

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**

**Scientifique**

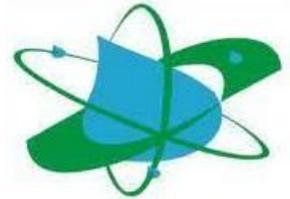


المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Ecole Nationale Polytechnique**

**Département Hydraulique**

**Laboratoire de Recherche Science de l'Eau**



**LRS EAU**  
ENP - ALGERIE

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Cartographie des zones sensibles aux inondations à l'aide de techniques SIG, télédétection et d'intelligence artificielle**

**Présenté et soutenu publiquement le 11 juillet 2021**

**Mr. MESSEN Hillal et Mr. SERRAH Houcine**

**Composition du Jury :**

Présidente	Mme. BENMAMAR Saâdia	Professeur	ENP	Alger
Promoteur	Mr. TACHI Salah Eddine	MCA	ENP	Alger
Co-promotrice	Mme. MAROUF Zineb	Doctorante	ENP	Alger
Examineur	Mr. BELHADJ Omar	MAA	ENP	Alger
Examineur	Mr. ALIRAHMANI Salah Eddine	MCB	USTHB	Alger
Examineur	Mr. BOUKHARI Abdelkarim	Ingénieur	SEAAL	Alger

**ENP 2021**



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche**

**Scientifique**

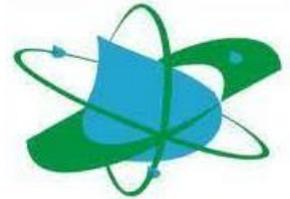


المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
Ecole Nationale Polytechnique

**Ecole Nationale Polytechnique**

**Département Hydraulique**

**Laboratoire de Recherche Science de l'Eau**



**LRS EAU**  
ENP - ALGERIE

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Hydraulique

**Cartographie des zones sensibles aux inondations à l'aide de techniques SIG, télédétection et d'intelligence artificielle**

**Présenté et soutenu publiquement le 11 juillet 2021**

**Mr. MESSEN Hillal et Mr. SERRAH Houcine**

**Composition du Jury :**

Présidente	Mme. BENMAMAR Saâdia	Professeur	ENP	Alger
Promoteur	Mr. TACHI Salah Eddine	MCA	ENP	Alger
Co-promotrice	Mme. MAROUF Zineb	Doctorante	ENP	Alger
Examineur	Mr. BELHADJ Omar	MAA	ENP	Alger
Examineur	Mr. ALIRAHMANI Salah Eddine	MCB	USTHB	Alger
Examineur	Mr. BOUKHARI Abdelkarim	Ingénieur	SEAAL	Alger

**ENP 2021**

في هذه الدراسة، يستند المنهج المعتمد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بعد (RS) ونماذج التصنيف للتعلم الآلي وهي شجرة قرار وAdaBoost لإنشاء خريطة التأثر بالفيضانات في ولاية الجزائر. تم استخدام ثمانية عوامل هيدرولوجية وطوبوغرافية كمدخلات لنماذج التأثر بالفيضانات. أظهرت النتائج أن AdaBoost كان النموذج الأمثل بقيمة AUC 0.90 وشجرة القرار 0.68. تستخدم نتائج هذه الدراسة لتخطيط وتنفيذ استراتيجيات للتخفيف من الفيضانات في المنطقة.

كلمات مفتاحية: AdaBoost، شجرة القرار، الفيضانات، الاستشعار عن بعد، التعلم الآلي.

## Abstract

In this study, the adopted approach is based on geographical information systems (GIS), remote sensing (RS) techniques and classification models of machine learning which are decision tree and AdaBoost implemented to create a flash-flood susceptibility map, in Algiers province. Eight hydrological and topographical factors were used as inputs of the flash flood susceptibility models. The results showed that AdaBoost was the most optimal model with AUC value of 0.90 and decision tree with 0.68. The results of this study are used for the planning and implementation of flood mitigation strategies in the region.

**Keywords:** AdaBoost, Decision Tree, Flood, Remote sensing, Machine learning.

## Résumé

Dans cette étude, l'approche adoptée est basée sur les systèmes d'information géographique (SIG), les techniques de télédétection (RS) et les modèles de classification de l'apprentissage automatique qui sont l'arbre de décision et AdaBoost ont été mis en œuvre pour créer une carte de vulnérabilité aux inondations, dans la province d'Alger. Huit facteurs hydrologiques et topographiques ont été utilisés comme entrées des modèles de vulnérabilité aux inondations. Les résultats ont montré que AdaBoost était le modèle le plus optimal avec une valeur AUC de 0,90 et l'Arbre de décision avec 0,68. Les résultats de cette étude sont utilisés pour la planification et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation des inondations dans la région.

**Mots clés :** AdaBoost, Arbre de décision, Inondation, Télédétection, Apprentissage automatique.

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à*

*Ma très chère mère qui m'a toujours apporté  
Son amour et son affection*

*Mon cher père qui m'a toujours encouragé, conseillé  
et Soutenu dans ma vie*

*Ma grande mère*

*Mes frères : Sofiane, Adel*

*Mes sœurs : Hassina, WIam, Ikram*

*Et à tout ma famille*

*Mes très chers amis, Billel, Hillal, Ramy*

*Mes collègues de la promo Hydraulique 2021*

*Houcine*

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail accompagné d'un profond  
amour :*

*A celle qui m'arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source  
d'amour incessible, a la mère des sentiments fragiles qui  
ma bénie par ces prières ... ma mère*

*A mon support dans ma vie, qui m'appris m'a supporté et  
m'a dirigé vers la gloire... mon père*

*A mes chères frères et sœurs : Amina, Achraf, Sara et  
Saif*

*A toutes les personnes de ma grande famille*

*A ma chérie Sarab*

*A tous mes chers amis*

*A mes chers collègues au cours du cursus de formation*

*Houcine, Bilel, Rami*

*A tous mes collègues de la promo hydraulique 2021*

*Hillal*

# Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant qui nous a donné le courage, la volonté et la patience pour arriver jusqu'au bout de ce travail.

Nous remercions ensuite la directrice du laboratoire de recherche de science de l'eau « LRSE » Mme BENMAMAR Saâdia pour son soutien son accompagnement et sa patience.

Nous tenons à remercier également nos encadreurs Mr. TACHI Salah Eddine et Mme. MAROUF Zineb pour le temps qu'ils nous ont consacré et leurs orientations et remarques attentives tout au long de ce travail

Nos remercions également Mr. BOUGUERRA Hamza, Mr. BOUAMRANE Ali et Mr. BELAROUI Abdelhakim pour leurs aides tout au long de ce travail

Nous adressons nos vifs remerciements aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de bien vouloir juger et évaluer notre travail

Nos remerciements vont également à nos enseignants de l'école nationale polytechnique pour leurs bénéfiques encadrements durant toute notre formation.

A tous nos collègues de la promotion hydraulique 2021 et tous ceux qui nous ont aidé de loin ou de près pour établir ce mémoire.

# Références bibliographiques

Liste des tableaux	
Liste des photos	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	15

## **Chapitre 1 : Revue littérature sur les inondations**

1.1	INTRODUCTION	18
1.2	LES INONDATIONS	18
1.3	LES TYPES DES INONDATIONS	19
1.3.1	Inondations de plaine	19
1.3.2	Les inondations par remontée de nappe phréatique	19
1.3.3	Les inondations par crues torrentielles	19
1.3.4	Inondation par rupture d'ouvrage ou d'embâcle	20
1.3.5	Les inondations par submersion marine	20
1.3.6	Inondations par ruissellement en secteur urbain	20
1.4	LES INONDATIONS DANS LE MONDE	21
1.5	LES CAUSES DES INONDATIONS EN ALGÉRIE	22
1.6	LE RISQUE D'INONDATION :	22
1.6.1	Aléa	22
1.6.2	Vulnérabilité	23
1.7	LA GESTION DU RISQUE D'INONDATION	23
1.8	CONCLUSION	25

## **Chapitres 2 : Revue de littérature sur le système d'information géographique (SIG), la télédétection (RS) et l'apprentissage automatique (ML)**

2.1	INTRODUCTION	27
2.2	DÉFINITION DE LA MODÉLISATION	27
2.2.1	Application de la modélisation dans le domaine de l'hydraulique	27
2.3	SYSTÈME D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE	28
2.3.1	Introduction	28

2.3.2	Définition du SIG	28
2.3.3	Description du fonctionnement du SIG	28
2.3.4	Structure de données dans le SIG	29
2.3.5	Utilité et fonctionnalité du SIG	29
2.3.6	Limites du SIG dans le domaine de cartographie	31
2.4	NOTION DE BASE SUR L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE ML	32
2.4.1	Définition et Généralités	32
2.4.2	Les types d'apprentissage automatique	32
2.4.3	Les type d'apprentissage supervisé	34
2.4.4	Différence entre l'apprentissage par régression et classification	35
2.5	REVUE DE LITTÉRATURE SUR LA TÉLÉDÉTECTION (RS)	36
2.5.1	Introduction	36
2.5.2	Définition formelle	36
2.5.3	Principe de fonctionnement	36
2.5.4	Les étapes d'acquisition	37
2.5.5	Quelques informations sur Landsat 8	38
2.5.6	Domaine d'application de la télédétection	38
2.6	CONCLUSION	39

## **Chapitre 3 : présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail**

3.1	INTRODUCTION	41
3.2	PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	41
3.2.1	Introduction	41
3.2.2	Contexte géographique	41
3.2.3	Contexte géologique	42
3.2.4	Contexte géomorphologique	43
3.2.5	Contexte hydrographique	43
3.2.6	Contexte climatique	44
3.2.7	Précipitation	44
3.2.8	Température	44
3.2.9	Humidité	45
3.3	MÉTHODOLOGIE	46

3.3.1	Choix des facteurs entrant en jeu	46
3.3.2	Les modèles utilisés	48
3.3.3	Carte d'inventaire des points	49
3.3.4	Standardisation	50
3.3.5	Validation du modèle	50
3.3.6	Carte de vulnérabilité	52
3.4	CONCLUSION	53

## **Chapitre 4 : Résultat d'étude et discussion**

4.1	INTRODUCTION	55
4.2	RÉSULTATS	55
4.2.1	les facteurs	55
4.2.2	L'importance des facteurs	60
4.2.3	Elaboration de la carte de vulnérabilité	61
4.2.4	Validation	63
4.3	DISCUSSION	64
4.4	CONCLUSION	65

Conclusion générale 67

Référence bibliographiques

## Liste des Tableau

<b>Tableau 1. 1</b>	Les inondations les plus couteuses entre 1980 et 2008	21
<b>Tableau 2. 1</b>	Comparaison entre l'apprentissage par régression et classification	35
<b>Tableau 3. 1</b>	Classification de la performance avec les valeurs de AUC	51
<b>Tableau 4. 1</b>	Classement d'importance des facteurs	61
<b>Tableau 4. 2</b>	Classes des zones de vulnérabilité aux inondations	63
<b>Tableau 4. 3</b>	Performance des deux modèles	63

## Liste des photos

<b>Photo 1-1</b> L'inondation Beni Slimane Médéa	18
<b>Photo 1- 2</b> Inondation de Bab El-Oued (2001)	20

## Liste des figures

<b>Figure 2- 1</b> Une entité réelle représentée par un modèle de données spatiales dans le SIG	29
<b>Figure 2- 2</b> Cycle de vie de l'information géographique	31
<b>Figure 2- 3</b> Exemple d'apprentissage supervise	32
<b>Figure 2- 4</b> Exemple d'apprentissage non supervise	33
<b>Figure 2- 5</b> Exemple d'apprentissage par régression et classification	35
<b>Figure 2- 6</b> Processus de la télédétection	37
<b>Figure 2- 7</b> Type de résolution spatiale de Landsat 8	38
<b>Figure 3- 1</b> Localisation de la zone d'étude (Alger)	42
<b>Figure 3- 2</b> Carte de réseau hydrographique d'Alger et les stations pluviométriques	43
<b>Figure 3- 3</b> Variation des pluies moyenne à Alger (1976-2005)	44
<b>Figure 3- 4</b> Variation moyenne maximale et minimale de la température à Alger	45
<b>Figure 3- 5</b> Variation de l'humidité à Alger	45
<b>Figure 3- 6</b> La structure générale d'un arbre de décision	49
<b>Figure 3- 7</b> Carte d'inventaire des points inondables et non inondables	50
<b>Figure 3- 8</b> Organigramme récapitulatif de la méthodologie	52
<b>Figure 4- 1</b> Carte de variation de la pente	55
<b>Figure 4- 2</b> Carte de pluviométrie moyenne	56
<b>Figure 4- 3</b> Carte d'aspect de la pente	57
<b>Figure 4- 4</b> Carte de variation d'élévation	57
<b>Figure 4- 5</b> Carte variation de la distance par rapport à la rivière	58
<b>Figure 4- 6</b> Carte de variation de NDVI	59
<b>Figure 4- 7</b> Carte de variation de NDWI	59
<b>Figure 4- 8</b> Carte de variation de TWI	60
<b>Figure 4- 9</b> Carte de vulnérabilité avec le modèle Arbre de décision	62

**Figure 4- 10** Carte de vulnérabilité avec le modèle AdaBoost 62

**Figure 4- 11** La courbe ROC avec le modèle l'AdaBoost et l'Arbre de décision 64

## Liste des abréviations

**ANRH:** Agence National des Ressources Hydriques

**DT:** Decision Tree

**EROS:** Earth Resources Observation and Science

**IDW:** Inverse Distance Weighting

**LDCM:** Landsat Data Continuity Mission.

**MEDD:** Ministère français de l'environnement et du développement durable

**MNE:** Modèle Numérique d'Élévation

**NDVI:** Normalize Digital Vegetation Index

**NDWI:** Normalized Digital Water Index

**NIR:** Near-infrared

**NOAA:** National Oceanic and Atmospheric Administration

**OLI:** Operational land imager

**ONM:** Office National de la Météorologie

**RS:** Remote Sensing

**SIG:** Système d'information géographique

**SWIR:** Short-Wave Infrared

**TIRS:** Thermal Infrared Sensor

**TWI:** Topographic Wetness Index

**USGS:** United States Geological Survey

# **Introduction générale**

## Introduction générale

Les inondations sont une combinaison de différents paramètres environnementaux, météorologiques, hydrologiques, géomorphologiques, et l'intervention humaine. Le changement climatique mondial actuel est la cause principale de l'augmentation de la fréquence et de la magnitude des risques d'inondation. De plus, l'intervention humaine à grande échelle dans l'environnement à travers la déforestation, les constructions anarchiques, la construction de barrages et le développement de l'urbanisation près des rivières sont des multiples facteurs qui peuvent s'ajouter au changement climatique comme des causes influençant l'inondation.

Les inondations sont classées comme des catastrophes les plus destructives qui peuvent causer d'importants dommages socio-économiques, décès, dommages aux infrastructures et des pertes des établissements humains, tels que : terres agricoles, bâtiments, routes, chemins de fer...etc. En 2010, l'enquête statistique mondiale a également révélé que plus de 178 millions de personnes ont été largement touchées par des inondations destructives (75 millions de personnes deviennent sans abri) (*De Risi et al., 2019*).

