

République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المدرسة الوطنية العليا لعلوم البحر وتهيئة الساحل  
Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en sciences  
de la mer et de l'aménagement du littoral

**Spécialité :** Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

**Thème :**

**Étude de la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations et  
estimation de leur variabilité spatio-temporelle**

Présenté par : **ZIADI Sérine Razika**

Soutenu le 22/06/2022 devant le jury composé de :

M <sup>me</sup> Mokhbi Dahbia	Maitre de conférence B (ENSSMAL)	Présidente
M <sup>me</sup> Keraghel Mehdi	Maitre de conférence B (ENSSMAL)	Promotrice
M. Otmani Housseyn	Maitre de conférence B (ENSSMAL)	Examinateur
M <sup>me</sup> Benzouai Sihem	Maitre de conférence B (ENSSMAL)	Examinatrice

Promotion : 2021 – 2022



## *Dédicaces*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce mémoire :*

*À ma très chère mère, qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi. Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit, ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*À mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études et pour m'assurer les bonnes conditions. Merci de partager avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce projet fin d'études. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.*

*À mes frères et sœurs pour leur encouragement, leur soutien moral et leur appui tout le long de mon parcours.*

*Que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos vœux et le fruit de votre soutien.*

## **Remerciements**

*Je remercie ALLAH le Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces années d'études.*

*Au terme de ce travail, il m'est agréable de remercier tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et en particulier :*

*Mon encadreur, M<sup>me</sup> Mehdiya KERAGHEL qui a accepté de diriger ce travail, je la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa disponibilité durant ma préparation de ce mémoire et surtout ses judicieux conseils qui ont alimenté ma réflexion.*

*J'exprime toute ma gratitude et remerciements au Commandant Lotfi BENARBA et au Capitaine Abdelbasset TOUATI ainsi qu'à la Direction Générale de la Protection Civile (Hydra-Alger) pour leur aide très précieuse et leur partage d'informations très utiles pour la réalisation de mon projet de fin d'études.*

*Je remercie également M. Lounes FERNANE pour ses précieux conseils méthodologiques.*

*J'exprime également ma gratitude aux membres du jury, M<sup>me</sup> MOKHBI Dahbia qui m'a fait l'honneur de présider le jury.*

*Je tiens à remercier l'ensemble des examinateurs M. OTMANI Housseyn et M<sup>me</sup> BENZOUAI Sihem pour avoir accepté d'évaluer ce travail, pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture et à l'examen de ce manuscrit, qu'ils trouvent également dans ces lignes le témoignage de mon profond respect.*

# Sommaire

<b>Liste des figures</b> .....	<b>7</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>9</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>10</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>12</b>
<b>1 Chapitre I : Généralités</b> .....	<b>15</b>
1.1 Aperçu sur les inondations .....	15
1.1.1 Introduction .....	15
1.1.2 Définitions .....	15
1.1.3 Les types d'inondations.....	18
1.1.4 Les causes d'inondations.....	20
1.1.5 Types de dommages dues aux inondations .....	21
1.2 Changement climatique et catastrophes naturelles.....	21
1.2.1 Climat .....	22
1.2.2 Changement climatique.....	23
1.2.3 Evènements extrêmes : les pluies extrêmes .....	23
1.2.4 Le changement climatique aggrave-t-il les inondations ?.....	23
1.2.5 Les inondations du pourtour Méditerranéen .....	24
<b>2 Chapitre II : Présentation de la zone d'étude : wilaya d'Alger</b> .....	<b>27</b>
2.1 Situation géographique de la zone d'étude .....	27
2.2 Démographie et urbanisation .....	28
2.3 Le climat Algérois.....	31
2.3.1 Température .....	32
2.3.2 Précipitation .....	33
2.4 Hydrographie de la wilaya d'Alger.....	35
2.5 Historique des inondations en Algérie .....	35
<b>3 Chapitre III : Matériel et méthodes</b> .....	<b>38</b>
3.1 Logiciels utilisés.....	38
3.2 Etude du réseau hydrographique de la wilaya d'Alger .....	39
3.2.1 Présentation des données utilisées.....	39
3.2.2 Etapes de travail .....	40
3.3 Paramètres de vulnérabilité de la wilaya d'Alger .....	42
3.3.1 Carte de distribution des altitudes .....	43
3.3.2 Carte des pentes.....	43
3.3.3 Carte de la densité de drainage.....	43
3.3.4 Carte de l'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index TWD).....	45
3.3.5 Carte de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger .....	46
3.3.6 Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) .....	49
3.3.7 Carte des types de sol .....	50

3.3.8	Carte des précipitations .....	51
3.4	Cartographie de la vulnérabilité aux inondations à l'aide de l'analyse multicritères.....	51
<b>4</b>	<b>Chapitre IV : Résultats et discussion.....</b>	<b>55</b>
4.1	Etude du réseau hydrographique de la wilaya d'Alger .....	55
4.1.1	Bassin versant de l'oued Mazafran .....	56
4.1.2	Bassin versant de l'oued Beni Messous .....	57
4.1.3	Bassin versant de l'oued Koriche.....	58
4.1.4	Bassin versant de l'oued El Harrach .....	59
4.1.5	Bassin versant de l'oued El Hamiz.....	62
4.1.6	Bassin versant de l'oued Reghaïa.....	63
4.2	Facteurs de vulnérabilité de la wilaya d'Alger.....	64
4.2.1	Carte de distribution des altitudes .....	64
4.2.2	Carte des pentes.....	65
4.2.3	Carte de la densité de drainage.....	66
4.2.4	Carte de l'indice d'humidité topographique (TWI) .....	67
4.2.5	Carte de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger .....	68
4.2.6	Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) .....	70
4.2.7	Carte des types de sol .....	71
4.2.8	Carte de précipitation .....	73
4.3	Carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger issue de l'analyse multicritères AHP.....	74
4.3.1	Validation des résultats .....	75
4.3.2	Impact sur l'occupation du sol .....	77
4.4	Les inondations de la wilaya d'Alger.....	82
4.5	Stratégie nationale de lutte contre les inondations .....	87
	<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>93</b>
	<b>Annexes .....</b>	<b>99</b>
	Annexe 1 .....	I
	Annexe 2 .....	II
	Annexe 3 .....	III
	Annexe 4.....	V
	Annexe 5.....	VII
	<b>Résumé.....</b>	<b>107</b>

## Liste des figures

<b>Figure 1 :</b> Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale (HOSTACHE, 2006).....	16
<b>Figure 2 :</b> Combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité .....	17
<b>Figure 3 :</b> (a) Le lit mineur (permanent) d'un cours d'eau. (b) Le lit majeur (champ d'inondation) .....	18
<b>Figure 4:</b> Représentation schématique de l'inondation par submersion marine (EAUFRANCE, 2019) .....	19
<b>Figure 5 :</b> Schéma représentatif des causes d'inondations .....	20
<b>Figure 6 :</b> Les dommages dus aux inondations.....	21
<b>Figure 7 :</b> Nombre de personnes déclarées tuées dans chaque inondation documentée au cours de la période 1940-2015 (GAUME et al., 2018) .....	25
<b>Figure 8 :</b> Carte de situation de la zone d'étude (wilaya d'Alger).....	28
<b>Figure 9 :</b> Évolution du nombre d'habitants de la wilaya d'Alger entre 1987 et 2015 .....	29
<b>Figure 10 :</b> Nombre d'habitants en fonction des communes de la wilaya d'Alger (2008).....	29
<b>Figure 11 :</b> Répartition spatiale de la population des communes de la wilaya d'Alger (2008)...	30
<b>Figure 12 :</b> Évolution des températures annuelles (°C) des stations de Houari Boumediene et Port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA .....	32
<b>Figure 13 :</b> Climatologie des températures mensuelles (°C) des stations de Houari Boumediene et Port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA .....	33
<b>Figure 14 :</b> Évolution des précipitations cumulées annuelles (mm/an) des stations de Houari Boumediene et port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA .....	34
<b>Figure 15 :</b> Climatologie des précipitations cumulées mensuelles (mm/mois) des stations de Houari Boumediene et port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA	34
<b>Figure 16 :</b> Organigramme de réalisation de la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations .....	42
<b>Figure 17 :</b> Les principaux bassins versants de la wilaya d'Alger.....	55
<b>Figure 18 :</b> Bassin versant de l'oued Mazafran .....	57
<b>Figure 19:</b> Bassin versant de l'oued Beni Messous .....	58
<b>Figure 20 :</b> Bassin versant de l'oued Koriche.....	59
<b>Figure 21 :</b> Bassin versant de l'oued El Harrach .....	60
<b>Figure 22 :</b> Le débit annuel moyen du bassin versant de l'Oued El Harrach .....	61
<b>Figure 23 :</b> Le débit mensuel du bassin versant de l'oued El Harrach .....	61
<b>Figure 24 :</b> Bassin versant de l'oued El Hamiz .....	62
<b>Figure 25 :</b> Bassin versant de l'oued Reghaïa.....	63

<b>Figure 26 :</b> Carte de distribution des altitudes de la wilaya d'Alger .....	65
<b>Figure 27 :</b> Carte des pentes de la wilaya d'Alger .....	66
<b>Figure 28 :</b> Carte de la densité de drainage de la wilaya d'Alger .....	67
<b>Figure 29 :</b> Carte de l'indice d'humidité topographique de la wilaya d'Alger .....	68
<b>Figure 30 :</b> Carte d'occupation du sol de la wilaya d'Alger pour l'année 2021 .....	69
<b>Figure 31 :</b> Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de la wilaya d'Alger .....	70
<b>Figure 32 :</b> Carte des types de sol de la wilaya d'Alger .....	72
<b>Figure 33 :</b> Carte géologique de la wilaya d'Alger.....	72
<b>Figure 34 :</b> Carte des précipitations de la wilaya d'Alger .....	73
<b>Figure 35 :</b> Carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger .....	75
<b>Figure 36 :</b> Carte montrant la distribution spatiale des principales inondations enregistrées dans la wilaya d'Alger superposées à la carte de vulnérabilité.....	76
<b>Figure 37 :</b> Carte de la classification de l'urbanisation de la wilaya d'Alger selon sa vulnérabilité aux inondations .....	77
<b>Figure 38 :</b> Carte de la classification des terres agricoles de la wilaya d'Alger selon leur vulnérabilité aux inondations.....	78
<b>Figure 39 :</b> Carte montrant la vulnérabilité très forte et forte des classes de l'urbanisation et des terres agricoles dans la wilaya d'Alger .....	79
<b>Figure 40 :</b> Carte qui représente le taux d'urbanisation des bassins versants de la wilaya d'Alger .....	81
<b>Figure 41 :</b> Densité de la population en 2008 superposée à la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger .....	82
<b>Figure 42 :</b> Nombre d'inondations dans la wilaya d'Alger en fonction des années .....	85
<b>Figure 43 :</b> Nombre d'inondations en fonction des communes de la wilaya d'Alger (1946-2021) .....	86
<b>Figure 44 :</b> Nombre de morts enregistrés pour chaque commune et événement.....	86
<b>Figure 45 :</b> Nombre de sinistrés enregistrés pour chaque commune et événement.....	86
<b>Figure 46:</b> Image Sentinel 2 découpée selon les limites administratives de la wilaya d'Alger.....	II
<b>Figure 47:</b> Cartes des critères utilisés dans l'analyse multicritères AHP avec une classification de 1 à 5 (de la vulnérabilité la plus faible à la plus forte).....	VI

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Caractéristiques de l'image utilisée .....	47
<b>Tableau 2</b> : Echelle proposée par SAATY (1991).....	52
<b>Tableau 3</b> : Caractéristiques physiques des bassins versants des oueds d'Alger .....	56
<b>Tableau 4</b> : Superficie et pourcentage des classes d'occupation du sol de la wilaya d'Alger (2021) .....	69
<b>Tableau 5</b> : Superficies des classes d'occupation du sol de la wilaya d'Alger selon leur vulnérabilité aux inondations .....	79
<b>Tableau 6</b> : Le taux d'urbanisation des bassins versants de la wilaya d'Alger .....	80
<b>Tableau 7</b> : Catastrophe des inondations de Bab El Oued.....	83
<b>Tableau 8</b> : Quelques évènements d'inondations frappant la wilaya d'Alger (Direction Générale de la Protection Civile, 2022) .....	I
<b>Tableau 9</b> : Critères de causalité des inondations utilisés pour l'Analyse Hiérarchique Multicritères .....	III

## Liste des abréviations

- AHP** : Analytic Hierarchy Process
- CHRS** : Center for Hydrometeorology and Remote Sensing
- ESA** : European Space Agency
- ESRI** : Environmental Systems Research Institute
- GES** : Gaz à Effet de Serre
- INCT** : Institut National de Cartographie et de Télédétection
- MNT** : Modèle Numérique du Terrain
- MSI** : Multi Spectral Instrument
- NASA** : National Aeronautics and Space Administration
- NDVI** : Normalized Difference Vegetation Index
- NIR** : Near Infrared
- ONS** : Office National des Statistiques
- PAC** : Programme d'Aménagement Côtier
- PDAU** : Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme
- PDIR-Now** : PERSIANN Dynamic Infrared –Rain Rate
- POS** : Plan d'Occupation du Sol
- PPRI** : Plan de Prévention des Risques d'Inondations
- ROI** : Region of Interest
- SDAAM** : Schéma Directeur d'Aménagement de l'Aire Métropolitaine
- SIG** : Système d'Information Géographique
- SNAP** : Sentinels Application Platform
- SNAT** : Schéma National d'Aménagement du Territoire
- SNREPAL** : Société Nationale de Recherches de Pétrole en Algérie
- SRTM** : Shuttle Radar Topography Mission
- SWIR** : Short Wave Infrared
- TOPMODEL** : Topographic based Model
- TWI** : Topographic Wetness Index
- USGS** : United States Geological Survey
- UCI** : University of California, Irvine
- UTM** : Universal Transverse Mercator
- WGS** : World Geodetic System.



# Introduction

## Introduction

Les inondations sont le risque naturel qui a le plus d'impact dans le monde à la fois en raison de leur fréquence et des pertes socio-économiques et environnementales qu'elles produisent, car dans de nombreux cas, elles sont liées à d'autres phénomènes tels que les glissements de terrain et les phénomènes météorologiques violents (LLASAT, 2021). Le problème d'inondation n'est pas une nouveauté, de tout temps l'homme a eu de bonnes raisons de s'installer dans des zones occasionnellement inondables où il avait un meilleur accès à la ressource en eau. Depuis longtemps aussi, l'homme a tenté de domestiquer ce « capital eau » au travers des aménagements hydrauliques afin de mieux maîtriser les risques associés dont le risque d'inondation (GILARD and GENDREAU, 1998). Les tendances des pertes mondiales dues aux inondations ont augmenté au cours des dernières décennies et ont été principalement attribuées à l'augmentation de l'exposition due à la forte croissance démographique et au développement économique dans les zones sujettes aux inondations (IPCC, 2012; MOHLEJI and PIELKE, 2014). De plus, les régimes et les intensités des précipitations peuvent changer sous l'effet du changement climatique (IPCC, 2014; KUNDZEWICZ et al., 2014) ce qui pourrait influencer le risque d'inondation (DANKERS et al., 2014; MILLY et al., 2002).

Les crues soudaines sont beaucoup plus fréquentes dans certaines parties de la région méditerranéenne (GAUME et al., 2009; LLASAT et al., 2010), cela est dû au climat local, qui est sujet à de courtes et intenses rafales de pluies dévastatrices. En outre, la croissance démographique est particulièrement élevée le long des côtes méditerranéennes, entraînant une augmentation rapide des agglomérations urbaines et des populations exposées aux inondations (GAUME et al., 2018).

En Algérie, de tels phénomènes sont fréquents. Selon GAUME et al. (2018), l'Algérie fait partie des pays méditerranéens qui ont déclaré le plus grand nombre de personnes tuées dans chaque inondation documentée. Les inondations et les coulées de boues de Bab El Oued (Alger) du 11 novembre 2001 (ARGENCE et al., 2006; HEGGLIN et al., 2004; KÄSTNER, 2003; SANTOS-MUÑOZ et al., 2006; THOMAS et al., 2003), de Ghardaïa en septembre 2008, Bechar, Naama, Mechria et Telemcen en octobre 2008, ont fait un grand nombre de victimes et causé des dégâts considérables. À Ghardaïa, le débordement de l'oued M'Zab, en septembre 2008, a

provoqué la mort de 60 personnes et des dégâts évalués à plus de 20 milliards de dinars (CHEIKHLOUNIS et al., 2011).

À plusieurs reprises, la wilaya d'Alger a été touchée par des inondations rapides dont certaines ont été catastrophiques, elle subit une centralisation rapide de la population due aux activités socio-économiques, ce qui engendre une urbanisation dense de son territoire qui s'accompagne d'un étalement urbain important, occupant parfois des zones non constructibles (REDJEM et al., 2020). Sous l'effet du changement climatique, l'intensité et la fréquence des catastrophes naturelles risquent de s'accroître dans les années à venir, provoquant un effet dévastateur sur la wilaya d'Alger, sachant que la fréquence et l'intensité de ces catastrophes naturelles se sont déjà considérablement accrues au cours de la dernière décennie (EGIS EAU et al., 2012a).

Dans un premier temps, l'objectif principal de cette étude consiste à déterminer les zones vulnérables aux inondations (zones à risque) de la wilaya d'Alger pour une meilleure prévention et gestion des crises ainsi que pour l'amélioration des stratégies d'aménagement du territoire de la capitale. Quelques études ont été réalisées dans le même contexte par la Protection Civile en collaboration avec des bureaux d'études internationaux, mais en utilisant d'autres méthodologies. Dans un second temps, ce mémoire se focalise sur l'étude et l'analyse de l'évolution spatio-temporelle des différentes inondations qui ont touché la wilaya d'Alger.

Ce document s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités et définitions des termes et phénomènes traités dans ce travail.

Le deuxième chapitre présente la wilaya d'Alger (zone d'étude), plus précisément sa situation géographique, sa démographie et urbanisation, son climat, son hydrographie ainsi qu'un bref historique des inondations qui ont touché l'Algérie.

Le troisième chapitre porte sur les données et les méthodes adoptées pour l'étude des inondations dans la wilaya d'Alger.

Enfin, le quatrième chapitre englobe les résultats obtenus et leur discussion.

# Chapitre I : Généralités

## **1 Chapitre I : Généralités**

Dans ce chapitre, on va aborder les notions nécessaires à la compréhension des phénomènes d'inondations et du changement climatique ainsi que la relation qui les lie.

### **1.1 Aperçu sur les inondations**

#### **1.1.1 Introduction**

Une inondation est un fléau naturel qui affecte plusieurs pays du monde. Elle est causée par de nombreux facteurs et aggravée par d'autres dont l'activité de l'homme qui fait souvent partie de l'un de ces facteurs. Les dégâts engendrés par cette catastrophe naturelle, qu'ils soient humains ou matériels sont généralement des statistiques lourdes (RAACHI and BENDIB, 2020).

#### **1.1.2 Définitions**

##### **1.1.2.1 Inondation**

D'après la définition donnée dans le dossier d'information « inondation » MEDD-PRIM (2004), « l'inondation est une submersion, rapide ou lente, d'une zone habituellement hors d'eau. Le risque d'inondation est la conséquence de deux composantes : l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'homme qui s'installe dans l'espace alluvial pour y implanter toutes sortes de construction, d'équipements et d'activités ». Selon LEDOUX (2006) il s'agit d'une submersion temporaire d'une zone habituellement sèche, par des eaux douces tels que les fortes pluies (pluies torrentielles), débordement des bassins versants, d'oueds... etc. Ou des eaux salées tels que la submersion marine et les tsunamis. Elle peut être un phénomène régulier ou catastrophique selon les conditions topographiques et météorologiques de la zone affectée.

##### **1.1.2.2 Crue**

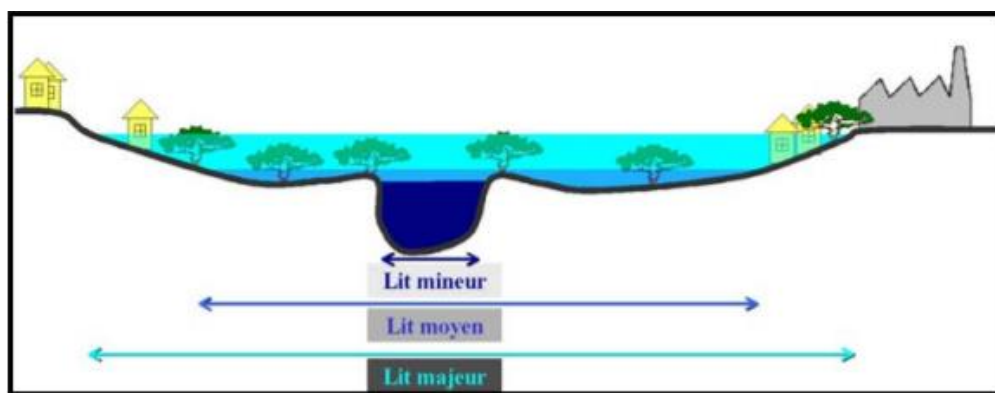
La crue, tel que défini par LEDOUX (2006), est un phénomène naturel et saisonnier qui correspond à une élévation des niveaux des eaux. Elle ne provoque pas de perturbations majeures lorsque son ampleur est modérée. Mais une crue est susceptible de présenter des risques, lorsque le débit et le volume d'eau sont tels qu'il y a débordement par rapport au lieu d'écoulement habituel (le lit mineur) : on parle alors d'inondation. L'eau se répand dans les zones d'expansion des crues, qui correspondent au lit majeur du cours d'eau, souvent largement urbanisées, et provoque des

dégâts considérables. De ce fait, il est très important de bien différencier les notions d'inondation et de crue.

D'après le dossier d'information MEDD-PRIM (2004), l'importance de l'inondation dépend de trois paramètres : la hauteur d'eau, la vitesse du courant et la durée de la crue. Ces paramètres sont conditionnés par les précipitations, l'état du bassin versant et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.), notant que ces caractéristiques naturelles peuvent être aggravées par la présence d'activités humaines.

### 1.1.2.3 Plaine alluviale

La plaine d'inondation ou plaine alluviale désigne usuellement les zones de fond de vallée, à faible dénivelée, constituées par des alluvions déposées lors des crues du cours d'eau (HOSTACHE, 2006). En termes d'écoulement, d'après l'explication de RACLOT (2003), la plaine alluviale est souvent décomposée en trois zones morphologiquement différentes : le lit mineur (ou permanent) occupé en permanence par les eaux, le lit moyen (ou majeur saisonnier ou périodique) inondé à peu près tous les ans et correspond à la zone d'écoulement du cours d'eau hors débordement (un espace fluvial occupé par la ripisylve<sup>1</sup>), et le lit majeur exceptionnel (ou épisodique) où l'écoulement ne s'effectue que lors de grande crue (Figure 1). Le terme « lit majeur » seul ou « champ d'inondation » est employé donc pour le lit majeur exceptionnel.



**Figure 1 : Représentation schématique des lits mineur, moyen et majeur en plaine alluviale (HOSTACHE, 2006)**

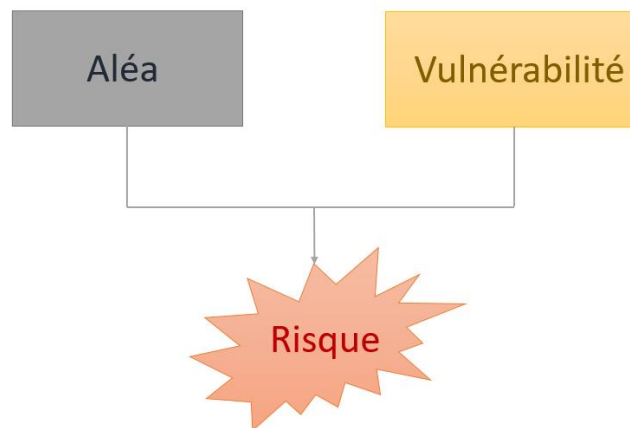
<sup>1</sup> Les ripisylves sont les forêts rivulaires des cours d'eau. Elles s'étendent sur une largeur variable en fonction de la largeur du lit majeur mais également du degré d'anthropisation du milieu (COLLETTE et al., 2018).

#### 1.1.2.4 Risque : aléa et vulnérabilité

Selon BOUBCHIR (2007), le terme « risque » vient de l'italien « Risco » ce qui signifie « ce qui coupe » et désigne un danger potentiel perçu dans un contexte social, économique et culturel donné. Le risque résulte de la combinaison de deux composantes qui sont l'aléa et la vulnérabilité (GILARD and GENDREAU, 1998) (Figure 2).

D'après TORTEROTOT (1993) : « il n'y a pas de risque sans aléa naturel, il n'y en a pas sans élément vulnérable exposé ».

- **Aléa** : représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement du cours d'eau et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation (POTTIER, 1998). Selon HOSTACHE (2006), il peut être caractérisé suivant deux composantes, l'une fréquentielle (occurrence) et l'autre spatio-temporelle (intensité).
- **Vulnérabilité** : correspond à la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation (POTTIER, 1998).



*Figure 2 : Combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité*

Comme le rappelle DE VANSSAY en 2001 la catastrophe est « le résultat de la conjonction d'un évènement naturel et d'une situation géographique, avec l'ensemble des perceptions, des attitudes, des structures et des normes édifiées par la communauté qui doit faire face à la menace ». Ainsi, les individus, qui se trouvent confrontés à des inondations, doivent en construire une représentation acceptable pour pouvoir continuer à vivre avec ce risque (BAGGIO and ROUQUETTE, 2006).

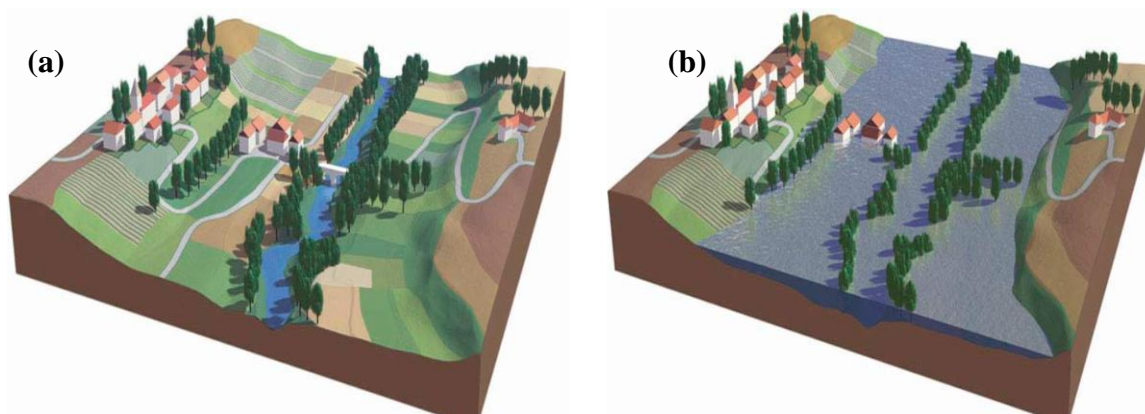
Selon LEDOUX (2006), le risque n'est pas le même sur les différents territoires exposés puisque ni l'aléa ni la vulnérabilité sont les mêmes, les crues surviennent de manière plutôt lente sur les bassins plats alors qu'elles se produisent de manière extrêmement rapide et brutale sur les bassins pentus.

### 1.1.3 Les types d'inondations

REDJEM et al. (2020) ont mentionné que les inondations peuvent être la conséquence de crues ou de fortes averses, notant que l'inondation des zones urbanisées n'est pas toujours liée à la proximité d'un cours d'eau. Les principaux facteurs qui influencent la durée et l'intensité des inondations sont la quantité de pluie qui tombe, l'état des sols (degré d'imperméabilisation, pratiques culturales et aménagement et entretien du réseau hydrographique). C'est en fonction de l'évènement créateur de la catastrophe qu'on peut distinguer plusieurs types d'inondation :

#### 1.1.3.1 Inondations de plaine

Elles se traduisent par le débordement d'un cours d'eau qui sort de son lit habituel (lit mineur) (Figure 3.a) et envahit son lit moyen jusqu'au lit majeur (Figure 3.b) (BOUBCHIR, 2007). Selon les experts en Géorisques, ce phénomène est souvent lié à des pluies répétées, prolongées ou intenses qui provoquent une élévation plus au moins brutale du débit et par conséquent la hauteur du cours d'eau. Ce débordement peut être suivi par des remontées de nappes phréatiques, car après des épisodes pluviométriques, la nappe se charge par l'accumulation d'eau infiltrée dans le sol qui peut atteindre le niveau de surface (débordement indirect).



**Figure 3 : (a) Le lit mineur (permanent) d'un cours d'eau. (b) Le lit majeur (champ d'inondation d'un cours d'eau) (MEDD-PRIM, 2004)**

### 1.1.3.2 Inondations par ruissèlement

REDJEM et al. (2020) indiquent que les inondations par ruissèlement pluvial en secteur urbanisé se produisent par écoulement dans les rues, il s'agit des volumes d'eau ruisselée dans le site et qui ne sont pas absorbés par le réseau d'assainissement superficiel et souterrain. Ce type d'inondations recouvrent des phénomènes physiques différents selon qu'elles se produisent en milieu rural, périurbain ou urbain (LEDOUX, 2006). Ces phénomènes se caractérisent par leur soudaineté et leur courte durée, ce qui les rend peu prévisibles et difficilement maîtrisables en période de crise, ce sont des phénomènes très locaux qui touchent les petits bassins versants.

### 1.1.3.3 Inondation côtière (submersion marine)

La submersion marine désigne une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et hydrodynamiques extrêmes (dépression atmosphérique, vent violent, forte houle, etc.), associées aux phénomènes marégraphiques provoquant une surélévation du niveau moyen de la mer (Figure 4). Il s'agit d'un phénomène naturel brutal de courte durée qui se produit de manière périodique et qui s'aggraverait avec les effets du changement climatique. Il faut noter que cette invasion par des eaux salées est particulièrement dommageable pour les biens bâtis ou non bâtis et contribue au recul du trait de côte (MULOT et al., 2010).

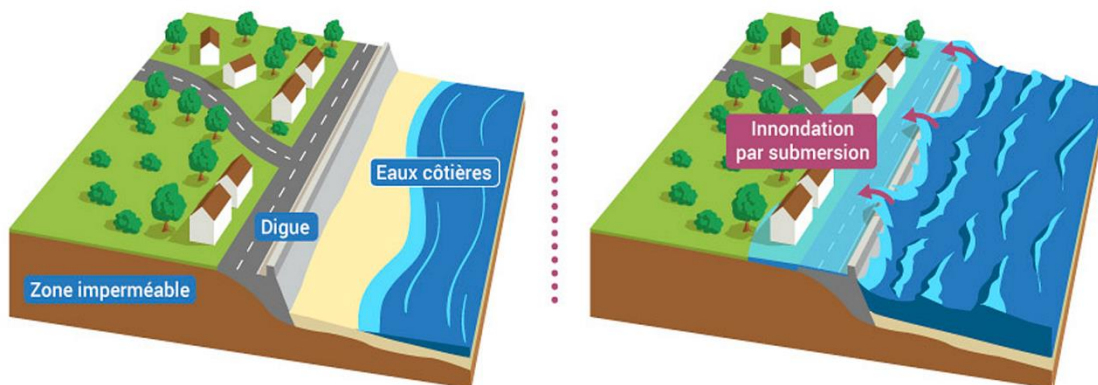


Figure 4: Représentation schématique de l'inondation par submersion marine (EAUFRANCE, 2019)

### 1.1.3.4 Inondation par les crues torrentielles

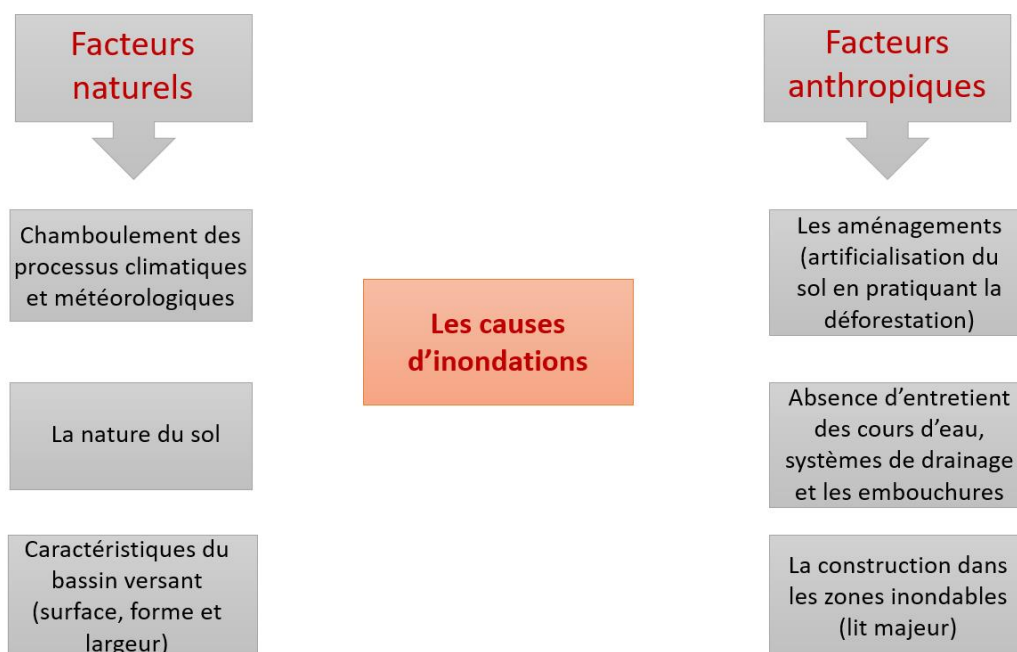
Aussi nommées les crues éclairées, elles résultent de l'accélération du débit d'un cours d'eau suite à de fortes précipitations sur tout un bassin versant. Elles se caractérisent par une montée

rapide des eaux, une vitesse d'écoulement très élevée et une durée de submersion très courte, ce sont des crues exceptionnelles et constituent un grave danger pour les populations (BOUBCHIR, 2007).

#### 1.1.4 Les causes d'inondations

Il est très important de connaître les causes de formation des inondations. Elles sont causées par différents facteurs (Figure 5), dont on cite :

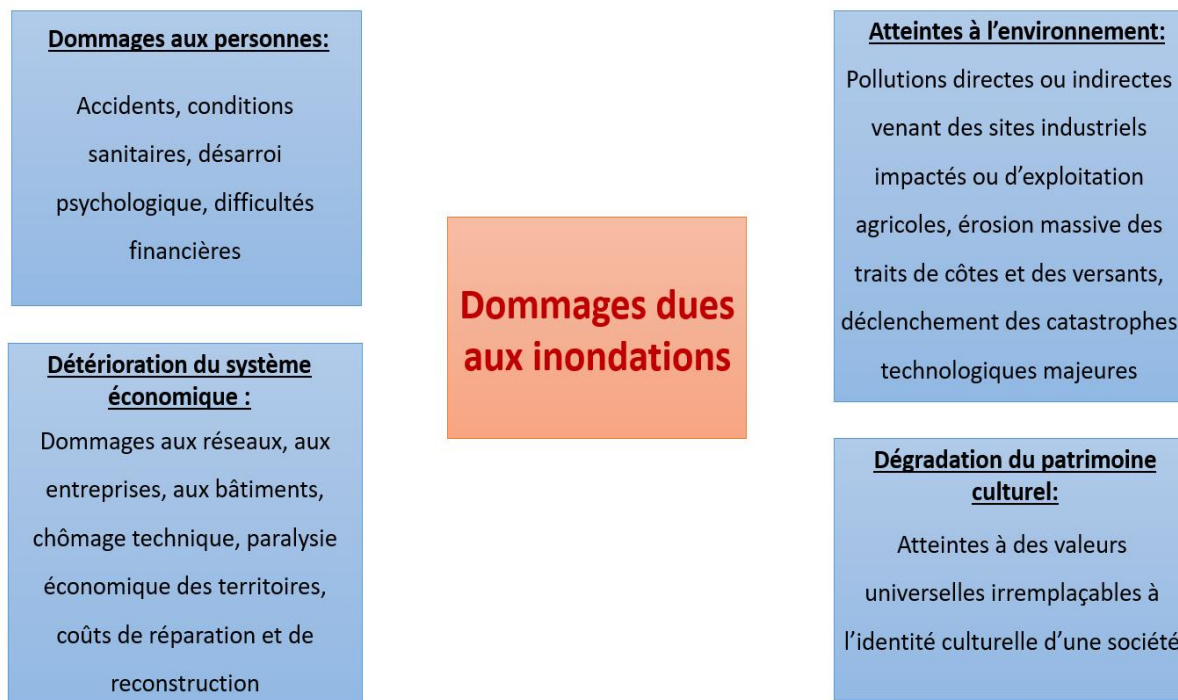
- **Les facteurs naturels** : suite à des situations climatiques et météorologiques remarquables qui se traduisent par de fortes pluviosités (abondance de pluies importantes et orages violents) qui interviennent selon leur répartition spatiale et temporelle (REDJEM et al., 2020). D'autres facteurs interviennent également tels que la nature du sol et les caractéristiques du bassin versant (surface, forme et largeur).
- **Les facteurs d'origine anthropique** : si les crues sont des aléas naturels, l'action de l'homme peut conduire à les aggraver, notamment par l'artificialisation du sol (urbanisation et aménagement), ainsi que la négligence qui se manifeste par l'absence d'entretien des cours d'eau et la construction dans les zones inondables (BAGGIO and ROUQUETTE, 2006).



