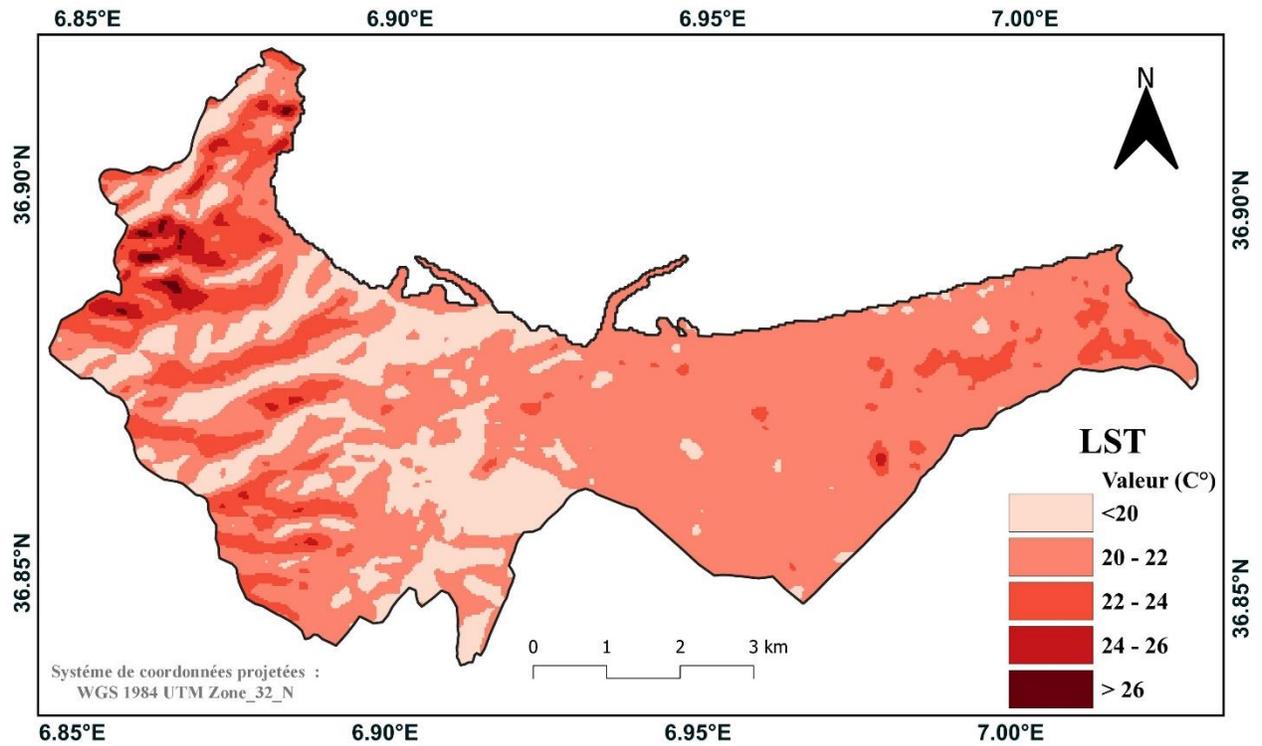
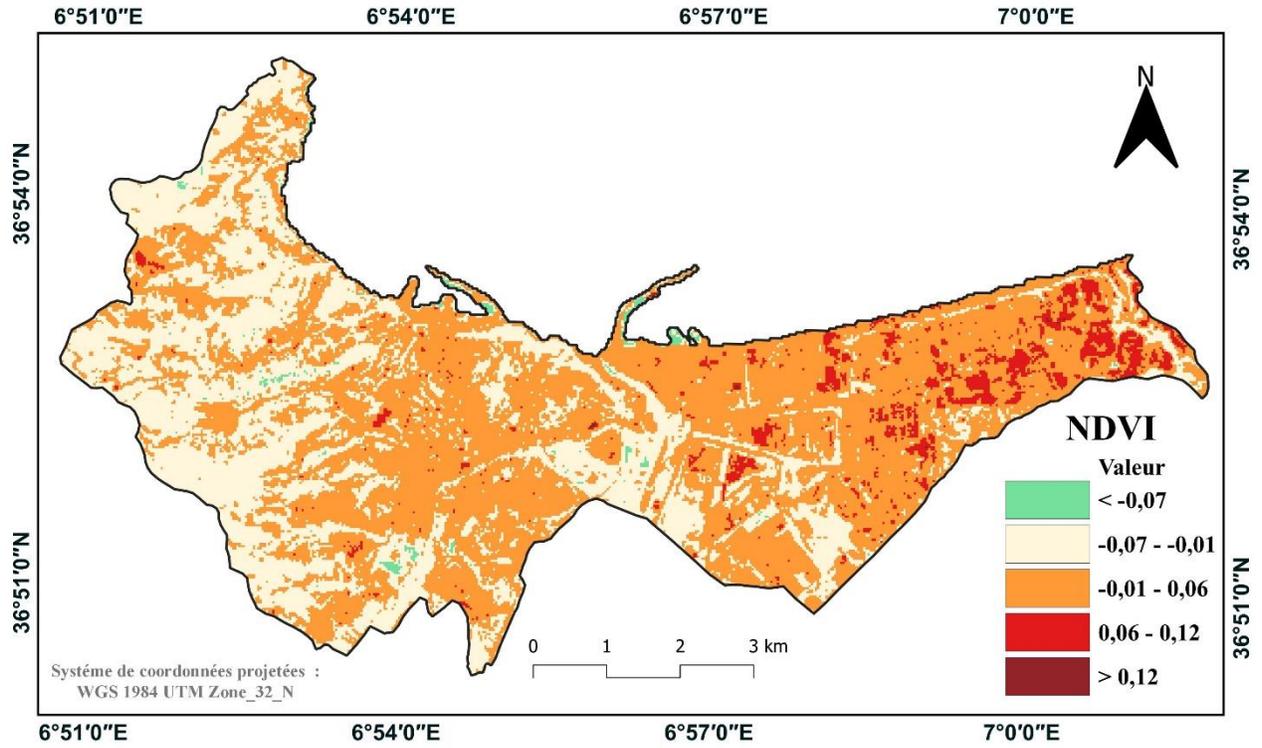