En Algérie, les inondations sont évaluées comme un risque assez important. Ces deux dernières décennies, plusieurs inondations importantes ont été observées causant des centaines de morts, des milliers de blessés et des milliards de dinars de dégâts matériels. 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*).

Les inondations sont difficiles à étudier à grande échelle, car elles sont influencées par des facteurs locaux très diversifiés tels que les précipitations, la pente du terrain, les réseaux hydrographiques, la couverture du sol et d'autres facteurs.

Habituellement, l'évaluation des risques d'inondation est réalisée par le biais de la modélisation hydrologique et hydraulique telle que la modélisation par HEC-RAS en estimant l'intensité et l'étendue de l'inondation pour différentes périodes de retour. Cependant, l'application de ces techniques de modélisation nécessite une série de données d'observation qui ne sont pas toujours disponibles.

Actuellement, les chercheurs ont concentré leurs études sur le développement des modèles permettant de comprendre les facteurs influençant les phénomènes et leurs interactions entre eux grâce aux systèmes d'informations géographiques (SIG) et des techniques de télédétection (RS), ainsi que de la mise au point des techniques de l'intelligence artificielle à haute performance. Ces démarches s'avèrent fondamentales pour la préparation d'une carte de vulnérabilité qui représente la première étape de la gestion du risque d'inondations.

L'objectif de cette étude est de produire une carte de vulnérabilité aux inondations de la wilaya d'Alger en utilisant les modèles d'apprentissage automatique, notamment l'Arbre de décision et AdaBoost, dont la méthodologie est comme suit:

- Préparation et extraction des cartes des facteurs influençant;
- Analyse et traitement des données des facteurs;
- Application de l'apprentissage automatique pour évaluer l'impact de chaque facteur sur les inondations;
- Valider les résultats obtenus des modèles d'apprentissage automatique
- Combiner et cartographier tous les résultats des facteurs pour obtenir la carte finale de vulnérabilité aux inondations.

Cette étude se présente sous forme de quatre chapitres :

- Le premier chapitre comprend un aperçu sur les inondations;
- Le deuxième chapitre présente les notions principales sur lesquelles repose notre étude
- Le troisième chapitre se consacre à une vision globale de la zone d'étude ainsi que la méthodologie à suivre;
- Le quatrième chapitre concerne les résultats de l'étude et leurs interprétations
- Et enfin une conclusion générale qui résume les résultats obtenus dans les chapitres précédents.

# **Chapitre 1**

## **Revue littérature sur les inondations**

# Chapitre 1 : Revue littérature sur les inondations

## 1.1 Introduction

Les inondations sont une catastrophe naturelle qui affecte de nombreux pays dans le monde. Ceci est dû au fait de nombreux facteurs, y compris les activités de l'Homme. Les dégâts engendrés par cette catastrophe, qu'ils soient humains ou matériels sont généralement de statistiques lourdes. Ce chapitre a pour but de présenter une revue de littérature sur les inondations, les types d'inondation

## 1.2 Les inondations

Une inondation est une submersion plus ou moins rapide d'une zone habituellement hors d'eau, avec des hauteurs d'eau variables, dont le facteur déclenchant est la pluie.

Le risque inondation est la conséquence de deux composantes, l'eau qui peut sortir de son lit habituel d'écoulement et l'implantation par l'homme dans la zone inondable de toutes sortes de constructions, d'équipements et d'activités (*Benmamar,2021*).

Pendant les périodes de fortes pluies, les inondations se produisent lorsque les bassins versants reçoivent de grandes quantités d'eau de précipitation, qui sont collectées et drainées dans l'oued. Dans la plupart des pays du monde les inondations sont des événements cycliques qui frappent chaque année aux mêmes saisons et qui causent des dégâts humains et matériels plus importantes.



**Photo 1- 1:** Inondation Beni-Slimane Médéa. Source : (*APS,2021*)

### **1.3 Les types des inondations**

On peut distinguer plusieurs types d'inondations en fonction de l'événement qui a provoqué la catastrophe : inondations de plaine, remonté de nappe, crues torrentielles, ruissellement en secteur urbain ou rural (dont la pluie est le potentiel générateur du phénomène), inondation par rupture d'une digue (à cause des événements spécifiques comme les séismes), inondation marine (qui se fait par l'action de la mer) (*Marant, 2009*).

#### **1.3.1 Inondations de plaine**

Les inondations de plaine se produisent dans des bassins versants moyens à larges lors des événements pluvieux océaniques prolongés d'intensité modérée, tombant sur des sols où les précipitations prennent beaucoup de temps à se déclencher. Le cours d'eau sort progressivement de son lit mineur pour rejoindre son lit majeur et inonder la plaine pendant une longue période, les zones touchées se situent dans la vallée de la rivière.

L'ampleur de la destruction causée par cette forme d'inondation est déterminée par la hauteur et la durée de submersion.

#### **1.3.2 Les inondations par remontée de nappe phréatique**

Une source d'eau douce souterraine peu profonde est connue sous le nom de nappe phréatique. Le ruissellement des eaux de pluie remplit la nappe phréatique. Étant donné que les sols argileux, contrairement aux sols sableux, servent de filtres naturels qui laissent passer l'eau vers la nappe. Ces nappes phréatiques fournissent une partie importante de l'eau potable.

En cas des événements pluvieux, le niveau de la nappe va rapidement monter car la nappe absorbe plus d'eau qu'elle ne peut en rejeter des cours d'eau ou des sources, La nappe phréatique va atteindre la surface du sol et provoquer une inondation en cas d'un événement de grande ampleur (*Allier et al.,2011*).

#### **1.3.3 Les inondations par crues torrentielles**

Les pluies torrentielles est un phénomène brusque et violent qui résulte des épisodes pluvieux forts et localisés de forme orages convectifs. Lorsque le temps que met une goutte d'eau à tomber sur le point le plus éloigné "hydrologiquement" pour atteindre l'exutoire est inférieur à 24 heure, Les experts utilisent cinq critères pour définir une averse torrentielle : la vitesse à laquelle le cours d'eau réagit, sa pente, le nombre de Froude, le fort transport solide et ses effets (*Ledoux, 2006*). C'est le cas des inondations de Bab El Oued à Alger le 10 novembre 2001, lorsque des pluies exceptionnellement fortes se sont abattues sur une zone de 40 kilomètres, faisant 750 morts, 120 disparus et plus de 10 000 familles déplacées (*DGPC, 2021*).



**Photo 1- 2:** Inondation de Bab El-Oued (2001). Source : (*Ferhat Zafane*)

#### **1.3.4 Inondation par rupture d'ouvrage ou d'embâcle**

Ce type d'inondation se produit par une rupture d'un ouvrage ou d'un embâcle situé dans un cours d'eau lors d'une crue violente, il est assez dangereux lorsque l'ouvrage est proche d'une agglomération. Le fait d'être derrière un ouvrage de protection dimensionné pour un certain niveau de crue peut rehausser le seuil de risque en cas de rupture ou dépassement de ce dernier. Des secteurs habituellement hors de l'eau peuvent se trouver brutalement inondés, Lorsque la crue est suffisamment importante, elle remplit puis fait déborder la retenue (*Boubchir, 2007*).

Un exemple bien représentable de ce cas d'inondation est la catastrophe environnementale de la rupture du barrage de **Brumadinho** en Brésil le 25 janvier 2019, qui provoqua 115 morts et 248 disparus et d'autres dégâts innombrables (*APS, 2021*).

#### **1.3.5 Les inondations par submersion marine**

Une submersion marine est une inondation temporaire des zones côtières par de l'eau salée provenant de la mer. Elle se produit à la suite d'un événement météorologique ou océanographique inhabituel, tels qu'une marée inhabituellement haute ou le phénomène de la surcote et l'élévation du niveau de la mer due à une fonte importante des glaciers (*Chabane, et al., 2016*).

#### **1.3.6 Inondations par ruissellement en secteur urbain**

Les inondations par ruissellement dépendent d'une variété de phénomènes physiques selon lesquels se produisent dans un cadre rural, suburbain ou urbain. Ces phénomènes sont

caractérisés par leur soudaineté et leur courte durée, ce qui les rend difficiles à prévoir et à gérer en période de crise (*Ledoux, 2006*).

## 1.4 Les inondations dans le monde

Les inondations sont les plus fréquentes, les plus dévastatrices et les plus meurtrières de toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année. Elles sont responsables d'environ la moitié de tous les décès causés par des catastrophes naturelles au cours des 50 dernières années, ainsi que de près d'un tiers de toutes les pertes économiques mondiales. Le coût des dommages causés par les tempêtes et les inondations aux États-Unis est estimé à 10 milliards de dollars chaque année. De même, en Europe, les pertes économiques les plus importantes ont eu lieu entre 1980 et 2002 en Allemagne et en Italie, avec un coût estimé à 11 milliards d'euros, suivis par l'Espagne et la Grande-Bretagne par 6 Milliards d'euros à eux deux (*Ledoux, 2006*). Le tableau suivant résume quelques chiffres concernant les conséquences des inondations au monde.

**Tableau 1. 1 :** Les inondations les plus coûteuses entre 1980 et 2008

(Source : Munich RE,2011)

Date	Lieu	Les dommages (millions USD)	Montant de dommages assurés (millions de USD)	Nombre de morts
1998	Chine	30700	1000	4159
1996	Chine	24000	445	3048
1993	Etats-Unis	21000	1300	48
2002	Europe centrale	16500	3400	39
1995	Corée du Nord	15000	?	68
1991	Chine	13600	410	2628
1993	Chine	11000	?	3300
2008	États-Unis	10000	500	24
1994	Italie	9300	65	68
2000	Europe	8500	470	38

La majorité des inondations les plus dévastatrices se sont produites dans les pays peuplés comme les États-Unis et la Chine.

Dans les dernières décennies, l'Algérie est affectée par des inondations catastrophiques, le cas le plus meurtrier qui survie à Bab El oued et qui a fait plus de 800 morts, 150 disparus, 30000 habitants sans domicile et des pertes économiques plus de 250 millions d'euros, le cas

d'inondation de Ghardaïa qui a fait de 34 morts, 89 blessés, 2000 familles se sont retrouvées sans abri et les constructions proches de l'oued ont été submergées par les eaux boueuses (*Lahlah, 2004*). La dernière inondation est celle de la ville de Beni Slimane (Médéa) qui a été inondée par des tonnes de boues emportées par la crue, fait un bilan de six morts et plus de 134 véhicules ont été endommagés (*APS, 2021*).

## **1.5 Les causes des inondations en Algérie**

D'une manière générale, les causes des inondations survenues en Algérie peuvent être classées en trois types :

- Les inondations liées par des situations météorologiques exceptionnelles qui se manifestent par une forte pluviosité (pluies importantes, orages violents), tel que les inondations du bassin de Mazafran en 1957 et les inondations du Bassin Algérois en 1974 (*Lahlah, 2004*).
- Les inondations provoquées par des facteurs liés à l'effet de l'homme : Le manque d'entretien des systèmes de collecte des eaux usées et des eaux pluviales (*Lahlah, 2004*), l'exemple de l'inondation de ruisseaux à Alger en 2020.
- Les inondations qui se produisent dans des zones présentant une topographie défavorable, comme les villes traversées par des oueds comme Alger (traversée par Oued Ouchayah, Oued Koriche et Oued El-Harrach), ou situées au pied d'une montagne (cas de Bab El-oued) (*Lahlah, 2004*).

## **1.6 Le risque d'inondation :**

Les inondations constituent une menace importante pour le monde moderne. Par rapport au reste du monde, la région méditerranéenne a connu des inondations périodiques au cours des années précédentes, qui deviennent une menace plus sérieuse.

Le risque de l'inondation est défini par deux indices, l'aléa d'inondation et la vulnérabilité des risques exposés. L'évaluation du risque se base sur l'évaluation de ces deux indices veut dire que : estimer, quantifier, apprécier, calculer et mesurer l'aléa, identifier, délimiter, localiser, chiffrer et analyser l'importance de la vulnérabilité (*Rifai, et al., 2004*).

### **1.6.1 Aléa**

Constitue un phénomène physique de submersion, résultant d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité donnée susceptible d'occasionner des pertes en vies humaines ou des blessures, des dommages aux biens, des perturbations sociales et économiques ou une dégradation de l'environnement. Quatre paramètres principaux sont nécessaires pour

caractériser l'aléa qui sont : durée et hauteur de submersion, période de retour, vitesse d'écoulement et volume de transport solide.

- **La durée et la hauteur de submersion** : la hauteur est susceptible d'avoir une influence importante sur les bâtis qui les endommagent, en particulier si elle dépasse une hauteur de référence donnée. Lorsque la durée de submersion est importante, elle va conduire à des problèmes sanitaires graves.

- **Période de retour** : c'est la durée moyenne pendant laquelle un événement de même intensité se répète statistiquement (crue décennale, centennale, etc.), plus cette période est grande plus les débits et l'intensité sont importants.

- **La vitesse d'écoulement** : est influencée par la pente du lit du cours d'eau et sa rugosité. Elle atteint plusieurs mètres par seconde. Les dégâts engendrés par l'écoulement dépendent par la relation hauteur / vitesse. Par exemple, lorsque que la vitesse du courant atteint 0,50 m/s, elle devient dangereuse pour l'homme, avec un risque d'être emporté par le cours d'eau ou d'être blessé par des objets.

- **Volume du transport solide** : Il s'agit des matériaux se trouvant dans le cours d'eau, En raison des forces du courant d'eau, le transport peut se faire soit par suspension soit par déplacement sur le fond du lit (charriage) (*Tanguy, 2012*).

### 1.6.2 Vulnérabilité

La vulnérabilité est un concept aux multiples facettes. Il existe plusieurs définitions dans la littérature, parmi lesquelles deux définitions officielles ont été retenues. Les définitions du MEDD (Ministère français de l'environnement et du développement durable) et de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont respectivement "la vulnérabilité est le niveau des conséquences anticipées d'un phénomène naturel sur les enjeux" et "la vulnérabilité des ressources à être affectées par les aléas".

Le concept de vulnérabilité peut être résumé en quatre points :

- ❖ La perception sociale de l'aléa
- ❖ L'aléa et ses conséquences prévisibles sur les enjeux
- ❖ Les dispositions prises pour limiter l'effet de l'aléa
- ❖ Les enjeux.

Les enjeux sont les éléments à risque (personnes, biens, activités, patrimoine, etc.) qui donnent à la vulnérabilité une dimension quantitative et qualitative complexe (*Chachoua, 2009*).

## 1.7 La gestion du risque d'inondation

La lutte contre le risque des inondations dans le monde repose sur les principaux suivants : prévention, prévision et retour d'expérience.

- **La prévention**

La prévention intervient au préalable d'une crise, elle regroupe l'ensemble des dispositions à mettre en œuvre pour réduire l'impact d'un phénomène naturel prévisible sur les personnes et les biens. En matière d'inondation, elle inclut d'une part l'information des populations concernant leur vulnérabilité aux inondations et les démarches à suivre en cas de crise, et d'autre part la mise en place de moyens de protection et l'organisation des secours (*Chachoua, 2010*).