*Figure 5 : Schéma représentatif des causes d'inondations*

### 1.1.5 Types de dommages dues aux inondations

D'après l'Union Nationale des Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement (2014), il existe quatre types de dommages dues aux inondations qui peuvent affecter les sociétés. Ces derniers sont expliqués dans la Figure 6.



*Figure 6 : Les dommages dus aux inondations*

## 1.2 Changement climatique et catastrophes naturelles

Selon DETUNCQ (2021), parmi les conclusions de la première partie du sixième rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié le 09 août 2021 à Genève :

« Les changements climatiques proviennent des émissions de gaz à effet de serre (GES) générées principalement par la combustion du charbon, pétrole et gaz naturel, ainsi que de la déforestation, de l'agriculture intensive et de l'élevage de bovins »

« Chacune des quatre dernières décennies a été plus chaude que toutes les décennies qui l'ont précédé depuis 1850. Durant la décennie 2011-2020, la température moyenne à la surface

du globe a été supérieure de 1,1 °C à celle de 1850-1900. Cette élévation de température est sans précédent au moins pour les 2000 dernières années »

« Les précipitations moyennes mondiales ont augmenté depuis 1950, avec un taux d'augmentation plus rapide depuis les années 1980. Des inondations dues à de fortes précipitations et à l'élévation du niveau de la mer et des sécheresses plus intenses sans précédent sont survenues dans plusieurs pays du monde en 2021. Les pluies ont entraîné des dégâts considérables et des pertes de vie humaine »

Le changement climatique est maintenant largement reconnu par la communauté scientifique, ce qui a poussé plusieurs acteurs à s'impliquer dans la recherche des processus d'adaptation au changement climatique, mais aussi la capacité des scientifiques à produire de nouvelles connaissances pour faire face aux conséquences de ce dernier (BOYER, 2016). Selon le rapport du GIEC de 2021, les changements climatiques s'accroîtront dans toutes les régions au cours des prochaines décennies. Dans le cas d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C, les vagues de chaleur seront plus nombreuses, les saisons chaudes plus longues et les saisons froides plus courtes. De plus, le régime des précipitations évoluera, ce qui aura des répercussions sur les inondations et les sécheresses. Le rapport du GIEC de 2021 a montré aussi comment le changement climatique intensifie le cycle de l'eau. Sous l'effet du changement climatique, dans de nombreuses régions dans le monde, les sécheresses s'amplifient, de même que les précipitations et les inondations qui les accompagnent (OMM, 2021).

### **1.2.1 Climat**

Le climat se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes (tels que la température, les précipitations et le vent) sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années (la période type, définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), est de trente ans). La météo quant à elle, correspond à l'étude du temps qu'il fait ou qu'il va faire à très court terme (de l'ordre de quelques jours, voire semaines). Le climat et la météo ne sont pour autant pas déconnectés, puisque ce sont entre autres les observations météorologiques qui servent de fondements aux études climatiques pour établir leurs moyennes et tendances (GAMEREN et al., 2014).

## 1.2.2 Changement climatique

D'après la définition de Dictionnaire Environnement (2019), le changement climatique désigne l'ensemble des variations des caractéristiques climatiques en un endroit donné, au cours du temps : réchauffement ou refroidissement. Certaines formes de pollution de l'air (émissions des gaz à effet de serre) résultant d'activités humaines menacent de modifier sensiblement le climat dans le sens d'un réchauffement global. Ce phénomène peut entraîner des dommages importants tels que l'élévation du niveau des mers, accentuation des événements climatiques extrêmes (sécheresse, inondation, cyclone, etc.), déstabilisation des forêts, menaces sur les ressources d'eau douce, réduction de la biodiversité, etc.

## 1.2.3 Evènements extrêmes : les pluies extrêmes

Les pluies extrêmes sont caractérisées par l'apport d'une importante quantité d'eau sur une courte durée (d'1h à une journée). Cette quantité peut égaler celle reçue habituellement en un mois, ou en plusieurs mois. Des cumuls de l'ordre de 50 mm en 24 heures dans la plupart des régions de plaine, et de l'ordre de 100 mm en 24 heures dans les régions montagneuses sont considérés comme des seuils critiques. Pour les phénomènes les plus violents, le cumul des précipitations dépasse généralement les 100 mm en une heure. Le dépassement de ces seuils peut provoquer, lorsque la nature du terrain s'y prête, de graves inondations (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique, 2019).

## 1.2.4 Le changement climatique aggrave-t-il les inondations ?

- **Dans le passé et actuellement :** d'après le CNRS (2021), les conclusions du rapport du GIEC sorti le 09 août 2021 sont très claires sur le fait que le changement climatique d'origine humaine :
  - A augmenté la fréquence et l'intensité des épisodes de fortes précipitations depuis les années 1950.
  - Affecte déjà de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes dans toutes les régions du monde.
- **Dans le futur :** avec la poursuite du réchauffement, les aléas climatiques à venir seront les suivants :

- Chaque région pourrait subir plus d'évènements climatiques extrêmes, parfois combinés et avec des conséquences multiples.
- L'élévation relative du niveau de la mer contribuera à augmenter la fréquence et la gravité des inondations côtières.
- Les inondations seront (et sont déjà) plus fréquentes et plus intenses.
- Notre atmosphère plus chaude contiendra plus de vapeur d'eau, engendrant de plus en plus d'inondations pluviales.

### **1.2.5 Les inondations du pourtour Méditerranéen**

La région Méditerranéenne est une vaste zone s'étendant sur plus de 4000 km d'Ouest en Est et 1500 km du Sud au Nord avec des modèles climatiques et des densités de population variables dans l'espace. Elle se caractérise par des climats, des conditions météorologiques synoptiques et des propriétés hydrologiques diverses : types de substrat rocheux et de sol, utilisation des terres et couvert végétal (GAUME et al., 2018). Cette région a des caractéristiques spécifiques qui favorisent tous les types de risques hydrométéorologiques, car c'est une zone où les masses d'air subtropicales et polaires peuvent converger, donnant lieu à des phénomènes météorologiques violents et à de fortes précipitations (LLASAT, 2021). Selon LLASAT et al. (2016), les régimes d'inondation et les types d'événements pluvieux dominants générateurs d'inondations varient considérablement le long des côtes de la mer méditerranée.

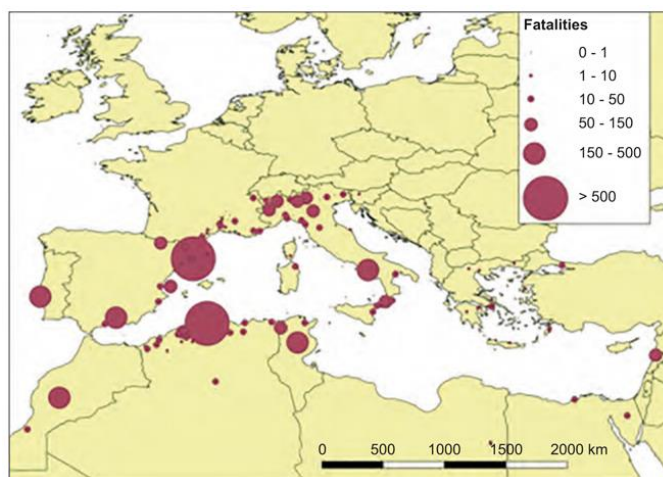
D'après GAUME et al. (2018), les inondations destructrices en Méditerranée sont principalement produites par :

1. Des événements de précipitations intenses (souvent inférieure à 1 heure) fortement convectives de courte durée (jusqu'à 180 mm/h en seulement 5 minutes) avec des quantités totales de précipitations limitées (généralement inférieures à 100 mm). De tels événements ont une étendue géographique limitée (généralement moins de 100 km<sup>2</sup>) et génèrent des crues soudaines locales de petits cours d'eau en amont. Un exemple typique de ces crues éclair est la crue catastrophique qui s'est produite à Alger (Bab El Oued) en novembre 2001.

2. Les systèmes convectifs à méso-échelle<sup>2</sup> peuvent produire des pluies stationnaires durant plusieurs heures conduisant à des précipitations dépassant 200 mm en quelques heures.
3. À certaines conditions, des pluies abondantes et soutenues peuvent faire partie d'une perturbation à grande échelle de plusieurs jours.

Les principales caractéristiques des inondations autour de la Mer Méditerranée selon GAUME et al. (2018) sont :

L'ampleur et l'impact des crues extrêmes varient considérablement dans la région Méditerranéenne avec un net contraste entre l'Ouest et l'Est. La partie Ouest de la zone est beaucoup plus exposée aux évènements à fort impact et à forte ampleur (Figure 7). Cela est probablement dû à la proximité de l'Océan Atlantique et aux influences climatiques océaniques aux latitudes où dominent les flux atmosphériques vers l'Est. L'automne est clairement la principale saison (mais pas la seule) des inondations extrêmes et dévastatrices. C'est notamment le cas des systèmes convectifs de méso-échelle produisant des évènements pluviométriques durables et stationnaires qui entraînent de fortes réponses des bassins versants concernés (i.e. des taux de ruissèlement élevés dus à la saturation du sol et du sous-sol) et des valeurs de débit de pointes extraordinaires.



**Figure 7 : Nombre de personnes déclarées tuées dans chaque inondation documentée au cours de la période 1940-2015 (GAUME et al., 2018)**

<sup>2</sup> Un système convectif à méso-échelle (MCS) est un groupe organisé d'orages, qui persiste au moins pendant plusieurs heures et produit une zone de précipitations continues et intenses causant des inondations sur de larges régions. Un MCS peut être de forme linéaire ou circulaire (LIN, 2007).

Chapitre II : Présentation  
de la zone d'étude :  
wilaya d'Alger

## **2 Chapitre II : Présentation de la zone d'étude : wilaya d'Alger**

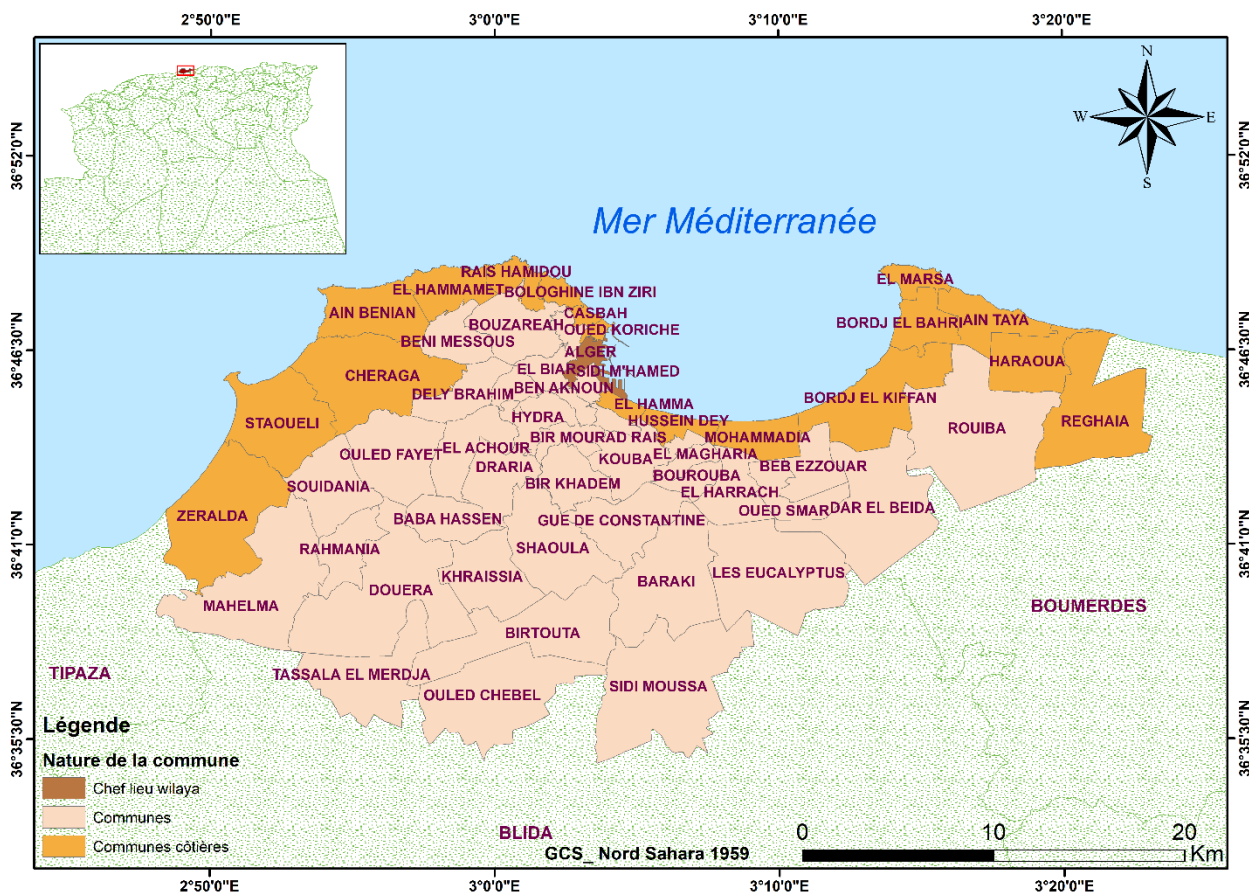
Ce chapitre a pour objet de décrire la zone d'étude qui s'agit de la wilaya d'Alger. En premier lieu, la situation géographique de la wilaya est présentée avec notamment une présentation de l'évolution démographique et urbanistique de cette dernière. Une description de la climatologie de la zone d'étude est aussi abordée ainsi que l'hydrographie de la wilaya d'Alger et un historique des inondations en Algérie.

Notre choix s'est porté sur la wilaya d'Alger, principalement, parce qu'elle a été victime de plusieurs inondations meurtrières à travers son histoire. C'est une zone qui connaît une forte densité de population à cause de sa situation géographique et administrative, ce qui engendre une concentration d'urbanisation importante, parfois d'une façon anarchique en provoquant ultérieurement des dégradations environnementales qui ne font qu'accroître la vulnérabilité de cette wilaya. Dernièrement, les impacts du changement climatique augmentent d'une façon exponentielle, et comme la pression anthropique continue à se propager, lors de la présence de l'aléa : inondation, le risque sur la wilaya devient très inquiétant et demande une intervention immédiate.

### **2.1 Situation géographique de la zone d'étude**

La wilaya d'Alger est la capitale de l'Algérie, elle est située dans l'Algérois au Nord de l'Algérie, délimitée par la Mer Méditerranée au Nord, Blida au Sud, Boumerdès à l'Est et Tipaza à l'Ouest (Figure 8). Elle s'étend sur  $809 \text{ km}^2$  et se compose de 57 communes, dont 19 sont côtières, et de 13 daïras. Sa localisation géographique est entre les latitudes  $36^\circ 35' 30'' \text{ N}$  et  $36^\circ 52' 00'' \text{ N}$  et entre les longitudes  $2^\circ 50' 00'' \text{ E}$  et  $3^\circ 20' 00'' \text{ E}$ .

Du point de vue géographique, la wilaya d'Alger fait partie du Sahel (littoral) et occupe une partie de la Mitidja orientale à l'Est. Elle bénéficie d'une localisation centrale, au bord de la côte méditerranéenne, qui en fait le portail de l'Algérie sur le monde extérieur. Ajouté à cela, elle se distingue par sa très grande influence liée au poids démographique et économique de l'agglomération mais aussi son statut administratif sur la région Centre et sur le reste du territoire national (MEDJADJ, 2009).



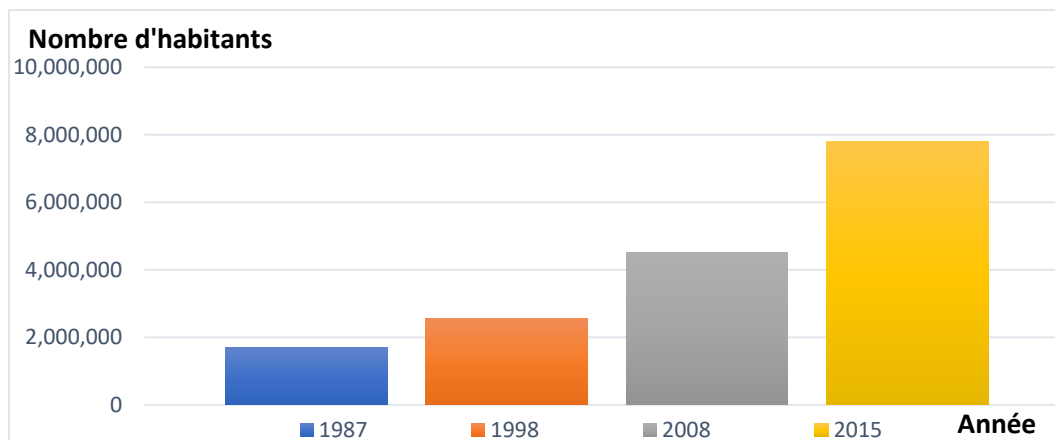
*Figure 8 : Carte de situation de la zone d'étude (wilaya d'Alger)*

## 2.2 Démographie et urbanisation

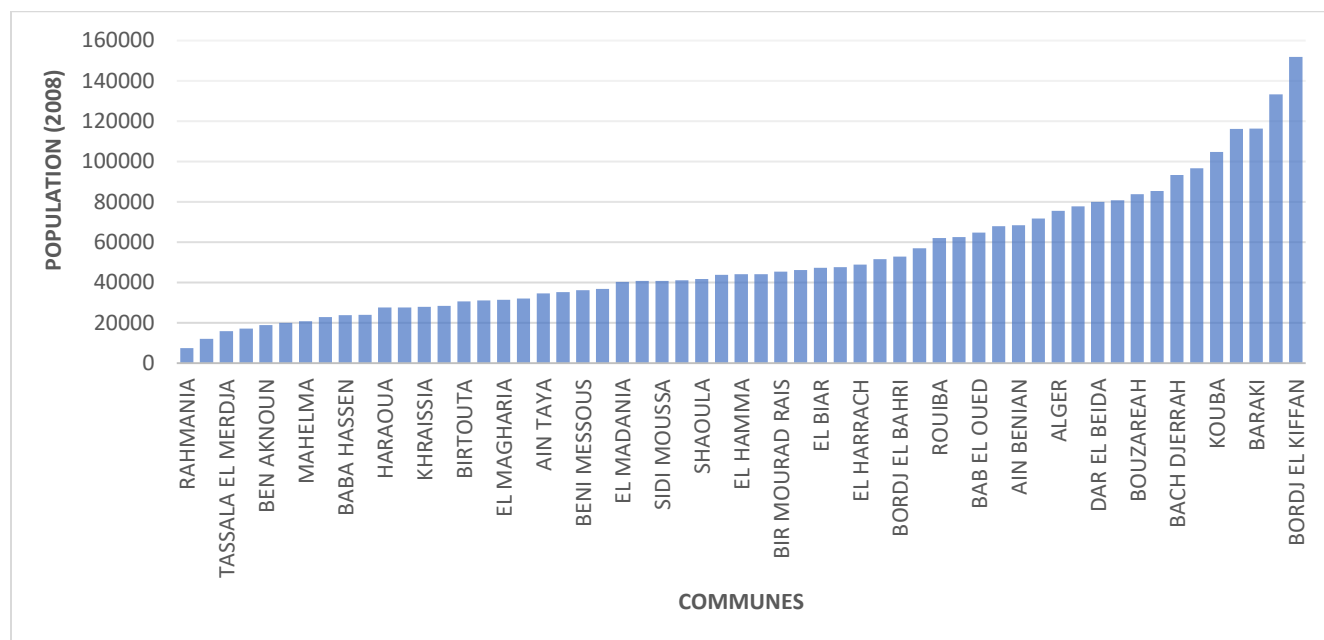
La majorité des enjeux et des vulnérabilités vis-à-vis des risques naturels et du changement climatique sur la frange côtière algérienne se situe dans le périmètre de la wilaya d'Alger. Cette dernière est connue par sa forte densité de population et son taux d'urbanisation très élevé qui est de plus en plus marqué ces dernières années. Ceci aggrave sa vulnérabilité face aux catastrophes naturelles et aux impacts du changement climatique (EGIS EAU et al., 2012b).

La population urbaine a augmenté très rapidement et a presque quadruplé au cours des 28 dernières années (Figure 9), passant de 1,6 millions d'habitants en 1987 à plus de 4 millions d'habitants en 2008 (ONS, 2013), pour arriver à plus de 7 millions d'habitants en 2015 (Population Data, 2020). Il est aussi important de noter que ces chiffres ne prennent pas en considération la population dynamique qui entre et sort de la wilaya chaque jour, d'où la difficulté de limiter notre zone d'étude aux limites administratives de la wilaya.

La Figure 10 et la Figure 11 illustrent la distribution de la population de la wilaya d'Alger par communes. Ces données correspondent aux recensements de l'ONS (Office National des Statistiques) de l'année 2008 (ONS, 2009).



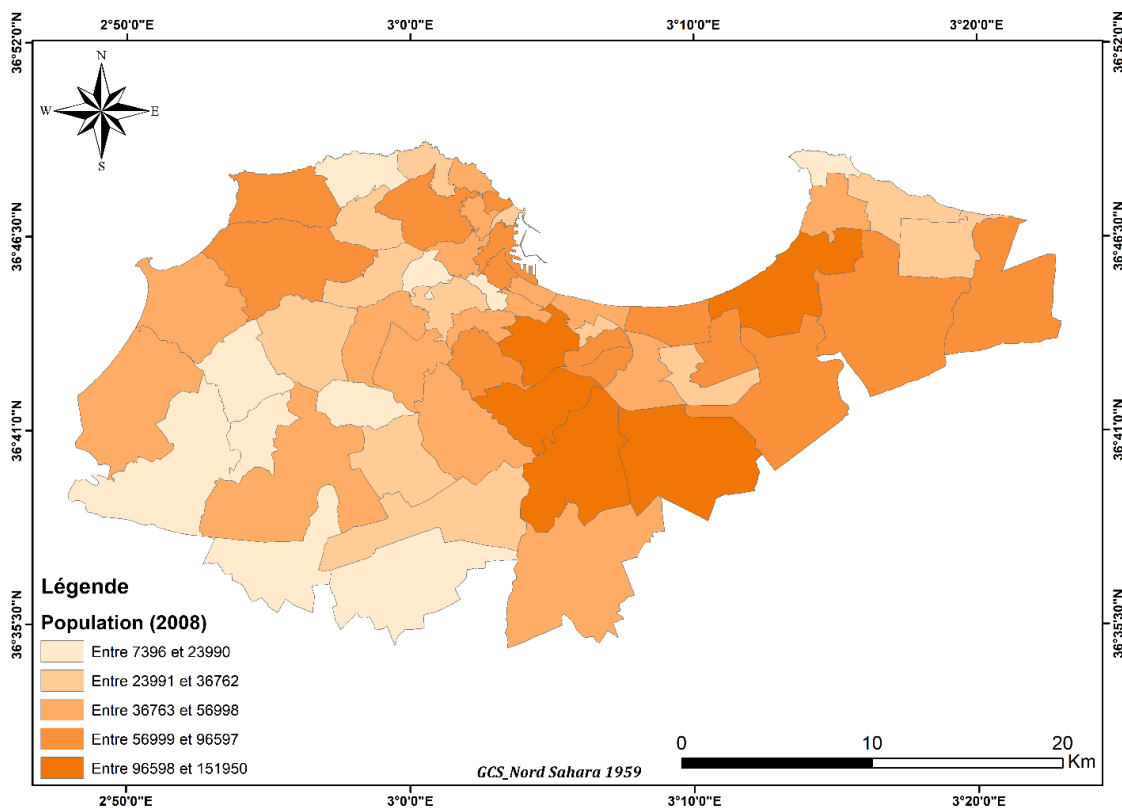
**Figure 9 : Évolution du nombre d'habitants de la wilaya d'Alger entre 1987 et 2015**



**Figure 10 : Nombre d'habitants en fonction des communes de la wilaya d'Alger (2008)**

D'après les deux figures, on remarque que la population de la wilaya d'Alger se concentre dans les communes du centre et de l'Est d'Alger, telles que Bordj El Kiffan, Baraki, Les Eucalyptus, Kouba, Gué de Constantine, Bab Ezzouar, Cheraga et Ain Benian (entre 96598 et 151950 habitants par communes) ainsi que Reghaïa, Rouïba, Dar El Beida, Alger Centre, Sidi

M'Hamed, Bir Khadem, Bouzareah, Bab El Oued, Bourouba, Mohammadia, et Douera (entre 56999 et 96597 habitants par communes). Les communes qui concentrent peu d'habitants sont principalement situées au sud-ouest de la wilaya : Rahmania, El Marsa, Tassala El Merdja, Souidania, Mahelma, Baba Hassen (entre 7396 et 23990 habitants par communes).



**Figure 11 : Répartition spatiale de la population des communes de la wilaya d'Alger (2008)**

Depuis le début des années 90, la wilaya d'Alger a connu un essor important de l'urbanisation, dont une grande partie est non règlementaire. Ce mouvement tient sa vigueur et sa particularité à la profondeur et à la rapidité des changements institutionnels et politiques opérés par le pays au début des années 90 et des bouleversements socio-économiques qui les ont accompagnés, faisant sans nul doute du cas d'Alger, un cas unique parmi les villes des pays de la rive Sud de la Méditerranée (SAFAR ZITOUN and TABTI-TALAMALI, 2009).

La superficie urbanisée a été multipliée par trois en l'espace de vingt ans (1987-2008), avec l'ouverture de nouveaux espaces périphériques aux populations provenant des quartiers centraux de l'agglomération, alors que la population de la wilaya n'a augmenté que de 40 % durant la même

période. C'est significatif du formidable phénomène de desserrement résidentiel qu'a vécu l'agglomération en un laps de temps relativement court (SAFAR ZITOUN and TABTI-TALAMALI, 2009). Ces données datent de 2008, depuis, le tissu urbain de la wilaya d'Alger a évolué avec une densité de population plus importante dans certaines communes tels que : Rahmania, Mahelma, Douira et Baba Hassen.

### **2.3 Le climat Algérois**

La wilaya d'Alger est bordée par la Mer méditerranée au nord ce qui lui confère un climat méditerranéen modéré avec de longs étés chauds et secs et des hivers doux caractérisés par des pluies abondantes souvent diluviennes. Notant que le réchauffement global observable de nos jours pourrait accentuer certains risques naturels tels que les inondations (EGIS EAU et al., 2012b).

D'après MEDJADJ (2009), les années et les mois les plus arrosés s'étalent d'octobre à mars. Les vents dominant soufflent de l'ouest, de novembre jusqu'à mai (ils sont frais et apportent des pluies), les vents de l'est sont frais aussi et dominant de mai à octobre. Les vents du sud sont chauds et fréquents en été. Il est important de souligner que les variations climatiques, notamment la prolongation des périodes de sécheresse engendre une pénurie remarquable de la ressource en eau dont Alger souffre aujourd'hui.

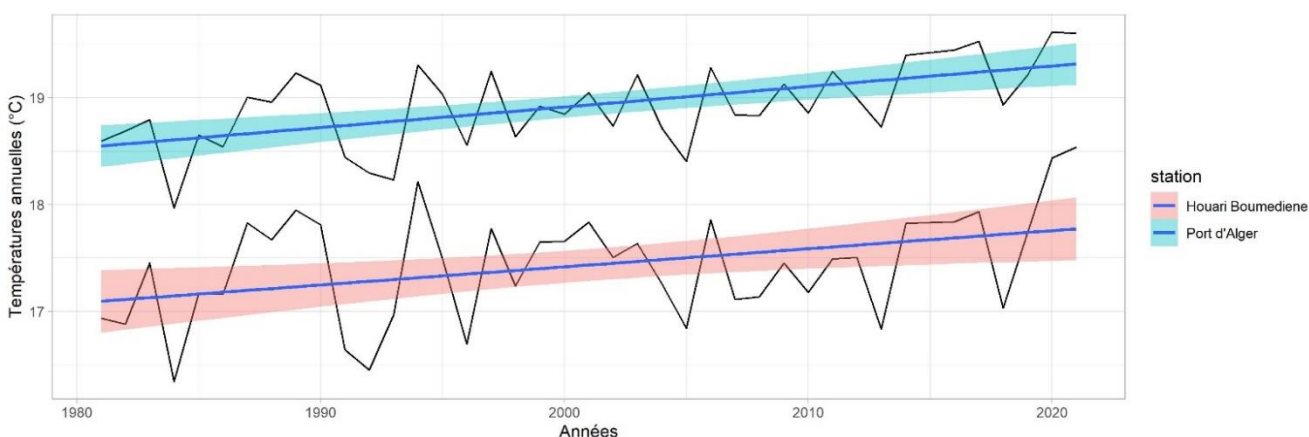
Un téléchargement des données journalières de températures (°C) et précipitations (mm/an) a été fait sur le site de la NASA POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources)<sup>3</sup> sur une échelle de temps de 40 ans (de 1981 à 2021) dans deux stations de la wilaya d'Alger (Houari Boumediene et Port d'Alger) afin de faire la liaison entre les inondations et le climat algérois. Ces produits basés sur des satellites et des modèles se sont révélés suffisamment précis pour fournir des données météorologiques fiables dans des régions où les mesures de surface sont rares, inexistantes ou difficilement accessibles. Selon NOUACEUR et al. (2013), les évolutions de la température et des précipitations témoignent des bouleversements climatiques subis ces dernières années par l'Afrique du Nord et le grand Maghreb.

---

<sup>3</sup> Lien de NASA POWER : <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

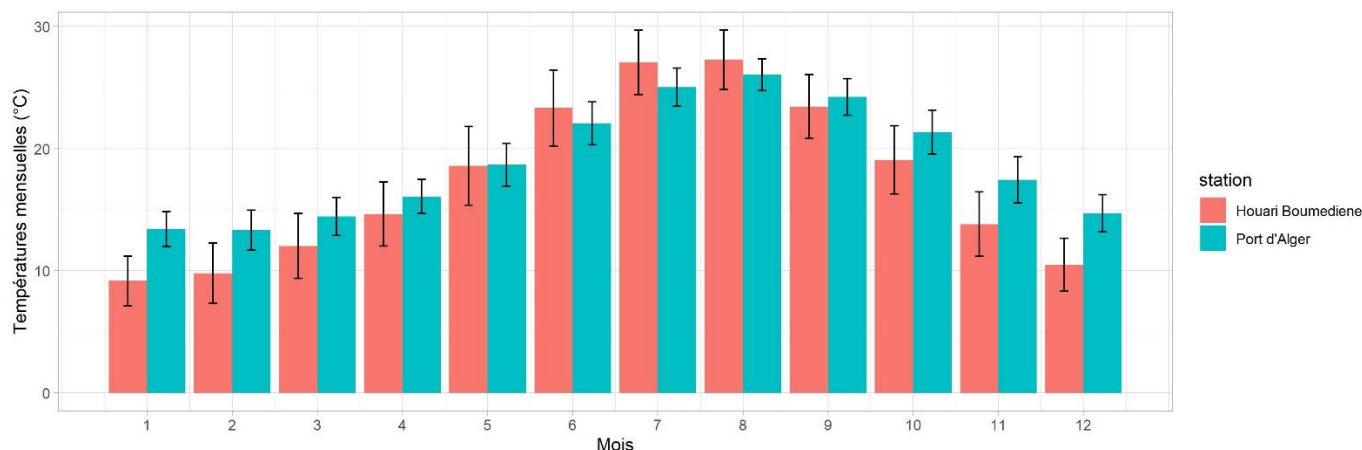
### 2.3.1 Température

Selon la Figure 12, les stations de Houari Boumediene et le Port d'Alger ont enregistré plusieurs fluctuations de températures annuelles (des hausses et des baisses) au cours des 40 dernières années. La station du port d'Alger se caractérise par des températures moyennes plus chaudes par rapport à celles de Houari Boumediene probablement en raison de sa proximité de la mer. Une tendance à l'augmentation des températures est clairement visible, par la droite de régression linéaire, ce qui reflète probablement les conséquences du changement climatique. En effet, la température moyenne varie entre un maximum d'environ 19,7°C en 2021 et 18°C en 1984 pour la station du Port d'Alger, et entre 18,5 °C en 2021 et 16,8 °C en 1984 pour la station de Houari Boumediene.



**Figure 12 : Évolution des températures annuelles (°C) des stations de Houari Boumediene et Port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA**

La Figure 13 montre que les mois où la wilaya d'Alger a enregistré des températures moyennes élevées de l'ordre de 25°C sont les mois de juillet et aout (été), dans les deux stations. Les mois froids correspondent aux mois de décembre, janvier, février et mars (hiver) où la température moyenne est environ 14°C.

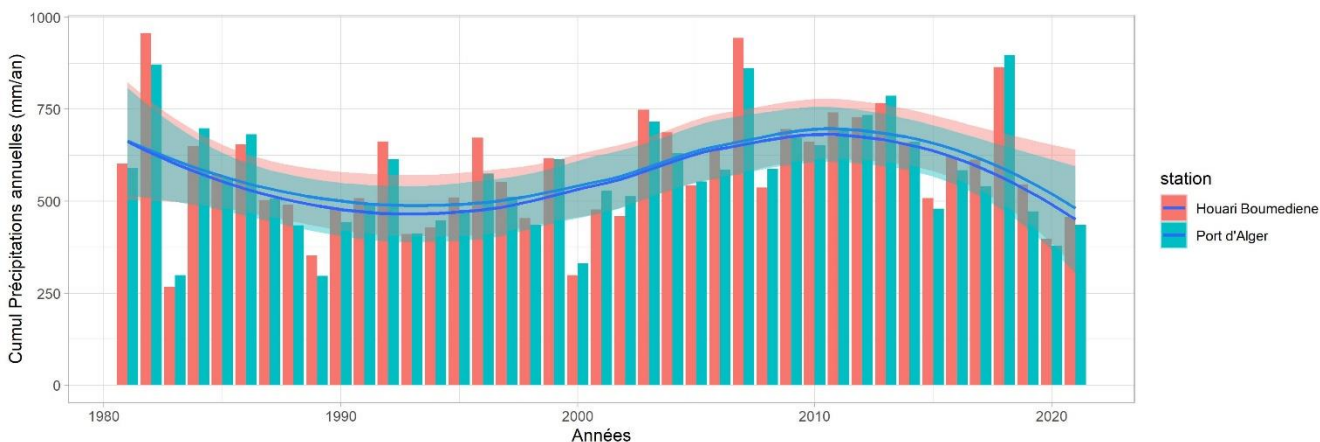


**Figure 13 : Climatologie des températures mensuelles (°C) des stations de Houari Boumediene et Port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA**

### 2.3.2 Précipitation

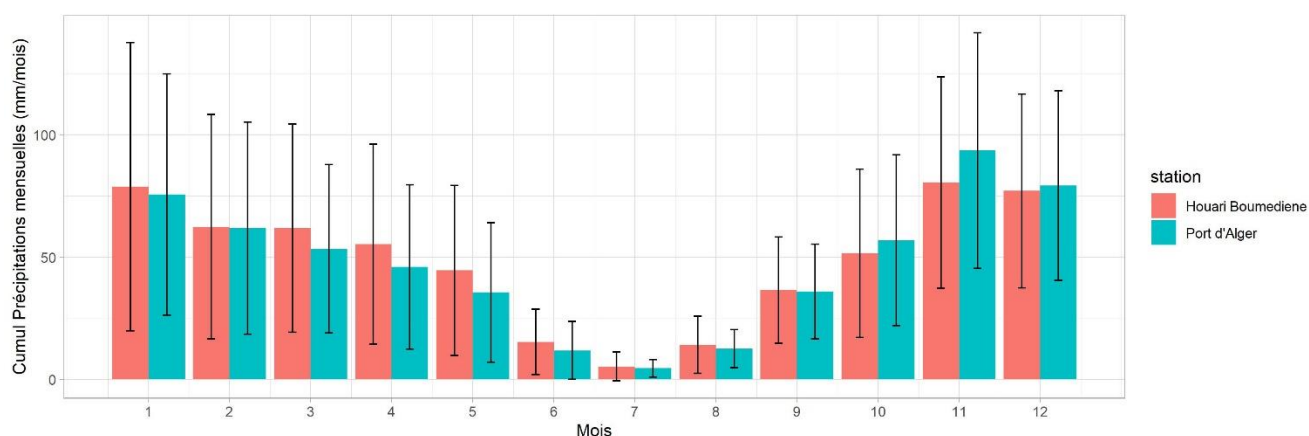
La Figure 14 montre que le cumul des précipitations moyennes a augmenté dans la décennie comprise entre 2000 et 2010, où en 2007 la wilaya d'Alger a enregistré le cumul maximal des précipitations annuelles (900 mm/an). Notons également qu'à partir de l'année 2010, les précipitations cumulées annuelles ont diminué, ce qui explique les périodes de sécheresses prolongées que subit la wilaya d'Alger ces dernières années dont la pénurie d'eau est l'une des conséquences.