# Annexes



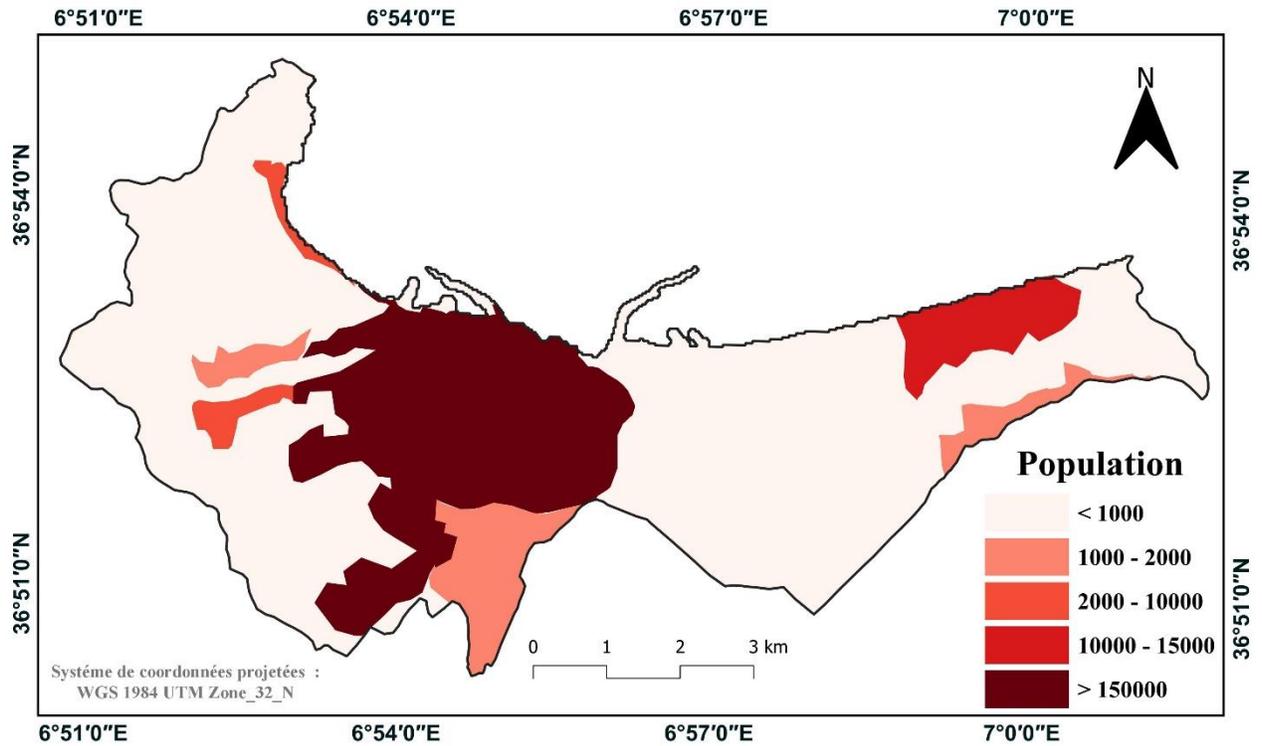
