

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 De Master en sciences de la mer et l'aménagement du littoral

Spécialité : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

## Thème :

# Contribution à l'étude des inondations dans une zone côtière : wilaya d'Alger

Présenté par :

- **Gaouaou Farah**
- **Hamrouche Soumia**

Soutenu le 11/07/2023 devant le jury composé de :

M<sup>me</sup> Abdeddaim Hakima  
M<sup>me</sup> Keraghel Mehdi  
M<sup>me</sup> Harid Romaissa  
M<sup>me</sup> Maouel Djamila

Maitre de conférence B (ENSSMAL)  
Maitre de conférence B (ENSSMAL)  
Maitre Assistant B (ENSSMAL)  
Maitre de conférence B (ENSSMAL)

Présidente  
Promotrice  
Examinatrice  
Examinatrice/BMC

Promotion : 2022 – 2023

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 l'aménagement de littoral

Spécialité : Ingénierie de l'Environnement Marin et Côtier

**Thème :**

**Contribution à l'étude des inondations dans une zone  
côtière : wilaya d'Alger**

Présenté par :

- **Gaouaou Farah**
- **Hamrouche Soumia**

Soutenu le 11/07/2023, devant le jury composé de :

M<sup>me</sup> Abdeddaim Hakima

M<sup>me</sup> Keraghel Mehdi

M<sup>me</sup> Harid Romaissa

M<sup>me</sup> Maouel Djamil

Maitre de conférence B (ENSSMAL)

Maitre de conférence B (ENSSMAL)

Maitre Assistant B (ENSSMAL)

Maitre de conférence B (ENSSMAL)

Présidente

Promotrice

Examinatrice

Examinatrice/BMC

Promotion : 2022-2023

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce mémoire à : Mes parents, Ma mère qui a œuvré pour ma réussite de par son amour, son soutien tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie et ses prières pour moi. Je ne saurai point te remercier comme il se doit, pour ta présence à mes côtés. A mon père qui peut être fier de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venus de toi.*

*A mon frère et ma sœur qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.*

*A mes professeurs de l'ENSSMAL qui doivent voir dans ce travail la fierté d'un savoir bien acquis. Que ce modeste travail soit l'accomplissement de vos vœux et le fruit de votre soutien.*

*Merci d'être toujours là pour moi.*

*Gaouaou Farah*

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents.*

*A ma mère pour m'avoir mis au Monde et pour m'avoir accompagné*

*tout au long de ma vie.*

*A mon père qui sans lui je ne serais pas arrivé jusqu'ici. J'espère toujours*

*rester fidèle aux valeurs morales qu'il m'a apprises.*

*A mes très chères sœurs et toute ma famille.*

*A mes très chers Amis.*

*A mes camarades de la promo 2018.*

*A mes partenaires de Business et ma deuxième famille MK HOUSE*

*Hamrouche Soumia*

## **Remerciements**

*Tout d'abord, nous remercions Allah le tout puissant pour nous avoir donné la santé, le courage et la volonté, pour réaliser ce modeste travail.*

*Au terme de ce mémoire, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers tous ceux qui ont contribué à sa réalisation et en particulier :*

*Notre encadrante, M<sup>me</sup> Mehdiya KERAGHEL pour avoir accepté de superviser ce travail. Nous sommes reconnaissantes envers elle pour la qualité remarquable de son encadrement, sa patience et sa disponibilité tout au long de la préparation de ce mémoire. Ses précieux conseils ont nourri notre réflexion et ont contribué de manière significative à sa réussite.*

*Nous remercions chaleureusement le Dr. Abdesslem Louaedj pour son aide précieuse.*

*Nous souhaitons adresser nos sincères remerciements aux responsables et au personnel de l'ANRH d'El Mouradia et de Blida, ainsi qu'au Ministère des Ressources Hydrauliques, pour leur appui et partage des informations et données nécessaires à la réalisation de notre recherche.*

*Nous tenons également à exprimer notre sincère gratitude envers tous les formateurs de l'incubateur Bleu Start, en particulier M. Loubar, pour leur précieuse contribution dans le domaine socioéconomique et leur aide précieuse pour réaliser notre BMC.*

*J'exprime également ma gratitude aux membres du jury, M<sup>me</sup> Abdeddaim Mehdi Hakima qui nous a fait l'honneur de présider le jury, Hommage respectueux.*

*Nous tenons à remercier l'ensemble des examinatrices M<sup>me</sup> Harid Romaiassa et M<sup>me</sup> Maouel Djamila 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 notre profond respect.*

*A tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.*

## Sommaire

<b>Liste des figures.....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>x</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Chapitre I : Généralité .....</b>	<b>4</b>
1.1 Aperçu sur les inondations .....	4
1.1.1 Définitions.....	4
1.1.2 Les types d'inondations.....	7
1.1.3 Les causes de formation des crues et des inondations .....	10
1.1.4 Les dommages et les conséquences des inondations.....	11
1.2 Cadre Climatologique : Les changements climatiques .....	11
1.2.1 Existe-t-il un lien entre les changements climatiques et les inondations ? ...	12
1.2.2 Existe-t-il un lien entre la NAO et la pluie sur le littoral algérien ? .....	12
1.3 Les inondations en Méditerranée .....	12
1.4 Les inondations en Algérie.....	14
1.4.1 Les types d'inondations.....	14
1.4.2 Evaluation du risque d'inondation en Algérie.....	15
<b>2 Chapitre II : Contexte général de la zone d'étude - Wilaya d'Alger .....</b>	<b>17</b>
2.1 Situation géographique.....	17
2.2 Organisation administrative .....	18
2.3 Géologie et Géomorphologie .....	19
2.3.1 La plaine de la Mitidja .....	20
2.3.2 Le Sahel .....	21
2.3.3 Le Massif de Bouzaréah.....	22
2.4 Le climat algérois .....	22
2.5 Hydrographie.....	22
2.5.1 Bassins versants d'Alger .....	23
2.5.2 Débits moyens des oueds .....	25
2.6 Démographie et urbanisation .....	26
2.6.1 Urbanisation .....	26
2.6.2 Démographie .....	27
2.7 Politique de gestion de l'occupation du sol.....	30
<b>3 Chapitre III : Matériels et méthodes .....</b>	<b>33</b>
3.1 Logiciels utilisés.....	33
3.2 Etude de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger .....	34
3.2.1 Présentation des données utilisées.....	35
3.2.2 Etapes de travail .....	36
3.2.3 Les changements thématiques.....	37
3.3 Etude climatique des précipitations.....	38
3.3.1 Acquisition des données.....	39
3.3.2 Etude du climat moyen.....	40

3.3.3	Approche climatique des risques d'inondation .....	41
3.3.4	Etude des tendances climatiques sur la période historique .....	43
3.4	Etude des inondations de la wilaya d'Alger.....	45
3.4.1	Données utilisées.....	45
3.4.2	Etapas de travail .....	46
3.5	Cas d'étude : Utilisation des données Sentinel-1 pour cartographier les zones inondées	46
3.5.1	Présentation des données utilisées.....	47
3.5.2	Etapas de travail .....	47
<b>4</b>	<b>Chapitre IV : Résultats et discussion .....</b>	<b>51</b>
4.1	Etude de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger .....	51
4.1.1	Urbanisation .....	55
4.1.2	Terres Agricoles .....	57
4.1.3	Végétation .....	59
4.1.4	Sols nus .....	60
4.1.5	Eau.....	61
4.2	Etude climatique des précipitations.....	62
4.2.1	Régimes pluviométriques.....	62
4.2.2	Risque d'inondation .....	71
4.2.3	Evolution du climat (étude des tendances).....	73
4.3	Etude des inondations de la wilaya d'Alger.....	96
4.3.1	Evolution temporelle des inondations .....	96
4.3.2	Distribution spatiale des inondations .....	99
4.3.3	Types d'inondations à Alger .....	101
4.3.4	Inondation de Bab El Oued .....	103
4.4	Synthèse générale.....	103
4.5	Cas d'étude : Utilisation des données Sentinel-1 pour cartographier les zones inondées	105
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>109</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>113</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>119</b>
	Annexe 1 .....	II
	Annexe 2 .....	III
	Annexe 3 .....	VI
	Annexe 4 .....	VII
	Annexe 5 : Business Model Canvas .....	VIII

## Liste des figures

Figure 1 :Représentation du bassin versant d'une rivière (MEDD-PRIM, 2004) .....	5
Figure 2 : Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité (RACLOT, 2003) .....	6
Figure 3 : Inondations par crues torrentielles (REDA, 2014).....	7
Figure 4 : Inondation par débordement direct d'un cours d'eau (MEDD-PRIM, 2004) .....	8
Figure 5 : Inondation par remontée des eaux dans le réseau d'assainissement et dans des points bas (EDALO AND BACHAROU, 2012) .....	8
Figure 6 : Inondation par accumulation d'eau ruisselée (BOKO et al., 2020).....	9
Figure 7 : Inondation par destruction de digue (BOKO et al., 2020) .....	9
Figure 8 : Représentation schématique de l'inondation par submersion marine (EAUFRANCE, 2019).....	10
Figure 9 : Nombre de personnes déclarées tuées dans chaque inondation documentée au cours de la période 1940-2015 (GAUME et al., 2016) .....	13
Figure 10: Distributions mensuelles, saisonnières et régionales des inondations désastreuses en Algérie (1965-2013) (SUMI et al., 2022) .....	14
Figure 11: Carte de la situation géographique de la zone d'étude (wilaya d'Alger).....	18
Figure 12:L'évolution des limites administratives de la wilaya d'Alger (MEDJAD et al., 2015)	19
Figure 13: Relief de la wilaya d'Alger (BAAZIZ, 2020).....	20
Figure 14:Localisation de la plaine de la Mitidja, du Sahel et du Massif de Bouzaréah.....	21
Figure 15:Les cinq principaux bassins versants de la wilaya d'Alger (ZIADI, 2022) .....	23
Figure 16:Evolution des débits Moyens des oueds (El Hamiz, Smar et Oued Ouchayah-Baraki) d'après les données de l'ANRH.....	26
Figure 17:Evolution du nombre d'habitants d'Alger entre 1987 et 2020 (RGPH, 2020).....	28
Figure 18: Evolution de la Population des communes de la wilaya d'Alger entre 1998 et 2020 : (A) 1998, (B) 2002, (C) 2008, (D) 2020 (RGPH, 2020). .....	29
Figure 19:Evolution des pourcentages des classes d'occupation du sol à Alger.....	51
Figure 20: Cartes d'occupation du sol de la wilaya d'Alger de 1984 à 2022(a :1984, b :1992 , c :2003 , d :2011 , e : 2022 , f :changement thématique ).....	54
Figure 21: Cumuls des précipitations mensuelles moyennes (a) et maximales (b) dans les trois stations météorologiques considérées .....	63
Figure 22: Cumuls des précipitations mensuelles par types de pluie pour les trois stations considérées (El Hamiz, Baraki, Birmandreis).....	64
Figure 23 : Fréquence mensuelle des jours secs et humides pour les stations météorologiques : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c).....	66

Figure 24 : Nombre de jours de précipitations par types de pluie et par mois pour les trois stations météorologiques considérées .....	67
Figure 25 : Cumuls des précipitations saisonnières moyennes, minimums et maximums aux stations d'El Hamiz (bleu), Baraki (rouge) et Birmandreis (vert) .....	68
Figure 26: Cumuls saisonniers des précipitations par types de pluie pour les trois stations considérées (El Hamiz, Baraki, Birmandreis).....	69
Figure 27 : Nombre de jours secs (a) et de pluie (b) en fonction des saisons hydrologiques pour les trois stations (Baraki, Birmandreis et El Hamiz).....	70
Figure 28 : Nombre de jours par types de pluie et par saisons hydrologiques pour les stations météorologiques de Baraki (a), Birmandreis (b) et El Hamiz (c).....	71
Figure 29: Nombre d'épisodes pluvieux qui dépassent le seuil de 50 mm selon les quatre dernières normales climatiques pour les trois stations météorologiques considérées .....	72
Figure 30 : Centiles des cumuls quotidiens par mois .....	73
Figure 31: Cumuls de précipitations annuelles dans les trois stations météorologiques .....	74
Figure 32 : Suivi annuel du cumul de précipitations par types de pluie pour les stations d'El Hamiz (a), Baraki (b) et Birmandreis (c).....	76
Figure 33: Evolution du nombre de jours secs de 1905 à 2020 pour les stations considérées .....	77
Figure 34: Nombre de jours par types de pluies de 1905 à 2005 pour les trois stations météorologiques : El Hamiz, Baraki et Birmandreis .....	79
Figure 35 : Représentation en Damier du SPI Mensuel pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c) .....	81
Figure 36: Représentation en damier du SPI des saisons météorologiques pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c) .....	82
Figure 37: Représentation en damier du SPI des saisons hydrologiques pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c).....	84
Figure 38: Le SPI par saisons Hydrologiques pour les trois stations considérées sur la période de référence (1971-2018) : (a) El Hamiz, (b) Birmandreis, (c) Baraki .....	86
Figure 39: Le SPI par saisons Hydrologiques pour la station d'El Hamiz durant la période de référence 1905-2020 .....	86
Figure 40 : Ecart à la normale des cumuls annuels de pluie pour les trois stations considérées .	88
Figure 41 : Evolution des cumuls mensuels moyens dans les trois stations considérées entre les périodes 1961-1990 et 1991-2020 .....	89
Figure 42: Variation de la normale annuelle au cours des cent dernières années.....	90
Figure 43: Graphes présentant le SPI (bleu) et l'indice NAO (rouge) en fonction des années pour les stations de (a) Birmandreis, (b) El Hamiz et (c) Baraki .....	92
Figure 44 : Evolution des cumuls annuels de precipitations pour la station d'El Hamiz avec la rupture de la série en 1972 .....	94

Figure 45: Evolution du nombre d'inondations à Alger entre 1946 et 2021 : (a) par année, (b) par date .....	96
Figure 46: Evolution Mensuelle du nombre d'inondations à Alger : Distribution par saison et par région .....	99
Figure 47: Carte de distribution des inondations selon les communes de la wilaya d'Alger .....	100
Figure 48: Nombre de morts enregistrés pour chaque commune et événement .....	101
Figure 49: Nombre de sinistrés enregistrés pour chaque commune et événement .....	101
Figure 50: Nombre d'inondations à Alger par type .....	102
Figure 51: Pluies enregistrées et leur durée en fonction des communes de la wilaya d'Alger ...	102
Figure 52 : Images Sentinel-1 montrant l'étendue de l'inondation du 23 janvier 2017 : (a) image archive, (b) image de crise, (c) image traitée .....	107
Figure 53 : La carte des sols de la partie nord-ouest d'Algérie (Rouge : la zone touchée par l'inondation) .....	II
Figure 54: Images Landsat 5, 7 et 8 découpées selon les limites administratives de la wilaya d'Alger .....	V
Figure 55: Carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger (Ziadi, 2022) .....	VI
Figure 56: Schéma illustratif des phases positive et négative de la NAO .....	VII
Figure 57: Photographies de catastrophes naturelles (source : internet) .....	X
Figure 58: Les trois Etapes de processus de production .....	XXI
Figure 59: Evolution des gains à travers les 3 premières années .....	XXVIII
Figure 60: Images Sentinel-1 montrant l'étendue de l'inondation du 23 janvier 2017 : .....	XXIX

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat utilisées .....	35
Tableau 2: Le Nombre de ROI de chaque classe .....	37
Tableau 3: Indicateurs préconisés pour décrire le climat moyen (AMIOT, 2021).....	40
Tableau 4: Les différents types de pluies en fonction de leur intensité .....	41
Tableau 5: Indicateurs préconisés pour définir les risques d'inondations (AMIOT, 2021) .....	42
Tableau 6: Valeurs de l'indice SPI (AMIOT, 2021).....	43
Tableau 7: Caractéristiques des images utilisées .....	47
Tableau 8: Superficies et pourcentages des classes d'occupation du sol considérées.....	51
Tableau 9 : Résultats les différents tests statistiques réalisés .....	92
Tableau 10: Inondation de Bab El Oued.....	103
Tableau 11 : Calendrier de Projet .....	XV
Tableau 12: Cout total du Projet .....	XXV
Tableau 13: Tableau des charges .....	XXVI
Tableau 14: Résumé des gains .....	XXVII

## Liste des abréviations

- AADL** : Agence Nationale d'Amélioration et de Développement du Logement
- AC** : Année civile
- AH** : Année Hydrologique
- ANRH** : Agence National des Ressources Hydrauliques
- BMC** : Business Model Canvas
- C-SAR** : C-band synthetic aperture radar
- DGPC** : Direction Générale de la Protection Civile
- ENSO** : El Niño-Southern Oscillation
- ENVI** : The ENvironment for Visualizing Images
- ESA** : European Space Agency
- ESA**: European Space Agency
- ESRI** : Environmental Systems Research Institute
- ETM** : Enhance Thematic Mapper
- FAO** : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
- GEIC (IPCC)** : Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GGA** : Gouvernorat du Grand Alger
- GRD** : Ground Range Detected
- GRU** : Grand Projet Urbain
- H<sub>0</sub>** : Hypothèse nulle
- H<sub>1</sub> ou H<sub>a</sub>** : Hypothèse alternative
- HRS** : Haute résolution spatiale
- IW** : Interferometric Wide Swath
- LPP** : Logement Promotionnel Public
- LPP** : Logement Promotionnel Public
- M** : Mensuel
- NAO** : Oscillation Nord Atlantique
- NASA** : National Aeronautics and Space Administration
- NOAA** : National Oceanic and Atmospheric Administration.

**OLI** : Operational Land Imager  
**OMM** : l'Organisation Météorologique Mondiale.  
**ONS** : Office National des Statistiques  
**PDAU** : Plan directeur d'aménagement urbain  
**POS** : Plan d'occupation des sols  
**PUD** : Plan d'Urbanisme Directeur  
**RADAR** : RAdio Detection And Rangin  
**RGB** : Rouge Green Bleu  
**ROI** : Region of interest  
**SDAAM** : Schéma Directeur d'Aménagement de l'Aire Métropolitaine  
**SH** : Saison Hydrologique  
**SIG** : Systèmes d'informations géographiques  
**SLP** : Sea Level atmospheric Pressure  
**SM** : Saison météorologique  
**SNAP** : Sentinel Application Platform  
**SNAT** : Schéma National d'Aménagement du Territoire  
**SPI** : Standardized Precipitation Index  
**TIR** : Thermal Infrared Sensor  
**TM** : Thematic Mapper  
**USGS** : United States Geological Survey  
**UTM** : Universal Transverse Mercator  
**WGS** : World Geodetic System



# Introduction

## Introduction

De tous temps, des catastrophes naturelles et technologiques se sont produites et ont causé de nombreux dégâts humains, économiques et environnementaux. En Algérie, les inondations sont évaluées comme le deuxième risque majeur touchant le pays, après les séismes. En effet, parmi les quatorze risques majeurs répertoriés par l'Organisation des Nations Unies, le risque d'inondation en Algérie fait partie des dix risques majeurs présents sur le territoire et cités par la loi 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable (NOURI et al., 2016).

La majorité des inondations catastrophiques en Algérie sont caractérisées par des événements pluvieux intenses qui favorisent la genèse des inondations, notamment en automne (BOURENANE et al., 2019). Ces événements sont également exacerbés par la croissance des activités socio-économiques de la wilaya d'Alger avec une centralisation rapide de la population, qui s'est traduite par une urbanisation dense de son territoire et une importante éviction urbaine qui occupe occasionnellement des zones non constructibles (REDJEM et al., 2020). La fréquence et l'intensité des inondations de la Wilaya d'Alger ont considérablement augmenté au cours de la dernière décennie et risquent de s'intensifier dans les années à venir sous l'influence du changement climatique (EGIS EAU et al., 2012).

Plusieurs études ont été menées en Algérie sur les inondations, notamment celles réalisées par GRINE AND BOUHAMIDA (2021), HAFNAOUI et al. (2022) ainsi que KORICHI (2016). A Alger, ces études se sont principalement concentrées sur l'analyse de la vulnérabilité en identifiant les zones les plus exposées aux risques d'inondation. Parmi ces travaux, MESSSEN AND SERRAH (2021) et ZIADI (2022) ont utilisé des techniques de SIG, de télédétection et d'intelligence artificielle pour cartographier cette vulnérabilité dans la région. BOUGHEDIR (2015) a également contribué à l'étude des inondations en abordant la gestion des risques de catastrophe et l'adaptation au changement climatique dans le Grand Alger, en évaluant la vulnérabilité des zones touchées.

L'objectif principal de la présente étude consiste à étudier l'évolution spatio-temporelle des inondations dans la wilaya d'Alger en se focalisant sur l'étude de l'évolution de deux facteurs causaux : l'urbanisation et les précipitations. Ceci passe, dans un premier temps, par l'étude de

l'évolution de l'occupation du sol de 1984 à 2022 qui a été entreprise afin d'appréhender les taux de croissance du tissu urbain. Dans un second temps, une analyse climatique de la wilaya d'Alger visant à étudier les variations climatiques au cours des dernières décennies a été entreprise, en se basant sur les données de précipitations disponibles. Cette démarche vise à améliorer la prévention et la gestion des crises ainsi qu'à optimiser les stratégies d'aménagement du territoire de la capitale. Enfin, un cas d'étude a été abordé afin d'étudier l'étendue (zone touchée) d'une inondation qui a affecté la wilaya d'Alger via la télédétection radar.

Le présent travail s'inscrit également dans le cadre de l'Arrêté 1275 et ses directives, à travers lequel nous avons entrepris de transformer notre thème de mémoire en un projet innovant et réalisable et de mettre en œuvre des solutions concrètes pour résoudre les défis identifiés (les inondations), tout en respectant les normes et réglementations en vigueur. Pour ce faire, nous avons opté pour un Bureau d'étude d'expertise : Cartographie des catastrophes naturelles maritimes et terrestres, Prévisions Climat futur et Formation SIG.

Ce document s'articule autour de quatre chapitres :

Le premier chapitre est une synthèse bibliographique qui englobe une définition des termes clés liés aux inondations et des phénomènes associés sur les deux échelles Nationale (Algérie) et internationale (Méditerranée). Il présente également une synthèse du cadre climatologique en mettant en lumière les facteurs climatiques influençant les inondations.

Le deuxième chapitre se focalise sur la zone d'étude, la wilaya d'Alger. Il décrit sa situation géographique, morphologique, urbanistique et hydrographique en mettant en évidence les principaux paramètres qui contribuent à la vulnérabilité de la capitale aux inondations.

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

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



# Chapitre I : Généralités

# 1 Chapitre I : Généralité

Ce chapitre a pour but de faire le point sur les phénomènes d'inondations en général et leurs relations avec le changement climatique ainsi que les dégâts engendrés par ces derniers.

## 1.1 Aperçu sur les inondations

Les inondations représentent l'une des catastrophes les plus destructives dans le monde. Elles résultent de la conjonction de plusieurs facteurs naturels et anthropiques dont les principaux sont liés aux climats et aux caractéristiques édaphiques du milieu. Les dégâts engendrés par cette catastrophe naturelle, qu'ils soient humains ou matériels sont généralement des statistiques lourdes (RAACHI AND BENDIB, 2020).

### 1.1.1 Définitions

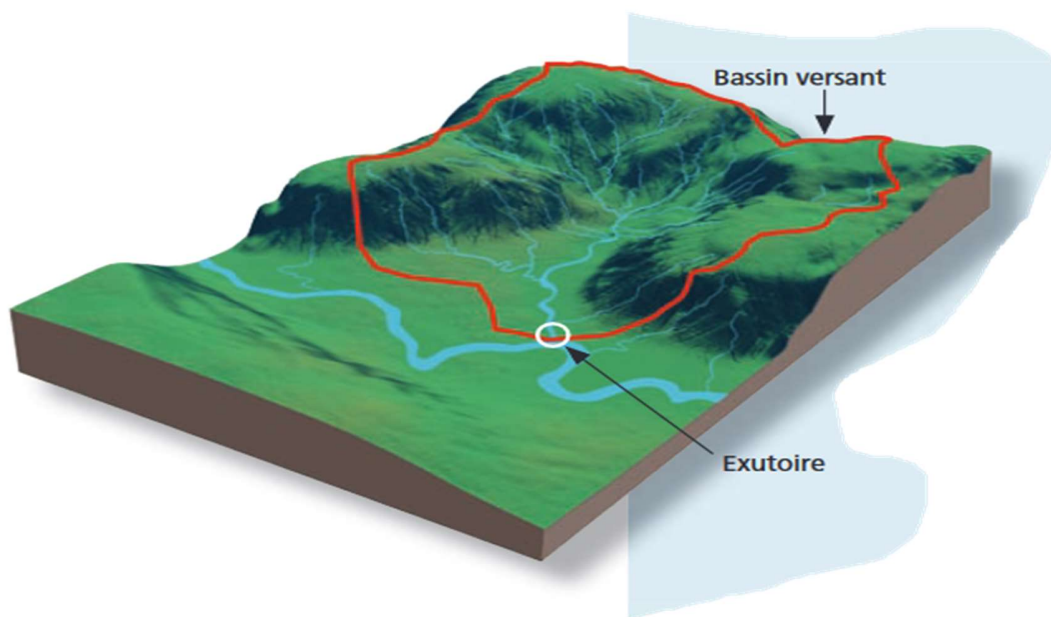
#### 1.1.1.1 Les inondations

Le dictionnaire universel (4<sup>e</sup> édition) définit une inondation comme un « débordement des eaux qui submergent un terrain, un pays ». Une inondation est donc une submersion rapide ou lente, par l'eau, d'une zone généralement hors d'eau (EDALO AND BACHAROU, 2012). D'après 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 topographique et météorologique de la zone affectée.

#### 1.1.1.2 Les crues

D'après BOKO et al. (2020), les crues sont des phénomènes naturels faisant partie intégrante du régime naturel d'un cours d'eau, où périodes sèches (étiage) et humides s'alternent. Selon le dictionnaire Larousse (2002), la crue est une élévation du niveau d'un cours d'eau résultant de la fonte des neiges ou des glaces ou des pluies abondantes. D'après LEDOUX (2006), 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. 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 (Figure 1) et les caractéristiques du cours d'eau (profondeur, largeur de la vallée, etc.).



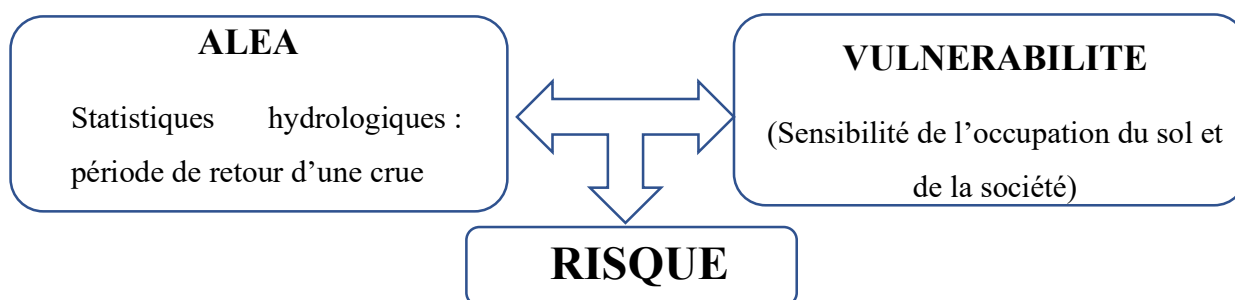
**Figure 1 : Représentation du bassin versant d'une rivière (MEDD-PRIM, 2004)**

### 1.1.1.3 Le risque d'inondation (Aléa et Vulnérabilité)

Le risque peut se définir comme la résultante du croisement entre aléa et vulnérabilité (DESBORDES, 1997) (Figure 2).

**L'Aléa** représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement de cours d'eau ou de canaux de drainage et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation (GILARD AND GENDREAU, 2005). Les principaux paramètres nécessaires pour évaluer l'aléa sont : la période de retour des crues ; la hauteur et la durée de submersion ; la vitesse d'écoulement ; la torrencialité du cours d'eau.

**La vulnérabilité** transcrit la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation (POTTIER, 1998). Les dégâts qu'engendre une inondation résultent de la sensibilité du lieu où se produit le phénomène : c'est la composante vulnérabilité.



**Figure 2 : Décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité (RACLOT, 2003)**

#### 1.1.1.4 Le Cycle urbain de l'eau

L'urbanisation de l'espace par l'homme a complètement modifié le cycle de l'eau. Le cheminement de l'eau à partir de la pluie peut être décrit de la façon suivante :

- L'eau précipitée tombe sur une surface imperméabilisée (toiture, trottoir, parking, etc.) ou non (espace vert, revêtement poreux, etc.) ;
- Le ruissellement se forme et l'eau rejoint le caniveau, de façon directe ou en passant par une gouttière ;
- L'écoulement dans le caniveau rencontre un avaloir et l'eau peut descendre dans un regard d'accès au réseau d'assainissement pluvial ;
- L'eau qui s'écoule dans le caniveau ou le collecteur à ciel ouvert est à surface libre ;
- Suivant les agglomérations et la topographie du milieu, l'eau de ruissellement peut être stockée dans un bassin de retenue et/ou acheminée vers une station d'épuration ;
- Finalement, l'eau est rejetée dans le milieu naturel.

Le réseau d'assainissement et le réseau de voirie constituent les principaux éléments du réseau hydrographique en milieu urbain. En plus du processus décrit précédemment, trois phénomènes supplémentaires peuvent se produire en période de crue :

- Une arrivée d'eau provenant des bassins situés en amont de la zone urbaine ;
- Le débordement d'un cours d'eau dans la ville ;
- Le blocage de l'eau au niveau de l'exutoire du réseau d'assainissement à cause du niveau d'eau trop élevé dans le milieu récepteur (lac, mer, etc.).

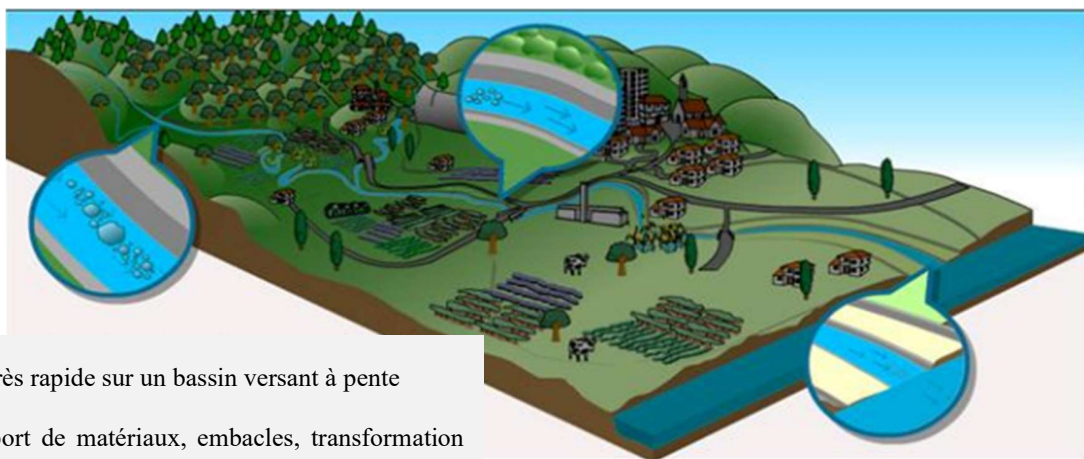
Ces trois phénomènes peuvent être à l'origine des inondations en milieu urbain.

### 1.1.2 Les types d'inondations

En fonction de l'événement créateur de la catastrophe, on peut distinguer plusieurs types d'inondation :

#### 1.1.2.1 Les inondations par crues torrentielles

Les crues torrentielles sont des phénomènes brusques et violents résultant d'épisodes pluvieux intenses et localisés, du type orages convectifs. De manière un peu conventionnelle, on parle de crues torrentielles lorsque la durée nécessaire pour qu'une goutte d'eau tombant sur le point « hydrologiquement » le plus éloigné atteigne l'exutoire est inférieure à 12 heures (ou 24 h pour certains auteurs) (REDA, 2014). Les spécialistes retiennent cinq critères pour définir la crue torrentielle : la rapidité de la réponse du cours d'eau, sa pente, le nombre de Froude<sup>1</sup>, le transport solide et les effets de ces crues. Ces dernières touchent principalement les zones de montagne et les cours d'eau du pourtour méditerranéen. Elles ont des vitesses d'écoulement importantes, même dans le lit majeur, ce qui les rend particulièrement dangereuses (BOKO et al., 2020; REDA, 2014).



**Figure 3 : Inondations par crues torrentielles (REDA, 2014)**

<sup>1</sup> Le nombre de Froude : nombre sans dimension exprimant le rapport des forces d'inertie aux forces de gravité

### 1.1.2.2 Les inondations par débordement direct

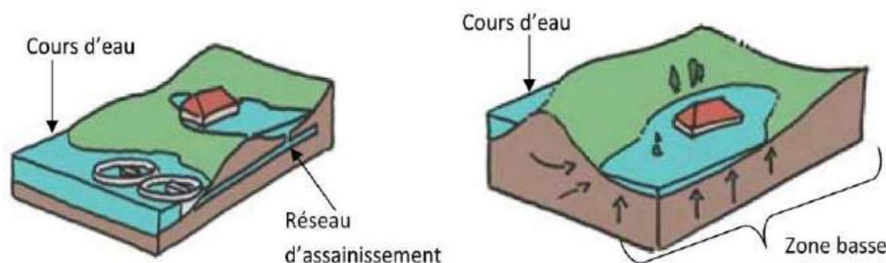
Ce sont des inondations résultant du débordement d'un cours d'eau de son lit mineur (espace occupé en permanence par le cours d'eau) pour s'étendre à son lit majeur (espace situé entre le lit mineur et la limite de la plus grande crue historique) généralement suite à de fortes précipitations. Lorsque le niveau d'eau augmente, le cours d'eau entre alors dans son lit majeur, envahissant ainsi les vallées qui l'entourent et les habitations avoisinantes (EDALO AND BACHAROU, 2012). Ce type d'inondation est caractérisé par des montées lentes des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces de faibles pentes. Les zones exposées constituent généralement des secteurs de forte extension sur lesquels l'homme s'est implanté depuis longtemps (BOKO et al., 2020). Le schéma ci-dessous (Figure 4) illustre ce type d'inondation.



**Figure 4 : Inondation par débordement direct d'un cours d'eau (MEDD-PRIM, 2004)**

### 1.1.2.3 Les inondations par débordement indirect

Les eaux remontent par effet de siphon à travers les nappes alluviales, dans les réseaux d'assainissement ou encore dans des points bas localisés même au-delà du lit du cours d'eau (BOKO et al., 2020). Le temps de réaction à ce genre d'événements est généralement très faible.



**Figure 5 : Inondation par remontée des eaux dans le réseau d'assainissement et dans des points bas (EDALO AND BACHAROU, 2012)**

#### 1.1.2.4 Les inondations par ruissellement

BOKO et al. (2020) indiquent que, dans une zone nivelée, les eaux de pluie et de nombreux éléments contribuent à un ruissellement accentué et provoquent des inondations lorsque le débit ne permet pas l'écoulement de l'eau, dans le bassin versant. Les routes et les habitations subissent une inondation par accumulation d'eau submergeant les terres (Figure 6). Ce type d'inondation peut engendrer des glissements de terrain et des coulées de boue. Ces inondations peuvent également se produire en zone urbanisée lorsque la capacité du sol à faire passer l'eau et la conception de la ville font obstacle au bon écoulement des eaux pluviales.

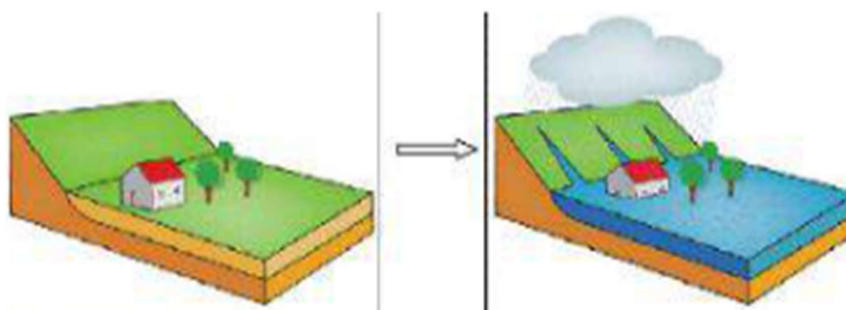


Figure 6 : Inondation par accumulation d'eau ruisselée (BOKO et al., 2020)

#### 1.1.2.5 Les inondations par destruction d'un ouvrage (barrages, digues)

Ce sont des inondations qui résultent de la rupture d'un barrage ou d'une digue. Les eaux envahissent alors les habitations situées en aval (EDALO AND BACHAROU, 2012).

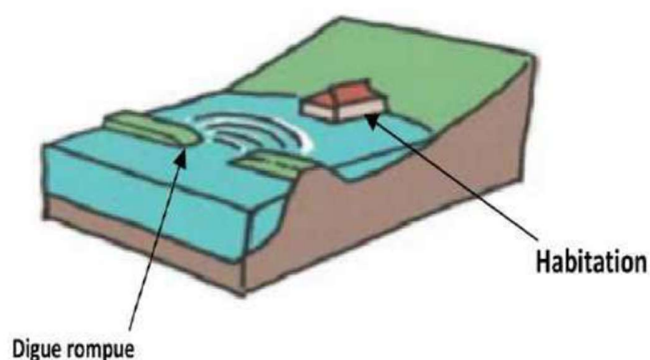
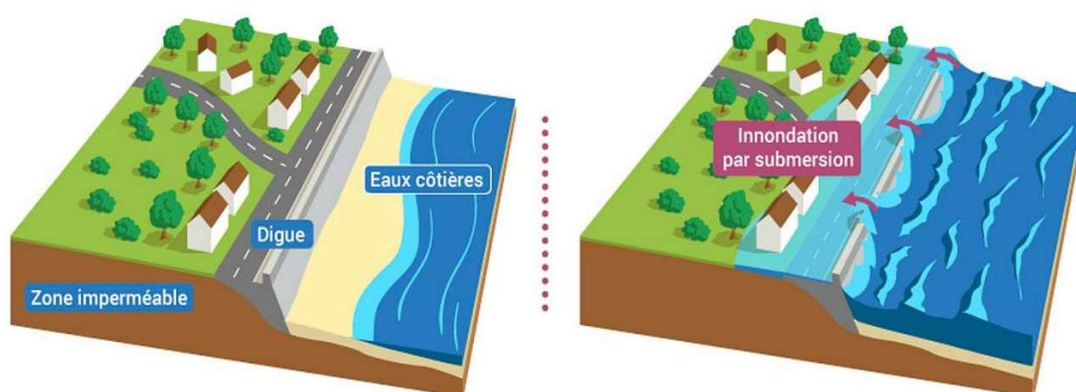


Figure 7 : Inondation par destruction de digue (BOKO et al., 2020)

### 1.1.2.6 Les inondations par submersion marine

La submersion marine est définie comme une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et marégraphiques sévères, généralement née de la conjonction de phénomènes extrêmes (dépression atmosphérique, vent, houle, pluie) et de forts coefficients de marée provoquant une surcote importante du plan d'eau (DAVIS ET SHEPHERD, 2009; SAIDI et al., 2011) (Figure 8).



**Figure 8 : Représentation schématique de l'inondation par submersion marine (EAUFRANCE, 2019)**

### 1.1.3 Les causes de formation des crues et des inondations

Les crues et les inondations sont causées par différents facteurs :

- **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 telles 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 (déforestation, 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 (lit majeur) (BAGGIO AND ROUQUETTE, 2006).

### **1.1.4 Les dommages et les conséquences des inondations**

Comme conséquences des inondations, on peut citer :

La destruction des habitations et des infrastructures (écoles, centres de santé, maisons et routes), la diminution du revenu moyen mensuel des sinistrés, les pertes d'animaux domestiques, de documents et de dossiers précieux, les déplacements de populations sinistrées, les pertes en vies humaines et la dégradation de la santé des populations (EDALO AND BACHAROU, 2012).

On note également la perte des cultures par l'invasion de l'eau ; l'insécurité alimentaire ; la dégradation des routes ; la modification du paysage par la destruction du couvert végétal ; l'insalubrité par le transport des déchets par l'eau ; les maladies hydriques.

## **1.2 Cadre Climatologique : Les changements climatiques**

Le climat selon la définition de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), est la synthèse des conditions météorologiques (tels que la température, les précipitations et le vent) dans une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère. 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).

Le changement climatique correspond à un changement du « temps moyen » observé dans une région donnée. Le temps moyen comprend tous les éléments associés au temps, à savoir la température, les caractéristiques des vents et les précipitations. Le terme de changement climatique, tel qu'utilisé par le GIEC (le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), désigne tout changement du climat dans le temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou provoqué par les activités humaines.

Le GIEC en 2022, le résumé à l'intention des décideurs du troisième volume de son 6<sup>ème</sup> rapport d'évaluation, consacré à l'atténuation du changement climatique. Il fournit une évaluation détaillée des impacts, des risques et de l'adaptation au changement climatique dans les villes, où vit plus de la moitié de la population mondiale. La santé, la vie et les moyens de subsistance des gens, de même que les biens matériels et les infrastructures cruciales comme les systèmes d'énergie et de transport, sont de plus en plus touchés par les aléas dus aux vagues de chaleur,

tempêtes, sécheresses et inondations, ainsi que par les phénomènes à évolution lente telle l'élévation du niveau de la mer. Le GIEC a notamment mis l'accent sur les impacts du changement climatique sur le continent Africain. Ce dernier est l'un des continents qui a le moins contribué aux émissions de gaz à effet de serre, et est pourtant la région la plus vulnérable aux changements climatiques qui en résultent.

### **1.2.1 Existe-t-il un lien entre les changements climatiques et les inondations ?**

Le rapport du GIEC de 2021 a montré que 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).

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.

### **1.2.2 Existe-t-il un lien entre la NAO et la pluie sur le littoral algérien ?**

La variabilité du climat mondial à court terme est généralement associée avec des phases de couplage de phénomènes océaniques et atmosphériques incluant El Niño-Southern Oscillation (ENSO) et l'Oscillation Nord Atlantique (NAO). Cette dernière oscillation cyclique, pourrait expliquer la variabilité des précipitations dans une grande partie de la zone méditerranéenne et étayer l'hypothèse de la fin des années de sécheresse dans cette zone (NOUACEUR et al., 2013).

## **1.3 Les inondations en Méditerranée**

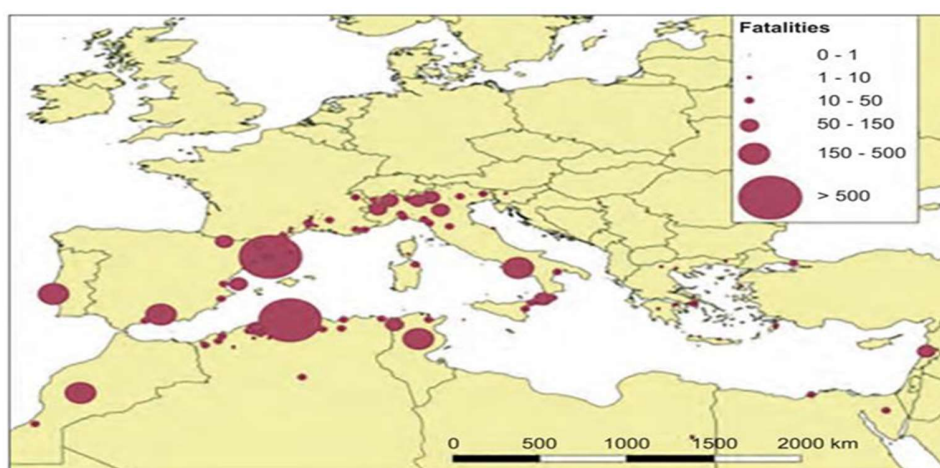
Les inondations méditerranéennes sont connues depuis l'Antiquité mais, dans tous les pays, elles deviennent un fléau de plus en plus redouté. D'après GAUME et al. (2016), les inondations destructrices en Méditerranée sont principalement produites par :

1. Des événements de précipitations intenses (souvent inférieurs 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 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.

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 événements à fort impact et à forte ampleur (Figure 9). 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) où se produisent les inondations extrêmes et dévastatrices. C'est notamment le cas des systèmes convectifs de méso-échelle qui entraînent de fortes réponses des bassins versants concernés (taux de ruissellement élevés dus à la saturation du sol et du sous-sol) et des valeurs de débit de pointe extraordinaires (GAUME et al., 2016).

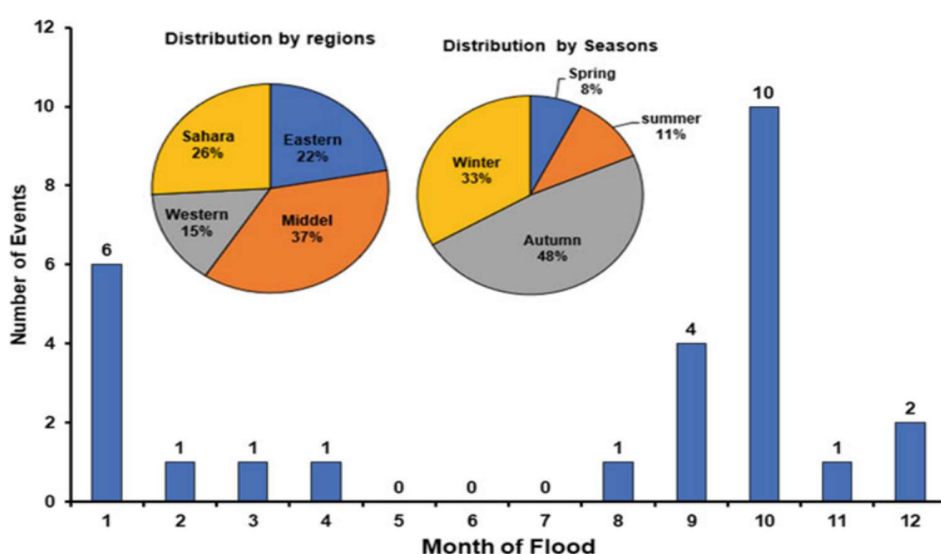


**Figure 9 : Nombre de personnes déclarées tuées dans chaque inondation documentée au cours de la période 1940-2015 (GAUME et al., 2016)**

## 1.4 Les inondations en Algérie

Les précipitations caractérisées, en Algérie, par une très forte irrégularité tant interannuelle que saisonnière entraînent des étiages extrêmement sévères des cours d'eau et inversement, de fortes crues et des inondations engendrant des dégâts humains et matériels considérables.

Le mois d'octobre est le mois où l'on enregistre le plus d'inondations avec 1141 victimes (87% du nombre total de décès). En outre, la plupart des événements se produisent en automne et en hiver, et sont plus fréquents dans les régions centrales du pays (Figure 10) (SUMI et al., 2022).



**Figure 10: Distributions mensuelles, saisonnières et régionales des inondations désastreuses en Algérie (1965-2013) (SUMI et al., 2022)**

### 1.4.1 Les types d'inondations

D'une manière générale, les inondations survenues en Algérie sont de trois types :

**1. Les inondations liées à des situations météorologiques remarquables** se traduisant par une forte pluviosité (pluies importantes, orages violents), telles que :

- Les inondations de Décembre 1957 des bassins du MAZAFRAN et du SEBAOU ;
- Les inondations de L'automne 1969 en Algérie et en Tunisie ;
- Les inondations catastrophiques de Mars 1973 sur l'est algérien ;
- Les inondations de Mars 1974 des bassins versants de l'algérois et du SEBAOU ;
- Les inondations de décembre 1984 sur tout l'est algérien.

**2. Les inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme :** ces inondations sont liées à l'urbanisation anarchique, la défaillance des réseaux d'assainissement, la collecte des eaux pluviales, et le gonflement des oueds par les décombres et les débris. C'est le cas de :

- La ville de TIARET inondée presque à chaque hiver ;
- La plaine du MZAB où des inondations se produisent tous les 02 à 03 ans.

**3. Les inondations produites dans des régions présentant un environnement topographique défavorable** Comme le cas des villes traversées par des oueds (BORDJ BOU ARRERIDJ, OUED R'HIOU, BECHAR, BAYADH et SIDI BEL ABBES) ; des villes situées au pied d'une montagne (AIN DEFLA, BATNA, MEDEA).

#### **1.4.2 Evaluation du risque d'inondation en Algérie**

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).

Outre ses missions de secours, d'interventions et d'assistance, la DGPC (Direction Générale de la Protection Civile) a procédé à la mise en place d'une cartographie des zones inondables relativement précise permettant d'évaluer le risque d'inondation en Algérie, à prendre en compte dans le cadre du plan local d'urbanisme. La DGPC a constitué, par ailleurs, une base de données sur le risque d'inondation pour la période entre 1921 et 2021. Les données collectées ont fait ressortir que huit wilayas sont à risque extrême d'inondations et 22 autres à haut risque. Les wilayas les plus sujettes aux inondations sont : Chlef, suivie d'Alger, Tébessa, M'Sila, Ghardaïa, Sidi Bel Abbès, Skikda, Batna avec un risque extrême alors que les wilayas d'Annaba, Tlemcen, Aïn Témouchent, Sétif, Oum El Bouaghi, El Bayadh, sont classées comme des régions « à très haut risque ». En outre, l'analyse classe Tamanrasset, Biskra, Béjaïa, Tizi-Ouzou, Jijel, Béchar, Constantine, Oran, El Taref, Médéa, Djelfa, Mascara comme wilayas à « haut risque ».

Il est à noter que la majorité des études réalisées sur les inondations se concentrent beaucoup plus sur la vulnérabilité et pas sur étude de l'étendu de cette Aléa.

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

## **2 Chapitre II : Contexte général de la zone d'étude - Wilaya d'Alger**

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre zone d'étude : la wilaya d'Alger. La description d'Alger englobera un aperçu de sa situation géographique, administrative, climatique, géologique et hydrographique, avec notamment une présentation de son évolution démographique et urbanistique.

Notre choix s'est porté sur la wilaya d'Alger qui présente une forte périodicité des inondations, surtout au cours des dernières années. 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. Avec l'augmentation des impacts du changement climatique et la pression anthropique croissante, 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**

Alger est la capitale d'Algérie. Le territoire de la wilaya d'Alger s'étend sur une superficie de 1190 km<sup>2</sup>, et est localisée dans la région Nord-Centre du pays entre les latitudes 36° 35' 30" N et 36° 52' 00" N et entre les longitudes 2° 50' 00" E et 3° 20' 00" E. Alger occupe une position géostratégique, aussi bien de par les flux économiques échangés avec le reste du monde, que par sa géopolitique. Elle est limitée par : la mer Méditerranée au Nord ; la wilaya de Blida au Sud ; la wilaya de Tipaza à l'Ouest et la wilaya de Boumerdès à l'Est (Figure 11).