Les travaux de NOUACEUR et al. (2013) confirment nos constats. Ces auteurs ont observé une première période humide s'étalant de 1970 à 1986, une sécheresse s'est établie ensuite pendant près de quinze ans, de 1987 à 2002. Elle est suivie du retour à une situation plus clémente (qualifiée d'humide) depuis 2003. Ce retour à des précipitations plus abondantes s'accompagne d'un plus grand nombre d'épisodes pluvieux extrêmes (perturbations pluvio-orageuses sévères). Ces phénomènes ont été particulièrement fréquents au cours de la dernière décennie, tout comme les jours d'orage.



**Figure 14 : Évolution des précipitations cumulées annuelles (mm/an) des stations de Houari Boumediene et port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA**

Selon la Figure 15, les périodes les plus pluvieuses dans la wilaya d'Alger correspondent aux saisons hivernales et automnales (novembre, décembre, janvier, février) où le cumul maximal des précipitations mensuelles, dans la période 1981-2021, a été enregistré dans le mois de novembre (presque 100 mm/mois pour la station du port d'Alger et environ 60 mm/mois pour celle de Houari Boumediene). Les précipitations cumulées mensuelles les plus basses ont été enregistrées en été durant le mois de juillet (environ 5 mm/mois).



**Figure 15 : Climatologie des précipitations cumulées mensuelles (mm/mois) des stations de Houari Boumediene et port d'Alger pour la période 1981-2021 selon les données de la NASA**

## 2.4 Hydrographie de la wilaya d'Alger

La wilaya d'Alger comprend plusieurs bassins versants avec plusieurs affluents qui les drainent en formant un réseau hydrographique dense. Parmi les oueds de la Wilaya : oued Djer, oued Mazafran, oued Beni Messous, oued Kniss, oued Koriche, oued El Harrach, oued Smar, oued El Hamiz, oued Boureah et oued Reghaïa.

Le phénomène de ruissèlement du cours d'eau peut être permanent ou temporaire. Les crues soudaines générées sur les oueds non permanents sont plus dangereuses et dévastatrices. Ces inondations diffèrent d'une inondation causée par un débordement de cours d'eau (oued permanent), elle se produit suite à des apports massifs d'eaux pluviales dans des oueds asséchés (oueds temporaires) souvent urbanisés.

## 2.5 Historique des inondations en Algérie

D'après le Journal Officiel de la République Algérienne démocratique et populaire (2004), le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix risques majeurs présents sur le territoire et cités par la loi 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. Il est en deuxième place après les séismes et les risques géologiques dans le classement national des risques majeurs, vu l'ampleur des dégâts matériels et immatériels engendrés (NOURI et al., 2016).

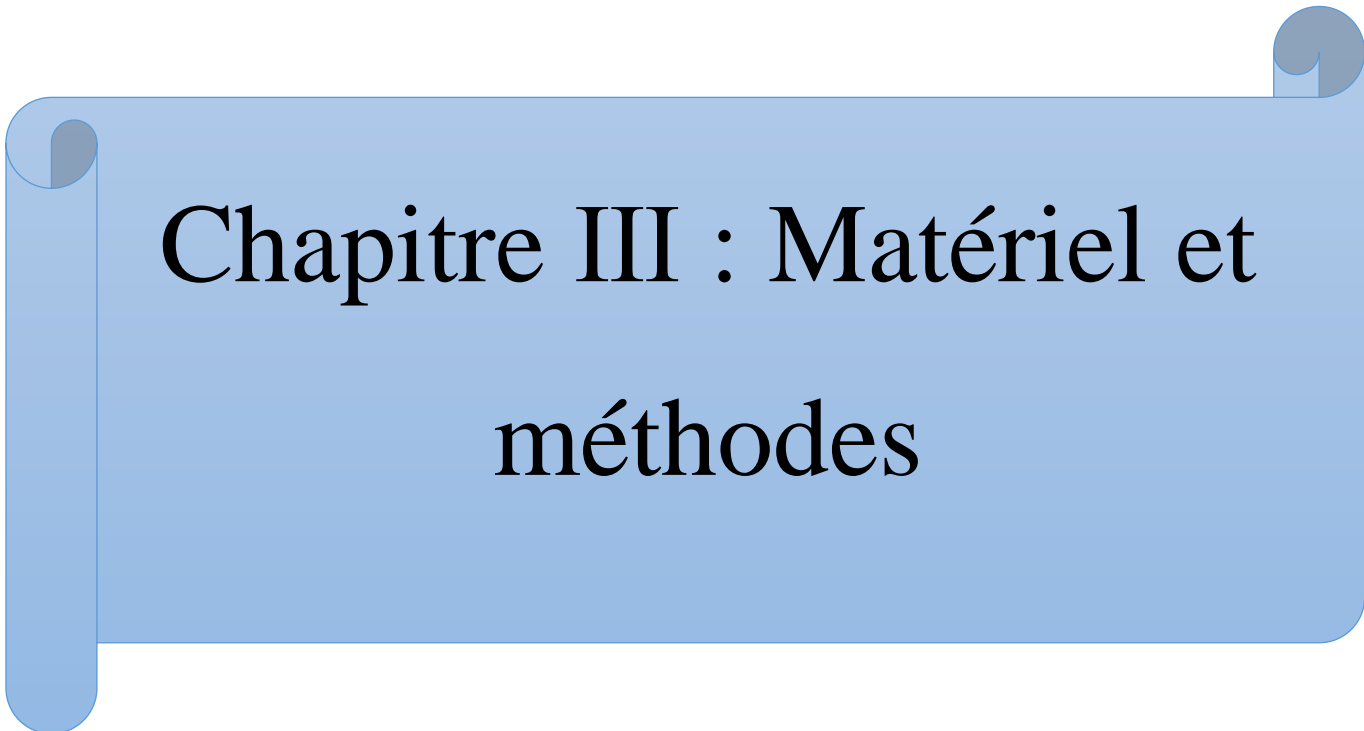
De grandes inondations engendrées par des pluies intenses et des crues d'oueds généralisées sur de grands bassins versants ont touché plusieurs régions de l'Algérie atteignant parfois l'ampleur d'une catastrophe nationale telles que : les inondations de 1973 affectant l'Est du pays, les inondations de 1974 des bassins versant de l'Algérois et de la Sebaou, celle du 22 octobre 2000 touchant l'Ouest du pays causant plus de 24 décès et les pluies diluviennes du 1<sup>er</sup> octobre 2008 qui ont fait dangereusement monter les cours d'eau dans la région de Ghardaïa en causant plusieurs dégâts matériels et des pertes humaines (TABET HELAL et al., 2012; ELFETNI, 2019).

L'inventaire des inondations au niveau de la wilaya d'Alger pour la période allant de 1946 à 2021 révèle qu'il n'existe pas de régions prémunies contre ce risque et que ces évènements sont

imprévisibles dans le temps et dans l'espace. La wilaya d'Alger a connu des inondations assez remarquables et dévastatrices au cours de l'histoire.

Selon le répertoire des inondations d'Alger recensé par la Direction Générale de la Protection Civile (Annexe 1), la première inondation enregistrée qui a frappé Alger a eu lieu le 02 février 1946 au niveau du secteur de Sidi Moussa (Chebli) dont la cause était la crue d'oued Djemaa. D'autres inondations ont eu lieu dans les années 1954, 1973 et 1974 au niveau de la zone industrielle d'El Harrach et Oued Smar, causées également par une crue d'oued El Harrach et oued Smar. Le 26 janvier 1992, une inondation a touché le territoire de la wilaya suite à des évènements de pluies et de crue avec 361 familles sinistrées. Le 10 novembre 2001, Alger a connu la plus terrible inondation de son histoire (la crue centennale), au niveau de Bab El Oued, Oued Koriche et Hammamet qui a fait 870 morts et plus de 10000 familles sinistrées. Par ailleurs, au niveau d'autres quartiers de Bab El Oued, des pluies exceptionnelles et intenses de 211 mm pendant 24 heures ont provoqué la crue d'Oued M'kecel qui a causé 723 morts, 1300 familles sinistrés et 311 blessés dont la hauteur de l'eau est arrivée jusqu'à 8 mètres par endroits.

Presque chaque année, Alger enregistre des inondations suite à de fortes chutes de pluies et des crues d'oueds. Le 23 octobre 2021, Alger a connu 23 inondations dans des communes différentes au sein de la wilaya où les pluies enregistrées sont arrivées à 216 mm durant quatre heures.



# Chapitre III : Matériel et méthodes

### 3 Chapitre III : Matériel et méthodes

Le but principal de la présente étude consiste à étudier les inondations de la wilaya d'Alger et leur variabilité temporelle. Pour ce faire, ce mémoire s'est centré dans un premier temps sur l'étude de la morphométrie du terrain de la wilaya, qui a permis de reconstruire le réseau hydrographique d'Alger avec ses principaux cours d'eau et leurs bassins versants.

Afin de mieux comprendre le phénomène des inondations, une analyse multicritères (méthode AHP- Analytic Hierarchy Process) du facteur causal des inondations a été aussi effectuée en utilisant plusieurs paramètres afin de cartographier la vulnérabilité de la wilaya d'Alger face aux inondations. Les paramètres considérés dépendent de la topographie de la zone d'étude (hypsométrie, pente, etc.) ainsi que de l'occupation du sol et des précipitations.

#### 3.1 Logiciels utilisés

Les logiciels utilisés pour effectuer ce mémoire :

- **ArcGIS 10.5** : est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, visualiser, analyser, diffuser et cartographier des informations géographiques. Il s'agit d'une suite de logiciels d'information géographique (SIG) développés par la société Américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute). Il est composé de plusieurs modules, dont : ArcCatalog pour la gestion et la navigation dans les bases de données, ArcMap pour analyser les données et réaliser des produits cartographiques et ArcToolbox qui est une collection d'outils de géotraitements pour analyser, mettre à jour et convertir des données.
- **ENVI 5.1** : est un logiciel commercial complet de visualisation et de traitements d'images issues de la télédétection développé par la société Américaine Harris Geospatial. Toutes les méthodes de traitement d'images de correction géométriques, radiométriques, de classification et de mise en page cartographique sont présentes. D'autres outils relatifs à la visualisation et à la modélisation de données topographiques sont aussi disponibles.

- **SNAP 8** : Sentinel Application Platform est un logiciel de traitement d'images satellitaires développé par l'ESA (European Space Agency). Il est fait principalement pour l'exploitation des produits Sentinels.
- **SeaDAS** : est un logiciel complet pour le traitement, l'affichage, l'analyse et le contrôle de la qualité des données de la couleur de l'océan développé par la NASA (National Aeronautics and Space Administration), il est aussi applicable à de nombreuses analyses de données satellitaires.

### 3.2 Etude du réseau hydrographique de la wilaya d'Alger

Dans le domaine de l'hydrographie, un cours d'eau principal prend généralement sa source en hauteur et se jette dans un autre cours d'eau ou dans une mer, il s'agit de son exutoire, mais avant de rejoindre son exutoire il recueille les eaux d'autres cours d'eau appelés affluents. On appelle « bassin versant » un territoire géographique bien défini qui correspond à la totalité de la surface topographique drainée naturellement par un cours d'eau et ses affluents. Les limites qui séparent deux bassins versants sont appelées « lignes de partage des eaux ».

L'hydrographie de la wilaya d'Alger étant un paramètre décisif dans la vulnérabilité de la zone face aux inondations, cette partie a pour but de cartographier les bassins versants des principaux oueds traversant la wilaya (oued Beni Messous, oued Koriche, oued El Harrach, oued El Hamiz et oued Reghaïa) et de présenter quelques-unes de leurs caractéristiques physiques.

#### 3.2.1 Présentation des données utilisées

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT), correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique en représentant la surface théorique du sol. Les MNT considérés dans ce travail sont au mode Raster (cellules) et se déclinent comme suit :

- Un MNT de 5 m de résolution spatiale a servi à l'extraction du bassin versant de Beni Messous (données fournies par un bureau d'étude privé).
- Un MNT de 30 m de résolution spatiale de type SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) a servi à l'extraction du réseau hydrographique du reste de la wilaya d'Alger. Ce MNT a été téléchargé à partir du site de l'USGS <sup>4</sup> (United State

---

<sup>4</sup> Lien USGS : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Geological Survey). Deux Rasters ont été nécessaires afin de couvrir l'intégralité de la zone d'étude. De ce fait, une étape de mosaïckage a été nécessaire afin d'assembler les deux MNT (la partie Est et la partie Ouest de la wilaya d'Alger et de ses wilaya limitrophes) en un seul MNT. Ce processus a été réalisé sur ENVI : *Toolbox > mosaicking > seamless mosaic*

### 3.2.2 Etapes de travail

La reconstitution du réseau hydrographique de la Wilaya d'Alger ainsi que de ses différents bassins versants est passée par plusieurs étapes :

- **Digitalisation des exutoires :** Les exutoires des différents oueds ont été digitalisés (shapefile point) en utilisant le font de carte disponible sur ArcMap : *add basemap > sélection de imagery ou imagery with labels.*
- **L'élimination des artéfacts du MNT**
  - Sur ArcToolbox: *spatial analyst tools > hydrology > fill.*
- **La détermination de la direction du flux d'écoulement**
  - Sur ArcToolbox: *spatial analyst tools > hydrology > flow direction.*
- **Détermination des zones d'accumulation d'eau**
  - Sur ArcToolbox: *spatial analyst tools > hydrology > flow accumulation.*
- **Reconstitution du réseau hydrographique**
  - Sur ArcToolbox : *spatial analyst tools > conditional > con.*
- **Détermination de l'ordre des cours d'eau (6 catégories)**
  - Sur ArcToolbox: *spatial analyst tools > hydrology > stream order.*
- **Transformation du réseau hydrographique en vecteur**
  - Sur ArcToolbox : *spatial analyst tools > hydrology > stream to feature*

Un vecteur linéaire du réseau hydrographique a été obtenu. Le champ « *grid code* » de sa table attributaire représente l'ordre du cours d'eau selon la classification de STRAHLER (1952) qui s'agit d'une manière de hiérarchisé l'ensemble des branches du réseau en attribuant à chacune une valeur entière qui caractérise son importance.

- **Délimitation du bassin versant :**

- Sur ArcToolbox : *spatial analyst tools* > *hydrology* > *watershed*
- **Transformation du fichier obtenu du format raster au format vecteur**
  - Sur ArcToolbox : *conversion tools* > *from raster* > *raster to polygon*
- **Extraction du réseau hydrographique du bassin versant**
  - Sur ArcToolbox : *analysis tools* > *extract* > *clip*
- **Calcul de quelques paramètres morphométriques**

Les paramètres morphométriques ont aidé à présenter les caractéristiques physiques de chaque bassin versant :

- ✓ Calcul de la superficie et du périmètre des bassins versants : en utilisant l'outil *calculate geometry*.
- ✓ Calcul de la longueur du cours d'eau principal à l'aide de l'outil *calculate geometry*.
- ✓ Calcul de la largeur moyenne des bassins versants : à l'aide de l'outil *field calculator*

$$\text{Largeur moyenne} = \frac{\text{Superficie du bassin versant}}{\text{Longueur du cours d'eau principal}} \dots (1)$$

- ✓ **Calcul de l'indice de Horton** : C'est un indice de la forme du bassin versant qui exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal selon HORTON (1932). Il se définit comme suit :

$$K_H = \frac{A}{L^2} \dots (2)$$

Avec :

A : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>)

L : longueur du cours d'eau principal (km)

Quand l'indice est inférieur à 1, le bassin versant est de type allongé, et quand il est supérieur à 1, il est de forme ramassée.

- ✓ **Calcul de l'indice de Gravelius** : La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydro-gramme résultant d'une pluie donnée. Cette caractéristique est donnée par l'indice de GRAVELIUS (1914) ou de compacité qui se définit comme suit :

$$K_G = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} \dots (3)$$

Avec :

P : périmètre du bassin versant (km)

A : superficie du bassin versant (km<sup>2</sup>)

Quand l'indice est proche de 1, le bassin versant est de forme quasiment circulaire, quand il est supérieur à 1, il est de forme allongée.

### 3.3 Paramètres de vulnérabilité de la wilaya d'Alger

Pour cartographier les niveaux de vulnérabilité dans la wilaya d'Alger face aux inondations, plusieurs cartes thématiques ont été établies. En effet, la wilaya d'Alger a été caractérisée selon huit volets, schématisés sur la Figure 16.

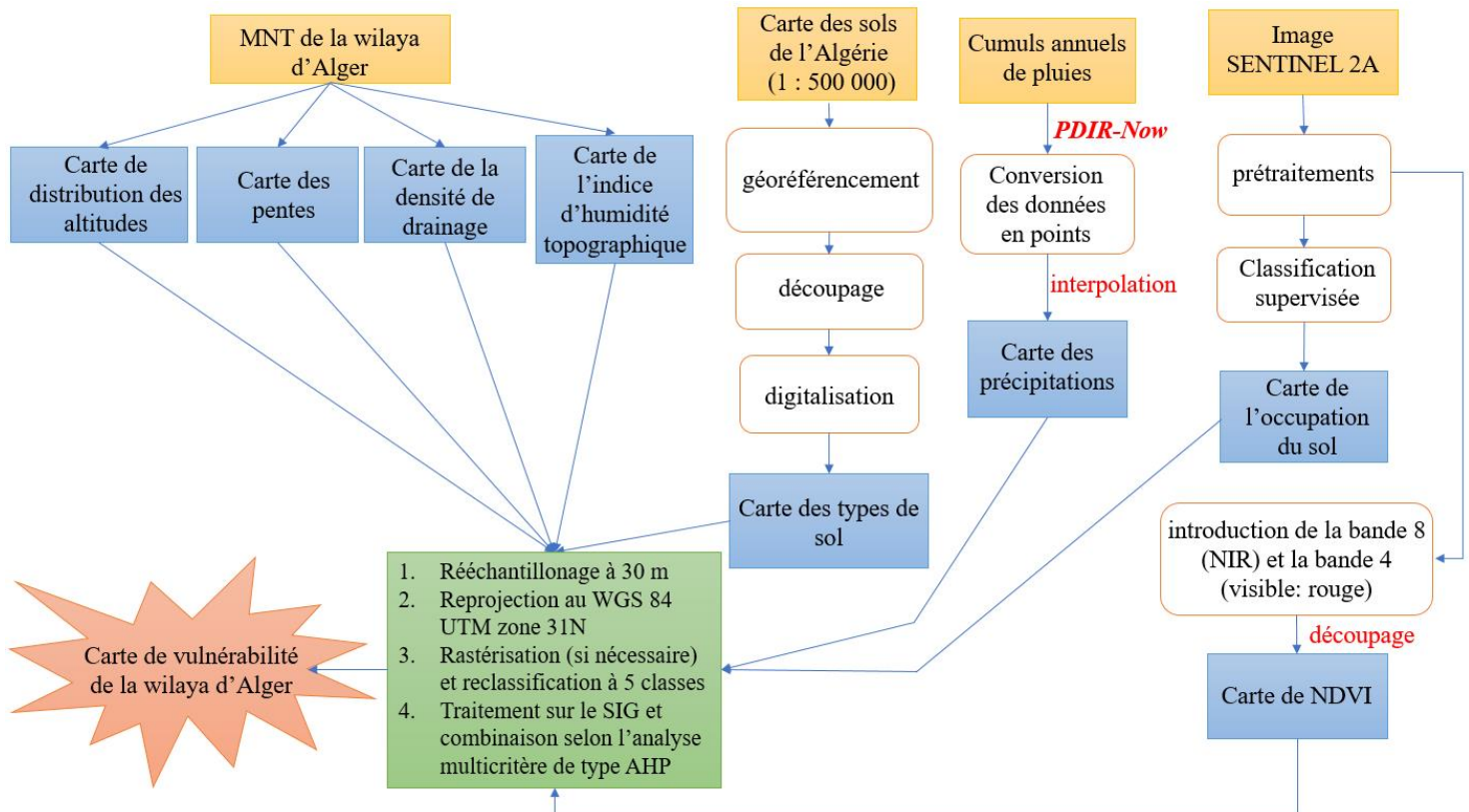


Figure 16 : Organigramme de réalisation de la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations

### 3.3.1 Carte de distribution des altitudes

La carte de distribution des altitudes fait partie des paramètres cruciaux pour la réalisation de notre carte de vulnérabilité car elle permet de visualiser les différentes zones d'altitude de notre zone d'étude : Les zones avec des altitudes importantes étant moins vulnérables aux inondations.

Pour réaliser cette carte, le MNT de 30 m de résolution spatiale a été utilisé afin de classifier l'image, découpé selon le contour de la wilaya, en 5 classes : *Toolbox > spatial analyst tools > reclass > reclassify*. Une symbologie adéquate a été appliquée par la suite afin de la représenter dans une carte.

### 3.3.2 Carte des pentes

La pente est un outil très important dans les études des inondations, car elle nous permet de connaître les zones où les pentes sont fortes (écoulement rapide des eaux) ou faibles (stagnation des eaux). C'est un paramètre déterminant dans l'estimation de la vitesse d'écoulement dans les différents bassins versants lors des épisodes de précipitations, qui peuvent provoquer des inondations.

Les pentes de la wilaya d'Alger ont été cartographiées en utilisant le MNT de 30 m de résolution spatiale, décrit précédemment. Ceci passe d'abord par une extraction de notre zone d'étude (wilaya d'Alger) puis par un géotraitement pour calculer le degré de pente du terrain :

- *Toolbox > spatial analyst tools > extraction > extraction by mask*
- *Toolbox > spatial analyst tools > surface > slope*

### 3.3.3 Carte de la densité de drainage

Selon (HORTON, 1932), la densité de drainage est un excellent indicateur de la perméabilité de la surface d'un bassin de drainage. MOGLEN et al. (1998) expliquent que la densité de drainage n'est pas une simple fonction des précipitations, mais c'est une expression de l'interrelation du climat, de la géologie du sol et de la végétation. Ils affirment aussi que la densité de drainage définit la mesure dans laquelle les cours d'eau dissèquent la topographie. C'est une mesure de la texture du réseau et indique l'équilibre entre le pouvoir érosif du ruissellement et la

résistance des sols et des roches de surface<sup>5</sup>. Autrement dit, la densité de drainage dépend à la fois du climat et des caractéristiques physiques du bassin versant. L'imperméabilité du sol (difficulté d'infiltration) et le type de roche sous-jacente affectent le ruissèlement dans un bassin versant car un sol imperméable ou un substratum rocheux exposé entrainera une augmentation du ruissèlement des eaux de surface et donc des cours d'eau plus fréquents. Les régions accidentées ou celles à relief élevé auront également une densité de drainage plus élevée que les autres bassins versants si les autres caractéristiques du bassin sont les mêmes<sup>6</sup>.

La densité de drainage se calcule comme suit (HORTON, 1932) :

$$D_d = \frac{R}{A}$$

Avec :

$D_d$  : densité de drainage en (km/km<sup>2</sup>)

R : longueur du réseau hydrographique en km

A : superficie du bassin versant en km<sup>2</sup>

En se basant toujours sur le MNT de 30 m de résolution spatiale, décrit précédemment, la carte de la densité de drainage a été réalisée sur ArcMap comme suit :

- ***Toolbox > spatial analyst tools > hydrology > fill*** (cet outil permet de supprimer les petites imperfections dans les données raster).
- ***Spatial analyst tools > hydrology > flow direction***
- ***Spatial analyst tools > hydrology > flow accumulation***
- ***Spatial analyst tools > conditional > con***
- ***Spatial analyst tools > hydrology > stream order***
- ***Spatial analyst tools > hydrology > stream to feature***
- ***Spatial analyst tools > density > line density***

---

<sup>5</sup>[https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/shared\\_folder/projects/DIS4ME/indicator\\_descriptions/drainage\\_density.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/indicator_descriptions/drainage_density.htm)

<sup>6</sup>[https://stringfixer.com/fr/Drainage\\_density](https://stringfixer.com/fr/Drainage_density)

### 3.3.4 Carte de l'indice d'humidité topographique (Topographic Wetness Index TWI)

L'indice d'humidité topographique a été développé par BEVEN et KIRKBY (1979) dans le modèle de ruissèlement TOPMODEL (acronyme de TOPographic based MODEL) qui permet de prédire spatialement les réponses des bassins versants. Ce TOPMODEL est articulé autour de deux idées centrales, à savoir que le ruissèlement se produit sur des surfaces contributives variables d'une part, et d'autre part, que la topographie influence la manière dont se produit le ruissèlement. Le TWI est défini par BEVEN and KIRKBY (1979) comme :

$$\ln \frac{a}{\tan b} \dots (4)$$

Où : « **a** » est la zone de pente ascendante passant par un certain point par unité de longueur de contour et « **tanb** » est la pente locale en radians.

Le TWI a été beaucoup utilisé pour étudier les effets d'échelle spatiale sur les processus hydrologiques (BEVEN et al., 1988; FAMIGLIETTI and WOOD, 1991; SIVAPALAN and WOOD, 1987; SIVAPALAN et al., 1990) ainsi que pour identifier les voies d'écoulement hydrologique pour la modélisation géochimique (ROBSON et al., 1992). Cet indice, également connu sous le nom d'indice topographique composé, est un indicateur qui mesure le potentiel où l'eau a tendance à s'accumuler. Une valeur d'indice élevée indique un potentiel élevé d'eau accumulée en raison de la faible pente. En permettant de quantifier le contrôle topographique des processus hydrologiques, cet indice est un outil unique qui permet d'identifier les domaines et les zones affectée par les inondations causées par les précipitations (BEVEN and KIRKBY, 1979) .

En utilisant le MNT de la wilaya d'Alger de 30 m de résolution spatiale, les étapes de travail sur le logiciel ArcMap se résument comme suit :

- *Toolbox > spatial analyst tools > hydrology > fill*
- *Toolbox > spatial analyst tools > flow direction*
- *Toolbox > spatial analyst tools > flow accumulation*
- *Toolbox > spatial analyst tools > surface > slope (en degré)*
- *Toolbox > spatial analyst tools > map algebra*  
  - > raster calculator (calcul des radians de la pente : (slope en degré\*1,570796)/90)*

- > *raster calculator (calcul de la tangente de la pente :  $\tan(\text{slope})$ , 0,001)*
- > *raster calculator (calcul de l'accumulation du débit mise à l'échelle :  $(\text{flow accumulation} + 1) * \text{taille de la cellule}$ )*
- > *raster calculator (calcul de l'indice de l'humidité topographique :  $\ln(\text{flow accumulation mise à l'échelle} / \text{tangente de la pente})$ ).*

### 3.3.5 Carte de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger

La wilaya d'Alger subit une artificialisation intense du sol naturel par des aménagements qui peuvent entraîner une imperméabilisation partielle ou totale lors des pluies intenses. Pour le démontrer, une étude de l'artificialisation du sol de la wilaya d'Alger a été menée en utilisant la technique de la classification supervisée.

Classifier une image en télédétection consiste à rassembler l'ensemble des pixels de l'image en un nombre limité de classes correspondant aux grands éléments structuraux de l'image, c'est donc établir une cartographie de l'image en s'appuyant sur les valeurs radiométriques des pixels. Les méthodes de classification les plus communes peuvent être séparées en deux grandes catégories : la classification supervisée et non supervisée (DERDJINI, 2017). Les recherches sur les extractions de l'occupation du sol à l'aide d'images satellites utilisent pour beaucoup, les méthodes de classification supervisées basées sur le pixel, il s'agit d'une technique qui part du principe que l'on a une connaissance du terrain sur lequel nous travaillons. La méthode consiste à choisir différents échantillons d'apprentissage représentatifs des classes visées, puis d'appliquer un algorithme classificateur, qui selon certaines règles statistiques va attribuer chaque pixel de l'image à une classe définie (DERDJINI, 2017). Ce type de classification donne un résultat rapide et généralement assez efficace pour se rendre compte des changements de l'occupation du sol.

### 3.3.5.1 Présentation de l'image utilisée

La classification a été réalisée sur deux images du satellite Sentinel 2A (10 m de résolution spatiale<sup>7</sup>) de niveau 2<sup>8</sup> de l'année 2021 téléchargées à partir du site de Copernicus Open Access Hub<sup>9</sup>. Les caractéristiques des images sont synthétisées dans le Tableau 1.

*Tableau 1 : Caractéristiques de l'image utilisée*

Satellite	Sentinel 2A
Agence spatiale	ESA (European Space Agency)
Capteur	MSI (Multi Spectral Instrument)
Date et heure d'acquisition	18/07/2021 à 10 h 30 min
Couverture nuage	Très faible
Niveau de traitement	Level 2A
Résolution spatiale	10 m
Résolution spectrale <sup>10</sup>	13 bandes spectrales
Résolution temporelle <sup>11</sup>	05 jours
<b>Bandes spectrales et leurs résolutions spatiales respectives</b>	Bande 1 : Aérosol côtier (443 nm) 60 m Bande 2 : Visible (bleu : 490 nm) 10 m Bande 3 : Visible (vert : 560 nm) 10 m Bande 4 : Visible (rouge : 665 nm) 10 m Bande 5 : NIR (Near InfraRed : 705 nm) 20 m Bande 6 : NIR (Near InfraRed : 740 nm) 20 m Bande 7 : NIR (Near InfraRed : 783 nm) 20 m Bande 8 : NIR (Near InfraRed : 842 nm) 10 m Bande 8A : NIR étroit (Near InfraRed narrow : 865 nm) 20 m Bande 9 : Water vapor (vapeur d'eau : 945 nm) 60 m Bande 11 : SWIR (Short Wave InfraRed : 1610 nm) 20 m Bande 12 : SWIR (Short Wave InfraRed : 2190 nm) 20 m

<sup>7</sup> La résolution spatiale désigne la taille de l'unité de mesure minimale sur la surface terrestre correspondant au pixel de l'image. Elle s'exprime en unité de longueur (centimètres, mètres, kilomètres) ou en unité angulaire (degrés, minutes, secondes) (BAYOUDH, 2013).

<sup>8</sup> Des images de niveau 2 sont des images ayant subi des corrections atmosphériques (correction du signal électromagnétique reçu par le satellite par rapport aux modifications de ce dernier par les composantes de l'atmosphère).

<sup>9</sup>Lien : <https://scihub.copernicus.eu/>

<sup>10</sup> La résolution spectrale correspond au nombre et à la largeur des bandes spectrales (appelée aussi canaux) dans lesquelles est mesurée l'énergie électromagnétique reçue par le capteur (BAYOUDH, 2013).

<sup>11</sup> La résolution temporelle caractérise la capacité du satellite et de ces instruments à répéter des mesures de la même zone géographique. Elle est exprimée par la durée entre deux mesures de la même zone (en nombre de jours) ou par une fréquence d'acquisition (en nombre d'images par jours) (BAYOUDH, 2013).

### 3.3.5.2 Etapes de travail

Quelques prétraitements ont été nécessaires à l'image SENTINEL 2 afin de la préparer à l'étude de l'occupation du sol :

- **Ouverture des images** : sur le logiciel SNAP :
  - *File > import > optical sensors > Sentinel-2 > S2-MSI L2A*
- **Ré-échantillonnage (resampling)** : Afin de mettre toutes les bandes spectrales nécessaires à notre étude à une même résolution spatiale de 10 m, un ré-échantillonnage des différentes bandes a été réalisé sur le logiciel SNAP :
  - *Raster > geometric operations > resampling > resampling parameters > by pixel resolution : 10 m*
- **Subset** : un découpage grossier de la zone d'intérêt a été réalisé par la suite afin de réduire la taille des deux images considérées et d'optimiser le temps de traitement des images. Sur le logiciel SNAP :
  - *Raster > subset*
- **Mosaïckage** : Après le ré-échantillonnage et le subset des deux images (partie Est et Ouest), un mosaïckage a été nécessaire afin d'avoir une seule image sur laquelle la classification supervisée sera réalisée. Sur le logiciel SNAP :
  - *Raster > geometric > mosaicking*
- **Découpage de l'image** : Afin d'extraire seulement la zone l'étude, l'image résultante a été découpée selon un vecteur correspondant aux limites administratives de la wilaya d'Alger fourni par l'INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection).  
 Pour plus de précision, le vecteur a été édité en digitalisation manuelle, sur le logiciel ArcGIS, le trait de côte de la wilaya d'Alger en se basant sur l'image satellitaire Sentinel 2A. Le résultat est présenté sur l'Annexe 2.  
 Sur le logiciel ENVI, la découpe a été effectuée comme suit :
  - *Toolbox > regions of interest > subset data from ROIs*
- **Classification supervisée** : Sur ENVI :
  - *Toolbox > classification > classification workflow > use training data*

- *Création de cinq classes : urbanisations (739 échantillons), végétations (610 échantillons), terres agricoles (102 échantillons), sols nus (73 échantillons) et eau (177 échantillons) > algorithm : Maximum Likelihood Classification*

Un calcul des superficies et pourcentages de chaque classe a été effectué par la suite sur le logiciel ArcGIS.

### 3.3.6 Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

Le NDVI quantifie la végétation en mesurant la différence entre le proche infrarouge (que la végétation reflète fortement) et la lumière rouge (que la végétation absorbe). Il est calculé par la formule suivante (ROUSE et al., 1974) :

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \dots (5)$$

Où « **NIR** » et « **Red** » sont la réponse spectrale dans une bande du proche infrarouge et une bande du rouge, respectivement. Le NDVI est toujours compris entre -1 et +1. Lorsque les valeurs sont négatives, il est fort probablement que ce soit de l'eau. D'un autre côté, si la valeur est proche de +1, il y a de forte chance qu'il s'agisse de feuilles vertes denses. Mais lorsque le NDVI est proche de zéro, il s'agit de zones urbanisées ou de zones sans végétation (ROUSE et al., 1974).

Cet indice permet de déterminer la vitalité et la santé de la végétation en mesurant la teneur en chlorophylle des plantes via des capteurs embarqués sur des satellites ou des drones GAUSMAN (1985).

C'est un indice important dans notre étude car la végétation permet de lutter contre le ruissellement en augmentant l'infiltration de l'eau dans le sol, elle permet de retenir les eaux excessives et de réduire les dégâts en cas d'inondation.

Pour réaliser la carte NDVI, l'image satellitaire Sentinel 2A de 10 m de résolution spatiale (niveau 2) de l'année 2021 a été utilisée. Sur cette image, le NIR (proche infrarouge) correspond à la bande spectrale n°8 et le RED (rouge) correspond à la bande 4 :

- Introduction de la bande 8 (NIR) et la bande 4 (visible : rouge) de l'image Sentinel 2A sur ArcMap :

**Toolbox > spatial analyst tools > extraction > extract by mask (la bande 8 et la bande 4 selon le vecteur de la wilaya d'Alger)**

- **Toolbox > spatial analyst tools > map algebra > raster calculator :  $(B8 - B4) / (B8 + B4)$**

### 3.3.7 Carte des types de sol

La cartographie des types de sols est très importante pour la mise en œuvre correcte d'une gestion durable de l'utilisation des terres. La réalisation de la carte des types de sol va nous aider à identifier les types de sol de la wilaya d'Alger afin de connaître les zones qui sont imperméables ou pas à l'eau en cas d'inondations.

Pour ce faire, deux « Cartes des sols de l'Algérie » à une échelle de 1 :500 000 ont été utilisées afin de présenter les types de sol de la wilaya d'Alger. Ces cartes ont été dressées, héliogravées et publiées par le Service Géographique de l'Armée en 1927, complété en 1949.