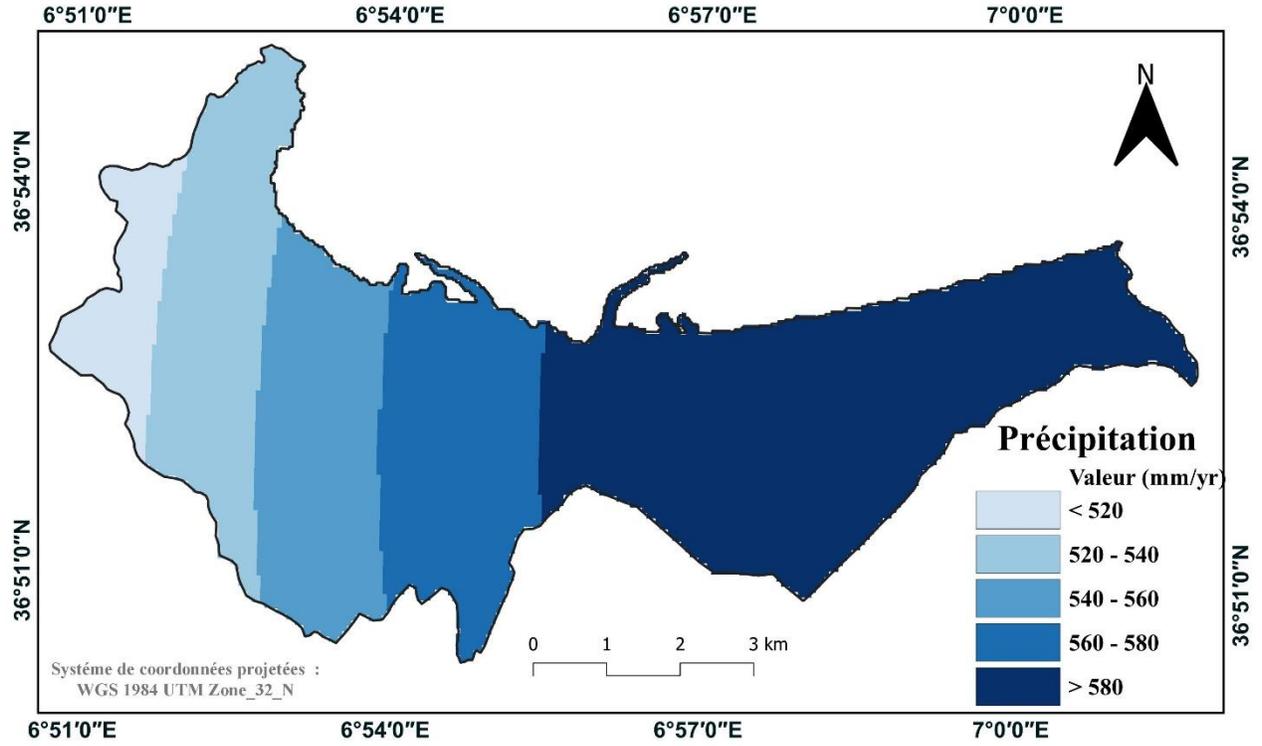
# Annexes