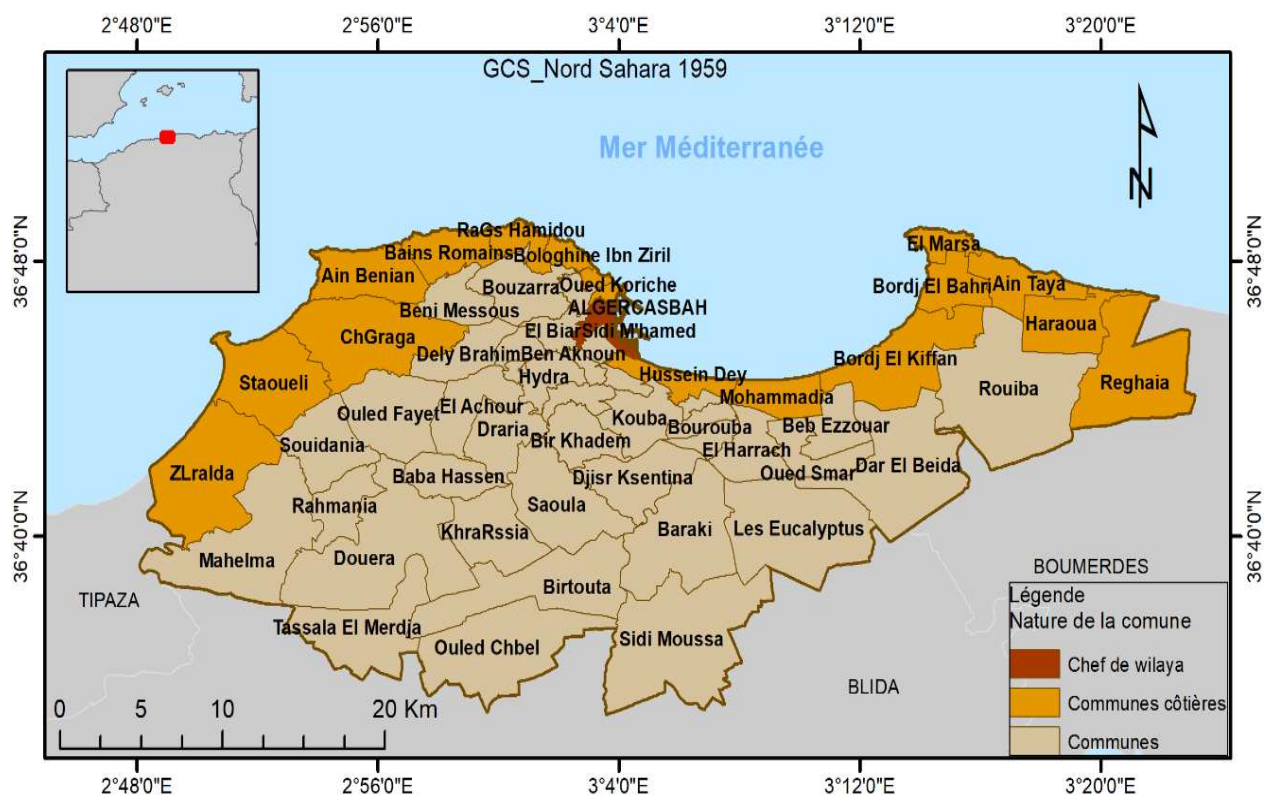
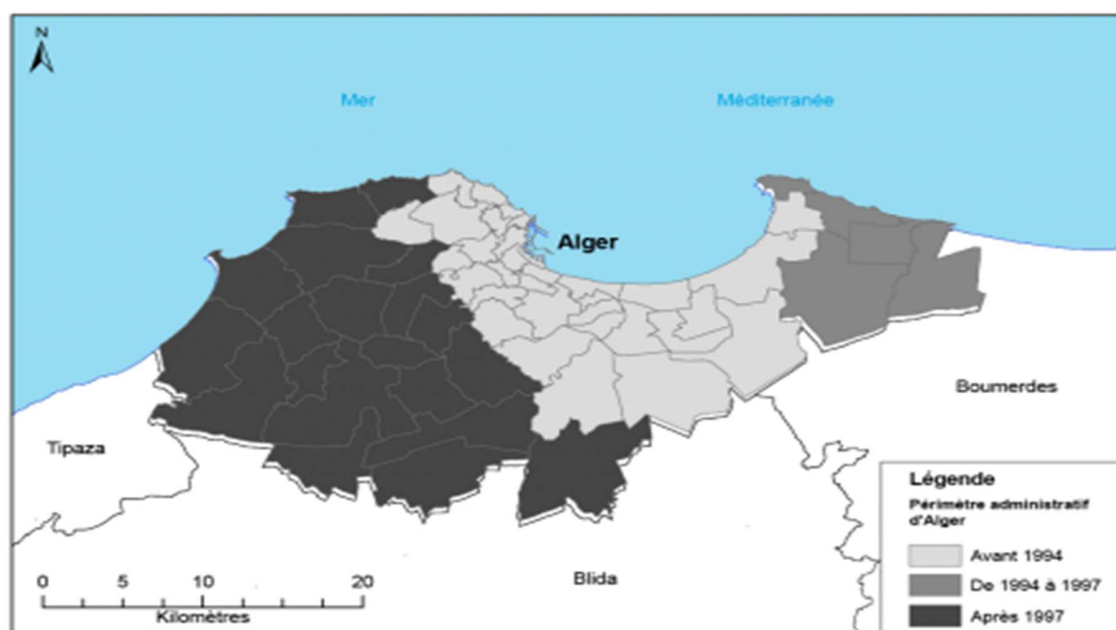


Figure 11: Carte de la situation géographique de la zone d'étude (wilaya d'Algier)

## 2.2 Organisation administrative

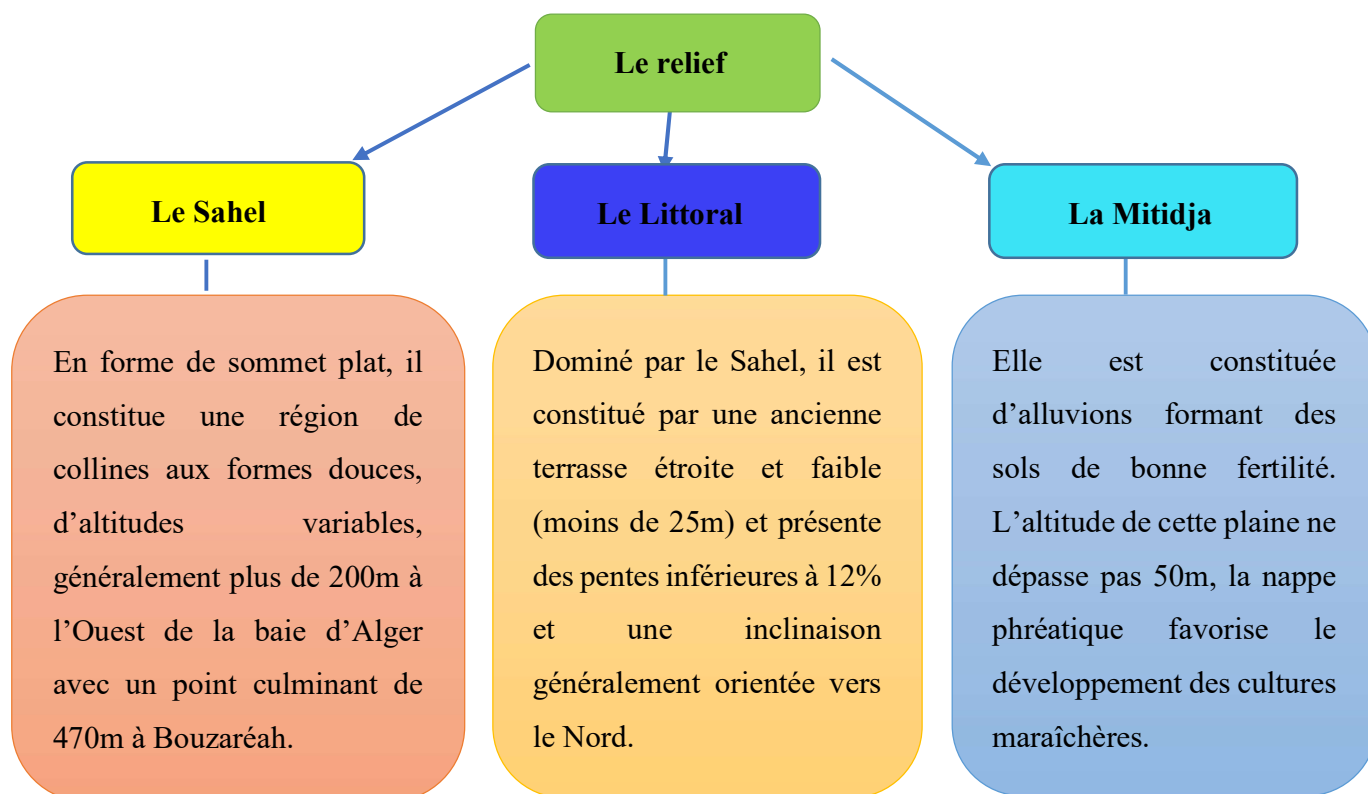
Algier est le siège de toutes les administrations centrales, des institutions politiques et sociales, des grands établissements économiques et financiers, des grands centres de décisions et de représentations diplomatiques. De plus, elle dispose d'une infrastructure plus étendue par rapport aux autres villes augmentant par là son exposition au risque d'inondation. D'après MEDJAD et al., (2015), le mouvement d'urbanisation de la capitale s'est logiquement accompagné sur le plan administratif d'un élargissement des limites de l'agglomération d'Algier. Le périmètre de planification a donc été agrandi. De 15 communes en 1978, il est passé à 28 en 1990 et 57 en 2000. Ces communes servent traditionnellement de réceptacle aux populations issues de la ville-centre et des communes immédiatement limitrophes d'Algier (Figure 12). Compte tenu de ce processus centrifuge, actuellement elle se compose de 57 communes, dont 19 sont côtières, et de 13 daïras.



**Figure 12: L'évolution des limites administratives de la wilaya d'Alger (MEDJAD et al., 2015)**

### 2.3 Géologie et Géomorphologie

La morphologie de la côte algéroise est caractérisée par l'enchaînement de gradins à partir de la rive (bord de la mer) jusqu'à une altitude de plus de 300 mètres, stratifiés les uns au-dessus des autres comme les marches d'un escalier. Ces marches qui discrétisent la continuité des pentes, sont généralement assez raides et bordent le littoral algérois (MESSEN AND SERRAH, 2021). La morphologie d'Alger est composée de trois zones longitudinales : le Sahel, le littoral et la Mitidja (BAAZIZ, 2020) (Figure 13, Figure 14).



**Figure 13: Relief de la wilaya d'Alger (BAAZIZ, 2020)**

### 2.3.1 La plaine de la Mitidja

D'un point de vue administratif, la plaine de la Mitidja est répartie entre les wilayas d'Alger, de Blida, de Tipaza et de Boumerdes. Elle s'étend sur une superficie de 1450 Km<sup>2</sup> et est orientée WSW\_ENE. Elle est limitée par l'Atlas Blidéen au Sud. Son altitude moyenne varie de 50 à 100 mètres. La pente dans la plaine tend vers zéros, ce qui favorise l'infiltration là où les conditions géologiques le permettent.

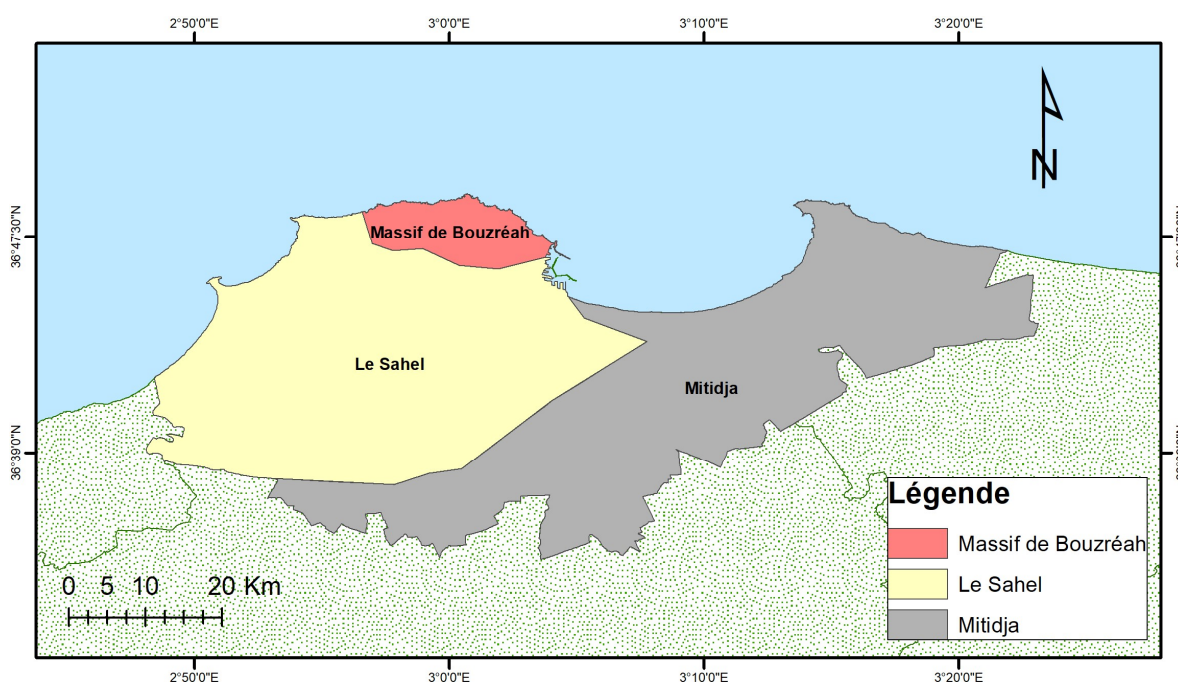
La plaine de la Mitidja est traversée par plusieurs Oueds qui coulent généralement du Sud vers le Nord (MEKLATI, 2009). Ces Oueds sont en grande partie en liaison hydraulique avec la nappe de la Mitidja puisque leurs eaux peuvent s'infiltrer ou inversement drainer la nappe. En outre, la plaine de la Mitidja est répartie entre trois sous bassins versants (bassins versants des

oueds Mazafran, El Harrach et El Hamiz) qui appartient en totalité au grand bassin versant des côtiers Algérois.

### 2.3.2 Le Sahel

Le Sahel d'Alger est un ensemble de petites plaines littorales, plateaux, collines et coteaux agricoles ou forestiers de faible altitude, il couvre la région située entre l'Atlas Blidéen et la Mer Méditerranée. Il est limité à l'Ouest par l'embouchure de l'Oued Nador, au pied du Chenoua, et à l'Est par celle de l'Oued Boudouaou. On distingue le Sahel oriental et le Sahel occidental qui s'appuie à l'Ouest sur le mont Chenoua. Il est constitué d'une série de petites collines d'orientation W-SW /E-NE, limitées au Sud par la plaine de la Mitidja et interrompues par les oueds Mazafran, El Hachem et Nador. Dans son prolongement le Sahel oriental est également constitué de petites collines qui s'appuient vers l'Est sur le Massif de Thenia (prolongement septentrional de Bouzegza), celui-ci étant beaucoup moins développé (HADDADI-HAMDANE, 1996).

Le bassin de la Mitidja et le massif du Sahel sont constitués de formations sédimentaires meubles d'âge Mio-Plio-Quaternaire (CHERIGUIA et al., 2004).



**Figure 14: Localisation de la plaine de la Mitidja, du Sahel et du Massif de Bouzaréah**

### 2.3.3 Le Massif de Bouzaréah

Le massif cristallin de Bouzaréah constitue le principal relief de la wilaya d'Alger. Ce massif de formations cristallines primaires (schistes, micaschistes et gneiss), domine le chaînon du Sahel, constitué principalement de conglomérats, molasses et marnes pliocènes à miocènes (ISL & BRGM, 2006).

### 2.4 Le climat algérois

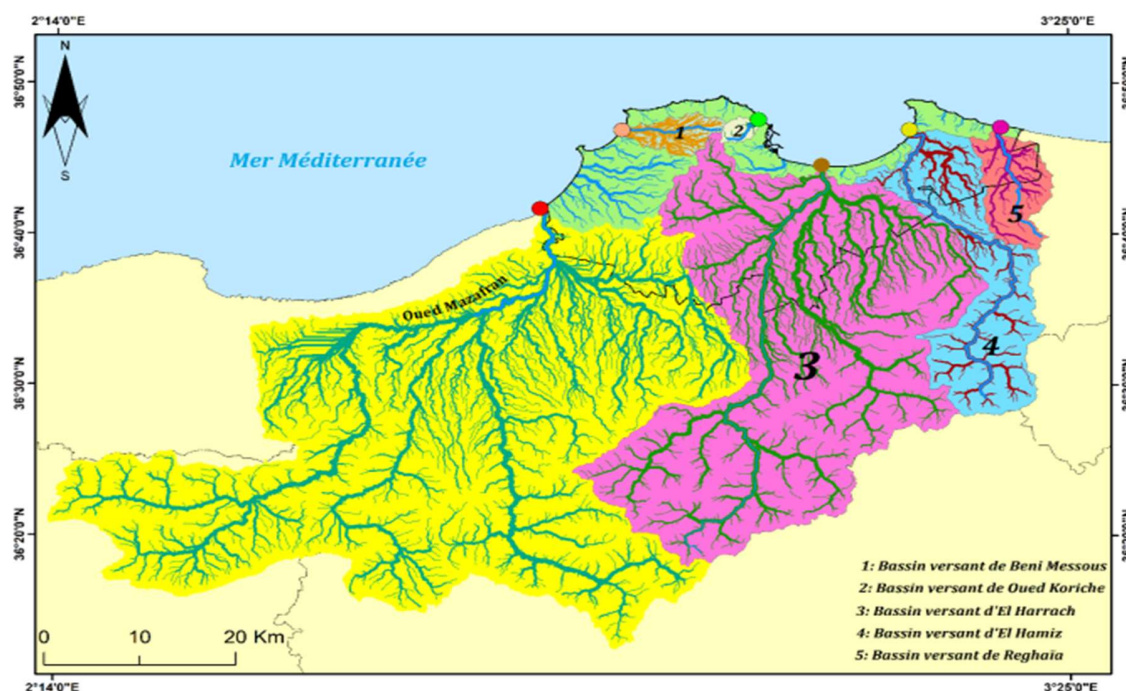
La wilaya d'Alger est bordée par la Mer méditerranée au nord ce qui lui confère un climat méditerranéen modéré avec de longs étés chauds et secs et des hivers doux caractérisés par des pluies abondantes souvent diluviennes. Le climat est tempéré par la rencontre des mouvements des masses d'air froides du nord et chaudes provenant de l'intérieur depuis le désert. La température moyenne annuelle varie dans la plaine de la Mitidja entre 17°C et 18°C (MESSEN AND SERRAH, 2021).

### 2.5 Hydrographie

L'hydrographie de la wilaya d'Alger est un paramètre décisif dans la vulnérabilité de la zone face aux inondations. De nombreux oueds traversent Alger et déversent dans la mer Méditerranée. En dépris de leur faible débit d'eau, ces oueds subissent des crues importantes en cas de fortes pluies (MESSEN AND SERRAH, 2021). La plupart de ces cours d'eau ont été aménagés et équipés par des canalisations de collection enterrées.

À l'ouest, l'Oued Mazafran constitue la frontière entre les wilayas d'Alger et de Tipaza. Au bas du massif de Bouzaréah se trouve l'Oued Koriche. Plus à l'est, entre Chéraga et Aïn Benian se situe l'embouchure de l'Oued Beni Messous. À l'Est, se trouvent les Oueds El Hamiz, Réghaïa et El Harrach, pour lequel l'état a consacré ces dernières années un projet d'assainissement et d'aménagement (MESSEN AND SERRAH, 2021). La Figure 15 illustre les bassins versants des principaux oueds traversant la wilaya.

Il est important de noter que ces oueds ont un aspect soit permanent, soit non permanent : l'oued El Harrach est un oued permanent toute l'année, par contre les autres oueds comme (El Hamiz, Beni Messous, Reghaïa et Koriche) sont des oueds non permanents, ils débordent en hiver et s'assèchent en été.



**Figure 15: Les cinq principaux bassins versants de la wilaya d'Algier (ZIADI, 2022)**

### 2.5.1 Bassins versants d'Algier

Il est crucial de souligner que la zone d'étude (wilaya d'Algier) est incluse dans le bassin versant numéro 02, communément appelé le bassin côtier algérois.

#### 2.5.1.1 Bassin versant de l'Oued El Harrach

Oued El Harrach est le principal cours d'eau de la Mitidja, 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 et un débit moyen de 4 à 5 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, mais celui-ci peut monter jusqu'à 3 000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en temps de crue. Ce bassin versant est caractérisé par une activité industrielle très importante. Il est considéré comme le plus grand bassin versant de notre zone d'étude. Il est caractérisé par une forte urbanisation (artificialisation du sol) au niveau de ses rives, dont une grande partie est anarchique. Ceci augmente le risque de dégâts humains, matériels et environnementaux lors de la survenue d'inondations.

### **2.5.1.2 Bassin versant de l'Oued Réghaia**

Oued Reghaïa se trouve dans la partie Est de la plaine de la Mitidja 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. 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. Selon CHEIKHLOUNIS et al . (2011), oued Reghaïa présente la même situation urbanistique qu'oued El Hamiz, ce sont des zones fortement urbanisées avec notamment la présence d'habitations anarchiques.

### **2.5.1.3 Bassin versant de l'Oued Beni Messous**

L'oued de Beni Messous, 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>. Il prend sa source à l'Est du massif de Bouzaréah et s'écoule vers l'Ouest. 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 (ISL and BRGM, 2006).

### **2.5.1.4 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 5km. 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).

### **2.5.1.5 Bassin versant de l'Oued El Hamiz**

Oued El Hamiz 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. 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.

### **2.5.1.6 Bassin versant de L'oued Mazafran**

Situé à 40 km à l'Ouest d'Alger, l'Oued Mazafran constitue l'unité majeure du bassin versant côté Algérois. C'est le principal cours d'eau de la Mitidja. Il représente une superficie d'environ 1991 km<sup>2</sup> et un cours d'eau principal de 22 km. Il résulte de la confluence des oueds Chiffa, Bouroumi et Djer à 5 km environ en aval de la ville d'Attatba. Cet oued coule en orientation sud-nord sur une distance de 22 km avant de se jeter dans la mer Méditerranéenne. Sa pente moyenne est de l'ordre de 0,2% et la largeur de son lit mineur peut atteindre 25 m. Le cours d'eau n'est pas rectiligne mais n'accuse pas non plus de sinuosités très marquées. Il présente des méandres de débordement inondables en période de crues (CHAHRAOUI, 2022).

### **2.5.2 Débits moyens des oueds**

D'après les graphes suivants (Figure 16) qui représentent le débit moyen de quelques oueds de la wilaya d'Alger (oued El Hamiz, Stations de Baraki et d'oued Smar), on remarque une très grande variabilité de leur débit moyen. Les années et les mois où le débit moyen est important, représentent les périodes où le bassin versant est le plus susceptible d'être touché par les inondations. Les débits maximaux enregistrés correspondent aux périodes suivantes :

- **Les années quatre-vingt** : avec un débit moyen de 1,3 m<sup>3</sup>/an pour Oued El Hamiz (1984-1985), et un débit moyen de 2 m<sup>3</sup>/an pour Oued Smar (1985-1986). Ces derniers correspondent à des années bien arrosées avec des précipitations relativement importantes.
- **Les années deux mille** : (2002-2003) avec un débit moyen de 14 m<sup>3</sup>/an pour Oued Ouchayah-Baraki.

D'après l'ANRH-Blida (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques), le débit centennal d'Oued El Harrach a été estimé à 426 m<sup>3</sup>/s. Les autres oueds ne comportent pas une série

de données assez longue (au minimum 25 à 30 ans) pour pouvoir calculer leur période de retour de cent ans.

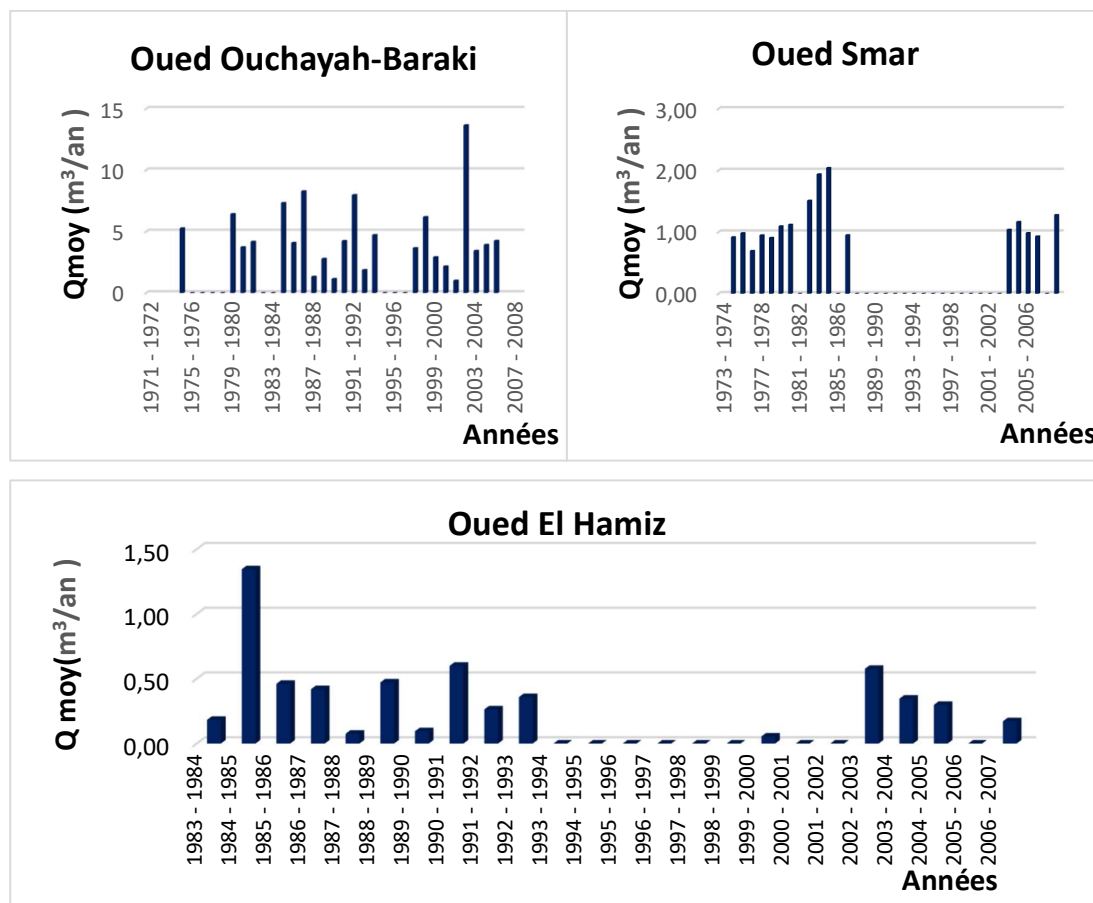


Figure 16: Evolution des débits Moyens des oueds (El Hamiz, Smar et Oued Ouchayah-Baraki) d'après les données de l'ANRH.

## 2.6 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 (EGIS EAU et al., 2012b).

### 2.6.1 Urbanisation

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, 2013).

La wilaya d'Alger est dotée de :

- 04 zones industrielles (Rouiba\_Reghaia, El Harach, Sidi Moussa et Oued Smar) et 26 zones d'activités (Site de la wilaya d'Alger)<sup>2</sup>.
- L'aéroport Houari Boumediene.
- Les Infrastructures portuaires : 04 ports : Alger, Rais Hamidou, El Djamilia et El Marsa.
- Un réseau routier composé de 113 km de réseau express, 307 km de routes nationales, 308 km de chemins de wilayas et 816 km de chemins communaux.
- Plusieurs universités et écoles ainsi qu'un ensemble d'établissements scolaires.
- Le secteur de la formation professionnelle est doté lui aussi d'un nombre d'établissements atteignant 155 unités.
- Le secteur de la santé compte 4 centres hospitalo-universitaires, 13 établissements hospitaliers spécialisés, 10 secteurs sanitaires et 61 polycliniques.
- Le secteur de la jeunesse et des sports dispose de 82 stades de football, 23 salles de sport, 13 piscines et de 219 terrains de sports.
- La wilaya d'Alger compte également 126 hôtels.

### 2.6.2 Démographie

D'après le site de l'O.N.S<sup>3</sup>, la population résidente totale en Algérie a atteint 42,2 millions d'habitants avec 2 988 145 habitants pour la wilaya d'Alger, qui hébergeait le quart (25 %) de la

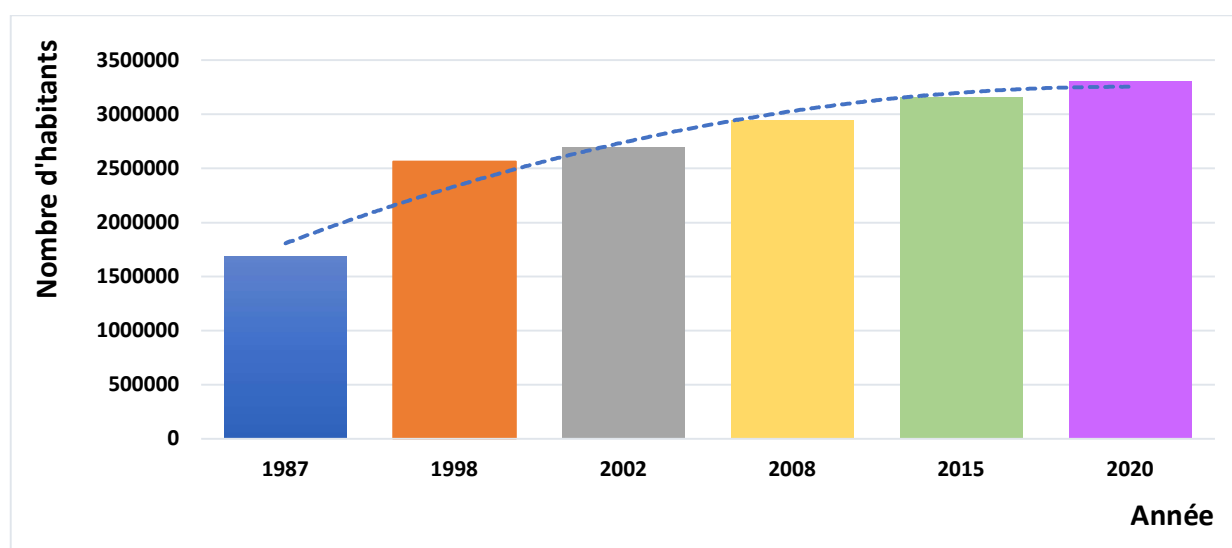
---

<sup>2</sup> Le lien du site de la wilaya d'Alger : <https://www.dawalger.dz/fr/>

<sup>3</sup> Le lien du site de l'Office National des Statistiques (O.N.S) : <https://marges.hypotheses.org/valorisation/profils-de-villes/alger>

population totale du pays en 1966 et environ 31% en 2008. Plus de 70% de la population de cette wilaya est urbaine, alors que ce taux devrait atteindre les 85% à l'horizon 2050.

La croissance démographique est l'une des causes principales de l'augmentation de l'urbanisation. L'évolution de la population dans la Wilaya d'Alger ne fut pas homogène, se caractérisant par un changement significatif de la répartition de la population sur son territoire (Figure 17 et Figure 18).



**Figure 17: Evolution du nombre d'habitants d'Alger entre 1987 et 2020 (RGPH, 2020)**

Les communes du centre d'Alger et de ses environs ont enregistré la plus forte diminution en valeur absolue et relative de la Wilaya. Cette tendance est surtout marquée entre 1998 et 2008 (Figure 18) et a entraîné en contrepartie une forte croissance relative de la population dans la banlieue (migration vers les communes périphériques). Durant cette période, La population a plus que doublé dans les communes de Draria (203,8%), Dar el Beida (130,6%), Zeralda (117,8%) et Birtouta (112,5%). Une analyse plus détaillée montre que les croissances relatives les plus élevées, avec des valeurs supérieures à 250%, se produisent dans les communes de la banlieue Ouest de l'hyper-centre, avec une plus grande disponibilité d'espaces pour la construction de logements et la proximité de grands axes routiers qui permettent la connexion avec le centre et la Rocade Sud, en particulier l'ouest de la Wilaya avec l'axe entre El Achour (327%) et Baba Hassen (275,8%), le long de la Route Nationale 36 (NAIT AMARA, 2012).

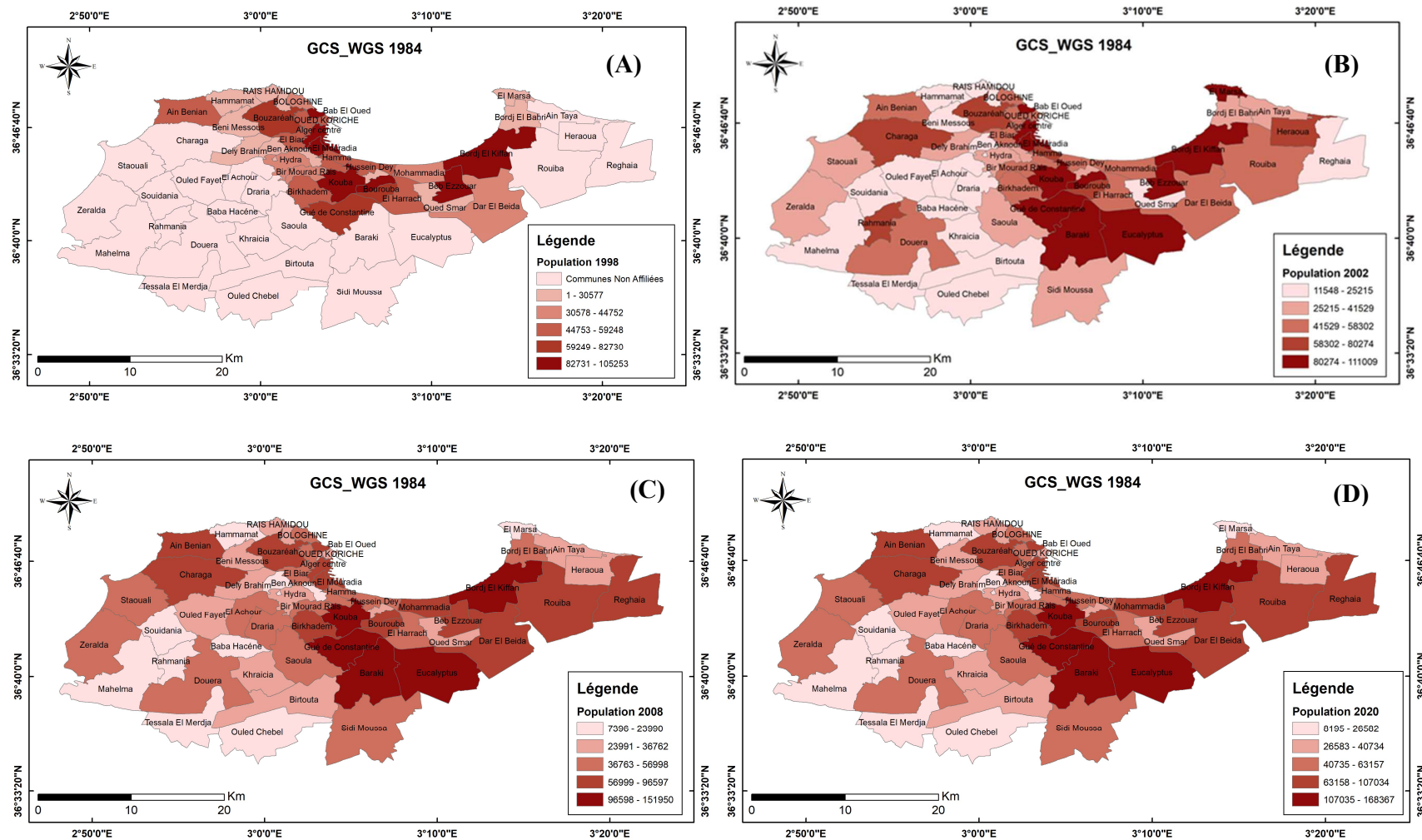


Figure 18: Evolution de la Population des communes de la wilaya d'Alger entre 1998 et 2020 : (A) 1998, (B) 2002, (C) 2008, (D) 2020 (RGPH, 2020).

À l'exception d'El Harrach, la tendance démographique de la Wilaya montre plus de dynamisme entre 1987 et 1998 que lors de l'inter-recensement suivant. Toutefois, une lecture plus détaillée montre un comportement différent dans 11 des 57 communes (Bachdjarah, Beni Messous, Bordj el Bahri, Bouzareah, El Harrach, Mahelma, Mohammadia, Oued Smar, Rais Hamidou, Souidania et Sidi Moussa) qui ont observé une augmentation due essentiellement à la mise en œuvre de programmes de logement au cours de cette période (Figure 18).

Entre 1998 et 2005, les croissances les plus importantes sont à Bab Ezzouar, Gué de Constantine, Bordj El Kiffan, Rahmania, Dar el Beida et Les Eucalyptus. Depuis 2008, les communes présentant le nombre d'habitants le plus important (jusqu'à 168.367 hab) sont : Kouba, Gué de Constantine, Baraki, les Eucalyptus et Bordj El Kiffan.

## 2.7 Politique de gestion de l'occupation du sol

L'État algérien a mis en place plusieurs stratégies et instruments pour gérer l'occupation du sol de la wilaya d'Alger<sup>4</sup>, notamment :

1. La loi sur l'aménagement du territoire (2001) : cette loi établit les règles et les procédures pour l'utilisation des terres et la planification spatiale. Elle permet de réglementer les activités économiques, de protéger les espaces naturels et de favoriser l'urbanisation ; La loi 02-02 relative à la protection et à la valorisation du littoral ; La loi 90-29, modifiée et complétée par la loi 04-05, définit les instruments et plans d'aménagement du territoire. La loi 04-05 exige une étude de planification de l'occupation des sols en prenant en considération les risques naturels et technologiques. Le ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme et la Wilaya d'Alger est chargé de la réalisation de cartes de risques et d'aléas.
2. Le plan directeur d'aménagement urbain (PDAU) : ce plan, à échelle communale et intercommunale, établit les orientations stratégiques pour le développement urbain de la Wilaya d'Alger. Il définit les zones urbanisées (U), à urbaniser réellement ou prochainement (AU), les zones à préserver (non urbanisables, NU) et les axes de développement économique (urbanisation future, UF). Avant 2004, l'instrument de base d'aménagement urbain était le « Plan d'Urbanisme Directeur » (PUD). La Wilaya d'Alger

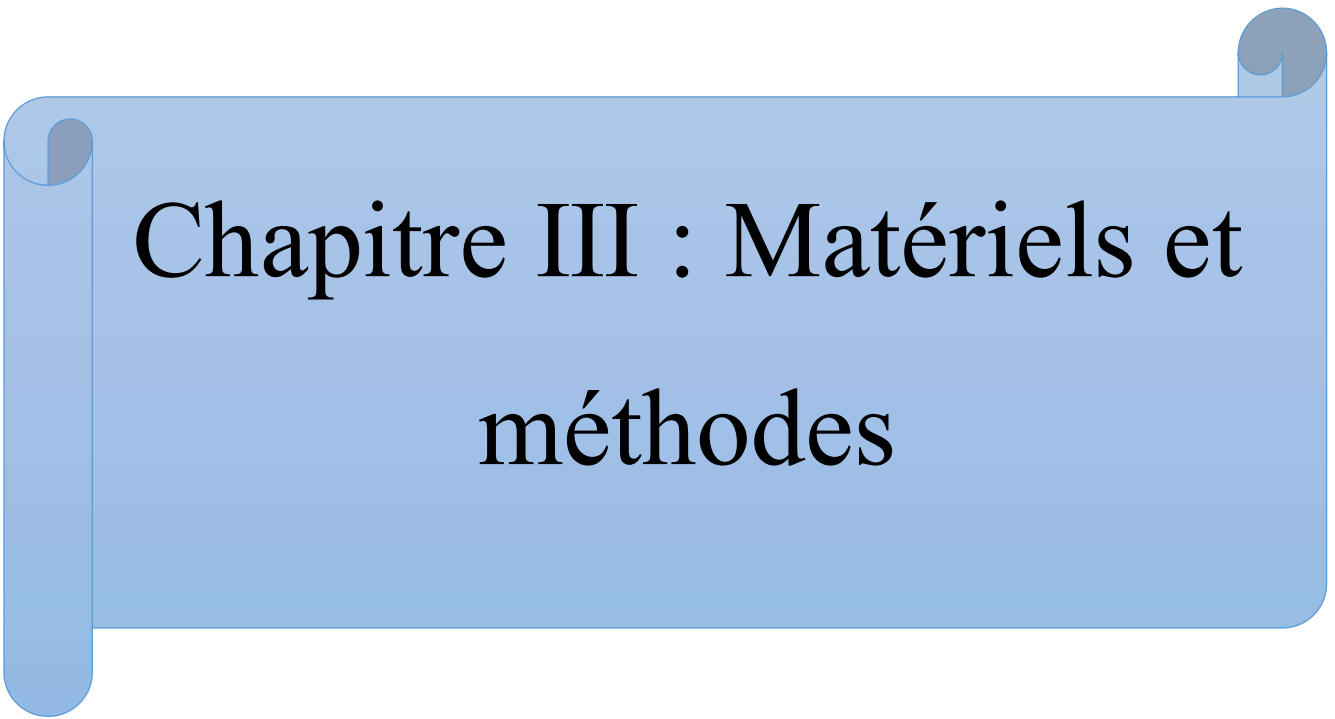
---

<sup>4</sup> [https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11842036\\_02.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11842036_02.pdf)

a réalisé de grands PDAU d'Alger dans 37 communes, en plus des 20 PDAU communaux depuis 2005.

3. Les plans d'occupation des sols (POS) : établis au niveau communal, ces plans définissent les règles d'utilisation du sol dans les différentes zones de la Wilaya d'Alger. Ils permettent de réglementer l'implantation des activités économiques, des habitations et des équipements publics. 126 POS d'un total de 500 ont été appliqués.
4. Le schéma d'aménagement de la Wilaya d'Alger : ce schéma vise à organiser l'occupation du sol à l'échelle de la Wilaya d'Alger. Il prend en compte les besoins socio-économiques et les enjeux environnementaux pour définir les zones à urbaniser et à préserver.
5. La réglementation de l'utilisation des terres agricoles promulguée en 1987 : l'État algérien a mis en place des mesures pour protéger les terres agricoles de la Wilaya d'Alger et encourager l'agriculture. Il a notamment créé des zones agricoles protégées et interdit la conversion des terres agricoles en terrains à bâtir.

En somme, l'État algérien utilise une combinaison de politiques et d'instruments pour réglementer l'occupation du sol dans la Wilaya d'Alger, en vue de garantir une utilisation équilibrée et durable du territoire. Ces politiques et instruments visent à concilier les besoins de développement économique et la préservation des espaces naturels.

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 III : Matériels et méthodes

### 3 Chapitre III : Matériels et méthodes

Le but principal de la présente étude consiste à étudier les inondations de la wilaya d'Alger et leur variabilité spatio-temporelle. Dans cette optique, ce mémoire s'est initialement concentré sur l'étude de l'occupation du sol de la wilaya, ce qui a permis de mettre en évidence les changements dans la répartition des différentes utilisations du sol au fil du temps.

Dans un deuxième temps, notre orientation s'est portée vers une étude climatique approfondie de la wilaya d'Alger en se basant sur les données de précipitations. L'objectif est de comprendre la relation entre les précipitations et les inondations dans la région, ainsi que d'analyser leur variabilité spatio-temporelle. Grâce à cette approche, nous visons à fournir une description détaillée du climat local, à identifier les tendances et les modèles des précipitations, ainsi qu'à évaluer les risques d'inondations associés. Ces informations seront essentielles pour établir des mesures d'adaptation et de gestion efficaces, permettant ainsi de minimiser les conséquences néfastes des inondations et de promouvoir le développement durable de la wilaya d'Alger.

Afin de mieux gérer ce phénomène d'inondations, nous nous sommes orientés, dans un troisième temps vers une étude statistique des inondations de la wilaya d'Alger pour comprendre la répartition des inondations, leurs schémas et tendances ainsi que leur évolution temporelle.

Enfin, un cas d'étude a été abordé par une technique de télédétection qui consiste à combiner deux images Radar, une image acquise pendant l'inondation avec une image acquise avant l'inondation, pour distinguer les zones inondées des masses d'eau permanentes. Cette technique permet de cartographier l'étendue des zones inondées de la wilaya d'Alger.

#### 3.1 Logiciels utilisés

Le travail réalisé dans ce mémoire s'est fait à l'aide des logiciels suivants :

- **ArcGIS 10.8:** ArcGIS est un système d'informations géographiques (SIG) complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser, communiquer et diffuser des informations géographiques. Il a été développé par la société Américaine ESRI (Environmental Systems Research Institute).

- **ENVI 5.1** (The ENvironment for Visualizing Images) est un logiciel commercial complet de visualisation et de traitements d'images issues de la télédétection développé par la société Américaine Harris Geospatial.
- **SNAP 8** (Sentinel Application Platform) est un logiciel de traitement d'images satellitaires de télédétection développé par l'ESA (European Space Agency). Il a principalement été développé pour l'exploitation des produits Sentinel.
- **RStudio** est un logiciel et un langage de programmation gratuits développés en 1995 à l'Université d'Auckland en tant qu'environnement informatique statistique et graphique. Il est utilisé pour l'analyse de données dans diverses disciplines scientifiques.
- **Khronostat 1.01** est un logiciel d'analyse statistique de séries chronologiques regroupant différents tests statistiques. Ces tests sont spécifiques à un changement de comportement de la variable dans la série temporelle (<http://www.hydrosciences.org>). Il est dédié à la détection de ruptures des séries statistiques, notamment des séries climatiques (<https://www.geograchid.com>).

### 3.2 Etude de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger

Au cours des dernières décennies, la wilaya d'Alger a été témoin d'une expansion urbaine fulgurante et d'une intensification des aménagements, ce qui a entraîné une artificialisation croissante du sol naturel. Malheureusement, cette transformation rapide du paysage a eu des conséquences préoccupantes, notamment une imperméabilisation partielle ou totale du sol lors des épisodes de fortes pluies. Pour mieux comprendre l'ampleur de ce phénomène et d'apporter la démonstration factuelle, une étude d'occupation du sol de la wilaya d'Alger a été menée sur une période allant de 1984 à 2022 en utilisant la technique de la classification supervisée. Cette approche scientifique et rigoureuse a permis d'analyser les changements dans l'utilisation des terres au fil du temps, mettant en évidence les zones urbanisées qui ont connu une imperméabilisation croissante.

La classification d'une image en télédétection implique de regrouper tous les pixels de l'image en un nombre restreint de classes correspondant aux éléments structuraux majeurs de l'image. Il s'agit essentiellement de cartographier l'image en se basant sur les valeurs

radiométriques des pixels. Les méthodes de classification les plus couramment utilisées peuvent être divisées en deux catégories principales : la classification supervisée et la classification non supervisée. Dans le domaine de l'extraction de l'occupation du sol à partir d'images satellites, les recherches se basent largement sur des méthodes de classification supervisée pixel par pixel (DERDJINI, 2017). Cette approche repose sur l'hypothèse que nous avons une connaissance du terrain sur lequel nous travaillons. La méthode consiste à sélectionner différents échantillons d'apprentissage représentatifs des classes cibles, puis à appliquer un algorithme de classification qui, selon certaines règles statistiques, attribue à chaque pixel de l'image une classe spécifique. Ce type de classification offre un résultat rapide et généralement assez efficace pour détecter les changements dans l'occupation du sol (DERDJINI, 2017).

### 3.2.1 Présentation des données utilisées

La classification a été réalisée sur cinq images du satellite Landsat (L5, L7, L8) (30 m de résolution spatiale) de niveau 2<sup>5</sup> des années (1984, 1992, 2003, 2012, 2022) qui ont été téléchargées à partir du site de l'USGS<sup>6</sup> (United State Geological Survey). Les caractéristiques des images sont synthétisées dans le (Tableau 1) :

**Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat utilisées**

Satellite	LANDSAT 5			LANDSAT 7	LANDSAT 8
Image	Image de 1984	Image de 1992	Image de 2011	Image de 2003	Image de 2022
Agence spatiale	La NASA (USA)			La NASA (USA)	La NASA (USA)
Capteur	TM (Thematic Mapper)			ETM (Enhance Thematic Mapper)	OLI (Operational Land Imager) et TIRS (Thermal Infrared Sensor)
Date et heure d'acquisition	30/07/1984 09h 55 min	04/07/1992 09h 48 min	08/10/2011 11h 53 min	24/05/2003 10 h 14 min	23/07/2022 10 h 25 min
Niveau de traitement	Level 2 SP			Level 2 SP	Level 2 SP

<sup>5</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>6</sup> Lien USGS : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Satellite	LANDSAT 5	LANDSAT 7	LANDSAT 8
<b>Bandes Spectrales (résolution spectrale<sup>7</sup>)</b>	1 (B) [0,45,0,52 $\mu$ m] 2 (V) [0,52-0,60 $\mu$ m] 3 (R) [0,63-0,69 $\mu$ m] 4 (IR) [0,76-0,90 $\mu$ m] 5 (IRM) [1,55-1,75 $\mu$ m] 6 (IRT) [10,4-12,5 $\mu$ m] 7 (IRM) [2,08-2,35 $\mu$ m]	1 (B) [0,45,0,52 $\mu$ m] 2 (V) [0,53-0,61 $\mu$ m] 3 (R) [0,63-0,69 $\mu$ m] 4 (IR) [0,78-0,90 $\mu$ m] 5(IRM) [1,55-1,75 $\mu$ m] 6(IRT) [10,4-12,5 $\mu$ m] 7(IRM) [2,09-2,35 $\mu$ m] (Pan) [0,52-0,90 $\mu$ m]	1(Aérosols)[0,43,0,45 $\mu$ m] 2 (B) [0,45,0,52 $\mu$ m] 3 (V) [0,53-0,61 $\mu$ m] 4 (R) [0,63-0,69 $\mu$ m] 5(PIR)[0,85-0,89 $\mu$ m] 6(IRM) [1,56-1,65 $\mu$ m] 7(IRM) [2,11-2,29 $\mu$ m] 8(Pan) [0,50-0,68 $\mu$ m] 9(Cirrus) [1,36-1,39 $\mu$ m] 10(IRT-1) [10,6-11,2 $\mu$ m] 11(IRT-2) [11,5-12,5 $\mu$ m]
<b>Système de projection</b>	WGS84 UTM zone 31	WGS84 UTM zone 31	WGS84 UTM zone 31
<b>Résolution spatiale<sup>8</sup></b>	30 m Bande 6: 120 m	30 m Bande 6 : 60 m Pan: 15 m	30 m Bande 10 et 11 : 100 m Pan: 15 m
<b>Résolution temporelle<sup>9</sup></b>	16 jours	16 jours	16 jours
<b>Résolution radiométrique<sup>10</sup></b>	8 bits	9 bits	12 bits
<b>WRS_PATH/ROW</b>	196 / 35	196 / 35	196 / 34

### 3.2.2 Etapes de travail

Quelques prétraitements et traitements ont été nécessaires à l'image Landsat afin de réaliser l'étude de l'occupation du sol :

#### 1. Ouverture des images : sur le logiciel ENVI 5.2 :

- File > Open > Sélection des 7 bandes de format TIFF

#### 2. Empilement des bandes (Layer Stacking) Afin de rassembler toutes les bandes en une seule image pour effectuer aisément le reste des manipulations.

- Toolbox > Raster Management > Layer Stacking

<sup>7</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>8</sup> La résolution spatiale désigne la taille de l'unité de mesure minimale sur la surface terrestre correspondant au pixel de l'image (BAYOUDH, 2013).

<sup>9</sup> La résolution temporelle caractérise la capacité du satellite et de ces instruments à répéter des mesures de la même zone géographique (BAYOUDH, 2013).

<sup>10</sup> La résolution radiométrique correspond au nombre de bits sur lequel l'image est codée.

3. **Mosaïckage** : lorsqu'une date déterminée comprend deux images pour couvrir la scène, un mosaïckage est nécessaire afin d'obtenir une seule image sur laquelle la classification supervisée sera réalisée :
  - Toolbox > Mosaicking > Seamless Mosaic.
4. **Découpage de l'image** : Afin d'extraire seulement la zone d'étude, l'image résultante de la mosaïque a été découpée selon un vecteur correspondant aux limites administratives de la wilaya d'Alger.
  - Toolbox > regions of interest > subset data from ROIs.
5. **Classification supervisée** : Sur ENVI à l'aide de l'algorithme : Maximum Likelihood Classification.
  - Toolbox > classification > classification workflow > use training data
  - Création de cinq classes pour chaque image (Tableau 2) : urbanisation, terres agricoles, végétation, sols nus et eau.
  - Un calcul des superficies et pourcentages de chaque classe a été effectué par la suite sur le logiciel ArcGIS.

Les échantillons correspondent à des ROI (Régions of interest) sous forme de polygones.

**Tableau 2: Le Nombre de ROI de chaque classe**

Classes	1984	1992	2003	2011	2022
Végétations	237	243	593	182	146
Urbanisation	677	354	1054	438	569
Terres agricoles	505	517	502	398	334
Sols nus	678	197	412	77	119
eaux	43	14	34	12	31

### 3.2.3 Les changements thématiques

La technique "Thematic Change" se base sur la comparaison entre deux images de classification réalisées pour deux dates différentes afin d'extraire le changement survenu (différence entre les deux images). La réalisation de cette application s'est basée sur le tutorial « Thematic Change Tutorial » disponible sur le site internet Harris Geospatial Solutions<sup>11</sup> :

<sup>11</sup> <https://www.13harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Tutorials>

- Sur ENVI: Toolbox > Change Detection > Thematic Change Workflow.
- Sélection des deux images de classification à utiliser
- Sélection de «Only Include Areas That Have Changed » afin de permettre la création de deux classes: une classe incluant les pixels qui ont changé de vocation et une autre classe pour les pixels inchangés.
- Amélioration du résultat avec l'application de lissage et d'agrégation : « Enable Smoothing » et « Enable Aggregation »
- Enregistrement du résultat sous les deux formats Vecteur et images de classification (Export Files).