- Un géoréférencement des deux cartes a été effectué sur le logiciel ArcMap en leur attribuant le système de coordonnées géographiques « Nord Sahara 1959 »
- La zone d'intérêt de chaque carte a été découpée en utilisant l'outil « Analyse d'image » de ArcMap : **windows > image analysis > processing > clip** afin de les mosaïquer comme suit : **ArcToolbox > data management tools > raster > raster dataset > mosaic to new raster**
- L'image résultante a été coupée selon le vecteur de la wilaya d'Alger : **ArcToolbox > spatial analyst tools > extraction > extract by mask**
- Les différents types de sol ont été par la suite digitalisés par un vecteur de type polygone.

Afin de mieux comprendre la nature du sol de notre zone d'étude, les formations géologiques de la wilaya d'Alger ont aussi été digitalisées à partir d'une carte géologique de l'Algérie à une échelle de 1:500 000, réalisée par le Service géologique de la SNREPAL (société nationale de recherches de pétrole en Algérie).

### 3.3.8 Carte des précipitations

Les précipitations sont une composante fondamentale dans cette étude, car la connaissance de l'apport d'eau au sol est essentielle pour comprendre l'état des réserves en eau du sol et le régime des cours d'eau.

La carte de précipitation a été réalisée en téléchargeant d'abord des cumuls annuels de précipitations sur une période de 21 ans (de 2001 à 2021) à partir de la base de données *PDIR-Now (PERSIANN Dynamic Infrared-Rain Rate)*. Il s'agit d'un produit mondial de précipitations déduites par mesures satellitaires, de haute résolution spatiale (0,04°) en temps réels, développé par le centre d'hydrométéorologie et de télédétection (CHRS<sup>12</sup>) de l'université de Californie à Irvine (UCI). Une moyenne de ces cumuls annuels a été calculée en introduisant la formule de calcul sur l'outil Math Band du logiciel SeaDAS.

- Sur ArcMap, une conversion des données en points a été effectuée avec : *ArcToolbox > conversion tools > from raster > raster to point*
- Une interpolation de ces points a été par la suite réalisée sur l'ensemble du territoire de la wilaya d'Alger : *ArcToolbox > spatial analyst tools > interpolation > spline*

### 3.4 Cartographie de la vulnérabilité aux inondations à l'aide de l'analyse multicritères

Afin d'élaborer la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations, nous avons suivi la méthode de l'Analyse Multicritères AHP (Analytic Hierarchy Process : processus d'hierarchie analytique). Cette méthode créée par SAATY (1991) à la « Wharton School (université de pennsylvanie, Philadelphie au États-Unis) », est une méthode d'analyse multicritères qui peut être utilisée dans la quantification des caractéristiques qualitatives, par le biais de production des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 100 %. La méthode est basée sur la comparaison des différentes caractéristiques, deux par deux (SAATY, 1987). À partir de la construction d'une matrice carrée (Annexe 3), on évalue l'importance relative d'une caractéristique par rapport à une autre, en utilisant pour cela une échelle adéquate. SAATY (1991) propose d'utiliser l'échelle indiquée dans le Tableau 2. Une fois que la matrice de comparaison est remplie, on calcule la valeur propre de chaque caractéristique et le vecteur propre lui

<sup>12</sup> Lien : <https://chrsdata.eng.uci.edu/>

correspondant. Le vecteur propre indique l'ordre de priorité ou la hiérarchie des caractéristiques étudiées. Ce résultat est important pour l'évaluation de la probabilité, puisqu'il sera utilisé pour indiquer l'importance relative de chaque critère opérant (RAMOS et al., 2014).

Plusieurs études ont utilisé cette méthode pour évaluer et cartographier le risque d'inondation dans différentes régions du monde tels que : le travail de DAS en 2018 sur le bassin versant de Vaitarna en Inde ; OUMA et TATEISHI en 2014 sur les zones urbaines en croissance au Kenya ; HAMMAMI et al. en 2019 sur la ville de Tunis; DANUMAH et al. en 2016 dans le district d'Abidjan à la Côte d'ivoire ; KITTIPONGVISES et al. en 2020 en Thaïlande.

Les caractéristiques retenues dans notre étude sont : Topographic Wetness Index (TWI), la distribution des altitudes, la pente, les précipitations, l'occupation du sol, le couvert végétal (NDVI), la densité de drainage et les types de sol (Annexe 3).

**Tableau 2 : Echelle proposée par SAATY (1991)**

Degré d'importance de chaque caractéristique	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux caractéristiques contribuent de la même façon à l'objectif
3	Importance modérée (faible importance d'une caractéristique par rapport à une autre)	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisent légèrement une caractéristique par rapport à une autre
5	Importance forte ou déterminante	L'expérience et l'appréciation favorisent fortement une caractéristique par rapport à une autre
7	Importance très forte	Une caractéristique est fortement favorisée et sa dominance est attestée dans la pratique
9	Importance extrême (absolue)	Les preuves favorisant une caractéristique par rapport à une autre est de l'ordre d'affirmation le plus élevé possible
2, 4, 6, 8	Valeurs associées à des jugements intermédiaires	Lorsqu'un compromis est nécessaire

La réalisation de la carte de vulnérabilité, sur le logiciel ArcMap, s'est faite sur plusieurs étapes :

- Attribution du même système de coordonnées projeté à toutes les couches (WGS 1984 UTM zone 31) : *ArcToolbox > data management tools > projections and transformations > raster > project raster*
- Ré-échantillonnage de toutes les couches à une même résolution spatiale (30 m) : *ArcToolbox > data management tools > raster > raster processing > resample*
- Toutes les couches ont été reclassées en 5 classes de susceptibilité d'inondation (Très faible, Faible, Modérée, Forte, Très forte) : *ArcToolbox > spatial analyst tools > reclass > reclassify*
- Pour produire la carte de vulnérabilité, une combinaison de toutes les couches a été réalisées (Annexe 4) sur : *ArcToolbox > spatial analyst tools > overlay > weighted overlay*, en ajoutant le poids de pondération de chaque critère. La carte finale divise la wilaya d'Alger en 5 classes de vulnérabilité (Très faible, Faible, Modérée, Forte, Très forte).

A blue scroll graphic with rounded corners and a vertical strip on the left side, resembling a rolled-up document. The text is centered on the scroll.

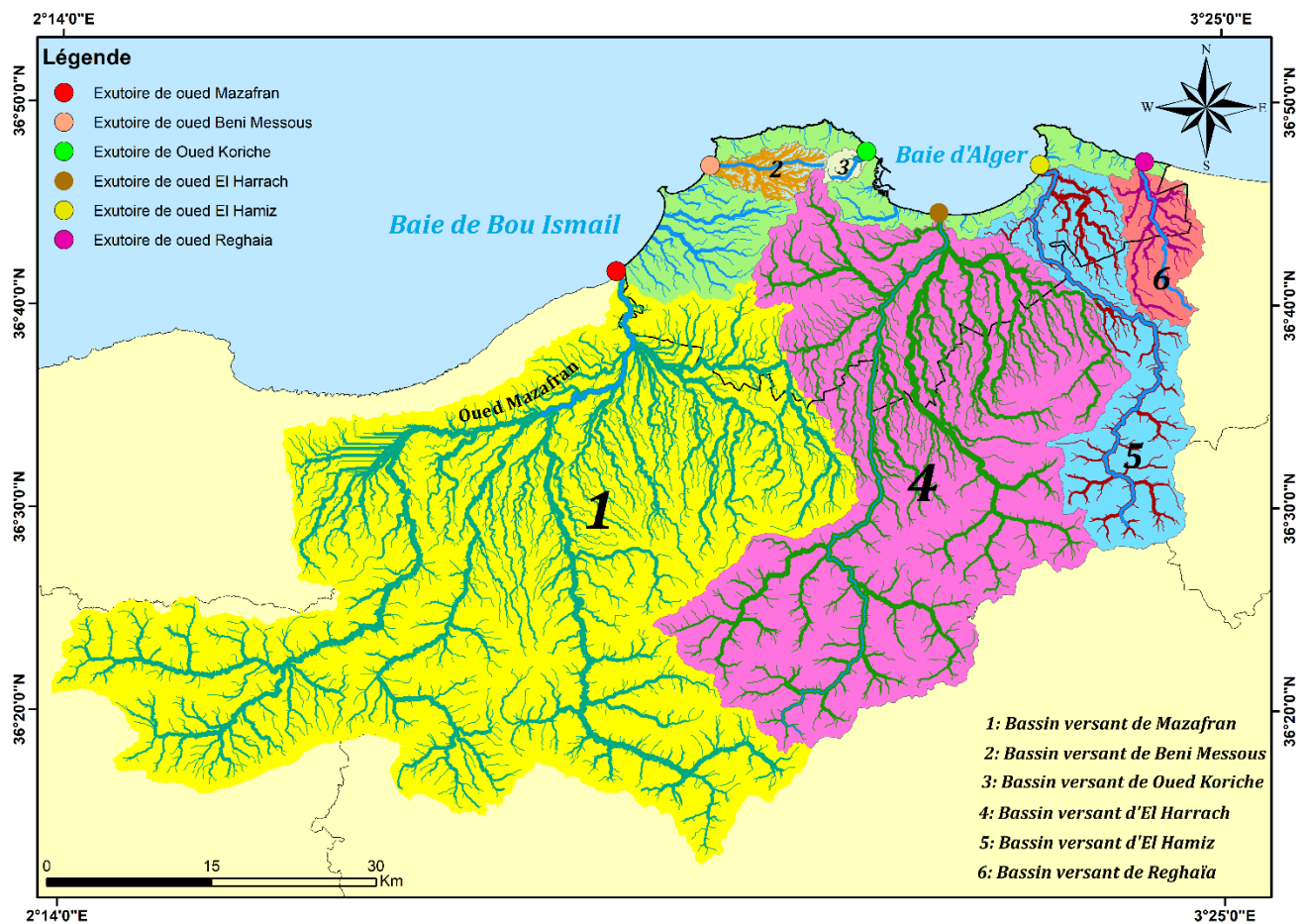
# Chapitre IV : Résultats et discussion

## 4 Chapitre IV : Résultats et discussion

Ce chapitre expose les résultats de la présente étude ainsi que leur interprétation.

### 4.1 Etude du réseau hydrographique de la wilaya d'Alger

La Figure 17 localise et délimite les principaux bassins versants de la wilaya d'Alger avec leurs contours et leurs réseaux hydrographiques, dont certains dépassent largement le périmètre de la wilaya : oued Mazafran, oued El Harrach, oued El Hamiz et oued Reghaïa. Le Tableau 3 résume les principales caractéristiques physiques des bassins versants de la wilaya.



**Figure 17 : Les principaux bassins versants de la wilaya d'Alger**

D'autres bassins versants plus réduits ou de moindre importance caractérisent le territoire de la wilaya d'Alger, notamment : oued Dra, oued Sidi Bougandoura, oued Bou Sagar et oued Boudahles.

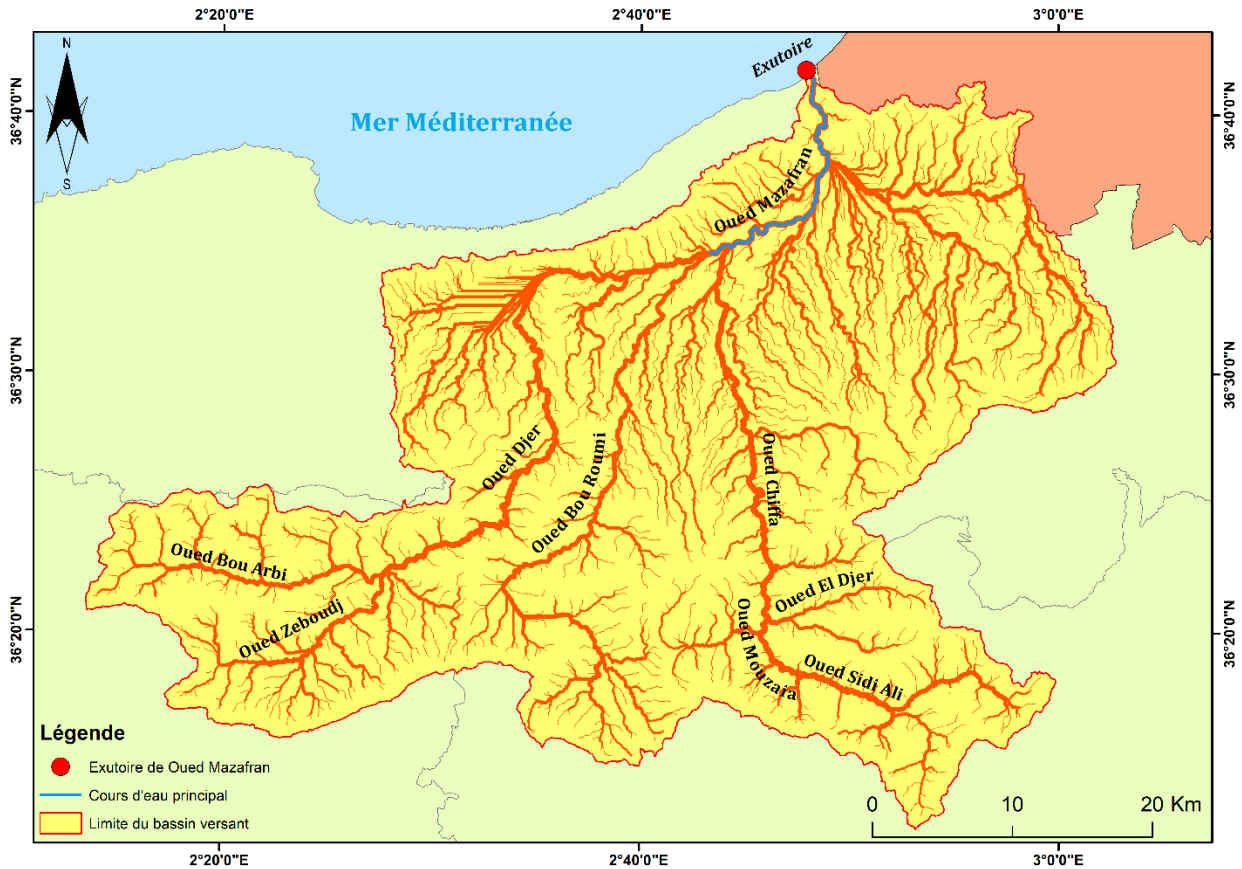
**Tableau 3 : Caractéristiques physiques des bassins versants des oueds d'Alger**

<b>Bassin versant</b>	<b>Oued Mazafran</b>	<b>Oued Beni Messous</b>	<b>Oued Koriche</b>	<b>Oued El Harrach</b>	<b>Oued El Hamiz</b>	<b>Oued Reghaïa</b>
<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>	1991,67	33,68	9,36	1159,08	275,79	81,19
<b>Périmètre (km)</b>	320,29	35,75	14,01	220,75	130,29	53,14
<b>Longueur du cours d'eau principal (km)</b>	22,46	11,61	5,34	67,17	52,72	17,22
<b>Largeur moyenne du bassin versant (km)</b>	88,66	2,90	1,75	17,25	5,23	4,72
<b>Indice de compacité de Horton (<math>K_H</math>)</b>	3,94	0,25	0,33	0,26	0,09	0,27
<b>Indice de Gravelius (<math>K_G</math>)</b>	2,00	1,72	1,28	1,82	2,20	1,65

#### 4.1.1 Bassin versant de l'oued Mazafran

Le bassin versant de l'oued Mazafran occupe la partie centrale de la plaine de la Mitidja, il représente une superficie d'environ 1991 km<sup>2</sup> et un cours d'eau principal de 22 km (Tableau 3). Il présente quelques affluents dans la partie Sud-Ouest de la wilaya d'Alger, et il résulte de la confluence de trois oueds importants : oued Chiffa, oued Bou Roumi et oued Djer (Figure 18).

Cependant, d'après EGIS EAU et al. (2013), les conditions d'inondabilité et la vulnérabilité sont considérées pour le moment comme relativement faibles puisque l'oued ne traverse pas beaucoup de zones urbanisées. Néanmoins, les terres agricoles caractérisant ce bassin versant, peuvent présenter une vulnérabilité considérable.

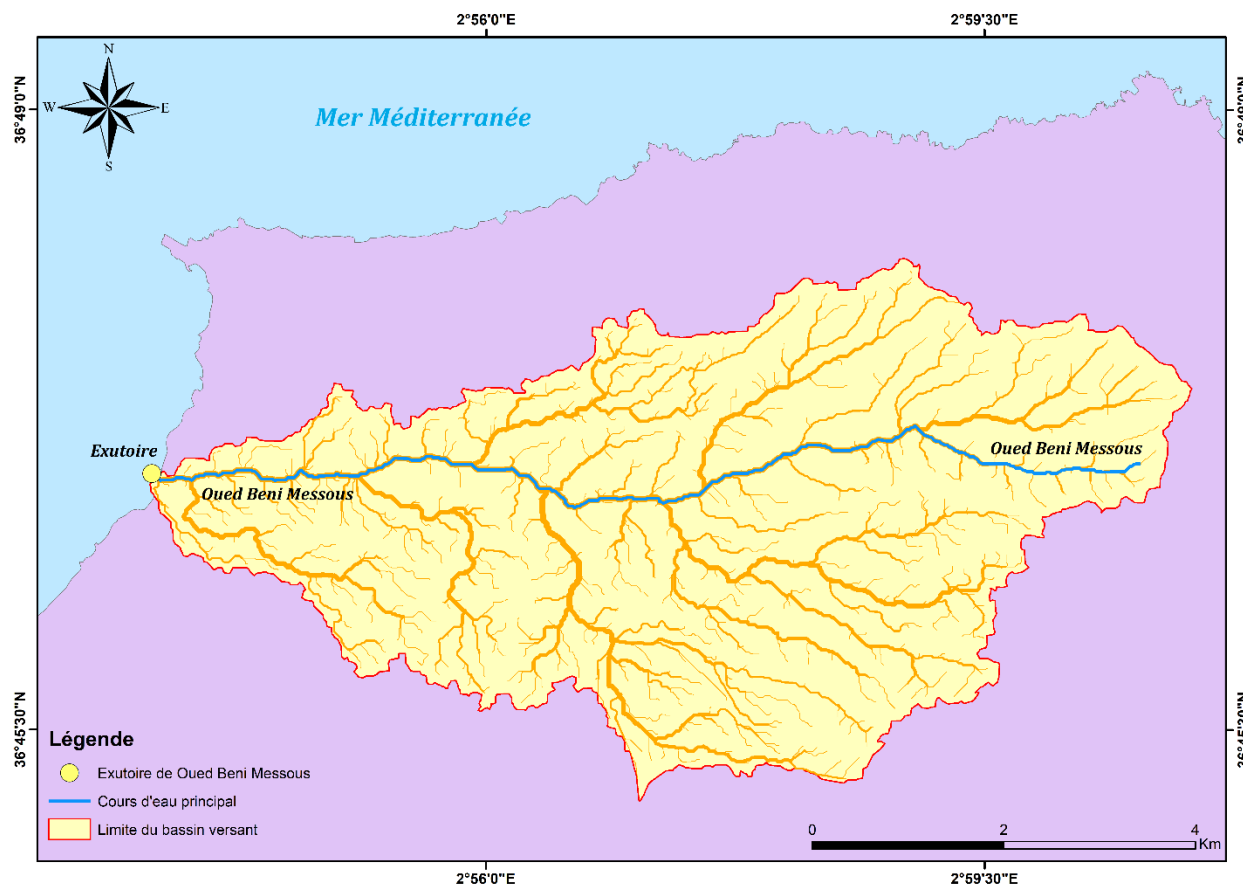


*Figure 18 : Bassin versant de l’oued Mazafran*

#### 4.1.2 Bassin versant de l’oued Beni Messous

L’oued Beni Messous (Figure 19), dont le cours d’eau principal s’étend sur 11 km, occupe la partie Ouest de la zone d’étude avec un bassin versant d’une forme allongée d’une superficie de près de 33 km<sup>2</sup> (Tableau 3). Il prend sa source à l’Est du massif de Bouzaréah et s’écoule vers l’Ouest, traversant les communes de Beni Messous et Cheraga. Ce bassin versant fait partie des unités hydrologiques contributives du massif de Bouzaréah. Son embouchure est au niveau d’une plage appelée « les dunes » qui fait partie de la baie d’El Djamila.

En aval, l’oued ne reçoit pas d’affluents importants et traverse de manière incisée et presque rectiligne les cultures d’Ain Benian. Les crêtes amont situées sur la commune de Bouzaréah et la commune de Beni Messous sont relativement urbanisées (ISL and BRGM, 2006).

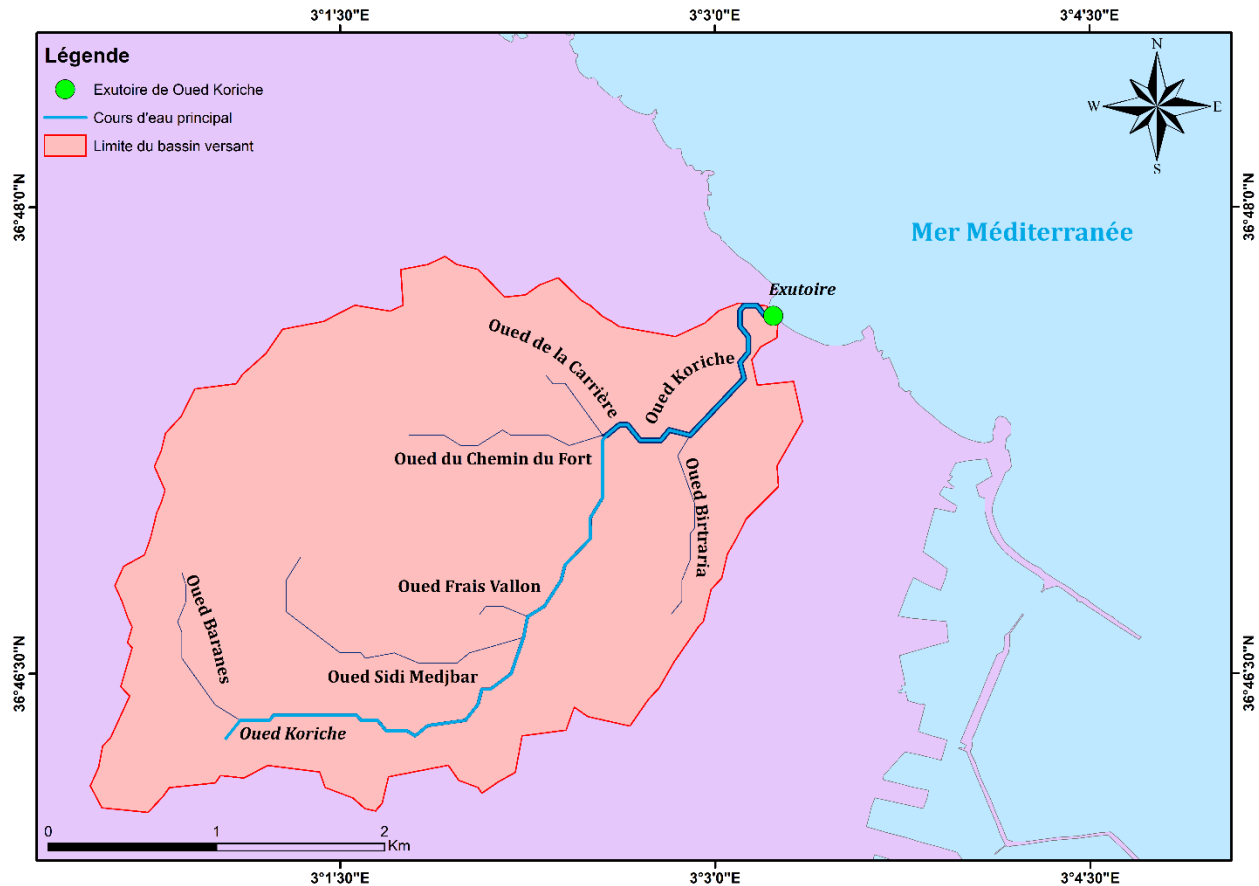


**Figure 19: Bassin versant de l’oued Beni Messous**

#### 4.1.3 Bassin versant de l’oued Koriche

Oued Koriche occupe la partie centre de notre zone d’étude avec un bassin versant allongé d’une superficie de près de 9 km<sup>2</sup> et un cours d’eau principal d’une longueur d’environ 5 km (Tableau 3). Il fait partie des unités hydrologiques contributives du massif de Bouzaréah et il est drainé par un réseau chargé d’évacuer les eaux pluviales et constitué de différents collecteurs et ouvrages hydrauliques. Ce bassin versant est fortement urbanisé, les inondations qui y surviennent proviennent des débordements ou des dysfonctionnements de ces collecteurs et ouvrages dus à des pluies engendrant des débits supérieurs à leur capacité (ISL and BRGM, 2006).

Le bassin versant de l’oued Koriche (Figure 20) est bien structuré avec de nombreux affluents tels que : oued Birtraria en rive droite et oued de la Carrière, oued du Chemin du Fort, oued Frais Vallon, oued Sidi Medjbar et oued Baranes en rive gauche.



**Figure 20 : Bassin versant de l'oued Koriche**

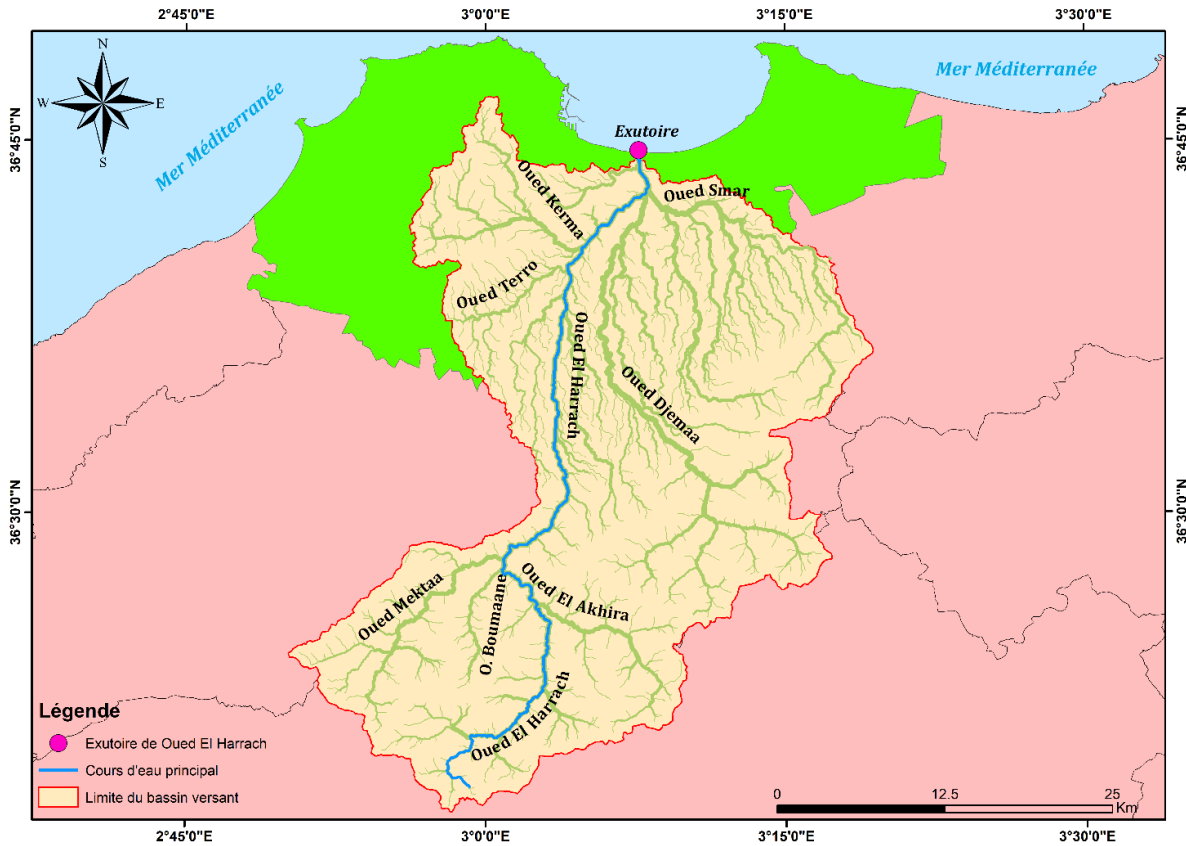
Lorsque des pluies de forte intensité tombent sur le bassin, comme en 2001, l'oued Koriche collecte une très grande part des apports hydrosédimentaires issus des vallons latéraux. Une fois concentrés, les écoulements deviennent rapides, turbides et violents. Ces derniers ont suffisamment d'énergie pour provoquer des incisions majeures et atteindre Bab El Oued en quelques dizaines de minutes seulement, prenant alors au dépourvu les populations implantées dans ce quartier Ouest d'Alger (MENAD et al., 2011).

#### 4.1.4 Bassin versant de l'oued El Harrach

Oued El Harrach est le principal cours d'eau de la Mitidja, il collecte l'ensemble des écoulements en provenance de son bassin versant, il draine un bassin versant d'une forme allongée de 1159 km<sup>2</sup> environ. Le cours d'eau principal a une longueur de 67 km (Tableau 3). Il prend naissance dans les reliefs de l'atlas blidéen et traverse la plaine de la Mitidja. La partie aval du bassin versant, à l'origine zone humide, a été peu à peu assainie et urbanisée jusqu'aux berges de

l'oued, et forme maintenant un tissu urbain quasiment continu entre Alger et les communes bordant l'oued El Harrach (EGIS EAU et al., 2012a).

Le bassin versant de l'oued El Harrach (Figure 21) est bien structuré avec de nombreux affluents tels que : oued Smar, oued Djemaa et oued El Akhira en rive droite et oued Kerma, oued Terro, oued Mektaa et oued Boumaane en rive gauche.



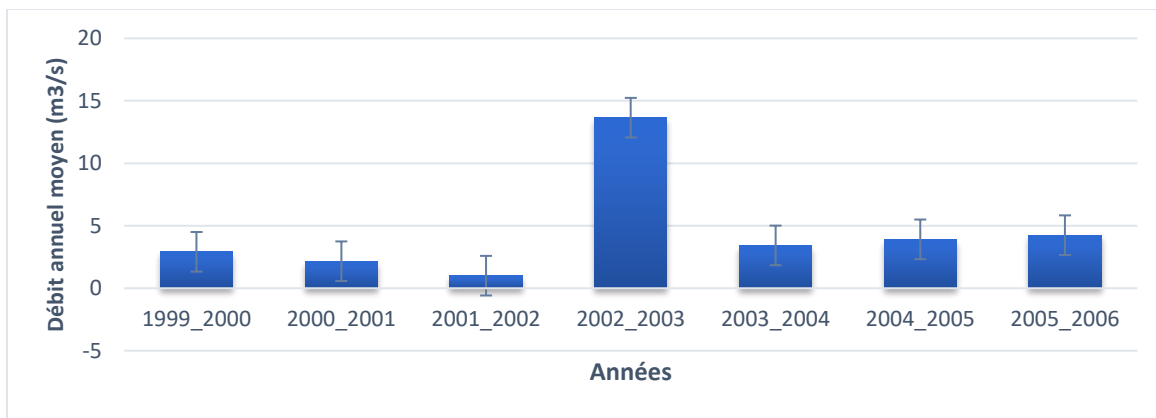
**Figure 21 : Bassin versant de l'oued El Harrach**

La Figure 22 et la Figure 23 représentent les débits annuels moyens et les débits mensuels moyens de l'Oued El Harrach, respectivement. Les données sont fournies par l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) sur une échelle de temps de sept ans (de 1999 à 2006).

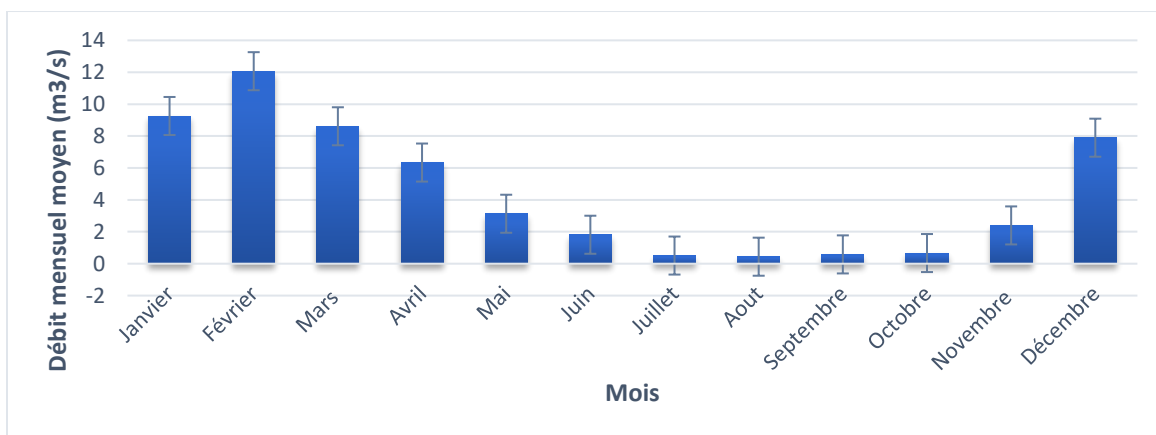
Selon la Figure 22, on remarque une très grande variabilité interannuelle du débit moyen avec un maximum dans les années 2002-2003. Ces dernières correspondent à des années bien arrosées avec des précipitations relativement importantes accompagnées d'une augmentation du débit moyen ( $13,65 \text{ m}^3 / \text{s}$ ).

D'après la Figure 23, le mois où le débit moyen est très important est le mois de février ( $12,06m^3 /s$ ) ainsi que les mois de janvier, mars et décembre ( $9,25m^3 /s$ ,  $8,61m^3 /s$ ,  $7,89 m^3 /s$  respectivement). Ces mois correspondent à la saison hivernale où les précipitations arrivent à leurs taux maximaux en provoquant par la suite l'augmentation du débit moyen du bassin versant d'oued El Harrach.

Les années et les mois où le débit moyen est important, représentent les périodes où le bassin versant d'oued El Harrach est le plus susceptible d'être touché par les inondations via le débordement de son lit majeur. De plus, ce bassin versant est considéré comme parmi les grands bassins versants de notre zone d'étude. Il est caractérisé par une forte urbanisation (artificialisation du sol) au niveau de ces rives, dont une grande partie est anarchique. Ceci augmente le risque de dégâts humains, matériels et environnementaux.



**Figure 22 : Le débit annuel moyen du bassin versant de l'Oued El Harrach**

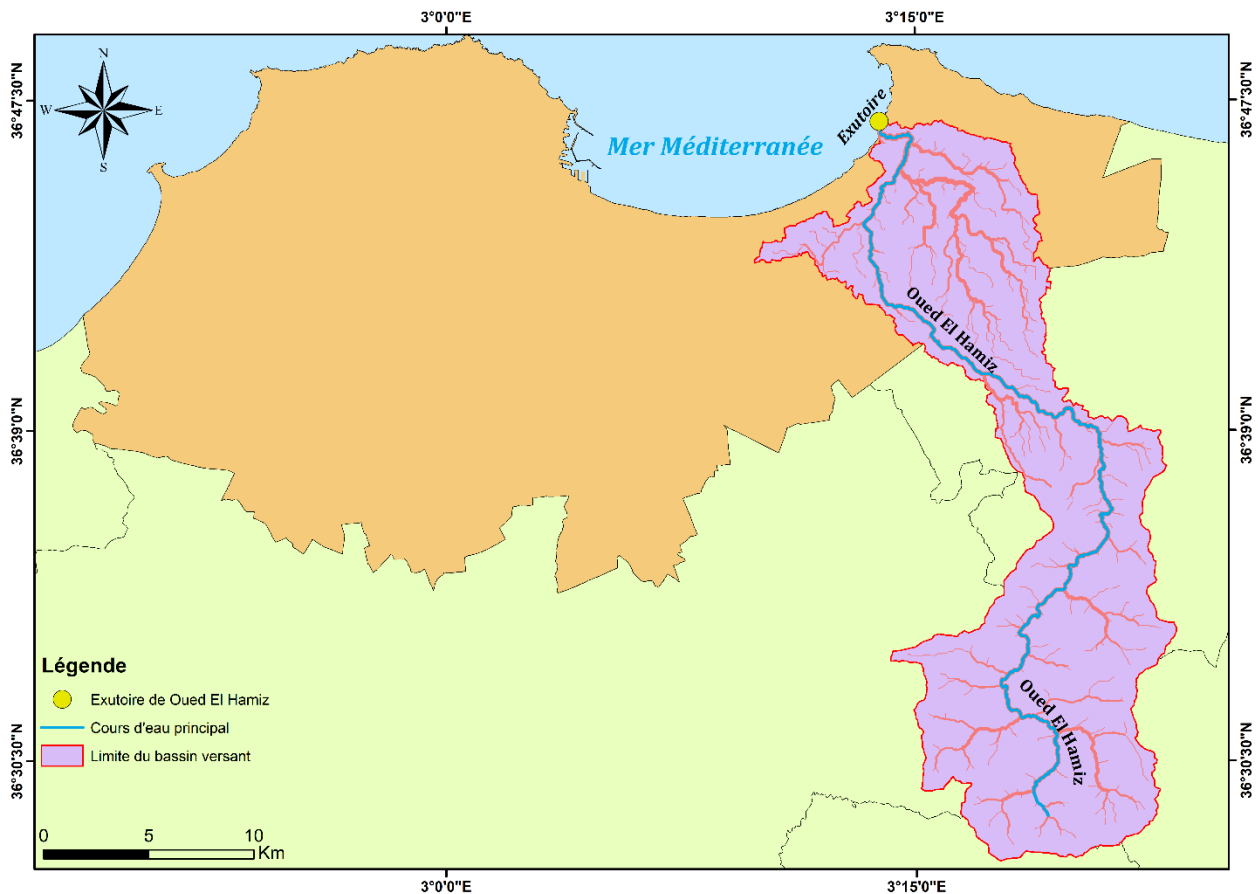


**Figure 23 : Le débit mensuel du bassin versant de l'oued El Harrach**

#### 4.1.5 Bassin versant de l'oued El Hamiz

Oued El Hamiz (Figure 24) occupe la partie Est de notre zone d'étude. Il comprend du Nord au Sud, trois unités structurales : le Sahel d'Alger, la plaine orientale de la plaine de la Mitidja et les monts de l'Atlas Blidéen. Il possède un bassin versant d'une forme allongée avec près de 275 km<sup>2</sup> et un cours d'eau principal d'une longueur d'environ 52 km (Tableau 3). Selon CHEIKHLOUNIS et al. (2011), ce bassin versant est fortement urbanisé, avec notamment des habitations anarchiques qui se sont développées au cours des dernières décennies tout au long de l'oued.