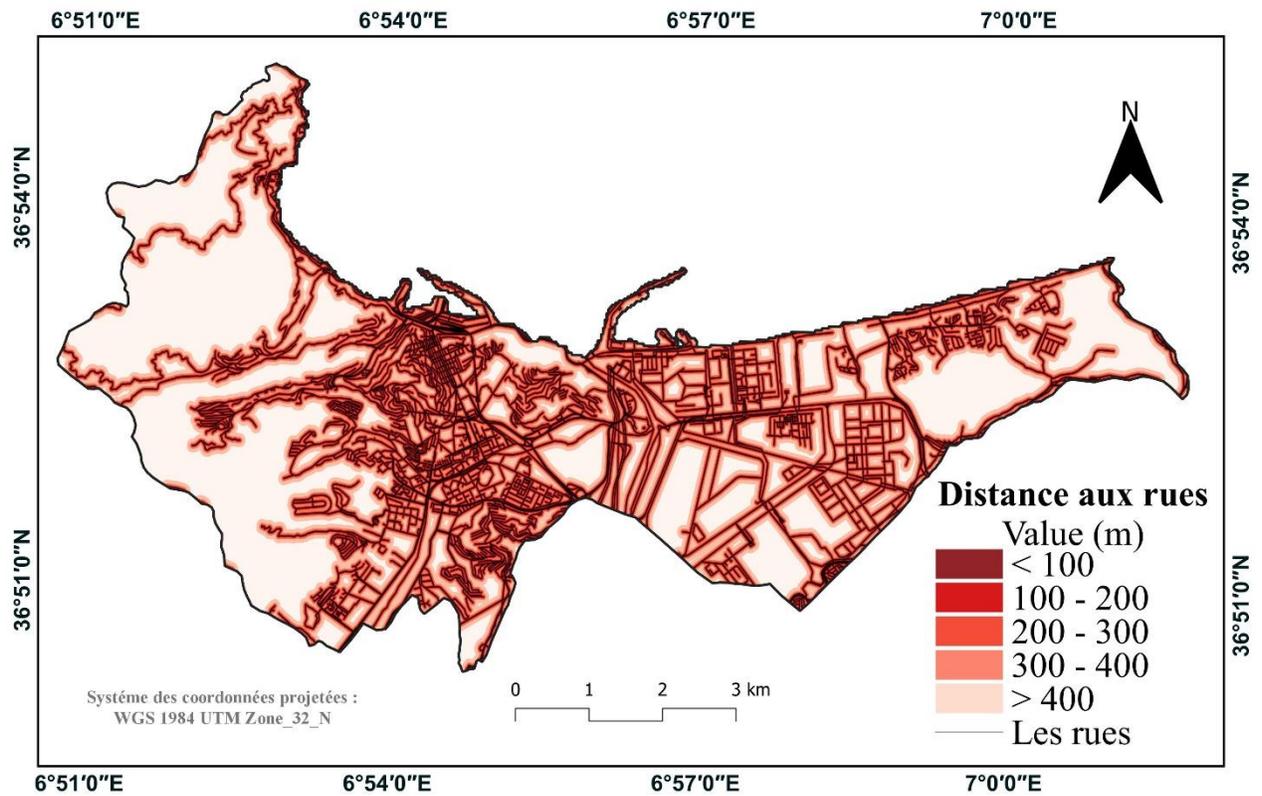
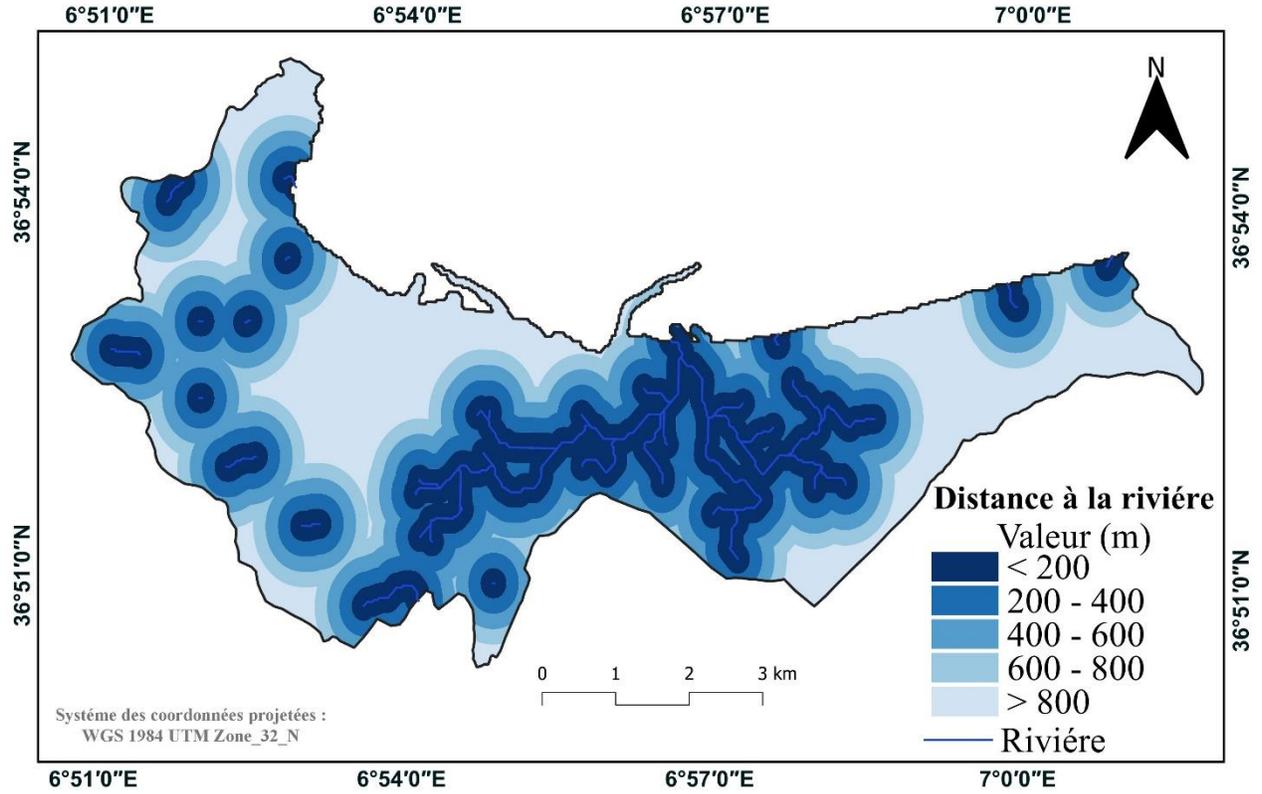