- **La prévision**

Elle implique la simulation d'un phénomène naturel ainsi que le suivi continu et régulier de données descriptives de ce phénomène. Les informations obtenues à partir de cette prévision sont de deux types : l'intensité et la probabilité de la crue à long terme.

Elle vise à prédire la survenue d'une catastrophe et ses conséquences en temps réel afin d'alerter les populations et de mettre en place des décisions plus efficaces. En cas d'une catastrophe qui risquent d'atteindre les zones vulnérables, la prévision s'applique aux états d'urgence, qui impliquent une réaction quasiment instantanée afin de fournir des informations très rapidement. Les modèles hydrauliques utilisés à cet effet doivent être faciles à mettre en œuvre et avoir des temps de calcul très courts (*Hostache, 2006*).

La prévision est basée sur deux étapes : La première consiste à créer une carte avec la délimitation précise des secteurs inondables pour chaque type de crue, la classification des inondations (durée, intensité, période de retour ...), l'étendue des inondations et l'évaluation des dommages à craindre tant sur le plan matériel que sur le plan humain. La seconde consiste à mettre en place un service d'annonce des crues qui prévient les habitants quelques heures avant la crue (*Cortes, 2006*).

L'inondation est un risque qui peut être prédit en fonction de son intensité, mais il peut être difficile de prévoir quand elle se manifestera. La pluie c'est le paramètre dominant qui a causé des crues violentes, d'où la prévision des inondations se base sur les observations continues des précipitations. C'est pour cela, il est nécessaire que les centres météorologiques (ex : ANRH, ONM ) publient quotidiennement une carte de surveillance diffusée par les moyens de transmission d'information. La surveillance météorologique doit être complétée par un suivi des débits dans la majorité des cours d'eau afin de transmettre l'information et d'avertir les personnes concernées pour que des mesures de protection appropriées soient prises (*Cortes, 2006*).

- **Le retour d'expérience**

Avant une crise, le retour d'expérience vise à recueillir des informations sur les catastrophes précédentes afin de mieux comprendre les phénomènes, analyser la

vulnérabilité, améliorer la prévention des crues, spécifie les plaines d'inondation et d'aider à la gestion de risque des catastrophes futures. Dans une démarche d'analyse préventive par retour d'expérience, les données et connaissances disponibles sur les crues passées (mesures hydrométriques, surfaces inondées extraites d'images satellitaires ou de photographies aériennes...) seront soumises à des analyses profondes afin de comprendre et modéliser les phénomènes physiques (*Defrance, 2009*).

## **1.8 Conclusion**

Cet aperçu historique des catastrophes naturelles, notamment des inondations, nous a permis de formaliser un langage propre à ce sujet tout en retraçant un bref historique des nombreux événements survenus à l'échelle nationale avec quelques références en termes de vulnérabilité et de mesures de prévention. L'inondation a des effets majeurs (pertes humaines, sociales, économiques et environnementales) tant pour les pays riches que pour les pays en développement, même si tous ne sont pas touchés de la même manière. Dans tous les cas il est primordial de s'intéresser aux procédés de protection contre les inondations. À cette fin, nous avons fait un vocabulaire qui définit la gestion de risques pour mieux comprendre comment se manifeste cette catastrophe, et choisir des meilleures mesures pour réduire ses impacts à l'échelle humaine et matérielle.

## **Chapitre 2**

**Revue de littérature sur le système  
d'information géographique (SIG), la  
télédétection (RS) et l'apprentissage  
automatique (ML)**

## **Chapitre 2 : Revue de littérature sur le système d'information géographique (SIG), la télédétection (RS) et l'apprentissage automatique « Machine Learning »**

### **2.1 Introduction**

La cartographie en général est basé sur des variétés de notions géographiques dont les inspections des terrains, l'établissement des cartes topographique, les limites administrative...etc. représentent les grands principaux objets visés. A cette fin nous avons besoin des outils assez développés pour aboutir à des résultats plus sophistiqués en ce qui concerne la qualité, la fiabilité et la crédibilité des données. Ces objectifs actuellement sont assurés par le système d'informations géographiques suit par la science de télédétection, en incluant le nouveau concept de l'apprentissage automatique pour faire intégrer la machine surtout en traitement des données et en aide à la décision. Ces trois notions on va les expliquer dans ce chapitre.

### **2.2 Définition de la modélisation**

La modélisation, c'est l'ensemble du processus qui permet l'intervention des mathématiques dans une science basée sur l'expérience ou l'observation.

Pour aboutir à un modèle mathématique nous devons passer par plusieurs étapes :

Nous établissons tout d'abord des hypothèses sur les phénomènes étudiés, les hypothèses sont traduites mathématiquement en un modèle puis on étudie le modèle mathématique pour en extraire des conséquences qualitatives ou quantitatives et on fait des prévisions. On compare les prévisions aux réalités expérimentales. À la fin, Il est censé de revenir éventuellement sur les hypothèses pour modifier le modèle (*Ducrot, 2008*).

#### **2.2.1 Application de la modélisation dans le domaine de l'hydraulique**

Les applications de la modélisation sont comme suit :

- Modélisation des systèmes hydrauliques
- Optimisation et conception de fonctionnement des ouvrages hydraulique.
- Délimitation des zones inondables.
- Gestion en temps réel et stratégies de contrôle.
- Analyses et traitement des données pluviométriques.
- Modélisation de transport solide.

## **2.3 Système d'information géographique**

### **2.3.1 Introduction**

L'utilisation de SIG dans la prédiction des inondations montre de bon résultat en ce qui concerne la gestion des risques et des endommagements d'où la nécessité de l'intégrer dans les plans de prévention future. C'est pour cela nous allons définir et expliquer quelques notions dans le SIG pour mieux comprendre son utilisation dans notre travail.

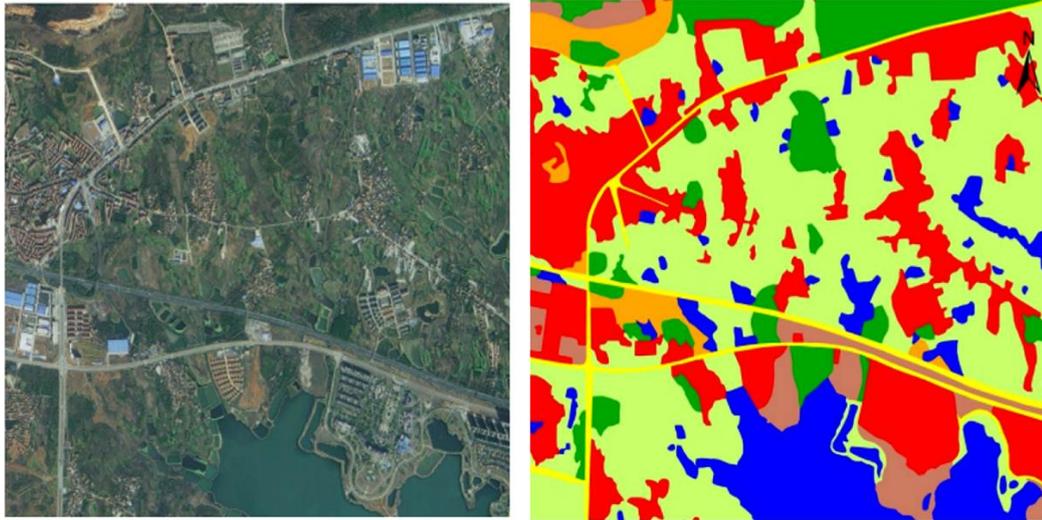
### **2.3.2 Définition du SIG**

Un système d'information géographique (SIG) est un environnement permettant de recueillir, de gérer et d'analyser des données. Ancré dans la science de la géographie, le SIG intègre de nombreux types de données. Il analyse l'emplacement spatial et organise les couches d'informations en visualisations à l'aide de cartes et de scènes 3D. Grâce à cette capacité unique, le SIG révèle des informations plus approfondies sur les données, telles que les modèles, les relations et les situations, ce qui aide les utilisateurs à prendre des décisions plus avisées (*ESRI, 2021*).

### **2.3.3 Description du fonctionnement du SIG**

Les données d'un SIG représentent une vue simplifiée des entités physiques, des routes, des montagnes, des lieux d'accidents ou d'autres caractéristiques que nous souhaitons identifier. Les données comprennent des informations sur l'emplacement spatial et l'étendue des entités, ainsi que des informations sur leurs propriétés non spatiales.

Chaque entité physique est représentée par un objet spatial dans le SIG. Il existe donc une correspondance entité-objet. Comme le montre la figure ci-dessous, nous pouvons représenter la couverture du sol dans une région donnée par un ensemble de polygones. Ces polygones sont associés à un ensemble de caractéristiques essentielles qui définissent chaque type de couverture, par exemple le type de végétation, l'urbanisation, les plans d'eaux... etc. (*Bolstad, 2016*).



**Figure 2- 1:** Une entité réelle représentée par un modèle de données spatiales dans le SIG

### 2.3.4 Structure de données dans le SIG

Les entités spatiales que le SIG les emploie dans la représentation des données sont divisées en deux catégories principales, l'une est le format « Vecteur », l'autre est le format « Raster », qu'on va essayer de les expliquer ci-dessous.

#### 2.3.4.1 Format Vecteur

Un modèle de données vectorielles utilise des ensembles de coordonnées et des données d'attributs associés pour définir des objets discrets. Les groupes de coordonnées définissent l'emplacement et les limites des objets discrets, et ces données de coordonnées ainsi que leurs attributs associés sont utilisés pour créer des objets vectoriels représentant les entités du monde réel (*Bolstad, 2016*).

#### 2.3.4.2 Format Raster

Les modèles de données Raster définissent le monde comme un ensemble de cellules dans un modèle de grille. En général, ces cellules sont carrées et uniformément espacées dans les directions x et y. Les phénomènes ou objets en question sont représentés par des valeurs d'attribut associées à l'emplacement de chaque cellule. (*Bolstad, 2016*).

### 2.3.5 Utilité et fonctionnalité du SIG

Ces utilités sont assurées principalement par des fonctionnalités qui représentent la majeure partie des outils du SIG et qui sont nécessaires pour l'analyse spatiale à l'aide de SIG. Parmi eux on cite :

### **2.3.5.1 Géoréférencement**

Le géoréférencement, également appelé géocodage, est la capacité de spécifier l'emplacement des données géographiques. Cette fonctionnalité crée une géoréférencement pour les attributs et pour effectuer des analyses (*ESRI, 2016*)

### **2.3.5.2 Adéquation et distance**

Une des principales aptitudes d'un SIG est de mesurer les distances entre les objets et d'identifier si les objets sont adjacents les uns aux autres. (*Régis, et al., 2011*).

### **2.3.5.3 Superpositions et requêtes**

C'est la capacité de superposer plusieurs couches d'informations et d'accéder à ces différentes couches simultanément du cela facilite l'analyse spatiale en permettant de créer facilement des combinaisons d'informations.

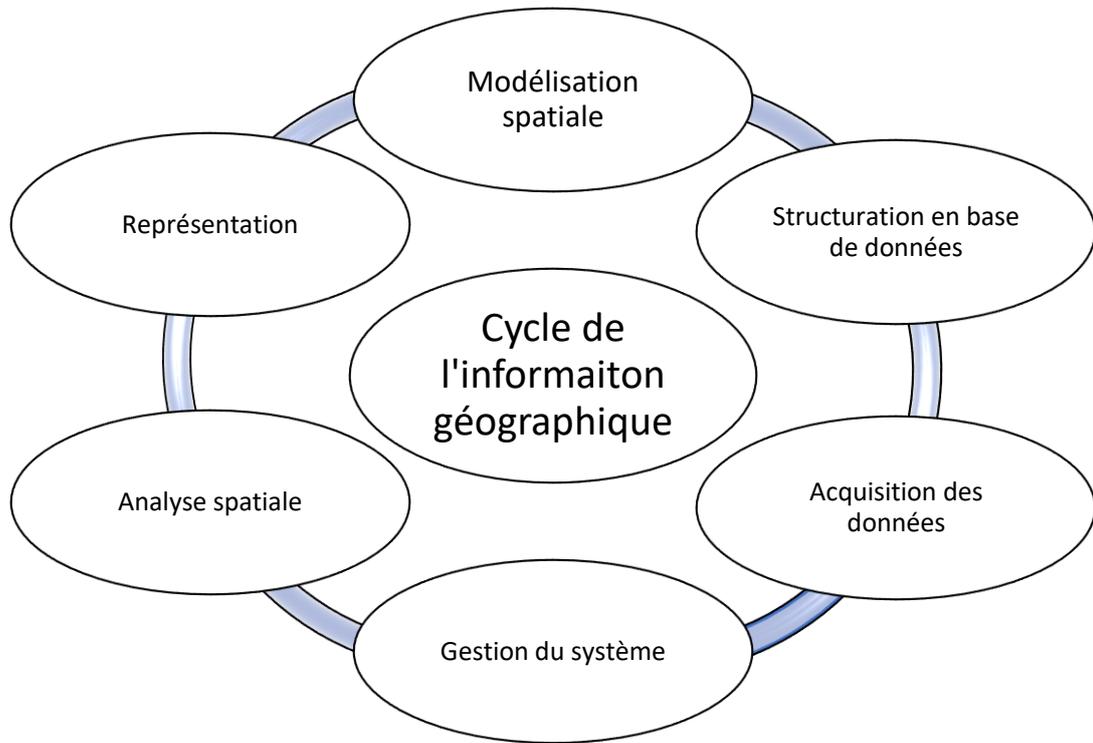
### **2.3.5.4 La base de données géographiques (Geodatabase)**

La Geodatabase est une architecture de données évolutive qui permet le stockage de tous les aspects de l'application géographique dans un format de base de données relationnelle. (*Régis, et al., 2011*).

### **2.3.5.5 Analyse spatiale des données**

Une analyse spatiale consiste en un ensemble de techniques et de modèles qui s'intéressent explicitement aux modèles et processus spatiaux. Lors de l'exploitation de la base de données dans le SIG, l'analyse spatiale est la phase la plus importante à réaliser lors du cycle de l'information géographique car toute les types des données sont représentés sous formes des cartes et des schéma (données spatiales) (*Serraoui, et al., 2018*).

La forme circulaire dans la figure suivante exprime le fait que SIG s'adapte aux résultats récurrents et aux nouveaux besoins et qu'il n'est pas une invariant et faite une fois pour toute. (*Régis, et al., 2011*).