### **3.3 Etude climatique des précipitations**

Au cours des dernières décennies, la wilaya d'Alger a été fortement touchée par les changements climatiques, qui ont amplifié les événements hydrologiques extrêmes tels que les pluies torrentielles et les inondations (BILEL et al., 2015). Ces catastrophes ont des répercussions importantes, réduisant les rendements agricoles et la disponibilité alimentaire à tous les niveaux. De plus, elles peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur d'autres secteurs. Ainsi, il est essentiel d'analyser et de cartographier les tendances et les variabilités pluviométriques d'Alger.

L'analyse des données climatiques permet de quantifier la variabilité spatio-temporelle du climat et repose sur l'utilisation de longues séries chronologiques continues et homogènes de variables climatiques (DAGNELIE, 1970). Parmi les paramètres analysés, la pluviométrie est un paramètre primordial, car elle influence directement les quantités d'eau disponibles à court et moyen terme.

Afin de mieux anticiper et gérer les risques hydrologiques, une étude climatologique complète est donc nécessaire pour comprendre l'évolution des conditions météorologiques moyennes et leur variabilité sur le territoire de la wilaya d'Alger. La climatologie, en tant qu'étude des moyennes des paramètres météorologiques, de leurs variations et de leurs extrêmes, permet d'évaluer l'impact du changement climatique sur la ressource en eau et sur les phénomènes d'inondations.

La présente étude s'est appuyée sur le guide méthodologique intitulé "DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL FOCUS - RESSOURCE EN EAU" (AMIOT, 2021). L'objectif

principal de ce guide est de contribuer à l'évaluation de l'impact du changement climatique sur la ressource en eau, en décrivant le contexte climatique local actuel et son évolution passée et future à l'aide d'indicateurs climatiques adaptés.

### **3.3.1 Acquisition des données**

#### **3.3.1.1 Données de l'ANRH**

Les données utilisées ont été recueillies auprès de l'Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH). Ces données exhaustives concernent les conditions de précipitations dans les stations météorologiques d'El Hamiz avec un code de 020602 (localisée à : X=558Km, 55, Y=367,4Km, Z=130 m), Bir Mourad Rais (020509, localisée à : X=531,1Km, Y=382,8Km, Z=140 m) et Baraki (021421, localisée à : X=535,05Km, Y=376,5Km, Z=20 m)<sup>12</sup>.

Ces données couvrent une période significative de relevés journaliers (au moins 50 ans). Pour la station d'El Hamiz, les données s'étendent de 1905 à 2020, pour Bir Mourad Rais de 1951 à 2018 et pour Baraki de 1971 à 2020. Ces trois stations ont été sélectionnées en suivant des critères géographiques rigoureux, afin de garantir une bonne représentation des différentes situations géographiques présentes dans le territoire de la wilaya. Elles sont situées respectivement au centre, à l'est et à l'ouest d'Alger et fournissent une vision détaillée et complète des régimes de précipitations.

Ces stations répondent également à des critères de qualité élevés, avec des séries de données quotidiennes les plus complètes et homogénéisées possible. Cela garantit la fiabilité des relevés et facilite une analyse détaillée de la pluviométrie pour un diagnostic territorial précis.

Avant l'utilisation de ces données, il est essentiel de passer par une étape de vérification de leur qualité afin de confirmer leur validité. Ces données ont été codifiées avec la valeur -999 pour représenter les données manquantes. De plus, il convient de trier les données de pluviométrie selon différents critères : par mois, par saison hydrologique et par année hydrologique. Il est nécessaire aussi de décomposer les jours de pluie en fonction de leur intensité.

---

<sup>12</sup> Site ONM : <https://www.meteo.dz/home>

### 3.3.1.2 Données de l'NAO (North Atlantic Oscillation)

Les données annuelles de l'indice NAO ont été téléchargées à partir du site <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>. Ces données s'étalent de 1821 à 2022 (201 ans), offrant une perspective historique sur les fluctuations annuelles de l'indice NAO<sup>13</sup>, qui est un indicateur important des conditions atmosphériques.

### 3.3.2 Etude du climat moyen

Décrire le climat consiste à définir les conditions météorologiques moyennes qui prévalent actuellement. Cette description est obtenue en calculant les indicateurs climatiques moyens sur une période de référence<sup>14</sup>. Des analyses statistiques élémentaires permettent de décrire le climat moyen dans différentes stations ainsi que de les comparer entre elles. Les indicateurs climatiques utilisés sont résumés dans le (Tableau 3).

**Tableau 3: Indicateurs préconisés pour décrire le climat moyen (AMIOT, 2021)**

Indicateurs	Détail	Echelle			
		AH	SH	SM	M
<b>Les cumuls pluviométriques</b>					
Cumul de précipitation <sup>15</sup> moyen, minimum et maximum	Cumul moyen, minimum et maximum sur la période de référence	X	X		X
Cumul moyen par type de pluie	Cumul moyen selon l'intensité des pluies (faible, moyenne, intense, très intense)	X	X		X
Part du cumul par type de pluie par rapport au cumul total	% de cumul par type de pluie	X	X		X
<b>Nombre de jours de pluies</b>					
Nombre de jours secs moyen	Nombre de jours ou $p < 1$ en moyenne sur la période de référence	X	X		X
Nombre de jours de pluie moyen	Nombre de jours ou $p \geq 1$ en moyenne sur la période de référence	X	X		X
Nombre de jour par types de pluie moyen	Nombre de jours ou $p = 1-5$ , $P = 5-10$ , $P = 10-20$ , $P > 20$ en moyenne sur la période de référence	X	X		X

AH : année hydrologique, SH : saisons hydrologiques, SM : saisons météorologiques, M : mois

<sup>13</sup> **Indice NAO** : la différence de pression atmosphérique au niveau de la mer (SLP) normalisée d'une station météorologique proche de l'anticyclone des Açores et celle d'une station proche de la dépression d'Islande (CASSOU, 2004)

<sup>14</sup> **La période de référence** : est la plus longue période commune à toutes les stations de mesures considérées

<sup>15</sup> **Le cumul de précipitation** désigne la quantité totale de précipitations enregistrées sur une période de temps spécifique.

Ces indicateurs des cumuls pluviométriques ainsi que les nombres de jours de pluies ont été calculés sur l'échelle de l'année Hydrologique<sup>16</sup>, la saison Hydrologique<sup>17</sup> et mensuelle.

La période de référence utilisée a été fixée en fonction de la longueur des séries de données disponibles (1971-2018). Néanmoins, pour la station d'El Hamiz qui présente une série temporelle de 115 ans, une période de référence couvrant cette échelle de temps a également été considérée.

Selon leur intensité, les pluies peuvent être subdivisées en quatre catégories (Tableau 4).

**Tableau 4: Les différents types de pluies en fonction de leur intensité**

<b>Jour de pluie faible</b>	(1-5 mm)
<b>Jour de pluie modérée</b>	(5-10 mm)
<b>Jour de pluie marquée</b>	(10-20 mm)
<b>Jour de pluie forte</b>	(>20 mm)

Les indicateurs climatiques calculés sont par la suite représentés graphiquement à travers des courbes et des histogrammes.

### 3.3.3 Approche climatique des risques d'inondation

L'évolution climatique peut intensifier les événements extrêmes tels que les inondations. Il est donc crucial de comprendre en détail la fréquence, l'intensité et l'évolution de ces phénomènes sur une période historique.

Le risque peut être considéré comme un événement extrême et étudié à l'aide d'une approche probabiliste (Tableau 5) qui permet de déterminer les périodes de précipitations extrêmes en fonction de leurs probabilités d'occurrence. Dans cette optique, le régime probable se révèle être l'indicateur le plus adapté pour définir les seuils extrêmes des cumuls mensuels de précipitation et pour analyser la répartition ainsi que l'amplitude de ces cumuls extrêmes.

<sup>16</sup> **L'année hydrologique** correspond à une période continue de 12 mois pendant laquelle se produit un cycle climatique complet. Le début de l'année hydrologique correspond au début de la reconstitution des stocks d'eau des bassins versants, c'est-à-dire à la reprise des précipitations au début de l'automne (mois de septembre).

<sup>17</sup> **Les saisons hydrologiques** sont étroitement liées au cycle de l'eau, à l'hydrologie des cours d'eau, mais aussi au cycle végétal. Ainsi deux saisons hydrologiques se distinguent :

- **La saison de recharge** des nappes et des cours d'eau (octobre à mars) correspond à la période la plus arrosée de l'année, avec une végétation en dormance. Les précipitations viennent recharger les réserves en eau de surface ou s'infiltrer dans le sol. Une infime partie s'évapore du fait de températures modérées/basses.
- **La saison d'étiage** (avril à septembre) est la saison où les pluies sont généralement moins présentes et la végétation est en pleine activité avec un besoin en eau accru. Les précipitations durant cette période sont majoritairement absorbées par la végétation et les cours d'eau ont tendance à s'assécher.

Concernant le risque de crue, il est intéressant de quantifier et de qualifier les caractéristiques pluviométriques qui mènent potentiellement à des inondations. Cela peut être réalisé en examinant les valeurs seuils de cumul, par exemple 50 mm en un jour, 100 mm en 10 jours, 200 mm en 20 jours. Ces jours de pluie extrêmes sont très rares et peuvent intervenir en été comme en hiver en engendrant une crue rapide.

Pour évaluer le risque d'inondation, il est possible d'utiliser des indicateurs climatiques tels que le Standardized Precipitation Index (SPI<sup>18</sup>) qui est utilisé pour identifier, sur les trois stations d'El Hamiz, Baraki et Bir Mourad Rais, les périodes extrêmes (humides ou sèches) du climat passé, sur différentes échelles temporelles. Les différentes représentations du SPI permettent également de mettre en évidence les tendances d'évolution par rapport à la moyenne sur la période étudiée. Cet indicateur repose uniquement sur l'analyse des précipitations. Les résultats obtenus sont représentés, par la suite, graphiquement à travers des courbes, des histogrammes et des Heatmaps.

Les indicateurs calculés sont résumés dans le ( Tableau 5).

**Tableau 5: Indicateurs préconisés pour définir les risques d'inondations (AMIOT, 2021)**

Indicateurs	Détail	Echelle			
		AH	SH	SM	M
<b>Approche probabiliste du risque</b>					
Centiles des cumuls	Centiles des cumuls	X	X		X
Régime probable	Centiles 10,20,50,80 et 90 moyen des cumuls mensuels sur la période de référence				X
SPI	Standardized precipitation index		X	X	X
<b>Risque d'inondation</b>					
Episode de forte pluies	Seuils à déterminer (ici : 50 mm en 1 jour)	X			
Centiles Quotidiens supérieurs	Centiles 90, 95 et 99 sur la période de référence	X			X

AH : année hydrologique, SH : saisons hydrologiques, SM : saisons météorologiques, M : mois

<sup>18</sup>Le **Standardized Precipitation Index (SPI)** est un indicateur statistique utilisé pour la caractérisation des sécheresses locales ou régionales. Basé sur un historique des précipitations de longue durée, le SPI permet de quantifier l'écart des précipitations d'une période, déficit ou surplus par rapport aux précipitations moyennes historiques de la période (MCKEE et al ., 1993).

L'indice SPI a été calculé pour l'ensemble des stations sur échelle des saisons hydrologiques et météorologiques<sup>19</sup> et l'échelle mensuelle à l'aide de l'équation suivante :

$$SPI = (P - Pm) / \sigma p$$

Avec : P = Cumul de précipitations sur l'échelle de temps considéré

Pm = Cumul moyen de précipitations sur la période historique (période de référence)

$\sigma$  = Écart-type de précipitations sur la période historique

Les seuils de SPI considérés sont repris dans le (Tableau 6).

**Tableau 6: Valeurs de l'indice SPI (AMIOT, 2021)**

2 et +	<b>Extrêmement Humide</b>
1,5 à 2	<b>Très Humide</b>
1 à 1,5	<b>Humide</b>
-0,99 à +0,99	<b>Normal</b>
-1 à -1,5	<b>Sec</b>
-1,5 à -2	<b>Très Sec</b>
-2 et -	<b>Extrêmement sec</b>

### 3.3.4 Etude des tendances climatiques sur la période historique

L'objectif de l'étude des tendances est de quantifier l'évolution de la pluviométrie dans le temps. Pour ce faire, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Des tests statistiques permettent également de valider la significativité des tendances.

#### 3.3.4.1 Méthodes d'étude des tendances

- **Le suivi temporel**, qui consiste à observer l'évolution du cumul annuel sur l'ensemble de la période étudiée. La mise en évidence de la tendance se fait par une régression linéaire.

- **Les écarts entre deux moyennes** : nécessite la disposition de deux périodes d'au moins 30 ans et de même durée. Généralement, la tendance va être calculée entre la normale climatique actuelle (1991-2020) et celle qui se termine juste avant (ici 1961-1990). Il faut donc disposer d'une série d'au moins 60 ans pour identifier ces tendances moyennes.

<sup>19</sup> **Les saisons météorologiques** : durent trois mois et démarrent au 1er du mois. Ainsi, chaque saison météorologique correspond à 3 mois entiers : L'hiver = décembre, janvier et février ; Le printemps = mars, avril et mai ; L'été = juin, juillet et août ; L'automne = septembre, octobre et novembre.

• **Les écarts à la normale climatique** : cette méthode consiste à comparer le cumul annuel, mensuelle ou saisonnière d'une année à l'autre par rapport à la normale<sup>20</sup> afin de caractériser les périodes extrêmes. Dans notre cas, nous avons considéré, la normale de la période 1991-2020 qui a été établie à partir des données mesurées du 1<sup>er</sup> janvier 1991 au 31 décembre 2020.

### 3.3.4.2 Les tests statistiques des tendances

Dans ce qui suit, nous définissons les tests statistiques et présentons ceux utilisés dans cette étude.

#### Principes des tests statistiques

Les tests statistiques suivent un principe commun qui implique l'énoncé de deux hypothèses :

1. Hypothèse nulle (H0) : absence de différence ou de changement ;
2. Hypothèse alternative (H1 ou Ha).

La décision est prise en comparant la valeur p (p-value) avec le seuil alpha.

#### Valeur critique (alpha) :

La valeur critique ou le risque alpha est la valeur limite à partir de laquelle on pourra rejeter H0 avec un seuil de significativité donné, généralement 5%.

#### Valeur P (p-value) :

Le p-value est la probabilité où le risque pris lorsque l'hypothèse H0 est rejetée. À partir de cette probabilité, le choix final d'une hypothèse se base sur la règle suivante : Si  $p \leq \alpha$  : H0 est rejeté et H1 est acceptée. Si  $p > \alpha$  : H1 est rejeté et H0 est acceptée.

Les tests préconisés pour cette étude sont les suivants : des tests de détection des ruptures et des tests de tendance.

1. **Les tests de détection de ruptures** : La variable Précipitation abordée dans cette étude a été soumise aux tests de rupture suivants : test de Pettitt, de Buishand ainsi que la segmentation d'Hubert appliqués à l'échelle annuelle.

---

<sup>20</sup> **La normale climatique** est la moyenne arithmétique calculée pour chaque mois de l'année à partir des données climatiques enregistrées quotidiennement sur une période de 30 ans. Cette période débute le 1er janvier au début d'une décennie et se terminent le 31 décembre, 30 ans plus tard (Organisation Mondiale de Météorologie).

- **Test de Pettitt** : test non paramétrique où l'hypothèse  $H_0$  est que la série suit une même distribution. Ce test permet d'identifier la présence et la date de ruptures d'homogénéité dans la série (rupture climatique).
- **Test de Buishand** : utilisé sur des variables suivant des distributions quelconques. L'hypothèse alternative indique un changement de la moyenne.
- **Test Hubert** : test d'homogénéité non paramétrique qui permet de détecter plusieurs ruptures dans une série temporelle. Les deux tests précédents ont la capacité de détecter une seule rupture dans la série temporelle.

## 2. Les tests de tendance

- **Le test de Mann-Kendall** est non paramétrique dédié à vérifier l'existence d'une tendance dans la série temporelle. L'hypothèse nulle  $H_0$  indique qu'il n'y a pas de tendance alors que l'hypothèse alternative correspond à l'existence d'une tendance (négative, non nulle ou positive) avec une signification de 5 %.
- **Le test t de student** : est un test paramétrique qui permet d'évaluer la significativité de la tendance.
- **Ecarts des moyennes** : L'écart peut être approché par un intervalle de confiance pour rendre compte de la significativité des tendances. En effet, plus l'intervalle est réduit, plus la tendance est significative.

## 3.4 Etude des inondations de la wilaya d'Alger

### 3.4.1 Données utilisées

La wilaya d'Alger a été frappée par de nombreuses inondations au fil des années, touchant plusieurs communes de la région. Afin d'étudier l'évolution spatiotemporelle de ces inondations, le répertoire des inondations de la wilaya d'Alger, issu de la base de données de la Direction Générale de la Protection Civile (2020) a été utilisé. Ce répertoire exhaustif recense de manière systématique les informations clés relatives aux inondations survenues dans la région depuis février 1946 jusqu'à octobre 2021. Chaque enregistrement comprend des données telles que la date, les communes concernées, le nombre de victimes et de sinistrés et les dégâts engendrés lors de chaque incident. Les types d'inondations, qu'ils soient dus à des pluies intenses ou à d'autres

facteurs, sont également répertoriés. Par ailleurs, le répertoire fournit des données précises sur les précipitations enregistrées pendant ces épisodes ainsi que leurs durées respectives.

### **3.4.2 Etapes de travail**

Une étude statistique a été réalisée en se basant sur cette base de données afin de mieux comprendre la répartition des d'inondations ainsi que leurs tendances et évolution temporelle dans la wilaya d'Alger. Ceci dans le but d'améliorer la prévention et la gestion de ces catastrophes. Cette étude vise, entre autres, à identifier les zones géographiques les plus touchées par les inondations, en mettant en évidence les communes les plus vulnérables. Cette identification permet de prioriser les mesures de prévention et d'atténuation des risques dans ces zones spécifiques. De plus, l'étude cherche à évaluer l'ampleur des dommages causés par les inondations notamment en termes de pertes humaines. Ces évaluations sont essentielles pour estimer l'impact socio-économique des inondations mais aussi pour identifier les types d'inondations les plus fréquents et les facteurs qui y contribuent. Ces informations aident à mieux comprendre les causes des inondations et à formuler des recommandations précises pour la gestion des ressources en eau et l'aménagement du territoire. Dans ce contexte plusieurs graphiques ont été réalisés afin d'illustrer ces statistiques.

### **3.5 Cas d'étude : Utilisation des données Sentinel-1 pour cartographier les zones inondées**

La technique utilisée pour cartographier les zones inondées correspond à l'utilisation de l'imagerie Radar (**RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging) du satellite Sentinel 1 : le principe est basé sur l'émission d'un faisceau lumineux et la mesure de son écho (émission d'une onde électromagnétique cohérente et polarisée). Ces images radar s'avèrent précieuses pour la cartographie des inondations car elles ne sont pas gênées par les nuages et elles peuvent être acquises très peu de temps après l'événement. Les zones d'extension de la crue y sont également très visibles. Cette technique utilise une combinaison d'une image acquise pendant l'inondation avec une image acquise avant l'inondation, pour distinguer les zones inondées des masses d'eau permanentes.

### 3.5.1 Présentation des données utilisées

Dans les applications de cartographie des catastrophes, l'image acquise au cours de la catastrophe est appelée "image de crise" (25/01/2017) ; l'image acquise avant est appelée "archive" (19/01/2017). Ces images sont de niveau 1<sup>21</sup>, téléchargées à partir du site de Copernicus Open Access Hub<sup>22</sup>. Les caractéristiques des images utilisées sont synthétisées dans le (Tableau 7).

Par ailleurs, plusieurs tests ont été effectués sur d'autres dates d'inondations plus récentes tels que 2021, 2020, 2018, etc. Néanmoins, il s'avère difficile de tomber sur les dates exactes des inondations et sur des inondations observables par l'imagerie radar d'un seul satellite.

**Tableau 7:Caractéristiques des images utilisées**

Satellite	Sentinel 1A/1B
Agence spatiale	ESA (European Space Agency)
Capteur	C-SAR instrument (C-band synthetic aperture radar)
Date et heure d'acquisition	"image de crise" (25/01/2017) à 20 h "image de l'archive" (19/01/2017) à 20h 06 min
Niveau de traitement	Level 1
Type de produit	GRD (Ground Range Detected)
Mode d'acquisition	IW (Interferometric Wide Swath: 250 km swath)
Résolution spatiale	5x20 m
Résolution spectrale	Une seule bande spectrale : c'est la bande C
Résolution temporelle	12 jours
Fréquence centrale	5.405 GHz
Polarisation	VV+VH, HH+HV, HH, VV

### 3.5.2 Etapes de travail

- Ouverture sur le logiciel SNAP 8.0 des images de crise et d'archive. Sur l'image de crise, les zones inondées sont très évidentes, comme des zones de faible rétrodiffusion. Ces zones sombres sont dues à la réflexion spéculaire sur les surfaces lisses de l'eau, alors que les terres environnantes sont beaucoup plus rugueuses.

<sup>21</sup> Des images de niveau 1 sont des images ayant subi des corrections géométriques et radiométriques (correction du signal électromagnétique reçu par le satellite par rapport à l'effet de terrain, à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite et aux effets du relief terrestre).

<sup>22</sup> Lien du site web de Copernicus: <https://scihub.copernicus.eu/>

- Découpage des images : cette étape permet de garder la partie des images concernées par l'inondation ("Raster" > "subset"). Les images découpées sont ensuite sauvegardées au format BEAM-DIMAP.
- Traitement multi-vues des deux images afin de réduire le speckle<sup>23</sup> ainsi que les dimensions de l'image : "Radar">"multilooking" avec un facteur multilook de trois par trois.
- Calibration radiométrique afin de permettre la comparaison des deux images avec : "radar"> "radiometric calibration".
- Conversion des pixels d'une échelle linéaire en une échelle logarithmique non linéaire, c'est ce que nous appelons des décibels. Ceci permet d'avoir une bien meilleure visualisation et distinction de l'eau ainsi qu'un histogramme plus facile à manipuler : Clic droit sur le nom de la bande > "linear to/from dB".
- Correction géométrique : afin de projeter les pixels sur un système cartographique et de corriger également la distorsion des zones à fort relief : "radar">"geometric"> "terrain correction"> "Range-Doppler terrain correction". Le système de projection sélectionné est le WGS 84 UTM zone 31.
- Conversion des bandes obtenues en décibel ("linear to/from dB"). La sauvegarde de ces nouvelles bandes passe par deux étapes : Clic droit sur la bande > "convert band", puis "fichier">"enregistrer le produit".
- Ré-échantillonnage des images : Ceci permet la création d'une grille homogène géoréférencée : "raster" > "geometric" > "Resampling"> "Define resampling algorithm : Nearest" puis "fichier" > "enregistrer le produit au format BEAM-DIMAP".
- Superposition des images par la création d'une pile (stack) : "radar" > "coregistration" > "stack tools" > "create stack" > sélection de la géolocalisation du produit comme méthode de compensation initiale.
- Création d'une composition colorée RGB à partir de l'image empilée > "open RGB image window". L'image d'archive est sélectionnée pour la bande rouge et l'image de crise pour les bandes verte et bleue. De ce fait :

---

<sup>23</sup> **Le speckle** : est l'aspect granulaire que présente une surface éclairée par un faisceau cohérent dont la longueur d'onde est de l'ordre de l'échelle de rugosité de la surface.

- Les zones inondées devraient apparaître en rouge car elles auront une forte rétrodiffusion dans le canal rouge, mais une faible rétrodiffusion dans les canaux vert et bleu
  - Sur les zones environnantes où il n'y a pas de zones inondées, nous devrions voir des tons de gris car la rétrodiffusion devrait être plus ou moins la même dans le rouge, le vert et le bleu.
  - Sur les masses d'eau permanentes nous devrions avoir un retour uniformément sombre étant donné que la rétrodiffusion sera faible tant dans l'archive que dans l'image de crise.
  - Dans certaines zones, nous pouvons voir certaines parties de l'image en cyan, donc dans les canaux vert et bleu, où nous avons une réponse plus élevée dans l'image de crise que dans l'archive. Mais celles-ci peuvent être dues à une couverture du sol qui n'est pas liée aux inondations.
- La zone inondée a été digitalisée par la suite sur ArcGIS.



# Chapitre IV : Résultats et discussion

## 4 Chapitre IV : Résultats et discussion

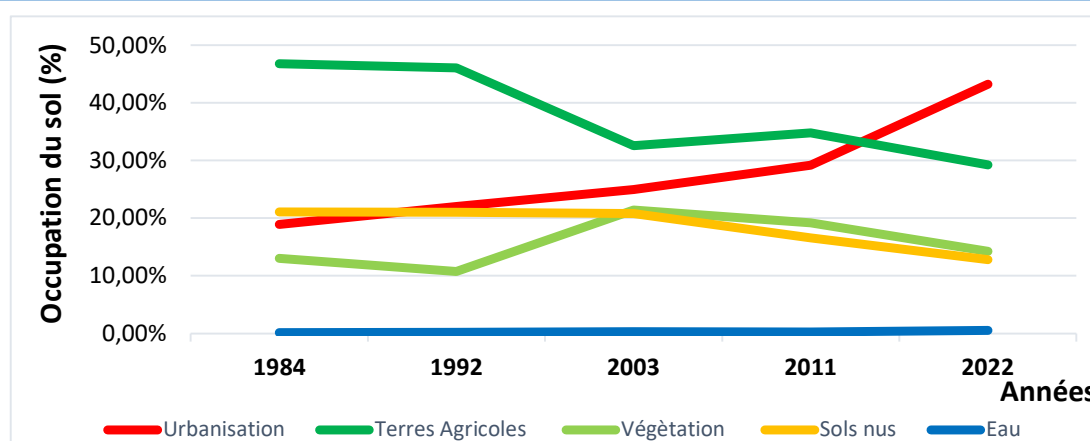
Ce chapitre expose les résultats de la présente étude ainsi que leur interprétation

### 4.1 Etude de l'occupation du sol de la wilaya d'Alger

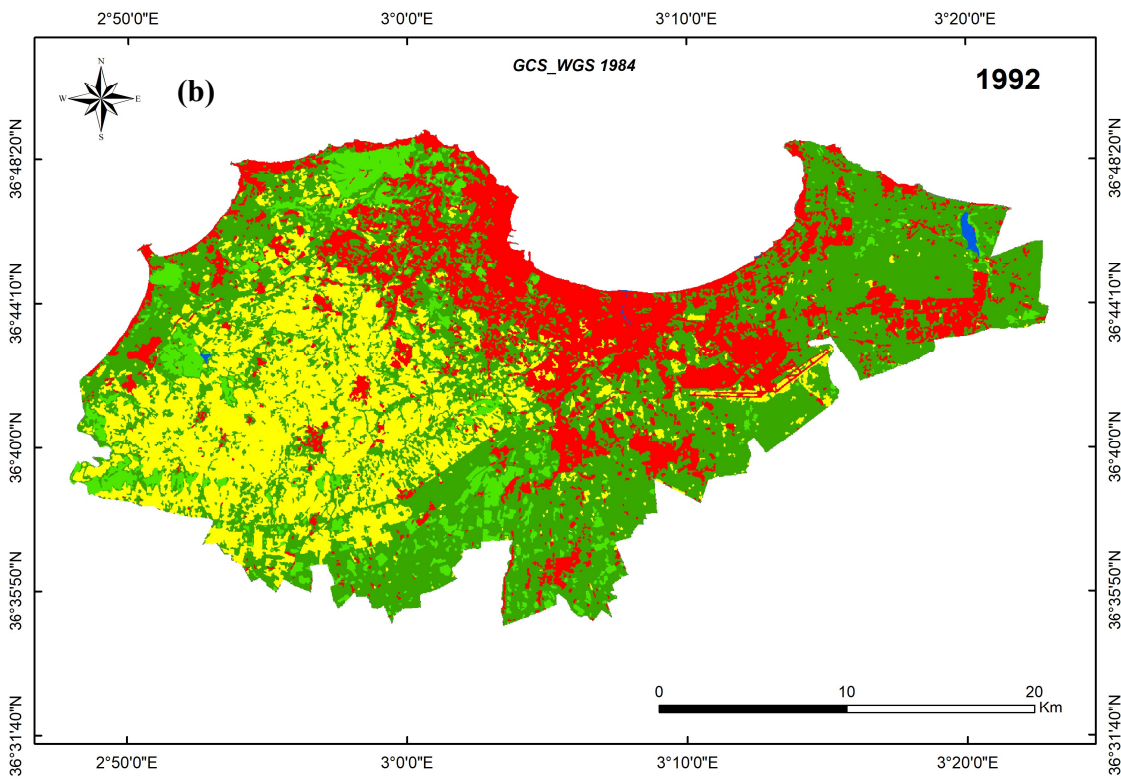
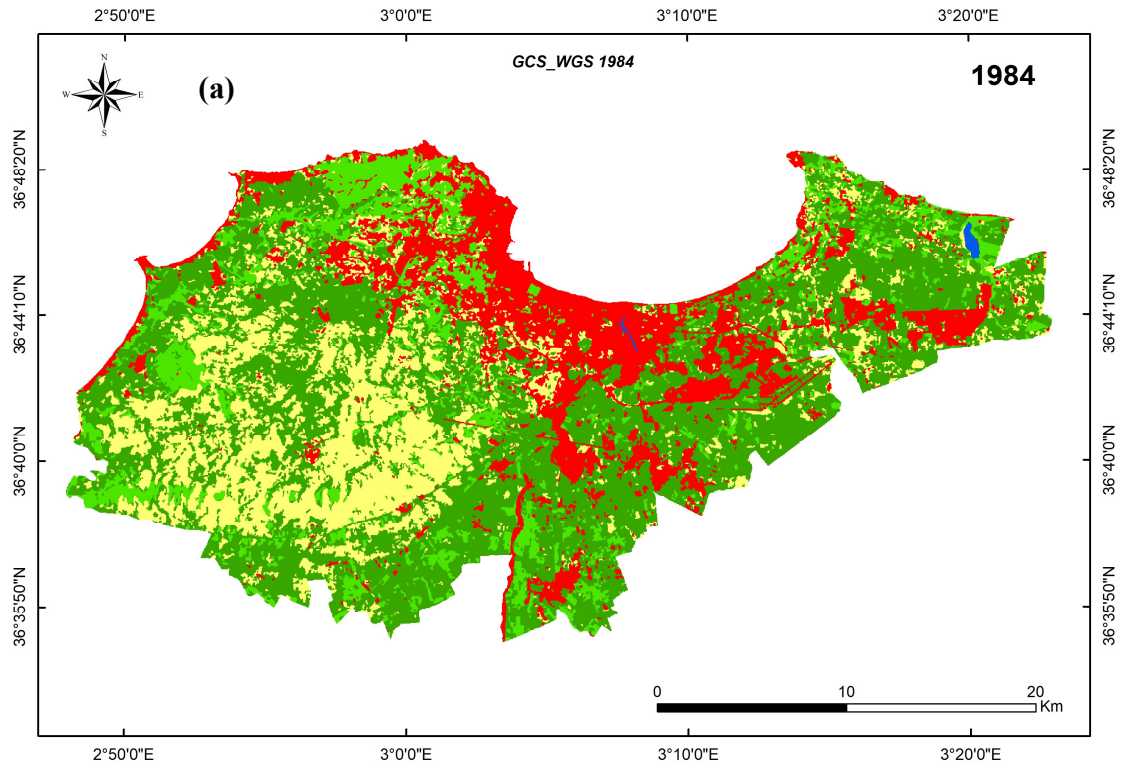
Cette partie a pour objectif d'étudier l'évolution de l'occupation du sol de la Wilaya d'Alger de 1984 à 2022 ainsi que l'évolution de sa démographie. Ces deux facteurs sont d'une importance capitale dans la compréhension de l'augmentation du nombre d'inondations à Alger durant ces dernières années. La Figure 19 et la Figure 20 (Annexe 2) montrent que l'évolution spatiale et temporelle de l'occupation du sol dans la wilaya d'Alger, au cours des cinquante dernières années, peut être divisée en plusieurs phases distinctes, reflétant les changements survenus dans les activités humaines et les facteurs économiques. Le Tableau 8 résume les statistiques obtenues suite à la classification réalisée.

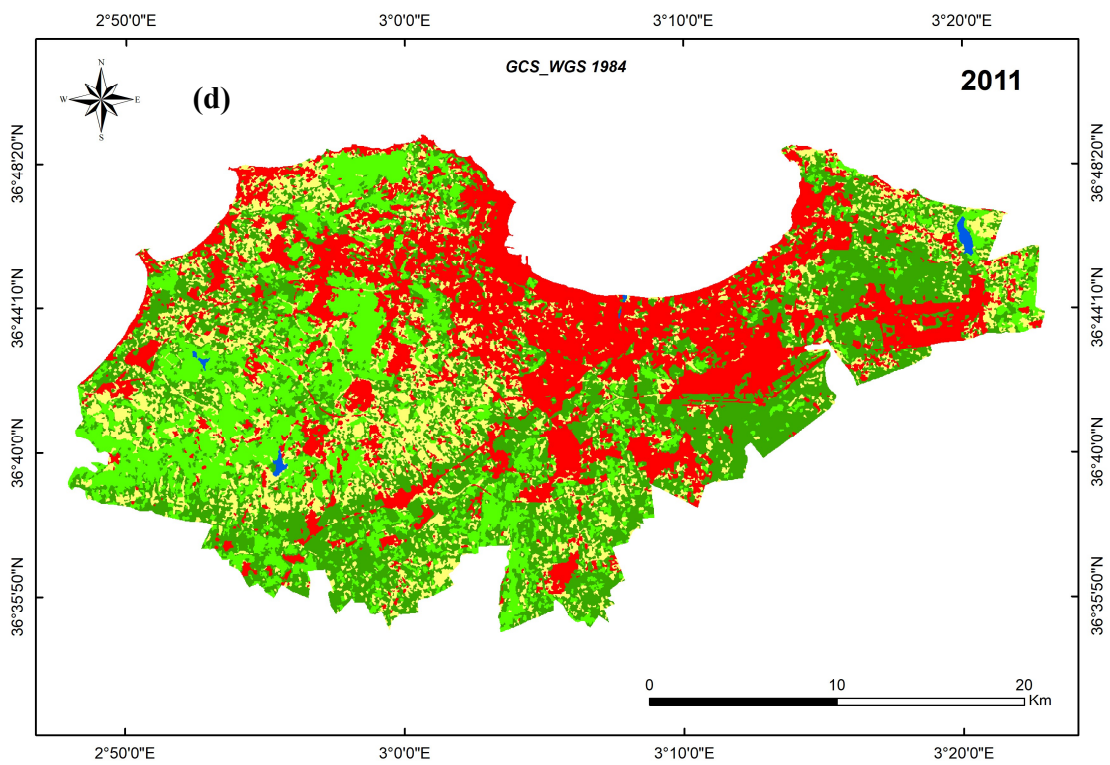
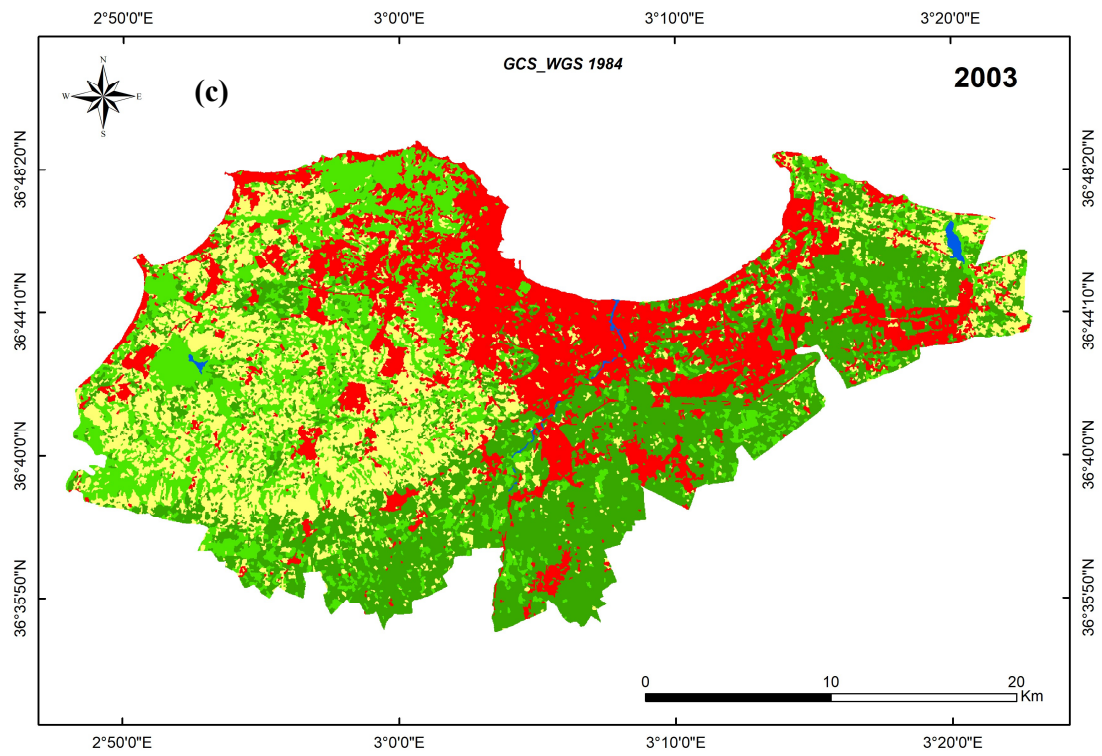
**Tableau 8: Superficies et pourcentages des classes d'occupation du sol considérées**

Classes	1984	1992	2003	2011	2022
Urbanisation	143,98 km <sup>2</sup>	167,71 km <sup>2</sup>	189,98 km <sup>2</sup>	222,701 km <sup>2</sup>	329,19 km <sup>2</sup>
	18,89 %	21,99 %	24,94 %	29,19 %	43,23 %
Terres agricoles	356,73 km <sup>2</sup>	351,42 km <sup>2</sup>	248,08 km <sup>2</sup>	265,23 km <sup>2</sup>	222,72 km <sup>2</sup>
	46,80 %	46,07 %	32,57 %	34,75 %	29,24 %
Végétation	99,59 km <sup>2</sup>	39,75 km <sup>2</sup>	163,19 km <sup>2</sup>	146,75 km <sup>2</sup>	108,24 km <sup>2</sup>
	13,07 %	8,62 %	21,42 %	19,22 %	14,21 %
Sols nus	160,76 km <sup>2</sup>	202,32 km <sup>2</sup>	158,11 km <sup>2</sup>	126,49 km <sup>2</sup>	97,44 km <sup>2</sup>
	21,09 %	23,12 %	20,76 %	16,58 %	12,79 %
eaux	1,14 km <sup>2</sup>	1,34 km <sup>2</sup>	2,34 km <sup>2</sup>	1,91 km <sup>2</sup>	3,98 km <sup>2</sup>
	0,15 %	0,18 %	0,31 %	0,25 %	0,52 %



**Figure 19: Evolution des pourcentages des classes d'occupation du sol à Alger**





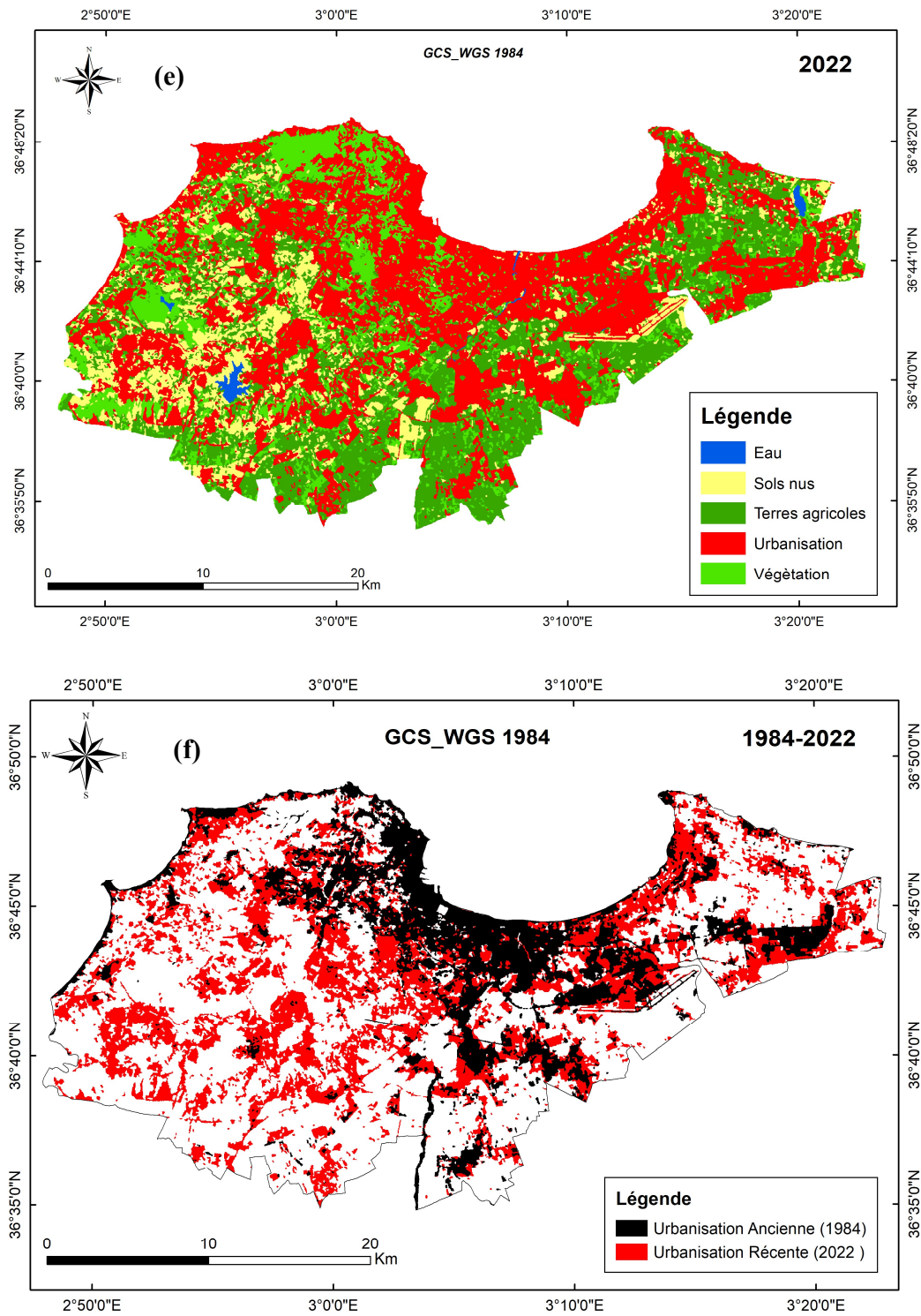


Figure 20: Cartes d'occupation du sol de la wilaya d'Alger de 1984 à 2022(a :1984, b :1992 , c :2003 , d :2011 , e : 2022 , f:changement thématique )

#### 4.1.1 Urbanisation

La wilaya d'Alger présente une augmentation quasi-linéaire de l'artificialisation de ses sols depuis les années quatre-vingt jusqu'à l'année 2011 (avec un taux de  $2,92 \text{ km}^2/\text{an}$  soit  $0,38 \%$ ) où la cadence a considérablement augmenté ( $9,68 \text{ km}^2/\text{an}$  soit  $1,27\%$ ). Il est important de signaler que dans la présente étude, l'urbain correspond à l'artificialisation des sols d'une manière générale en incluant, notamment, les routes ainsi que les serres agricoles (Figure 20).

En 1984, l'urbanisation représentait  $18,89\%$  ( $144 \text{ km}^2$ ) de la superficie d'Alger et se localisait principalement dans la partie centre de la Wilaya. En 1992, le taux d'urbanisation est passé à  $22\%$  ( $167,7 \text{ km}^2$ ) et se concentrait dans la partie littorale, centre et Est d'Alger avec une expansion vers l'arrière-pays. En 2003, la structure urbaine est devenue plus dense pour atteindre une superficie de  $190 \text{ km}^2$  ( $24,94\%$ ) (Tableau 8). Cette valeur a augmenté en 2011 ( $222,7 \text{ km}^2$ ;  $29,2\%$ ) avec une densification de l'urbanisation dans la partie Est et une extension vers l'arrière-pays dans la partie ouest. En 2022, la superficie urbanisée est passée à  $329,2 \text{ km}^2$ , soit  $43,23 \%$  de la superficie totale d'Alger avec une couverture quasi homogène de toute la wilaya (Figure 20). En effet, d'après LAICHE et al. (2018), l'état algérien s'est lancé durant cette dernière décennie dans la concrétisation d'un ambitieux programme d'infrastructures et d'équipements dont la réalisation constitue un volet essentiel de la phase de mutation urbaine, économique et sociale que traverse Alger. En 2008, la ville a enregistré des augmentations signifiant une plus grande dynamique de Développement par rapport aux autres villes de rang immédiatement inférieur (Oran, Constantine et Annaba).

Il est important de noter que, d'un point de vue administratif, en 1997, « L'ordonnance 97-14 » a été introduite pour étendre la Wilaya d'Alger par intégration de 24 communes qui appartenaient auparavant aux wilayas adjacentes. Cette nouvelle circonscription administrative inclut 57 communes dont 28 étaient considérées comme arrondissement urbain, alors que le reste s'est vu donner le statut de communes périphériques. De plus, le Gouvernorat du Grand Alger (GGA) a mis en place un « Grand Projet Urbain (GPU), Alger, capital du 21<sup>e</sup> siècle » en 1997 afin que cette wilaya devienne une métropole digne de la capitale du pays.

Pour résumer l'évolution de l'artificialisation au niveau de la wilaya d'Alger, une carte a été réalisée pour la période entre 1984 et 2022 (Figure 20.f). Cette carte révèle une augmentation

considérable de l'urbanisation dans l'ensemble de la région. Cette croissance a été particulièrement marquée dans la région ouest. De nouvelles agglomérations ont fait leur apparition à l'ouest et au sud, avec des pourcentages d'occupation du sol passant de 18,89% en 1984 à 43,23% en 2022. Dans la région est, une progression notable de l'occupation du sol est également visible, principalement autour des anciennes agglomérations déjà implantées. L'analyse de cette carte indique une véritable explosion de l'urbanisation de la wilaya au cours des 50 dernières années, ce qui expose la région d'Alger à un risque élevé d'inondation, principalement en raison de la forte occupation du sol.

L'urbanisation est un phénomène complexe et multifactoriel qui peut être causé par<sup>24</sup> :

- L'industrialisation et la croissance économique : les industries et les activités économiques ont besoin de main d'œuvre et de consommateurs. Elles ont donc tendance à s'installer dans des zones qui concentrent les populations. De ce fait, les villes attirent les industries, les investissements et les emplois et encouragent la migration des populations rurales vers les zones urbaines. C'est le cas des quatre zones industrielles d'Alger (Rouiba-Reghaia, El Harach, Sidi Moussa et Oued Samar) et de ses 26 zones d'activités.
- La croissance démographique : les changements observés dans la répartition territoriale de la population de la Wilaya d'Alger au cours des deux dernières périodes de recensement sont dus principalement à trois facteurs (NAIT AMARA, 2012) :
  - La migration interne du centre vers la banlieue. Les communes qui ont reçu l'essentiel de la migration interne sont celles qui sont les mieux dotées en logements collectifs, programmes sociaux d'habitat et équipements. Deux pôles importants sont à signaler : les communes de Bab Ezzouar et du Gué de Constantine.
  - La politique du logement a orienté la construction de logements en banlieue. Citons à titre indicatif, les projets de construction AADL (L'Agence Nationale d'Amélioration et de Développement du Logement) et LPP (Logement Promotionnel Public) qui ont été lancés à partir de 2001, tels que : Projet AADL de Ouled Fayet dans la banlieue ouest d'Alger ; Projet AADL de Draria dans la

---

<sup>24</sup> <https://youmatter.world/fr/definition/urbanisation-definition-causes-consequences/>

banlieue sud-ouest d'Alger ; Projet LPP de Bordj El Kiffan dans la banlieue est d'Alger ; Projet LPP de Hydra dans la banlieue sud d'Alger ; Projet AADL de Birtouta dans la banlieue ouest d'Alger.

- Une croissance incontrôlée de l'habitation spontanée - précaire et illégale - dans les banlieues, liée principalement à l'exode rural vers la capitale.
- Les changements sociaux et culturels tels que la libéralisation des mœurs, l'évolution des valeurs familiales, etc., peuvent encourager les gens à quitter les zones rurales pour chercher de nouvelles opportunités dans les villes.
- Les conflits et les crises tels que la guerre civile des années 1990, les catastrophes naturelles, la famine, la sécheresse, etc., peuvent également forcer les populations à quitter leurs terres et à chercher refuge dans les zones urbaines.
- Les politiques publiques peuvent jouer un rôle important dans l'urbanisation, en encourageant ou en décourageant la migration vers les villes. Par exemple, les politiques favorisant le développement des infrastructures urbaines peuvent encourager la migration vers les villes, tandis que les politiques de protection des terres agricoles peuvent décourager l'urbanisation. L'Algérie a mis en place plusieurs instruments pour gérer l'occupation du sol, notamment le PDAU et le POS (voir section 2.7).

#### 4.1.2 Terres Agricoles

Dans les années 1980, la wilaya d'Alger était principalement rurale, avec une grande partie de son territoire utilisée pour l'agriculture et l'élevage. En effet, la majorité des terres agricoles étaient concentrées dans les zones rurales, notamment dans les communes de la Mitidja : Rouiba, Bordj El Kiffan, Baraki, Birtouta et les Eucalyptus (partie Est et Sud de la wilaya), avec près de 46,8% (soit 356,73 km<sup>2</sup>) de la superficie d'Alger (Figure 20).

L'évolution des terres agricoles dans la wilaya d'Alger au cours des 50 dernières années est marquée par une diminution globale en raison de l'augmentation de la pression démographique (Figure 18) et urbanistique ainsi qu'aux politiques agricoles qui ont été souvent orientées vers l'industrialisation et la modernisation, au détriment des petits exploitants agricoles et des pratiques traditionnelles (BESSAOUD, 2019). Cette diminution était relativement lente jusqu'à l'année 1992 où la superficie totale des terres agricoles dans la wilaya d'Alger est passée à 351,42 km<sup>2</sup>

(46,07%) (Tableau 8), soit une diminution d'environ 0,73%. Selon les données de l'Office National des Statistiques (ONS)<sup>25</sup>, les communes ouest telles que Ouled Fayet, Baba Hacène, Rahmania, Chéraga et Birtouta ont été les plus touchées par la diminution de la superficie des terres agricoles au cours des années 1990. La superficie des terres agricoles à Chéraga est passée de 48,25 km<sup>2</sup> en 1988 à 36,45 km<sup>2</sup> en 1998, tandis que la superficie des terres agricoles à Birtouta est passée de 82,45 km<sup>2</sup> en 1988 à 59,28 km<sup>2</sup> en 1998.

Cette période a été suivie par une phase de diminution rapide principalement due à l'urbanisation rapide de la wilaya d'Alger avec la création de nouvelles villes et banlieues environnantes. La croissance démographique ainsi que l'expansion des zones industrielles ont également contribué à la réduction de la superficie des terres agricoles (32,57% soit 248,08 km<sup>2</sup> de la superficie d'Alger en 2003, avec une diminution d'environ 13,5%). Selon les données de l'ONS, la superficie totale des terres agricoles dans la wilaya d'Alger est passée de 319,29 km<sup>2</sup> en 1998 à 260,14 km<sup>2</sup> en 2008. Cette diminution s'est principalement produite dans les zones urbaines et périurbaines. Les communes de Baba Hassen et de Zéralda à l'ouest et Reghaïa, Heraoua, Bordj El Bahri et Ain Taya à l'est ont été particulièrement touchées par cette diminution, avec une perte de plus de 103,34 km<sup>2</sup> de terres agricoles dans la wilaya entre 1992 et 2003. D'autres communes, tels que Chéraga, Birtouta et Ouled Fayet, ont également connu une diminution significative de la superficie des terres agricoles au cours de cette période.