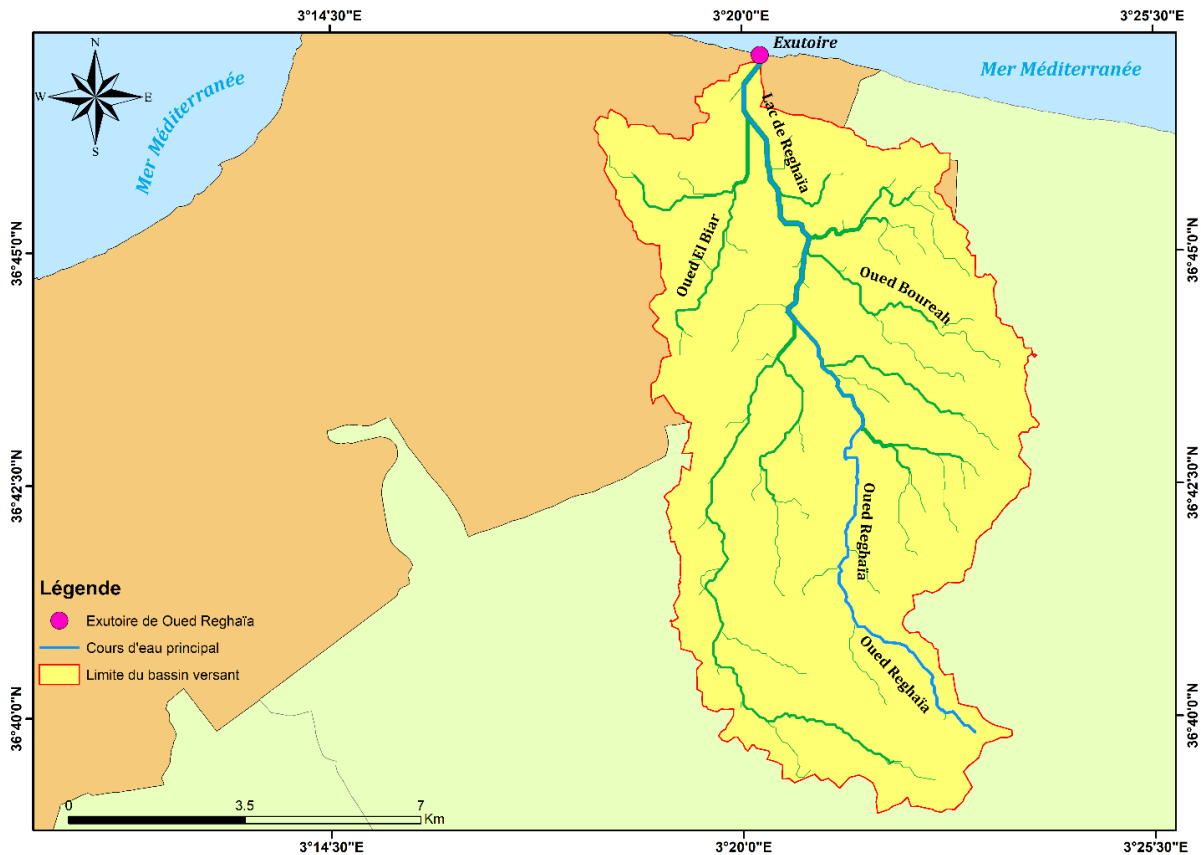
D'après NEZZAL et al. (2015), la partie aval de l'oued El Hamiz est confrontée depuis les années 1921 à ce jour, à de fréquentes inondations liées à un débordement direct de l'oued lors des évènements pluvieux exceptionnels.



*Figure 24 : Bassin versant de l'oued El Hamiz*

#### 4.1.6 Bassin versant de l'oued Reghaïa

Oued Reghaïa se trouve dans la partie Est de la plaine de la Mitidja et de la wilaya d'Alger, il représente un bassin versant d'une forme allongée d'environ 81 km<sup>2</sup> et un cours d'eau principal de 17 km (Tableau 3). Le bassin versant de l'oued Reghaïa est bien structuré avec de nombreux affluents tels que : oued Boureah en rive droite qui débute à Rouïba et oued El Biar en rive gauche qui forme le lac de Reghaïa avant de se jeter dans la mer Méditerranée (Figure 25). Selon CHEIKHLOUNIS et al. en 2011, oued Reghaïa présente la même situation urbanistique qu'oued El Hamiz, ceux sont des zones fortement urbanisées avec notamment la présence d'habitations anarchiques.



*Figure 25 : Bassin versant de l'oued Reghaïa*

Selon le résultat du calcul des indices de forme, la plupart des bassins versants de la wilaya d'Alger présentent une forme allongée qui favorise les faibles débits grâce à un temps de concentration plus long et à leur superficie importante qui va dissiper la force de drainage. Cependant, cette forme ne met nullement les populations à l'abri des crues.

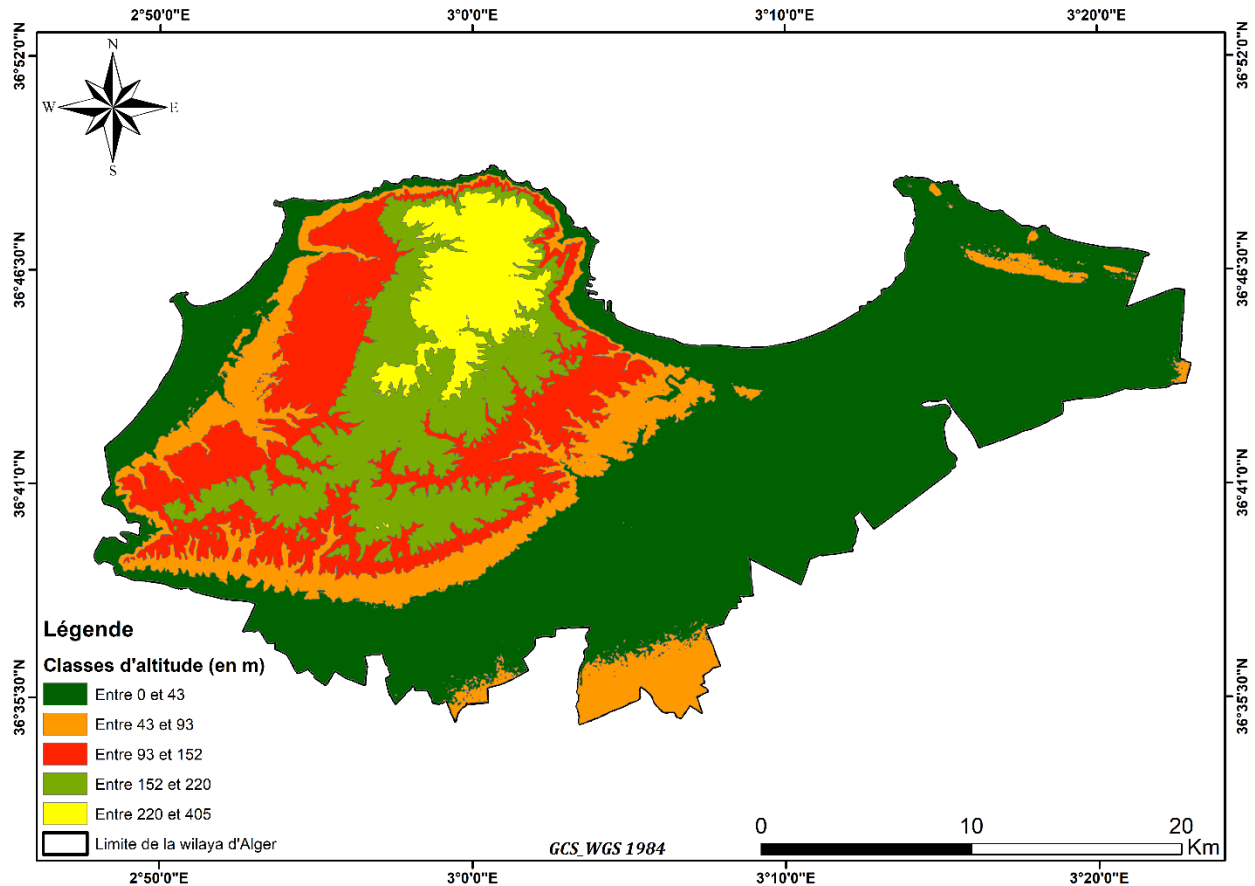
## **4.2 Facteurs de vulnérabilité de la wilaya d'Alger**

La vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations a été déterminée à l'aide de l'agrégation de plusieurs cartes représentant huit critères différents (format raster).

### **4.2.1 Carte de distribution des altitudes**

D'après la Figure 26, qui représente la carte de distribution des altitudes de la wilaya, Alger est caractérisée par un relief assez plat (entre 0 m et 43 m) dans sa partie Est où se trouvent les communes de Reghaïa, Rouïba, El Marsa, Bordj El Bahri, Ain Taya, Dar El Beida, Bab Ezzouar, ainsi que dans sa partie Sud et Sud-Ouest qui concerne les communes de Bir Touta, Ouled Chebel, Tassala El Merdja (la plaine de la Mitidja). La zone côtière Ouest présente également un relief très bas au niveau des communes d'Ain Benian, Cheraga, Staoueli, Zeralda et Mahelma.

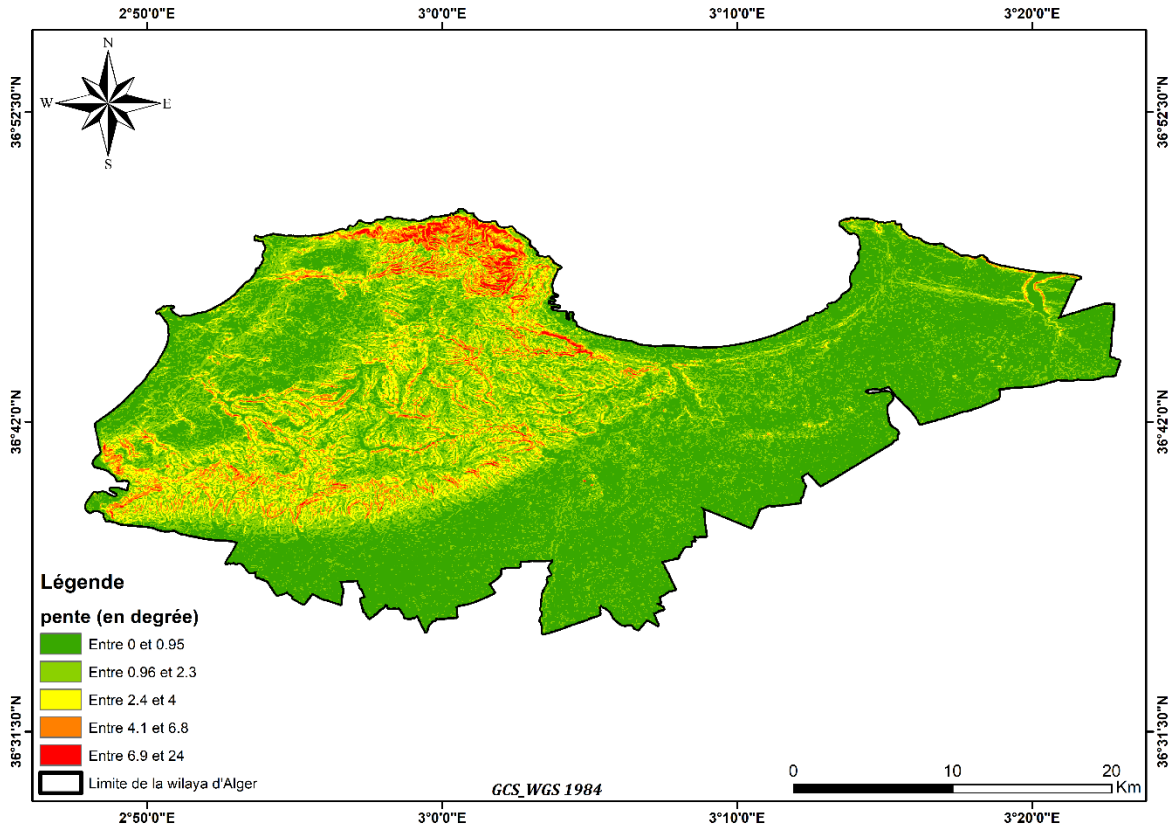
Les communes de Bouzareah (massif de Bouzareah), Dely Brahim, El Biar, Hydra, Beni Messous et Ben Aknoun présentent une altitude relativement élevée (entre 220 m et 405 m). D'après DAS (2019), l'altitude est l'un des principaux facteurs contrôlant les inondations dans une région, car les zones basses peuvent être inondées plus rapidement à mesure que l'eau s'écoule des hautes altitudes vers des régions basses et donc, les zones situées à une altitude plus élevée ont généralement une probabilité plus faible d'enregistrer une inondation par rapport aux zones de plaine (DAS, 2018; LIUZZO et al., 2019).



*Figure 26 : Carte de distribution des altitudes de la wilaya d'Alger*

#### 4.2.2 Carte des pentes

La wilaya d'Alger présente un relief hétérogène avec des pentes qui varient entre  $0^\circ$  et  $24^\circ$ . Les pentes les plus faibles se situent dans la Mitidja couvrant les communes de Reghaïa, El Hamiz, Bordj El Bahri, Ain Taya, Rouïba, Bab Ezzouar, Sidi Moussa, Baraki et Ouled Chbel (Figure 27). C'est au niveau du massif de Bouzareah que l'on retrouve les pentes les plus importantes (Alger Centre, Ben Aknoun, Bouzareah, Rais Hamidou, Beni Messous, El Biar et Hydra). Ces pentes accentuent le ruissèlement de l'eau durant les épisodes pluviométriques et le concentrent dans les parties basses. En d'autres termes, lors de précipitations intenses dans la partie Ouest, l'écoulement d'eau va être intense à cause de la pente importante et causera d'éventuelles inondations en aval.

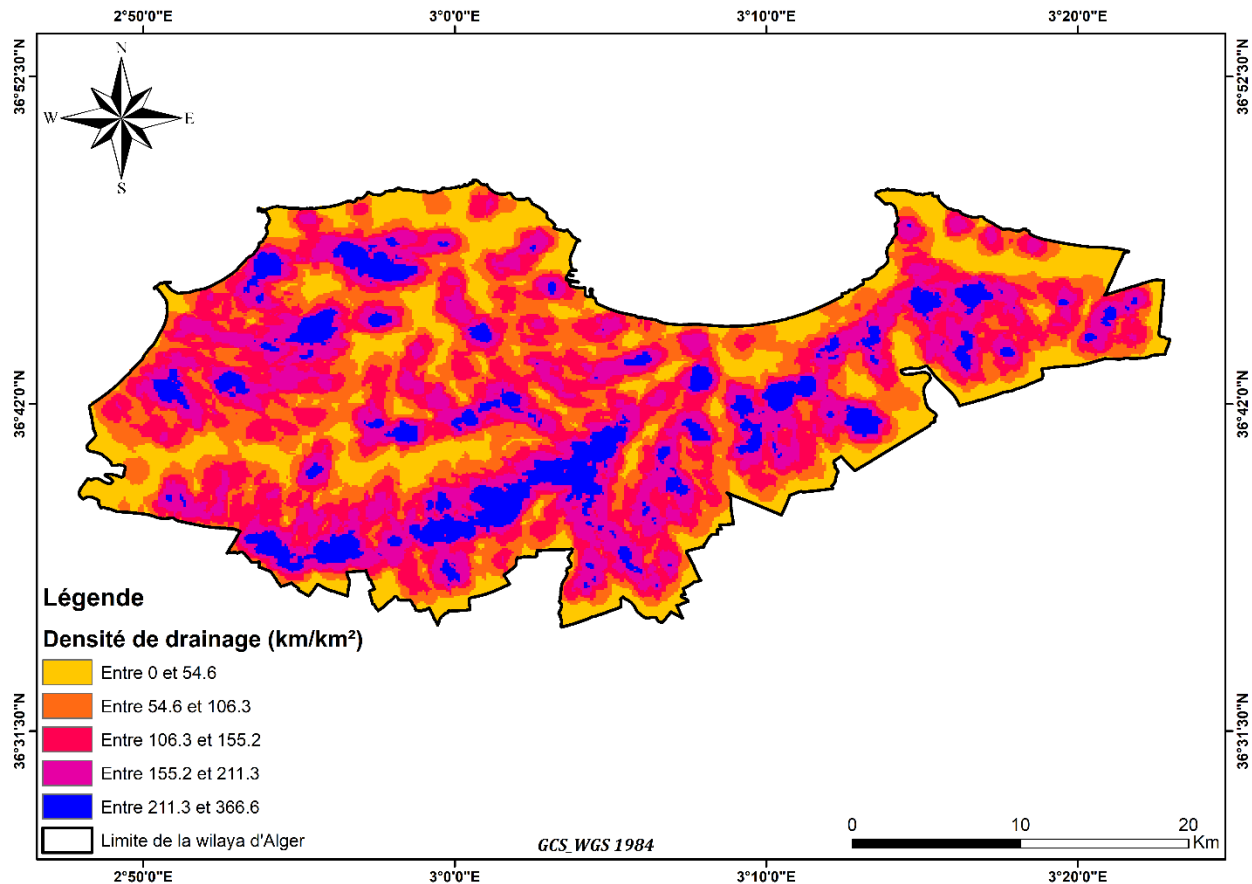


*Figure 27 : Carte des pentes de la wilaya d'Alger*

#### 4.2.3 Carte de la densité de drainage

Les zones où la densité de drainage est importante engendrent un ruissèlement qui conduit à des pics et des volumes de crues importantes. Ces zones se trouvent un peu partout dans la wilaya d'Alger et leur ruissèlement varie entre 155,2 km/km<sup>2</sup> et 366,6 km/km<sup>2</sup> (Figure 28). Les régions où la densité de drainage est forte correspondent aux zones les plus vulnérables aux inondations car elles indiquent un fort ruissèlement de surface (ULLAH and ZHANG, 2020). Dans les conditions inverses, les zones de faible densité de drainage correspondent aux zones les moins susceptibles d'être inondées. Néanmoins, la densité de drainage est en relation, en plus du relief (pente) avec le couvert végétal (NDVI), le type de sol et les précipitations qui vont affecter la perméabilité du sol et donc le ruissèlement.

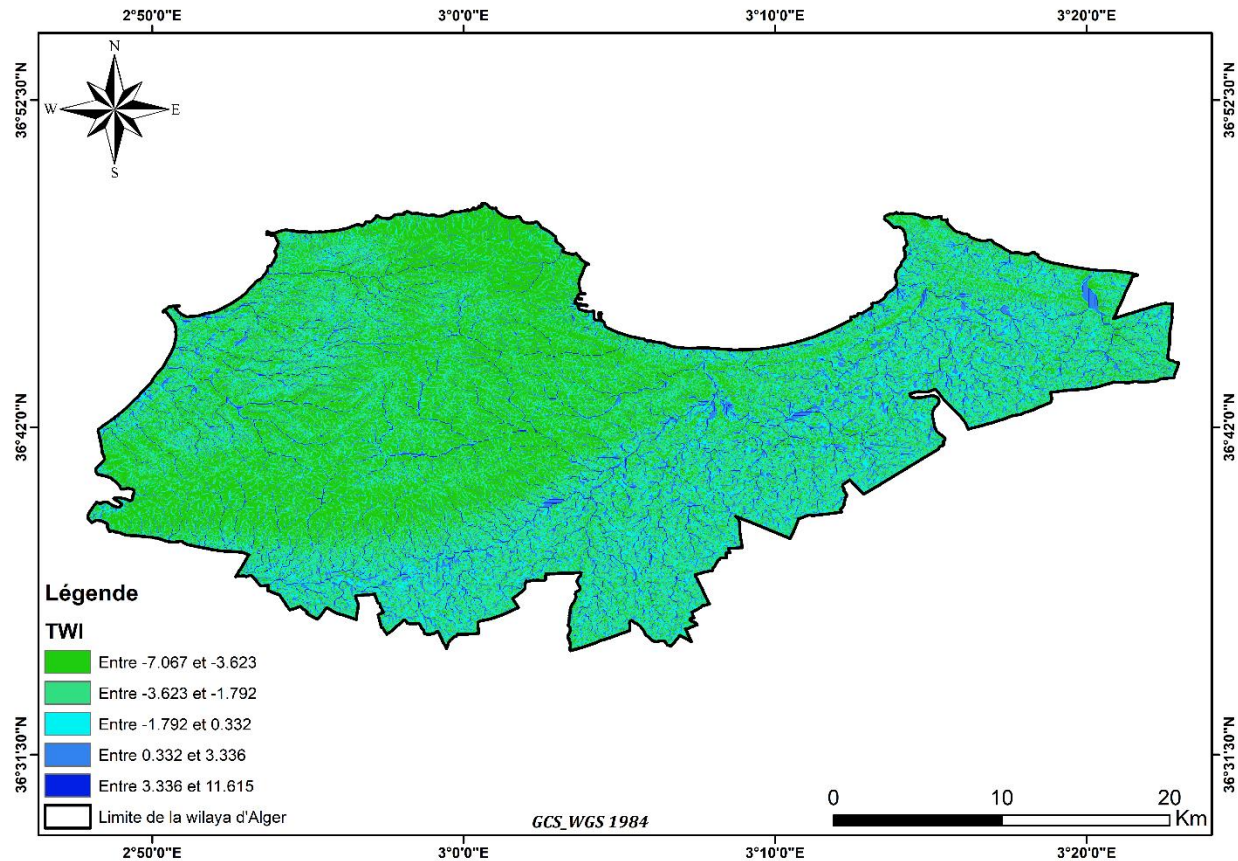
Avec des densités de drainage supérieures à 100 km/km<sup>2</sup>, le réseau hydrographique de la wilaya est assez ramifié avec peu d'infiltration, particulièrement au niveau d'oued El Harrach.



*Figure 28 : Carte de la densité de drainage de la wilaya d'Alger*

#### 4.2.4 Carte de l'indice d'humidité topographique (TWI)

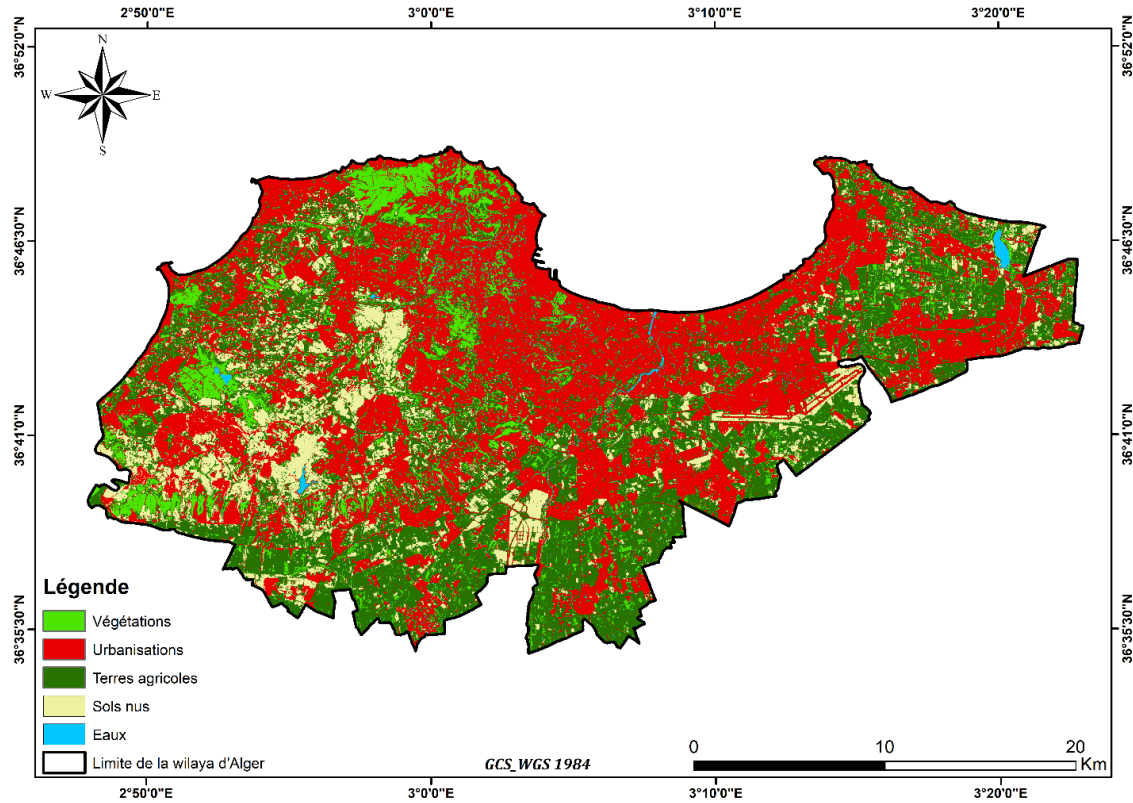
Le TWI représente les zones des différents bassins versants où l'eau a tendance à s'accumuler. Les fortes accumulations se font dans les zones basses (partie Est : Mitidja) à cause de la faible pente, alors que les faibles accumulations se trouvent dans la partie Ouest de notre zone d'étude qui se caractérise par une pente élevée (TWI entre -7,067 et -3,623). D'après la Figure 29, l'eau s'accumule dans les cours d'eau des bassins versants de Reghaïa, El Hamiz, El Harrach, Beni Messous ainsi qu'au niveau de leurs affluents, notamment ceux du bassin versant du Mazafran qui se trouvent dans la partie Sud-Ouest de la wilaya d'Alger. Selon KHOSRAVI et al. (2019), les régions à haut TWI ont une forte vulnérabilité aux inondations et les régions à faible TWI ont une vulnérabilité aux inondations plus faible. Dans notre étude, les régions traversées par un réseau hydrographique important ont un TWI élevé (entre 0,332 et 11,615) et sont, de ce fait, plus vulnérables aux inondations.



*Figure 29 : Carte de l'indice d'humidité topographique de la wilaya d'Alger*

#### 4.2.5 Carte de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger

La Figure 30 montre que la wilaya d'Alger présente une occupation du sol très importante où l'urbanisation représente environ 44 % de sa superficie (Tableau 4). On remarque également que le littoral est quasiment urbanisé sur tout son linéaire, avec une artificialisation concentrée dans la partie centre de la wilaya qui s'étend sur les reliefs du Sahel ainsi que sur la partie Est de la Mitidja. Les zones périphériques sont relativement moins urbanisées, principalement à cause de leur caractère de zones humides (Reghaïa et Mazafran) et de terres agricoles. En effet, les terres agricoles dominent la plaine de la Mitidja (partie Est et Sud de la wilaya) avec près de 34,19% de la superficie d'Alger. Il est important de préciser également que les bords des oueds El Harrach, El Hamiz, Reghaïa et oued Koriche sont fortement urbanisés.



**Figure 30 : Carte d’occupation du sol de la wilaya d’Alger pour l’année 2021**

La végétation est dominante dans la partie Ouest (Sahel Ouest-Algérois) et un peu moins dans le centre avec une très faible couverture du sol d’environ 8 % de la superficie de la wilaya d’Alger, sachant qu’elles ont un rôle très important dans la perméabilité du sol à l’eau. Ces espaces forestiers correspondent principalement aux forêts de Baïnem et de Zéralda.

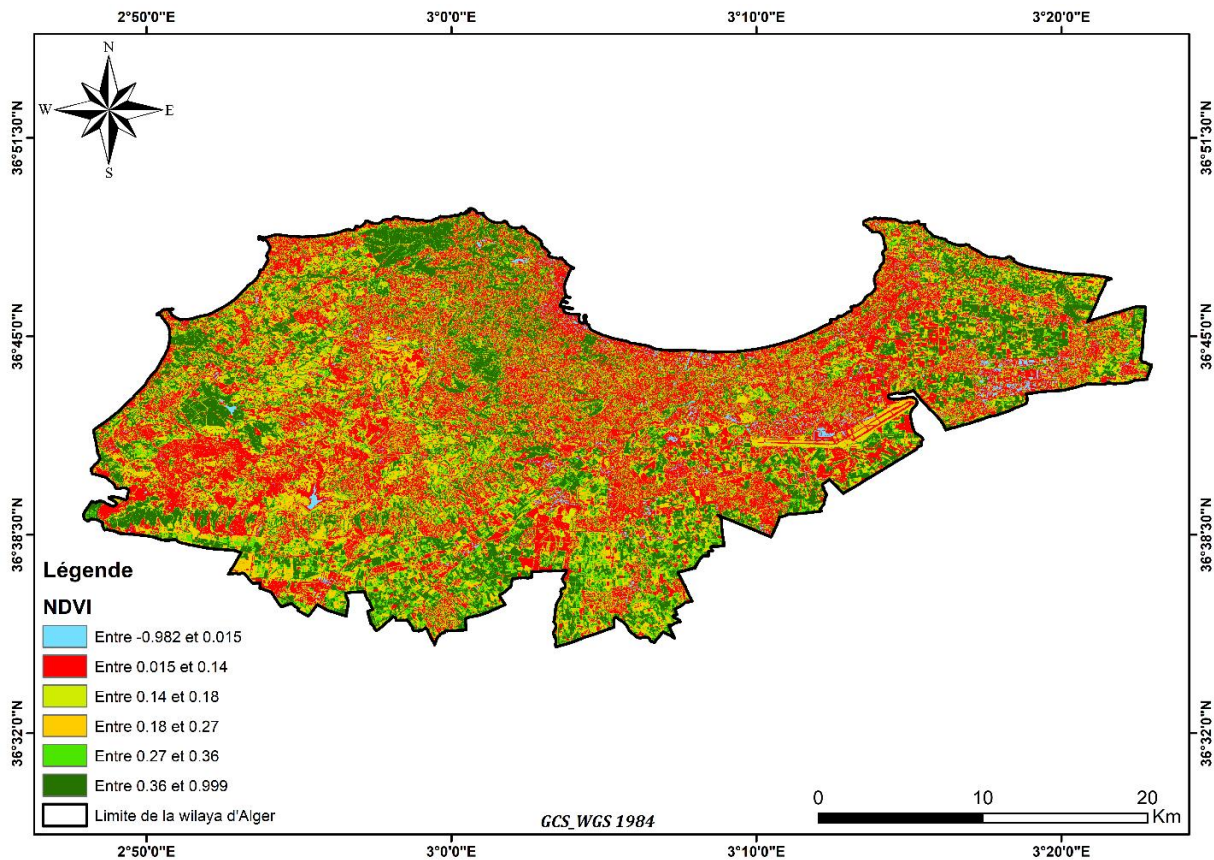
D’une manière générale, on peut dire que notre zone d’étude présente une alternance entre urbanisation dense et terres agricoles avec une petite portion de sol nu au sein de la wilaya (11,39 % de la superficie d’Alger). Nos résultats sont en accord avec les constats d’EGIS EAU et al. (2013) qui ont estimé le taux d’urbanisation de la wilaya d’Alger à 40% en 2012.

**Tableau 4 : Superficie et pourcentage des classes d’occupation du sol de la wilaya d’Alger (2021)**

Classes	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
<b>Végétations</b>	65,61	8,63
<b>Urbanisation</b>	338,24	44,35
<b>Terres agricoles</b>	260,81	34,19
<b>Sols nus</b>	86,84	11,39
<b>eaux</b>	11,04	1,44

#### 4.2.6 Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI)

L'indice NDVI varie sur une échelle de valeurs allant de -1 à +1, les valeurs positives représentent la biomasse végétale, plus les valeurs sont importantes, plus la végétation est dense. La wilaya d'Alger présente une distribution de végétation régulière entre Est, Ouest, Nord et Sud avec les forêts de Bainem et de Zeralda à l'Ouest et les terres agricoles dans la plaine de la Mitidja. Selon la Figure 31, les valeurs représentent : l'eau entre - 0,982 et 0,015, les zones bâties entre 0,015 et 0,14, les sols nus entre 0,14 et 0,18, les arbustes et prairies entre 0,18 et 0,27, les végétations clairsemées entre 0,27 et 0,36 et les végétations denses entre 0,36 et 0,999. Dans notre zone d'étude, l'urbanisation domine la végétation. En effet, le tissu urbain s'est étendue au dépend des espaces forestiers et des terres agricoles de la Wilaya. Sans végétation, les crues augmenteraient en accentuant les risques d'inondation à cause de l'intensification de l'écoulement des eaux de pluies et des débordements d'oueds à la surface du sol.



*Figure 31 : Carte de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) de la wilaya d'Alger*

#### 4.2.7 Carte des types de sol

Connaitre les types de sol pour comprendre la vulnérabilité de la zone d'étude aux inondations est une étape importante dans notre étude. En effet, l'imperméabilisation du sol par manque d'infiltration, intimement liée au type du sol, accentue le processus de ruissèlement et donc d'inondation surtout dans le cas d'un faible couvert végétal et d'une artificialisation importante du sol. Selon la Figure 32, les sols calcaires et de marais présentent le type de sol le plus répandu dans la wilaya d'Alger qui se caractérisent par une faible perméabilité car, les sols calcaires ont une granulométrie fine (forme compacte qui freine la perméabilité) et les sols de marais sont généralement saturés en eau. Les sols dunaires, qui présentent une forte perméabilité (sable), sont retrouvés dans la zone côtière : au centre de la baie d'Alger et à l'Ouest au niveau de la partie côtière des communes d'Ain Benian, Cheraga, Staoueli et Zéralda. Les sols alluviaux, qui sont les plus perméables (grains grossiers), se trouvent dans la partie Sud-Est, Sud et au Sud-Ouest de la wilaya d'Alger. Les sols insaturés retrouvés uniquement à l'Est (Reghaïa et El Marsa) ainsi qu'au Nord-Ouest de la wilaya, sont des sols assez perméables vu qu'ils sont non saturés en eau. Le type de sol le plus imperméable de notre zone d'étude est représenté par la roche mer qui se trouve uniquement au niveau de la ville d'Alger centre.

D'après la Figure 33, les sols alluviaux perméables correspondent à du quaternaire continental et à moindre mesure à du quaternaire marin. Les sols dunaires correspondent également à des formations géologiques récentes donc pas très compacts (perméables), à savoir des dunes récentes et du quaternaire marin. Les sols calcaires et de marais correspondent principalement à des formations légèrement plus anciennes : du calabrien, du pliocène marin (avant le quaternaire) et du villafranchien (l'étage le plus ancien du quaternaire). Les sols calcaires sont aussi présents dans le sud de la Mitidja, représentés par des alluvions actuelles et du quaternaire marin et continental. Les sols insaturés correspondent à des formations géologiques variées, notamment à des roches métamorphiques compactes (micaschiste, schiste satiné, gneiss) ainsi qu'à des rhyolites, dellénites, dacites et tuf associés, du miocène inférieur marin et du quaternaire marin. La roche mer correspond principalement à du micashiste, schiste satiné ainsi que du gneiss. Ces roches métamorphiques compactes sont moyennement à peu perméables.