**Figure 2- 2:** Cycle de vie de l'information géographique. **Source :** (Régis, et al., 2011).

### 2.3.6 Limites du SIG dans le domaine de cartographie

Malgré ses avantages dans le domaine d'analyse spatiale, le SIG reste toujours un système en déficience en ce qui concerne l'aide à la décision. **Chakhar (2006)** a essayé d'identifier quelques lacunes dont le SIG ne peut pas les combler, et parmi ces lacunes on compte :

- **Manque d'analyse multi-échelles** : Cela veut dire qu'il y a un manque de fonctionnalités d'analyse quand il s'agit de la notion du temps, de l'analyse sur plusieurs dimension (image 3D basée seulement sur un MNE ) et traitement des données de sources différents.
- **Manque d'unicité des chemins** : manque de démarches explicites unifiées pour aboutir à des résultats similaires, de ce fait chaque utilisateur suit son intuition et pour qu'il puisse accomplir la même tâche (*Chakhar, 2006*).
- **Une situation riche de données et pauvre en théorie** : Cette situation est expliquée par le fait que le SIG manipule les données par des relation mathématiques géométriques et ne prend pas en considération la théorie et la réalité du phénomène.
- **Les difficultés d'intégration de l'analyse spatiale aux SIG** :

Parce que l'analyse spatiale se concentre sur le traitement et la mise en points des mesures et des calculs pour illustre la réalité du phénomène alors que le SIG s'occupe des éléments que constituent cette réalité (*Serraoui, et al., 2018*).

## 2.4 Notion de base sur l'apprentissage automatique ML

### 2.4.1 Définition et Généralités

L'apprentissage automatique (ML) est une branche de l'informatique moderne qui consiste à analyser les bases de données ou interagir avec l'environnement à l'aide des algorithmes et d'en tirer des répétitions (des schémas) pour établir des prédictions en se basant sur des statistiques antécédents.

Ainsi, l'apprentissage automatique est basé sur l'exploration de données, la reconnaissance de schémas pour ensuite déduire des analyses prédictives.

L'apprentissage automatique montre son potentiel dans les cas où des tendances sont à relever à travers d'énormes ensembles de données différentes et variées, appelées données massives.

L'apprentissage automatique est plus efficace en termes de précisions et vitesse que les autres méthodes ordinaires d'analyse de données massifs et ceci est par le fait que l'algorithmes peuvent apprendre et adapter leurs résultats en fonction des nouvelles donnée acquises sans les reprogrammer. Là où les méthodes d'analyse traditionnels s'affrontent bien souvent des problèmes dans le cas où le volume de données est immense, l'apprentissage automatique révèle au contraire tout son avantage lorsque les bases de données sont croissantes, parce qu'elles lui permettant d'apprendre et déceler des tendances avec une précision beaucoup plus améliorée (*Alpaydin, 2014*).

### 2.4.2 Les types d'apprentissage automatique

#### 2.4.2.1 L'apprentissage supervisé

Est une opération dans laquelle le model ML sait déjà quel motif ou élément doit chercher dans la base de données en trouvant des corrélations entre les données d'entrée et les données de sorties dans le but d'induire la connaissance sur ces éléments, d'où le modèle sera capable de retrouver les mêmes tendances dans les données non traitées (*Mifdal, 2019*).

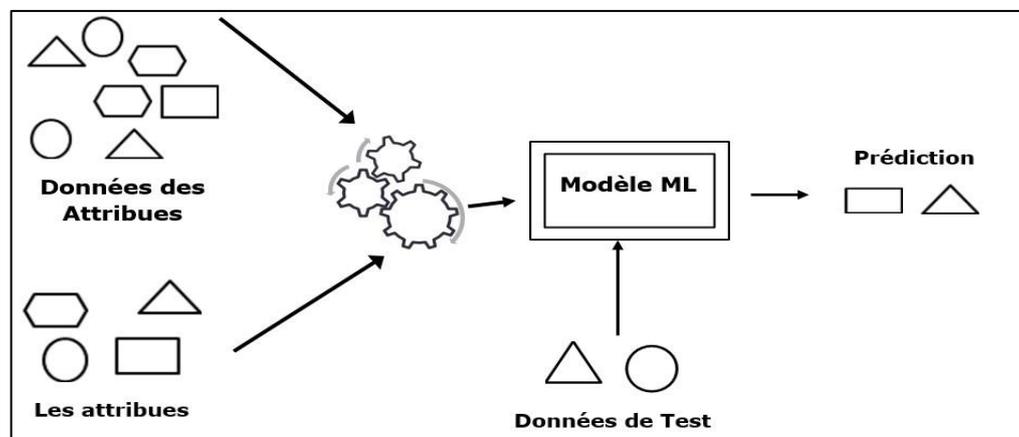


Figure 2- 3 : Exemple d'apprentissage supervisé

### 2.4.2.2 L'apprentissage non supervisé

Pour ce type d'apprentissage la variable cible n'est pas définie dans l'ensemble des données comme en apprentissage supervisé. Il y a seulement une gamme de données collectées en entrée puis l'algorithme doit déterminer par lui-même la structures et la répartition des données. Autrement dit, le programme traite les données sans aucune indication visée dans le but d'y reconnaître des modèles ou des tendances récurrents. Cette approche est utilisée pour répartir les données en groupes d'éléments homogènes (*Mifdal, 2019*).

Parmi les modèles non-supervisés, on distingue les algorithmes de regroupement (pour trouver des groupes d'objets similaires), d'association (pour trouver des liens entre des objets) et de réduction dimensionnelle (pour choisir ou extraire des caractéristiques) (*Alpaydin, 2014*).

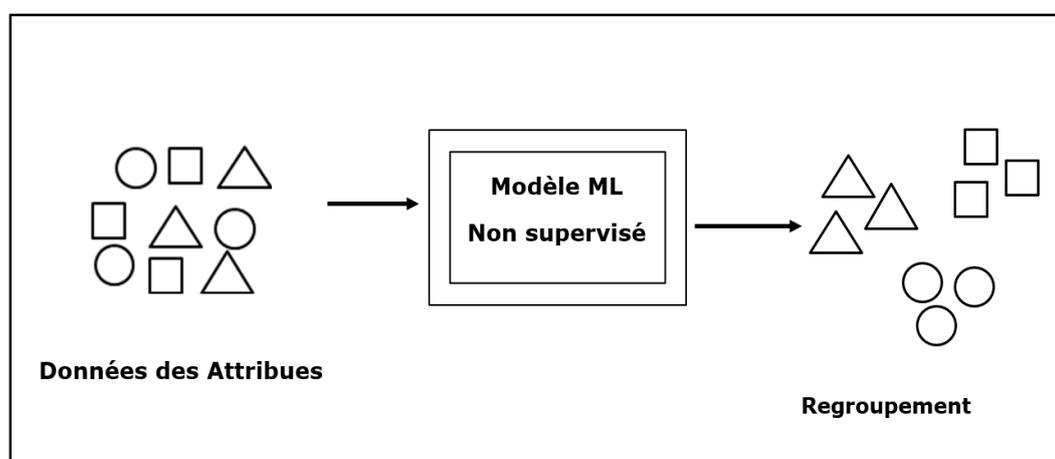


Figure 2- 4:Exemple d'apprentissage non supervisé

### 2.4.2.3 L'apprentissage semi supervisé

Il s'agit d'une combinaison d'apprentissage supervisé et non supervisé utilisant des données non marquées et marquées pour le même ensemble de données. L'avantage d'utiliser ce type d'apprentissage est que l'étiquetage de données peut être couteux et prend souvent beaucoup de temps et beaucoup d'espace mémoire. De plus, les données étiquetées pourraient contribuer au biais humain. Dans ce cas-là, l'apprentissage semi-supervisé est assez pratique, ne nécessitant que quelques données marquées pour s'entraîner. Même s'il y a beaucoup de données non marquées dans le processus de formation, les performances du dernier modèle sont améliorées et le temps et les coûts sont réduits (*Mifdal, 2019*).

### 2.4.2.4 L'apprentissage par renforcement

Cet apprentissage se fait sans aucun encadrement, en interagissant avec le milieu extérieur (principe d'essai et d'erreur) et le résultat sera l'action de la machine vis à vis son environnement. Une récompense va être attribuée à chaque action appropriée de la part de la machine. L'objectif est de déterminer la stratégie comportementale optimale pour

maximiser la récompense totale. Pour ce faire, un simple retour des résultats est indispensable pour que la machine puisse définir sa façon de comportement. Ce retour de résultat s'appelle le signal de renforcement. Bien qu'il ne soit pas évident de concevoir ou de programmer manuellement des scénarios appropriés pour de meilleurs résultats, l'apprentissage automatique s'avère assez bénéfique pour les cas de prévisions à grande nombre de conditions (*Sutton, et al., 2012*).

### **2.4.3 Les type d'apprentissage supervisé**

Dans notre travail, on va procéder par un modèle d'apprentissage supervisé en lui fournissant une gamme de données. Le modèle va analyser et traiter les données suivant deux méthodes différentes qu'on va expliquer ci-dessous

#### **2.4.3.1 La classification**

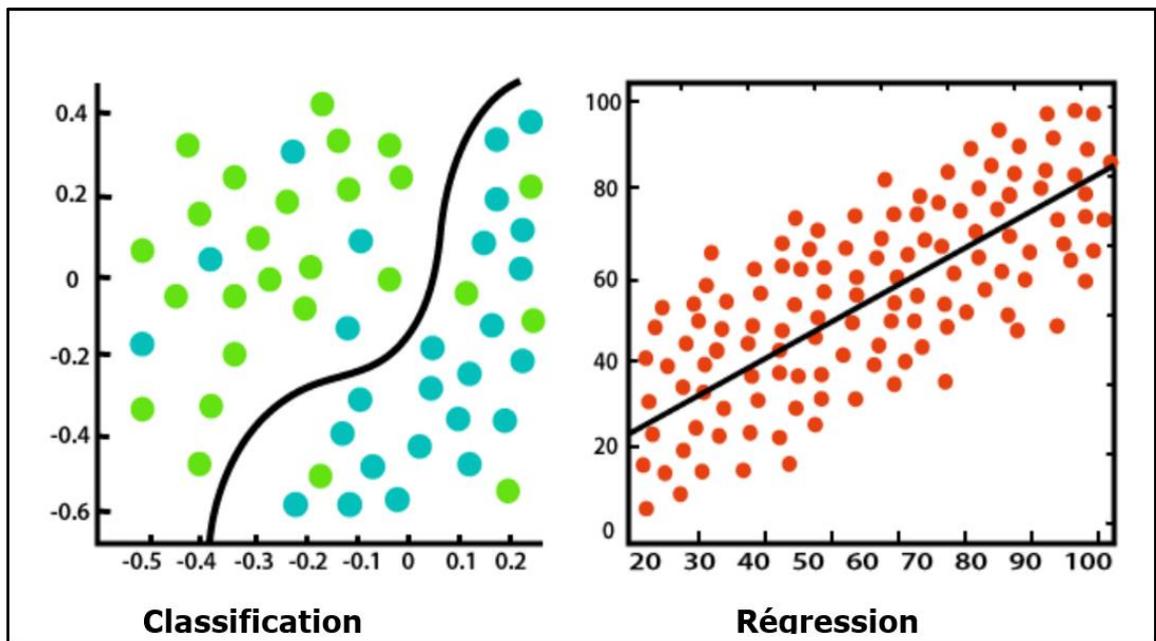
La classification est un processus qui consiste à trouver une fonction qui aide à diviser l'ensemble de données en classes en fonction de différents paramètres. Dans la classification, un programme informatique est entraîné sur l'ensemble de données d'entraînement, et sur la base de cet entraînement, il classe les données dans différentes classes.

La tâche de l'algorithme de classification consiste à trouver la fonction de mise en correspondance de l'entrée ( $x$ ) avec la sortie discrète ( $y$ ). (*Smola, 2008*)

#### **2.4.3.2 La régression**

La régression est un processus qui permet de trouver les corrélations entre les variables dépendantes et indépendantes. Elle aide à prédire les variables continues telles que la prédiction des tendances du marché, la prédiction des prix des maisons, etc.

La tâche de l'algorithme de régression est de trouver la fonction de mise en correspondance de la variable d'entrée ( $x$ ) avec la variable de sortie continue ( $y$ ) (*Smola, 2008*).



**Figure 2- 5** : Exemple d'apprentissage par régression et classification

#### 2.4.4 Différence entre l'apprentissage par régression et classification

L'apprentissage par classification se diffère à l'apprentissage par régression selon les points mentionnés dans le tableau suivant.

**Tableau 2. 1** : Comparaison entre l'apprentissage par Régression et Classification

<b>Régression</b>	<b>Classification</b>
La variable de sortie doit être de nature continue (réelle)	La variable de sortie doit être une valeur discrète.
Mettre en correspondance la valeur d'entrée (x) avec la variable de sortie continue (y).	Mettre en correspondance la valeur d'entrée (x) avec la variable de sortie discrète (y).
Utilisés avec des données continues.	Utilisés avec des données discrètes.
Nous essayons de trouver la meilleure ligne d'ajustement, qui peut prédire la sortie avec plus de précision.	Nous essayons de trouver la limite de décision, qui peut diviser l'ensemble de données en différentes classes.
Utilisés pour résoudre les problèmes de régression telles que la prévision météorologique, la prévision du prix des maisons... etc.	Utilisés pour résoudre des problèmes de classification tels que l'identification de spams, la reconnaissance vocale, l'identification de cellules cancéreuses ...etc.
L'algorithme de régression peut être divisé en régression linéaire et non linéaire.	Les algorithmes de classification peuvent être divisés en classificateur binaire et classificateur multi-classes.

## **2.5 Revue de littérature sur la télédétection (RS)**

### **2.5.1 Introduction**

Selon le sens littéral du mot, la télédétection désigne l'action d'acquérir à distance des informations sur un objet ou un phénomène quelconque sans que le détecteur être en contact direct avec l'objet à étudier. Actuellement le mot "télédétection" définit la science qui s'occupe de l'étude et la collection des informations sur des objets de l'environnement sur tout le globe au moyen de capteurs fonctionnant avec rayonnement électromagnétique qui se réfléchit ou transmette au travers la surface visé, montés à bord des plateformes aériennes ou spatiales (*Benmostefa, 2012*).

### **2.5.2 Définition formelle**

D'après le site Web du Centre Canadien de Télédétection, celle-ci est définie comme « La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information (*CCT, 2015*).

### **2.5.3 Principe de fonctionnement**

Comme il est mentionné dans la définition ci-dessus, la télédétection est basée sur le principe que tout corps, réfléchit ou émet du rayonnement électromagnétique selon ses propriétés physiques et chimiques d'une façon différente à un autre corps, en fonction du temps et de son emplacement dans l'espace (*CCT, 2015*).

A la fin de l'analyse et le traitement des informations issues des rayonnements et selon plusieurs propriétés (longueur d'onde, des moments d'observation et de l'emplacement relatif de l'objets) on peut, en principe :

- Identifier la nature des objets.
- Évaluer ou quantifier leurs caractéristiques.
- Contrôler le comportement dans le temps et dans l'espace de l'objet.
- Détecter par les capteurs la présence ou l'absence des objets non visible.

Les données acquises par les capteurs de télédétection permettent de reconstituer une image continue de la scène visée ou d'étudier le comportement des cibles (*CCT, 2015*). Acquérir des informations à distance signifie qu'il y a un flux d'informations entre l'objet observé et le capteur. Le support de cette information est un rayonnement électromagnétique

émanant de l'objet ou provenant d'un autre corps (soleil) et le reflétant. Le rayonnement électromagnétique est émis par tous les corps (planètes, êtres vivants et objets inanimés) et dépend fortement du volume et du type de rayonnement émis. (*González, et al., 2010*).