Cependant, les rapports de la FAO<sup>26</sup> (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) montrent que malgré la diminution globale de la superficie des terres agricoles à Alger, certains efforts ont été déployés pour promouvoir l'agriculture durable et la conservation des ressources naturelles. Par exemple, des projets ont été mis en place pour encourager la pratique de l'agriculture biologique, qui utilise des méthodes de production respectueuses de l'environnement et qui permettent aux agriculteurs de bénéficier de prix plus élevés pour leurs produits. Cet effort est visible entre 2003 et 2011 où la superficie des terres agricoles dans la wilaya d'Alger a connu une légère augmentation de 2 % en passant de 32,57 % (248,08 km<sup>2</sup>) à 34,75% (265,23 km<sup>2</sup>). Cependant, il est important de noter que cette augmentation est relativement faible

---

<sup>25</sup> Site de ONS : <http://www.ons.dz/>

<sup>26</sup> Site de FAO : <https://www.fao.org/statistics/fr/>

par rapport à la diminution globale de la superficie des terres agricoles dans cette région au fil du temps. Selon les données de l'Office National des Statistiques (ONS) et du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, la superficie totale des terres agricoles dans la wilaya d'Alger est passée de 830,53 km<sup>2</sup> en 2003 à 697,61 km<sup>2</sup> en 2011, soit une diminution d'environ 16%. Ceci n'est pas en contradiction avec nos résultats parce qu'ils ont considéré les terres agricoles comme la combinaison entre terres labourables (Cultures herbacées et les terres au repos) et cultures permanentes (Prairies naturelles, vignobles et plantation d'arbres). Or, la présente étude considère une partie de ces terres comme étant des Sols nus ou de la végétation. Ceci est dû à la limite de la méthodologie adoptée (résolution spatiale, spectrale et radiométrique des images utilisées : confusion possible entre les signatures spectrales des trois classes d'information).

Au fil des ans, la superficie totale des terres agricoles dans la wilaya a continué à diminuer pour atteindre environ 222,72 km<sup>2</sup> (soit 29,24%) de la superficie d'Alger en 2022. En plus des raisons expliquées précédemment, ceci s'explique par la pression exercée par les projets de logements étatiques (AADL, LPP, etc.). En 2022, les terres agricoles dominent la plaine de la Mitidja (partie Est et Sud de la wilaya). Sidi Moussa, Dar El Beida, Rouiba et Heraoua restent les communes qui ont le pourcentage le plus élevé des terres agricoles sur toute la wilaya tandis que les autres terres agricoles ont été progressivement remplacées par des zones résidentielles, commerciales et industrielles.

#### **4.1.3 Végétation**

La végétation domine la partie Ouest de la wilaya d'Alger (Sahel Ouest-Algérois) avec, principalement, les forêts de Baïnem et de Zeralda. La végétation détectée à l'est de la wilaya correspond à une partie des terres agricoles de la Mitidja consacrées à l'arboriculture (Figure 20).

D'après les résultats obtenus (Figure 20 et Tableau 8), la superficie couverte par la végétation a augmenté à travers les années : de 99,59 km<sup>2</sup> (13,07%) en 1984 à 163,19 km<sup>2</sup> (21,42%) en 2003, suivi par une diminution en 2022 (14,21%). Ceci peut être expliqué par la période humide qu'a connu le pays dans les années 2000 à 2010 qui a favorisé la croissance de la végétation. L'amélioration de la gestion des sols nus et de l'environnement par la mise en place de programmes de reboisement peut également expliquer cette tendance. Citons à titre d'exemple le programme national de reboisement, lancé en 2000 qui avait pour objectif de planter 1 milliard

d'arbres d'ici 2010. Ces programmes de reboisement ont contribué à réduire la superficie des sols nus en favorisant la croissance d'une végétation dense qui protège le sol de l'érosion. Néanmoins, une confusion entre la végétation et les terres agricoles est notée dans notre classification supervisée à cause de leurs signatures spectrales très proches.

La variation de la couverture végétale est la conséquence de deux principaux facteurs (EL ZEREY, 2014):

- Les causes directes liées aux activités humaines comme le déboisement, le système de culture, le surpâturage et le défrichement.
- Les causes indirectes liées aux besoins socioéconomiques selon quatre catégories : croissance démographique, pauvreté, régime juridique des terres et réparation inéquitable des ressources.

Il est à noter que les espaces forestiers ont un rôle très important dans l'imperméabilité du sol à l'eau : plus la végétation diminue, plus l'imperméabilité du sol augmente en faisant augmenter les risques d'inondations

#### **4.1.4 Sols nus**

Les sols nus sont dominants dans la partie ouest d'Alger (Sahel Ouest-Algérois) et un peu moins dans le centre et l'est avec un pourcentage de 21,09% (soit 160,76 km<sup>2</sup>) de la superficie de la wilaya en 1984. Les communes qui représentent le pourcentage élevé de sols nus sont Khraicia, Baba Hacène et Douera (Figure 20). Ce pourcentage a augmenté en 1992 pour d'atteindre environ 23,12% (202,32 km<sup>2</sup>) avec une augmentation d'environ 2,03%, probablement à cause de la diminution de l'activité agricole et à une intensification de l'urbanisation, qui ont entraîné en parallèle une diminution de la couverture végétale entre 1984 et 1992.

La superficie totale des sols nus a diminué par la suite dans la wilaya pour atteindre 20,76% (158,11 km<sup>2</sup>) (Tableau 8) en 2003. Cette diminution a touché les communes tels qu'El Achour, Douera, Draria, Ouled Fayet, Rahmania et Soudania en raison de l'expansion urbaine qui a pris de l'ampleur dans ces zones en entraînant la conversion des sols nus en zones urbaines. La diminution des sols nus a continué pour la même raison pour atteindre environ 126,49 km<sup>2</sup> en

2011 (soit 16,58%), avec une diminution d'environ 4,18 % et 12,79% (97,44 km<sup>2</sup>) en 2022. Les communes concernées par cette expansion urbaine sont Mahelma, Baba Hacéne et Draria.

#### 4.1.5 Eau

Les ressources hydriques (Eau) de la wilaya d'Alger ont augmenté à travers les années en passant d'une superficie de 1,14 km<sup>2</sup> (0,15%) en 1984 à 3,98 km<sup>2</sup> (0,52 %) en 2022 avec une légère baisse en 2011 (1,91 km<sup>2</sup> soit 0,25%) (Figure 20 et Tableau 8).

Ce changement peut s'expliquer par :

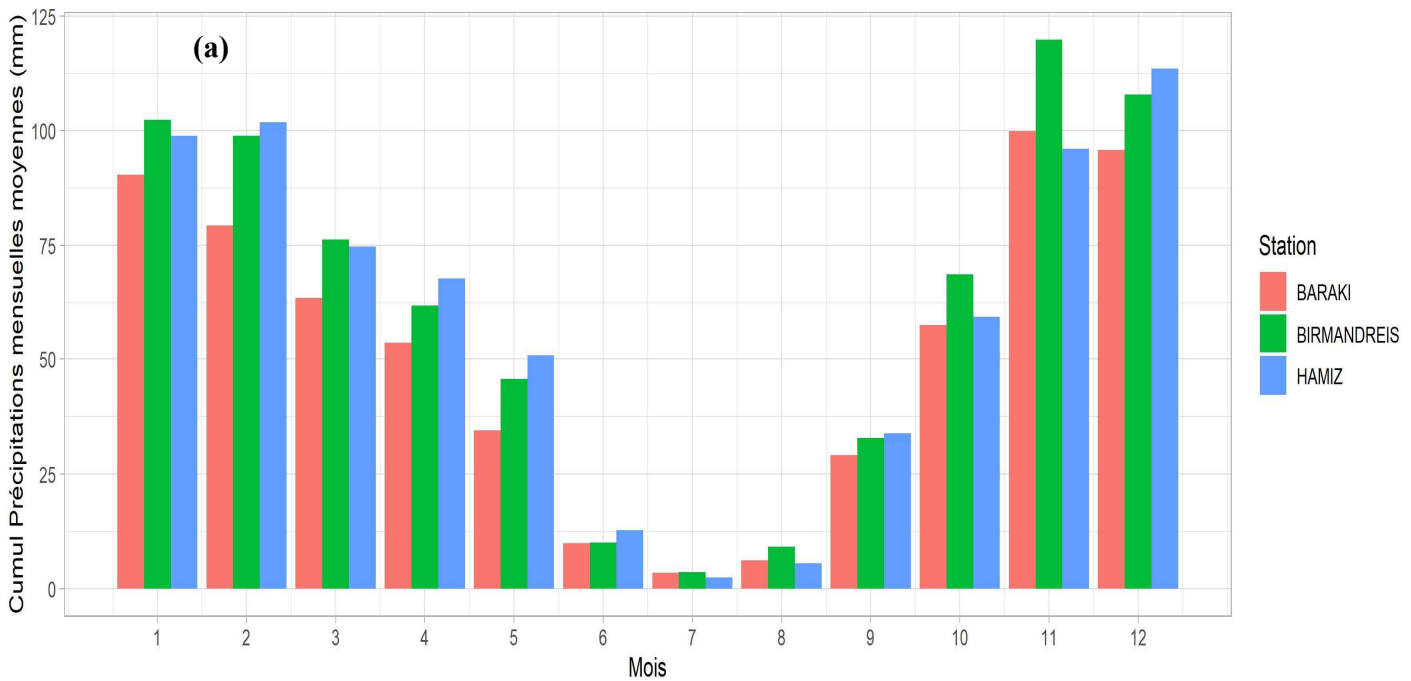
- Les facteurs naturels liée aux conditions climatiques comme les précipitations.
- Les facteurs anthropiques comme la construction du barrage de Douera, de type remblai, entre 2005 et 2010 avec une capacité de 87 million de mètres cubes.
- Les projets d'aménagement et d'assainissement comme le projet d'aménagement d'Oued El Harrach.

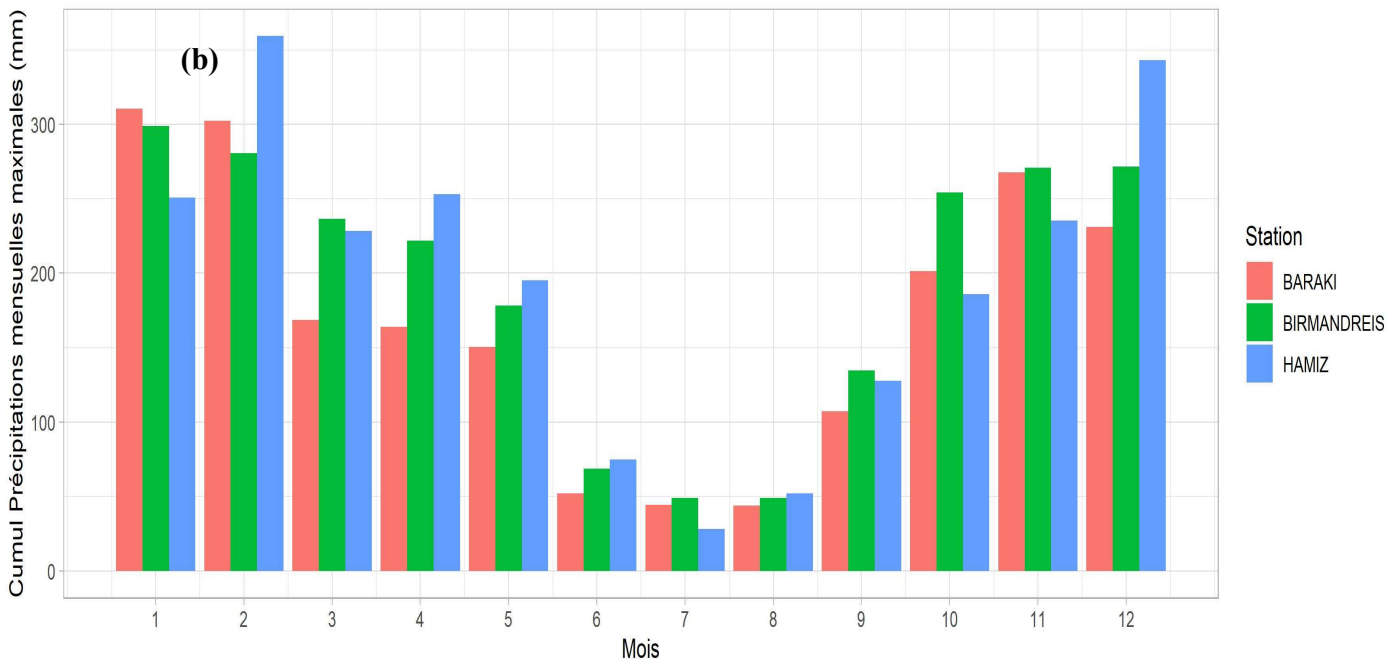
## 4.2 Etude climatique des précipitations

### 4.2.1 Régimes pluviométriques

#### 4.2.1.1 Cumuls mensuels

La Figure 21.a représente les cumuls de précipitations mensuelles moyennes pour les trois Stations considérées. Le cumul moyen des précipitations mensuelles varie de 2 à 123 mm, avec des cumuls minimums en juillet et maximum en décembre. Le cumul mensuel dépasse les 90 mm de Novembre jusqu'à février. D'une manière générale, la station d'El Hamiz présente les cumuls les plus importants, suivie la station de Birmandreis puis par la station de Baraki.





**Figure 21: Cumuls des précipitations mensuelles moyennes (a) et maximales (b) dans les trois stations météorologiques considérées**

La Figure 21.b, qui représente les cumuls mensuels maximaux, montre que les maximas de précipitation s’étalent entre Octobre et Avril avec un pic considérable en Décembre et Février pour El Hamiz (plus de 3200 mm/mois). En considérant les 115 années de données de la station d’El Hamiz, les maximas se situent en Octobre et Avril.

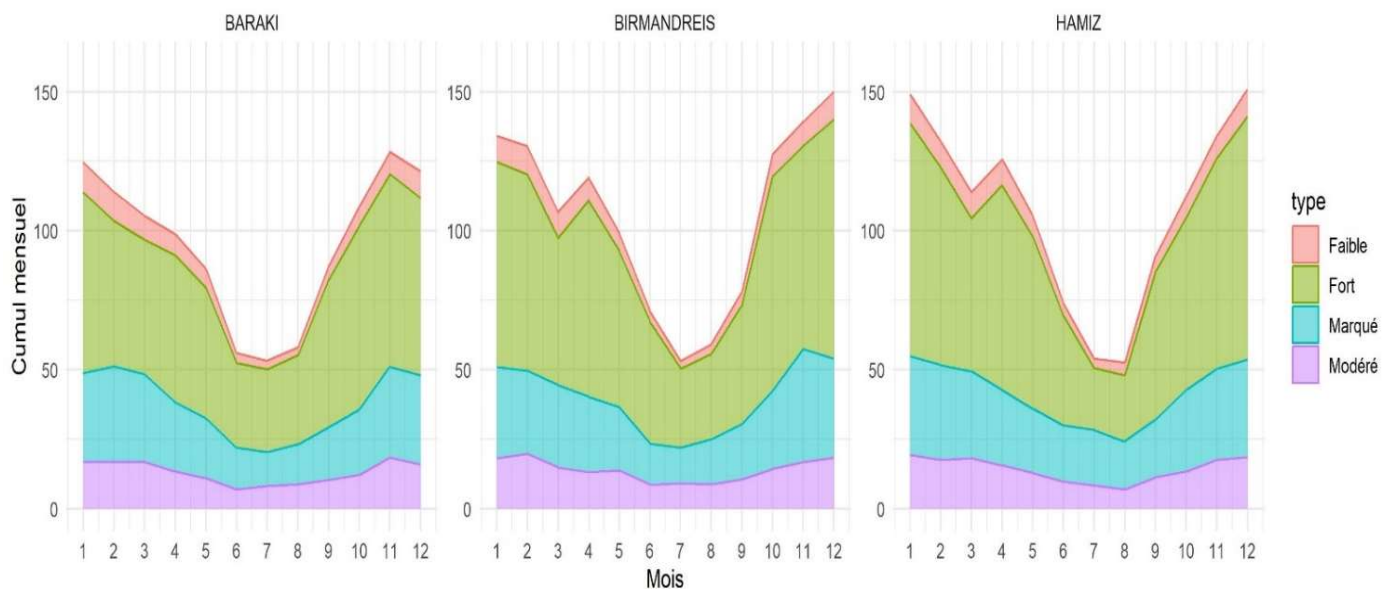
Les cumuls importants enregistrés en automne et en hiver sont la conséquence des masses d'air polaires ou des dépressions atmosphériques qui apportent des systèmes pluvieux. Ces masses d'air peuvent contenir une quantité d'humidité plus importante, ce qui entraîne des cumuls de précipitations plus élevés pendant cette période.

Durant les saisons printanière et estivale, les cumuls de précipitations sont plus faibles. Cela peut être dû à des changements dans la circulation atmosphérique et aux mouvements des masses d'air, ce qui réduit la quantité d'humidité disponible pour la formation de précipitations. Cela peut être dû aussi à l’influence de l'anticyclone subtropical qui entraîne des conditions plus stables et un temps plus sec avec des masses d'air plus chaudes, ce qui limite la formation de systèmes météorologiques dynamiques et réduit la fréquence des précipitations.

**a / Cumuls mensuels par types de pluie**

La Figure 22 présente les cumuls mensuels de précipitation par types de pluie pour les trois stations étudiées. Avec la décomposition des cumuls selon l'intensité des pluies, il apparaît que le cumul des jours de pluie faible varie peu et reste autour de 4/10 mm en moyenne par mois, tandis que celui des jours de pluie marquée (10-20 mm) varie de 17 à 35 mm. C'est durant les mois d'hiver que ces cumuls sont maximaux. Les cumuls dus aux fortes pluies représentent la part la plus importante du cumul total et sont caractérisés par des changements drastiques et rapides tout au long de l'année. Ils contribuent à forger le régime pluviométrique : lorsque le cumul de fortes pluies est minimum, le cumul total est minimum, et vice versa. En ce qui concerne les cumuls modérés (5-10 mm), il est intéressant de noter que leur variation est presque régulière entre (6-19 mm) pour les trois stations étudiées. Les données révèlent que ces cumuls modérés présentent peu de variations significatives d'une période à l'autre.

Un tel régime qui est porté par les fortes pluies est plus favorable au risque d'inondation, mais permet d'assurer une bonne recharge des réserves. En effet, plus la pluie est intense sur une courte période, plus elle contribue aux inondations (SUMI et al., 2022).

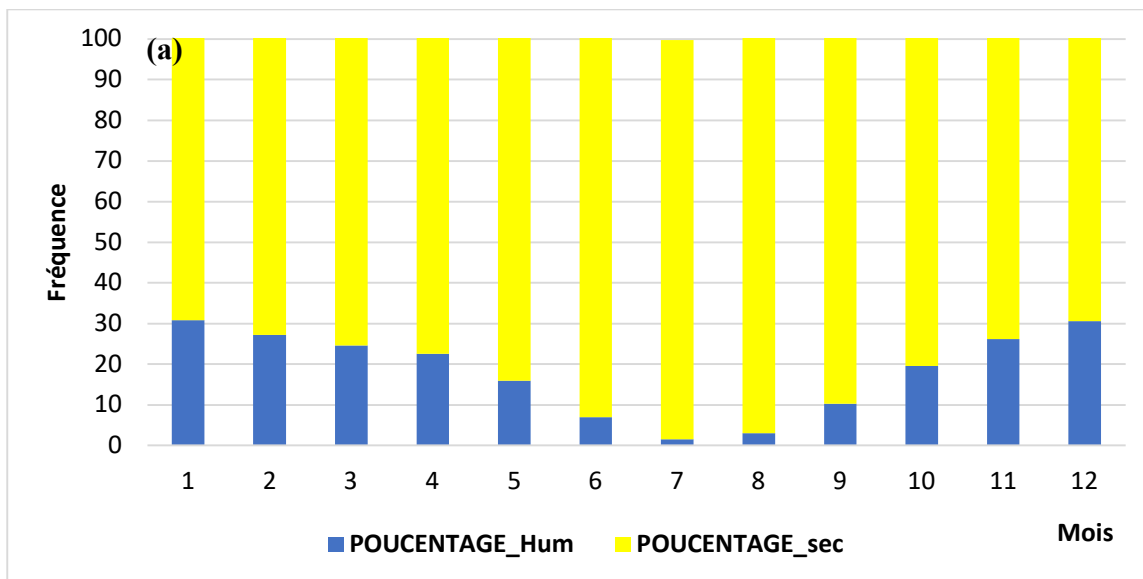


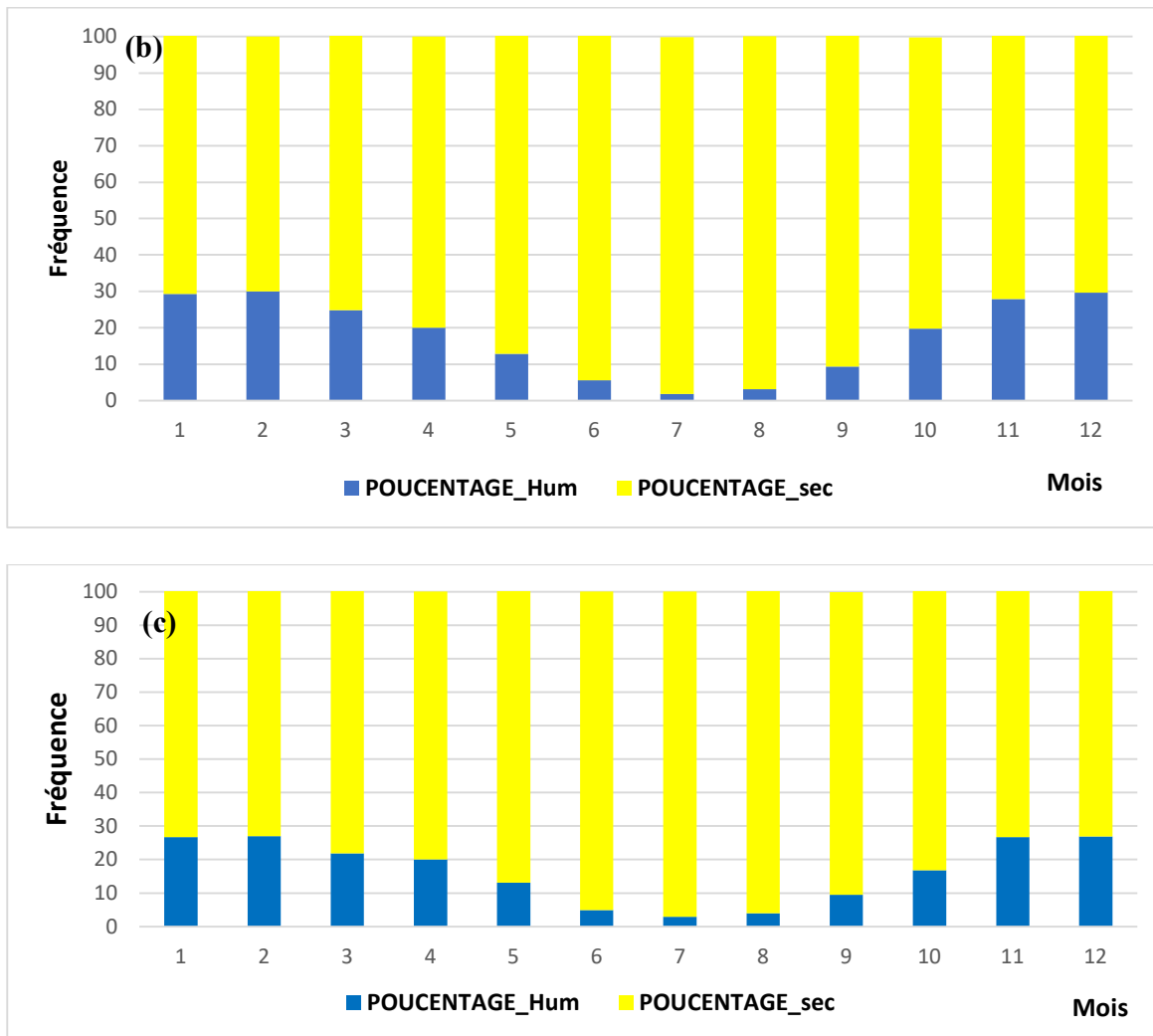
**Figure 22: Cumuls des précipitations mensuelles par types de pluie pour les trois stations considérées (El Hamiz, Baraki, Birmandreis)**

**b / Nombre de jours humides et secs par mois**

La Figure 23 montre la fréquence mensuelle des jours secs et jours de pluie, sachant que les jours de pluie correspondent aux jours où le cumul de pluie est supérieur ou égal à 1 mm. Cette analyse permet de donner une idée de la fréquence et de la répartition des pluies et indique donc la saisonnalité des pluies. En moyenne, il pleut à Alger un jour sur trois en hiver (Novembre-Décembre-Janvier), contre moins d'un jour sur dix en été (Juin-Juillet-Août). Ces tendances cohérentes entre les différentes stations mettent en évidence un schéma généralisé caractérisé par des variations saisonnières régulières.

D'une manière générale, le nombre de jours humides diminue progressivement de janvier (8 jours ; 26,6% à 30,8%) à juin (1 jour), puis reste assez faible pour les mois de juillet à septembre (moins de 3 jours ; 1,5% à 3,87 %), et augmente à nouveau pour les mois d'octobre et novembre (8 jours ; 29,6% à 30,8%). En décembre, le nombre de jours Humide est de 8 jours.





**Figure 23 : Fréquence mensuelle des jours secs et humides pour les stations météorologiques : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c)**

**c / Nombre de jours par types de pluie par mois**

La Figure 24 présente le nombre de jours de précipitations par mois pour les trois stations (El Hamiz, Baraki et Birmandreis) en fonction des différents types de pluie. Le nombre de jours de faibles pluies est le plus important et montre la variabilité mensuelle la plus marquée, en passant d'un maximum de 4 jours en hiver à 1,5 jours en été. Pour les autres types de pluies (modérées, marquées et fortes), la durée des précipitations ne dépasse pas 2,5 jours en hiver et un jour pendant la période estivale et ce pour les trois stations considérées. La variation saisonnière est la moins marquée pour le nombre de jours des fortes pluies.

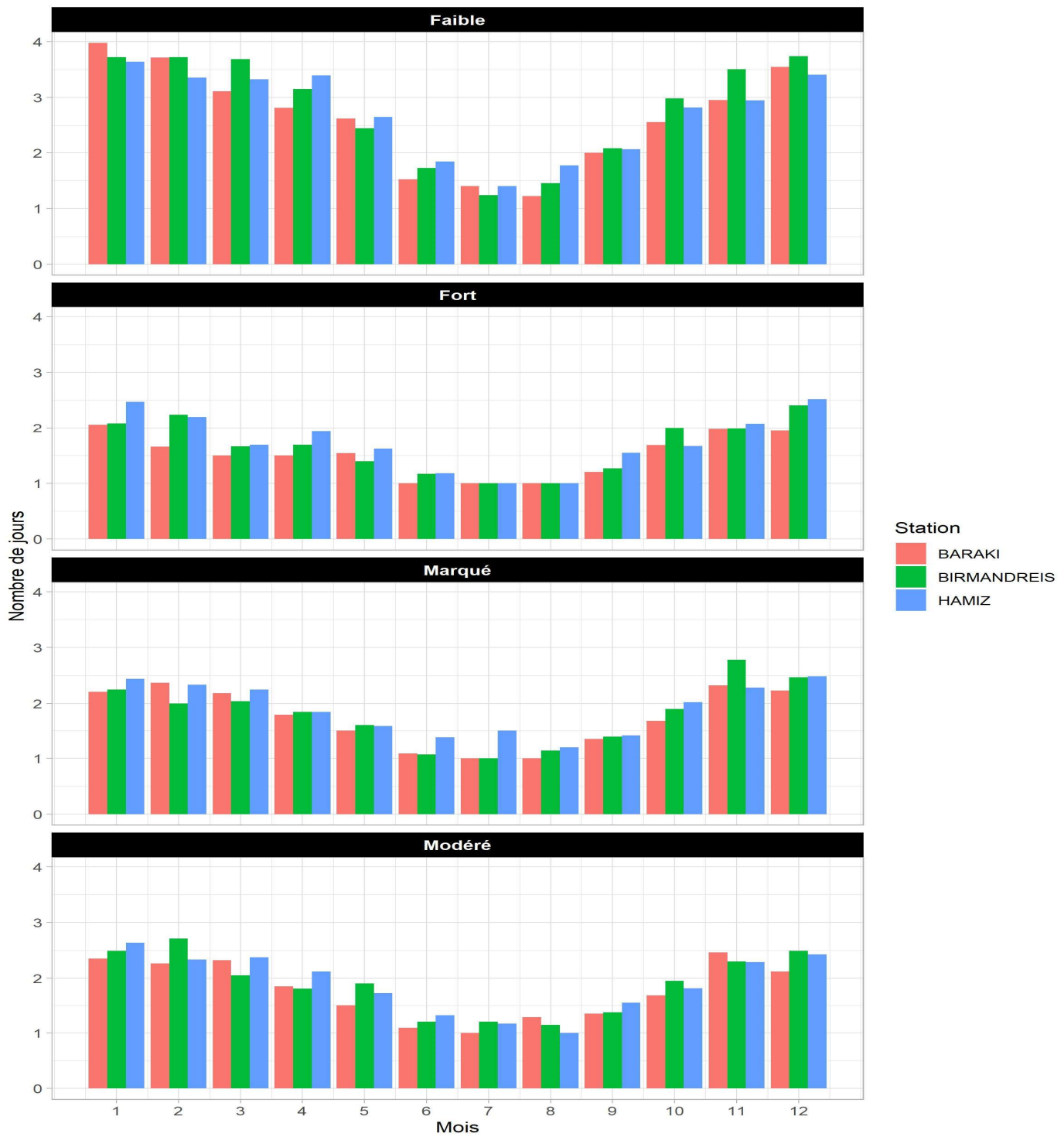
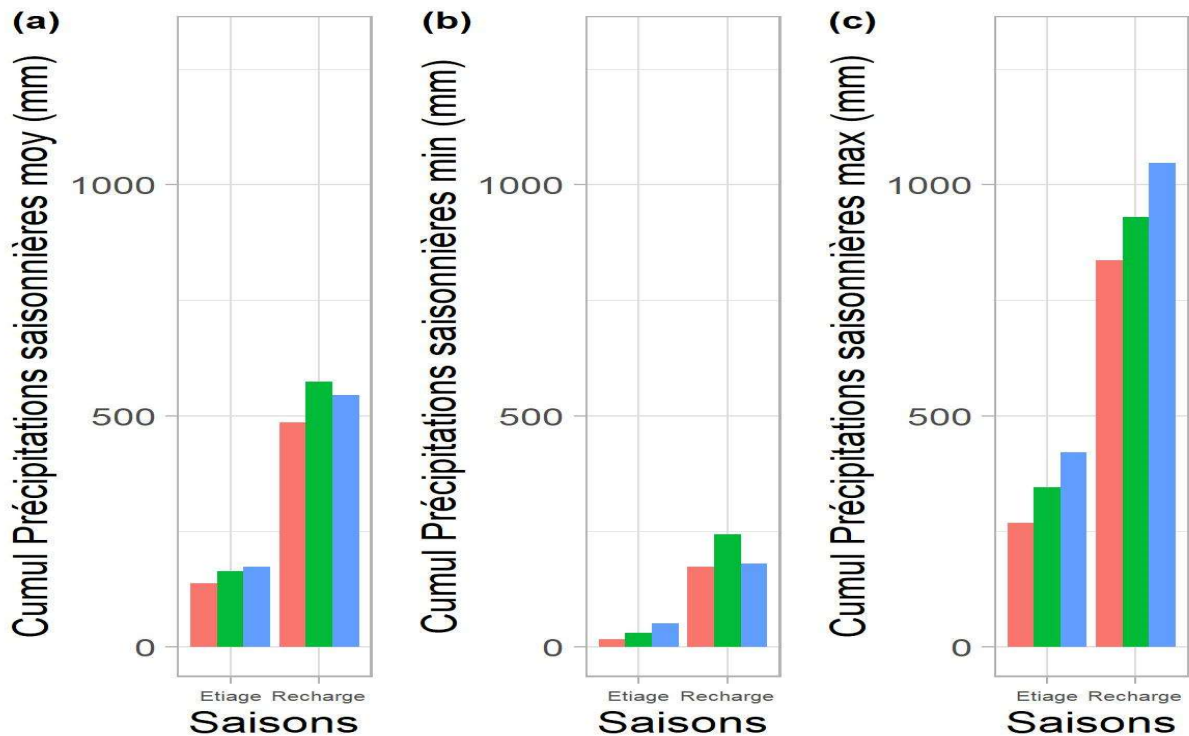


Figure 24 : Nombre de jours de précipitations par types de pluie et par mois pour les trois stations météorologiques considérées

#### 4.2.1.2 Cumuls saisonniers

La Figure 25 représente les cumuls de précipitations saisonnières moyennes, minimales et maximales durant les deux saisons hydrologiques (Recharge et Etiage) par rapport aux trois stations d'El Hamiz, Baraki et Birmandreis.



**Figure 25 : Cumuls des précipitations saisonnières moyennes, minimums et maximums aux stations d'El Hamiz (bleu), Baraki (rouge) et Birmandreis (vert)**

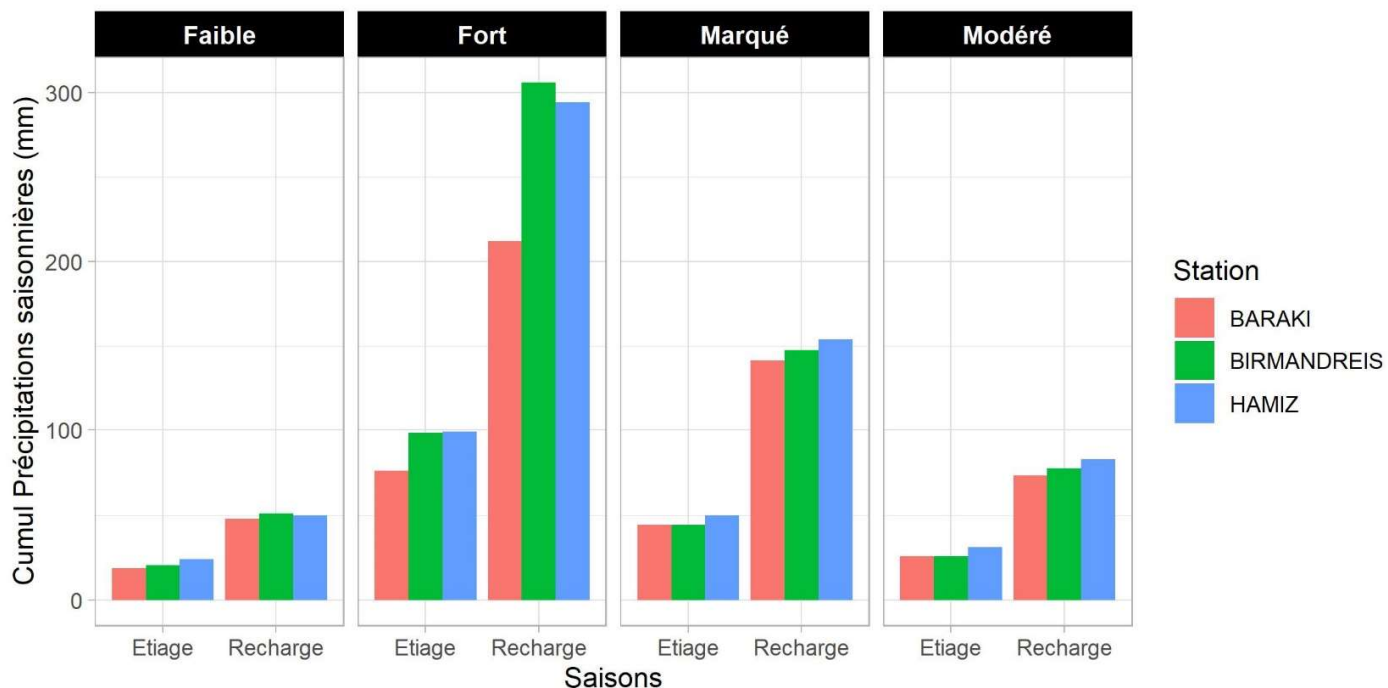
La saison d'Etiage est caractérisée par des cumuls moyens plus bas (182,4 mm) et des événements de précipitations moins intenses, tandis que la saison de Recharge présente des cumuls moyens plus élevés (576 mm) et des événements de précipitations plus intenses. En effet, la saison de recharge est une période propice à la reconstitution des réserves d'eau. Cette augmentation des précipitations peut être influencée par des facteurs tels que la migration des zones de convergence atmosphérique, la présence de systèmes frontaux actifs ou d'autres phénomènes météorologiques favorables aux précipitations. De plus, Alger étant une ville côtière cela peut également contribuer à une augmentation des cumuls de précipitations pendant cette saison.

La variation observée entre les cumuls de précipitations saisonnières minimums et maximums confirme également la variabilité du régime de précipitations dans la Région. Les

cumuls de précipitations minimums sont plus bas pendant la saison d'Étiage (19,3 mm) par rapport à la saison de Recharge (180 mm), soulignant une période de moindre activité pluvieuse. Les cumuls de précipitations maximums, quant à eux, sont plus élevés pendant la saison de Recharge (1284 mm) par rapport à la saison d'Étiage (507,8 mm), indiquant des événements de précipitations plus intenses et sporadiques pendant cette période.

#### 4.2.1.2.1 Cumuls saisonniers par type de pluie

La Figure 26 présente les cumuls saisonniers de précipitations par types de pluie pour les trois stations considérées. Les cumuls de fortes pluies sont les plus importants (300 mm pour la saison de recharge), suivis par les cumuls des pluies marquées, modérés et faibles. Cela indique une tendance générale où les épisodes de précipitations intenses sont plus significatifs en termes de cumuls par rapport aux autres types de pluie et ce pour les deux saisons (recharge et étiage).

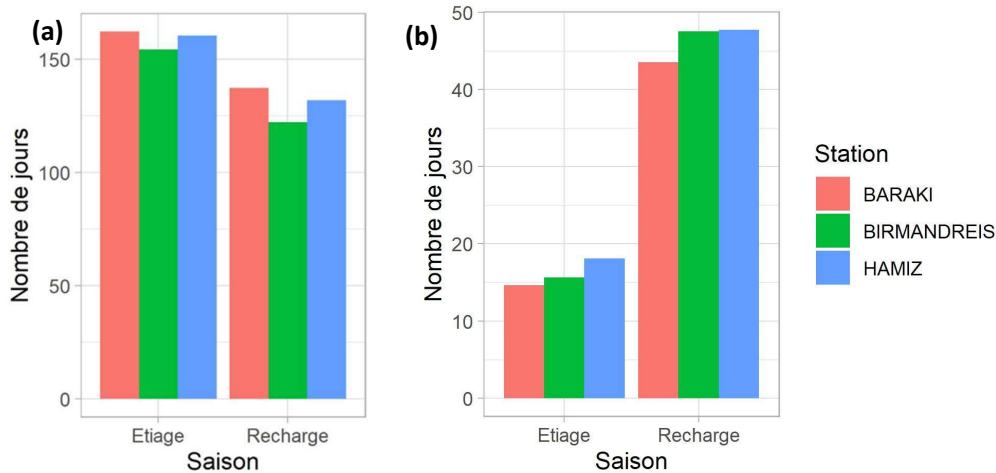


**Figure 26: Cumuls saisonniers des précipitations par types de pluie pour les trois stations considérées (El Hamiz, Baraki, Birmandreis)**

#### 4.2.1.2.2 Nombre de jours humides et secs par saisons

La Figure 27.a illustre le nombre de jours secs en fonction des saisons hydrologiques pour les trois stations considérées. La saison d'été est caractérisée par une longue période sèche

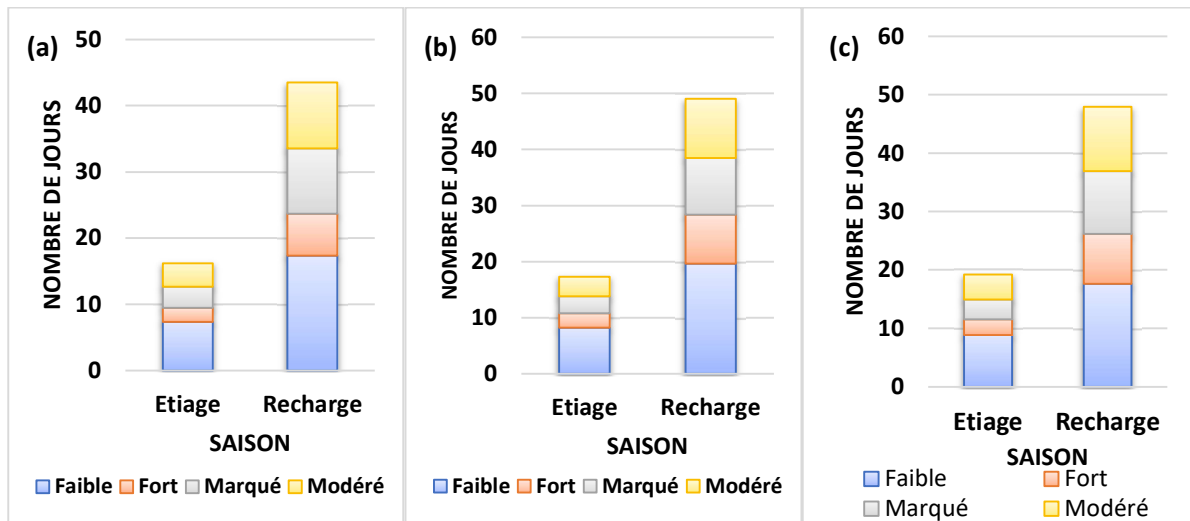
dépassant les 150 jours, alors que cette période n'excède pas les 130 jours pour la saison de recharge. En revanche, la Figure 27.b, qui représente le nombre de jours de pluie en fonction des saisons hydrologiques, montre que le nombre de jours pluvieux durant la saison de recharge s'avère être le double de celui observé pour la saison d'été (48 jours et 20 jours, respectivement). Cela s'explique par l'intensification des précipitations pendant les périodes hivernales.



**Figure 27 : Nombre de jours secs (a) et de pluie (b) en fonction des saisons hydrologiques pour les trois stations (Baraki, Birmandreis et El Hamiz)**

#### 4.2.1.2.3 Nombre de jours par types de pluie par saisons

La Figure 28 présente les nombres de jours des pluies en fonction des saisons hydrologiques pour les trois stations considérées. Le nombre de jours de faibles pluies est le plus considérable et ce pour les deux saisons. Il est en moyenne deux fois plus élevé durant la saison de recharge en comparaison avec la saison d'été (19 et 8 jours, respectivement). En revanche, pour les pluies modérées à marquées, le nombre de jours de précipitations est en moyenne de 10 pour la saison de recharge et 2 pour celle de l'été.



**Figure 28 : Nombre de jours par types de pluie et par saisons hydrologiques pour les stations météorologiques de Baraki (a), Birmandreis (b) et El Hamiz (c)**

Les fortes pluies présentent le nombre de jours le moins important (6 à 8 jours pendant la période de recharge) mais contribuent considérablement au cumul total de précipitations. Cela peut être bénéfique en favorisant la recharge des réserves d'eau, comme cela pourrait entraîner des inondations si ces jours sont concentrés sur une courte période. En revanche, pendant la saison d'étiage (d'avril à septembre), les jours de fortes pluies peuvent jouer un rôle important dans le remplissage des réservoirs d'eau de surface (par ruissellement) et même provoquer des crues soudaines.

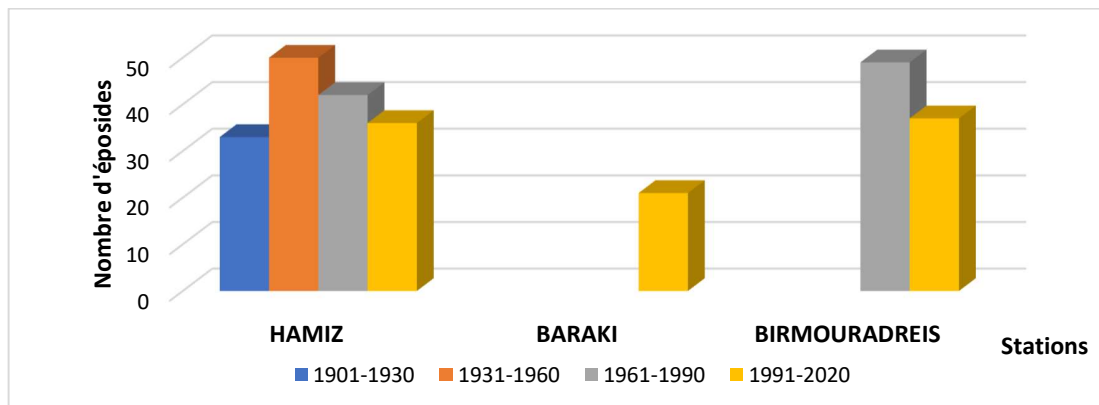
## 4.2.2 Risque d'inondation

### 4.2.2.1 Nombre d'épisodes de forte pluie

Les inondations ne se produisent pas exclusivement lors d'épisodes pluvieux intenses et de courte durée. Elles peuvent également survenir après une période prolongée de pluies continues, qui entraîne une saturation en eau du sol (AMIOT, 2021). Pour couvrir l'ensemble du risque d'inondation, les cumuls pluviométriques quotidiens supérieurs à 50 mm vont être utilisés afin de comprendre leurs tendances d'évolution et d'identifier théoriquement les pluies extrêmes en lien avec les crues rapides.

La Figure 29 illustre le nombre d'épisodes de pluies extrêmes selon les quatre dernières normales climatiques. Pour la station d'El Hamiz, qui couvre la période temporelle la plus longue,

le nombre d'épisodes varie d'une période à l'autre, avec un pic de 50 épisodes entre 1930 et 1960 (contre 30 épisodes durant la normale précédant). Cela peut indiquer une variabilité des conditions hydrologiques ou climatiques au fil du temps. A partir de 1960, le nombre d'épisodes à fortes pluies tend clairement à diminuer. Ce constat est confirmé avec la station de Birmandreis (de 49 épisodes en 1960-1990 à 37 épisodes en 1990-2020) et Baraki (20 épisodes en 1990-2020). Cela signifie que le risque d'inondation aurait dû diminué dans les périodes de 1960-1990 et 1991-2020.

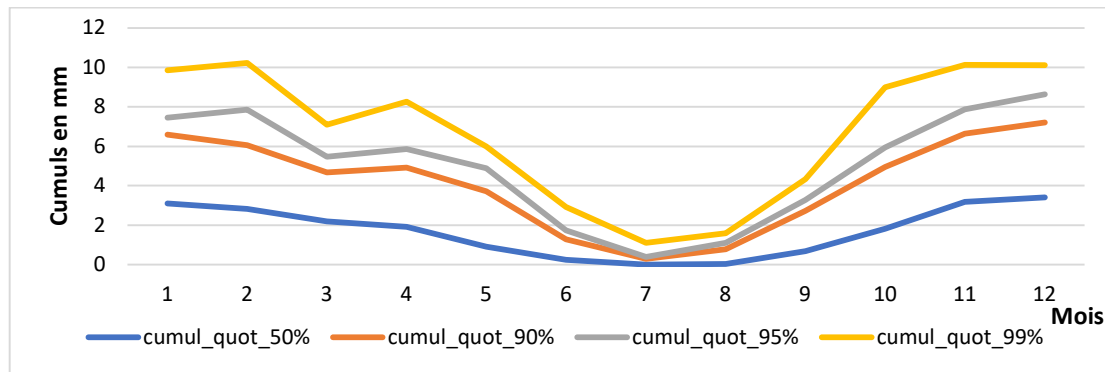


**Figure 29: Nombre d'épisodes pluvieux qui dépassent le seuil de 50 mm selon les quatre dernières normales climatiques pour les trois stations météorologiques considérées**

#### 4.2.2.2 Centiles quotidiens supérieurs

L'analyse des seuils correspondant aux centiles 50, 90, 95 et 99 des cumuls quotidiens (Figure 30) montre une tendance générale des cumuls de précipitations beaucoup plus élevée pendant les mois d'hiver et de printemps (janvier, février, mars, novembre et décembre) par rapport aux mois d'été (juin, juillet et août). Cette distribution mensuelle est cohérente avec les résultats précédant.

Les valeurs du centile 50% fournissent une estimation de la médiane des cumuls de précipitations quotidiennes. Cela indique que la moitié des mois ont des cumuls inférieurs à 4 mm. Cependant, les valeurs du centile 90%, 95% et 99% représentent les seuils de précipitations élevées. Cela suggère que la plupart des mois ont des cumuls de précipitations inférieurs à un seuil de 10 mm. Il est important de noter également un pic marqué en Avril dans le centile 99%, qui pourrait impliquer un risque d'inondation non négligeable durant ce mois.



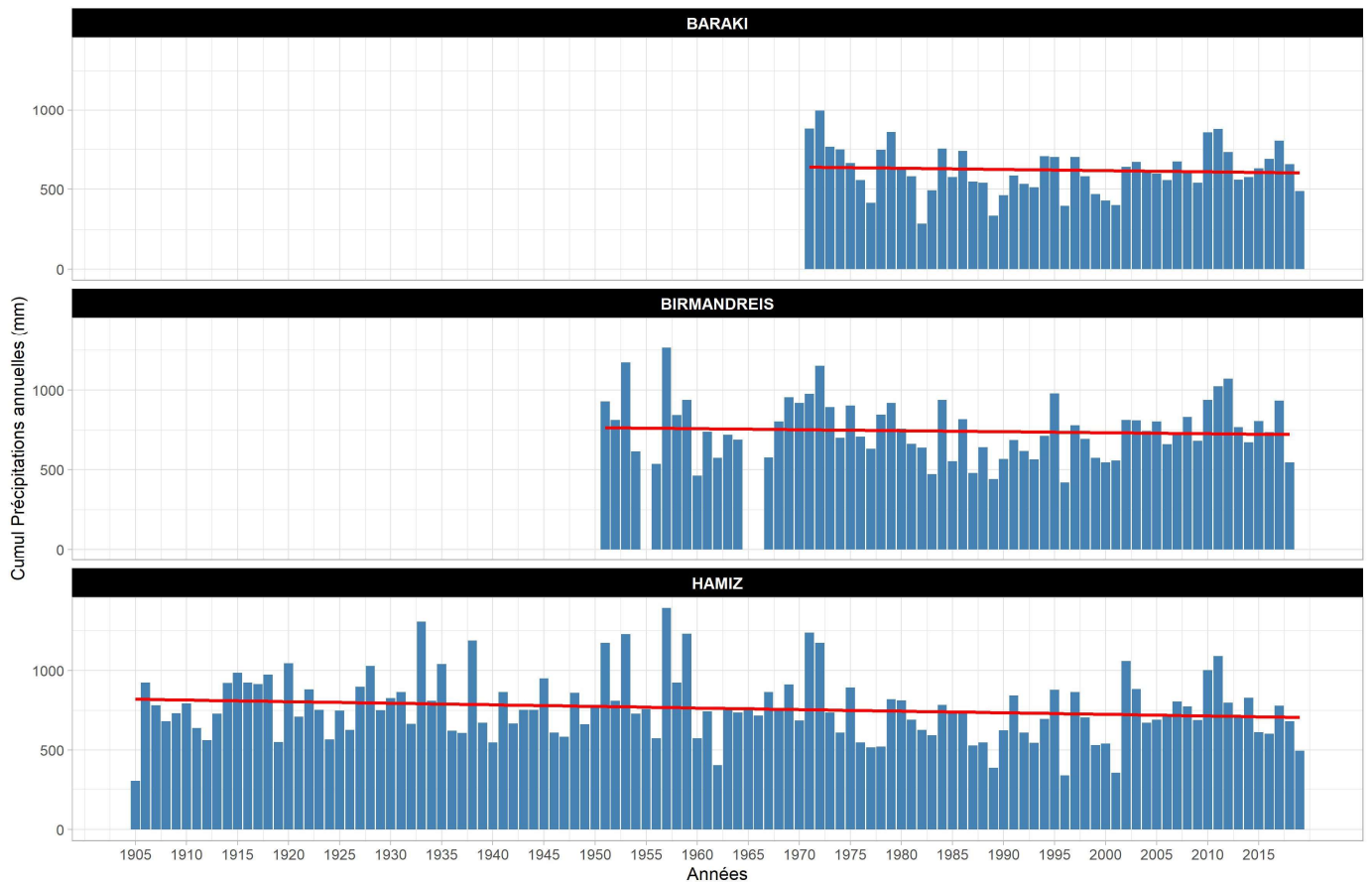
**Figure 30 : Centiles des cumuls quotidiens par mois**

### 4.2.3 Evolution du climat (étude des tendances)

#### 4.2.3.1 Cumuls annuels

La Figure 31 illustre les cumuls de précipitations annuelles au fil des années dans les trois stations météorologiques considérées (Hamiz, Baraki, Bir Mourad Rais). D'une manière générale, une légère tendance à la baisse des précipitations est observée pour la station d'El Hamiz (de 800 à 700mm) et Baraki, associée à une certaine stabilité à légère hausse pour la station de Birmandreis. Néanmoins, l'évolution du cumul est marquée par une importante variabilité interannuelle.