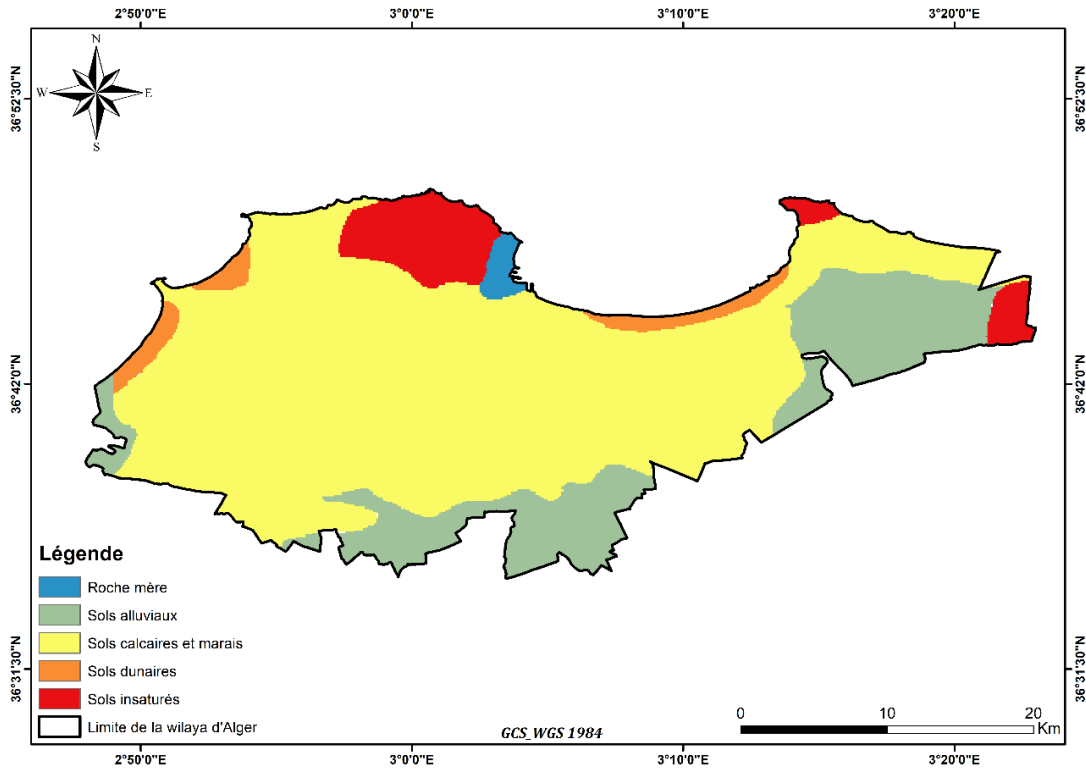


Figure 32 : Carte des types de sol de la wilaya d'Alger

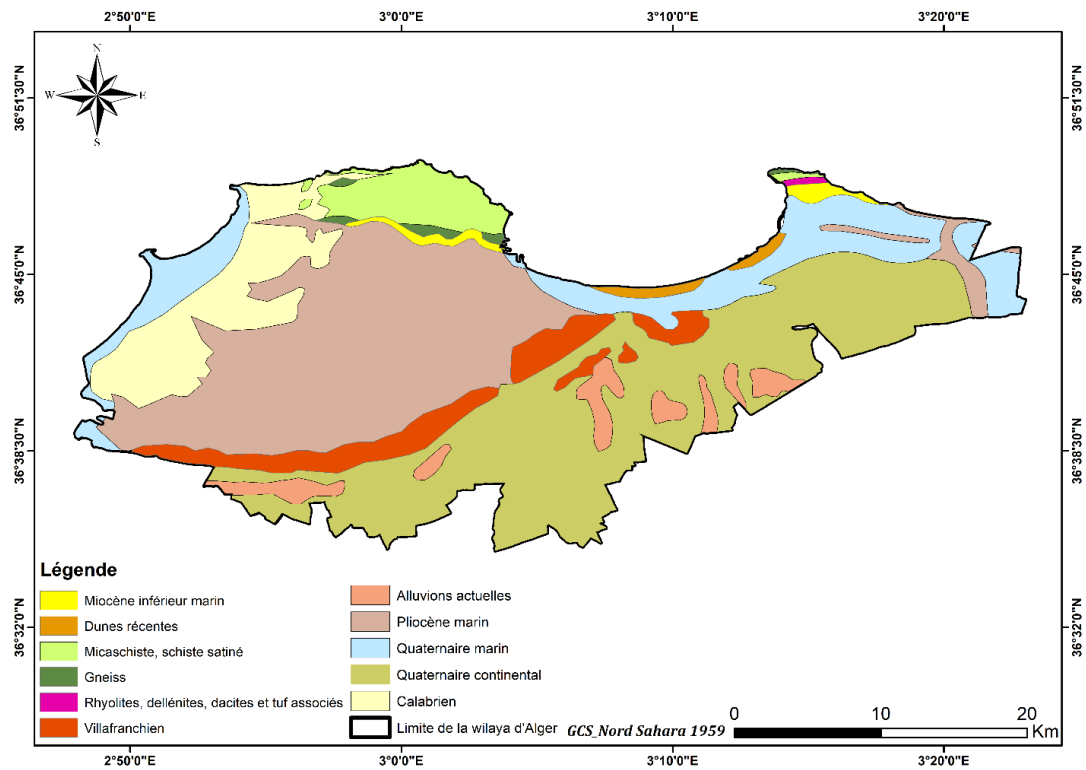
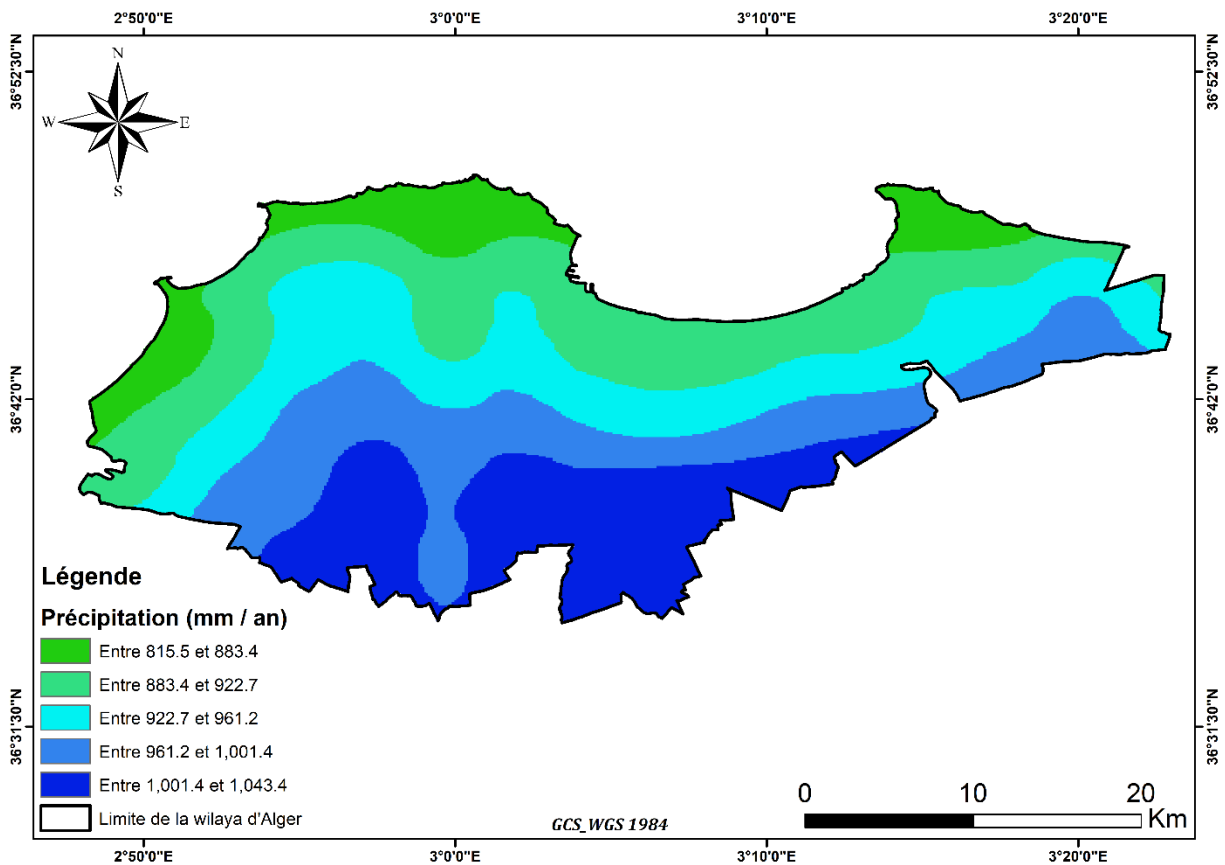


Figure 33 : Carte géologique de la wilaya d'Alger

#### 4.2.8 Carte de précipitation

Le cumul annuel des précipitations de la wilaya d'Alger montre que le nord de la zone d'étude (partie littorale) présente les taux les plus faibles avec des valeurs entre 815,5 mm/an et 883,4 mm/an. En allant vers le sud (en s'éloignant de la mer), le taux des précipitations augmente jusqu'à environ 1000 mm/an (Figure 34). Notant que la chaîne de montagnes qui se trouvent en amont de la wilaya d'Alger (Atlas Blidéen) engendre un ruissèlement intense de pluies vers la wilaya d'Alger en suivant les bassins versants pour se rejeter dans la baie d'Alger en traversant notre zone d'étude, ce qui accentue l'accumulation des eaux dans les différents bassins versant de la wilaya d'Alger. La littérature indique que les précipitations ont une relation directe avec le débit des rivières et des oueds et qu'une grande quantité de précipitations en peu de temps peut générer des crues soudaines (DAS, 2018; PAUL et al., 2019; LIUZZO et al., 2019; DAS, 2019).



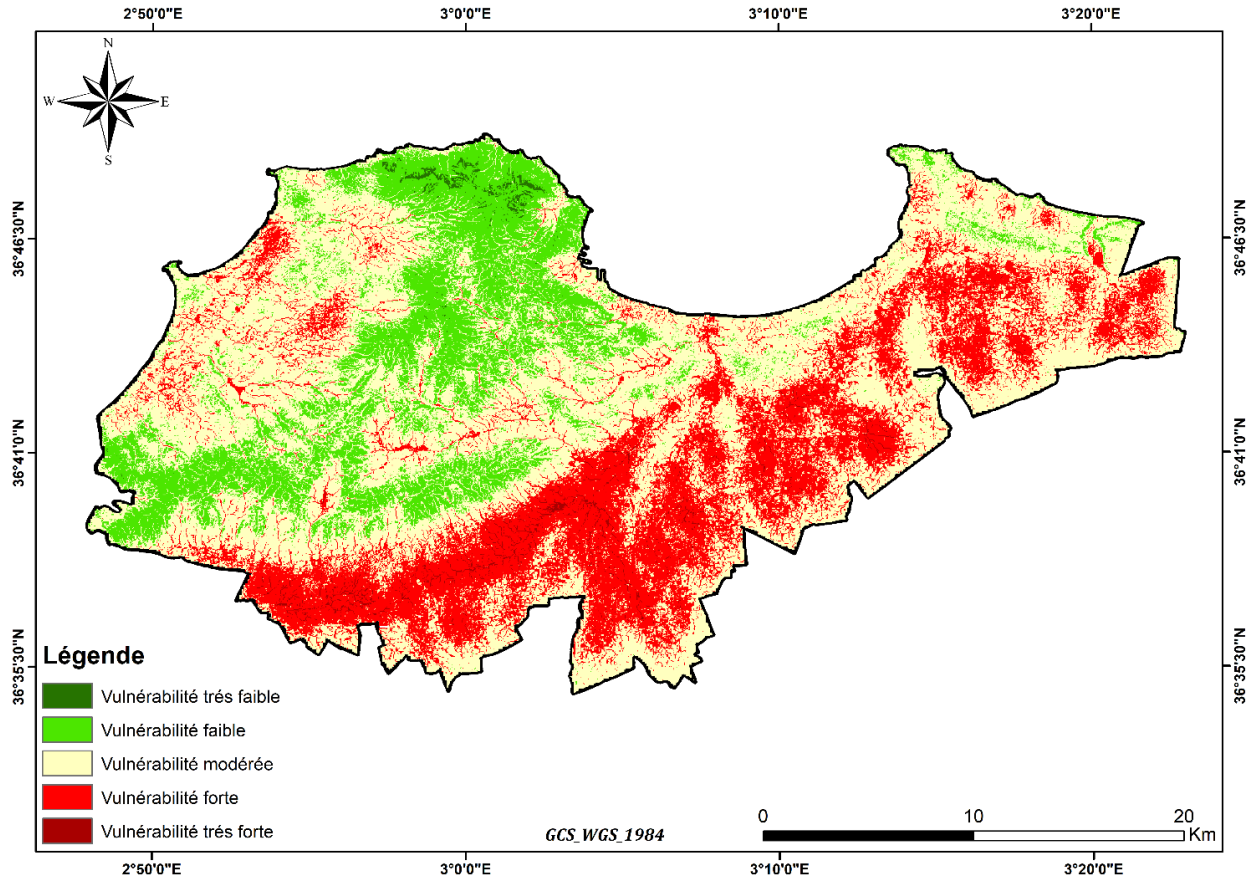
*Figure 34 : Carte des précipitations de la wilaya d'Alger*

### 4.3 Carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger issue de l'analyse multicritères AHP

La Figure 35 présente les différentes zones vulnérables aux inondations de la wilaya d'Alger, et montre que la plupart de ces zones correspondent aux zones d'accumulation des eaux (réseau hydrographique). En effet, c'est la partie Est qui abrite la majorité du réseau hydrographique de la wilaya d'Alger tels que les bassins versants des oueds El Harrach, El Hamiz et Reghaïa qui sont caractérisés principalement par une vulnérabilité forte à modérée. La partie Ouest de la wilaya, qui comporte les bassins versants de Beni Messous, oued Koriche et quelques petits oueds tels que les oueds Dra et Sidi Bougandoura, présentent quant-à-elles une vulnérabilité modérée à forte. Les communes qui se trouvent dans les zones à forte vulnérabilité sont : Réghaïa, Rouïba, Dar El Beida, Bordj El Kiffan, Ain Taya, Bordj El Bahri, Bab Ezzouar, Oued Smar, El Harrach, Hussein Dey, Baraki, Les Eucalyptus, Gué de Constantine, Sidi Moussa, Birtouta, Ouled Chebel, Shaoula et Tassala El Merdja ainsi que quelques zones à Cheraga, Staoueli et Zéralda.

Les zones où le relief est relativement plus prononcé avec de fortes pentes (massif de Bouzareah) sont caractérisées par une faible à très faible vulnérabilité. Les communes concernées sont : Bouzareah, El Biar, Ben Aknoun, Dely Ibrahim, El Hammamet, Alger Centre et Rais Hamidou. Les communes côtières de la partie Est ainsi que de la partie Ouest présentent une vulnérabilité forte à modérée, en revanche, celles qui se trouvent au niveau du massif de Bouzareah présentent une vulnérabilité faible.

Dans le cadre de l'aménagement du territoire, il serait préférable de construire dans les zones à vulnérabilité modérée à faible, c'est-à-dire avantager les communes tels que Sidi Abd Ellah, Douira, Mahelma et Rahmania, au lieu de continuer l'expansion urbaine dans les zones à vulnérabilité forte aux inondations. Néanmoins, le barrage de Douera peut accentuer le risque d'inondation dans cette commune en cas de sa rupture qui peut aboutir à une inondation soudaine en entraînant la formation d'une onde de submersion se traduisant par une élévation brutale du niveau de l'eau en aval.



*Figure 35 : Carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger*

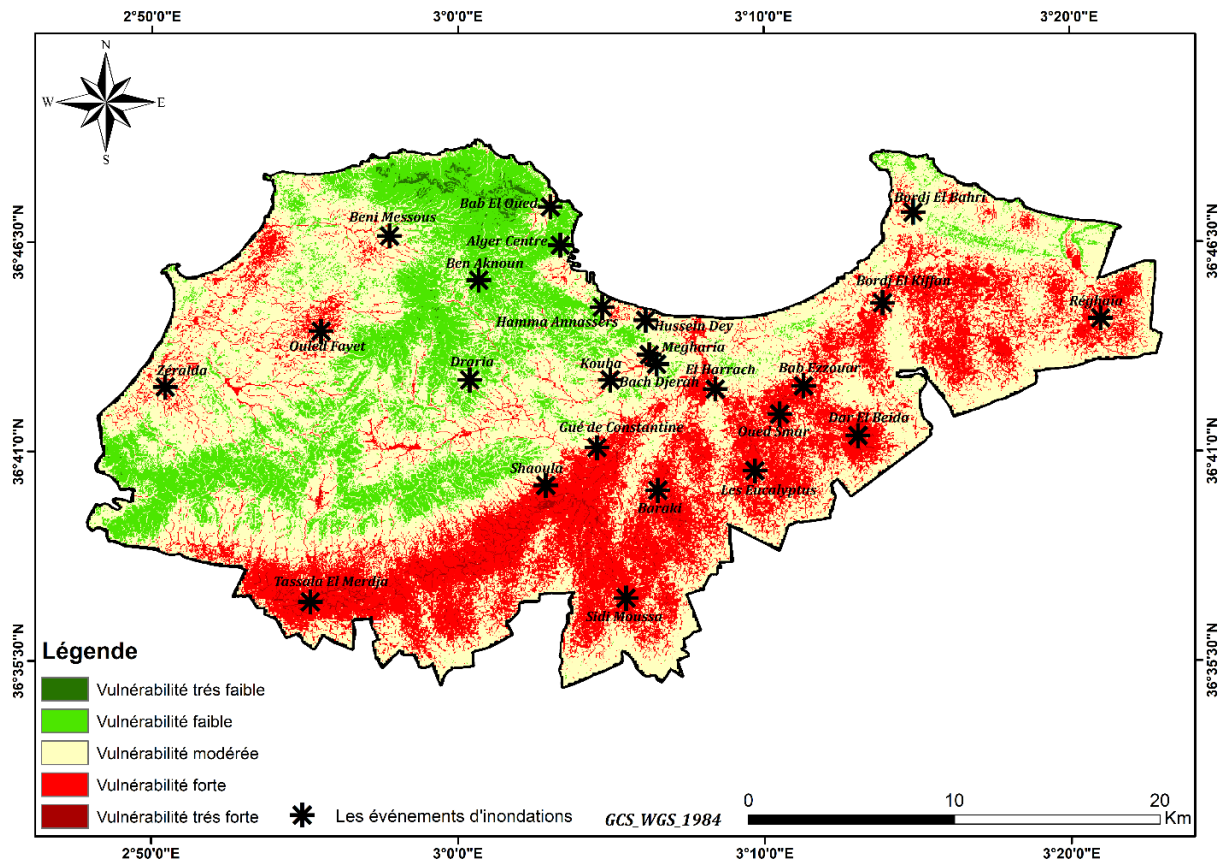
#### 4.3.1 Validation des résultats

Avant de pouvoir approfondir nos interprétations, nous avons tenté d'évaluer la pertinence de la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger par une validation des résultats. Afin de savoir si les inondations qui ont frappé la wilaya d'Alger sont survenues dans les zones classifiées comme vulnérables, une localisation des inondations les plus répétitives dans certaines communes sur la carte de vulnérabilité a été réalisée en se basant sur la base de données de la Direction Générale de la Protection Civile.

La Figure 36 montre que les communes qui ont enregistré plus d'inondations se trouvent majoritairement dans les zones qui présentent une forte vulnérabilité (85 % de communes), notamment les communes couvrant la Mitidja ainsi que Beni Messous, Ouled Fayet et Zéralda. La plupart de ces communes sont traversées par les oueds de la région et leurs affluents. Cette zone à forte vulnérabilité aux inondations est une zone basse (faible altitude) ce qui veut dire que lors des

événements de pluies intenses, les eaux de ruissellement s'écoulent rapidement dans les hautes altitudes (le massif de Bouzaréah et l'atlas blidéen au sud) et sont drainées vers les zones d'accumulation des bassins versants (El Harrach, El Hamiz et Réghaïa à l'Est, Oued Koriche au Centre et Beni Messous à l'Ouest) ce qui peut provoquer des débordements des lits majeurs des oueds.

Les zones à faible vulnérabilité ont subi quelques événements d'inondations qui peuvent être expliqués par l'accumulation des eaux de ruissèlement avec l'imperméabilisation du sol suite à des précipitations abondantes ; notant que ces communes ont un type de sol à faible perméabilité (sols calcaires et de marais) selon la Figure 32. Le débordement indirect d'une réserve d'eau de surface ou souterraine suite à la remontée des nappes phréatiques ou bien d'eaux à travers les canalisations ainsi que le mauvais fonctionnement des réseaux d'assainissements pluviaux peuvent être en outre la cause de ces évènements d'inondation dans ces zones à faible vulnérabilité.

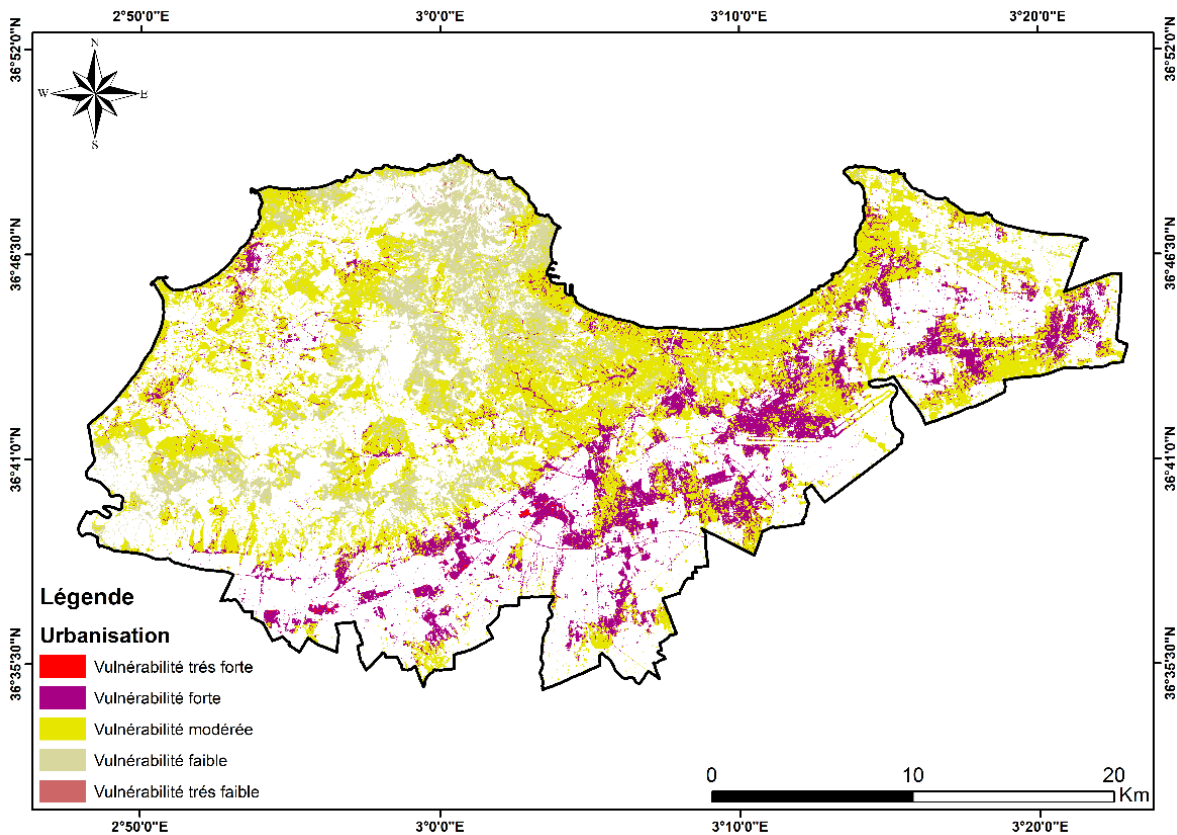


*Figure 36 : Carte montrant la distribution spatiale des principales inondations enregistrées dans la wilaya d'Alger superposées à la carte de vulnérabilité*

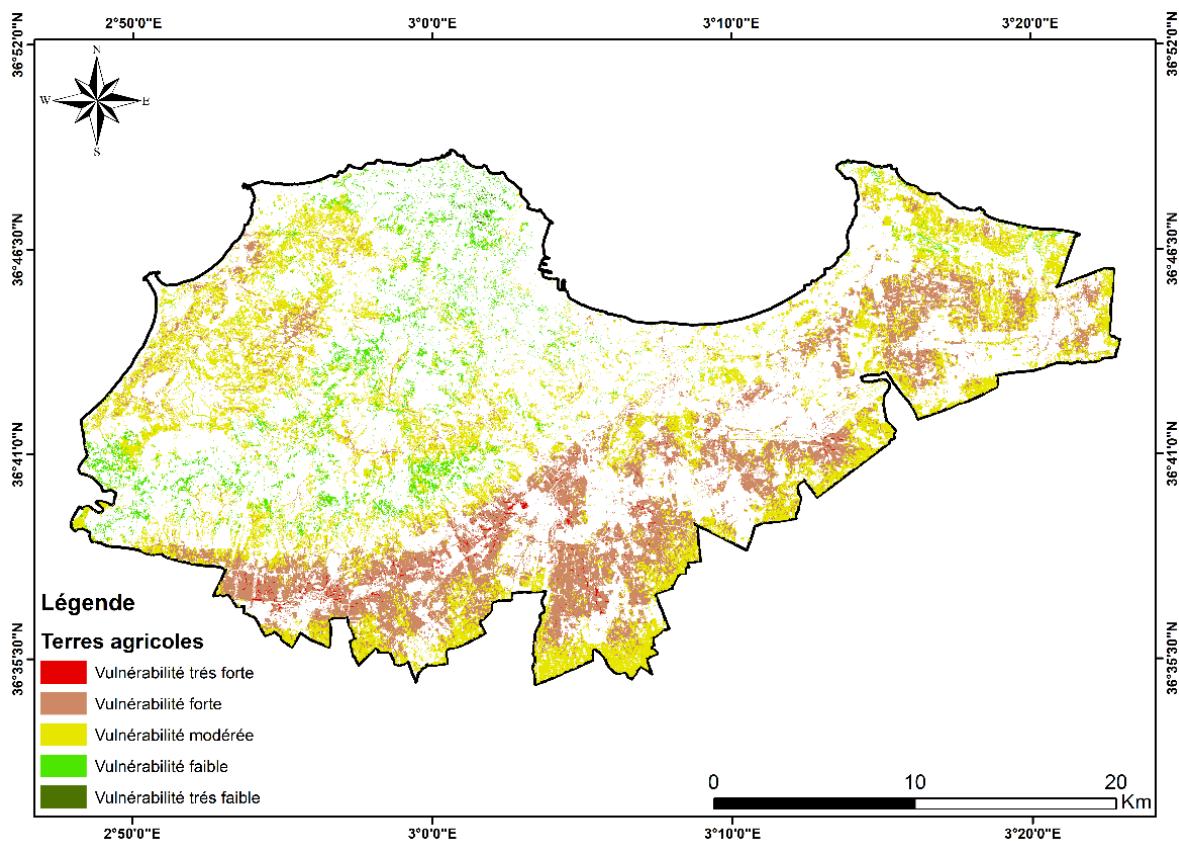
### 4.3.2 Impact sur l'occupation du sol

Selon la Figure 37 et le Tableau 5, l'urbanisation présentant une vulnérabilité modérée aux inondations est la plus dominante à Alger où elle représente une superficie de 194,97 km<sup>2</sup> et 25,81 % de la superficie de la wilaya. Elle se concentre principalement dans la zone côtière de la baie d'Alger ainsi que dans la zone centre de la wilaya. L'urbanisation à forte vulnérabilité occupe une partie de la Mitidja avec une superficie de 71,29 km<sup>2</sup>, alors que l'urbanisation à faible vulnérabilité présente une superficie de 67,20 km<sup>2</sup> et un pourcentage de 8,89 % (massif de Bouzareah).

La Figure 38 montre que les terres agricoles avec une forte vulnérabilité aux inondations sont situées dans la plaine de la Mitidja avec une superficie de 100,43 km<sup>2</sup>, celles à vulnérabilité modérée sont les plus abondantes avec 131,49 km<sup>2</sup>, soit 17,40 % de la superficie de la wilaya d'Alger.

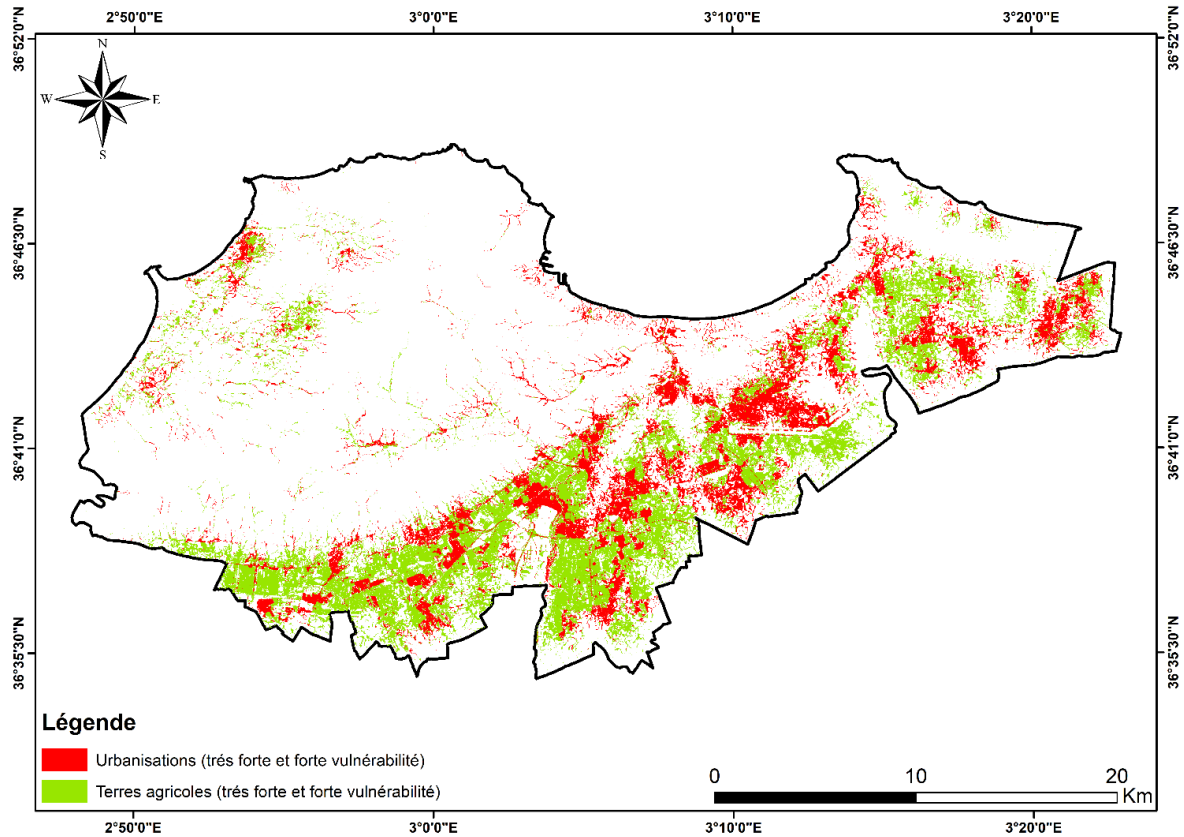


**Figure 37 : Carte de la classification de l'urbanisation de la wilaya d'Alger selon sa vulnérabilité aux inondations**



**Figure 38 : Carte de la classification des terres agricoles de la wilaya d'Algiers selon leur vulnérabilité aux inondations**

La Figure 39 résume les deux figures précédentes en mettant en avant le tissu urbain et les terres agricoles présentant une vulnérabilité forte à très forte face aux inondations (9,56 % et 13,57 % de la surface de la wilaya, respectivement). Ces dernières représentent les occupations du sol à protéger en priorité contre le risque des inondations. En plus de l'urbanisation qui s'est développée dans cette zone et qui accentue l'imperméabilité du sol, les terres agricoles peuvent également être considérées comme une sorte d'artificialisation du sol naturel où durant chaque épisode pluviométrique torrentielle, ces terres s'inondent due à leur faible perméabilité d'eau.



**Figure 39 : Carte montrant la vulnérabilité très forte et forte des classes de l'urbanisation et des terres agricoles dans la wilaya d'Alger**

**Tableau 5 : Superficies des classes d'occupation du sol de la wilaya d'Alger selon leur vulnérabilité aux inondations**

Classe	Vulnérabilité	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
Urbanisation	Très faible	0,26	0,03
	Faible	67,20	8,89
	Modérée	194,97	25,81
	Forte	71,29	9,43
	Très forte	1,02	0,13
Terres agricoles	Très faible	0,29	0,03
	Faible	23,69	3,13
	Modérée	131,49	17,40
	Forte	100,43	13,29
	Très forte	2,17	0,28

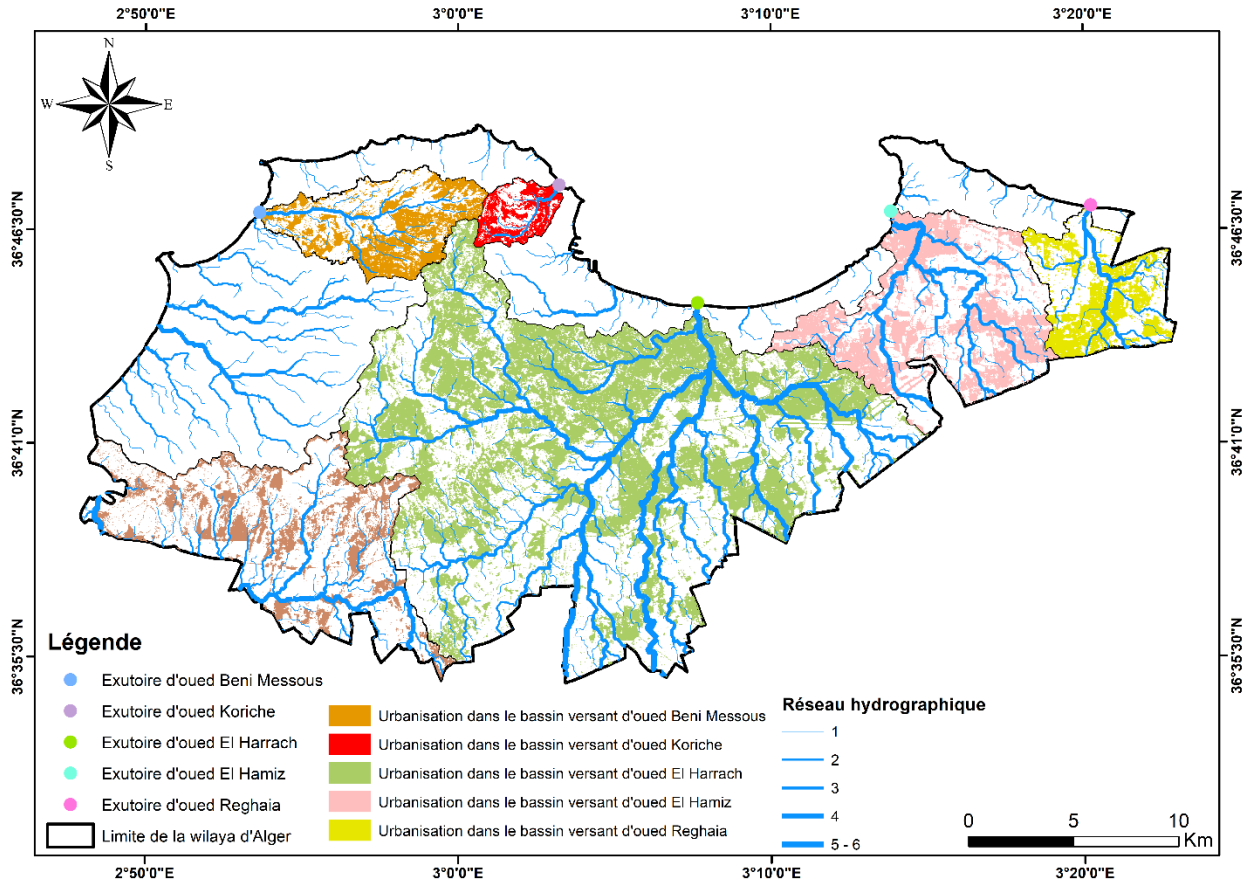
Classe	Vulnérabilité	Superficie (km <sup>2</sup> )	Pourcentage (%)
Végétations	Très faible	1,86	0,24
	Faible	24,23	3,20
	Modérée	29,61	3,92
	Forte	9,61	1,27
	Très forte	0,08	0,01
Eaux	Très faible	0,04	0,005
	faible	2,42	0,32
	Modérée	5,10	0,67
	Forte	3,09	0,40
	Très forte	0,06	0,009
Sols nus	Très faible	0,01	0,001
	Faible	19,23	2,54
	Modérée	45,71	6,05
	Forte	20,94	2,77
	Très forte	0,41	0,05

Les bassins versants de la wilaya d'Alger présentent un taux d'urbanisation très élevé par rapport à leurs superficies (Figure 40). Les bassins versants les plus vulnérables aux inondations, c'est-à-dire ceux d'El Harrach, El Hamiz et Reghaïa présentent un taux d'urbanisation de 43,97 %, 46,95 % et 44,28 %, respectivement (Tableau 6), soit près de la moitié de leur superficie.