#### 2.5.4 Les étapes d'acquisition

Le processus de la télédétection au moyen de systèmes radar comporte les sept étapes :

- **Source d'énergie :** pour illuminer la cible il faut principalement une source d'énergie.
- **Rayonnement et atmosphère :** le rayonnement entre en interaction avec l'atmosphère au cours de son trajectoire entre la source d'énergie et la cible. Puis une deuxième interaction se fait dans le sens inverse du trajet entre la cible et le capteur.
- **Interaction avec la cible :** Quand le rayonnement atteint la cible, il entre en interaction avec sa surface, cette interaction dépend de plusieurs propriétés tels que : la longueur d'onde du rayonnement, la nature de surface de l'objet et les caractéristiques de l'atmosphère.
- **Enregistrement et traitement de l'information :** Une fois l'onde se divise en une onde réfléchie ou émise par l'objet ciblé, elle va être captée par l'instrument de captage pour être ensuite transférée souvent par des moyens électroniques à la machine qui s'occupe de traitement de données. A la fin de ce traitement l'image informative va être en format exploitable (photographiques ou numériques).
- **Utilisation de données :** La dernière étape du processus consiste à utiliser la donnée extraite pour bien comprendre l'objet visé, pour nous permettre d'en savoir plus sur sa nature ou pour aider à résoudre un problème spécifique (*FAO,2021*).

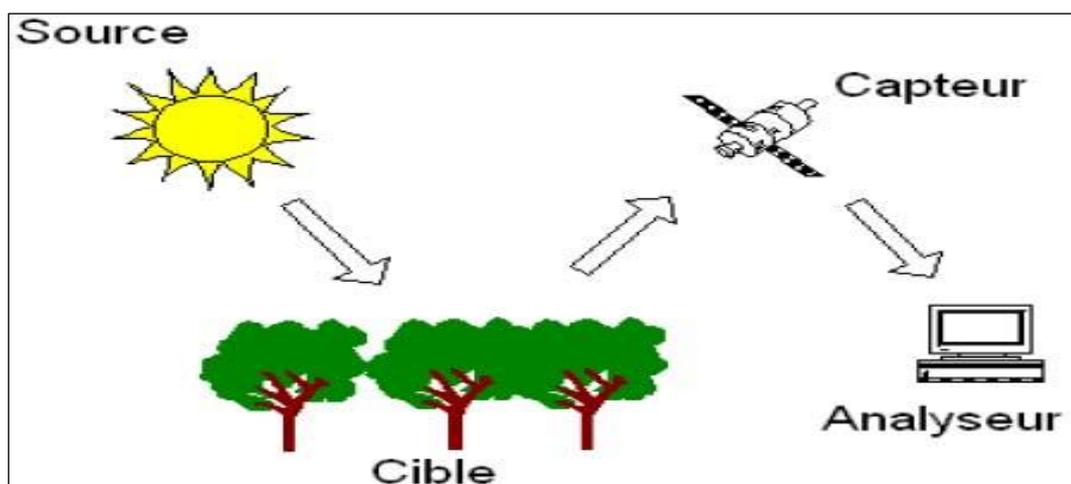


Figure 2- 6: Processus de la Télédétection (*FAO,2004*)

## 2.5.5 Quelques informations sur Landsat 8

Landsat 8 a été lancé le 11 février 2013 depuis la base aérienne de Vandenberg, en Californie. La charge utile du satellite Landsat 8 est constituée de deux instruments scientifiques : l'imageur terrestre opérationnel (OLI) et le capteur infrarouge thermique (TIRS). Ces deux capteurs fournissent une couverture périodique de la plaque terrestre mondiale à une résolution spatiale de 30 mètres (visible, NIR, SWIR) ; 100 mètres (thermique) ; et 15 mètres (panchromatique). Landsat 8 a été développé dans le cadre d'une collaboration entre la NASA et l'U.S. Geological Survey (USGS) (USGS, 2019).

Son objectif principal est d'obtenir des caractéristiques de température de surface et d'étudier le processus de transfert de chaleur et d'humidité dans l'intérêt du secteur agricole, de la gestion de l'eau, etc.

Dans notre travail, on utilise les images de Landsat 8 pour élaborer les cartes la végétation, l'humidité et les plans d'eaux.

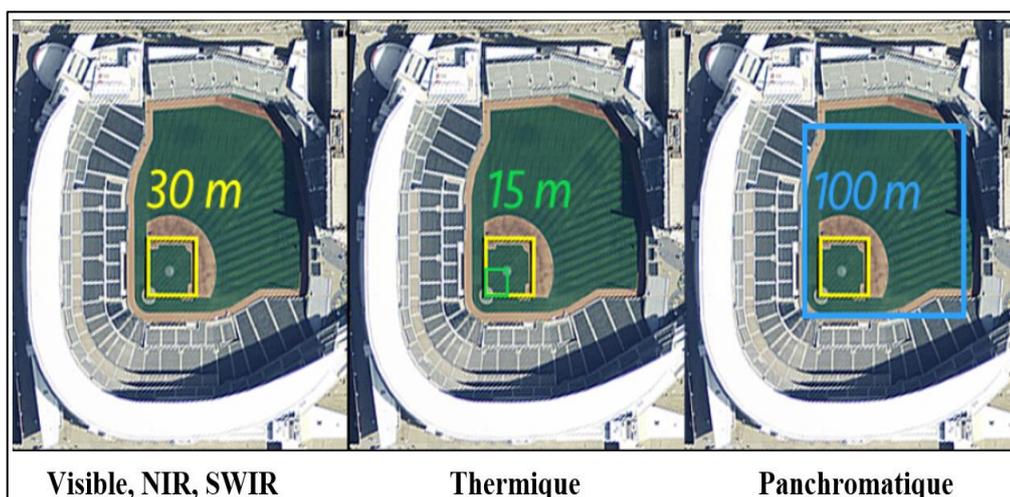


Figure 2- 7 : Type de résolution spatiale de Landsat 8

## 2.5.6 Domaine d'application de la télédétection

### 2.5.6.1 Météorologie et climatologie

L'importance de l'utilisation de la télédétection dans le domaine de la météorologie découle de la couverture globale et périodique de tout le globe. Dans des orbites géostationnaires, les satellites fournissent des images qui couvrent environ un cinquième de la superficie du globe chaque une demi-heure. Cinq satellites de ce type assurent la totale couverture de la terre sauf les deux régions polaires. Les capteurs utilisés permettent l'observation des nuages et leur mouvement, de mesurer des températures, l'humidité dans l'atmosphère, le vent...etc.

### **2.5.6.2 En océanographie**

La télédétection offre une image synoptique de vastes zones qui ne peuvent être atteintes par les moyens traditionnels (navires). Les données des satellites météorologiques sont fréquemment utilisées dans les applications océanographiques pour certaines études de moindre échelle (températures de surface des océans). Les satellites de télédétection terrestre équipés de capteurs à haute résolution sont les plus efficaces pour la recherche côtière (*Kergomard, 2020*).

### **2.5.6.3 En géologie**

La télédétection est une technique qui consiste à extraire des informations sur la composition et les caractéristiques de la surface de la Terre. Afin d'obtenir des informations sur la composition lithologique des roches à partir de la réflexion spectrale, elle est généralement couplée à d'autres sources de données pour des mesures supplémentaires. (*Kergomard, 2020*).

### **2.5.6.4 Les applications terrestres**

Les applications terrestres de la télédétection sont extrêmement variées. La photographie aérienne, sous toutes ses formes, est le moyen le plus usuel de télédétection. Les photographies aériennes sont de plus en plus utilisées sous forme numérique de façon à permettre leur correction géométrique et leur intégration dans les Systèmes d'Information Géographique. En télédétection spatiale, ce sont surtout les radiomètres optiques à haute ou très haute résolution qui sont utiles pour les applications terrestres (*Kergomard, 2020*).

## **2.6 Conclusion**

Nous avons à ce stade présenté, les concepts clés autour desquels repose le cadre de notre travail, en travers les conceptions de cartographie géographique et la collecte des données ainsi que les techniques modernes de l'aide à la prise de décision issue de l'intelligence artificielle pour entamer en suite la démarche de notre étude.

## **Chapitre 3 :**

### **Présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail**

# **Chapitre 3 : Présentation de la zone d'étude et méthodologie de travail**

## **3.1 Introduction**

Dans ce chapitre nous allons présenter la zone sur laquelle notre étude se déroule, une vue de littérature sur les situations géographique, climatique, géologique ...etc. puis on va expliquer la méthodologie de tout notre travail.

## **3.2 Présentation de la zone d'étude**

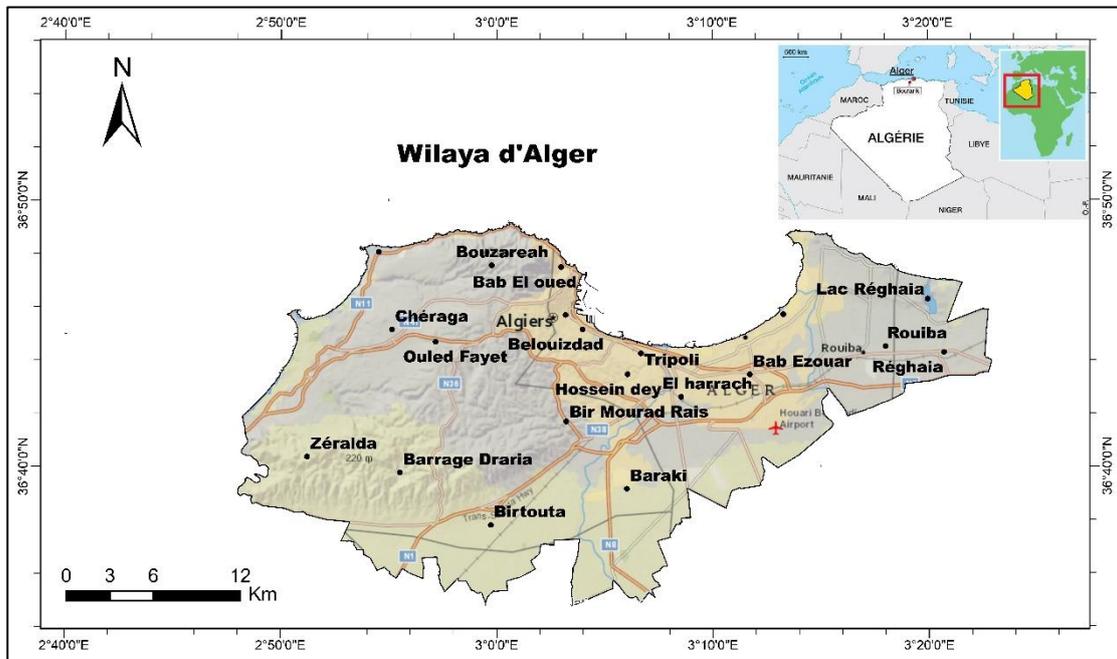
### **3.2.1 Introduction**

Selon les critères de classification des zones à risque d'inondation que nous avons présenté dans le chapitre 1, nous avons choisi la wilaya d'Alger sur laquelle nous allons procéder notre étude à cause de la forte périodicité des inondations observées dans cette zone au cours des dernières années.

Alger est la capitale d'Algérie, elle 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 cela fait un facteur majeur concernant l'exposition au risque d'inondation.

### **3.2.2 Contexte géographique**

Le territoire de la wilaya d'Alger s'étend sur une superficie de 1190 km<sup>2</sup>, elle est limitée par la mer Méditerranée au Nord, la Wilaya de Boumerdes à l'Est, la Wilaya de Tipaza à l'Ouest et la Wilaya de Blida au Sud.



**Figure 3- 1 : Localisation de la zone d'étude (Alger)**

### 3.2.3 Contexte géologique

L'étude cartographique approfondie de la zone algéroise montre des dépôts sédiments de type mio-plio-quaternaires dans le sous bassin de la Mitidja et le Sahel d'Alger, avec des sommets de type socle cristallin visibles entre Alger et Boumerdès (*Cherigui, et al., 2004*).

La majeure partie des limites entre les structures du Sahel et de la Mitidja et ces massifs de dépôts sont souvent des failles. Selon plusieurs auteurs ( (*Saadallah, 1981*), (*Mahdjoub, 1981*) les massifs métamorphiques d'Alger, Thénia et de Tamentefoust d'âge très débattu par plusieurs études scientifiques, depuis l'antécambrien, Hercynien à l'alpin, sont composés de formation de des marbres, des gneiss, et des micaschistes, ces formations sont injectées des roches de granites et de roches volcanique d'âge alpin.

Le massif Blidéen structuré en nappes de charriage (ensemble de couches géologiques) telliennes avec une fondation schistosité, est caractérisé par des schistes argilo- siliceux surmonté par les schistes argileux, les grès et les quartzites du Néocomien (Crétacé), au-dessus desquelles se sont mises en place les argiles compactes et laminées de l'Albien, les calcaires et marnes du Cénomaniens et des calcaires jaunes du Sénonien (*Cherigui, et al., 2004*).

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

### 3.2.4 Contexte géomorphologique

La morphologie de la côte algéroise est caractérisée par l'enchaînement de gradins à partir de la rive au bord de la mer et jusqu'à une altitude de plus de 300 mètres, stratifiés les uns au-dessus des autres comme une marche d'un escalier. Ces marches qui discrétisent la continuité des pentes, sont généralement assez raide et bordent le littoral algérois (*Metz, 1994*). La morphologie d'Alger est composée de trois zones longitudinales : le Sahel, le littoral et la Mitidja.