Pour la station d'El Hamiz, une première observation montre une tendance générale à la hausse des précipitations jusqu'aux années 1970, suivi d'une période de diminution. Cette baisse peut avoir des implications sur le climat local et les ressources en eau disponibles. La tendance à la baisse peut être expliquée par des cumuls annuels minimums de plus en plus bas qui sont passés d'une moyenne de 600 mm/an avant les années 1970 à 300mm/an (pour toutes les stations), soit une diminution de la moitié. De plus, les cumuls maximums atteignaient ou dépassaient les 1250 mm/an avant les années 1970. Depuis, ça dépasse rarement les 1000 mm/an.



**Figure 31: Cumuls de précipitations annuelles dans les trois stations météorologiques**

Cette évolution peut être justifiée par les changements climatiques à long terme qui peuvent avoir un impact sur les schémas de précipitations, entraînant une diminution générale des quantités observées. De plus, des variations saisonnières telles que des hivers plus secs ou des étés plus arides contribuent également à cette tendance à la baisse.

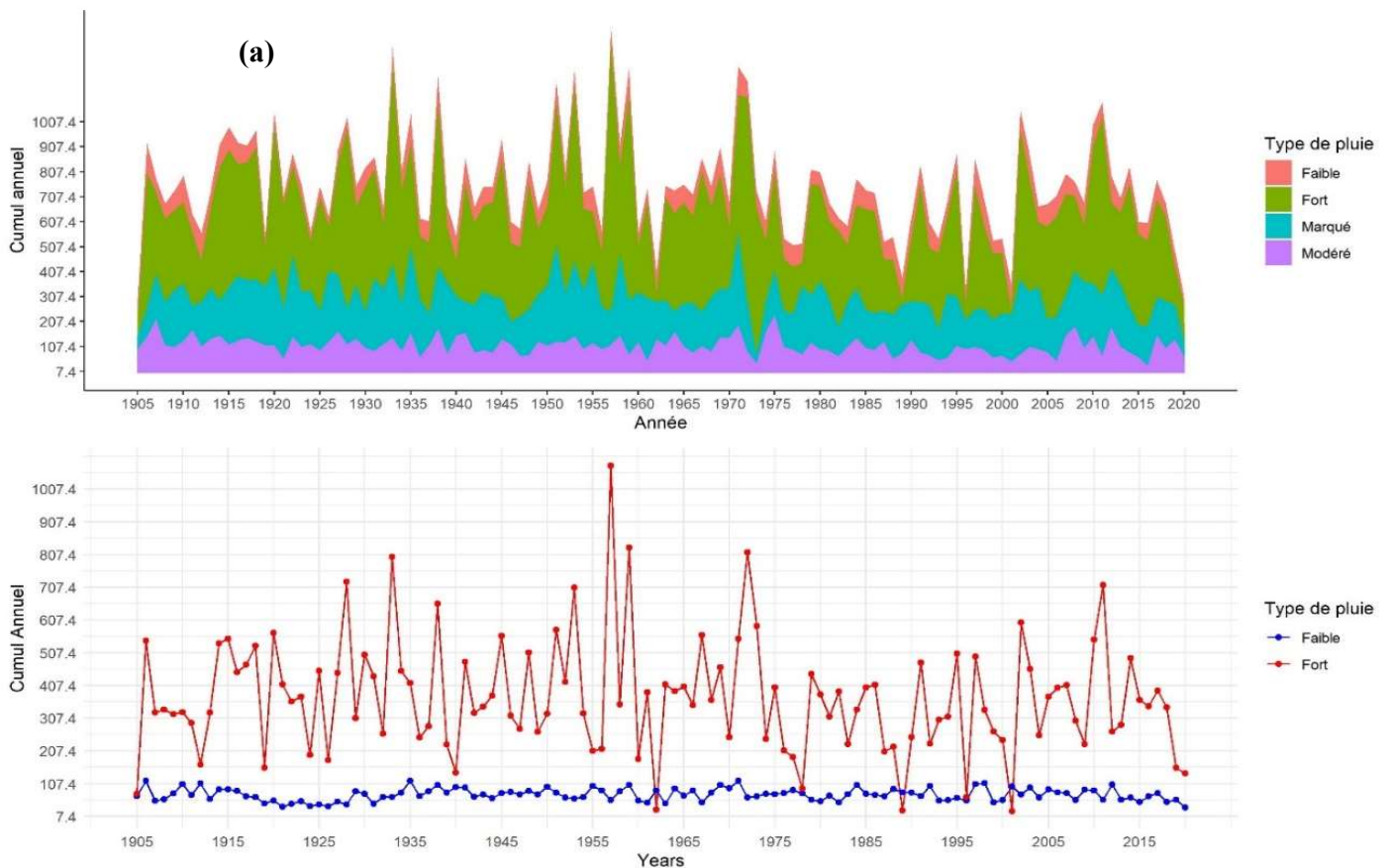
Pour résumer, les années où les faibles pluies dominent sont : 1905, 1996, 2001 et 2020. Les années où les fortes pluies sont prédominantes sont : 1933, 1938, 1951, 1957, 1959, 1971, 1972. Ces années présentent des cumuls de précipitations dépassant le seuil de 1000 mm.

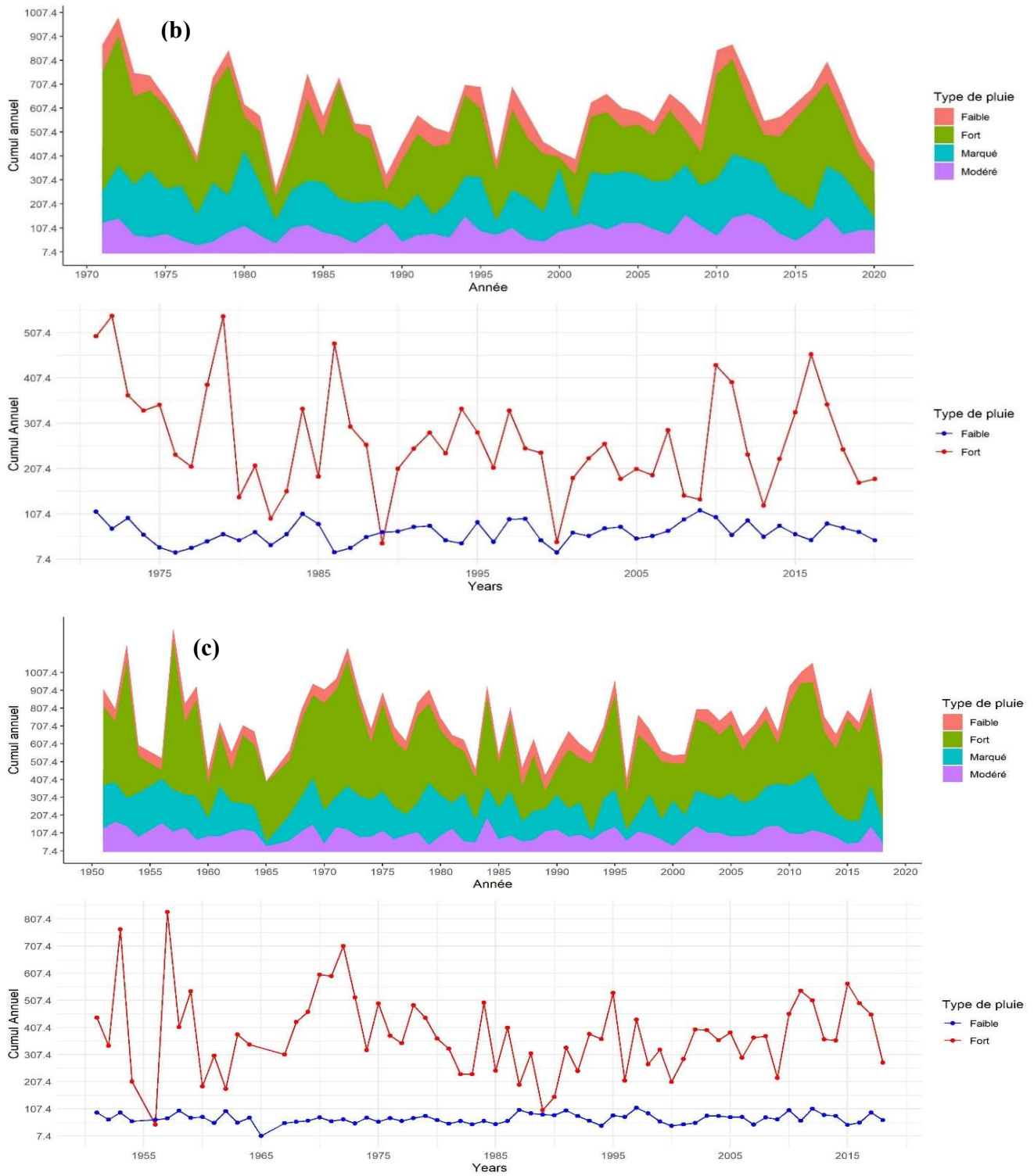
#### 4.2.3.1.1 Cumuls annuels par types de pluie

La Figure 32 présente le suivi annuel du cumul de précipitation par types de pluie pour les trois stations considérées. Les cumuls annuels supérieurs à 1000 mm sont plus fréquents dans la

période entre 1933-1974 pour la station d'El HAMIZ et en 1956 et 1973 pour Birmandreis. En ce qui concerne BARAKI, les pics les plus remarquables sont au début et à la fin de la série entre les périodes de 1971-1980 et 2010-2020. Cette évolution temporelle semble assez liée avec celle du cumul des fortes pluies. Ce cumul est situé en moyenne autour de 250 mm, mais varie de 50 à 550 mm pour BARAKI par exemple. Pendant ces périodes, des pics de cumul annuel de fortes pluies  $\geq 350$  mm s'observent davantage. Parallèlement, le cumul des pluies faibles est lui relativement stable et présente une variabilité interannuelle moins importante.

La courbe des précipitations marquées présente une variabilité plus importante, plus irrégulière et sporadique par rapport aux précipitations faibles. La courbe des précipitations modérées montre des cumuls annuels relativement stables, mais à des niveaux légèrement supérieurs à ceux des précipitations faibles. Cela suggère que les précipitations modérées sont plus régulières que les précipitations fortes et marquées, mais qu'elles contribuent tout de même à des cumuls annuels plus élevés.



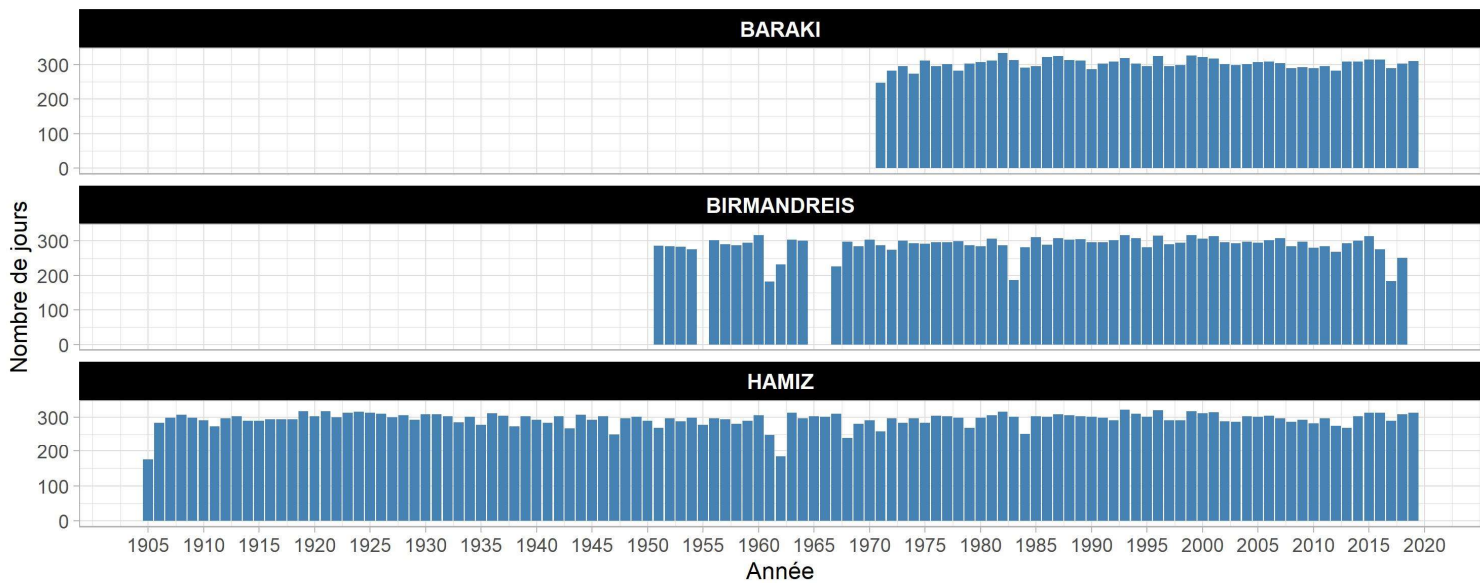


**Figure 32 : Suivi annuel du cumul de précipitations par types de pluie pour les stations d'El Hamiz (a), Baraki (b) et Birmandreïs (c)**

#### 4.2.3.1.2 Nombre de jours humides et secs par an

La Figure 33 illustre l'évolution du nombre de jours de précipitations par an sur une période prolongée (1905-2020) dans les trois stations : Baraki, El Hamiz et Birmandreis. Le nombre de jours de pluie varie entre 30 et 100 jours par an, soit entre 8,2% et 27,4% des jours de l'année. Une grande fluctuation interannuelle est observée avec des périodes plus pluvieuses que d'autres. Les années et les mois présentant des précipitations moyennes élevées représentent les périodes où le bassin versant est le plus susceptible d'être touché par des inondations. Les jours de précipitations ont atteint leur valeur maximale aux années : 1905, 1938, 1950, 1970 et 2012 (> 80 jours).

Le nombre de jours secs est en moyenne proche des 300 jours par an, soit 82% des jours de l'année. Une nette augmentation est observée à partir de 2012. Cette tendance pourrait être la conséquence du changement climatique, qui exerce un contrôle sur les quantités et les périodes de précipitations moyennes, en particulier dans la région méditerranéenne : les sécheresses deviendront de plus en plus fréquentes et intenses<sup>27</sup>.



**Figure 33: Evolution du nombre de jours secs de 1905 à 2020 pour les stations considérées**

<sup>27</sup> <https://www.ecologie.gouv.fr>

#### 4.2.3.1.3 Nombre de jours par types de pluie par an

La Figure 34 représente le jours de précipitations des différents types de pluies observés sur la période allant de 1905 à 2020 pour les trois stations météorologiques considérées.

Le nombre de jours de pluies faibles est le plus important avec un nombre de jours égale ou dépassant les 40 jours. Ceci est particulièrement visible au cours des années 1905, 1955, 1990, 1998 et 2009. Le nombre de jours de précipitations marquées et modérées sont du même ordre et ne dépassent pas les 30, 25 et 20 jours pour les stations d'El Hamiz, Birmandreis et Baraki, respectivement.

Le nombre de jours de forte pluie est le plus faible avec un maximum entre 15 et 20 jours, en fonction des stations. Les années présentant ces maximas sont 1921, 1926, 1956, 1965 et 2010 pour la station d'El Hamiz, 1953, 1965, 2010 et 2014 pour la station de Birmandreis et enfin, en 1964 et 1967 à Baraki. Néanmoins, ces jours jouent un rôle prépondérant dans les précipitations annuelles cumulées puisqu'ils sont caractérisés par des précipitations intenses malgré leur courte durée (Figure 32). Les inondations sont généralement déclenchées par des précipitations intenses concentrées dans la région touchée ou dans une zone en amont d'un cours d'eau qui entraîne une crue et provoque des inondations en aval.



**Figure 34: Nombre de jours par types de pluies de 1905 à 2005 pour les trois stations météorologiques : El Hamiz, Baraki et Birmandreis**

#### 4.2.3.2 SPI

D’après la Figure 35, le SPI mensuel des trois stations présente une majorité de périodes « normales » (SPI entre -0,99 et 0,99) », principalement pendant les mois d’été (Juin, Juillet, Août ainsi que Septembre). Les mois très Humides (SPI= 1,5 à 2) sont principalement identifiés d’Octobre à Mars pendant l’hiver, mais peuvent aussi survenir au printemps lors des mois d’Avril et de Mai. Les mois humides (SPI= 1 à 1,5) interviennent en saison de recharge et en parallèle avec les mois très humides. Le SPI dépasse plusieurs fois le seuil de mois extrêmement humides (SPI $\geq$ 2), qui sont souvent synonyme d’inondations dans la région. Les mois extrêmement humides consécutifs sont relativement moins fréquents. On peut citer Janvier 1933/1934, Janvier 1970 et Janvier 2017, ce qui confirme notre cas d’étude d’inondation survenue le (25/01/2017) dans la région. D’autres mois se démarquent également tels que Février 1974 et 2010, l’hiver 1956

(Octobre-Novembre-Décembre), l'hiver 2000-2001, l'hiver 2013-2014 et plus récemment le mois de Décembre 2015. Ces résultats sont en adéquation avec ceux de NOUACEUR et al. (2013) qui ont observé une plus grande fréquence des événements extrêmes entre 2003 et 2012.

La Figure 36, qui illustre l'évolution de l'indice centré réduit (SPI) en fonction des saisons météorologiques, révèle des tendances intéressantes. Pendant les hivers, une prédominance de périodes extrêmement humides est observée aux alentours des années 1970-1972, vers 2010 et également en 2015. De plus, la période de 1971-1974 est caractérisée par une humidité élevée (très humide), tandis que les périodes sèches sont très rares. En revanche, durant l'été, une dominance de sécheresse est observée, avec seulement quelques périodes normales et très peu de périodes humides. Ces observations ont des implications importantes, notamment en hiver où les inondations sont abondantes. Les périodes extrêmement humides peuvent être considérées comme des indicateurs prédictifs des risques accrus d'inondations.

L'automne est principalement marqué par des périodes normales, ce qui indique une stabilité relative des conditions climatiques. Cependant, quelques fluctuations humides sont observées au cours de cette saison, bien que les événements extrêmes soient rares. Cette période de transition entre l'été et l'hiver nécessite une surveillance attentive pour détecter d'éventuels changements brusques dans les conditions météorologiques. Quant au printemps, il est caractérisé par une prédominance de périodes normales, avec des conditions climatiques relativement stables et favorables. On observe également quelques fluctuations humides, bien que les périodes sèches soient peu fréquentes.

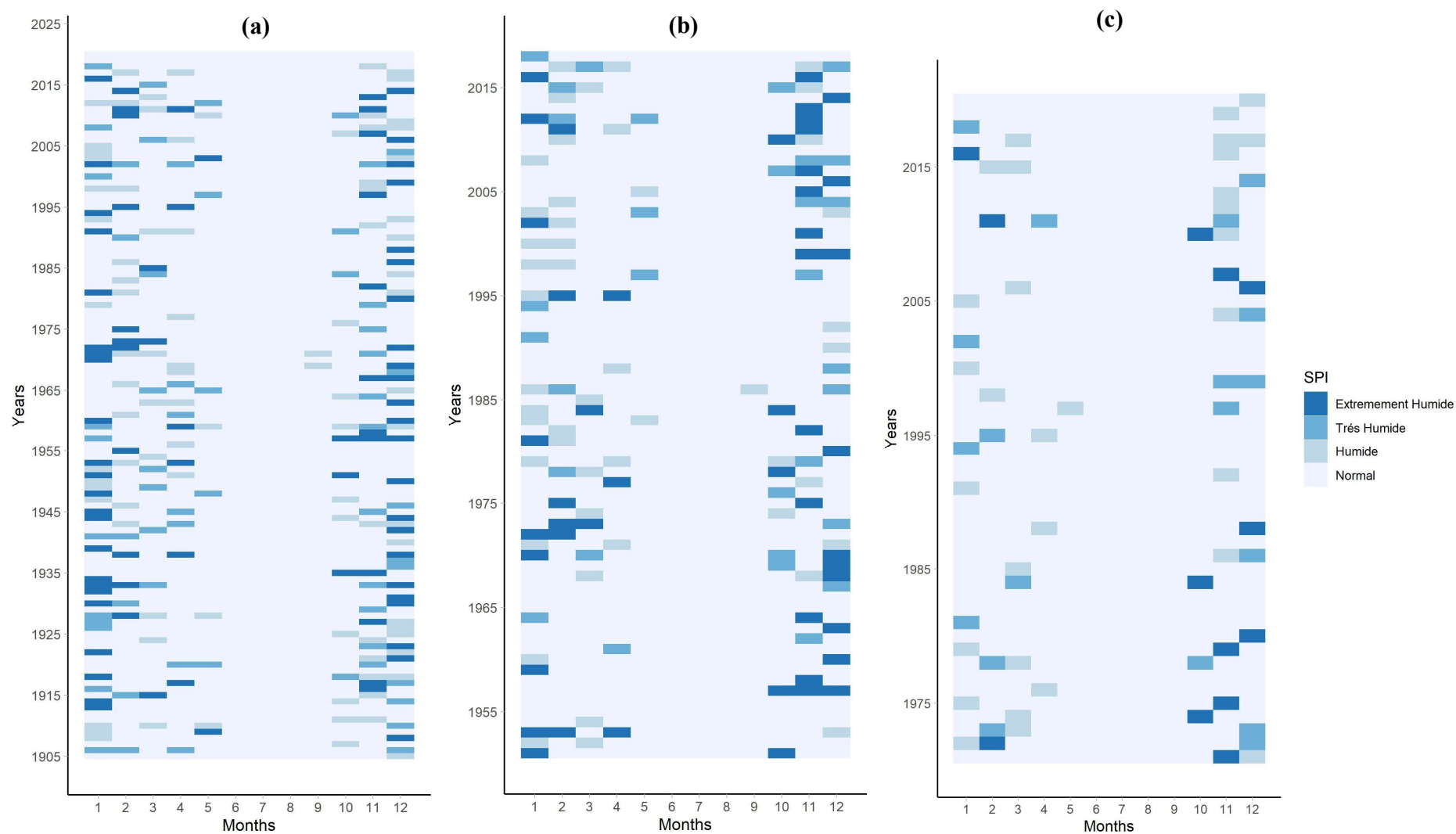
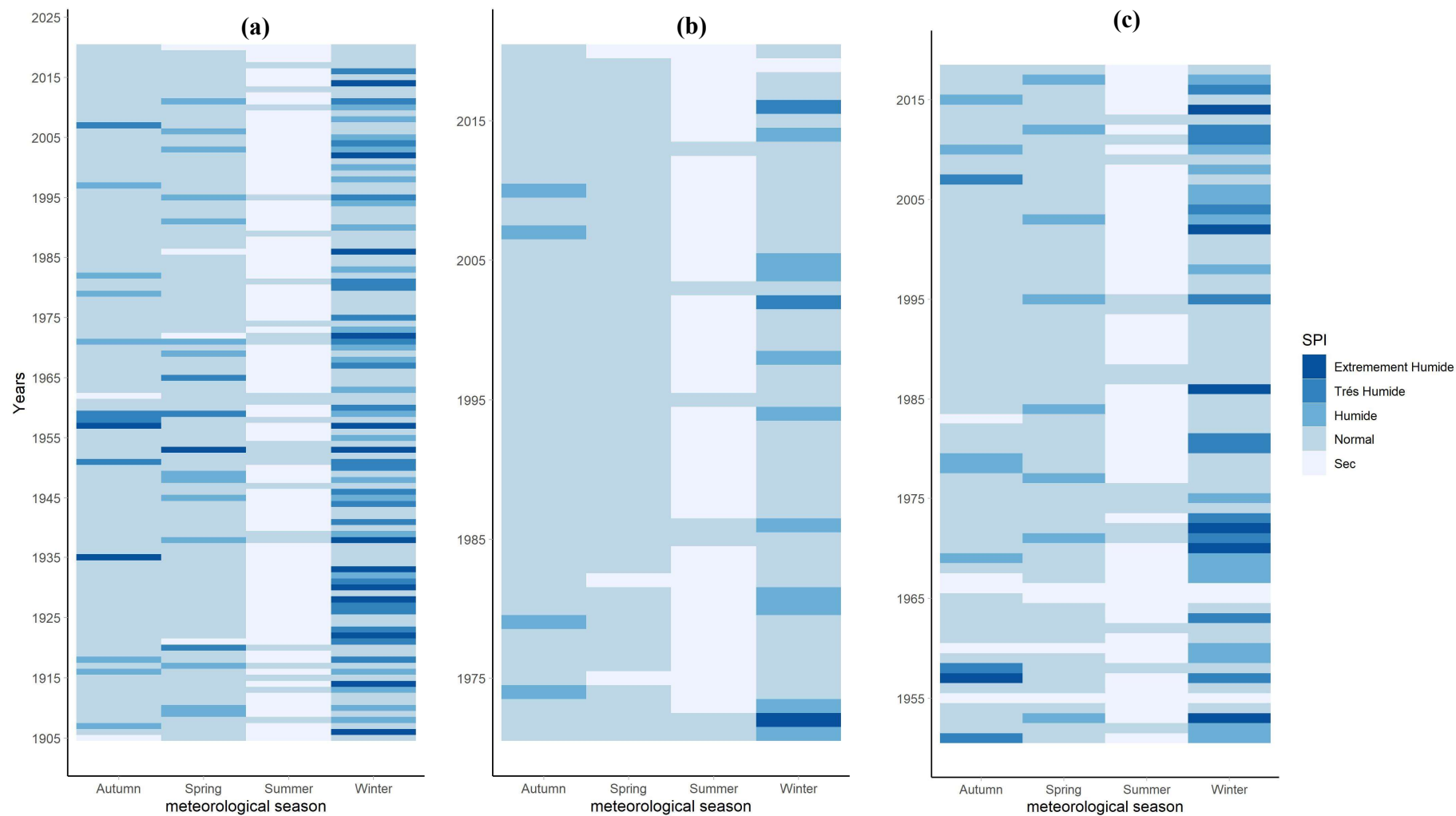


Figure 35 : Représentation en Damier du SPI Mensuel pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c)

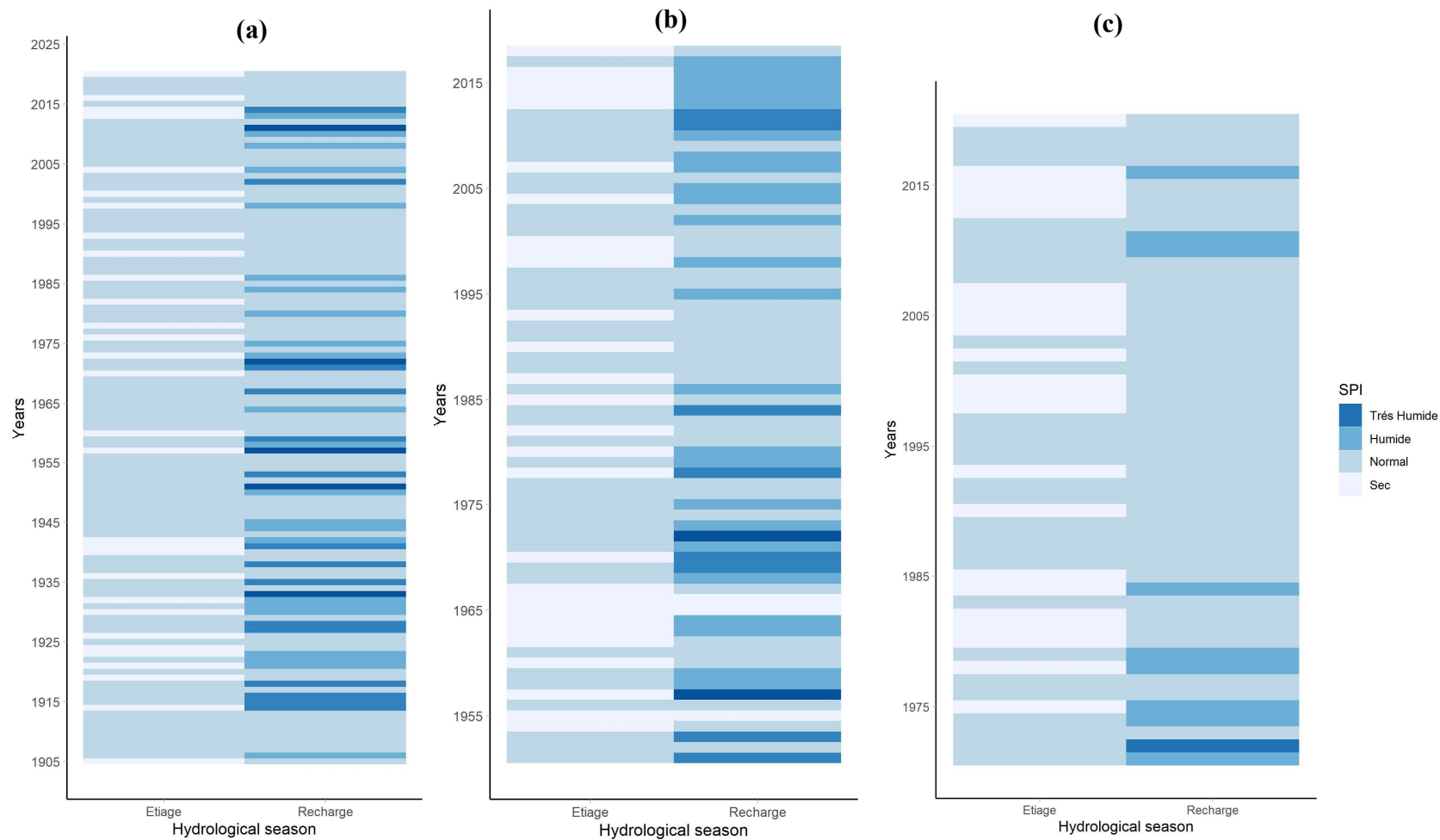


**Figure 36: Représentation en damier du SPI des saisons météorologiques pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c)**

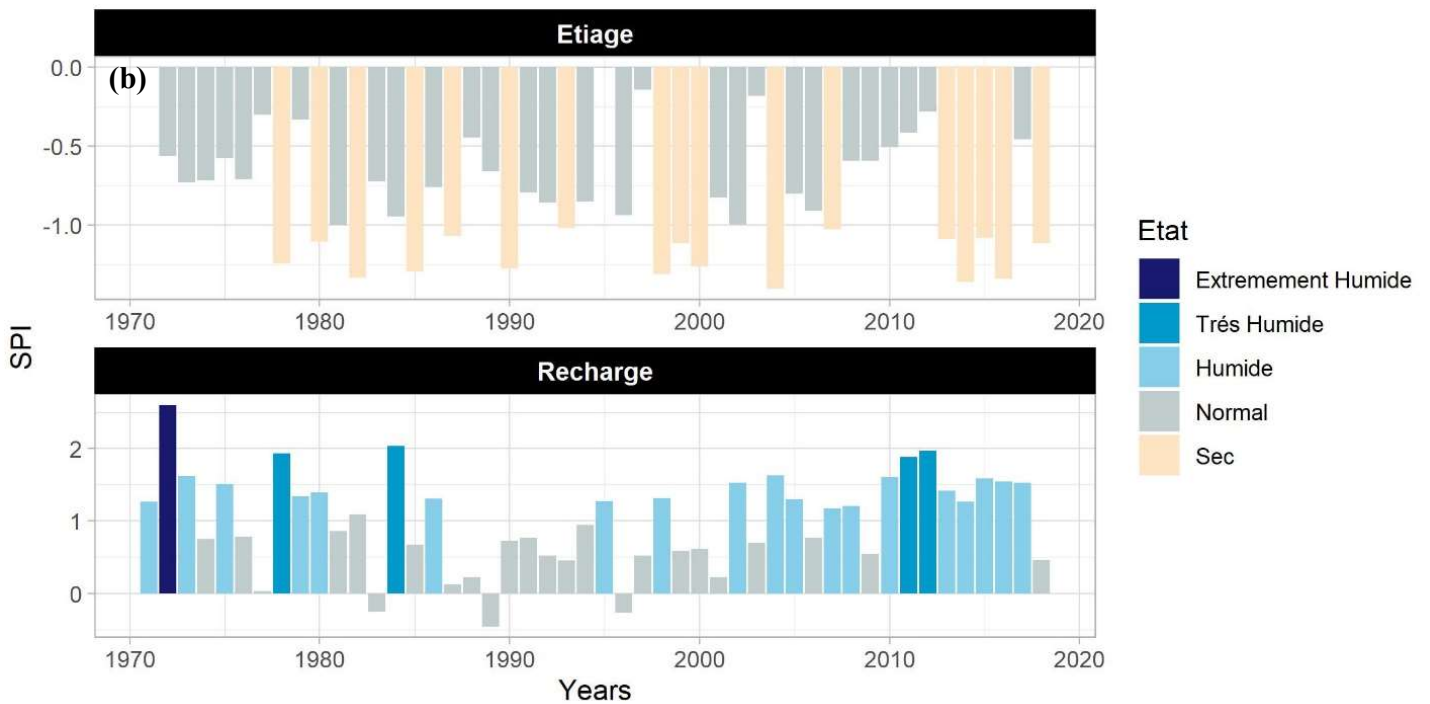
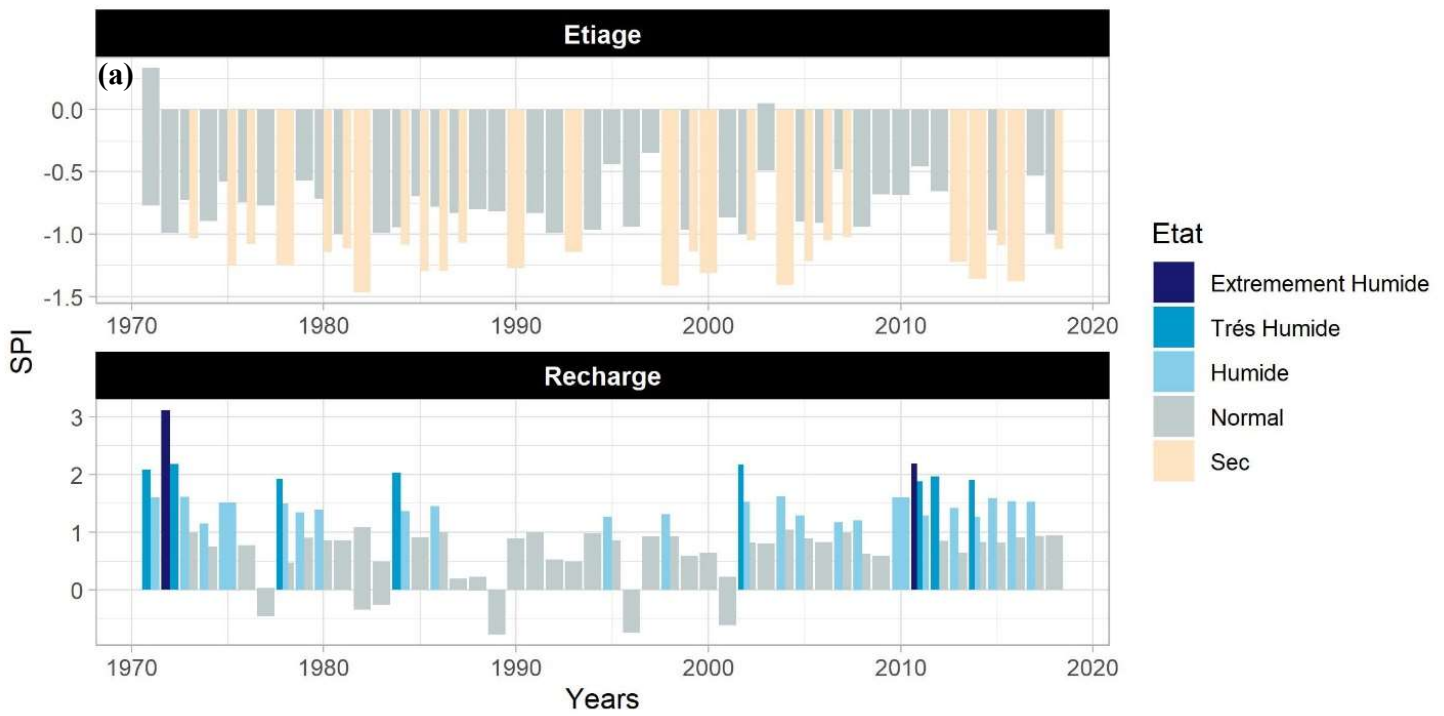
La Figure 37, la Figure 38 et la Figure 39 illustrent l'évolution de l'indice centré réduit (SPI) en fonction des saisons hydrologiques. Une importante variabilité interannuelle du SPI pour les deux saisons hydrologiques étudiées est observée.

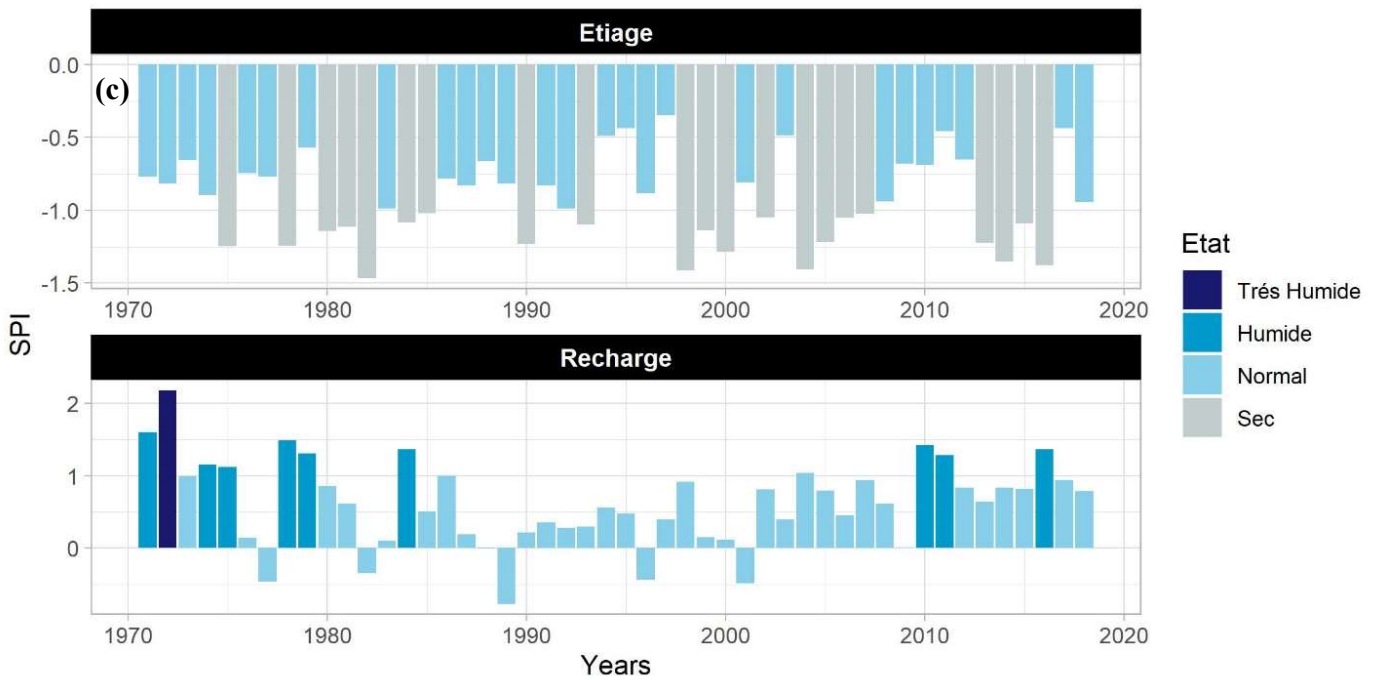
Au cours de la période de recharge, qui s'étend d'octobre à mars, une alternance entre périodes extrêmement humides, très humides, humides et normales est observée. Les périodes extrêmement humides sont décelées notamment au cours des années 2010 et 1971, ainsi que dans les années 1960 et 1984 (SPI = 2). Cette période de Recharge est également caractérisée par des années très humides comme en 2010, de 2002 à 2005 ce qui est conforme avec les résultats de la Figure 31 et les résultats de (NOUACEUR et al., 2013b). Ces observations indiquent une variabilité importante des précipitations, avec des périodes de fortes pluies de courte durée et des périodes de précipitations normales. Ces périodes normales contribuent à maintenir un équilibre hydrologique stable. C'est notamment le cas des années 90.

Les SPI présentent une certaine tendance où, dans les années 70 et 80, le SPI était élevé, puis a diminué dans les années 90 et 2000, pour augmenter à nouveau ces dernières décennies à partir de 2010 (Figure 37). Cependant, à partir de l'année 1972, une nette diminution des périodes extrêmement humides dans la saison de recharge et une augmentation des périodes de sécheresse dans la saison d'étiage est visible, pour les trois stations (Figure 37, Figure 38, Figure 39). Avant cette année, des pics de SPI supérieurs à 3 ont été observés. Au cours des années 2000 et de la dernière décennie, la tendance à la sécheresse est devenue de plus en plus évidente (SPI= 1,5), tel que confirmé par les résultats de TAIBI (2011), ce qui traduit un déficit important des totaux pluviométriques. Des années particulièrement sèches se démarquent, notamment en 1982, 2004 et 2016, sur l'ensemble des stations étudiées Cette augmentation de la sécheresse contribue à accroître le risque d'inondations lors des épisodes de précipitations intenses. Lorsque le sol est très sec en raison de la saison d'étiage prolongée, il a du mal à absorber rapidement les fortes pluies, entraînant un ruissellement accru et des risques accrus d'inondations.

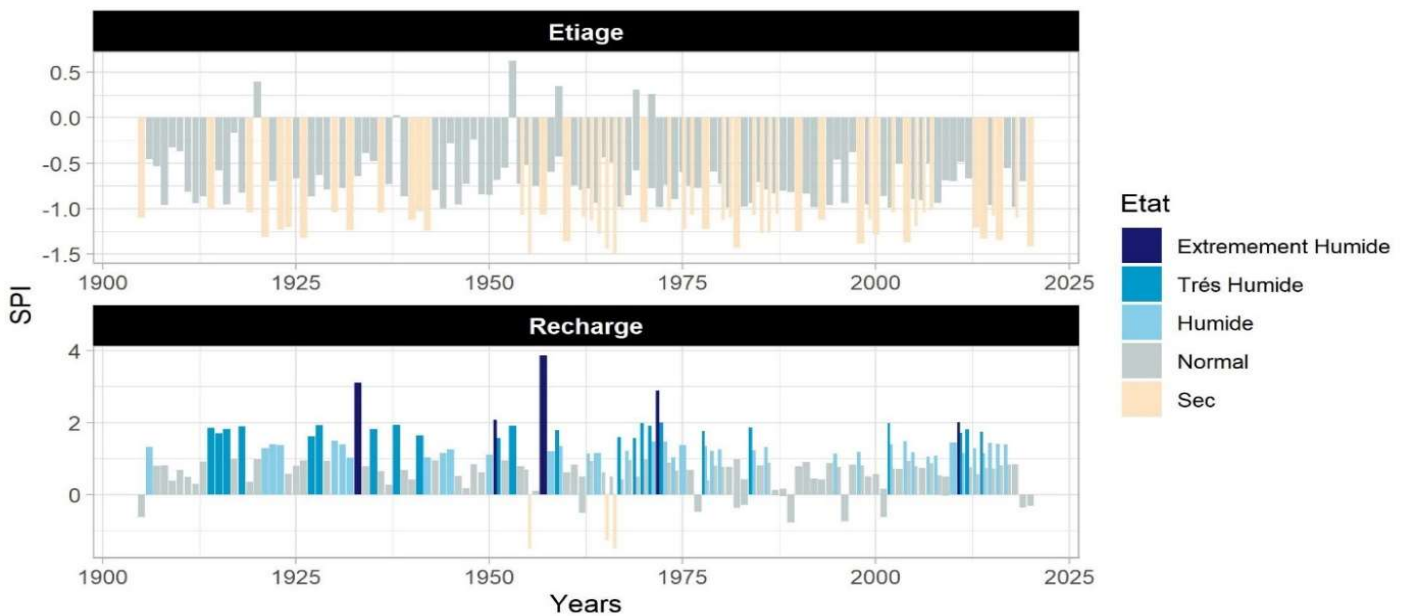


**Figure 37: Représentation en damier du SPI des saisons hydrologiques pour les trois stations : El Hamiz (a), Birmandreis (b) et Baraki (c)**





**Figure 38: Le SPI par saisons Hydrologiques pour les trois stations considérées sur la période de référence (1971-2018) : (a) El Hamiz, (b) Birmandreis, (c) Baraki**

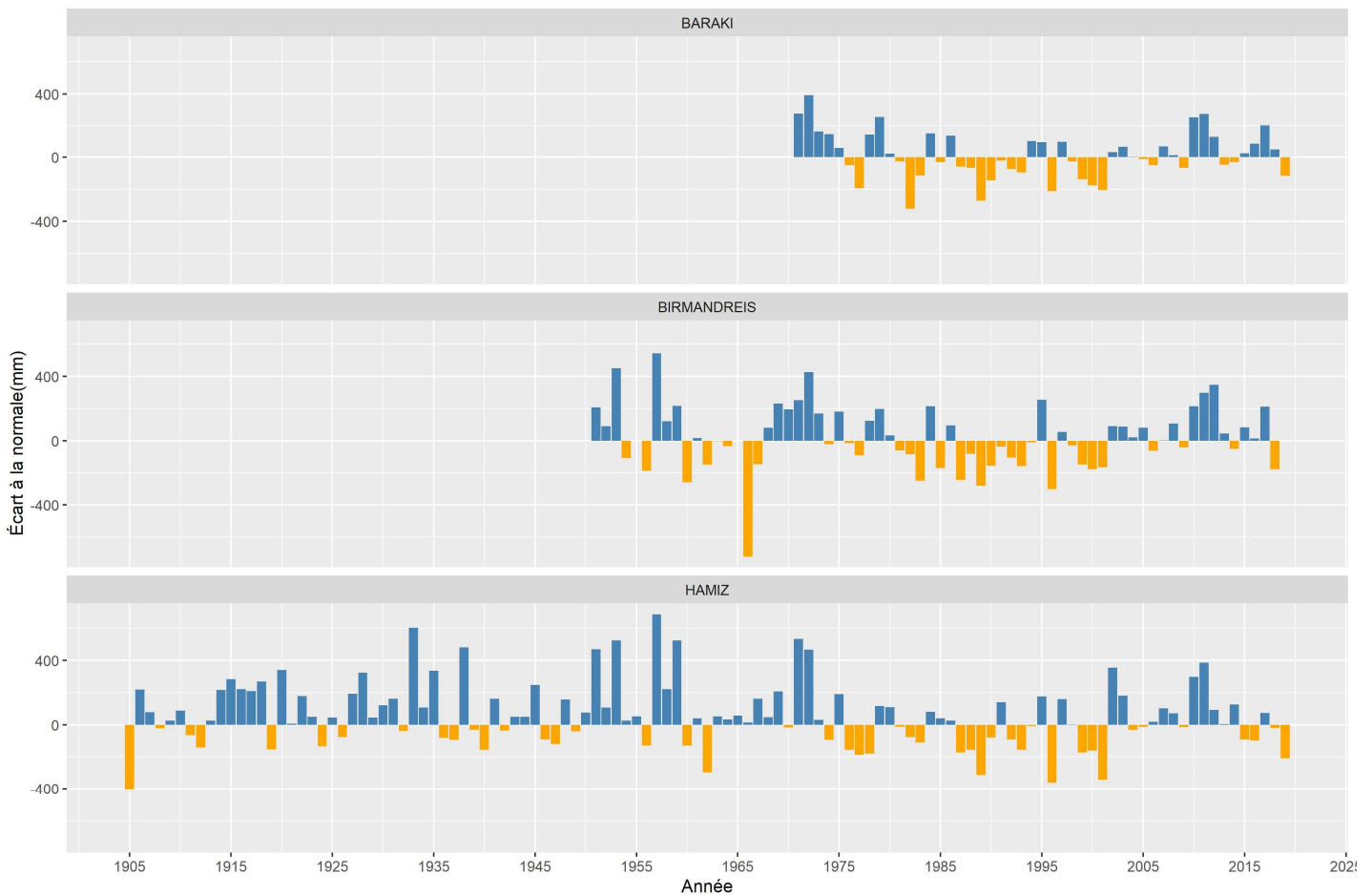


**Figure 39: Le SPI par saisons Hydrologiques pour la station d'El Hamiz durant la période de référence 1905-2020**

#### 4.2.3.3 Evolution des cumuls annuels par rapport à la normale

La Figure 40 montre l'écart à la normale des cumuls annuels de pluie. Ces derniers ne montrent pas de tendance nette. Toutefois, avant 1975, il semblerait que les années « Humides » soient plus fréquentes et plus marquées avec un pic maximal de +650 mm (en bleu) par rapport à la normale, sauf pour la station de Birmandreis qui présente des pics négatifs qui dépassent les -600 mm. La période entre 1975 et 2003 est caractérisée par des années sèches (en orange). Cependant, à partir de 2003 jusqu'en 2017, un retour marqué des années humides est enregistré, marquant ainsi une rupture avec la période précédente, ce qui est en accord avec les résultats de NOUACEUR et al. (2013). Les pluies de 2008/2010 ont généreusement réalimenté les nappes phréatiques superficielles et contribué aux inondations enregistrées durant cette période. Au cours des dernières décennies, un nouveau changement de tendance est observé avec un retour aux conditions sèches.

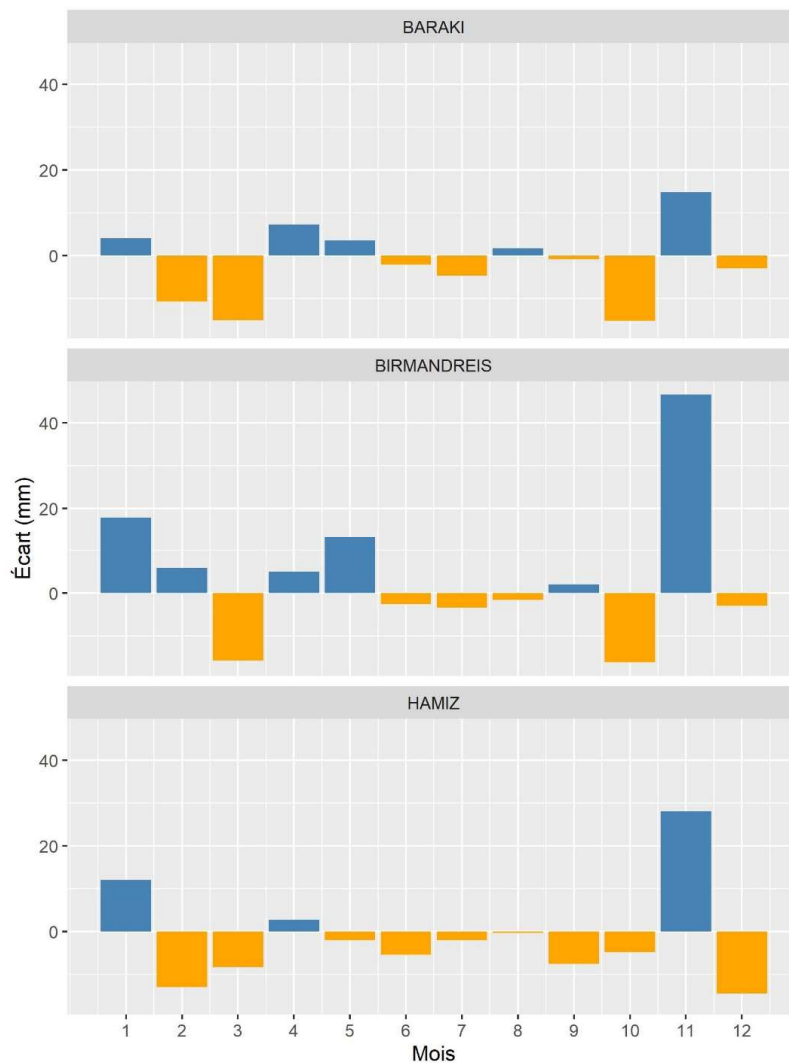
De plus, à partir de 1975, on observe une variation cyclique entre les périodes sèches et humides. Ces fluctuations régulières suggèrent l'existence d'un schéma récurant dans le régime pluviométrique des stations étudiées. Les années sèches et les années humides semblent se succéder dans un cycle relativement constant, bien que la durée et l'intensité de chaque phase puissent varier. Cette variabilité cyclique peut être influencée par plusieurs facteurs, tels que les oscillations océaniques (NAO), les systèmes atmosphériques régionaux. A titre indicatif, dans la partie occidentale de l'Algérie, les précipitations enregistrées depuis 1930 montrent de nombreuses années déficitaires pendant la décennie 40, puis sur l'ensemble des décennies 80 et 90 (MEDDI et TALIA, 2009).