Dans la partie ouest d'Alger, le bassin versant de l'oued Beni Messous présente un taux d'urbanisation de 49,35 % alors que le bassin versant d'oued Koriche est à 62,63 %. Ce taux important d'artificialisation du sol de ce bassin explique l'amplitude des dégâts engendrés par l'inondation de Bab El Oued en 2001. Cette urbanisation croissante sur les rives des oueds, parfois incontrôlée et non règlementaire (MENAD et al., 2011), accroît le risque d'inondabilité en raison de l'extension urbaine dans les lits fréquemment inondables (lits majeurs).

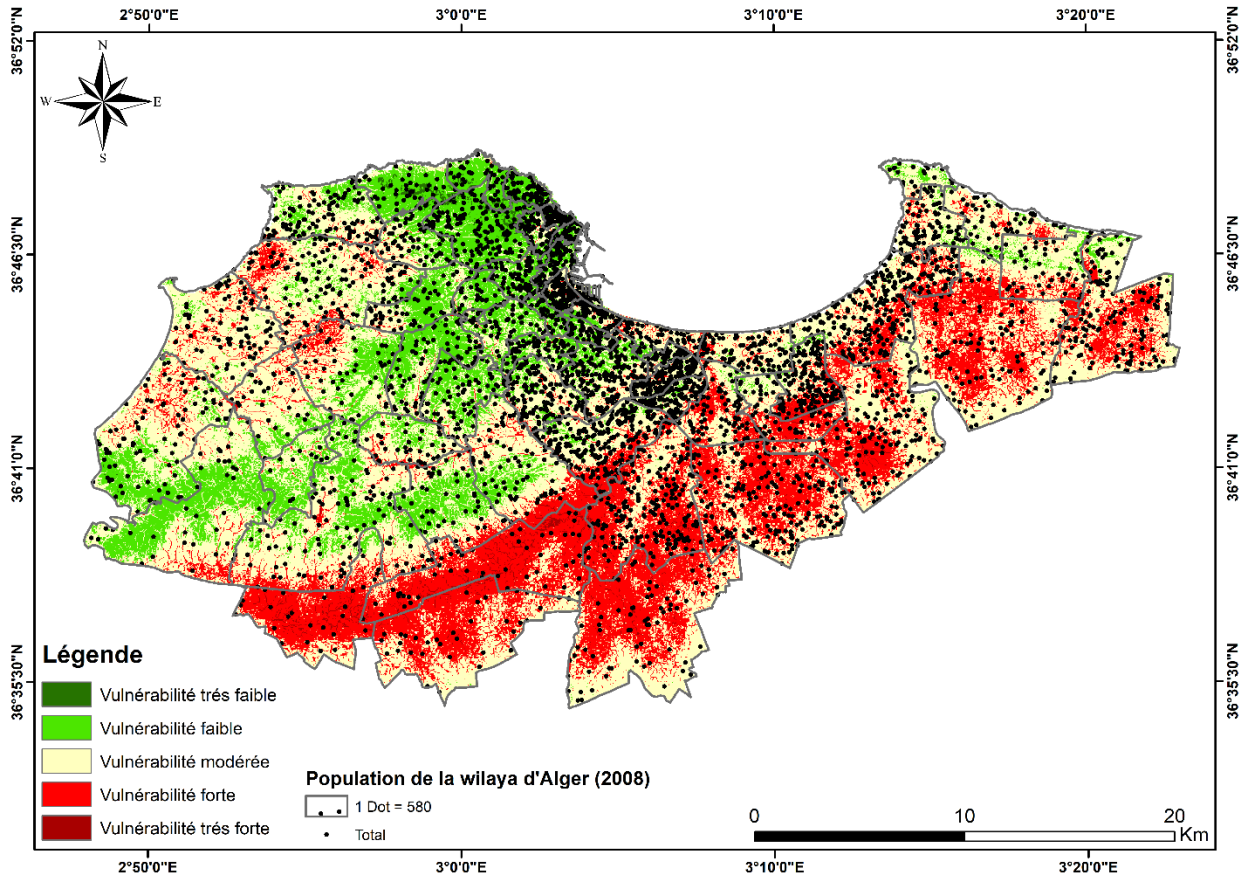
**Tableau 6 : Le taux d'urbanisation des bassins versants de la wilaya d'Alger**

Bassin versant	Oued Beni Messous	Oued Koriche	Oued El Harrach	Oued El Hamiz	Oued Réghaïa
<b>Taux d'urbanisation (%)</b>	49,35	62,63	43,97	46,95	44,28



**Figure 40 : Carte qui représente le taux d'urbanisation des bassins versants de la wilaya d'Alger**

La population de la wilaya d'Alger augmente d'une façon rapide et continue ce qui engendre l'installation de plusieurs infrastructures. Etant donné la quasi-saturation du littoral algérois qui est urbanisé dans sa presque totalité, le tissu urbain s'est étendu tout au long du territoire de la wilaya, particulièrement à proximité des cours d'eau. La Figure 41 montre que la plupart de la population se concentre dans le nord (communes côtières), avec une densité plus importante dans la zone côtière à l'ouest de la baie d'Alger. C'est principalement au niveau des bassins versants d'oueds Koriche et du centre et ouest du bassin versant d'oued El Harrach que la densité démographique est maximale. Dans ce cas, le risque devient plus important dans ces agglomérations, même si leur vulnérabilité est modérée, en raison du nombre important de personnes et d'infrastructures exposées aux inondations. L'installation importante de la population au niveau de la zone côtière augmente également la vulnérabilité de ces zones à un autre type d'inondation, non traité dans ce mémoire, la submersion marine.



**Figure 41 : Densité de la population en 2008 superposée à la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger**

#### 4.4 Les inondations de la wilaya d'Alger

A travers son histoire, la wilaya d'Alger a subi de nombreuses inondations dans ses différentes communes. Le 09 et le 10 novembre 2001, l'Algérie a enregistré la plus terrible inondation de son histoire, la crue centenaire de Bab El Oued (Tableau 7). Selon TABET HELAL et al. (2012), en secteur urbain, des orages intenses peuvent occasionner un très fort ruissèlement en dehors des lits des cours d'eau proprement dit, lorsque l'imperméabilisation des sols et la conception de l'urbanisation et des réseaux d'assainissement font obstacle à l'écoulement normal des pluies intenses. Ce fut le cas des inondations de Bab El Oued où des pluies exceptionnelles et intenses (214 mm pendant 24h) se sont abattues sur la région, sur une étendue de 40 km<sup>2</sup>. Les principales causes de cette catastrophe sont : le régime pluviométrique annuel irrégulier et son évolution défavorable, une imperméabilisation accrue du sol due à la sécheresse et le non-respect

par l'urbanisation des normes environnementales et les constructions anarchiques sur le lit des oueds (TABET HELAL et al., 2012).

Selon le répertoire des inondations de la wilaya d'Alger, issu de la base de données de la Direction Générale de la Protection Civile (2022), quelques statistiques sur les différentes inondations ayant touchées la capitale sont présentées (Figure 42, Figure 43, Figure 44 et Figure 45).

**Tableau 7 : Catastrophe des inondations de Bab El Oued**

<b>Date</b>	10 novembre 2001
<b>Communes</b>	Bab El Oued, El Hammamet, Oued Koriche, Alger Centre
<b>Nombre de morts</b>	1593
<b>Nombre de sinistrés</b>	Plus de 11000
<b>Type d'inondation</b>	Pluies et crues d'oued M'kecel

Selon la Figure 42, qui représente le nombre d'inondations par année, de 1946 à 2021, le nombre d'inondations a exponentiellement augmenté depuis le début des années 2000. Il est passé d'une moyenne de deux (02) inondations par an (1946-2000) à une dizaine (10) par an (2000-2021), soit cinq fois plus d'inondations durant les vingt dernières années. Cette augmentation considérable est probablement due à des facteurs climatiques ainsi qu'à l'explosion démographique qu'a connu la capitale depuis la fin des années 90 marquant un exode rural considérable qui a provoqué un changement considérable du tissu urbain sur l'ensemble du territoire algérois. De plus, à partir de l'année 2001, des projets étatiques de construction de logements ont débuté dans la capitale avec un autre mouvement démographique à partir de 2008, marqué par l'accélération des projets de relogement. En effet, la population a quadruplé de 1998 à 2015 en passant de 2,6 millions à 7 millions d'habitants (Population Data, 2020). Il est important également de souligner que la wilaya d'Alger comprend plusieurs pôles industriels tels que la zone d'El Hamiz, El Harrach, Rouiba, Reghaia et Semmar, qui ont engendré une urbanisation importante dans ces zones, classifiées comme des zones à vulnérabilité forte à modérée. Depuis 2008, les habitants s'orientent vers les nouveaux pôles d'urbanisation caractérisés, pour une grande

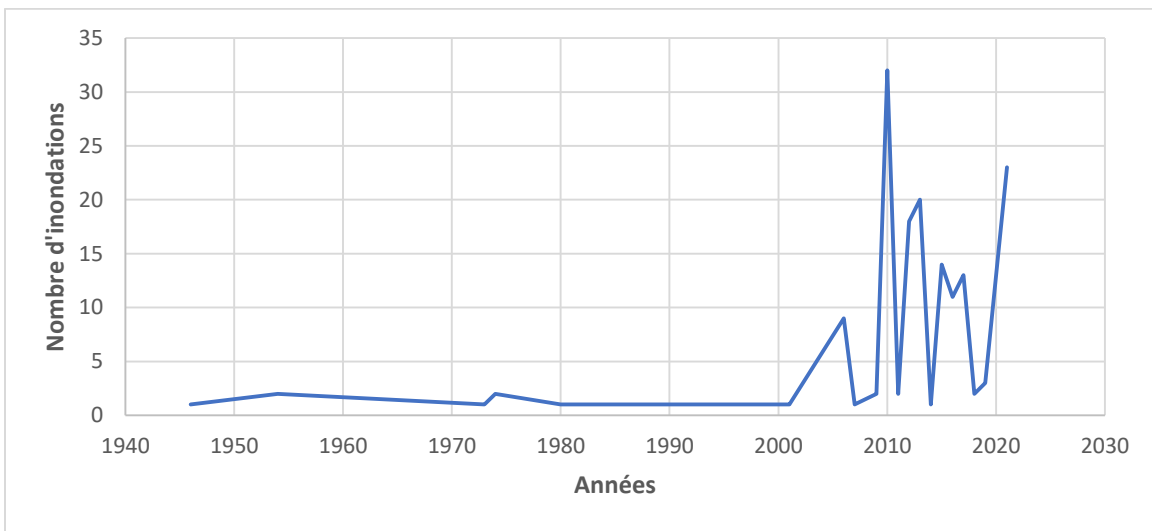
part, par une forte vulnérabilité tels que Bab Ezzouar et Réghaia, ainsi que par une vulnérabilité modérée à faible tels que Sidi Abd Ellah, Douira, Mahelma et Rahmania.

Du point de vue climatique, la région d'Alger est soumise à un climat de type méditerranéen, avec un cumul pluviométrique annuel de l'ordre de 675 mm. Les pluies de forte intensité y sont récurrentes et variables dans le temps et dans l'espace (MENAD et al., 2011). Ces pluies surviennent souvent à la suite de longues périodes de dessiccation favorables à la désagrégation granulaire (LARUE, 2005; PAPPY et al., 1988). Désorganisé en surface, le matériel en place est alors soumis à une intense érosion par ruissèlement. Ce qui est le cas d'Alger qui est passé d'une phase de sécheresse dans les années 1990 à une phase plus humide à partir des années 2000 (Figure 14). En effet, d'après NOUACEUR et al. (2013), une première période humide s'est produite en Algérie entre 1970 et 1986, suivie d'une forte sécheresse pendant près de quinze ans (1987-2002) ; L'année 2003 a marqué le retour d'une situation plus clémente. Les fortes averses, enregistrées depuis, ont provoqué des inondations et causé de gros dégâts matériels, voire des pertes humaines.

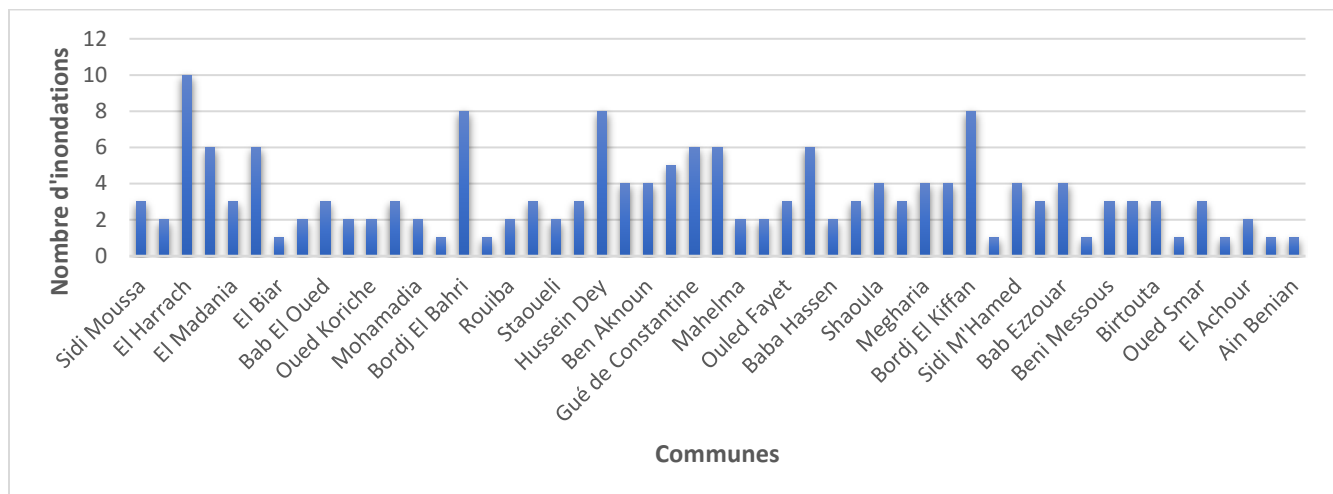
L'année qui a enregistré le plus d'inondations est l'année 2010 avec 32 inondations qui ont touché plusieurs communes de la wilaya d'Alger causant 32 familles sinistrées à Tassala El Merdja, 150 familles à Bordj El Bahri et 30 familles à Staoueli. D'après la Figure 14 et la Figure 15, le mois de novembre est le mois où le cumul mensuel des précipitations de la wilaya d'Alger est maximal, et l'année 2010 faisait partie de la décennie où la wilaya d'Alger a enregistré le plus grand cumul de précipitations annuelles. Le 23 octobre 2021, la wilaya d'Alger a enregistré 23 inondations dans ses différentes communes causant un mort dans la commune de Draria et deux morts à Shaoula, avec 04 familles sinistrées à Khraicia. Durant cette année, Alger a enregistré un cumul des précipitations annuelles d'environ 400 mm/an (Figure 14). L'année 2013 (précipitations cumulées annuelles d'environ 760 mm/an) a aussi été marqué par un nombre important d'inondations avec 20 inondations : le 24 avril 2013 à Baraki et Zéralda, le 15 mai 2013 à Bab Ezzouar ainsi que de nombreuses inondations dans plusieurs communes le 21 mai 2013 causant un mort à Beni Messous (Figure 44). Le 28 octobre 2012, plusieurs communes de la wilaya d'Alger ont enregistré des inondations avec un mort à Megharia (précipitations cumulées annuelles d'environ 750 mm/an).

Selon la Figure 43, les communes les plus touchées par les inondations sont El Harrach (10 inondations), Bordj El Bahri (8 inondations), Hussein Dey (8 inondations), Bordj El Kiffan (8 inondations), ainsi que Baraki, Alger Centre, Gué de Constantine, Tassala El Merdja, Draria (6 inondations) et Bach Djarah (5 inondations). Ceci est en accord avec nos résultats, puisque ces communes se situent dans les zones à forte et très forte vulnérabilité aux inondations.

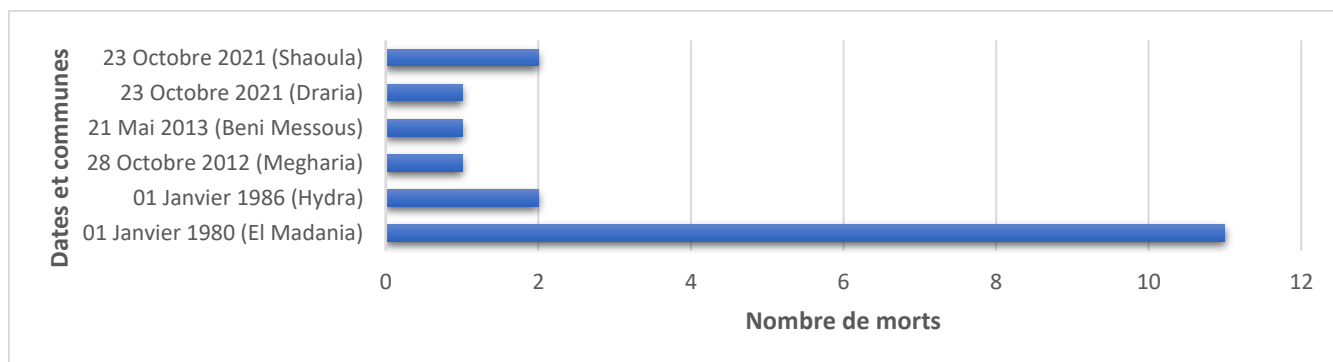
La commune qui a enregistré le nombre de victimes le plus important depuis le début de l’inventorisation des inondations de la wilaya d’Alger, après celle de Bab El Oued, est El Madania avec 11 morts le 01 janvier 1980 (Figure 44). Le nombre maximal de sinistrés, après l’inondation de Bab El Oued, est de 361 familles sinistrées à Alger centre le 26 janvier 1992 (Figure 45). On note que les communes enregistrant le plus de dégâts humains sont celles situées dans les zones à forte urbanisation et concentration démographique (partie centre et ouest de la baie d’Alger). Selon nos résultats, ces communes présentent une vulnérabilité aux inondations modérées à forte.



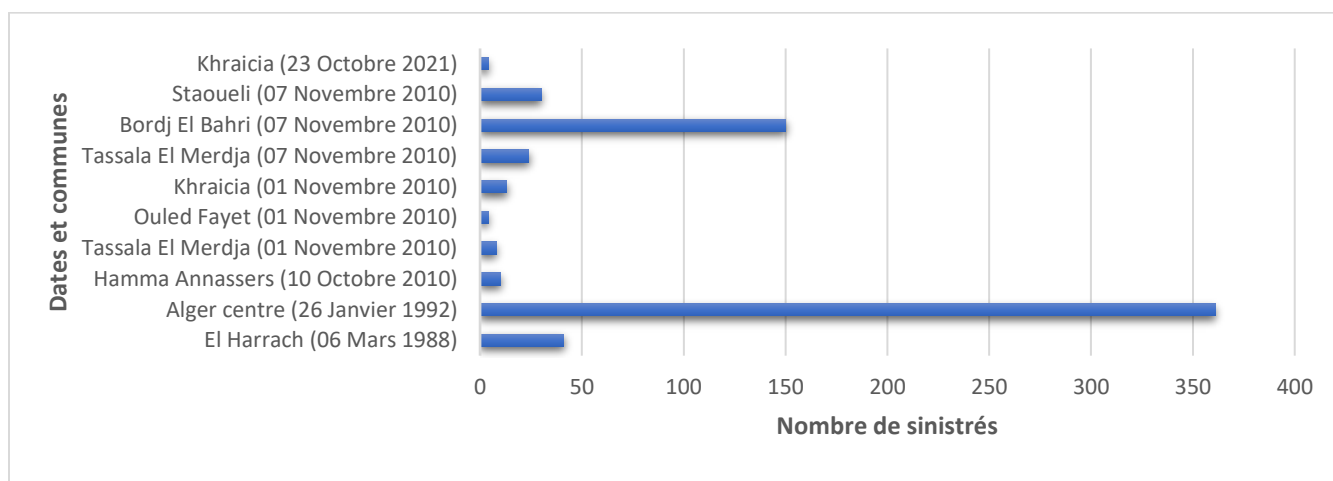
**Figure 42 : Nombre d’inondations dans la wilaya d’Alger en fonction des années (1946-2021)**



**Figure 43 : Nombre d'inondations en fonction des communes de la wilaya d'Algiers (1946-2021)**



**Figure 44 : Nombre de morts enregistrés pour chaque commune et événement**



**Figure 45 : Nombre de sinistrés enregistrés pour chaque commune et événement**

#### **4.5 Stratégie nationale de lutte contre les inondations**

Avoir un cadre législatif solide et des stratégies spécifiques relatives à la gestion et à la réduction des risques de catastrophe est essentiel pour éviter de nouveaux risques et renforcer la résilience à tous les niveaux, y compris parmi la population. La gestion des risques de catastrophe est de plus en plus perçue comme une politique transversale qui demande l'implication des parties prenantes à tous les niveaux et entre les différents secteurs concernés. L'Algérie a connu une évolution de son système de gouvernance de gestion des risques. Elle est passée d'une approche basée sur la réponse aux catastrophes à une vision plus élargie qui comprend la gestion, l'anticipation et la réduction des risques. Cette évolution prend en compte les leçons tirées des catastrophes de grande envergure qui ont frappé le pays (REVUE PAR LES PAIRS ALGÉRIE, 2019).

Selon les principaux actes législatifs régissant le système de gestion des risques et gestion de l'urgence en Algérie, il y a plusieurs décrets et lois qui traitent des catastrophes et des risques majeurs (Annexe 5), dont une seule qui aborde le risque d'inondation « la loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques et la gestion des catastrophes, dans le cadre du développement durable ». Dans cette loi, les inondations sont placées en deuxième position comme un risque majeur touchant le pays, après les séismes. La même loi a redéfini les bases de la politique nationale de gestion des risques, qui doit être gérée par la délégation nationale aux risques majeurs, sous l'autorité du premier ministre. Cette autorité coordonne et évalue les actions des différents acteurs liées à la gestion des risques dont la mise en place d'un plan général de prévention des risques majeurs, pour tout aléa identifié. Parmi les actions préconisées par ce plan : la mise en place d'un système d'alerte et d'un système de veille, ainsi que l'identification des zones vulnérables aux inondations (BENSERRAI et al., 2019).

# Conclusion générale

## Conclusion générale

En termes de catastrophes naturelles, le phénomène étudié dans ce travail est les inondations. L'objectif principal de ce mémoire consistait à étudier la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations, ainsi que de comprendre leur évolution temporelle sous l'effet du réchauffement climatique qui renforce la probabilité et l'intensité des inondations via les changements dans les précipitations totales, leurs fréquences et intensités et l'urbanisation intense et anarchique que la wilaya d'Alger a subi ces dernières années en constituant une menace pour la population lors de la présence de l'aléa.

En utilisant une image satellitaire de 10 m de résolution spatiale, la technique de la classification supervisée a fourni un bon résultat de l'occupation du sol de notre zone d'étude. La wilaya d'Alger présente une occupation du sol très importante qui s'alterne entre terres agricoles (34,19 %) qui dominent la plaine de la Mitidja et une urbanisation dense (44,35 %) dans pratiquement tout son territoire, surtout en aval des oueds, avec un littoral quasiment urbanisé due à une forte densité de population dans les communes côtières.

Dans ce mémoire, l'étude de la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations a été réalisée par une analyse multicritère de type AHP en combinant les données satellitaires, un MNT, la carte des sols de l'Algérie (1 : 500 000) et les cumuls annuels de précipitations. La carte de vulnérabilité nous a montré que les communes qui présentent une vulnérabilité forte se trouvent majoritairement dans les zones d'accumulations des eaux, à l'Est (la Mitidja), au niveau des bassins versants d'El Harrach, El Hamiz et Réghaïa (avec des taux d'urbanisations importants de 44 %, 47 % et 44,2 %) ainsi qu'au Sahel Ouest-Algérois, au niveau des bassins versants de Beni Messous et oued Koriche (des taux d'urbanisations plus importants de 49,4 % et 62,6 %). Cette zone de forte vulnérabilité, représente 9,4 % de l'urbanisation de la wilaya et 13,3 % de ses terres agricoles. Néanmoins, l'urbanisation et les terres agricoles les plus dominants à Alger sont d'une vulnérabilité modérée (25,8 % et 17,4 % de la surface de la wilaya, respectivement).

La validation de nos résultats a prouvé la pertinence de la carte de vulnérabilité où 85 % des inondations enregistrées à Alger ont touché les communes qui se trouvent dans les zones de forte vulnérabilité aux inondations en causant d'énormes dégâts matériels et humains. Le nombre d'inondations a augmenté depuis le début des années 2000 en raison de l'explosion démographique

qu'a connu Alger depuis la fin des années 90, ainsi qu'aux pluies intenses et au grand nombre d'épisodes pluvieux extrêmes depuis 2003.

Cette carte de vulnérabilité peut servir comme un outil d'aide à la décision pour la protection civile ainsi qu'aux autorités concernées pour la réalisation des futurs Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI). D'autres mesures préventives qui peuvent être prises pour une bonne prévention et prévision des inondations consistent à :

- Répertorier les zones inondables par des investigations sur terrain ainsi que l'utilisation de la photographie aérienne ;
- Faciliter l'écoulement des eaux en supprimant les obstacles qui provoquent le débordement et stagnation des eaux ;
- Protéger les lits des oueds par l'interdiction des décharges et l'extraction de matériaux ;
- Réalisation de digues de protection ainsi que le nettoyage régulier des réseaux d'assainissements pluviaux, les avaloires et le curage des oueds et de fossés le long des routes ;
- L'interdiction d'aménagement de nouvelles constructions dans les zones les plus exposées où les mesures restrictives doivent être reprises dans les Plans d'Occupation du Sol (POS) ;
- Mise en place d'un système de prévision, de surveillance et d'alerte aux crues et prévoir des aires d'évacuation selon la cartographie des risques pour les zones inondées ;
- Reboisement et contrôle de l'érosion et le renforcement de la veille météorologique et hydrologique.

Tout ça doit être complété par l'application de nouvelles réglementations, car le risque s'accroît du fait de l'urbanisation anarchique sur les lits majeurs des oueds, d'où la nécessité d'un aménagement du territoire réfléchi et en accord avec les instruments juridiques dédiés à cela (SNAT, SDAAM, PDAU, PAC, POS).

Ce projet de fin d'étude est un travail multidisciplinaire qui a tenté de combiner à la fois des aspects de cartographie et SIG, de télédétection, d'hydrographie, d'aménagement, d'environnement et de gestion de risques majeurs. Dans ce sens, on peut s'orienter vers un travail plus approfondi par :

- L'utilisation des réalités terrains pour la validation de nos résultats (notamment celui de la classification) ;
- Une étude hypsométrique pour chaque bassin versant afin d'estimer leur maturité et de comprendre leur comportement en cas de pluies torrentielles ;
- Faire des mises à jour périodiques de la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger afin de prendre en considération les modifications du climat ainsi que celles de l'occupation du sol ;
- Etudier les caractéristiques hydro-climatologiques et topographiques des bassins versants sujets à des inondations, utiliser des outils de cartographie automatique pour superposer l'ensemble des couches et élaborer des cartes définissant les degrés du risque pour chaque région ;
- Ajouter d'autres paramètres tels que la distance par rapport aux oueds, la nature des oueds (permanents ou temporaires), le pendage des talwegs et l'aspect géotechnique des sols afin d'améliorer l'estimation de la vulnérabilité de la wilaya d'Alger face aux inondations ;
- Faire des études plus approfondies sur les inondations à Alger et en Algérie avec la participation de plusieurs secteurs en développant d'autres méthodes d'adaptation et d'atténuation.



# Bibliographie

---

**Bibliographie**

- ARGENCE, S., et al. (2006).** High resolution numerical study of the Algiers 2001 flash flood: sensitivity to the upper-level potential vorticity anomaly, in: *Advances in Geosciences*. Presented at the 7th Plinius Conference on Mediterranean Storms (2005) - 7th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Crete, Greece, 7 October 2005, Copernicus GmbH, P.P. 251–257. <https://doi.org/10.5194/adgeo-7-251-2006>
- BAGGIO, S., ROUQUETTE, M.-L (2006).** La représentation sociale de l'inondation : influence croisée de la proximité au risque et de l'importance de l'enjeu. *Bull. Psychol.* Vol.481, P.P.103–117.
- BAYOUDH, M. (2013).** Apprentissage de connaissances structurelles à partir d'images satellitaires et de données exogènes pour la cartographie dynamique de l'environnement Amazonien (Thèse pour l'obtention du grade de Docteur). Université des Antilles et de la Guyane (France). P.P.179.
- BENSERRAI, A., BIOD, S., KACHOUT, K. (2019).** Aménagement en zone inondable, cas d'étude de la commune de Sidi Belattar-Mostaganem. Mémoire de master. Architecture. Faculté des sciences et de la technologie. Université Abdelhamid Ibn Badis. P.P.107.
- BEVEN, K.J., KIRKBY, M.J. (1979).** A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. *Hydrological Sciences Bulletin.* Vol.24, P.P.43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- BEVEN, K.J., WOOD, E.F., SIVAPALAN, M. (1988).** On hydrological heterogeneity — Catchment morphology and catchment response. *Journal of Hydrology.* Vol. 100, P.P.353–375. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90192-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90192-8)
- BOUBCHIR, A. (2007).** Risques d'inondation et occupation des sols dans le Thore (Région de Labruguière et de Mazamet). Mémoire de Master. Géographie et aménagement. Institut Daniel Faucher (France). P.P.75.
- BOYER, J. (2016).** The Involvement of Researchers in the Climate Change Adaptation Process: The Case of French Wine Clusters. *Innovations.* Vol.51, P.P. 147–171.
- CHEIKHLOUNIS, G., et al. (2011).** Évaluation du phénomène d'inondation dans la plaine orientale de la Mitidja (oued EL Hamiz er oued Réghaïa) Alger– Algérie. *Bulletin.* Vol.22, P.P. 1–14.
- Centre National de la Recherche Scientifique. (2021).** Les inondations sont-elles liées au changement climatique ?. [En ligne]. [Consulté le 24/01/2022]. Disponible sur le web: <https://www.insu.cnrs.fr/fr/Inondations-et-changement-climatique>.
- COLLETTE, O., et al. (2018).** La ripisylve : Intérêts et particularités, travaux, gestion. [En ligne]. [Consulté le 05/11/2021]. Disponible sur le web: <https://www.crsambre.be>.
- DANKERS, R., et al. (2014).** First look at changes in flood hazard in the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project ensemble. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* Vol.111, P.P. 1–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302078110>
- DANUMAH, J.H., et al. (2016).** Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters.* Vol. 3, P.P. 10. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>
- DAS, S. (2019).** Geospatial mapping of flood susceptibility and hydro-geomorphic response to the floods in Ulhas basin, India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment.* Vol.14, P.P. 60–74. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.02.006>

- 
- DAS, S. (2018).** Geographic information system and AHP-based flood hazard zonation of Vaitarna basin, Maharashtra, India. *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 11, P.P. 576. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3933-4>
- DE VANSSAY, B. (2001).** Risques naturels et relations hommes/environnements dans les Caraïbes, in: Risques et territoires. Centre National de la Recherche Scientifique (France), Vaulx-en-Velin. Vol. Tom 2.
- DERDJINI, H. (2017).** Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images LANDSAT. Mémoire de Master. Hydraulique urbaine. Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique -ARBAOUI Abdellah-. P.P.78.
- DETUNCQ, B. (2021).** Les conclusions du rapport du GIEC 2021. [En ligne]. [Consulté le 21/12/2021]. Disponible sur le web: <https://www.lesoleil.com/>.
- Dictionnaire Environnement. (2019).** Définition de changement climatique. [En ligne]. [Consulté le 27/12/2021]. Disponible sur le web: <https://www.actu-environnement.com/>.
- EAUFRANCE. (2019).** Les inondations et les submersions marines. [En ligne]. [Consulté le 20/12/2021]. Disponible sur le web: <https://www.eaufrance.fr>.
- EGIS EAU, IAU-IDF, BRGM. (2013).** Étude sur la vulnérabilité et l'adaptation de la Wilaya d'Alger au changement climatique et aux risques naturels (Rapport final), Phase 1 - Évaluation et représentation des sources de vulnérabilité. P.P.514.
- EGIS EAU, IAU-IDF, BRGM. (2012a).** Etude sur la vulnérabilité et l'adaptation de la Wilaya d'Alger au changement climatique et aux risques naturels (Rapport provisoire), Phase 1 - Évaluation et représentation des sources de vulnérabilité. P.P.282.
- EGIS EAU, IAU-IDF, BRGM. (2012b).** Etude sur la vulnérabilité et l'adaptation de la Wilaya d'Alger au changement climatique et aux risques naturels (Rapport de démarrage).P.P.79.
- ELFETNI, K. (2019).** Etude de protection contre les inondations de la ville de Doucen (Oued Tamda). Mémoire de Master. Hydraulique. Université de Mohamed Khider-Biskra. P.P.102.
- FAMIGLIETTI, J.S., WOOD, E.F. (1991).** Evapotranspiration and runoff from large land areas: Land surface hydrology for atmospheric general circulation models. *Surveys in Geophysics*. Vol.12, P.P.179–204. <https://doi.org/10.1007/BF01903418>
- GAMEREN, V., WEIKMANS, R., ZACCAÏ, E. (2014).** L'adaptation au changement climatique. Édition : la découverte, P.P.128.
- GAUME, E., et al. (2009).** A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*. Vol.367, P.P. 70–78. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.12.028>
- GAUME, E., et al. (2018).** The Mediterranean region under climate change: A scientific update, Sub-chapter 1.3.4. Mediterranean extreme floods and flash floods. IRD éditions, P.P.133-144.
- GAUSMAN, H.W. (1985).** Plant Leaf Optical Properties in Visible and Near-Infrared Light. Texas Tech University. Vol. 29, P.P.76.
- GILARD, O., GENDREAU, N. (1998).** Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. *Revue des sciences de l'eau*. Vol.11, P.P. 429. <https://doi.org/10.7202/705315ar>
- GRAVELIUS, H. (1914).** Flusskunde. G.J. göschen. The New York public library, P.P.206.
-

- 
- HAMMAMI, S., et al. (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*. Vol.12, P.P.653. <https://doi.org/10.1007/s12517-019-4754-9>
- HEGGLIN, M.I., et al. (2004).** Tracing troposphere-to-stratosphere transport above a mid-latitude deep convective system. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Vol.4, P.P.741-756. <https://doi.org/10.5194/acp-4-741-2004>
- HORTON, R.E. (1932).** Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*. Vol.13, P.P. 350. <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- HOSTACHE, R. (2006).** Analyse d'images satellitaires d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique. Thèse de Doctorat. Sciences de l'eau. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et Forêts -Centre de Montpellier-, Montpellier. P.P.257.
- Gouvernement Français. (2022).** Inondation [En ligne]. [Consulté le 19/11/2021]. Disponible sur le web: <https://www.gouvernement.fr/risques/inondation>.
- IPCC, I.P. on C. (2014).** Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, P.P.1553.
- IPCC, I.P. (2012).** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, P.P.593.
- ISL, BRGM. (2006).** Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles (No. Rapport de tâche 2), volume 2-risque inondation. France, P.P.225.
- Journal Officiel de la République Algérienne démocratique et populaire. (2004).** Loi n° 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable. P.P.13–21.
- KÄSTNER, M. (2003).** Intercomparison of Precipitation Estimations Using TRMM Microwave Data and Independent Data, in: AP-5. Presented at the 3rd GPM Workshop - Consolidating the Concept, Noordwijk, NL, 24-26 June 2003, P. P.8.
- KHOSRAVI, K. (2019).** Extreme Hydrology and Climate Variability, chapter 33 - Flood susceptibility mapping at Ningdu catchment, China using bivariate and data mining techniques. Elsevier, P.P. 419–434. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00033-6>
- KITTIPONGVISES, S. (2020).** AHP-GIS analysis for flood hazard assessment of the communities nearby the world heritage site on Ayutthaya Island, Thailand. Vol.48, P.P.1-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101612>
- KUNDZEWICZ, Z.W. (2014).** Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*. Vol.59, P.P. 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>
- LARUE, J.P. (2005).** The status of ravine-like incisions in the dry valleys of the Pays de Thelle (Paris basin, France). *Geomorphology*. Vol.68, P.P.242-256. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.018>
- LEDOUX, B. (2006).** La Gestion Du Risque Inondation. 11 rue Lavoisier - Paris-, P.P.766.
- LIN, Y-L. (2007).** Mesoscale Dynamics, mesoscale convective systems. Cambridge University Press, Cambridge, P.P. 322–378. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511619649.010>
-