### 3.2.5 Contexte hydrographique

De nombreux rivières traversent Alger, qui sont indifféremment nommés « Oued » déversent tous dans la mer Méditerranée, qui fait la circonférence de toute la côte d'Alger. Elle possède un réseau hydrographique très diversifié, au mépris que le débit d'eau est faible, mais ses rivières reçoivent des crues importantes en cas de forte pluie (*Mamdouh, 2007*). Un réseau hydrographique assez dense est représenté par des cours d'eau situés dans le massif de Bouzaréah qui est marqué pour sa topographie accidentée et assure le drainage de ce massif. La plupart de ses cours d'eau a 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, plus à l'est, entre Chéraga et Aïn Benian, l'embouchure de l'Oued Beni Messous. À l'Est, les Oueds, El Hamiz, Réghaïa et oued El Harrach que l'Etat lui consacre ces dernières années un projet d'assainissement et d'aménagement (*Mamdouh, 2007*)

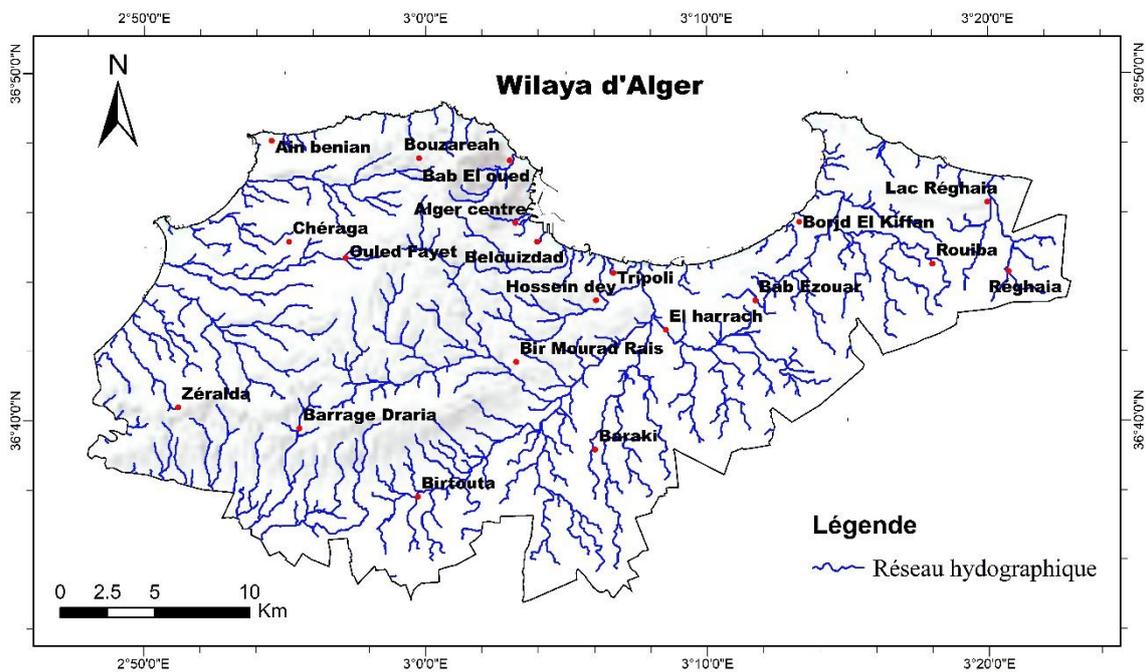


Figure 3- 2 : Carte de réseau hydrographique d'Alger et les stations pluviométriques

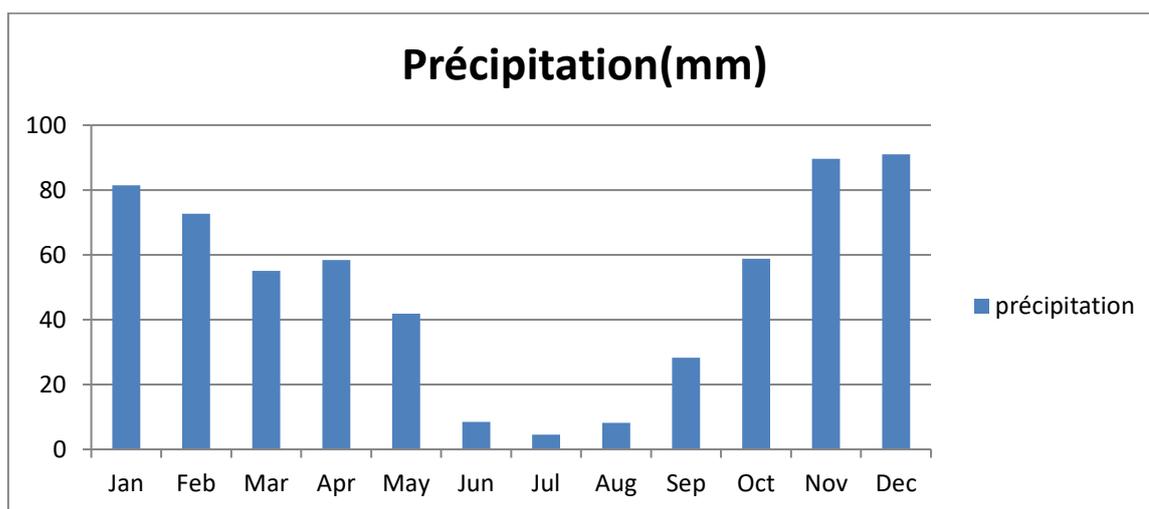
### 3.2.6 Contexte climatique

Le climat d'Alger est tempéré par la rencontre des mouvements des masse d'air froids du nord et chaud provenant de l'intérieur depuis le désert. La température moyenne annuelle varie dans la plaine de la Mitidja entre 17°C et 18°C. (*Mamdouh, 2007*).

### 3.2.7 Précipitation

La pluviométrie moyenne annuelle varie entre 600 et 900mm. Les premières pluies tombent généralement entre Septembre et Novembre, les dernières tombent d'Avril jusqu'à Mai. Bien que les évènements pluvieux soient peu fréquents et durent peu longtemps cependant ils sont intenses, ce qui signifie que les inondations peuvent être dangereuses et provoquer de considérables dégâts humains et matériels (*Doua, 2011*).

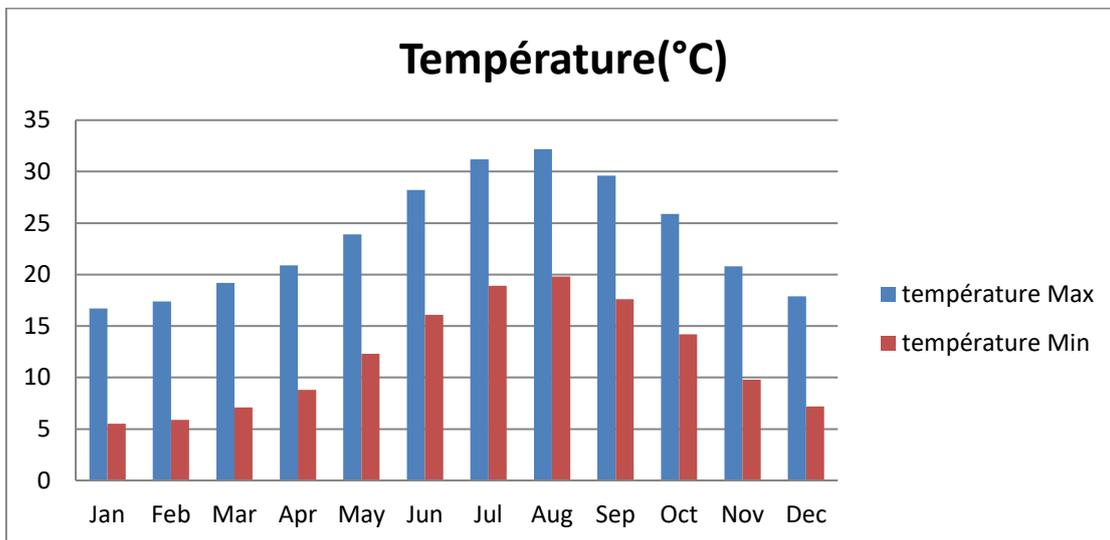
Nous présentons ci-dessous les données pluviométriques moyennes d'Alger pendant 30ans.



**Figure 3- 3 :** Variation des Pluies moyenne à Alger (1976-2005) *Source : (NOAA, 2021)*

### 3.2.8 Température

La température à Alger est généralement modérée. La saison chaude dure 3 mois, Les jours le plus chaud de l'année est dans le mois d'Aout. La saison fraîche dure 4 mois, Décembre au Mars, et peut aller même au mois d'Avril (*Doua, 2011*). Dans le tableau ci-dessous sont présentées quelque donnée de température moyenne maximale et minimale à Alger pendant 30 ans (du 1976 jusqu'à 2005).

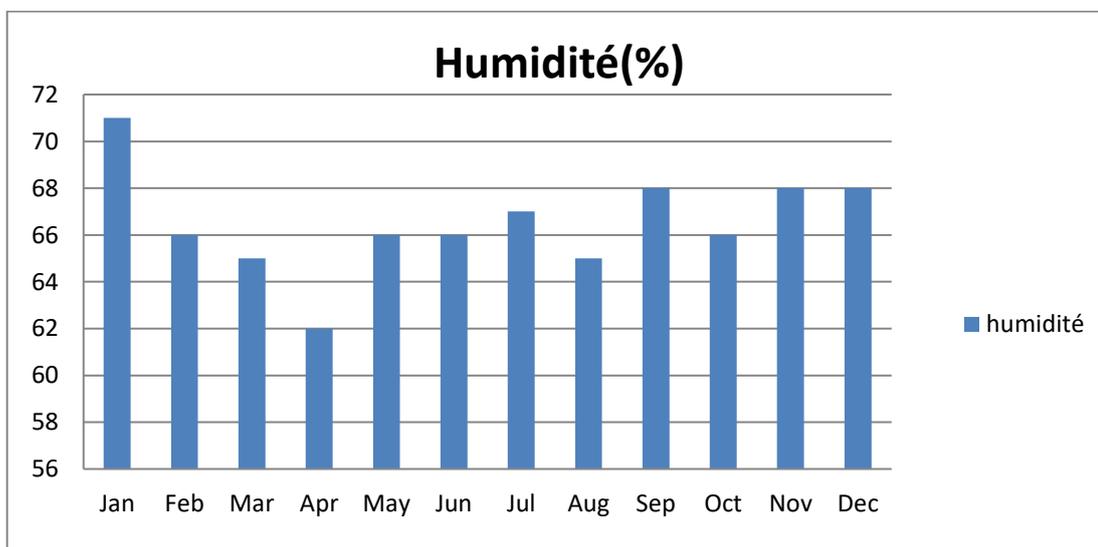


**Figure 3- 4 :** Variation moyenne maximale et minimale de la température à Alger  
**Source :** (NOAA, 2021)

### 3.2.9 Humidité

La variation de l'humidité à Alger subit des variation moyenne assez faible pendant les quatre saisons, dont elle est toujours dans la marge de soixante (60%) à quatre-vingt (80%) pourcent.

Le graphe ci-dessous donne, la variation de l'humidité à Alger pendant la totalité de l'année.



**Figure 3- 5 :** Variation de l'humidité à Alger **Source :** (Mamdouh, 2007)

### 3.3 Méthodologie

Notre démarche est basée sur l'intégration des outils du système d'information géographique (SIG), les techniques de télédétection et des modèles de l'apprentissage automatique d'aide à la décision pour élaborer une carte de vulnérabilité aux inondations. A cette fin nous allons suivre les étapes suivantes.

#### 3.3.1 Choix des facteurs entrant en jeu

Les principaux facteurs générateurs d'inondation utilisés pour l'évaluation des risques d'inondation peuvent être déterminés par les propriétés physiques des zones étudiées. Alors qu'une seule variable peut dans une large mesure contribuer aux inondations dans une région spécifique, elle peut n'avoir aucun impact dans une autre région (*Talukdar, et al., 2021*). Les facteurs utilisés dans cette étude ont été sélectionnés après consultation de différentes publications sur cette zone, Dans notre étude nous avons considéré huit (8) facteurs à savoir : les précipitations, l'élévation, la pente, NDWI, NDVI, TWI, la distance par rapport à la rivière et l'aspect.

##### 3.3.1.1 La pente

Dans les études hydrologiques, on constate que la pente du terrain joue un rôle important dans la régulation des débits. En effet, l'énergie cinétique du ruissellement augmente, proportionnellement avec la pente. De plus, avec une relation inversement proportionnelle la pente contrôle partiellement le processus d'infiltration. Les écoulements rapides se produisent dans les zones avec des pentes plus fortes, mais les inondations se manifestent dans les zones avec des pentes approximativement nulle. (*Talukdar, et al., 2021*).

##### 3.3.1.2 La pluie

Les pluies sont le principal élément causant les inondations, la quantité de pluie tombante est le paramètre le plus influençant sur les inondations, alors qu'il n'est pas clair dans quelle mesure une augmentation des précipitations entraînerait une augmentation correspondante à une inondations. La précipitation annuelle a été sélectionnée comme un facteur d'influence dans la cartographie de la vulnérabilité aux inondations. Les données des pluies moyennes ont été obtenues auprès de l'Agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH), mesurées sur 16 stations pluviométriques dès leur implantation jusqu'à l'année 2018, La méthode de pondération inverse de la distance (IDW) est utilisée pour interpoler les pluies moyennes dans l'ensemble de la zone.

##### 3.3.1.3 Aspect

L'aspect est un indice important pour analyser les crues au niveau des bassins versant. Lorsque le terrain est plat, il n'y a pas de pente, cela implique également qu'il n'y a pas d'aspect, par contre en montagne, il y a des pentes dans toutes les directions, cette direction est appelée l'aspect (*PANAHI, 2018*). S'il n'y a pas de pente, la valeur de la cellule sera -1,

les cellules grises dans les cartes d'aspect indiquent cette valeur. Lorsqu'il y a une pente, l'aspect est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir de 0 degré Nord. Il revient à sa position initiale de 360° nord. Nous avons besoin d'un modèle numérique d'élévation (MNE) pour générer cette carte d'aspect.

#### 3.3.1.4 Élévation

L'altitude est un élément essentiel dans le conditionnement des crues. Parce qu'elle a un impact sur les écoulements des eaux. Les lieux situés à une altitude plus élevée sont généralement protégés des crues soudaines, tandis que les lieux situés à une altitude plus faible présentent un risque important d'être inondés lors de crues torrentielles. La carte d'altitude est créée à l'aide du modèle numérique d'élévation (MNE) provenant du site Web "Earth Explorer" de USGS, dont la résolution spatiale est de 30m.

#### 3.3.1.5 Distance à la rivière

Ce facteur a un impact significatif sur l'étendue et la taille des inondations, les inondations sont plus susceptibles de se produire dans les zones situées près des rivières, ce facteur contribue le plus dans les régions côtières et urbaines près des rivières.

#### 3.3.1.6 NDVI

La végétation est un élément important à prendre en compte, lors de la détermination du risque d'inondation, c'est pourquoi l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est produit en combinant les bandes d'images du satellite Landsat 8 OLI collectées en Octobre 2013 par le centre de données EROS de l'USGS. L'indice NDVI a été développé pour montrer les différentes réponses spectrales de la végétation dans les bandes rouge et proche infrarouge. L'équation suivante a été utilisée pour calculer le NDVI.

$$NDVI = \frac{Band\ 5 - Band\ 4}{Band\ 5 + Band\ 4} \quad (1)$$

#### 3.3.1.7 NDWI

Cet indice a été développé par *McFeeters (1996)* pour détecter les eaux de surface et mesurer leur étendue. Étant donné que l'eau absorbe la lumière dans le domaine électromagnétique visible à infrarouge, L'indice utilise les bandes vertes (Bande 3) et proche infrarouge (Band 5) des images de (Landsat 8/OLI). Les plans d'eau ont généralement une réflectance élevée sur le spectre bleu (0,4 - 0,5 µm) que sur le spectre vert (0,5 - 0,6 µm) et rouge (0,6 - 0,7 µm) (*Claudia, et al., 2019*). L'indice NDWI est calculé à l'aide de l'équation.

$$NDWI = \frac{Band\ 3 - Band\ 5}{Band\ 3 + Band\ 5} \quad (2)$$

NDWI est sans dimension et varie entre -1 et +1. Les valeurs de NDWI supérieures à zéro sont présumées être des surfaces d'eau, tandis que les valeurs inférieures ou égales à zéro sont des surfaces nulles d'eau (*S.K.McFeeters, 1996*).