**Figure 40 : Ecart à la normale des cumuls annuels de pluie pour les trois stations considérées**

#### 4.2.3.4 Evolution des cumuls mensuels entre les deux dernières normales

La Figure 41 montre l'écart des cumuls mensuels entre deux périodes : la normale de 1961-1990 et la normale de 1991-2020. Les mois d'été (juin, juillet, août) sont relativement plus secs durant la dernière normale (1991-2020). Les mois de Septembre, Octobre, Décembre, Février et Mars présentent des écarts négatifs plus importants (près de -18mm) avec des valeurs différentes en fonction de la station. Les mois d'hiver, plus particulièrement Janvier et Février, sont plus humides durant la dernière normale en comparaison avec celle de 1961-1990. C'est également le cas des mois d'Avril et Mai (printemps). Le mois ayant gagné le plus en pluviométrie est celui de Novembre avec un pic qui dépasse les 40 mm, particulièrement à la station de Birmandreis.



**Figure 41 : Evolution des cumuls mensuels moyens dans les trois stations considérées entre les périodes 1961-1990 et 1991-2020**

#### 4.2.3.5 Evolution de la normale climatique

La Figure 42 représente la variation de la normale annuelle qui correspond aux moyennes de pluviométrie chaque 30 ans dans les stations d’El Hamiz, Baraki et Birmandreis.

Dans la station d’El Hamiz, qui compte la série temporelle la plus longue, la pluviométrie moyenne semble varier d’une période à l’autre. On observe une légère augmentation de la moyenne entre les normales de 1901-1930 et de 1931-1960 (de 778,07 mm à 838,78 mm), puis une diminution notable entre les deux normales suivantes (714,08 mm en 1961-1990 et 698,95 mm en

1991-2020). Ces variations pourraient refléter les oscillations océaniques, les cycles atmosphériques, les changements climatiques ainsi que les modifications du cycle de l'eau dues à l'urbanisation.

Contrairement à la station d'El Hamiz, la station de Birmandreis a enregistré une augmentation des cumuls annuels moyens entre la normale de 1961-1990 et celle de 1991-2020 (de 690,9 mm à 740,5 mm).

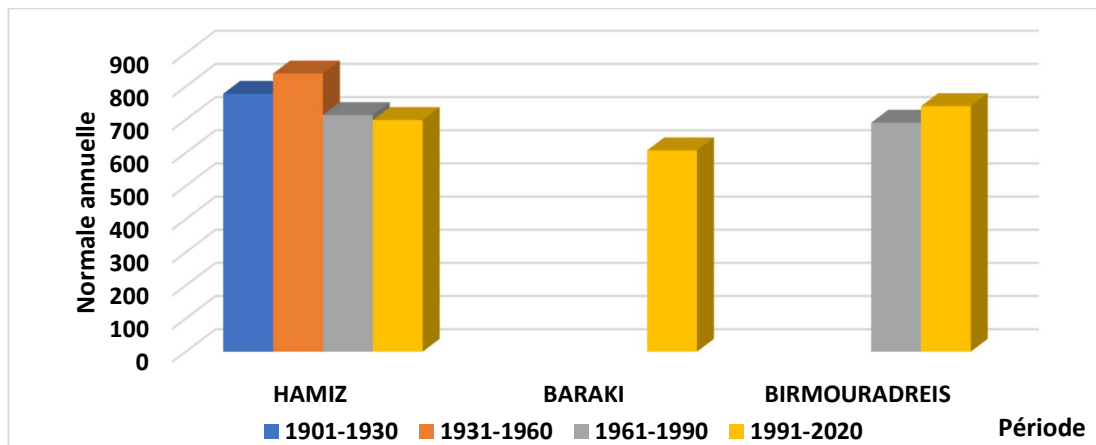
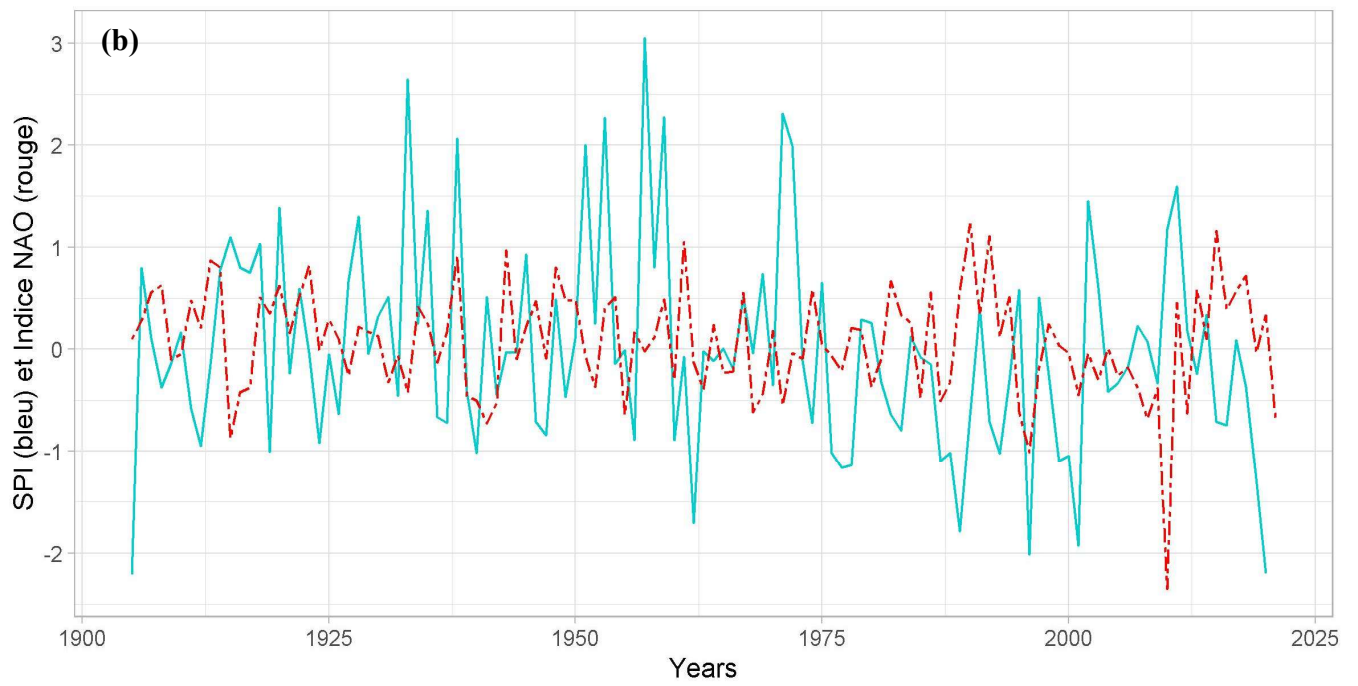
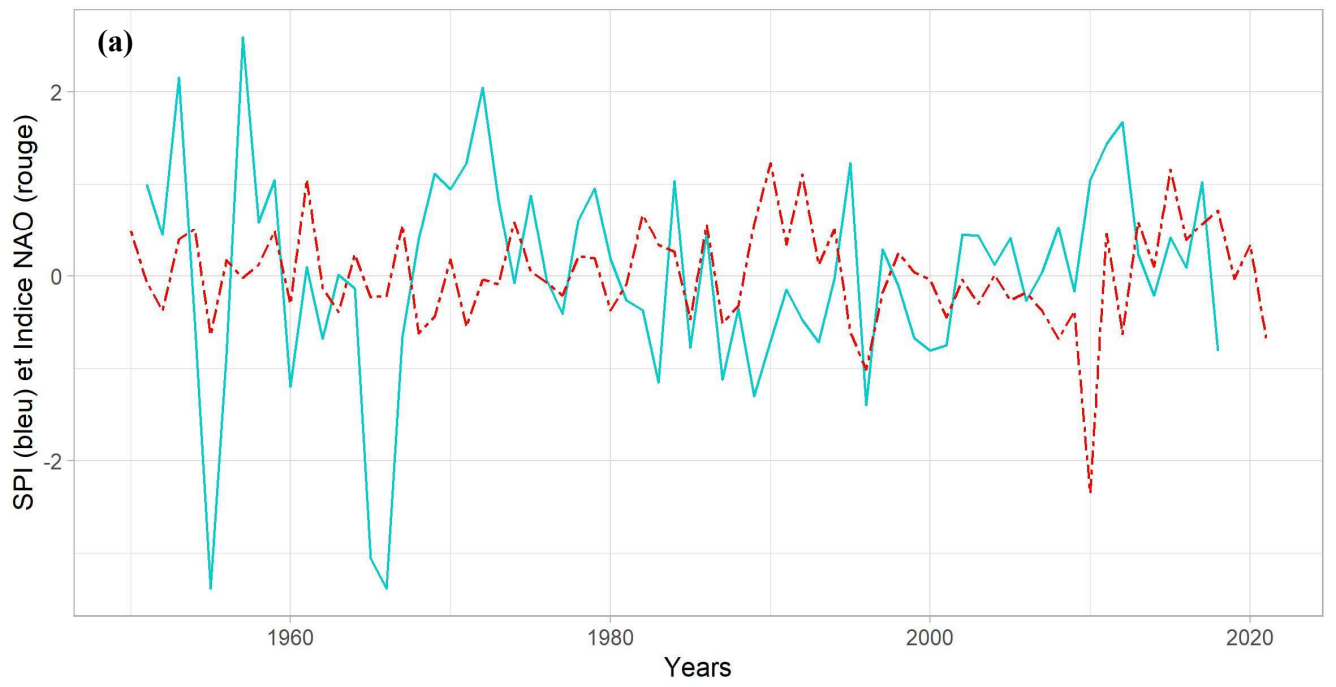
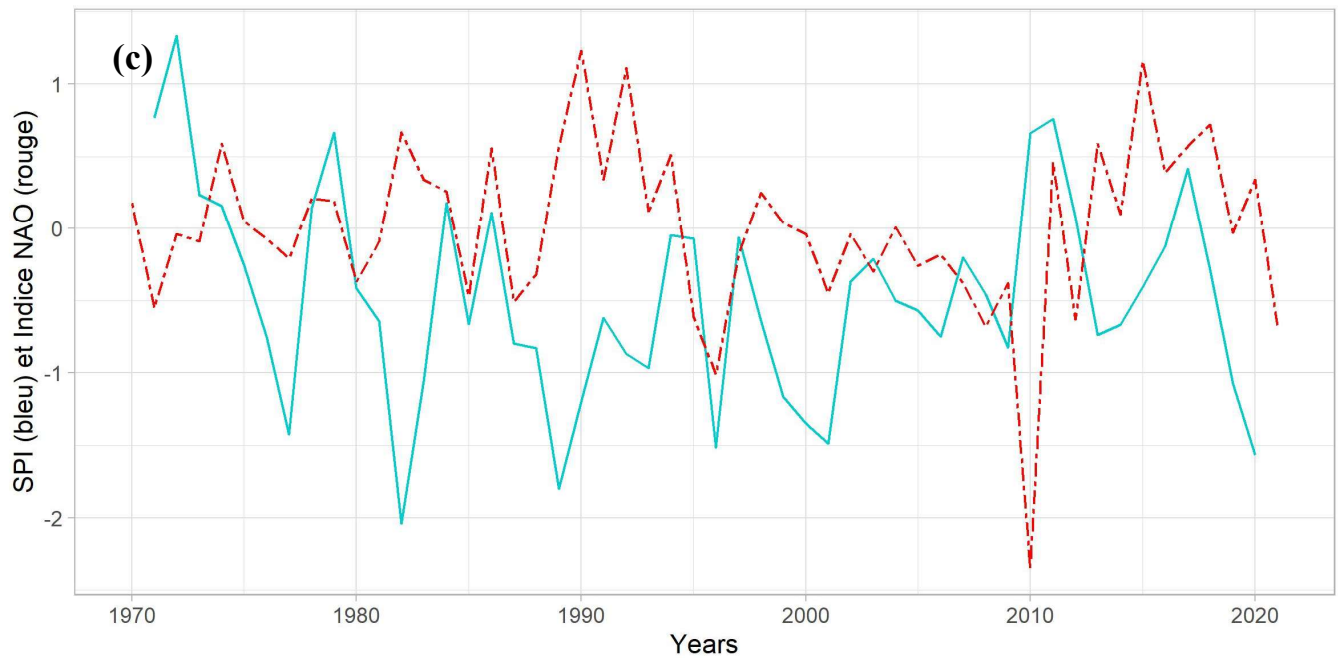


Figure 42: Variation de la normale annuelle au cours des cent dernières années

#### 4.2.3.6 Relation inondations-NAO

La Figure 43, qui présente le SPI (bleu) et l'indice NAO (rouge) en fonction des années pour les trois stations considérées, indique une relation inverse entre l'indice NAO et le SPI, où une augmentation du SPI correspond à une diminution de la valeur de l'indice NAO. Cette relation est particulièrement visible lors des années présentant des pics importants de précipitations (1970 et 2010) qui correspondent à des phases négatives de la NAO (Annexe 4). Les phases positives sont surtout observées lors d'années présentant une sécheresse plus importante, notamment aux années 1990. Cette relation est attribuée à l'interconnexion des facteurs climatiques dans la région méditerranéenne. Néanmoins, cette relation n'est pas une règle puisqu'on observe également des périodes où les précipitations suivent l'évolution de l'indice NAO. C'est le cas pour la dernière décennie (à partir de 2017).





**Figure 43: Graphes présentant le SPI (bleu) et l'indice NAO (rouge) en fonction des années pour les stations de (a) Birmandreis, (b) El Hamiz et (c) Baraki**

#### 4.2.3.7 Tests statistiques

Le Tableau 9 résume les résultats des différents tests statistiques réalisés. Ces tests ont été appliqués à la station d'El Hamiz, puisqu'elle englobe la série temporelle la plus étendue, sauf le test d'Hubert qui a été étendu à toutes les stations.

**Tableau 9 : Résultats les différents tests statistiques réalisés**

	Tests	Station	p-value	Hypothèse alternative	Résultats
Tests des tendances	Mann_Kendall	El Hamiz	0,0234	True S is not equal to 0	S= -9,51e+02 varS= 1,76e+05 tau= -1,43e-01
	Student	El Hamiz	<2,2e-16	True mean is not equal to 0	Mean= 758,47 (95% confidence interval : 720,4 et 796,5)
	Ecart de moyennes	El Hamiz	Min.= - 456,97; 1st Qu. = -456,97; Median= -139,84, Mean = -15,47, Mean= 0, 3 <sup>rd</sup> Qu.= 105,53 ; Max.= 631.03		
Tests des rupture	Pettitt	El Hamiz	0,01488	Two sided	Année: 1972
	Buishand	El Hamiz	La tendance est significative		Année: 1971

	Tests	Station	p-value		Hypothèse alternative		Résultats
			Date Début	Date Fin	Moyenne	Ecart-type	
Hubert	El Hamiz		1905	1956	794,248	194,721	
			1957	1959	1181,067	236,336	
			1960	2020	707,187	187,771	
	Baraki		1971	1974	849,025	115,401	
			1975	2020	595,450	137,025	
	Birmandreis		1951	2018	721,271	234,819	

**a/ Tests de tendance**

**Test de Mann\_Kendall :** La p-value (0.0234) est inférieure au seuil de significativité communément utilisé de 0,05. Cela suggère qu'il existe une tendance dans les données analysées. La valeur négative de S (-9.510000e+02) et de tau (-1.426108e-01) indique une tendance décroissante des cumuls annuels de précipitations dans cette région.

**Test de student :** t-value : La valeur du test de 39.48. Cela indique qu'il y a un écart important entre la moyenne de l'échantillon et la valeur nulle. La p-value est inférieure à 2,2e-16. Cela indique que l'hypothèse alternative est réalisée et donc que la moyenne de l'échantillon est significativement différente de zéro (moyenne = 758,47). L'intervalle de confiance à 95 % se situe entre 720,4 à 796,5.

**Ecart de moyennes :** La moyenne est de 0.00 ce qui suggère que les valeurs des précipitations sont équilibrées autour de cette moyenne, et la plupart des écarts semblent être regroupés près du zéro, tandis que certains sont très négatifs ou positifs.

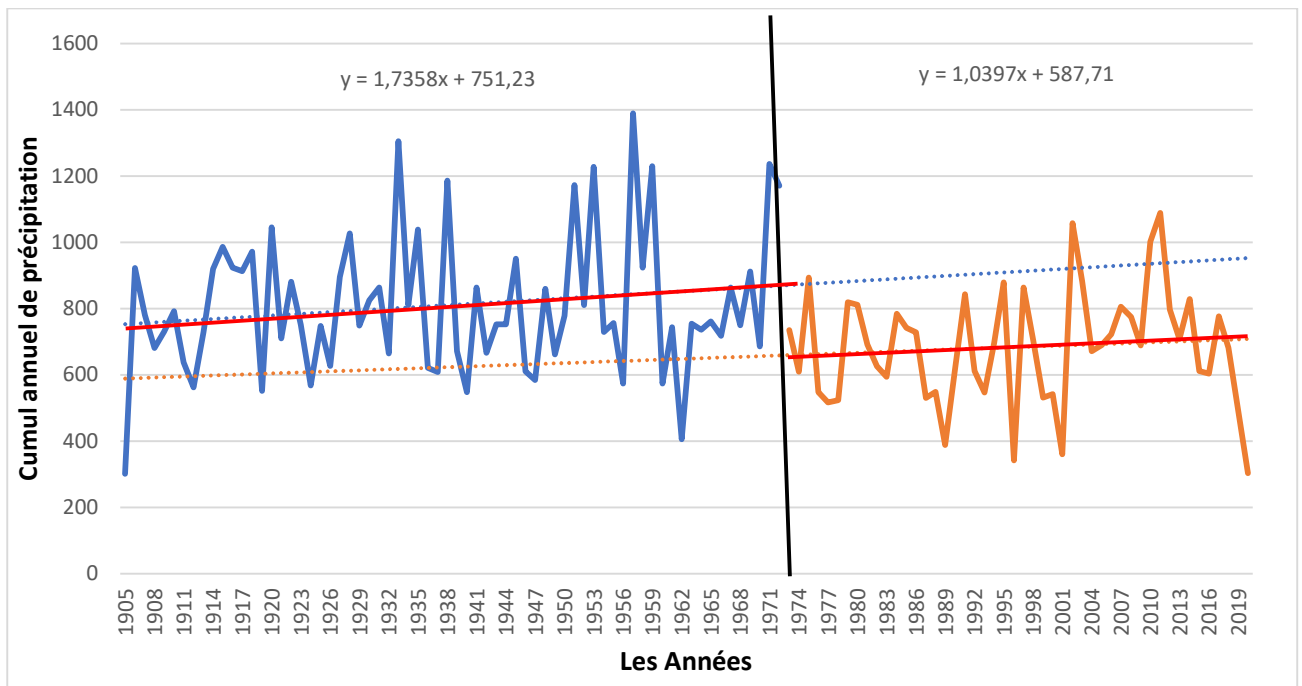
**b/ Tests de rupture**

**Test de Pettitt :** Les résultats du test de Pettitt suggèrent que la série de données de la station d'El Hamiz ne suit pas la même distribution, car la p-value est inférieure au seuil de significativité de 0,05. Le test a identifié, de ce fait, un probable point de changement à l'année 1972.

La

Figure 44 présente l'évolution des cumuls des précipitations en fonction des années. Une

tendance à la hausse des cumuls est observée de 1905 jusqu'en 1972 où le cumul annuel a augmenté de près de 68,45 mm par décennie. Un decline de cette cadence à la hausse est enregistré dans la série temporelle à partir de 1973. Ceci pourrait être lié aux changements climatiques que connaît la planète depuis la révolution industrielle.



**Figure 44 : Evolution des cumuls annuels de précipitations pour la station d'El Hamiz avec la rupture de la série en 1972**

**Test de Buishand :** Les résultats du test de Buishand suggèrent qu'il y a une rupture significative dans les cumuls annuels de la région d'El Hamiz. La rupture est détectée à l'année 1971, ce qui indique qu'il y a un changement significatif dans la moyenne des cumuls annuels à partir de cette année-là. Ce qui confirme les résultats du test de Pettitt qui a détecté la rupture en 1972.

**Test d'Hubert :**

Les résultats du test d'Hubert pour la station d'El Hamiz indiquent qu'il y a eu deux ruptures dans la série des données des cumuls annuels de précipitations entre 1905 et 2020. Pour la première rupture (1905-1956), la période est caractérisée par une moyenne relativement basse des cumuls annuels de 794,2 mm. La Deuxième rupture (1957-1959) se distingue par une moyenne beaucoup

plus élevée des cumuls annuels de précipitations (1181,06 mm), ce qui indique une période plus humide avec une pluviosité plus importante qui peut causer des inondations remarquables. La Troisième période (1960-2020) montre une baisse de la moyenne des cumuls annuels de précipitations (707,2 mm) correspondant au passage à une période plus sèche.

Les résultats du test d'Hubert pour la station de Baraki indiquent qu'il y a deux ruptures détectées dans la série de données des cumuls annuels de précipitations pour la période entre 1971 et 2020. La première rupture s'est produite en 1974, avec une moyenne de précipitations de 849,025 mm (entre 1971 et 1974). La deuxième période (1975 à 2020) est caractérisée par une diminution des précipitations avec une moyenne de 595,45 mm.

Les résultats du test de Hubert pour la station de Birmandreis indiquent qu'il n'y a pas eu de rupture dans la série des cumuls annuels de précipitations entre 1951 et 2018. Cela signifie que les données des cumuls annuels de précipitations ne montrent aucun changement abrupt ou discontinuité majeure au cours de cette période spécifique.

### 4.3 Etude des inondations de la wilaya d'Alger

#### 4.3.1 Evolution temporelle des inondations

Cette partie a pour but d'étudier la répartition spatiale et temporelle des inondations dans la wilaya d'Alger. Elle vise à déterminer les zones les plus touchées par cette catastrophe naturelle et à analyser l'évolution de ce phénomène à travers les 75 dernières années.

Selon la Figure 45.a, qui montre le nombre annuel d'inondations de 1946 à 2021, le nombre d'inondations a augmenté de façon exponentielle depuis le début des années 2000, plus particulièrement à partir de l'année 2006. Il est passé d'une moyenne de deux (02) inondations par an (1946-2000) à dix (10) inondations par an (2000- 2021), soit une augmentation d'un facteur de cinq.

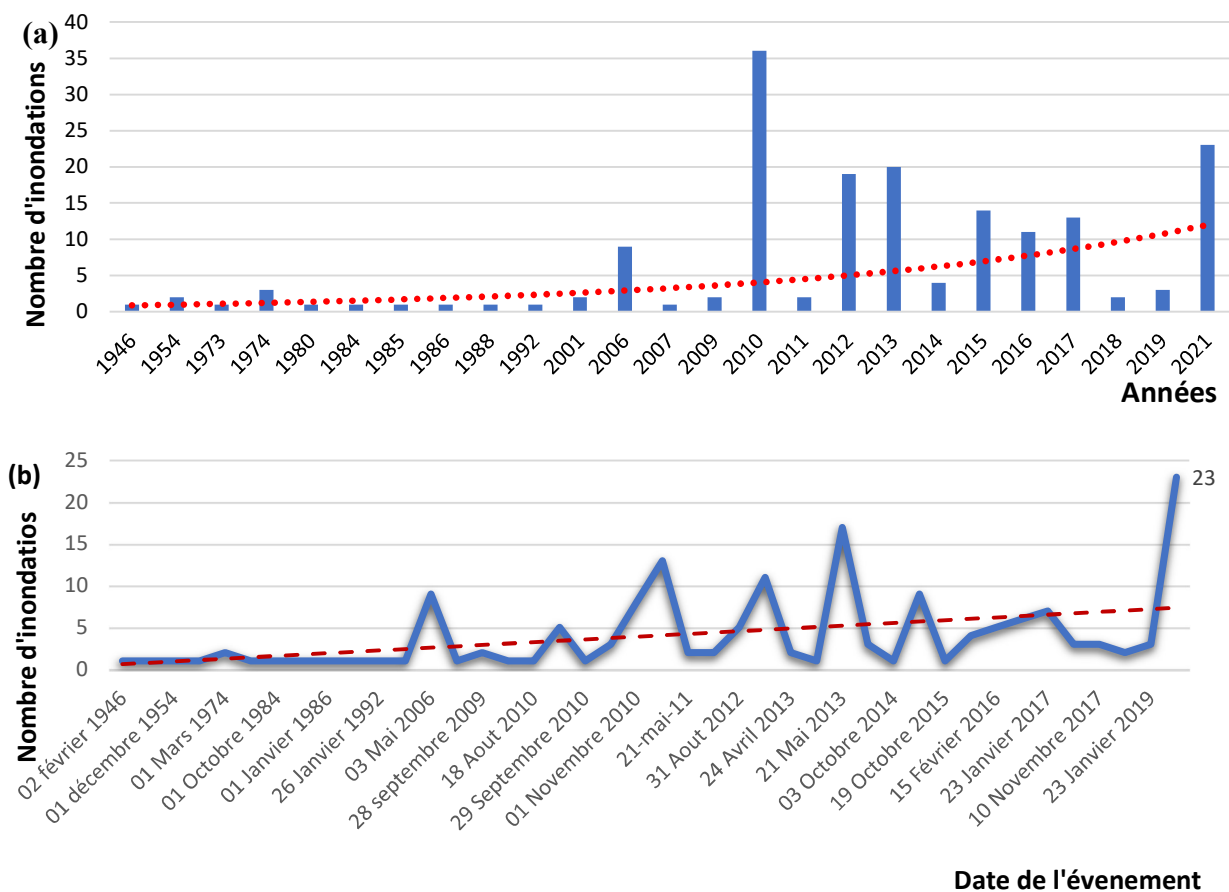


Figure 45: Evolution du nombre d'inondations à Alger entre 1946 et 2021 : (a) par année, (b) par date

Cette augmentation significative est probablement le résultat d'une combinaison de facteurs liés au climat et à l'explosion de la croissance démographique de la capitale depuis la fin des années 1990 : de 2,66 millions d'habitants en 2000 à 3,29 millions d'habitants en 2020 (MEKLATI, 2009). Cette croissance a coïncidé avec un important développement rural. L'exode rural a également considérablement modifié le tissu urbain sur l'ensemble de l'Algérie. En outre, à partir de 2001, des projets de développement de logements financés par l'État ont démarré dans la capitale et, à partir de 2008, une autre tendance démographique a émergé. L'urbanisation de la capitale est passée d'un taux de 18,9% en 1984 à 24,9% en 2003, pour atteindre 43,23% en 2022. En secteur urbain, des orages intenses peuvent occasionner un très fort ruissèlement en dehors des lits des cours d'eau, 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 (TABET HELAL et al., 2012).

Il est à noter également que la wilaya d'Alger contient plusieurs pôles industriels, tels que les zones El Hamiz, El Harrach, Rouiba, Réghaia et Semmar, qui ont entraîné une urbanisation importante dans ces zones, de vulnérabilité modérée à élevée aux inondations (ZIADI, 2022) (Annexe 3). De plus, la population gravite vers de nouveaux pôles d'urbanisation, dont beaucoup sont caractérisés par une vulnérabilité élevée, comme Bab Ezzouar et Réghaia, ainsi qu'une vulnérabilité modérée à faible, comme Sidi Abd Ellah, Douira, Mhalma et Rahmania.

D'un point de vue climatique, la région d'Alger est caractérisée par un climat méditerranéen avec des précipitations annuelles moyennes de 716,9 mm. Les orages de forte intensité y sont fréquents et variables dans le temps et dans l'espace. En outre, Alger connaît des périodes de dessiccation prolongées propices à la dispersion granulaire (LARUE, 2005; PAPY et al., 1988). Lors de forte pluviosité, ces sédiments sont décentralisés en surface et soumis à une vigoureuse érosion par ruissèlement.

Alger est passé d'une période sèche dans les années 1990 à une période plus humide à partir des années 2000 (NOUACEUR et al., 2013), ce qui l'a rendu plus vulnérable aux inondations, comme expliqué précédemment. L'année avec le nombre d'inondations le plus important est l'année 2010, avec 36 inondations enregistrées. En effet, selon les résultats de l'étude climatique réalisée, cette période a été caractérisée par une augmentation significative dans les précipitations

annuelles cumulées enregistrées à Alger, de l'ordre de 932,26 mm (Figure 31), s'inscrivant ainsi dans une tendance croissante de précipitations dans la région. Ces événements climatiques extrêmes ont eu des répercussions directes sur l'environnement et les activités humaines. D'après la direction générale de la protection civile, ces événements ont également touché plusieurs villes de la wilaya d'Alger entraînant la mort de 30 familles à Staoueli, 150 familles à Bordj El Bahri et 32 familles à Tassala El Merdja. Parallèlement, l'étude de l'occupation du sol a révélé une augmentation exponentielle de l'urbanisation et de la démographie au cours de cette même année et de l'année 2011 (Figure 20, Tableau 8) Cette expansion urbaine a conduit à une imperméabilisation des sols et s'est traduite par une diminution significative et préoccupante de la superficie des terres agricoles et des sols nus dans la région. Ces terres, qui étaient autrefois capables d'absorber l'excès d'eau lors de fortes précipitations, jouent un rôle essentiel dans la réduction du risque d'inondation. Cependant, avec la diminution de ces zones naturelles, la région d'Alger se retrouve désormais plus vulnérable aux conséquences des pluies intenses, car il y a moins de surfaces disponibles pour absorber l'eau excédentaire.

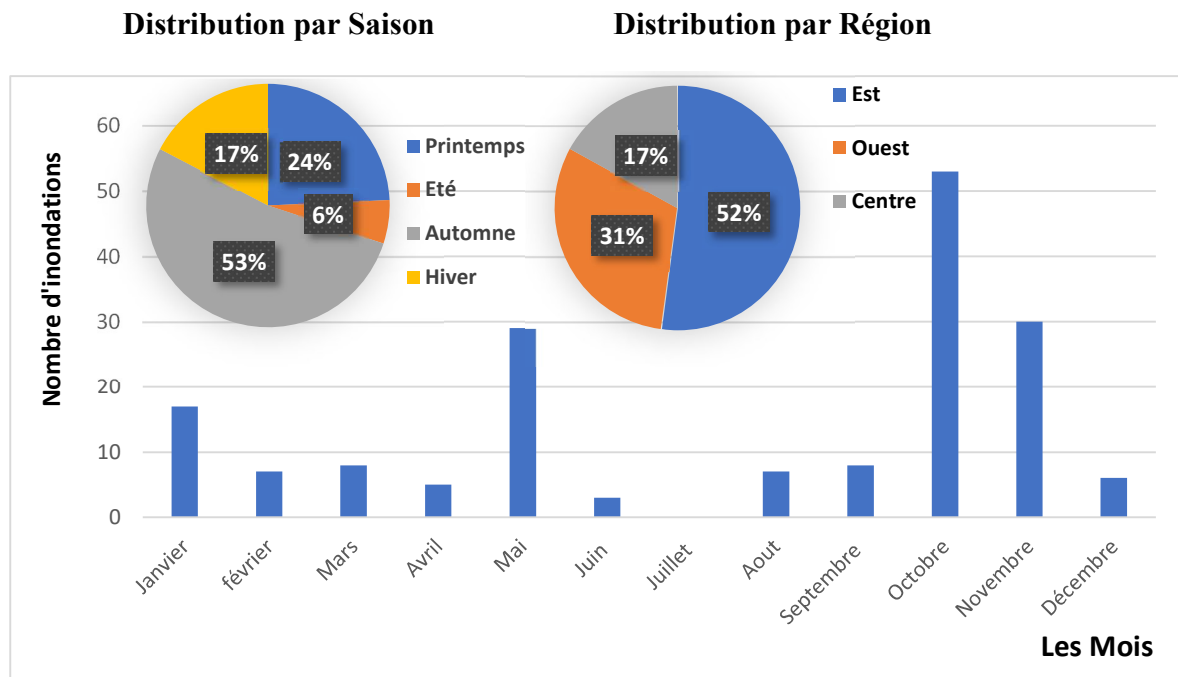
Il convient de souligner que ces inondations peuvent également être attribuées au dysfonctionnement des systèmes de drainage des eaux de pluie. Ces canaux, essentiels pour l'évacuation des eaux de pluie, ne sont pas régulièrement entretenus et peuvent être obstrués par des déchets et entraîner des inondations et des accumulations d'eau.

Entre autres, une réduction du nombre d'inondations a été observée en 2011, 2014, 2018 et 2019 avec un total ne dépassant pas les quatre inondations. Une moyenne de 15 inondations par an persiste pour les années restantes, pour atteindre 23 inondations en 2022. Ces variations peuvent être attribuées à une combinaison de facteurs naturels tels que les précipitations qui ont vu une légère diminution dans ces périodes (près de 700 mm).

D'après l'étude climatique, le mois de novembre est celui où les précipitations mensuelles cumulées de la Wilaya d'Alger sont les plus élevées. D'ailleurs, plusieurs inondations ont eu lieu durant ce mois (Figure 45b). Le nombre d'inondations par date est également en train d'augmenter avec un maximum le 23 octobre 2021 où 23 inondations ont été enregistrées le même jour dans plusieurs communes d'Alger.

D'après la Figure 46, l'histogramme indique que les mois d'octobre et de novembre ont enregistré le plus grand nombre d'inondations à Alger. Le mois de mai a également été marqué par un nombre significatif d'inondations. Cette tendance suggère que l'automne, en particulier les mois d'Octobre et de Novembre, est la période la plus propice aux inondations à Alger avec un pourcentage de 53%. En effet, ces mois enregistrent les cumuls de précipitations mensuelles maximales (Figure 21.b) et correspondent à la saison de recharge (Figure 25).

En ce qui concerne la répartition par région, le graphique montre que la région Est est la plus touchée par les inondations, représentant 52% du total des événements. Cela suggère que la région Est d'Alger est plus vulnérable aux inondations (Annexe 3), suivie de la région Ouest et de la région Centre.

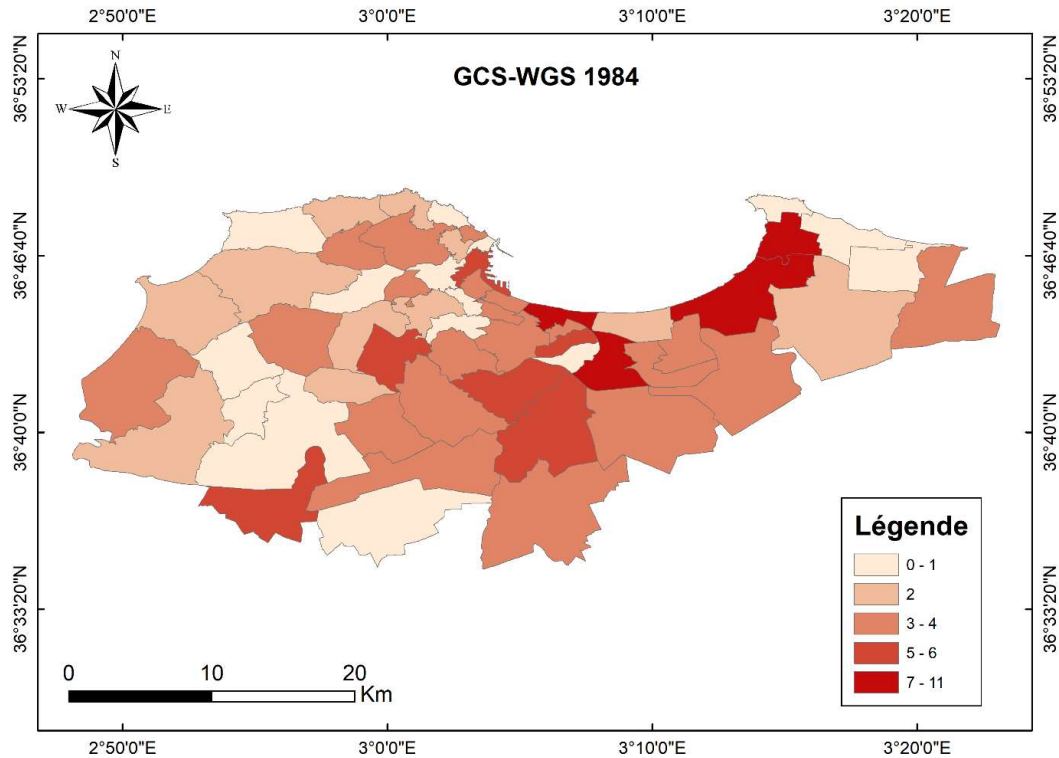


**Figure 46: Evolution Mensuelle du nombre d'inondations à Alger : Distribution par saison et par région**

#### 4.3.2 Distribution spatiale des inondations

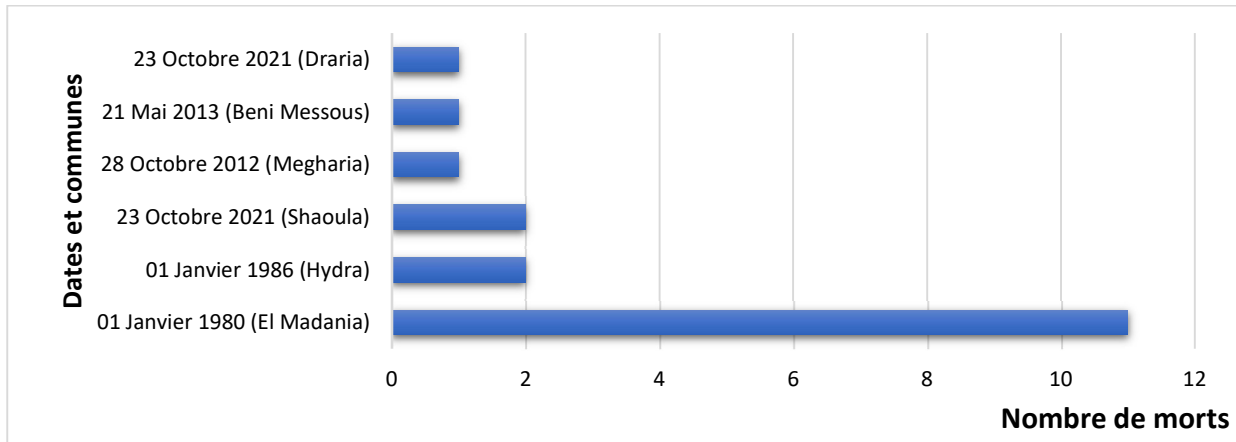
Selon la Figure 47, les communes les plus touchées par les inondations sont El Harrach avec 11 inondations, Bordj El Bahri, Hussein Dey et Bordj El Kiffan avec 8 inondations. Six (06) inondations ont été enregistrées à Baraki, Alger Centre, Gué de Constantine, Tassala El Merdja et

Draria. Ces statistiques sont en accord avec les résultats de ZIADI (2022), puisque ces communes se situent dans les zones à forte et très forte vulnérabilité aux inondations.

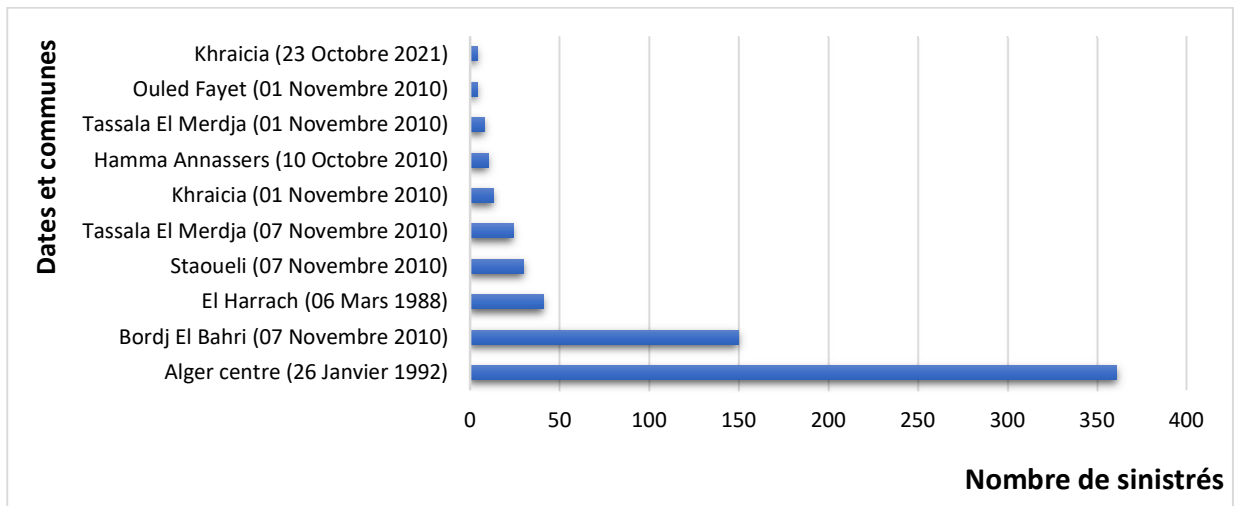


**Figure 47: Carte de distribution des inondations selon les communes de la wilaya d'Alger**

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 48). 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 49). A noter que les communes enregistrant le plus de dégâts humains sont celles contenues dans les zones à forte urbanisation et concentration démographique (partie centre et Est de la baie d'Alger). Ces communes ont une vulnérabilité modérée à sévère aux inondations (ZIADI, 2022).



**Figure 48: Nombre de morts enregistrés pour chaque commune et événement**



**Figure 49: Nombre de sinistrés enregistrés pour chaque commune et événement**

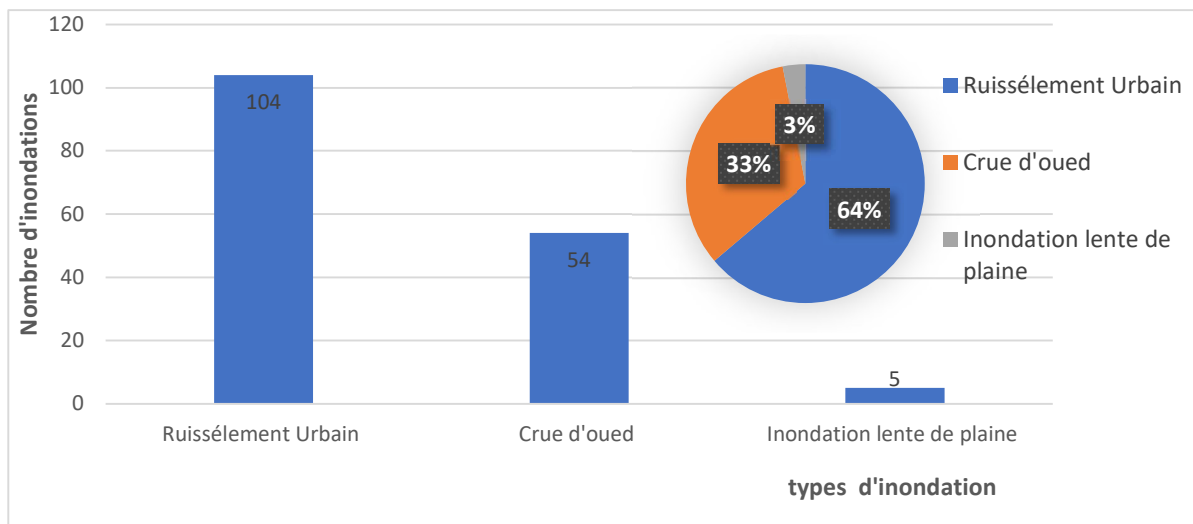
### 4.3.3 Types d'inondations à Alger

D'après la Figure 50, la wilaya d'Alger subi trois types d'inondations. Le type dominant est celui du ruissèlement urbain avec 104 inondations, ce qui correspond à un pourcentage de 64%. Les inondations causées par les crues d'oued viennent en deuxième position avec 54 inondations (33%). En dernière position, les inondations lentes de plaines sont responsables de 3% de l'effectif total.

La Figure 51 représente les pluies qui ont causé des inondations et leur durée (h) en fonction des communes. Citons à titre indicatif la commune de Bab El Oued avec une ampleur de pluie de 150,33 mm et une durée de 10h67 minute, El kalitous de 120 mm et une durée de 20h, ensuite

Baba Hsen de 72,5 mm et 3h50 minutes. Au final, Hamma Anassers avec une ampleur de pluie de 53,57 mm et une durée de 6h50 minute.

D’après la même figure, il existe une relation inverse entre la durée et l’ampleur de pluie. Plus ampleurs de la pluie est grande, plus la durée de précipitation est courte. Les inondations les



plus dévastatrices surviennent lorsque des pluies abondantes se produisent dans un laps de temps très court, ne laissant pas suffisamment de temps au sol pour absorber l'eau. Ce risque est amplifié dans les régions fortement urbanisées. Au cours de la période étudiée, près de 40 épisodes de fortes pluies ont eu lieu dans la wilaya d’Alger.

Figure 50: Nombre d’inondations à Alger par type

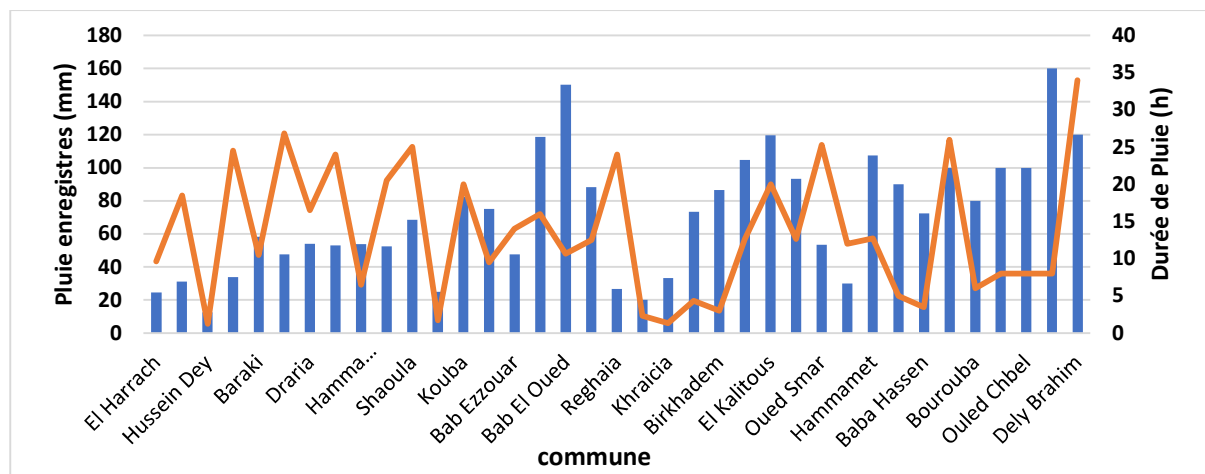


Figure 51: Pluies enregistrées et leur durée en fonction des communes de la wilaya d’Alger

#### 4.3.4 Inondation de Bab El Oued

D'après la direction générale de la protection civile, 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 (sur une étendue de 40 km<sup>2</sup>) ont provoqué la crue d'Oued M'kecel qui a causé 723 morts, 1300 familles sinistrés et 311 blessés (Tableau 10). La hauteur de l'eau est arrivée jusqu'à 8 mètres par endroits.

La principale cause de cette catastrophe réside dans le régime pluviométrique annuel irrégulier et son évolution défavorable, ce qui est bien illustré dans Figure 38 qui indique que cette période a été très Humide avec un SPI supérieure à 2. L'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 sont aussi parmi les principales causes de cette catastrophe nationale (TABET HELAL et al., 2012).

**Tableau 10: Inondation de Bab El Oued**

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

#### 4.4 Synthèse générale

L'intensification du risque d'inondation dans la région d'Alger découle d'une combinaison de plusieurs facteurs interdépendants. Tout d'abord, la croissance urbaine exponentielle, avec un taux d'urbanisation de 1,27% par an à partir de 2010, est directement liée à l'augmentation démographique et à l'exode rural. Cette urbanisation rapide a entraîné une imperméabilisation des sols, limitant leur capacité à absorber les fortes précipitations. Parallèlement, le climat de la région, caractérisé par des précipitations inversement proportionnelles à leur durée, a un impact majeur sur ce phénomène. Les fortes pluies sur une période de temps réduite augmentent le risque

d'inondation. De plus, la diminution des terres agricoles et des sols nus disponibles pour absorber l'excès d'eau aggrave cette situation. Enfin, le bouchage des canaux de drainage des eaux contribue à la limitation de l'évacuation des eaux pluviales.

Dans ce contexte, Il est crucial de prendre en compte l'effort considérable entrepris par la protection civile régionale ainsi que par le gouvernement algérien pour faire face à cette catastrophe naturelle, la protection civile en particulier, a joué un rôle essentiel dans la gestion des risques d'inondation dans la wilaya d'Alger en mettant en place un système de surveillance météorologique avancé, en réalisant des travaux de prévention et en intervenant rapidement en cas de catastrophe. Ces efforts contribuent à réduire les dommages matériels et à protéger la vie des citoyens.

En réponse aux épisodes récurrents d'inondations, le gouvernement a investi dans la construction et la réhabilitation des infrastructures de drainage et d'assainissement. Il a également renforcé la surveillance et la prévention des inondations en améliorant les systèmes de prévision météorologique et en établissant des mécanismes d'alerte précoce pour informer les populations des zones à risque.

De plus, selon le Ministère des Ressources en Eau (2021)<sup>28</sup>, le gouvernement a mis en place des programmes de sensibilisation et d'éducation pour informer les citoyens sur les mesures de prévention et les comportements à adopter en cas d'inondation. Des campagnes de sensibilisation sont menées pour encourager les habitants à évacuer les zones à risque et à prendre des mesures préventives pour protéger leurs biens.

---

<sup>28</sup> Le site d'Algeria Presse Service : <https://www.aps.dz/>

#### 4.5 Cas d'étude : Utilisation des données Sentinel-1 pour cartographier les zones inondées

Dans le cadre de l'application de l'Arrêté 1275 et afin de concrétiser notre thème en tant que projet de startup, nous avons entrepris une étude de cas visant à utiliser les données Sentinel-1 pour cartographier les zones inondées. Cette étude s'inscrit dans notre projet global qui vise à aborder toutes les catastrophes naturelles.

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer la précision et la rapidité de la détection de l'étendue des zones inondées, ce qui permettra une réponse plus efficace lors des situations d'urgence et contribuera à réduire les impacts négatifs des catastrophes naturelles sur les populations et les infrastructures.