- 
- LIUZZO, L., SAMMARTANO, V., FRENI, G. (2019).** Comparison between Different Distributed Methods for Flood Susceptibility Mapping. *Water Resources Management*. Vol.33, P.P. 1-19. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02293-w>
- LLASAT, M.C. (2021).** Floods evolution in the Mediterranean region in a context of climate and environmental change. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. Vol.47, P.P.13–32. <https://doi.org/10.18172/cig.4897>
- LLASAT, M.C. (2010).** High-impact floods and flash floods in Mediterranean countries: the FLASH preliminary database, in: *Advances in Geosciences*. Presented at the 10th EGU Plinius Conference on Mediterranean Storms (2008) - 10th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Nicosia, Cyprus, 22&ndash;24 September 2008, Copernicus GmbH, P.P.47–55. <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-47-2010>
- LLASAT, M.C. (2016).** Trends in flash flood events versus convective precipitation in the Mediterranean region: The case of Catalonia. *Journal of Hydrology*. Vol.541, P.P.24–37. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.040>
- MEDD-PRIM. (2004).** Risques naturels majeurs : Les inondations, P.P.24.
- MEDJADJ, T. (2009).** L’apport de la télédétection de haute résolution spatiale pour le développement urbaine qualitatif cas de la ville d’Alger. Mémoire de Master. Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE. P.P172.
- MENAD, W., DOUVINET, J., ARNAUD-FASSETTA, G. (2011).** Le risque d’inondation dans la vallée de l’oued Koriche (Massif de Bouzaréah, Alger ouest) : analyse systémique de l’aléa et facteurs de vulnérabilité. *Actes du Colloque International*. P.P.217.
- MILLY, P.C.D. (2002).** Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*. Vol. 415, P.P. 514–517. <https://doi.org/10.1038/415514a>
- MOGLEN, G., ELTAHIR, E., BRAS, R. (1998).** On the Sensitivity of Drainage Density to ClimateChange. *Water Resources Research*. Vol.34. P.P.862. <https://doi.org/10.1029/97WR02709>
- MOHLEJI, S., PIELKE, R. (2014).** Reconciliation of Trends in Global and Regional Economic Losses from Weather Events: 1980–2008. *Natural Hazards Review*. Vol.15, P.P.9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000141)
- MULOT, V., VIGNERON, A.-L., LAMBERT-HADID, M.-L. (2010).** Le littoral face aux changements climatiques. *Journal of Mediterranean geography*. P.P.131–137. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.5264>
- NEZZAL, F., BELKEBIR, R., BENHAIDA, A. (2015).** Risque d’inondations dans le bassin versant de l’oued Hamiz (baie d’Alger). *LARHYSS Journal*. Vol 12, P.P. 81–89.
- NOUACEUR, Z., LAIGNEL, B., TURKI, I. (2013).** Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ?. *Géographie Physique et Environnement*. P.P. 307–323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>
- NOURI, M., OZER, A., OZER, P. (2016).** Etude préliminaire sur le risque d’inondation en milieu urbain (Algérie). *Geo-Eco-Trop*. Vol. 40, P.P. 201–208.
- Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique. (2019).** Les événements météorologiques extrêmes dans un contexte de changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement - ONERC, P.P.200.
- OMM. (2021).** OMM: Le nouveau rapport sur le climat appelle à agir d’urgence. [En ligne]. [Consulté le 21/12/2021]. Disponible sur le web: <https://public.wmo.int/>.
-

- 
- ONS. (2013).** Office National des Statistiques. Démographie Algérienne. [En ligne]. [Consulté le 28/02/2022]. Disponible sur le web: <https://www.ons.dz/>.
- ONS. (2009).** Collections Statistiques. [En ligne]. [Consulté le 09/05/2022]. Disponible sur le web: <https://www.ons.dz/collections/>.
- OUMA, Y., TATEISHI, R. (2014).** Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. *Water*. Vol.6, P.P.31. <https://doi.org/10.3390/w6061515>
- PAPPY, F., BOIFFIN, J., DOUYER, C. (1988).** Influence des systèmes de culture sur les risques d'érosion par ruissellement concentré. II. Evaluation des possibilités de maîtrise du phénomène dans les exploitations agricoles. *Agronomie*. Vol.8, P.P.745–756.
- PAUL, G.C., SAHA, S., HEMBRAM, T.K. (2019).** Application of the GIS-Based Probabilistic Models for Mapping the Flood Susceptibility in Bansloi Sub-basin of Ganga-Bhagirathi River and Their Comparison. *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*. Vol.2, P.P.120–146. <https://doi.org/10.1007/s41976-019-00018-6>
- Population Data. (2020).** Algérie • Fiche pays • PopulationData.net. [En ligne]. [Consulté le 28/02/2022]. Disponible sur le web: <https://www.populationdata.net/pays/algerie/>
- POTTIER, N. (1998).** L'utilisation des outils juridiques de prévention du risque d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation du sol dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne). Mémoire de Doctorat de Sciences et Techniques de l'Environnement. École Nationale des Ponts et Chaussées. P.P.400.
- RAACHI, T., BENDIB, A. (2020).** Simulation des inondations par un modèle combiné 1D/2D à l'aide du logiciel HECRAS. Cas de la ville d'El kseur (W. Bejaia). Mémoire de Master. Université de M'sila. P.P.100.
- RACLOT, D. (2003).** Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine. Mémoire de Doctorat en Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental. Université Montpellier 2. P.P.294.
- RAMOS, A., CUNHA, L., CUNHA, P. (2014).** Application de la Méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique à l'étude des glissements de terrain dans la région littorale du centre du Portugal : Figueira da Foz – Nazaré. *Geo-Eco-Trop*. Vol. 38, P.P. 33–44.
- REDJEM, A., NOUIBAT, B., NAGHEL, M. (2020).** Pour des villes résilientes aux inondations: Cas de la ville de M'sila, Algérie. *Science et Technologie, Science de la Terre*. P.P. 33–42.
- REVUE PAR LES PAIRS ALGÉRIE (2019).** Programme 2018-2019 de revue par les pairs dans le cadre de la coopération de l'UE en matière de protection civile et de gestion des risques de catastrophe. (Peer review). P.P.114.
- ROBSON, A., BEVEN, K., NEAL, C. (1992).** Towards identifying sources of subsurface flow: A comparison of components identified by a physically based runoff model and those determined by chemical mixing techniques. *Hydrological Processes*. Vol.6, P.P. 199–214. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360060208>
- ROUSE, J., et al. (1974).** Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. Texas A & M University, Remote Sensing Center. P.P. 390.
- SAATY, R.W. (1987).** The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modeling*. Vol.9, P.P. 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. (1991).** Méthode de analyse hiérarchica, in: Analytic Hierarchy Process.Planning, Priority Setting, Resource Allocation. Português. São Paulo, McGraw-Hill, Makron, P.P. 367.
- SAFAR ZITOUN, M., TABTI-TALAMALI, A. (2009).** La mobilité urbaine dans l'agglomération d'Alger : évolutions et perspectives (Étude de cas. Rapport définitif), Avec la collaboration de Julien Le Tellier, chargé d'études du Plan Bleu. P.P.108.
- SANTOS-MUÑOZ, D., et al. (2006).** Diagnosis and numerical simulations of a heavy rain event in the Western Mediterranean Basin, in: Advances in Geosciences. Presented at the 7th Plinius Conference on Mediterranean Storms (2005) - 7th Plinius Conference on Mediterranean Storms, Crete, Greece, 5&ndash;7 October 2005, Copernicus GmbH. Vol.7. P.P. 105–108. <https://doi.org/10.5194/adgeo-7-105-2006>
- SIVAPALAN, M., WOOD, E.F. (1987).** A multidimensional model of nonstationary space-time rainfall at the catchment scale. Water Resources Research. Vol. 23, N°7, P.P.1-11. <https://doi.org/10.1029/WR023i007p01289>
- SIVAPALAN, M., WOOD, E.F., BEVEN, K.J. (1990).** On hydrologic similarity: 3. A dimensionless flood frequency model using a generalized geomorphologic unit hydrograph and partial area runoff generation. Water Resources Research. Vol.260, P.P.43–58. <https://doi.org/10.1029/WR026i001p00043>
- STRAHLER, A.N. (1952).** Dynamic basis of geomorphology. Geological Society of America Bulletin. Vol. 63, P.P. 923. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2)
- TABET HELAL, M.A., et al. (2012).** La crue centenaire de Bab EL Oued, Alger (Algérie). Journées de l'Hydraulique. Vol. 34, P.P.1–8.
- THOMAS, W., et al. (2003).** Analysis of the Algerian severe weather event in November 2001 and its impact on ozone and nitrogen dioxide distributions. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology. Vol.55, P.P.993-1006. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v55i5.16392>
- TORTEROTOT, J.P. (1993).** Le coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des incertitudes. Mémoire de Doctorat en Sciences et Techniques de l'Environnement. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. P.P. 351.
- ULLAH, K., ZHANG, J. (2020).** GIS-based flood hazard mapping using relative frequency ratio method: A case study of Panjkora River Basin, eastern Hindu Kush, Pakistan. PLOS ONE. Vol.15, P.P.1-18. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229153>
- Union Nationale des Centres Permanents d'Initiatives pour l'Environnement. (2014).** Les Cahiers de l'eau n°10 "Les inondations" : connaître leurs caractéristiques, leurs impacts sur les sociétés et les leviers pour agir. [En ligne]. [Consulté le 26/01/2022]. Disponible sur le web : <http://www.cpie-hautsdefrance.fr/cpie/content.aspx?ID=148800>.

#### Sites internet

<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

<https://earthexplorer.usgs.gov/>

[https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public\\_path/shared\\_folder/projects/DIS4ME/indicator\\_descriptions/drainage\\_density.htm](https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder/projects/DIS4ME/indicator_descriptions/drainage_density.htm)

[https://stringfixer.com/fr/Drainage\\_density](https://stringfixer.com/fr/Drainage_density)

<https://scihub.copernicus.eu/>

<https://chrsdata.eng.uci.edu/>



# Annexes

## Annexe 1

Inventaire des principales inondations ayant frappé la wilaya d'Alger

**Tableau 8 : Quelques évènements d'inondations frappant la wilaya d'Alger (Direction Générale de la Protection Civile, 2022)**

Date	Communes	Type d'inondation
Le 02 février 1946	Sidi Moussa	Crue d'oued
Le 08 avril 1954	Rais Hamidou	Crue d'oued
Le 01 décembre 1954	El Harrach	Crue d'oued
Le 01 février 1973	El Harrach	Crue d'oued
Le 01 mars 1974	El Harrach (zones industrielles) et Baraki	Crue d'oued
Le 01 octobre 1984	Alger centre	pluies
Le 26 janvier 1992	Territoire de la wilaya	Pluies et crues
Le 10 novembre 2001	Bab El Oued	Pluies et crues
Le 03 mai 2006	Alger centre, Dar El Beida, Rais Hamidou, Mohammadia, Ain Taya, Bordj El Bahri, Haraoua, Rouïba et Reghaïa	Inondation lente de plaine (fortes précipitations)
Le 08 mars 2007	El Harrach	Crue de l'Oued d'El Harrach
Le 28 septembre 2009	Staoueli et Zéralda	Ruissèlement urbain suite à de fortes chutes de pluies
Le 28 septembre 2010	Hamma Annassers, Hussein Dey, Ben Aknoun, Hammamet et Rouïba	Ruissèlement urbain suite à de fortes chutes de pluies
Le 31 aout 2012	Bouzareah, Baraki, Bourouba et Gué de Constantine	Ruissèlement urbain (pluies de 40 mm pendant 03 heures)
Le 21 mai 2013	Plusieurs communes de la wilaya (presque la totalité)	Ruissèlement urbain et crue des oueds
Le 09 octobre 2015	Plusieurs communes de la wilaya	Ruissèlement urbain (pluies de 60 mm à 100 mm durant 24 heures)
Le 21 décembre 2016	Plusieurs inondations dans plusieurs communes	Ruissèlement urbain et crue d'oued (pluies de 50 mm à 80 mm durant 24 heures)
Le 23 janvier 2017	El Harrach, Baraki, Oued Smar, Dar El Beida, El kalitous, Tassala El Merdja et Sidi Moussa	Crue de l'oued El Harrach et oued El Hamiz, ruissèlement urbain, inondation de plaine et remonté de la nappe
Le 31 octobre 2021	Des inondations dans tout le territoire de la wilaya	Ruissèlement urbain, crue de plusieurs oueds et refoulement du réseau d'assainissement

## Annexe 2

Image du satellite SENTINEL 2 utilisée pour l'étude de l'occupation du sol et du NDVI

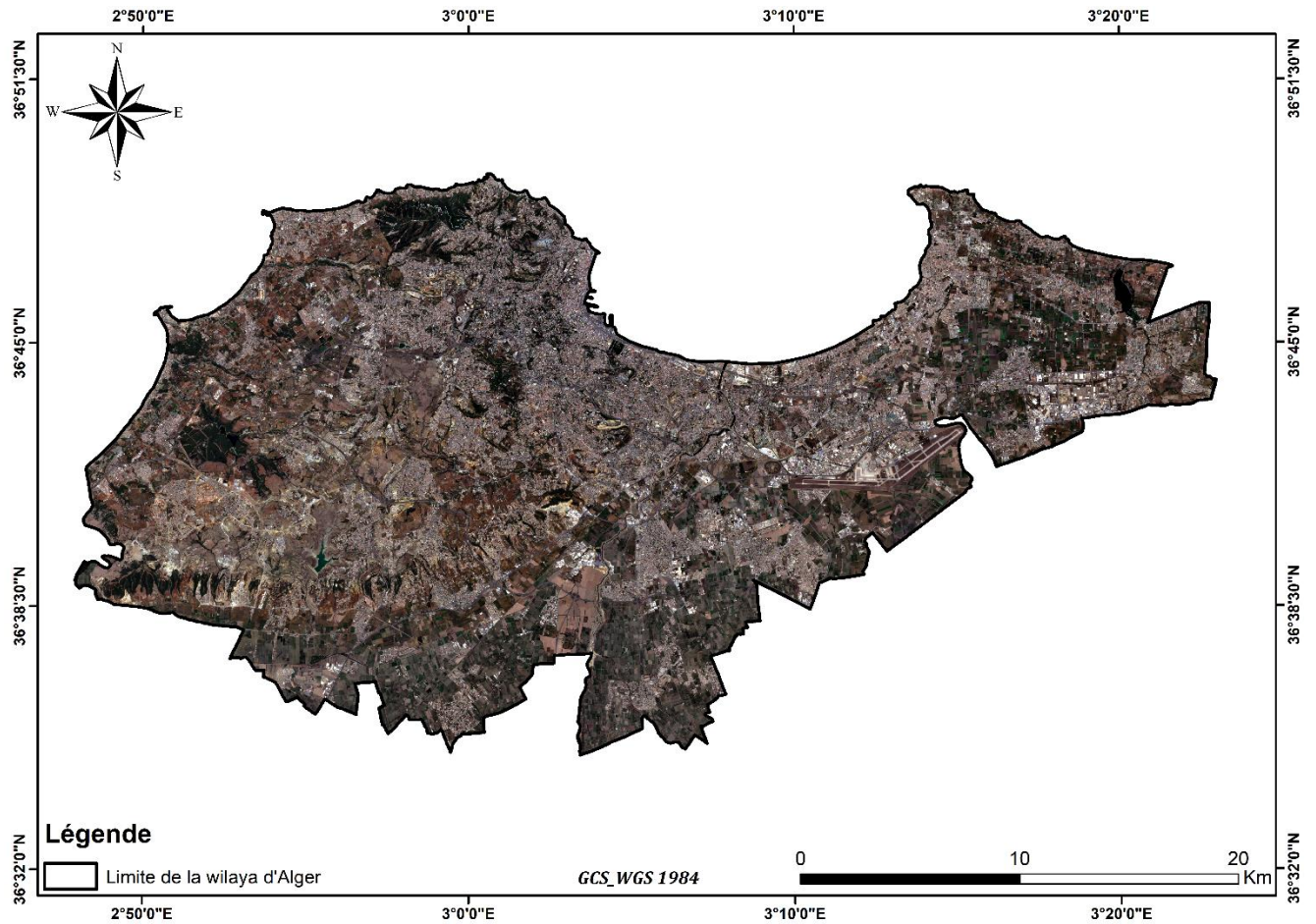


Figure 46: Image Sentinel 2 découpée selon les limites administratives de la wilaya d'Alger

## Annexe 3

**Tableau 9 : Critères de causalité des inondations utilisés pour l'Analyse Hiérarchique**  
**Multicritères**

	<b>Critères de causalité d'inondations</b>	<b>unité</b>	<b>Intervalle des Classes</b>	<b>Classes de susceptibilité</b>	<b>Taux de susceptibilité</b>	<b>Pondération (%)</b>
1	Topographic Wetness index (TWI)	/	-7,06 à -3,62	Très faible	1	22%
			-3,62 à -1,79	Faible	2	
			-1,79 à 0,33	Modérée	3	
			0,33 à 3,33	Forte	4	
			3,33 à 11,61	Très forte	5	
2	Élévation (MNT)	m	0 à 43	Très forte	5	15%
			43 à 93	Forte	4	
			93 à 152	Modérée	3	
			152 à 220	Faible	2	
			220 à 405	Très faible	1	
3	Pente	%	0 à 0,95	Très forte	5	15%
			0,95 à 2,19	forte	4	
			2,19 à 3,9	modérée	3	
			3,9 à 6,67	faible	2	
			6,67 à 24,3	Très faible	1	
4	Précipitation	mm/an	815,5 à 883,4	Très faible	1	11%
			883,4 à 922,7	Faible	2	
			922,7 à 961,2	Modérée	3	
			961,2 à 1001,4	Forte	4	
			1001,4 à 1043,4	Très forte	5	
5	Occupation du sol	/	Eau	Très forte	5	7%
			Terres agricoles	Forte	4	
			Urbanisation	Modérée	3	
			Sols nus	Faible	2	
			Végétation	Très faible	1	
6	Couvert vegetal (NDVI)	/	-0,96 à -0,23	Très forte	5	3%
			-0,23 à 0,14	Forte	4	
			0,14 à 0,29	Modérée	3	
			0,29 à 0,50	Faible	2	
			0,50 à 0,99	Très faible	1	
7	Densité de drainage	km/km <sup>2</sup>	0 à 54,6	Très faible	1	22%
			54,6 à 106,3	faible	2	
			106,3 à 155,2	modérée	3	

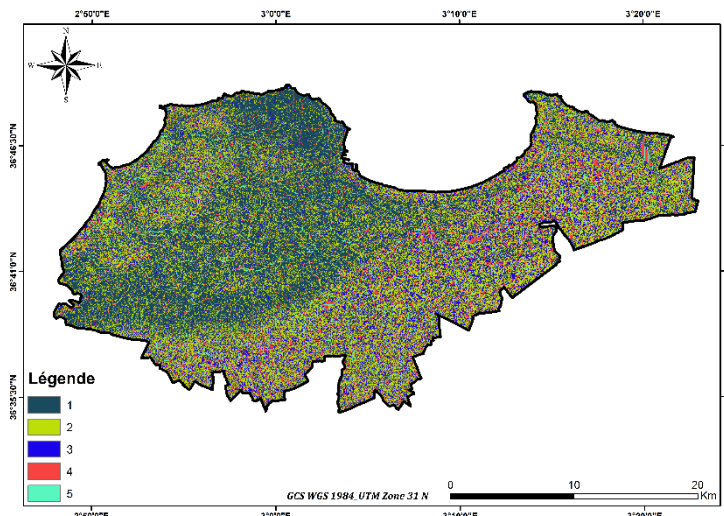
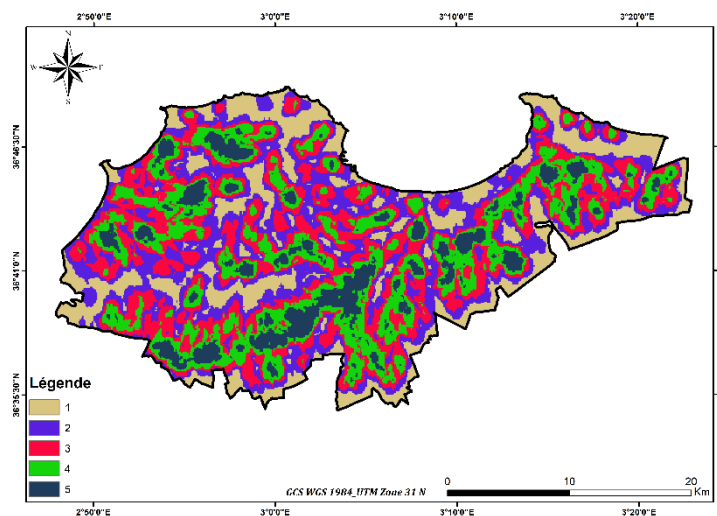
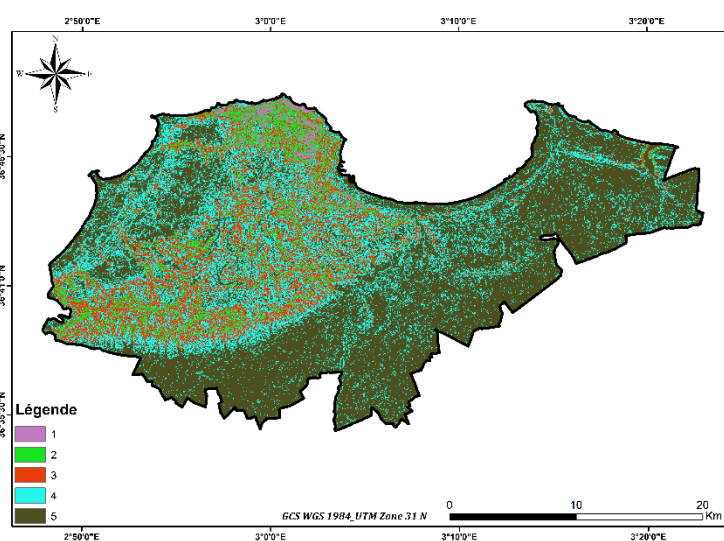
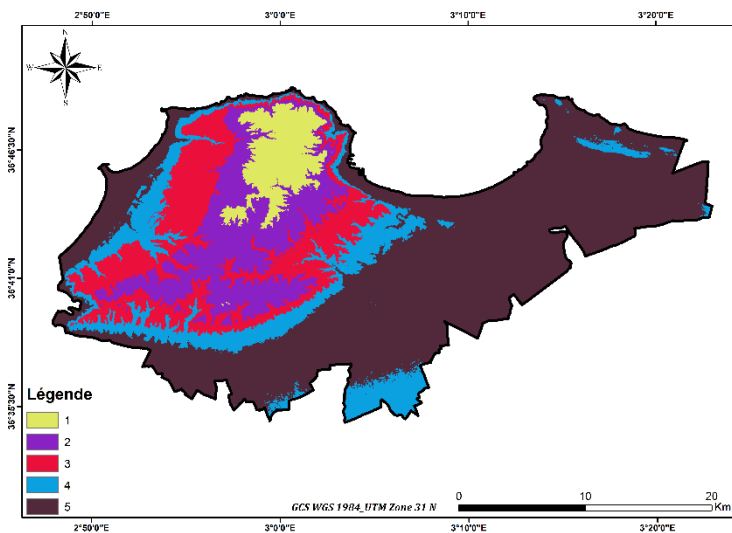
	Critères de causalité d'inondations	unité	Intervalle des Classes	Classes de susceptibilité	Taux de susceptibilité	Pondération (%)
			155,2 à 211,3	Forte	4	
			211,3 à 366,6	Trés forte	5	
8	Types de sol	/	Sols alluviaux	Trés forte	5	5%
			Sols dunaires	Forte	4	
			Sols insaturés	Modérée	3	
			Sols calcaires et de marais	Faible	2	
			Roche mère	Trés faible	1	

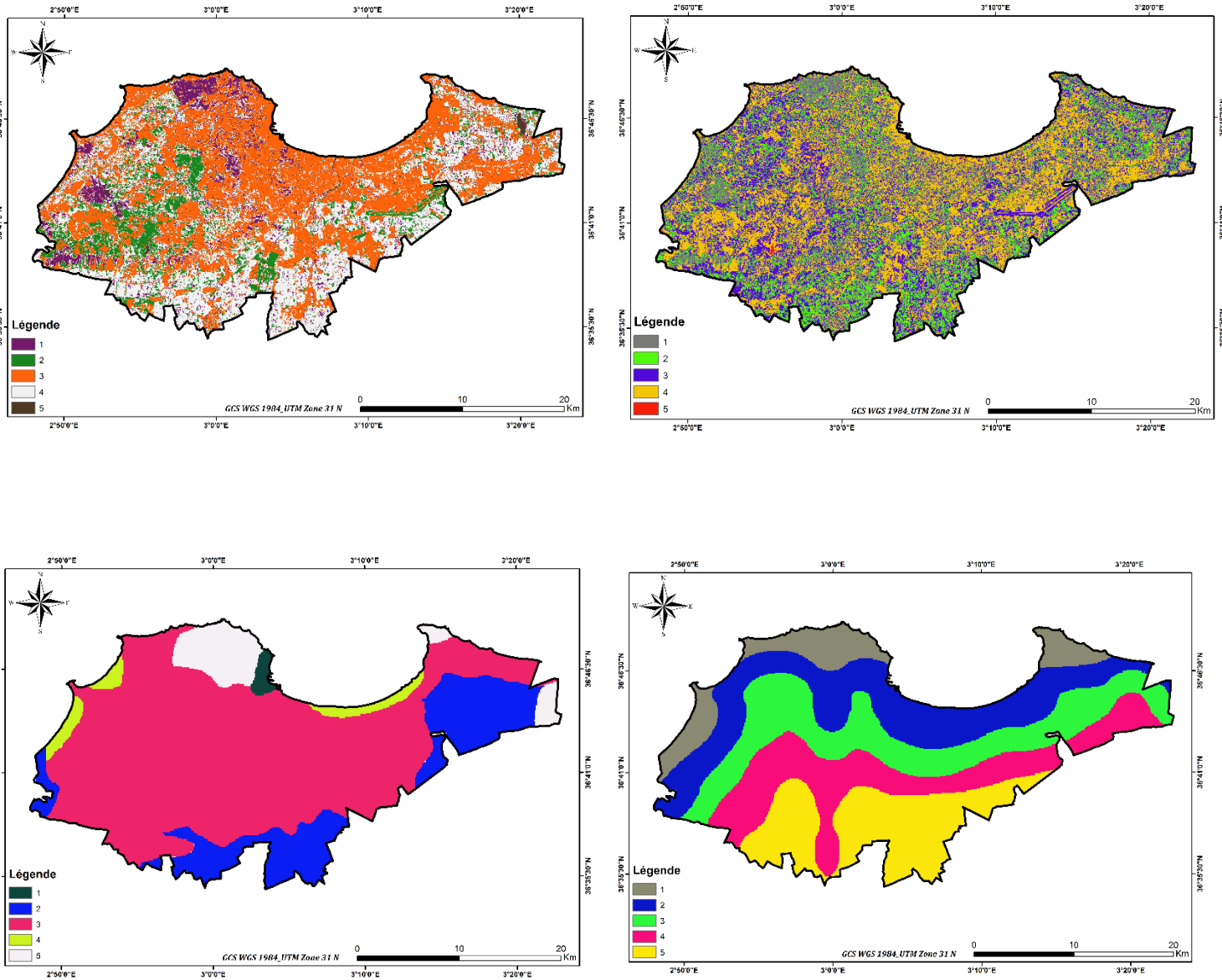
La matrice obtenue après la comparaison des différentes caractéristiques

Matrice									Vecteur propre principal normalisé	
	TWI	Elévation	Pente	Précipitation	Occupation du sol	NDVI	Densité de drainage	Types de sol		
	1	2	3	4	5	6	7	8		
TWI	1	2	2	2	3	5	1	3	21.50%	
Elévation	2	1	1	2	3	5	1/2	3		15.26%
Pente	3	1	1	2	3	5	1/2	3		15.26%
Précipitation	4	1/2	1/2	1	3	3	1/2	2		10.74%
Occupation du sol	5	1/3	1/3	1/3	1	3	1/3	3		7.29%
NDVI	6	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1/5	1/2		3.18%
Densité de drainage	7	1	2	2	3	5	1	3		21.50%
Types de sol	8	1/3	1/3	1/2	1/3	2	1/3	1		5.27%

### Annexe 4

Les cartes des critères utilisés dans l'analyse multicritères AHP pour la production de la carte de vulnérabilité de la wilaya d'Alger (carte de distribution des altitudes, carte des pentes, carte de la densité de drainage, carte de TWI, carte de l'occupation du sol, carte de NDVI, carte des types de sol et carte de précipitation respectivement)





*Figure 47: Cartes des critères utilisés dans l'analyse multicritères AHP avec une classification de 1 à 5 (de la vulnérabilité la plus faible à la plus forte)*

---

## Annexe 5

### *Les principaux actes législatifs réglant le système de gestion des risques et gestion de l'urgence en Algérie* (REVUE PAR LES PAIRS ALGÉRIE, 2019).

- Décret n° 85-231 du 25 août 1985 fixant les conditions et modalités d'organisation et mise en œuvre des interventions et secours en cas de catastrophes.
- Décret n° 85-232 du 25 août 1985 relatif à la prévention des risques de catastrophe.
- Décret exécutif n° 90-402 du 15 décembre 1990 portant organisation et fonctionnement du fonds de calamités naturelles et de risques technologiques majeurs ; décret exécutif n° 01-100 du 18 avril 2001 ; décret exécutif n° 05-131 du 24 avril 2005 ; arrêté interministériel du 26 décembre 2017 modifiant l'arrêté du 6 février 2011 fixant la nomenclature des recettes et des dépenses du compte d'affectation spéciale du Trésor 302-042 intitulé « fonds de calamités naturelles et de risques technologiques majeurs ».
- Décret exécutif n° 91-503 du 21 décembre 1991 portant sur l'organisation de l'administration centrale de la direction générale de la protection civile et décret exécutif n° 93-147 du 22 juin 1993 modifiant et complétant le décret exécutif n° 91-503 du 21 décembre 1991 portant sur l'organisation de l'administration centrale de la direction générale de la protection civile.
- Loi n° 01-20 du 12 décembre 2001 relative à l'aménagement et au développement du territoire.
- Décret exécutif n° 02-247 du 23 juillet 2002 fixant les modalités de fonctionnement du compte d'affectation spéciale n° 302-096 intitulé « fonds pour les urgences et les activités de soins médicaux ».
- Loi n° 03-10 du 19 juillet 2003 relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- 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.
- Décret exécutif n° 11-194 du 22 mai 2011 portant sur les missions, organisation et fonctionnement de la délégation nationale aux risques majeurs.
- Loi n° 19-02 du 17 juillet 2019 relative aux règles générales de prévention des risques d'incendie et de panique.
- Décret exécutif n° 19-59 du 2 février 2019 fixant les modalités d'élaboration et de gestion des plans.
- Loi n° 90-29 relative à l'aménagement et à l'urbanisme.

---

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse de la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations en employant la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP), par l'agrégation de huit critères (la distribution des altitudes, la pente, la densité de drainage, l'indice d'humidité topographique, l'occupation du sol, le NDVI, les types de sol et les précipitations). Le résultat, représenté par une carte de vulnérabilité, constituera un outil important pour une meilleure gestion des risques et de l'occupation du sol. Le recensement effectué par les services de la Protection Civile de 1946 à 2021, révèle que la wilaya d'Alger a connu plusieurs inondations dévastatrices, où 85 % de celles-ci ont touchées les communes qui présentent une forte vulnérabilité aux inondations, situées principalement au niveau de la Mitidja et du Sahel-Ouest Algérois. Ces zones représentent 71,29 km<sup>2</sup> (~10% de la superficie d'Alger), notant que 25,8 % des zones urbanisées présentent une vulnérabilité modérée. Ce risque est devenu plus fréquent et plus intense à cause de la forte anthropisation, souvent anarchique, que connaît la wilaya d'Alger ces dernières années, surtout au bord des lits majeurs des oueds (près de 50 % de la superficie des bassins versants est urbanisée). Cette tendance s'aggravera encore plus avec le dérèglement climatique par l'accélération des fréquences des événements extrêmes, d'où la nécessité d'une application plus stricte de la réglementation en vigueur régissant l'aménagement du territoire, accompagnée de mesures d'adaptation et d'atténuation de la vulnérabilité d'Alger.

**Mots clés :** wilaya d'Alger, inondations, vulnérabilité, Analyse Multicritère Hiérarchique, occupation du sol.

---

## Abstract

This End-of-Studies Project focuses on the analysis of Algiers vulnerability to flooding using the method of Hierarchical Multicriteria Analysis (AHP) by the aggregation of eight criteria (the distribution of altitudes, the slope, the drainage density, the topographic wetness index, the land cover and land use, the NDVI, soil types and precipitations). The result, represented by a vulnerability map, is an important tool for a better risk and land use management. The census carried out by the Civil Protection services from 1946 to 2021, reveals that the wilaya of Algiers has experienced several devastating floods, 85% of them affected the municipalities which present a high vulnerability to floods, mainly in the Mitidja and the Western Algiers's Sahel. These areas represent 71.29 km<sup>2</sup> (~10% of Algiers's area), while 25.8% of urbanized area present a moderate vulnerability. This risk has become more frequent and more intense due to the strong, often anarchic anthropization of the wilaya of Algiers these last years, especially at the edge of the major beds of the Wadis (nearly 50 % of the watersheds's area is urbanized). This trend will worsen even more with the climate change by the acceleration of extreme events frequencies, hence the need for a stricter application of the regulations in force governing land use planning, accompanied by adaptation and mitigation measures of the Algiers vulnerability to floods.

**Key words:** wilaya of Algiers, floods, vulnerability, Hierarchical Multicriteria Analysis, land use.

---

## المخلص

يركز هذه العمل على تحليل قابلية تعرض ولاية الجزائر للفيضانات باستخدام طريقة التحليل الهرمي متعدد المعايير من خلال تجميع ثمانية معايير (توزيع الارتفاعات، المنحدر، كثافة الصرف، مؤشر الرطوبة الطبوغرافية، استخدام الاراضي، مؤشر الغطاء النباتي بالفرق الطبيعي، انواع التربة والامطار). النتيجة، الممثلة بخريطة الضعف، ستكون أداة مهمة لتحسين إدارة المخاطر واستخدام الأراضي. يكشف الإحصاء الذي أجرته خدمات الحماية المدنية من عام 1946 إلى 2021 أن ولاية الجزائر شهدت عدة فيضانات مدمرة، حيث 85% من الفيضانات ضرت البلديات التي تمثل قابلية عالية للتأثر، والتي تقع على مستوى المتيجة والساحل الغربي الجزائري. تمثل هذه المناطق 71,29 كم<sup>2</sup> (10% مقارنة بمساحة ولاية الجزائر)، حيث أن 25,8 % من المناطق الحضرية لديهم قابلية معتدلة للتأثر. أصبح هذا الخطر أكثر تواترا وأكثر كثافة بسبب استخدام الأراضي القوي، غالبا فوضويا، الذي تعيشه ولاية الجزائر في السنوات الأخيرة، خاصة على حافة الوديان الرئيسية (حوالي 50 % من مساحة مستجمعات المياه حضرية). سوف يزداد هذا الخطر سوءًا مع التغير المناخي من خلال تسارع ترددات الأحداث المتطرفة، ومن هنا تأتي الحاجة إلى التطبيق الأكثر صرامة للأنظمة السارية التي تحكم تخطيط استخدام الأراضي، مصحوبة بإجراءات للتكيف والتخفيف من قابلية ضعف ولاية الجزائر.

**الكلمات الدالة:** ولاية الجزائر، الفيضانات، قابلية التأثر، التحليل الهرمي متعدد المعايير، استخدام الأراضي.

---