### 3.3.1.8 TWI (topographic wetness index)

L'indice d'humidité topographique a été développé par **Beven** et **Kirkby** (1979). La distribution géographique de l'humidité du sol et de l'écoulement des eaux sont influencées par la topographie, qui ont un contrôle de premier ordre sur la variation géographique des conditions hydrologiques. Par conséquent, le contrôle topographique sur les processus hydriques est généralement mesuré à l'aide de l'indice d'humidité topographique (TWI). L'accumulation d'écoulement dérivée de la direction d'écoulement et la pente du terrain sont récupérées à partir du MNE avec une résolution de 30 mètres, ont été utilisées pour calculer le facteur TWI de la zone. Avec l'équation suivante.

$$TWI = \ln \frac{A}{\tan \alpha} \quad (3)$$

Avec, **A** : accumulation d'écoulement et  **$\alpha$**  : La pente en degré (°)

### 3.3.2 Les modèles utilisés

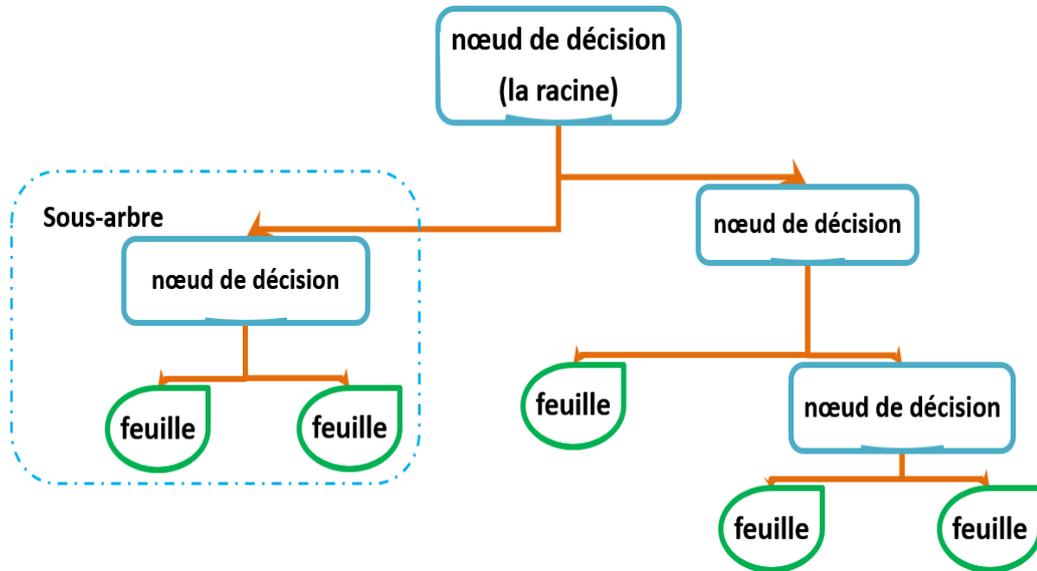
Parmi les modèles d'apprentissage automatique les plus fréquemment utilisés et qui ont montré leurs performances dans la cartographie des inondations, on va choisir deux modèles suivants :

#### 3.3.2.1 Arbre de décision (Decision Tree)

C'est une technique d'apprentissage supervisé qui peut être utilisée à la fois pour les problèmes de classification et de régression, mais elle est surtout utilisée pour résoudre les problèmes de classification grâce à sa simplicité algorithmique d'une part et de la facilité d'expliquer et interpréter les résultats d'autre part. Il s'agit d'un classificateur structuré en arbre, où les nœuds internes représentent les attribues, les branches représentent les règles de décision et chaque feuille représente le résultat.

Il s'agit d'une représentation graphique permettant d'obtenir toutes les solutions possibles à un problème/décision en fonction de conditions données. Un arbre de décision pose une question, et en fonction de la réponse (Oui/Non), l'arbre se divise en sous-arbres (*Alpaydm, 2014*).

Le diagramme ci-dessous explique la structure générale d'un arbre de décision.



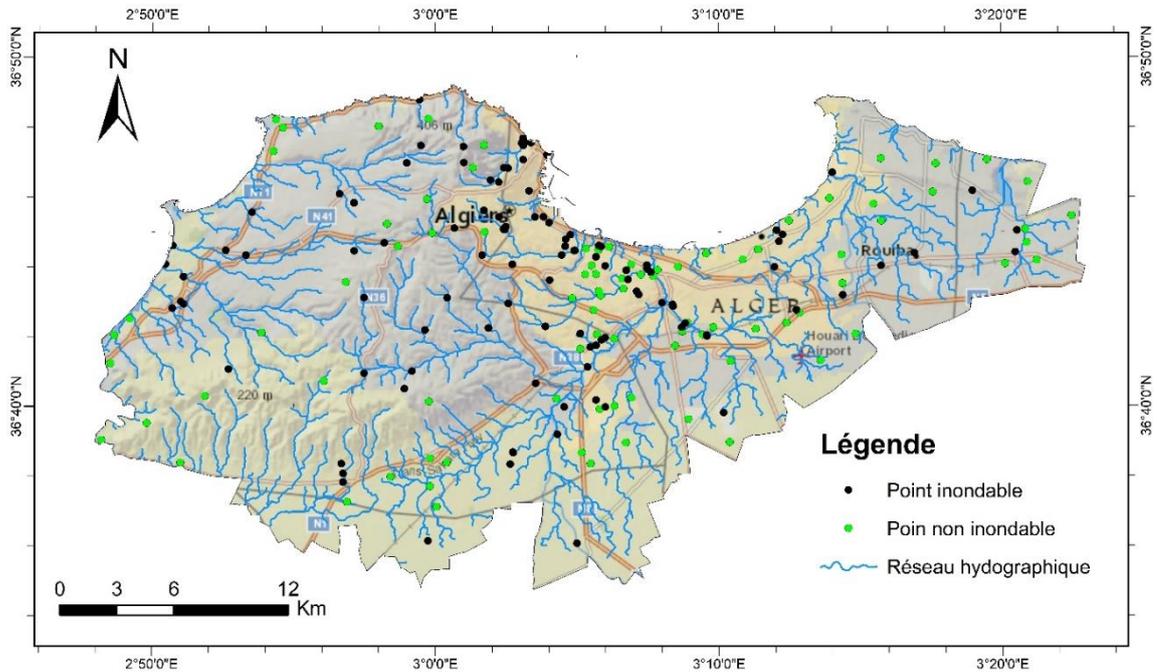
**Figure 3- 6 :** La structure générale d'un arbre de décision

### 3.3.2.2 AdaBoost (Adaptive Boosting)

C'est un algorithme de classification (introduit par **Schapire** et **Freund**, 1997) qui 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 (*Freund, et al., 1997*).

### 3.3.3 Carte d'inventaire des points

La création d'un inventaire des points (inondables et non inondables) constitue une étape essentielle pour procéder à la modélisation. Ceci est préparée sur la base des avis des experts, des témoignages des habitants de la zone étudiée et les historiques disponibles sur les inondations. 200 emplacements ont été identifiés et représentés par des points (80 % sont utilisés pour l'apprentissage, 20% restent pour la validation cette répartition est faite de façon aléatoire). Une valeur de 1 est attribuée aux points inondables. D'autre part, une valeur de 0 est attribuée aux autres non inondables. .



**Figure 3- 7 : Carte d'inventaire des points inondables et non inondables Source : ANRH**

### 3.3.4 Standardisation

La standardisation est une technique utilisée pour transformer les différentes entrées d'un problème de décision à une échelle commune, pour permettre la comparaison de ces entrées. Cette technique est fondée sur le principe de la logique floue (c'est une approche de prise de décision floue, inventée en 1970 par **Bellman et Zadeh**) et fonctionne d'une manière qu'on applique à chaque variable de décision d'un ensemble donnée une fonction d'appartenance floue, avec la meilleure option (solution idéale) est indiquée par **1** et la pire condition (solution non idéale) est indiquée par **0** (**Zadeh, et al., 1970**).

### 3.3.5 Validation du modèle

Les méthodes de validation et d'évaluation des modèles d'apprentissage automatique sont très nécessaires pour évaluer le résultat prédictif. Par conséquent, dans cette étude, on utilise la méthode de la courbe caractéristique de performance pour évaluer les deux modèles précédents.

La courbe caractéristique de performance, plus fréquemment désignée sous le terme « courbe ROC » (**receiver operating characteristic**) est un graphique représentant les performances d'un modèle de classification. C'est-à-dire d'un système qui a pour objectif de catégoriser des éléments en deux groupes distincts sur la base d'une ou plusieurs des caractéristiques de chacun de ces éléments (**Alpaydin, 2014**). Graphiquement, on représente souvent la ROC sous forme d'une courbe qui donne le taux de vrais positifs (Sensibilité) en fonction du taux de faux positifs (Spécificité). Ses formules sont données comme suit.

- Taux de vrais positifs

$$TVP = \frac{VP}{VP+FN} \quad (4)$$

- Taux de faux positifs

$$TFP = \frac{VN}{FP+VN} \quad (5)$$

Avec, VP : vrai positif i.e. (La valeur réelle était positive et le modèle la prédit une valeur positive), FP : faux positif i.e. (La valeur réelle était positive et le modèle la prédit une valeur négative), VN : vrai négatif i.e. (La valeur réelle était négative et le modèle la prédit une valeur négative) et FN : faux négatif i.e. (La valeur réelle était négative et le modèle la prédit une valeur positive).

Les vrais positifs et les vrais négatifs se réfèrent à ces pixels positifs(inondations) et négatifs (non inondation), qui sont divisés avec précision en classes positives ou négatives. À l'inverse, les faux positifs et les faux négatifs désignent les points positifs et négatifs qui sont incorrectement classés (*Schumann, et al., 2014*), pour évaluer la performance globale du modèle lors de la classification de données, on utilise le paramètre AUC (représente l'Aire sous la courbe ROC), calculé par la formule suivante.

$$AUC = \frac{VP+VN}{P+N} \quad (6)$$

Avec, P : les points positifs (inondable) et N : les points négatifs (non inondable)

**Tableau 3. 1 : Classification de la performance avec les valeurs de AUC Source : (Sajedi-Hosseini, et al., 2018)**

Valeur AUC	Performance de modèle
0.5 -0.6	Incompétent
0.6-0.7	Peu performant
0.7-0.8	Performance modérée
>0.8	Très performant

### 3.3.6 Carte de vulnérabilité

La création de la carte de vulnérabilité aux inondations se fait selon l'enchaînement des étapes qui se résume dans l'organigramme suivant.

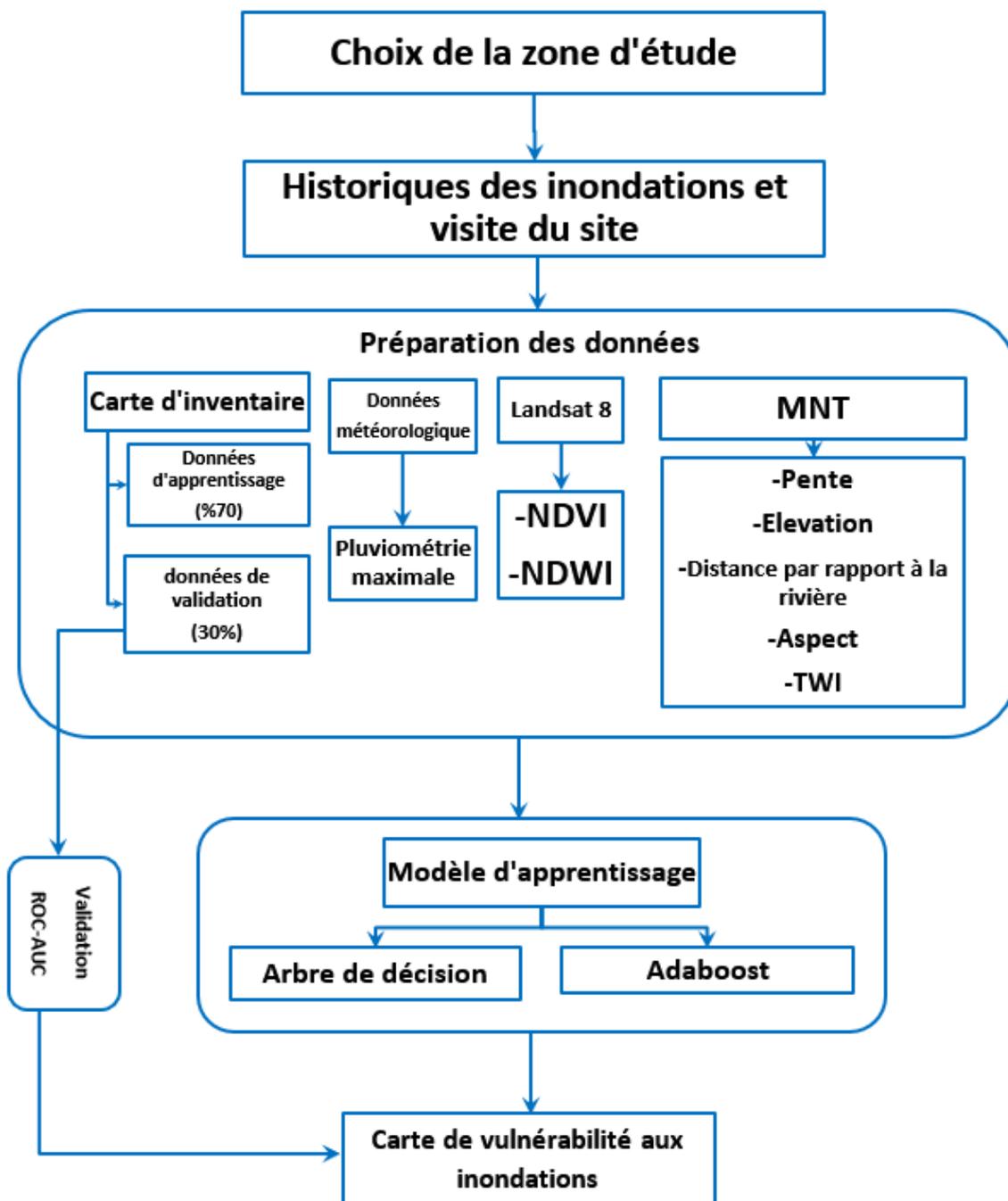


Figure 3- 8 : Organigramme récapitulatif de la méthodologie

### **3.4 Conclusion**

Nous avons présenté à ce niveau-là la totalité des données et notions nécessaires pour modéliser la carte de vulnérabilité en passant par la spécification de la zone d'étude ainsi que toutes ses situations vis-à-vis sa localisation, ses situations nous ont permis de déduire les facteurs principales influençant l'inondation avec présentation de chaque facteur avec sa distribution spatiale pour en fin clôturer le chapitre avec explication clarifiées de notre démarche poursuit pour aboutir au résultat suit par un schéma récapitulatif de notre étude que nous allons les présenter dans le chapitre suivant.

# **Chapitre 4 :**

## **Résultat d'étude et discussion**

# Chapitre 4 : Résultat d'étude et discussion

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire la présentation et l'interprétation des résultats obtenus représentés par des cartes de la distribution spatiale des différents facteurs et la carte finale de vulnérabilité ainsi qu'une discussion sur la fiabilité de nos modèles.