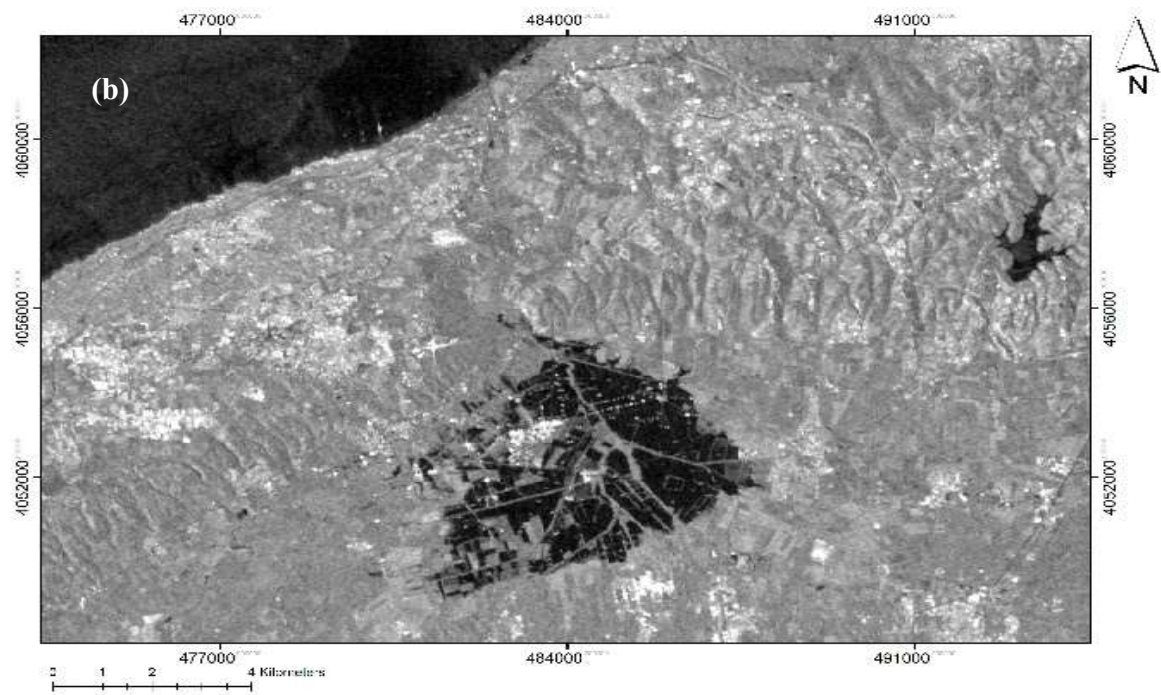
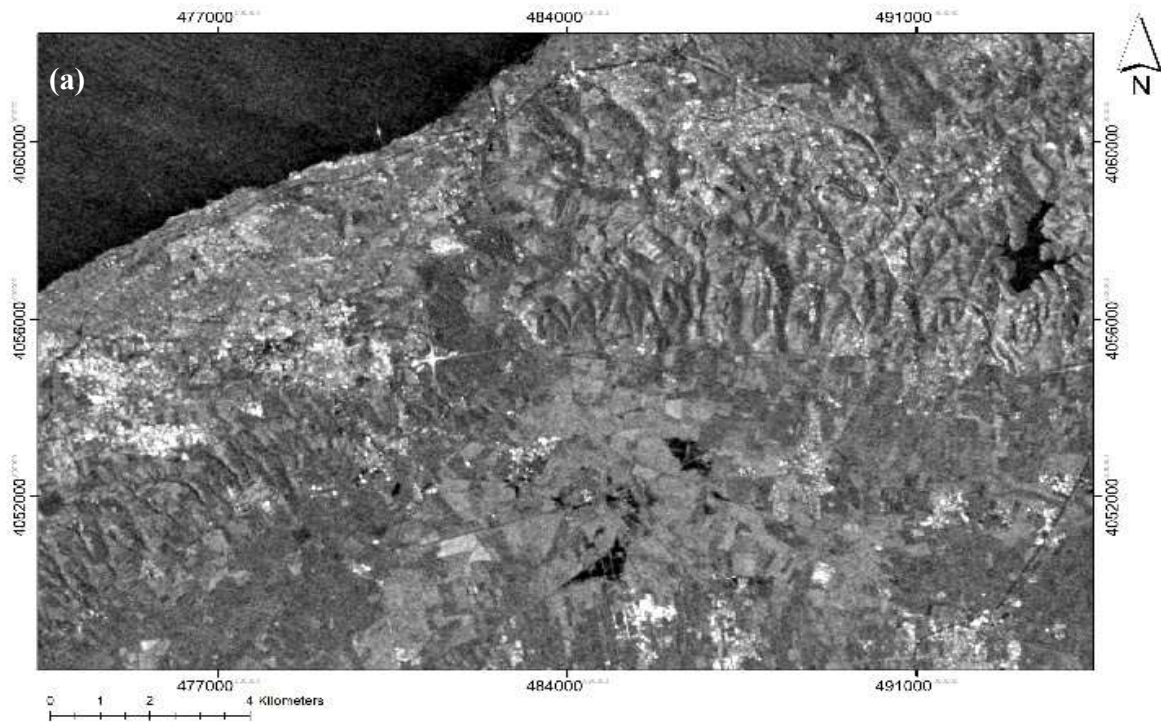
Les résultats de l'étude de l'inondation du 23 Janvier 2017 sont représentés sur la Figure 52. La zone inondée chevauche entre les wilayas de Tipaza et de Blida et est située dans la plaine de la Metidja qui est répartie entre trois sous bassins versants parmi eux celui de l'oued Mazafran qui est concerné par l'inondation du 23 janvier 2017. L'Oued Beni Azza, un des affluents de l'oued Mazafran, est également concerné.

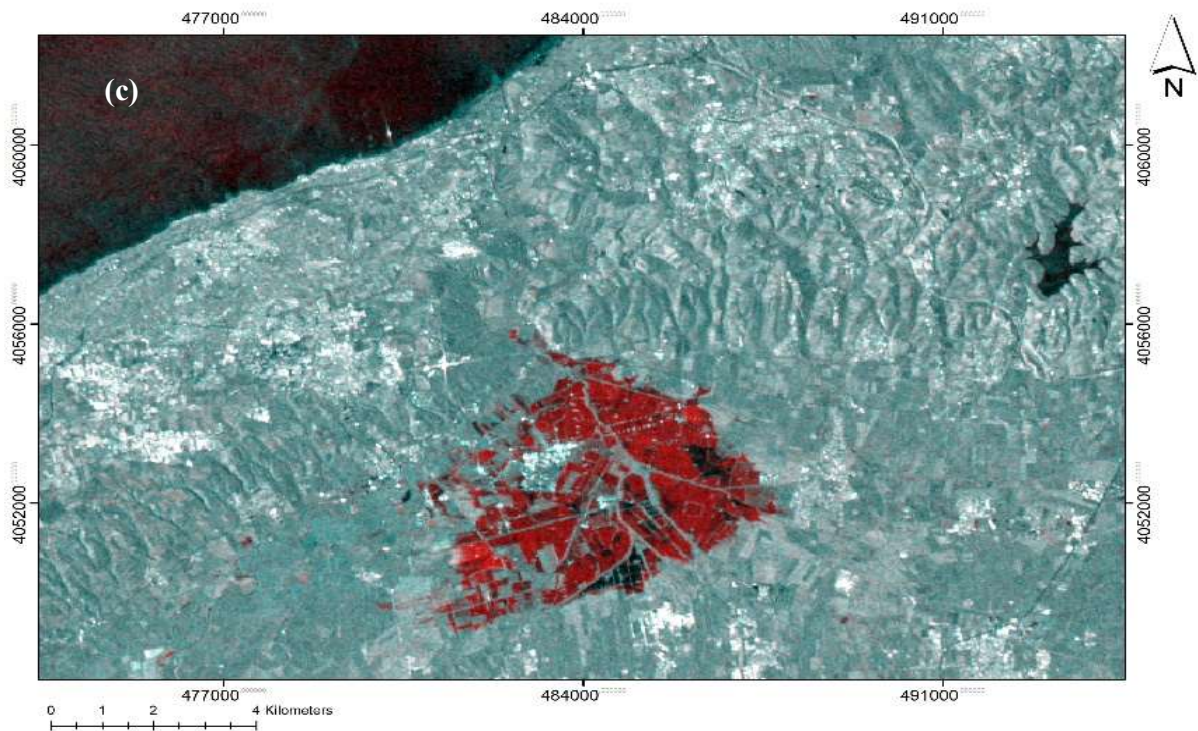
La Figure 52 montre que l'occupation du sol de la zone inondée est caractérisée pour la plupart par des terres agricoles. La zone inondée inclut également la zone industrielle de Kolea et s'étale sur trois communes :

- OUED EL ALLUEG qui fait partie de la willaya de Blida avec une superficie inondée de 2.771.980 m<sup>2</sup>, soit 11,26% de la superficie de la commune.
- KOLEA qui fait partie de la willaya de Tipaza avec une superficie de 11696400 m<sup>2</sup> et de 258.551 m<sup>2</sup>, soit 47,53% de la superficie de la commune.
- BEN KHLIL qui fait partie de la willaya de Blida avec une superficie inondée de 10.044.600 m<sup>2</sup>, soit 40,82% de la superficie de la commune.

La zone touchée de la plaine de la Metidja est caractérisée par une pente qui tend vers zéro qui favorise l'accumulation et l'infiltration de l'eau à ce niveau. De plus, d'après la carte des sols d'Algérie (Annexe 1), la zone touchée par l'inondation est principalement constituée de sols de type « marais » et « calcaire » qui sont peu perméables à l'eau, avec une zone de type alluvion. Avec les précipitations intenses enregistrées le 23 janvier 2017 qui se sont produites dans une

période de temps assez réduite, le sol n'a pas eu le temps d'absorber l'eau en excès qui s'est accumulée en provoquant une inondation.





**Figure 52 : Images Sentinel-1 montrant l'étendue de l'inondation du 23 janvier 2017 : (a) image archive, (b) image de crise, (c) image traitée**

La méthode utilisée (imagerie radar) présente plusieurs avantages, notamment :

- Application facile et utilisation possible en temps nuageux et de nuit.
- Méthode rapide, ne nécessite pas beaucoup de temps.
- Disponibilité et gratuité des données.

En revanche, nous avons constaté que la détection des inondations dans le milieu urbain est assez difficile. La précision des résultats peut être également améliorée par l'utilisation d'images satellitaires à plus haute résolution spatiale (HRS).



# Conclusion générale

## Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est d'analyser l'évolution spatiotemporelle des inondations dans la wilaya d'Alger, en mettant l'accent sur deux facteurs causaux : les précipitations et l'urbanisation. Ces deux facteurs contribuent à accroître la probabilité et l'intensité des inondations en modifiant les schémas de précipitations (leur fréquence, leur intensité) et en favorisant une urbanisation intense et non contrôlée. Cette urbanisation croissante, conjuguée à des changements dans les schémas de précipitations, constitue une menace pour la population lorsque des conditions propices aux inondations surviennent.

L'analyse du répertoire des inondations de la wilaya d'Alger démontre une augmentation exponentielle du nombre d'inondations depuis le début des années 2000, avec une tendance plus prononcée à partir de 2006. La fréquence des inondations est passée d'une moyenne de deux par an entre 1946 et 2000, à dix par an entre 2000 et 2021, représentant ainsi une augmentation d'un facteur de cinq. Cette augmentation est principalement attribuable à l'explosion démographique qu'a connue Alger depuis la fin des années 90 et qui a entraîné une augmentation significative de l'artificialisation, ainsi qu'aux précipitations intenses et à un nombre croissant d'événements pluvieux extrêmes, favorisés par une période plus humide à partir des années 2000.

L'étude de l'occupation du sol dans la wilaya a été réalisée en utilisant des images satellitaires de 30 m de résolution spatiale et à l'aide de la technique de la classification supervisée qui a fourni une bonne cartographie de l'urbanisation de notre zone d'étude. Nos résultats révèlent que l'évolution spatiale et temporelle de l'occupation du sol dans la wilaya d'Alger, au cours des cinquante dernières années, peut être divisée en deux phases distinctes. La première phase correspond à une augmentation quasi-linéaire de l'artificialisation depuis les années quatre-vingt jusqu'à l'année 2011 (avec un taux de  $2,92 \text{ km}^2/\text{an}$ , soit  $0,38 \%$ ). La cadence a considérablement augmenté par la suite ( $9,68 \text{ km}^2/\text{an}$ , soit  $1,27\%$ ) de 2011-2022. Ceci s'est traduit en parallèle par une diminution globale des terres agricoles en passant de  $46,8\%$  à  $29,24 \%$  de la superficie totale d'Alger, en raison de l'augmentation de la pression démographique et urbanistique ainsi qu'aux politiques agricoles qui ont été souvent orientées vers l'industrialisation et la modernisation.

Les inondations les plus dévastatrices surviennent lorsque des pluies abondantes se produisent dans un laps de temps très court (relation inverse), saturant rapidement les sols et

dépassant la capacité de drainage des systèmes urbains. Cela est directement lié au deuxième facteur, qui concerne l'étude du climat et des précipitations. Pendant les mêmes périodes qui ont connu l'explosion urbaine, une augmentation significative dans les précipitations annuelles cumulées a été identifiée, qui ont atteint 932,26 mm en 2010, s'inscrivant ainsi dans une tendance croissante de précipitations. De plus, ces périodes ont été caractérisées par des pluies intenses et un grand nombre d'épisodes pluvieux extrêmes supérieure à 50 mm/jour depuis 2003 (crue rapide).

En résumé, l'intensification du risque d'inondation dans la wilaya d'Alger depuis les années 2000 est le résultat de l'urbanisation croissante, de l'impact climatique, de l'imperméabilisation des sols, de la diminution des terres agricoles et du mauvais entretien des canaux de drainage des eaux, mettant en danger les habitants et les infrastructures de la région.

Les résultats de la présente étude peuvent servir à la protection civile ainsi qu'aux autorités concernées dans la gestion des risques d'inondation. Ils permettent de prendre des mesures préventives pour atténuer les effets des inondations en identifiant les zones les plus exposées. En utilisant les résultats de notre étude dans la prise de décision, l'État peut élaborer des stratégies efficaces de prévention des inondations et de protection des populations et des infrastructures. Ci-dessous, quelques mesures préventives qui peuvent être prises :

- Mise en place d'infrastructures de gestion des eaux pluviales, tels que des bassins de rétention et des systèmes de drainage adéquats, afin de réduire le ruissellement et d'améliorer l'infiltration des eaux de pluie.
- Réhabilitation des infrastructures existantes, et la sensibilisation de la population sur l'impact des inondations.
- Gestion des bassins versants, telles que la construction de barrages, de réservoirs et de systèmes de retenue.
- Facilitation de l'écoulement des eaux en supprimant les obstacles qui provoquent le débordement et stagnation des eaux et en mettant en place des programmes réguliers d'entretien et de nettoyage des canalisations de drainage
- Mise en place de normes de construction et de réglementations strictes pour garantir que les nouvelles constructions résistent aux inondations.

- 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, contrôle de l'érosion et renforcement de la veille météorologique et hydrologique.
- Aménagement du territoire réfléchi, en conformité avec des instruments juridiques spécifiques tels que le SNAT, SDAAM, PDAU, PAC et 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, de climatologie, d'aménagement, d'environnement et de gestion des risques majeurs. Dans ce sens, on peut s'orienter vers un travail plus approfondi par :

- L'utilisation d'images satellitaires à très haute résolution spatiale peut fournir des résultats plus précis en termes d'occupation des sols.
- L'étude d'autres paramètres susceptibles d'influencer les inondations, tels que l'hydrographie de la wilaya, la nature des oueds (permanents ou temporaires) et leurs crues centennales.
- L'étude de la variation de la température et de l'évapotranspiration potentielle afin de mieux comprendre le climat et ses variations ainsi que son impact sur les ressources hydriques.
- L'utilisation de modèles climatologiques telle que « ArpègeClimat » et « LMDZ », des techniques de machine Learning et d'intelligence artificielle peut être envisagée pour fournir une étude de prévision climatique à long terme. Cette approche permettrait d'évaluer les risques d'inondation sur une période de 30 ans et d'identifier les années présentant potentiellement un risque accru de cette catastrophe naturelle.



# Bibliographie

---

## Bibliographie

**AMIOT, L., (2021).** DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL FOCUS “ RESSOURCE EN EAU ” Guide méthodologique [Rapport de recherche] CRESEB; Région Bretagne; LETG Rennes. 2021, pp.146. fhalshs-03291992f .

**BAAZIZ, N., (2020).** Fiche Monographique de la wilaya d’Alger. Wilaya d’Alger.

**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.

**BESSAOUD, O., (2019).** Rapport de synthèse sur l’agriculture en Algérie. Rapport d’activité. Document non publié. Algérie.

**BILEL, Z., MESBAH, M., et al .(2015).** Analyse et cartographie des tendances pluviométriques dans le bassin versant de l’Oued Sebaou (Nord-Centre de l’Algérie), International Conference on African Large River Basins Hydrology, Algérie.

**BOKO, B., DOSSOUMOU, A., et al. (2020).** Effets des inondations sur les ouvrages d’assainissement dans l’arrondissement central d’Abomey-Calavi au Bénin (Technical Report). Document non publié. EPAC/UAC.

**BOUGHEDIR, S., (2015).** Case study: disaster risk management and climate change adaptation in Greater Algiers: overview on a study assessing urban vulnerabilities to disaster risk and proposing measures for adaptation. Curr. Opin. Environ. Sustain. 13, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2015.03.001>

**BOURENANE, H., BOUHADAD, Y. (2019).** Flood hazard mapping in urban area using the hydrogeomorphological approach: case study of the Boumerzoug and Rhumel alluvial plains (Constantine city, NE Algeria). J. Afr. Earth Sci. 160, 103602. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103602>

**CASSOU, C. (2004).** Du changement climatique aux régimes de temps : l’oscillation nord-atlantique. Météorologie théorique. La Météorologie - n° 45: pp 21-32 .

**CHAHRAOUI, H. (2022).** Etude des événements extrêmes et leur impact sur l’écoulement solide : cas du bassin versant du Mazafran. (Thèse de doctorat). École nationale supérieure d’Hydraulique Blida – ALGERIE.

**CHEIKHLOUNIS, G., et al. (2011).** Évaluation du phénomène d’inondation dans la plaine orientale de la Mitidja (oued EL Hamiz et oued Réghaïa) Alger– Algérie. Bulletin. Vol.22, P.P. 1–14.

- CHERIGUIA., et al. (2004).** Contexte géologique et structural de la région algéroise (Algérie) affectée par le séisme du 21 Mai 2003. In : Le Séisme de Zemmouri-Boumerdès (Algérie) du 21 Mai 2003. Ed. Serv. Géologique L'Algérie-Mém. 12, 25–32.
- DAGNELIE, P. (1970).** Théorie et méthodes statistiques : applications agronomiques. Cedex France : Gembloux : J. Duculot , P.451 ,vol. 2 : les méthodes de l'inférence statistique, Traités;2.
- DAVIS, M., SHEPHERD, R.(2009).** Climate change – Warming to the task. The Psychologist, 22, 112-114. The Psychologist 22, 112–114.
- DERDJINI, H., (2017).** Cartographie des changements de l'occupation du sol dans la plaine de la Mitidja à partir des images LANDSAT. (Mémoire de fin d'étude), Ecole nationale supérieure d'hydraulique (ENSH), Algeria.
- DESBORDES, M.(1997).** La gestion urbaine du risque d'inondation : problématique et enjeux. Houille Blanche 20–24. <https://doi.org/10.1051/lhb/1997058>
- EAUFRANCE. (2019).** Les inondations et les submersions marines. [En ligne]. [Consulté le 20/12/2021]. Disponible sur le web: <https://www.eaufrance.fr>
- EDALO, S., BACHAROU, T. (2012).** Contribution à l'étude des inondations à Cotonou : Impacts de la variabilité climatique. (Mémoire de fin d'étude). ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI (EPAC). BENIN.
- 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). Document non publié, Phase 1 - Évaluation et représentation des sources de vulnérabilité. P.P.282-360.
- 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). Document non publié P.79.
- EL ZEREY, W. (2014).** Etude diachronique de la régression du couvert forestier de la plaine de Telagh (Algérie) : approche par télédétection et SIG (eISSN 2458-7176 No. n° 36,). Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Vie.
- GAMEREN, V., WEIKMANS, et al. (2014).** L'adaptation au changement climatique. Édition : la découverte, P.P.128.
- GAUME, E., BORGA, M., et al (2016).** The Mediterranean region under climate change: A scientific update, Sub-chapter 1.3.4. Mediterranean extreme floods and flash floods. France. IRD éditions, P.P.133-144.
- GILARD, O., GENDREAU, N. (2005).** Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. Rev. Sci. Eau 11, 429–444. <https://doi.org/10.7202/705315ar>
- GRINE, Y., BOUHAMIDA, H.(2021).** Cartographie de la vulnérabilité aux inondations dans la région d' El Tarf (Thesis). Université de Ghardaia. Algérie
- HADDADI-HAMDANE, A.(1996).** Bryozoaires du Pliocène du Sahel d'Alger. Trav. Doc. Lab. Géologie Lyon 140, 3–189.

- 
- HAFNAOUI, M.A., MADI, M., et al . (2022).** Floods in El Bayadh city: causes and factors. LARHYSS J. P-ISSN 1112-3680 E-ISSN 2521-9782 97–113.
- ISL, BRGM. (2006).** Etude de réduction de la vulnérabilité du massif de Bouzaréah aux catastrophes naturelles (No. Rapport de tache 2), volume 2-risque inondation. France, P.P.225.
- JONES, P.D., JÓNSSON, T., et al. (1997):** Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland. *Int. J. Climatol.* 17, 1433-1450. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13<1433::AID-JOC203>3.0.CO;2-P
- KORICHI, K.(2016).** (PDF) Flash floods risk analysis in ephemeral streams: a case study on Wadi Mekerra (northwestern Algeria) [WWW Document]. URL [https://www.researchgate.net/publication/306076316\\_Flash\\_floods\\_risk\\_analysis\\_in\\_ephemeral\\_streams\\_a\\_case\\_study\\_on\\_Wadi\\_Mekerra\\_northwestern\\_Algeria](https://www.researchgate.net/publication/306076316_Flash_floods_risk_analysis_in_ephemeral_streams_a_case_study_on_Wadi_Mekerra_northwestern_Algeria) (accessed 6.22.23).
- LEDOUX, B. (2006).** La Gestion Du Risque Inondation. 11 rue Lavoisier - Paris-, P.P.766.
- LAICHE, M. (2018).** Dynamiques d’urbanisation de la ville d’Alger : quelles opportunités pour le développement territorial ?(Mémoire de fin d’étude ).Université Mouloud MAMMERI, TIZI-OUZOU(Algérie).P.P. 665-678.
- LARUE, J.( 2005).** The status of ravine-like incisions in the dry valleys of the Pays de Thelle (Paris basin, France). *Geomorphology* 68, 242–256. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.11.018>
- MEDD-PRIM. (2004).** Risques naturels majeurs : Les inondations, P.P.24. Rapport d'activité. Document non publié. Algérie.
- MCKEE, T., DOESKEN, N., et al .(1993).** The relationship of drought frequency and duration to time scales.Eighth Conference on Applied Climatology.Anaheim ,california: pp 17-22.
- MEDDI, M., TALIA, A., et al .(2009).** Évolution récente des conditions climatiques et des écoulements sur le bassin versant de la Macta (Nord-Ouest de l’Algérie) [WWW Document]. URL <https://journals.openedition.org/physio-geo/686> (accessed 6.29.23).
- MEDJAD, T., SETTI, M .,et al. (2015).** Quelle métropolisation pour Alger ? Méditerranée Rev. Géographique Pays Méditerranéens J. Mediterr. Geogr. <https://doi.org/10.4000/mediterranee.7267>
- MEKLATI, A.(2009).** La mise en place d’un plan d’intervention en cas de sécheresse pour la wilaya d’Alger (MEMOIRE DE MAGISTER). Université M’Hamed Bougara Boumerdes, Algérie.
- MESSEN, H., SERRAH, H. (2021).** Cartographie des zones sensibles aux inondations à l’aide de techniques SIG, télédétection et d’intelligence artificielle (Mémoire de projet de fin d’études), Ecole Nationale Polytechnique. Algérie.
- NAIT AMARA, F.( 2012).** Méthodologie de la mise en oeuvre d’un SIG pour la prévention des risques majeurs à Alger. (Thèse de magister) Université des sciences & de la technologie Houari Boumediene. Algerie
- NEZZAL, F., BELKEBIR, R., et al. (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. et al.(2013a).** Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 307–323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>
- NOUACEUR, Z., LAIGNEL, et al. (2013b).** Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ? *Physio-Géo Géographie Phys. Environ.* 307–323. <https://doi.org/10.4000/physio-geo.3686>
- NOURI, M. (2016).** Etude préliminaire sur le risque d'inondation en milieu urbain (Algérie) Preliminary study on the flood risk in urban areas (Algeria). *Geo-Eco-Trop* 201–208.
- 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/>.
- PAPPY, F., BOIFFIN, et al . (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.
- PASSY, P., PUISAIS, A.(2022).** Apport de la télédétection optique au suivi des crues dans la Bassée. Rapport d'activité. Document non publié. Algérie.
- 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. France.
- 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) (Thesis). Univ M'sila. Algeria.
- 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.
- REDA, M. (2014).** Contribution à l'étude des crues pour une gestion du risque aux inondations. (Mémoire de master), Ecole nationale supérieure d'hydraulique -arbaoui abdellah-. Algérie.P. 86.
- REDJEM, A., NOUIBAT, B., et al. (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.RGPH, 2020. ANNUAIRE STATISTIQUE DE LA WILAYA D'ALGER 2020.
- RGPH, (2020).** ANNUAIRE STATISTIQUE DE LA WILAYA D'ALGER 2020.

**SAFAR ZITOUN, M. (2013).** Spatial and social mobilities in Algeria: the case of Algiers. *J. North Afr. Stud.* 18, 678–689. <https://doi.org/10.1080/13629387.2013.849898>

**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

**SAIDI, S., BOURI, S. et al. 2011.** Assessment of groundwater risk using intrinsic vulnerability and hazard mapping: Application to Souassi aquifer, Tunisian Sahel. *Agric. Water Manag.* 98, 1671–1682. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.005>

**SUMI, T., KANTOUSH, S. et al. (2022).** Wadi Flash Floods: Challenges and Advanced Approaches for Disaster Risk Reduction. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-2904-4>

**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

**TAIBI, S. (2011).** Analyse de régime Climatique au Nord de l'Algérie. (Thèse de doctorat), Ecole nationale d'agronomie el Harach. Algerie.

**TAÏBI, S., MEDDI, B., et al. (2013).** Evolution et régionalisation des précipitations au nord de l'Algérie (1936–2009). *IAHS Publ.*, 359, 191-197

**ZIADI, S.R. (2022).** Étude de la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations et estimation de leur variabilité spatio-temporelle (Mémoire de fin d'étude). Ecole Nationale Supérieure des Sciences de la Mer et de l'Aménagement du Littoral. Algérie.

**Sites internet**

<https://marges.hypotheses.org/valorisation/profils-de-villes/alger>

<https://www.dcwalger.dz/fr/>

<http://www.hydrosciences.org>

<https://www.geograchid.com>

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

<https://www.l3harrisgeospatial.com/Support/Self-Help-Tools/Tutorials>

<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/nao/>

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

<https://youmatter.world/fr/definition/urbanisation-definition-causes-consequences/>

[https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11842036\\_02.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/11842036_02.pdf)

<http://www.ons.dz/>

<https://www.fao.org/statistics/fr/>

<https://www.ecologie.gouv.fr>

<https://www.aps.dz/>

<https://www.meteo.dz/home>



# Annexes

## Annexe 1

## Carte des sols de la partie nord-ouest d'Algérie

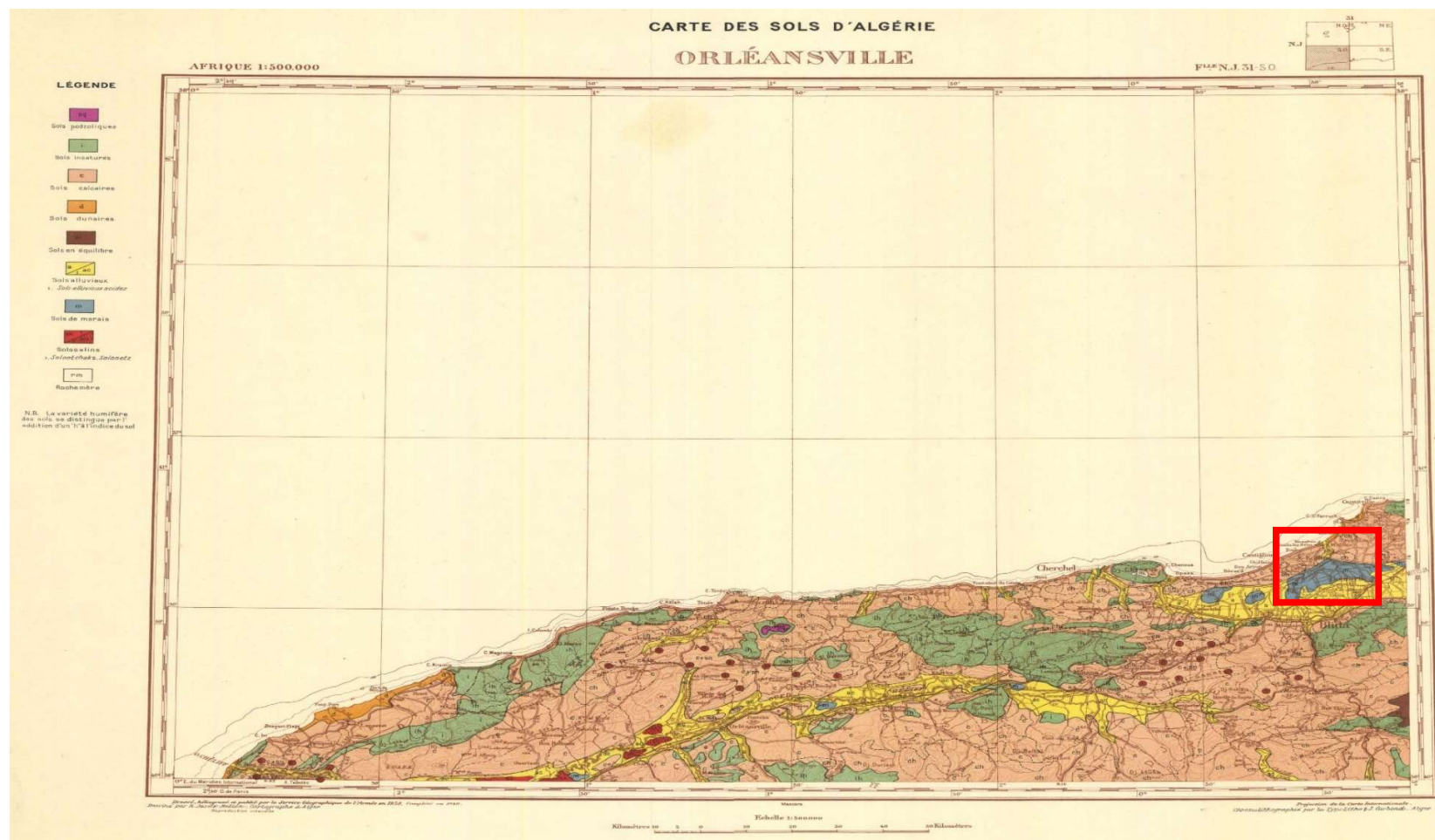
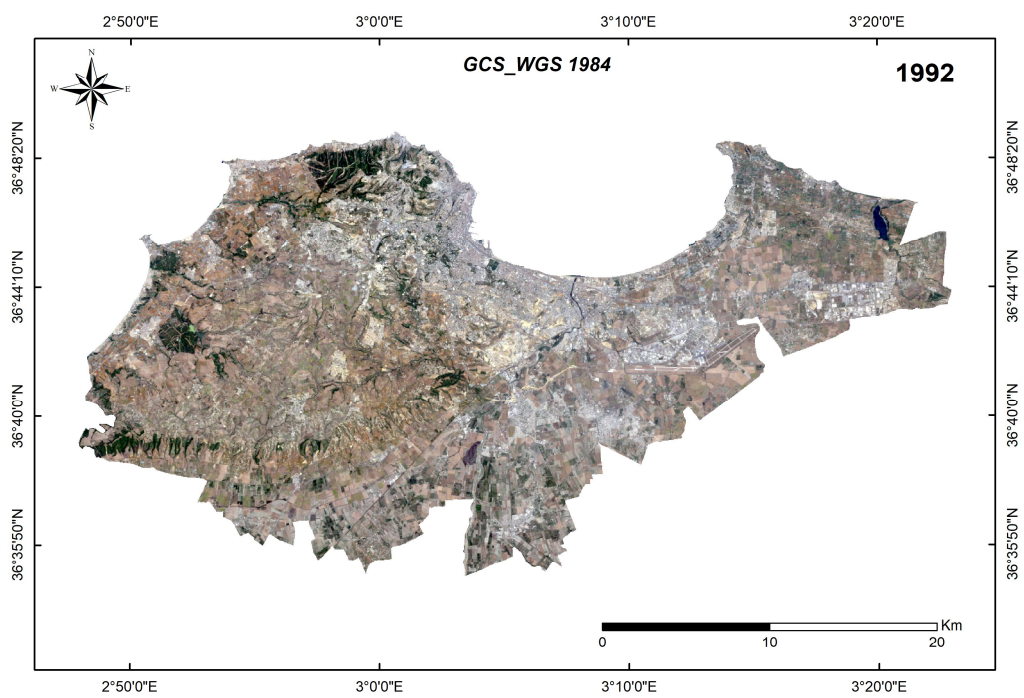
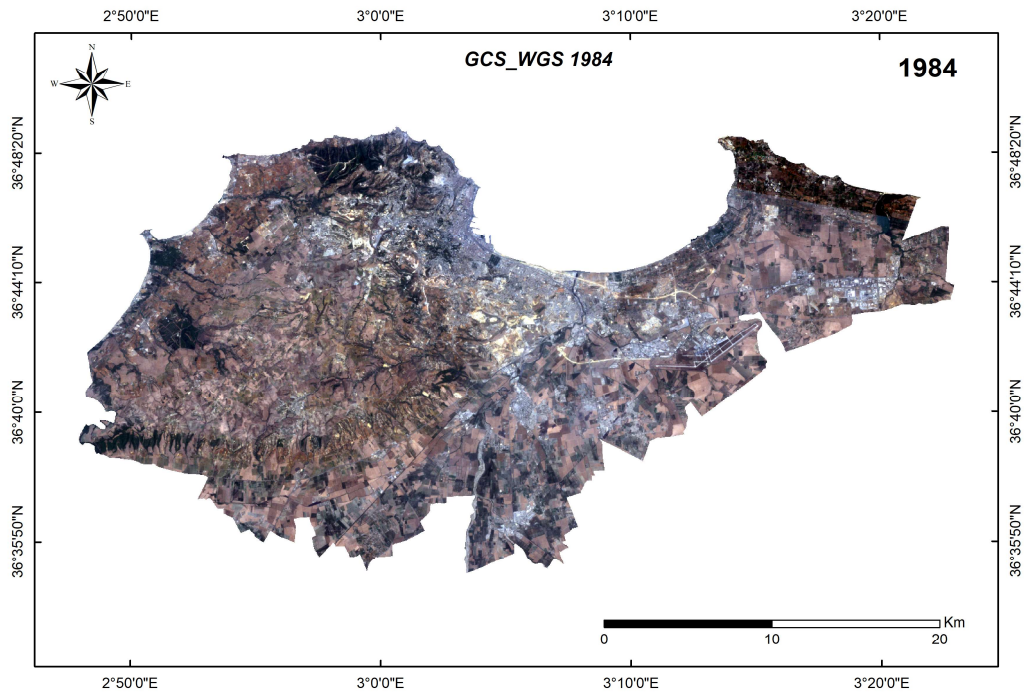
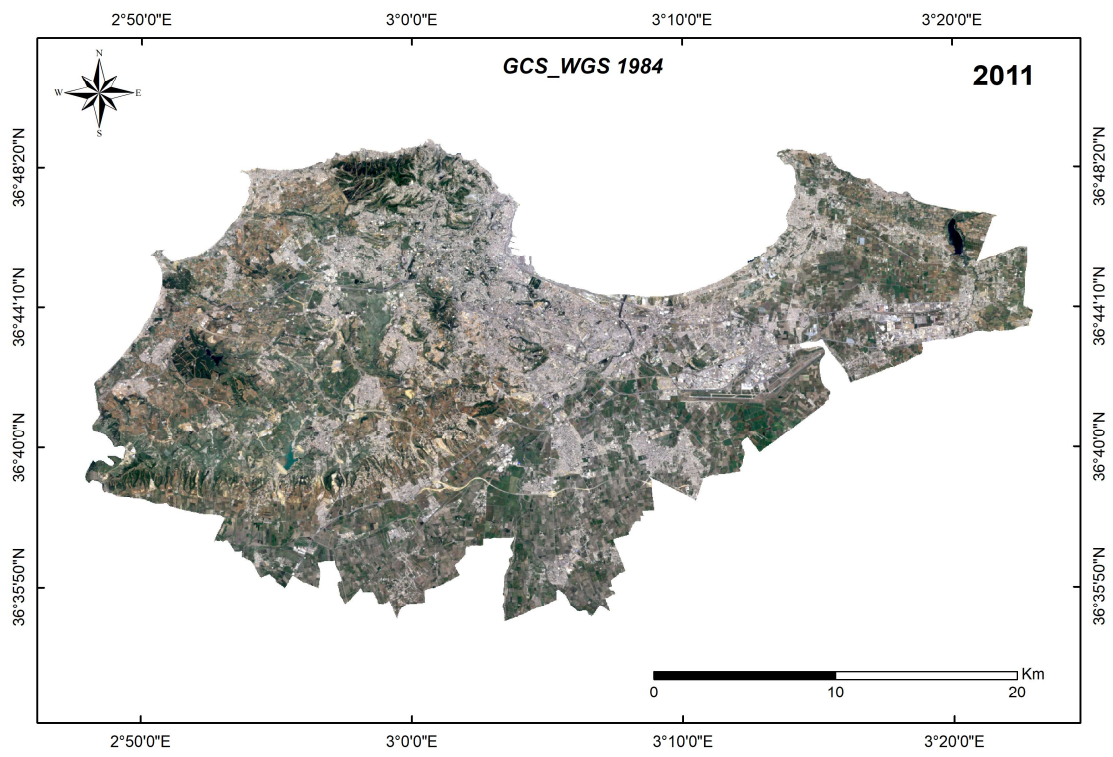
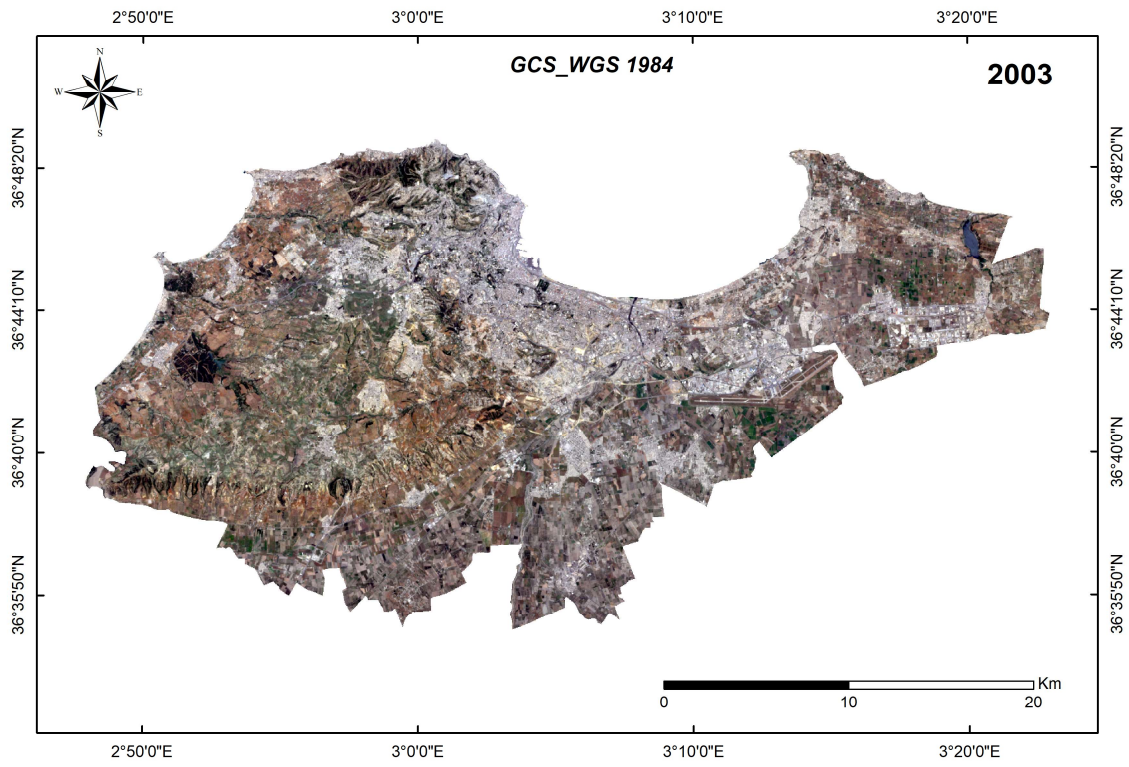


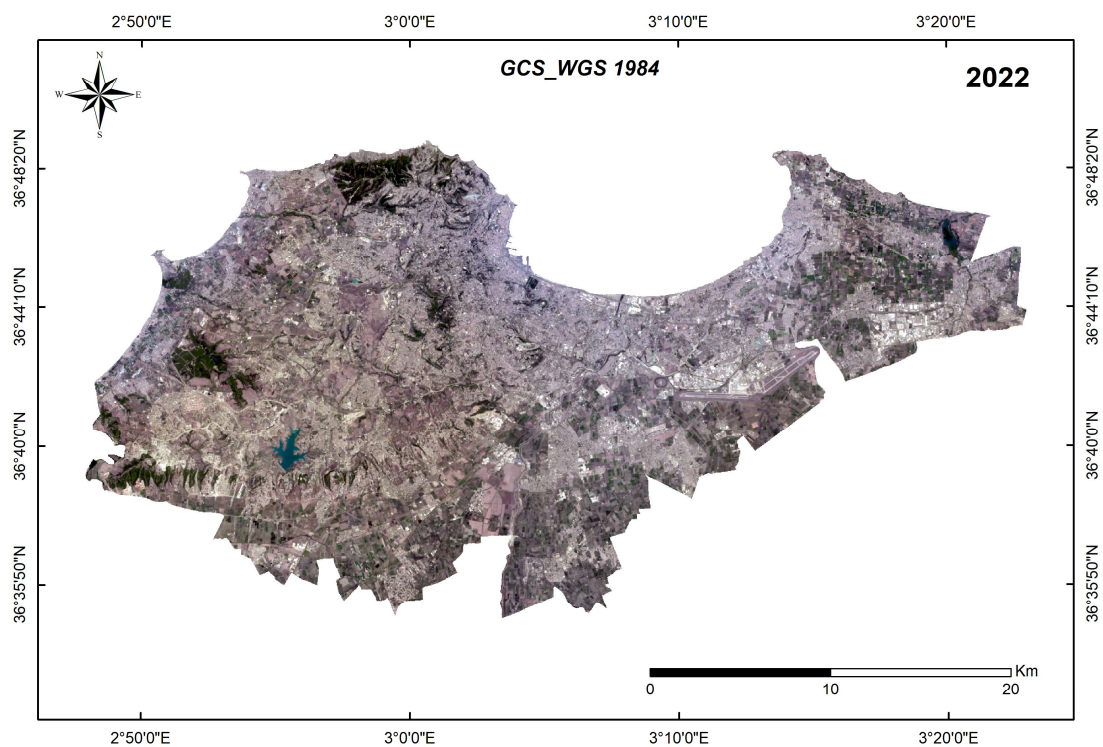
Figure 53 : La carte des sols de la partie nord-ouest d'Algérie (Rouge : la zone touchée par l'inondation)

Annexe 2

Images du satellite Landsat 5,7 et 8 utilisées pour l'étude de l'occupation du sol







**Figure 54: Images Landsat 5, 7 et 8 découpées selon les limites administratives de la wilaya d'Alger**

## Annexe 3

## Carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger

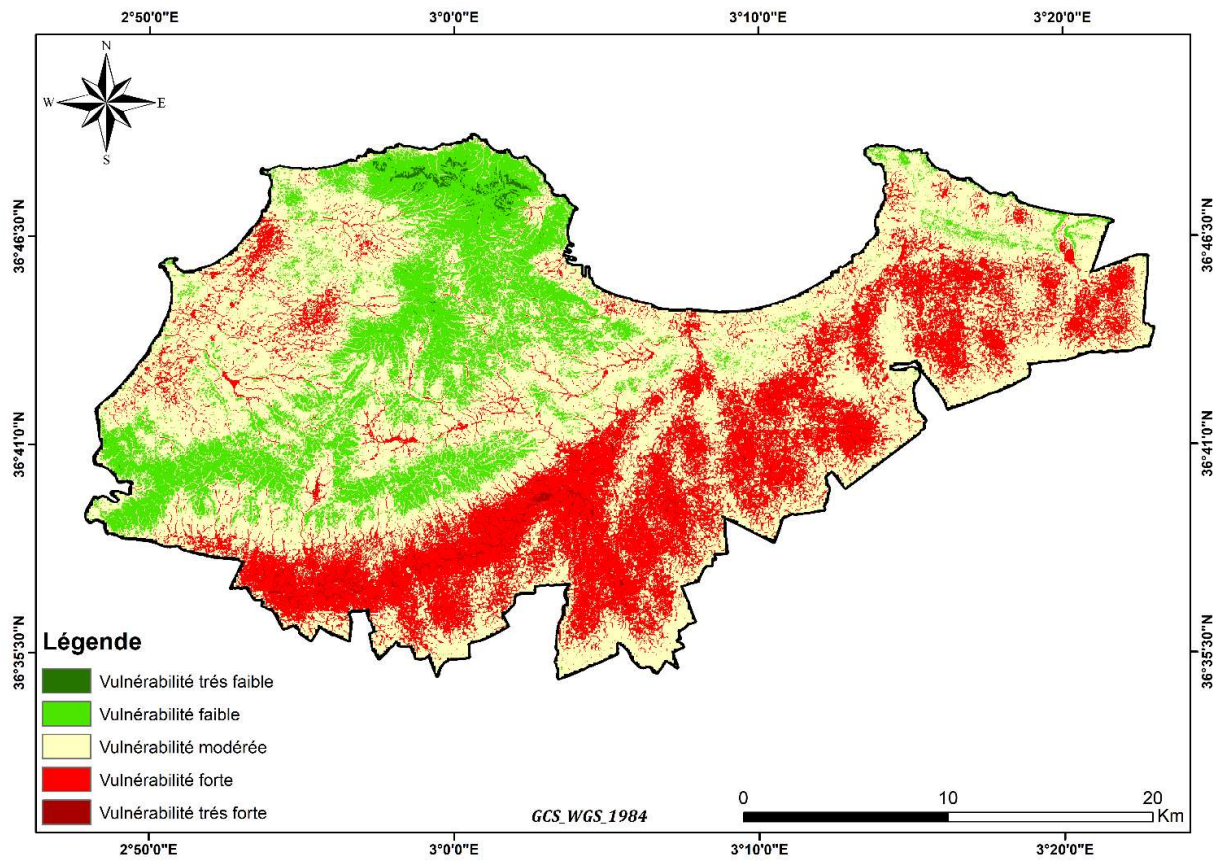


Figure 55: Carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger (Ziadi, 2022)

## Annexe 4

## Explications des phases de la NAO

L'activité NAO est forte lorsque la bascule de pression est forte entre l'Islande et les Açores. Une bascule forte implique d'importantes fluctuations de la pression autour de sa moyenne dans chacun de ces centres, et que ces fluctuations soient opposées (anti-corrélées).

L'activité NAO est au contraire faible lorsque la pression ne varie pas conjointement au sud et au nord, ou lorsque la pression varie peu. L'indice NAO est calculé pour osciller autour de zéro. Ainsi, il est positif lorsque la bascule penche vers le nord, négatif lorsqu'elle penche vers le sud, et proche de zéro lorsque la bascule est à plat (activité NAO faible).

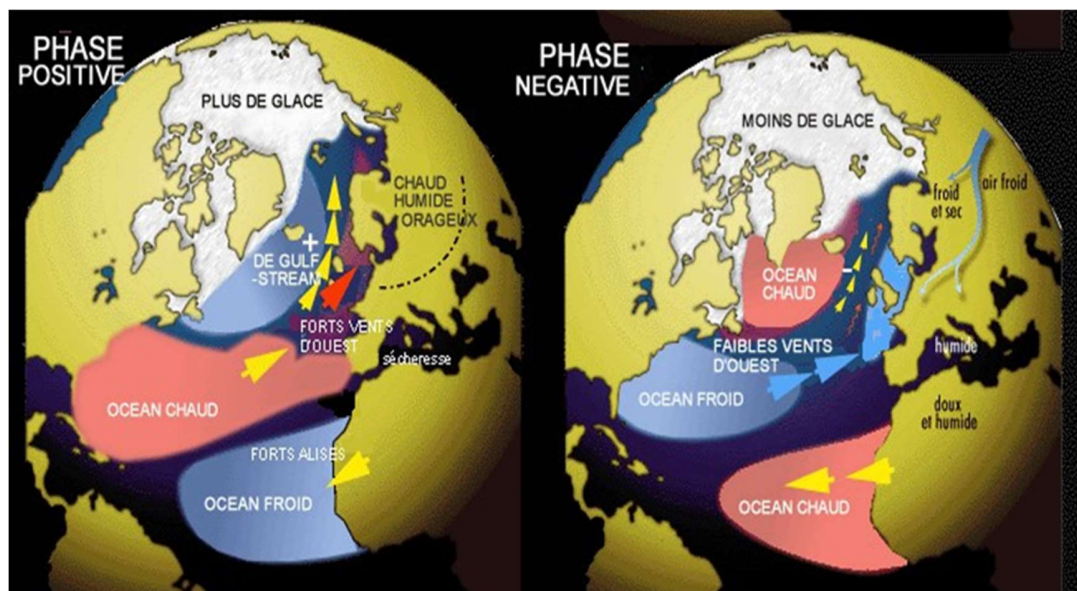
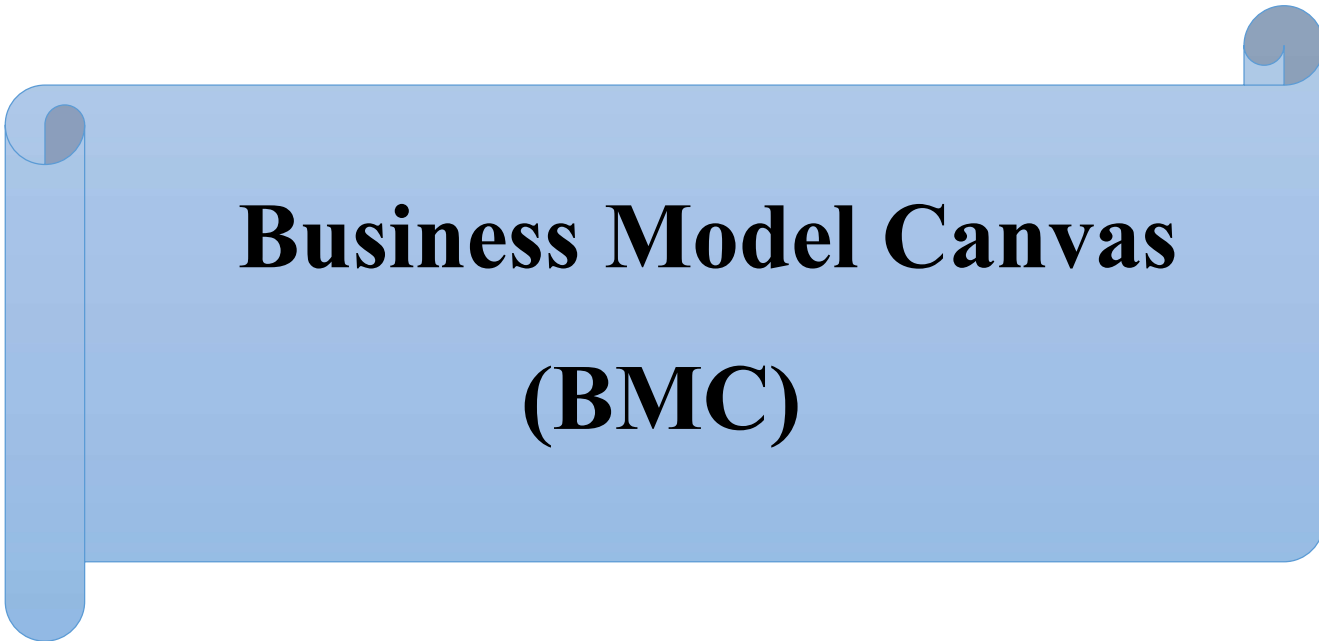


Figure 56: Schéma illustratif des phases positive et négative de la NAO

## **Annexe 5 : Business Model Canvas**



# **Business Model Canvas (BMC)**

---

**Sommaire**

<b>Introduction.....</b>	<b>X</b>
<b>CHAPITRE 1 : Présentation du Projet .....</b>	<b>X</b>
1/ Idée du Projet (La solution proposée).....	X
2/ Proposition de valeur .....	XI
3/ Equipe de Travail.....	XII
4/ Objectifs du Projet .....	XIII
5/ Activités Clés.....	XIII
5/ Calendrier de réalisation du projet.....	XV
<b>CHAPITRE 2 (Aspects innovants).....</b>	<b>XVI</b>
1/ Domaine et nature de l'innovation .....	XVI
<b>CHAPITRE 3 (Analyse stratégique du marché).....</b>	<b>XVI</b>
1/ Présentation du segment de marché.....	XVI
2/ Mesure de l'intensité de concurrence .....	XVIII
3/ Canaux de distribution.....	XVIII
4/ Relation avec les Clients.....	XIX
<b>CHAPITRE 4 : Plan de production et d'organisation .....</b>	<b>XX</b>
1/ Ressources Clés .....	XX
2/ Processus de Fabrication.....	XXI
3/ Restauration .....	XXI
4/ Sources de Revenues .....	XXII
5/ Main d'œuvre.....	XXIII
6/ Partenaires Clés .....	XXIII
<b>CHAPITRE 5 : Plan Financier.....</b>	<b>XXV</b>
1/ Coûts et charges .....	XXV
2/ Production envisagée .....	XXVII
<b>CHAPITRE 6 : Prototype expérimental.....</b>	<b>XXVIII</b>
1/ Prototype.....	XXVIII
2/ Logos de l'entreprise .....	XXIX

## Introduction

Dans un contexte mondial marqué par l'augmentation des catastrophes naturelles, la compréhension précise des risques des catastrophes naturelles comme les inondations, les incendies et les submersions et l'anticipation des changements climatiques sont devenus des enjeux cruciaux pour les gouvernements, les organisations et les communautés. A l'instar de la catastrophe météorologique qui s'est produite récemment, le 24/05/2023 au Centre Ouest de l'Algérie, les dégâts matériels et humains engendrés, pourront être minimisés ou même évités dans le futur grâce à des études permettant une gestion efficace des risques et une planification stratégique pour la prévention et l'adaptation aux inondations et d'autres catastrophes naturelles.