# Annexes



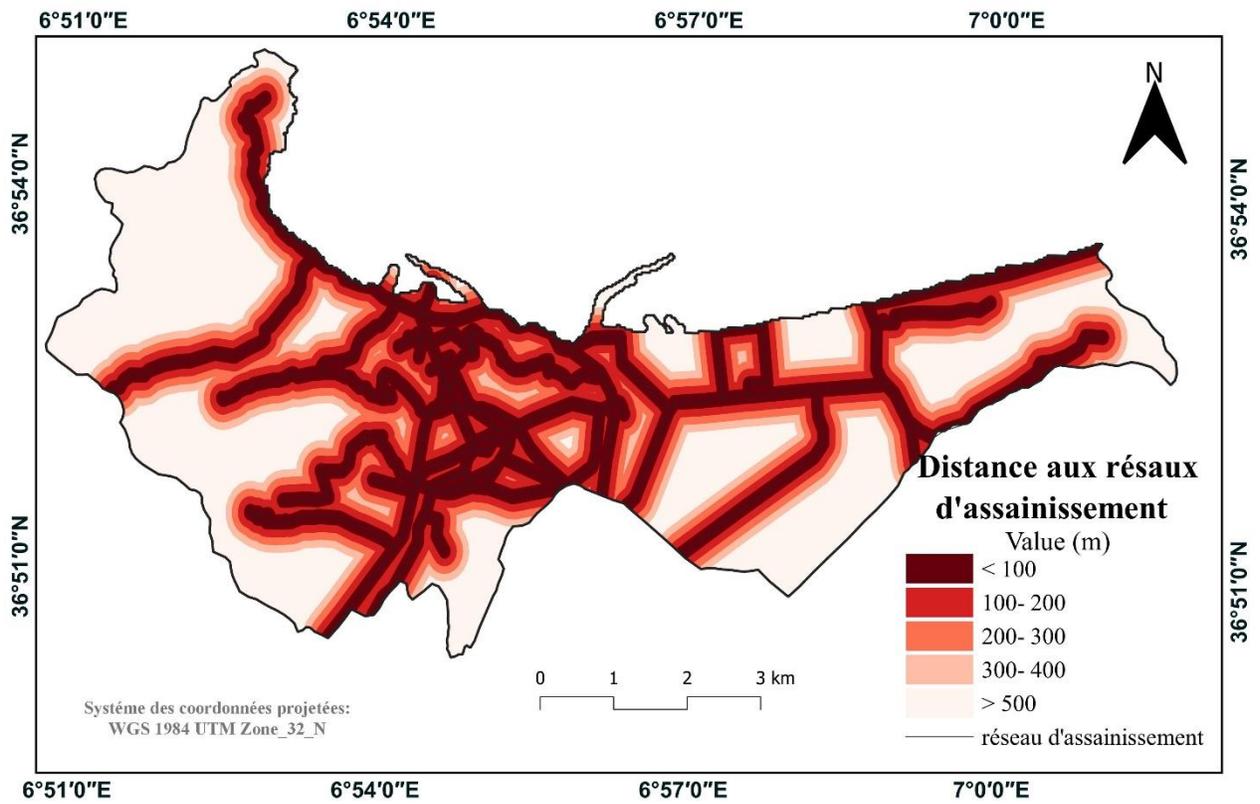
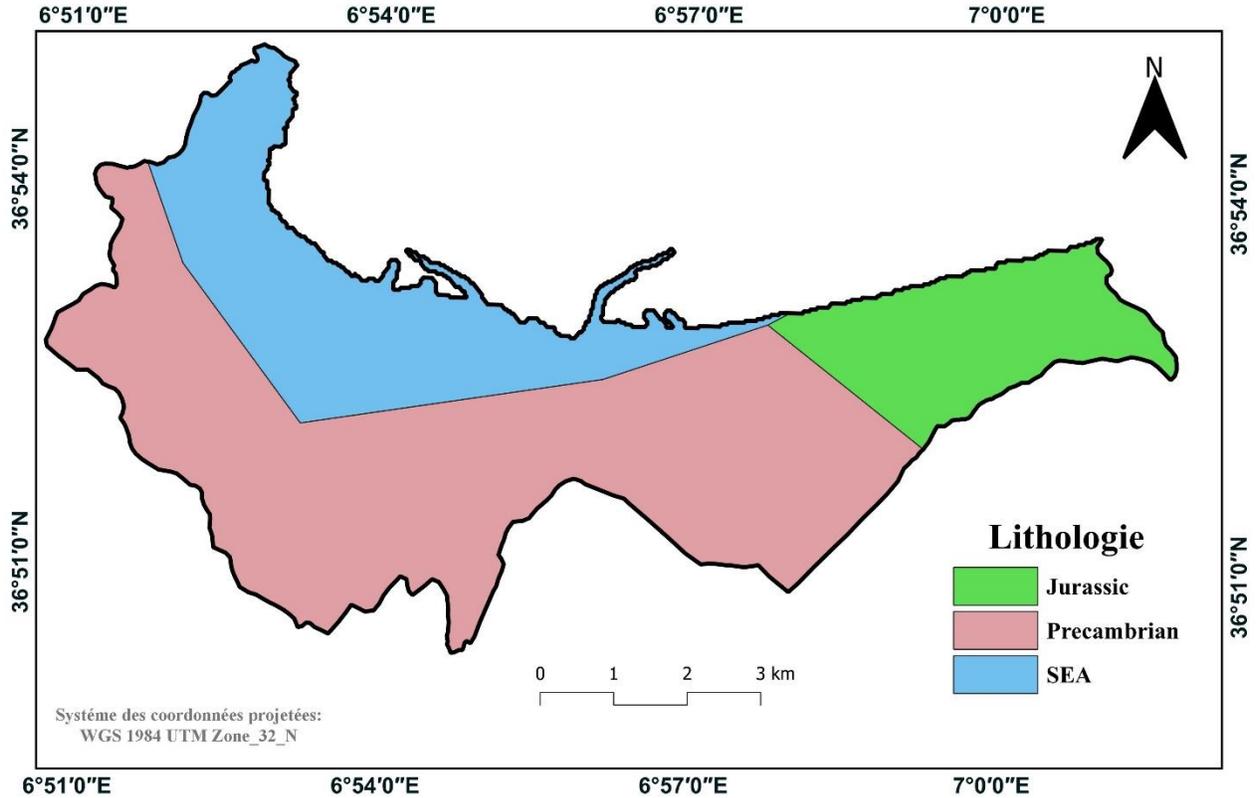
# Annexes



# Annexes



# Annexes



# Annexes