**Figure 57: Photographies de catastrophes naturelles (source : internet)**

## CHAPITRE 1 : Présentation du Projet

### 1/ Idée du Projet (La solution proposée)

Notre projet de création d'un bureau d'études d'expertise intitulé (CPF expertise), sis à El Harrach, spécialisé dans la cartographie des catastrophes naturelles maritimes et terrestres, ainsi que la prévision du climat futur.

Ce bureau d'études a le statut juridique d'une SARL (société à responsabilité limitée) avec un code de registre de commerce de **607007 (Bureau d'ingénierie et d'études techniques)** Récupéré à partir de Centre National du Registre du Commerce (CNRC).

L'idée a émergé du fait que les méthodes traditionnelles utilisées pour la détection précise de l'étendue des catastrophes naturelles se révèlent souvent insuffisantes pour fournir une

cartographie complète et fiable des zones touchées par les inondations, par exemple. L'existence d'un besoin pressant d'une approche plus avancée et innovante pour évaluer l'étendue des inondations de manière précise et fiable est également indéniable surtout celle causée par les submersions marines.

C'est dans ce contexte que notre projet se distingue en introduisant une nouvelle technique pour déterminer l'étendue des catastrophes naturelles en Algérie. Cette approche novatrice repose sur l'utilisation de technologies de pointe, telles que l'imagerie satellitaire, les logiciels et l'intelligence artificielle, combinées à des données locales et à une expertise spécifique au contexte algérien, pour une **gestion efficace des risques et une planification stratégique pour la prévention et l'adaptation aux inondations et d'autres catastrophes naturelles.**

## **2/ Proposition de valeur**

La valeur ajoutée de notre projet réside précisément dans l'introduction de cette nouvelle technique, qui n'est pas utilisée actuellement en Algérie pour **évaluer l'étendue des inondations et d'autres catastrophes.** En exploitant les avantages de l'imagerie satellitaire à haute résolution et les capacités avancées des logiciels qui présentent également l'avantage de **minimiser le temps en offrant ainsi un avantage économique supplémentaire à nos clients.**

De plus, notre projet intègre également l'utilisation de l'intelligence artificielle pour une analyse avancée des risques et leur gestion. Grâce à des techniques d'intelligence artificielle avancées, nous sommes en mesure d'exploiter de grandes quantités de données géo-spatiales et climatiques et d'identifier des modèles, des tendances et des corrélations pour évaluer les risques de manière plus précise. Cela permet à nos clients de prendre des décisions éclairées et de mettre en place des mesures de gestion adaptées pour minimiser les impacts des catastrophes naturelles. Un exemple de modèle potentiel à utiliser est **AdaBoost (Adaptive Boosting)**. Cet algorithme de classification consiste à associer de nombreux classificateurs de base (exemple : arbre de décision) pour construire un ensemble classificateur plus performant. Chaque fois qu'un classificateur de base est entraîné, les données mal classées précédemment seront reprises avec une pondération plus élevée, dans le but que dans les itérations futures, le nouveau modèle rectifie les erreurs du précédent modèle, ce qui permettra d'améliorer les performances globales. L'idée est que les classificateurs devront se concentrer sur les données difficilement classables correctement.

En combinant la nouvelle technique de cartographie des inondations, l'utilisation de l'imagerie satellitaire à haute résolution, les capacités avancées des logiciels et l'intelligence artificielle, nous offrons une approche complète et innovante pour évaluer les risques et gérer efficacement les catastrophes naturelles. Cela permet à nos clients de bénéficier d'une meilleure compréhension des dangers potentiels, d'une prise de décision plus rapide et de mesures de protection plus efficaces, renforçant ainsi leur résilience face aux catastrophes.

- 1. Cartographie détaillée des catastrophes naturelles :** Notre projet offre une cartographie précise de l'étendue des catastrophes naturelles maritimes et terrestres. Grâce à une technique innovante, nous sommes en mesure de fournir une représentation détaillée des zones affectées par ces catastrophes. Cela permet aux gouvernements, aux organisations et aux communautés de mieux comprendre l'ampleur des dommages et de prendre des décisions éclairées pour la gestion des crises.
- 2. Prévisions climatiques futures :** Nous proposons des prévisions climatiques pour les 30 prochaines années. Cette capacité à anticiper les changements climatiques aide les parties prenantes à prendre des mesures préventives et à planifier stratégiquement leurs activités en fonction des futurs scénarios climatiques. Cela permet une meilleure adaptation aux conditions environnementales changeantes et contribue à réduire les risques associés aux catastrophes naturelles.
- 3. Utilisation de l'intelligence artificielle (IA) :** Notre projet intègre l'utilisation de l'intelligence artificielle pour une analyse avancée des risques et leur gestion. L'IA permet d'exploiter de grandes quantités de données géo-spatiales et climatiques pour identifier des modèles, des tendances et des corrélations qui peuvent être utilisés pour évaluer les risques de manière plus précise et pour recommander des mesures de gestion adaptées. Cela permet une approche plus proactive dans la réduction des risques et la prise de décisions informées.

### **3/ Equipe de Travail**

L'équipe du projet est composée de Gaouaou Farah, une ingénieure spécialisée en Environnement marin et côtier. J'ai acquis une solide expertise dans différents domaines grâce à ses formations approfondies. Tout d'abord, J'ai suivi des formations en entrepreneuriat, ce qui me confère une compréhension approfondie des stratégies et des compétences nécessaires pour mener

---

à bien des projets. De plus, et je suis également formée à l'intelligence artificielle, ce qui me permet de comprendre et d'appliquer des concepts tels que l'apprentissage automatique et l'analyse des données. Aussi compétente dans l'utilisation de PowerPoint, Word et Excel ainsi que les logiciels de cartographie, de systèmes d'informations géographiques et de traitements d'images satellitaires (ArcGIS, SNAP, SeaDas, ENVI), cela me permet de réaliser des analyses géo-spatiales complexes et de créer des cartes précises.

D'autre part, ma partenaire de projet est Hamrouche Soumia, ingénieure spécialisée en Environnement marin et côtier. Elle a également suivi des formations dans différents domaines pour enrichir son expertise. En particulier, elle s'est formée au digital marketing, lui permettant de comprendre les stratégies de marketing en ligne, les techniques de promotion et de communication digitale. Une solide compétence en informatique. Elle est à l'aise dans l'utilisation des logiciels courants tels que PowerPoint, Word et Excel. Elle a également acquis des compétences dans l'utilisation de logiciels (ArcGIS, SNAP, SeaDas, ENVI).

#### **4/ Objectifs du Projet**

L'intérêt majeur de ce projet est de proposer une gestion des catastrophes naturelles et des risques climatiques mais aussi de fournir une évaluation précise et fiable de l'étendue des inondations, ainsi que de cartographier les zones vulnérables aux catastrophes naturelles en Algérie. Nous souhaitons également fournir des prévisions climatiques sur une période de près de 30 ans, en utilisant des modèles climatiques avancés et des algorithmes d'intelligence artificielle

Notre objectif principal est de fournir des **cartes détaillées et précises** représentant à la fois **l'étendue des catastrophes naturelles** (en mettant l'accent sur les inondations) et identifiant les **zones vulnérables**. Ce projet contribuera à renforcer la résilience des communautés face aux catastrophes naturelles, en fournissant des solutions concrètes, des recommandations stratégiques et une expertise technique pour une meilleure gestion des risques et une protection efficace des populations et de l'environnement.

#### **5/ Activités Clés**

**Acquisition des données :** Nous acquérons des données à partir de différentes sources pour notre projet. Nous utilisons les données satellitaires provenant de deux sites internet de Copernicus,

qui fournissent des images Sentinel, ainsi que l'USGS, qui met à disposition les images Landsat et d'autres données. De plus, nous obtenons des données ou des images satellitaires à très haute résolution de l'ASAL, ce qui est essentiel pour notre travail.

En ce qui concerne les données climatiques, nous nous appuyons sur l'ANRH et l'ONM ainsi que le site web de climat Blue pour obtenir des séries de données climatiques, telles que les précipitations, les températures et l'évapotranspiration. Ces données sont cruciales pour nos études climatiques et pour prévoir le climat futur. Nous recueillons également d'autres données pertinentes, telles que les débits des oueds, qui complètent notre analyse et notre compréhension des conditions environnementales.

**Analyse et traitement des données :** Nous effectuons une série d'étapes afin d'obtenir des résultats fiables. En ce qui concerne les images satellitaires, nous commençons par analyser les données pour détecter d'éventuelles corrections géométriques ou atmosphériques nécessaires. Cela peut inclure des corrections de distorsion géométrique, des corrections atmosphériques pour éliminer les effets indésirables, ainsi que des opérations de mosaïquage et de réduction de speckle pour améliorer la qualité des images. Ces étapes garantissent que les données satellitaires sont prêtes pour les analyses ultérieures.

Pour les données climatiques, nous procédons à une analyse approfondie afin de détecter les données manquantes. Nous éliminons les données manquantes et comblons les lacunes en utilisant des techniques appropriées. Ensuite, nous appliquons des techniques et des modèles spécifiques pour traiter les données climatiques et satellitaires et obtenir les résultats souhaités. Cela peut inclure l'utilisation de méthodes statistiques, de modèles climatiques ou d'autres outils d'analyse pour dériver des informations significatives à partir des données climatiques.

En réalisant ces étapes d'analyse et de traitement, nous nous assurons que les données satellitaires et climatiques sont prêtes pour les analyses ultérieures et nous pouvons obtenir des résultats fiables et pertinents.

**Développement de modèles :** Notre objectif est d'utiliser l'intelligence artificielle pour créer des modèles adaptés en fonction des données fournies et des résultats souhaités pour prévoir le climat futur.

**Génération de cartes et de rapports d'expertise :** Nous fournissons des cartes détaillées et précises qui mettent en évidence l'étendue des zones touchées par les catastrophes naturelles ainsi que leur vulnérabilité. Ces cartes fournissent des informations claires et visuelles sur les régions concernées, en mettant l'accent sur les différentes catégories de risques et de dommages potentiels.

Nos cartes incluent des données géo-spatiales spécifiques, telles que la localisation exacte des zones touchées, l'ampleur des dégâts, la densité de population, les infrastructures critiques et d'autres indicateurs clés. Elles permettent aux utilisateurs de visualiser rapidement et facilement les zones les plus exposées et de comprendre l'impact potentiel des catastrophes naturelles.

En ce qui concerne les rapports d'expertise, nous adoptons une approche qui allie le moyen et le court terme. Nous fournissons des analyses détaillées basées sur des études approfondies, en mettant l'accent sur les aspects clés tels que les prévisions des risques futurs, les mesures de prévention et d'adaptation recommandées, ainsi que les stratégies de gestion des catastrophes. Nos rapports sont conçus de manière à fournir des informations exploitables et pratiques pour les gouvernements, les organisations et les communautés concernées.

#### **Formation et sensibilisation**

- Organiser des sessions de formation sur l'utilisation des outils SIG et l'interprétation des cartes générées.
- Sensibiliser les parties prenantes aux risques climatiques et aux mesures de gestion des catastrophes naturelles.

#### **5/ Calendrier de réalisation du projet**

**Tableau 11 : Calendrier de Projet**

Equipment	La réalisation	La durée (Mois)				
		1	2	3	4	5
<b>Etape 01</b>	Etude préalable : choix de l'emplacement de l'unité de production, préparation des documents nécessaires	X				
<b>Etape 02</b>	Commande de matériel		X			
<b>Etape 03</b>	Location d'un siège de production	X				
<b>Etape 04</b>	Installation d'équipement	X				

Equipment	La réalisation	La durée (Mois)				
		1	2	3	4	5
<b>Etape 05</b>	L'approvisionnement en matière première	X				
<b>Etape 06</b>	Début de la production		X			

## CHAPITRE 2 (Aspects innovants)

### 1/ Domaine et nature de l'innovation

Les aspects d'innovation de notre projet se distinguent par le fait qu'il constitue le premier concept en Algérie qui utilise la technique de l'imagerie **Radar (RADIO DETECTION AND RANGING)** pour déterminer l'étendue des catastrophes naturelles sur une échelle spatio-temporelle, mais aussi l'utilisation des modèles d'intelligence artificielle pour prévoir le climat futur (près de 30 ans). Notre projet inclue également plusieurs formations SIG avec une flexibilité de choix.

## CHAPITRE 3 (Analyse stratégique du marché)

### 1/ Présentation du segment de marché

Nos clients potentiels comprennent la DGPC (Direction Générale de la Protection Civile), qui est responsable de la gestion des situations civiles en cas de catastrophe naturelle. Ils comprennent également les chefs de communes, les chefs de daïras et les chefs de wilayas

En situation de catastrophe naturelle entraînant des conséquences dévastatrices sur les ressources humaines et matérielles, il est essentiel de mettre en place des mesures visant à maîtriser efficacement la situation, tout en garantissant une supervision appropriée. Un exemple marquant de cette approche s'est produit lors des inondations survenues dans les villes de Kolea et Tipaza le 23 mai 2023. À cette occasion, les autorités compétentes ont joué un rôle central dans la coordination des opérations d'urgence et la mise en place de stratégies adaptées afin de gérer cette crise sans précédent. Les efforts déployés pour assurer la sécurité des citoyens, la protection des infrastructures clés et la restauration des services essentiels témoignent de l'importance cruciale d'une gestion professionnelle dans de telles situations.

Nous visons également à travailler avec l'ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). Nous avons identifié une opportunité de marché pour un Service spécialisé qui n'est pas actuellement fonctionnel. Cette collaboration mutuellement bénéfique permettra de

combiner nos compétences et nos ressources pour fournir une solution innovante répondant aux besoins du marché.

On présente nos offres spécialisées pour la marine nationale, qui est en parfait accord avec la nature de nos compétences. Notre expertise se concentre notamment sur l'étude des catastrophes naturelles marines, avec une attention particulière portée aux submersions. Compte tenu de l'importance stratégique de ces situations pour la marine nationale, nous mettons à disposition nos connaissances approfondies et notre expérience afin de fournir des solutions efficaces et adaptées à ces scénarios critiques.

De plus, nous accordons une importance aux clients particuliers en veillant à répondre à leurs besoins spécifiques. Nous nous engageons à offrir des services de qualité, tout en restant compétitifs sur le marché. Dans cette optique, nous avons conçu des offres sociales qui répondent à leurs attentes et leur permettent de bénéficier de nos prestations de haut niveau à des tarifs avantageux.

La Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, l'ENSH (École Nationale Supérieure d'Hydraulique), les CNL (Commissariats Nationaux du Littoral), ainsi que les entreprises étatiques et privées. Cette diversité de clients témoigne de notre volonté de collaborer avec des acteurs variés dans le but de fournir une expertise complète en matière de cartographie des catastrophes naturelles et des prévisions climatiques. Ceci Grâce à notre capacité à proposer des offres en parfaite adéquation avec les exigences du marché. Nous nous positionnons en tant que fournisseur privilégié de solutions innovantes. Notre objectif est de satisfaire les besoins variés de nos clients, qui incluent des étudiants, des responsables d'entreprises ainsi que des ministères. En mettant l'accent sur la rapidité et la qualité, nous sommes en mesure de livrer des résultats exceptionnels dans des délais très courts. Notre approche axée sur l'innovation nous permet de concevoir des solutions uniques et adaptées, tout en maintenant des normes de qualité élevées. Nous comprenons l'importance de répondre aux attentes spécifiques de chaque client, en tenant compte de leurs objectifs et contraintes individuels.

Au cours **des deux premières années**, notre marché cible principalement **le territoire national**, Cependant, **dès la troisième année**, nous souhaitons **élargir notre marché à l'échelle de l'Afrique**, qui est un continent vivement confronté aux catastrophes naturelles. A partir de **la**

---

**sixième année**, notre objectif est d'accéder au **marché international**. Nous visons à promouvoir nos solutions innovantes et notre expertise sur **le marché national**.

## **2/ Mesure de l'intensité de concurrence**

Les concurrents les plus importants sur le marché algérien se distinguent par leur ancienneté et leur position dominante telle que tous les bureaux d'étude et d'expertise de l'environnement. On cite : SEGREA, Ageos, Agerin et d'autres. On compte leur longue expérience et leur position de premier plan sur le marché algérien. Cependant, ils présentent des faiblesses, telles que l'absence de la technique que nous avons adoptée dans notre projet, ainsi que des délais relativement longs pour la prestation de services et des produits de moindre qualité.

## **3/ Canaux de distribution**

Nous avons développé des canaux de distribution complets et professionnels pour fournir nos services à nos clients :

Tout d'abord, nous offrons la possibilité à nos clients de nous rendre visite dans nos bureaux CPF Expertise aux niveaux d'El Harrach, où ils peuvent bénéficier d'une assistance en personne et d'une expérience face à face. Nos bureaux sont conçus pour offrir un environnement propice à l'échange d'informations et à la compréhension des besoins spécifiques de chaque client.

En outre, afin de faciliter le processus de demande de nos services, nous avons mis en place un site professionnel, CPFexpertise.dz. Ce site est une plateforme en ligne où nos clients peuvent soumettre leurs demandes, découvrir en détail notre expertise et accéder aux dernières nouveautés de notre entreprise. Nous veillons à ce que le site soit convivial, intuitif et sécurisé, afin de garantir une expérience utilisateur optimale.

Parallèlement à notre présence en ligne, nous sommes également accessibles par téléphone. Nous sommes disponibles pour répondre aux questions de nos clients et traiter leurs demandes par le biais d'appels téléphoniques. Cette approche permet d'instaurer une relation de confiance et de proximité avec nos clients, en offrant un support personnalisé et réactif.

Nous avons également pris en compte l'importance des réseaux sociaux dans la communication et la diffusion de notre expertise. Ainsi, nous maintenons une présence active sur les principales plateformes sociales, telles que Facebook, Twitter et LinkedIn. Ces canaux nous

permettent d'interagir avec notre public, de partager des informations pertinentes et de promouvoir nos services auprès d'une audience plus large.

Enfin, nous restons attentifs aux opportunités offertes par les appels d'offres. Nous participons activement aux processus d'appels d'offres liés à notre domaine d'expertise, ce qui nous permet de présenter nos compétences et nos solutions aux clients potentiels. Cette approche proactive nous permet de développer des partenariats stratégiques et de saisir de nouvelles opportunités de croissance.

#### **4/ Relation avec les Clients**

Afin d'optimiser la relation avec nos clients, nous envisageons la mise en place d'un programme de fidélité stratégique. Ce programme vise à récompenser la fidélité des clients et à renforcer leur engagement en offrant des avantages significatifs. À partir du troisième contrat conclu avec notre entreprise, les clients bénéficieront de réductions spéciales et de promotions exclusives. Ces avantages permettront de consolider la relation commerciale en fournissant une valeur ajoutée à nos clients réguliers. En outre, un avantage conséquent sera accordé au huitième contrat, où le client bénéficiera d'une réduction exceptionnelle de 75 % sur le prix normal. Cette mesure vise à récompenser la loyauté à long terme et à encourager les clients à poursuivre leur collaboration avec notre entreprise.

Nous offrons une variété d'options de formation adaptées aux besoins individuels de nos clients. Parmi nos offres figurent la formation avancée, qui vise à approfondir les compétences existantes en SIG et à explorer des concepts et des applications plus avancés. Nous proposons également une formation accélérée, conçue pour fournir une immersion rapide et intensive dans les principes fondamentaux et les pratiques du SIG. Enfin, nous proposons une formation axée spécifiquement sur les compétences de cartographie, offrant une expertise approfondie dans la création et l'analyse de cartes utilisant des outils SIG. Notre approche flexible et adaptative nous permet de répondre aux exigences spécifiques de nos clients en matière de formation SIG, en offrant des solutions sur mesure pour répondre à leurs besoins particuliers.

Notre bureau propose une gamme variée d'options en ce qui concerne le calendrier et les frais d'abonnement. En ce qui concerne le calendrier, nous offrons une grande flexibilité horaire tout au long de la durée du cours. Nous comprenons les contraintes des étudiants et des employés,

c'est pourquoi nous rendons les cours disponibles les week-ends. De plus, nous avons mis en place des frais d'abonnement avantageux pour les étudiants, avec une réduction de 10 %. Par ailleurs, nous offrons la possibilité d'un enseignement virtuel ou à distance, adapté aux besoins individuels ou aux groupes. Si un groupe comptant plus de 20 personnes souhaite suivre le cours, nous proposons des réductions supplémentaires de 15 % sur l'abonnement, en plus de prévoir des journées gratuites pendant la formation en fonction de la durée et du type d'abonnement. Enfin, chaque personne bénéficie d'un abonnement spécial, adapté à ses besoins spécifiques, car nous comprenons que chaque service est unique. Les formations dispensées par notre bureau sont certifiées, et nous fournissons des attestations agréées par l'État pour garantir la reconnaissance et la valeur ajoutée de nos programmes de formation.

## **CHAPITRE 4 : Plan de production et d'organisation**

### **1/ Ressources Clés**

**-Logiciels de télédétection et SIG (QGIS, SNAP, SeaDas) :** Utilisation des logiciels spécialisés tels que QGIS, SNAP et SeaDas pour effectuer des analyses géo-spatiales avancées, traiter les données satellitaires, créer des cartes, visualiser les résultats de manière professionnelle et générer des cartes précises et fournir des informations détaillées à nos clients.

**-Données Satellitaires et Climatiques :** L'utilisation de données satellitaires et climatiques telles que les images Sentinel-1 et Sentinel-2, les images Landsat, ainsi que les données statistiques climatiques telles que les précipitations, la température, l'évapotranspiration et les débits, est essentielle pour mener à bien des analyses approfondies.

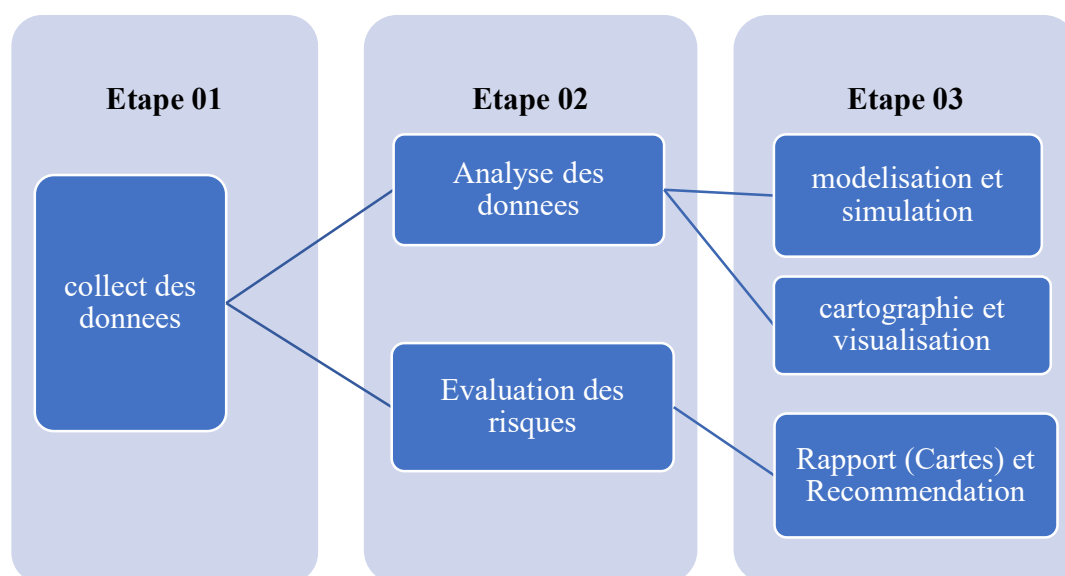
**-Imprimante professionnelle :** pour produire des copies physiques de nos cartes, rapports d'étude, et autres documents pertinents. Une imprimante fiable nous permettra de fournir à nos clients des documents de haute qualité qui renforcent notre professionnalisme et facilitent la communication visuelle.

**- Micro-ordinateur + Connection :** Utilisation d'un micro-ordinateur performant avec une connexion Internet stable pour effectuer des travaux de traitement des données, des analyses, et pour accéder aux ressources en ligne. Un environnement informatique robuste est essentiel pour

exécuter efficacement les logiciels, traiter les données volumineuses et collaborer avec d'autres experts.

- **Matériel bureautique et consommable** : tels que des bureaux, des chaises, des armoires de rangement, ainsi que des consommables tels que des fournitures de bureau, des cartouches d'encre, du papier et d'autres éléments nécessaires à notre fonctionnement quotidien.

## 2/ Processus de Fabrication



**Figure 58: Les trois Etapes de processus de production**

Il est important de noter que le processus exact suivi par CPF Expertise peut varier en fonction des spécificités du projet, des données disponibles et des besoins du client. Cependant, ces étapes générales fournissent une vue d'ensemble du processus de production typique pour un bureau spécialisé dans la cartographie des catastrophes naturelles maritimes et terrestres.

## 3/ Restauration

Dans le cadre de notre processus de production, nous collaborons avec l'Agence nationale de la ressource hydrologique (ANRH) et l'Office national de la météorologie (ONM) pour obtenir les données statistiques climatiques telles que les précipitations, la température, l'évapotranspiration et les débits. Parallèlement, pour les données satellitaires Sentinel-1, Sentinel-2 et les images Landsat, nous établissons également une collaboration avec l'Agence spatiale

algérienne (ASAL) et nous sommes en mesure d'extraire ces données à partir de deux sites : Copernicus et USGS.

#### **4/ Sources de Revenues**

- **Gains à partir de la production de cartes thématiques et de rapports d'expertise :** Notre source de revenus provient principalement de la vente de cartes thématiques détaillant l'étendue des catastrophes naturelles sur demande. Le prix fixe d'une seule carte est de **6000 DA**. Cependant, ce prix peut varier en fonction de la superficie de la région à cartographier et des exigences spécifiques du client. Nous adaptons nos tarifs en conséquence pour assurer une juste évaluation de nos produits.

En ce qui concerne les rapports d'expertise, nous générons des revenus grâce à la signature de contrats pour des projets de court et moyen terme. Pour les projets à court terme, le coût de notre étude est estimé à environ **12 000 DA** par mois. Cela nous permet de générer des revenus d'environ **70 000 DA** ou plus, selon la complexité et l'envergure de l'étude réalisée pour le client.

Pour les projets à moyen terme, le coût peut varier entre **2 000 000** et **3 000 000 DA**, en fonction du nombre de cartes et de rapports produits et interprétés. Ces tarifs reflètent le niveau d'expertise et de recherche nécessaire pour fournir des informations précises et fiables sur les catastrophes naturelles et les risques climatiques.

- **Gains à partir de la production de rapports détaillés sur les prévisions du climat futur (près de 30 ans) :** Le coût de ces rapports dépend de la demande spécifique du client en ce qui concerne la durée des prévisions. Par exemple, un rapport de prévision sur 5 ans est tarifé à 50 000 DA.

- **Les formations SIG payantes :** à des prix abordables pour répondre aux besoins variés de nos clients. Nos tarifs sont compétitifs, avec des options de formation à la carte disponibles à partir de 15 000 DA, des formations bloquées à 17 000 DA, des formations accélérées à 20 000 DA et des formations avancées à 25 000 DA.

- **La sous-traitance avec d'autres bureaux d'études :** Nous avons la possibilité de collaborer avec d'autres bureaux d'études en tant que sous-traitants, en mettant à disposition nos compétences et notre expertise dans des projets similaires. Cette collaboration permet d'établir des

partenariats stratégiques pour la réalisation de projets complexes, où nos connaissances complémentaires et notre expérience combinée peuvent apporter une valeur ajoutée significative.

## **5/ Main d'œuvre**

Au début du projet, nous commencerons avec une équipe de trois personnes (les deux fondatrices + un employé compétent). D'ici six ans, nous recruterons plus de personnes compétentes du domaine. Ceci dépendra de l'état d'avancement du projet sur les échelles prévues (Nationale, Afrique, etc.).

## **6/ Partenaires Clés**

**-ANRH (l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) :** En tant qu'organisme gouvernemental spécialisé dans la gestion des ressources hydrauliques en Algérie, l'ANRH possède une expertise inestimable dans la collecte de données hydrologiques, les prévisions climatiques et l'évaluation des risques liés aux catastrophes naturelles. Grâce à cette collaboration stratégique avec l'ANRH, notre projet bénéficie d'une source d'expertise de confiance, renforçant notre crédibilité auprès des clients et assurant des résultats de haute qualité.

**- ASAL (Agence Spatiale Algérienne) :** occupe une position clé en tant que deuxième partenaire stratégique. En tant qu'organisme gouvernemental responsable du développement et de l'utilisation des technologies spatiales en Algérie, l'ASAL apporte une expertise précieuse dans la collecte de données satellitaires et la gestion des ressources spatiales.

Grâce à notre partenariat avec l'ASAL, nous avons accès à une variété d'images satellitaires de haute résolution ainsi que d'autres données satellitaires spécialisées. Ces ressources sont essentielles pour réaliser des analyses détaillées, cartographier les zones touchées par les catastrophes naturelles et évaluer les risques climatiques.

L'ASAL nous offre également la possibilité de collaborer sur des projets de recherche et de développement, nous permettant d'explorer de nouvelles techniques et méthodologies dans le domaine de la télédétection et de la géo-spatialisation. Cette collaboration renforce notre expertise et notre capacité à fournir des solutions novatrices et précises à nos clients.

**- Entreprises de production du papier rouleau pour les cartes (Vally Chéraga, FARAS Khmis Elkhechna) :** Dans notre projet, nous avons le privilège de compter parmi nos partenaires

clés deux entreprises de production renommées de papier rouleau pour les cartes : Vally Chéraga et FARAS Khmis Elkhechna. Ces entreprises ont une expertise approuvée dans la fabrication de papier de haute qualité, spécialement conçu pour les besoins des cartes et des rapports.

En tant que troisième partenaire clé, la collaboration avec Vally Chéraga et FARAS Khmis Elkhechna est essentielle pour assurer la disponibilité d'un matériau de cartographie fiable et durable pour nos clients. Leur engagement envers l'excellence et leur capacité à produire des rouleaux de papier de haute qualité répondent parfaitement à nos exigences.

**-Entreprise de Production de l'Ancre pour les cartes (Palmapap à Bouzaréah) :** En tant qu'entreprise spécialisée dans la production de l'ancre pour les cartes, elle joue un rôle crucial dans la réalisation de notre mission.

En tant que quatrième partenaire clé, notre collaboration avec Palmapap garantit l'accès à une encre de haute qualité spécifiquement conçue pour les besoins de la cartographie. Leur expertise et leur engagement envers l'excellence assurent que nos cartes sont imprimées avec des encres durables et précises, offrant ainsi une lisibilité optimale et une qualité visuelle remarquable.

Grâce à Palmapap, nous sommes en mesure de produire des cartes de grande qualité qui permettent à nos clients de visualiser et d'analyser les catastrophes naturelles et les risques climatiques de manière précise et fiable. Leur ancre de haute qualité assure une impression nette et durable, garantissant que nos cartes restent informatives et lisibles pendant longtemps.

**-ONM (l'Office national de la météorologie) :** notre collaboration avec l'ONM nous permet d'accéder à des données météorologiques précieuses et à des prévisions climatiques anciennes fiables. Leur expertise en matière de collecte, d'analyse et d'interprétation des données climatiques nous aide à mieux comprendre les phénomènes météorologiques et à prévoir les événements futurs.

Grâce à l'ONM, nous sommes en mesure de fournir à nos clients des informations météorologiques actualisées, ce qui est essentiel pour la cartographie des catastrophes naturelles et des risques climatiques. Leur contribution en tant que partenaire clé renforce la qualité et la précision de nos prévisions et de nos analyses, permettant ainsi à nos clients de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques.

---

La collaboration avec l'ONM nous permet également d'apporter une expertise scientifique solide à notre projet. Leurs connaissances approfondies en matière de météorologie et de climatologie enrichissent nos capacités d'analyse et nous aident à développer des modèles prédictifs plus précis pour évaluer l'impact des catastrophes naturelles et des changements climatiques.

## CHAPITRE 5 : Plan Financier

### 1/ Coûts et charges

Tableau 12: Cout total du Projet

<b>Imprimante professionnelle</b>	<b>132267.5179 DA</b>
<b>Micro-ordinateur</b>	<b>80000 DA</b>
<b>Papier des cartes</b>	<b>44168,1116DA</b>
<b>Les cartouche d'encre</b>	<b>1,000,052 DA</b>
<b>Fournitures de bureau</b>	<b>5600 DA</b>
<b>Les Bureau</b>	<b>73 751,01 DA</b>
<b>Logiciels de bureautique (Microsoft office, antivirus)</b>	<b>10000 DA</b>
<b>Locale +Impos</b>	<b>76 000 0DA</b>
<b>Logiciels de télédétection et SIG (QGIS, SNAP, SeaDas)</b>	<b>Open source</b>
<b>Les l'images satellitaires</b>	<b>1.000.000 DA</b>
<b>Les charges de Communication</b>	<b>73920 DA</b>
<b>Totale</b>	<b>3032838.64 DA</b>



alamy

Image: Epson  
www.alamy.com



Tableau 13: Tableau des charges

Charge fixe	Catégorie	Coûts
	Locale	36 000 ODA
	Impos	40 000 DA

Charge variable	Catégorie	Coûts
	Electricité	125 000 DA
	Les images satellitaires	1.000.000 DA
	Le papier et ancre	44168,1116DA
	La somme : 1169168.112 DA	

➤ **La Charge de communication de la publicité : 73920 DA**

**Le coût de revient d'une étude de projet d'un mois =**

- Logiciels de télédétection et SIG (QGIS, SNAP, SeaDas) (Open Source Gratuit)
- Les l'images satellitaires (12000DA)
- Le papier (5000 DA)
- Encre (2000 DA)
- Fournitures de bureau (3000DA)
- Electricité (Projet d'un mois 13000 DA)
- Salaire des travailleurs (7000DA )

**44 000 DA**

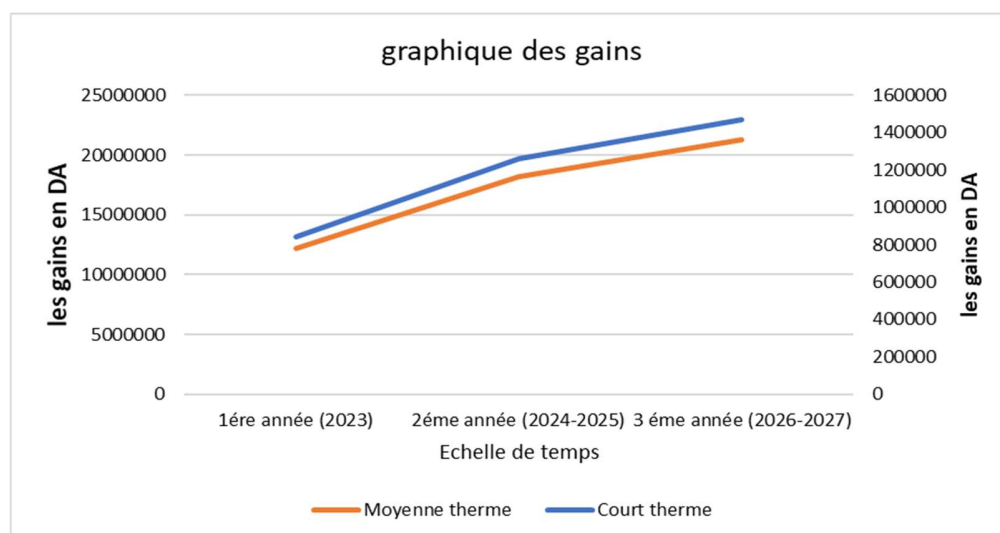
- Impôts (2000DA)
- Pour les projets à court terme, le coût de l'étude que nous effectuons est estimé à environ **120.000 DA** par mois. De ce fait, nous sommes en mesure de générer des revenus d'environ **70.000 DA** ou plus, en fonction de la complexité et de l'envergure de l'étude. Pour les projets à moyen terme, le coût peut varier entre **2.000.000 et 3.000.000 DA**, en fonction du nombre de cartes et de rapports produits et interprétés

## 2/ Production envisagée

Notre projet vise à réaliser entre **12 et 18 études complètes pour la première année. A partir de la 2ème et 3ème année, on vise plus de 18 études par an**, comprenant la production de cartes détaillées, de rapports approfondis et leur interprétation mais aussi les formation SIG. En se concentrant sur les études à **court terme**, nous sommes en mesure de générer un **bénéfice annuel estimé à 840 000 DA**. Si nous élargissons notre portée pour inclure à la fois les **études à court et à moyen terme**, notre **bénéfice potentiel sur une année s'élève à près de 12.156.000 DA**.

**Tableau 14:Résumé des gains**

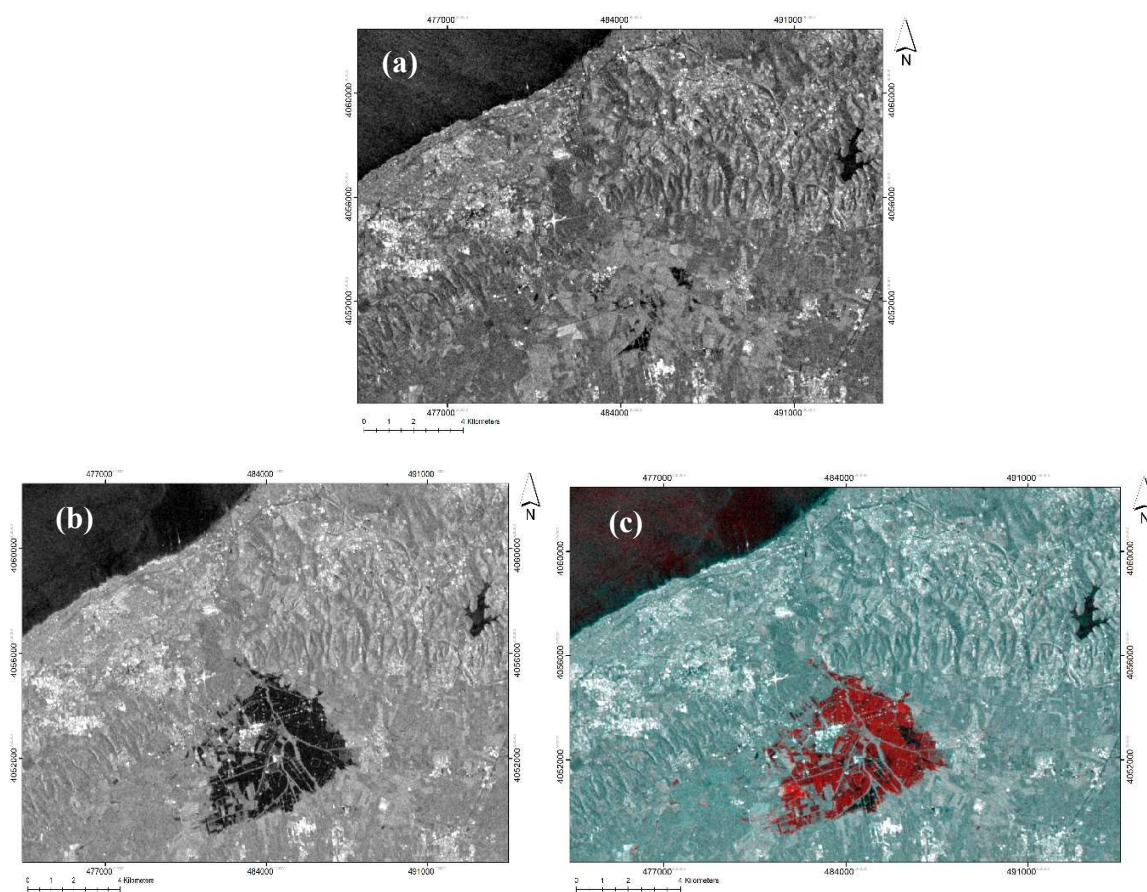
Gain de la premier année	Court terme : 840000 DA	Entre court et moy : 12156000 DA
<b>2ème année</b>	1260000 DA	18234000 DA
<b>3ème année</b>	1470000 DA	21273000 DA



**Figure 59: Evolution des gains à travers les 3 premières années****CHAPITRE 6 : Prototype expérimental****1/ Prototype**

La technique repose sur l'utilisation de **l'imagerie Radar (RADio Detection And Ranging)** du satellite Sentinel 1 : le principe est basé sur l'émission d'un faisceau lumineux et la mesure de son écho. Ces images radar s'avèrent précieuses pour la cartographie des inondations car elles ne sont pas gênées par les nuages et elles peuvent être acquises très peu de temps après l'événement. Les zones d'extension de la crue y sont également très visibles. Cette technique utilise une combinaison d'une image acquise pendant l'inondation avec une image acquise avant l'inondation, pour distinguer les zones inondées des masses d'eau permanentes.

L'application de Notre technique innovant sur la zone inondée qui chevauche entre les wilayas de Tipaza et de Blida, a permis de donner le prototype représenté dans la Figure 60 et de **détecter l'Etendue inondée dans un laps de temps de 05 minutes** (Nous avons personnellement réalisé ces cartes par cette technique à l'aide du logiciel SNAP et Arc GIS). Il s'agit ici de l'inondation du 23 janvier 2017



**Figure 60: Images Sentinel-1 montrant l'étendue de l'inondation du 23 janvier 2017 :  
(a) Image archive, (b) image de crise, (c) image traitée.**

## 2/ Logos de l'entreprise



Table 1 : Business Model Canvas du projet

<b>Partenaires Clés</b>	<b>Activités Clés</b>	<b>Proposition de valeur</b>	<b>Relation avec les Clients</b>	<b>Segments Client</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- ANRH (l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques)</li> <li>- ASAL (Agence Spatiale Algérienne)</li> <li>- <b>Entreprises de production du papier rouleau</b> pour les cartes (1/ Vally Chéraga, 2/FARAS Khmis Elkhechna)</li> <li>-Entreprise de Production de l'Ancre pour les cartes (Palmapap à Bouzaréah)</li> <li>-ONM (l'Office national de la météorologie)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Acquisition des <b>données</b></li> <li>- <b>Analyse</b> et traitement des données</li> <li>- Développement de <b>modèles</b></li> <li>- Génération de <b>cartes</b> et de <b>rapports</b> d'expertise</li> <li>- <b>Formation</b> et sensibilisation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Cartographie détaillée de l'étendue</b> des catastrophes naturelles <b>maritimes et terrestres</b> à l'aide d'une technique Innovante en <b>5 min</b></li> <li>- <b>Prévisions climatiques futures</b> (30 ans)</li> <li>- Utilisation de <b>l'intelligence artificielle</b> pour une analyse avancée des <b>risques et leurs Gestion</b></li> <li>- <b>Formation SIG</b> pour permettre aux clients de <b>gérer leurs propres données géo-spatiales</b></li> </ul>	<p>La Mis en place d'un <b>programme de fidélité</b> (à partir du <b>troisième contrat</b>, il y'aura des <b>réductions et des promotions spéciales. Au huitième contrat</b>, le client bénéficiera d'une réduction exceptionnelle <b>de 75 %</b> sur le prix normale)</p> <p>En ce qui concerne la <b>formation SIG</b>, nous proposons une variété de formations, allant des formations accélérées et avancées à des formations à la carte et bloquée, le tout accompagné de <b>réductions très attrayantes.</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>DGPC</b> La Direction Générale de la Protection Civile</li> <li>- Responsables de la gestion des situations civiles en cas de catastrophes naturelles (chefs de communes, de daïras et de wilaya)</li> <li>-<b>ANRH</b> (l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques)</li> <li>- Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement</li> <li>- <b>ENSH</b> École Nationale Supérieure d'Hydraulique</li> <li>-La Marine Nationale</li> <li>-Les <b>CNL</b> (Commissariats Nationaux du Littoral)</li> <li>-Entreprises Etatiques et privées</li> <li>-Les particuliers</li> </ul>
	<b>Ressources Clés</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Logiciels de <b>télé-détection</b> et <b>SIG</b> (QGIS, SNAP, SeaDas)</li> <li>-<b>Données Satellitaires</b> et <b>Climatiques</b></li> <li>-<b>Imprimante</b> professionnelle</li> <li>- <b>Micro-ordinateur</b></li> <li>- Connection internet</li> <li>- Matériel bureautique et consommable</li> </ul>		<b>Canaux de distribution</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Les clients peuvent nous rendre <b>visite</b> dans nos <b>bureaux CPFexpertise</b> pour une assistance en personne et une <b>expérience face à face.</b></li> <li>-<b>Le site professionnel CPFexpertise.dz</b> est disponible pour soumettre des demandes en ligne, y découvrir notre expertise et nos dernières nouveautés.</li> <li>- nous sommes également accessibles <b>par téléphone</b> pour répondre aux questions et traiter les demandes par le biais d'appels téléphoniques</li> <li>-Les réseaux sociaux</li> <li>-Appels d'offres</li> </ul>	
<b>Structure des Coûts</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Imprimante professionnelle (l'amortissement) <b>132267.5179 DA</b></li> <li>Micro-ordinateurs <b>80000 DA</b></li> <li>Papier des cartes <b>44168,1116DA</b></li> <li>Cartouches d'encre <b>1,000,052 DA</b></li> <li>Fournitures de bureau <b>5600 DA</b></li> <li>Bureaux <b>751,01 DA</b></li> <li>Logiciels de bureautique (Microsoft office, antivirus) <b>10000 DA</b></li> <li>Local +Impos <b>760 000 DA</b></li> <li>Logiciels de télé-détection et SIG (QGIS, SNAP, SeaDas) Open source</li> <li>Images satellitaires <b>1.000.000 DA</b></li> <li><b>Totale :3032838.64 DA</b></li> </ul>		<b>Sources de Revenues</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Gains à partir de la production de cartes thématiques et de rapports d'expertise</li> <li>- Gains à partir de la production de rapports détaillés sur les prévisions du climat futur (près de 30 ans)</li> <li>- Les formations SIG payantes</li> <li>- La sous-traitance avec d'autres bureaux d'études</li> </ul>		

---

## Résumé

Ce mémoire porte sur l'analyse de l'évolution spatiotemporelle des inondations dans la wilaya d'Alger, en se focalisant sur l'étude de l'évolution de deux facteurs causaux : les précipitations et l'urbanisation. Pour ce faire, la méthode de la classification supervisée a été utilisée pour l'étude de l'occupation du sol ainsi qu'une étude climatique complète des précipitations de la région. Les résultats montrent que la wilaya, au cours des cinquante dernières années, a vu une augmentation quasi-linéaire de l'artificialisation de ses sols depuis les années quatre-vingt jusqu'à l'année 2011 (avec un taux de 2,92 km<sup>2</sup>/an soit 0,38 %) où la cadence a considérablement augmenté (9,68 km<sup>2</sup>/an soit 1,27%) qui s'est traduit en parallèle par une diminution globale des terres agricoles (de 46.80% à 29.24 % de la superficie d'Alger). Cette urbanisation croissante a été accompagnée d'une augmentation significative des précipitations annuelles cumulées, atteignant 932,26 mm en 2010. Cette tendance à la hausse s'accompagne de pluies intenses et d'épisodes pluvieux extrêmes supérieurs à 50 mm depuis 2003, entraînant des crues rapides. L'analyse du répertoire des inondations de la wilaya d'Alger démontre que le nombre a augmenté de manière exponentielle depuis les années 2000, avec une augmentation plus marquée à partir de 2006. La fréquence est passée d'une moyenne de deux inondations par an entre 1946 et 2000, à dix inondations par an entre 2000 et 2021, soit une augmentation d'un facteur de cinq. Cette Etude peut contribuer de manière significative à la gestion des catastrophes, en fournissant des informations essentielles pour prendre des mesures préventives et mettre en place des stratégies efficaces de préparation et de réponse aux catastrophes.

**Mots clés :** wilaya d'Alger, inondations, Analyse spatiotemporelle, occupation du sol, climatologie.

---

## Abstract

This end of studies project deals with the analysis of the spatiotemporal evolution of flooding in Algiers. It focuses on the study of the evolution of two causal factors: precipitation and urbanization, by employing the supervised classification method for the study of land use and a climatic study of the region's precipitation. The results show that the wilaya, over the past fifty years, has seen a quasi-linear increase in the artificialization of its soils from the eighties until 2011 (with a rate of 2.92 km<sup>2</sup>/year or 0.38%), then the rate increased considerably (9.68 km<sup>2</sup>/year or 1.27%) from 2011-2022, resulting in a parallel overall decrease in agricultural land (from 46.80% to 29.24% of Algiers' surface area). This increasing urbanization has been accompanied by a significant increase in cumulative annual rainfall, reaching 932.26 mm in 2010. This upward trend resulted in extreme rainfall events since 2003, leading to rapid flooding. Analysis of the flood directory of Algiers shows that the number of floods has increased exponentially since the 2000s, with a more marked increase since 2006. The frequency has risen from an average of two floods per year between 1946 and 2000, to ten floods per year between 2000 and 2021, an increase by a factor of five. This study can make a significant contribution to disaster management, providing essential information for taking preventive measures and implementing effective disaster preparedness and response strategies.

**Key words:** wilaya of Algiers, floods, spatiotemporal analysis, land use, climatology

---

## المخلص

تتناول هذه الأطروحة تحليل التطور الزمني المكاني للفيضانات في ولاية الجزائر، مع التركيز على دراسة تطور عاملين مسببين: هطول الأمطار والتحضر، من خلال استخدام أسلوب التصنيف الخاضع للإشراف لدراسة استخدامات الأراضي ودراسة مناخية كاملة لهطول الأمطار في المنطقة. أظهرت النتائج، أن الولاية شهدت على مدى الخمسين عامًا الماضية زيادة شبه خطية. في تصنيع تربتها من الثمانينيات حتى عام 2011 (بمعدل 2.92 كم<sup>2</sup>/سنة أو 0.38 %)، ثم زاد المعدل بشكل كبير (9.68 كم<sup>2</sup>/سنة أو 1.27 %). من 2011-2022، مما أدى إلى انخفاض إجمالي مواز في الأراضي الزراعية (من 46.80% إلى 29.24% من مساحة الجزائر العاصمة). ترافق التوسع الحضري مع زيادة كبيرة في معدل هطول الأمطار السنوي التراكمي، حيث وصل إلى 932.26 ملم في عام 2010. وقد رافق هذا الاتجاه التصاعدي هطول أمطار غزيرة تزيد عن 50 ملم منذ عام 2003، مما يؤدي إلى فيضانات سريعة. يُظهر تحليل دليل الفيضانات لولاية الجزائر أن عدد الفيضانات قد ازداد بشكل كبير منذ العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، مع زيادة ملحوظة أكثر من عام 2006 فصاعدًا. ارتفع معدل حدوث الفيضانات من متوسط فيضانيين سنويًا بين عامي 1946 و2000، إلى عشرة فيضانات سنويًا بين عامي 2000 و2021، بزيادة قدرها خمسة أضعاف. يمكن أن تسهم هذه الدراسة مساهمة كبيرة في إدارة الكوارث، وتوفير المعلومات الأساسية لاتخاذ التدابير الوقائية وتنفيذ استراتيجيات فعالة للتأهب للكوارث والاستجابة لها.

**الكلمات الدالة:** ولاية الجزائر، الفيضانات، التحليل الزمني والمكاني، استخدام الأراضي، علم المناخ

---