## 4.2 Résultats

### 4.2.1 les facteurs

Nous allons présenter dans ce qui suit les cartes des différents facteurs influençant les inondations

#### 4.2.1.1 La pente

La figure ci-dessous montre que la partie Est, Sud Est et Ouest de la région et qui est représentée principalement par les plaines de la Mitidja est caractérisée par des pentes faible (inférieure à 7 degrés), les pentes modérées se situent au centre-ouest de la zone, tandis que les pentes raides (pente généralement supérieure à 15 degrés) sont distribuées au massif de Bouzeréah.

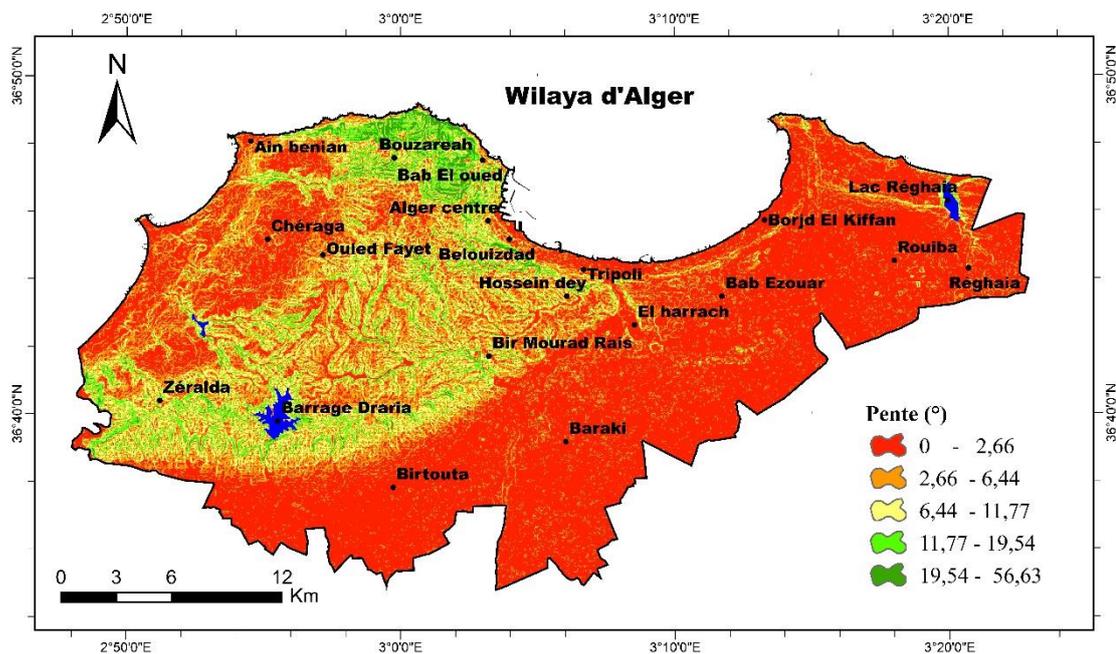


Figure 4- 1 : Carte de variation de la pente

### 4.2.1.2 Précipitation

Comme nous le montre la carte ci-dessous, la pluviométrie moyenne est divisée en six classes, avec un maximum d'environ 650mm dans la région de Oulad Fayet et les environs de Larbaa (Blida), un minimum de précipitation (environ 500mm) à l'Est (région de Réghaïa et Rouïba) et à l'Ouest de la zone (vers Zéralda- Koléa) et le reste de la zone est caractérisée par une pluviométrie moyenne entre 560 et 590mm.

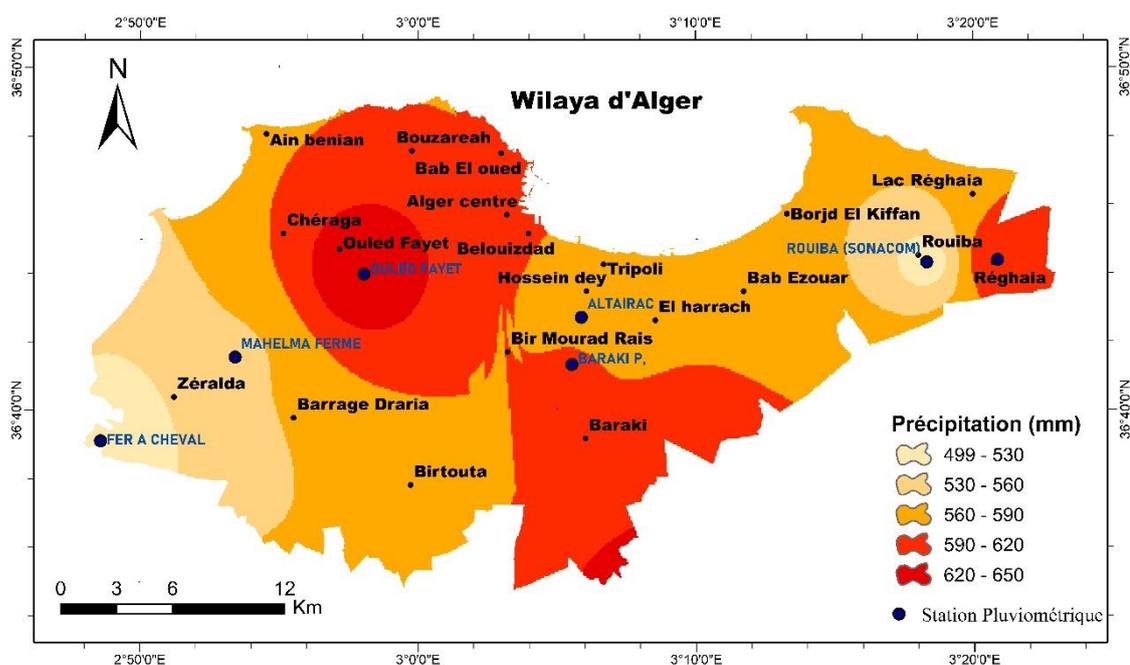


Figure 4- 2: Carte de pluviométrie moyenne

### 4.2.1.3 Aspect

Après sa génération, l'aspect ressort avec une palette de couleurs symbolisée en fonction de la direction de la pente (Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest). D'après la figure 4-3 la zone est divisée en deux majeures parties, l'une est la région du massif Ouest algérois qui se caractérise par des pentes dirigées vers le Nord-Ouest et vers le Sud-Ouest. Dans l'autre région qui est la plaine de Mitidja, l'aspect est nul car cette région est plate et les pentes y sont très faible.

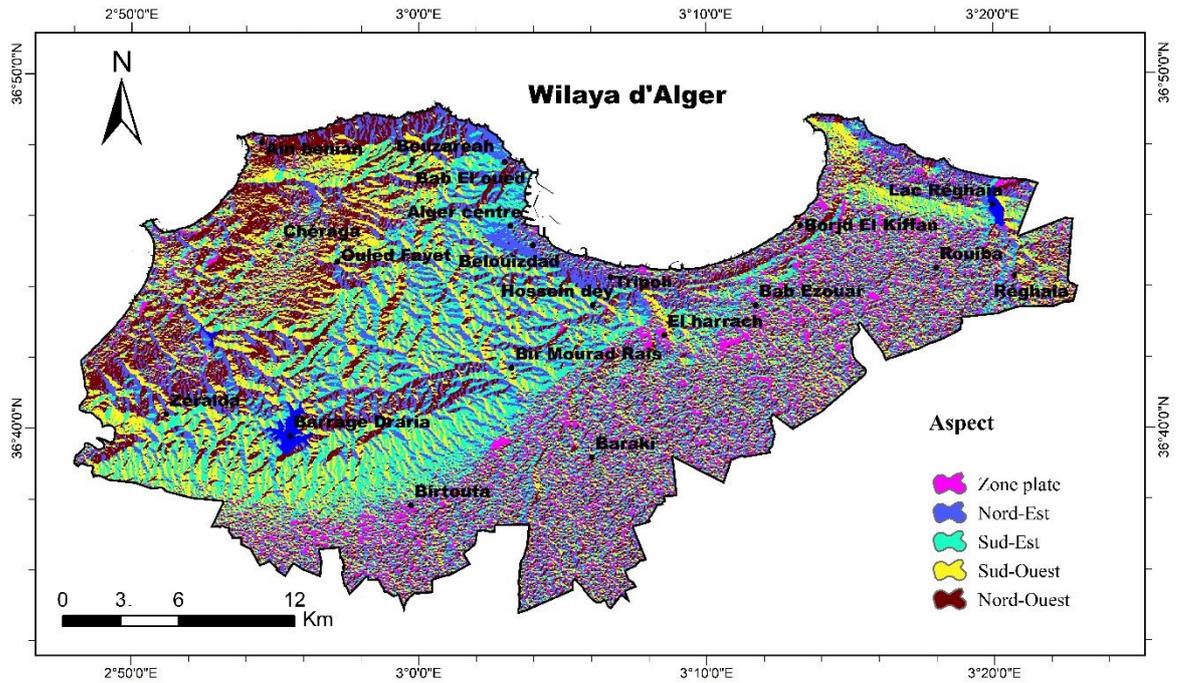


Figure 4- 3: Carte d'aspect de la pente

#### 4.2.1.4 Elévation

La topographie de la zone est partagée en trois parties, la première (<10m) caractérisée par des amplitudes très faibles, elle est située au littorale de Zéralda et au long du littorale de Bordj El Kiffan vers Alger centre, et la deuxième (10m-50m) situé au Sud vers l'Est (la plaine de Mitidja) et la troisième (>50m) situé au Centre vers l'Ouest.

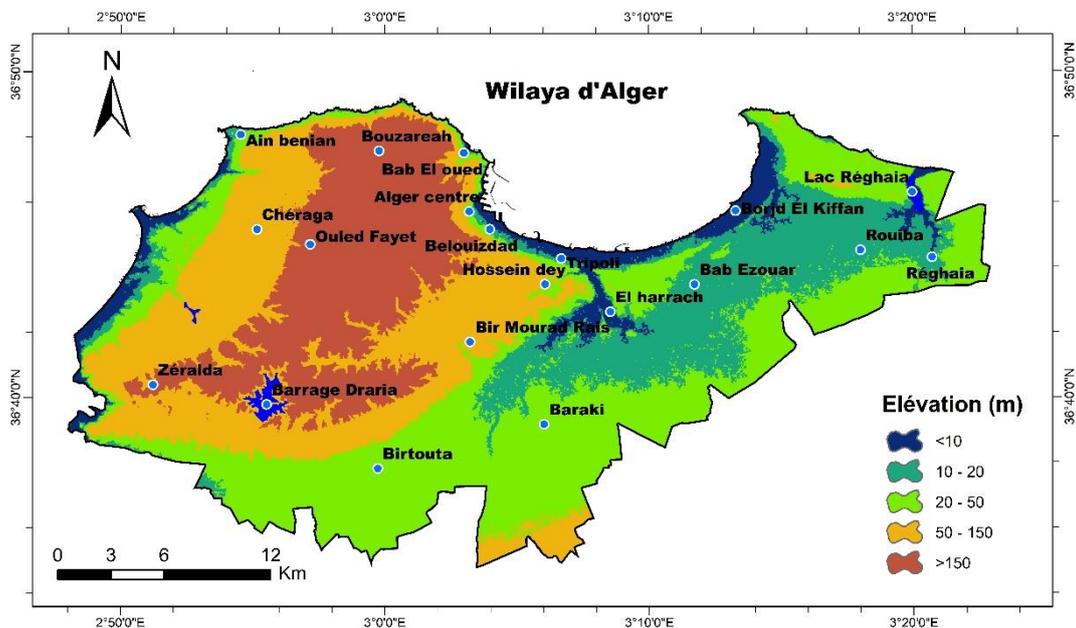


Figure 4- 4 : Carte de variation d'élévation

#### 4.2.1.5 Distance à la rivière

Les zones situées à moins de 90 mètres d'une rivière sont plus susceptibles d'être inondées (crue d'oued), elles peuvent s'étendre jusqu'à 100 mètres de la rivière. Les zones situées de 100 à 200 mètres sont généralement de moyenne susceptibilité. Cependant, les zones situées à plus de 200 mètres d'une rivière sont très peu susceptibles d'être inondées. La carte est divisée en cinq classes en utilisant la méthode quantile. Les oueds proches des villes et qui représentent une menace d'inondation sont les suivants : Oueds El-Harrach, Ouchayah, El-Hamiz, Koriche, Kniss et Oued Réghaia.

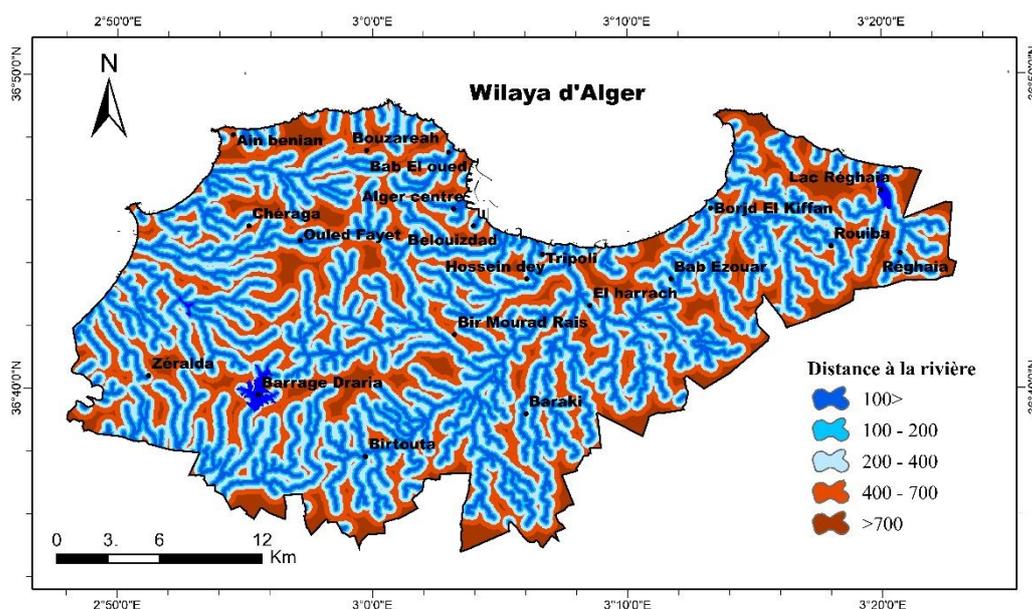


Figure 4- 5 : Carte variation de la distance par rapport à la rivière

#### 4.2.1.6 NDVI

La zone étudiée peut être divisée selon l'indice de végétation NDVI en deux majeurs parties, une première partie où l'indice varie de (-0,123 à 0,2) représentant les plans d'eau, l'urbanisation, les roches et les sols nus, se distribuant majoritairement dans le centre de la zone et au long du littoral algérois où il y a une forte agglomération, et une deuxième partie avec des valeurs supérieures à 0,2 représentant généralement les zones forestières, les jardins publics, les espaces agricoles, citons à titre d'exemple : la forêt de Ben Aknoun, la forêt de Bouchaoui, jardins d'essai, la plaine de Mitidja ...etc.

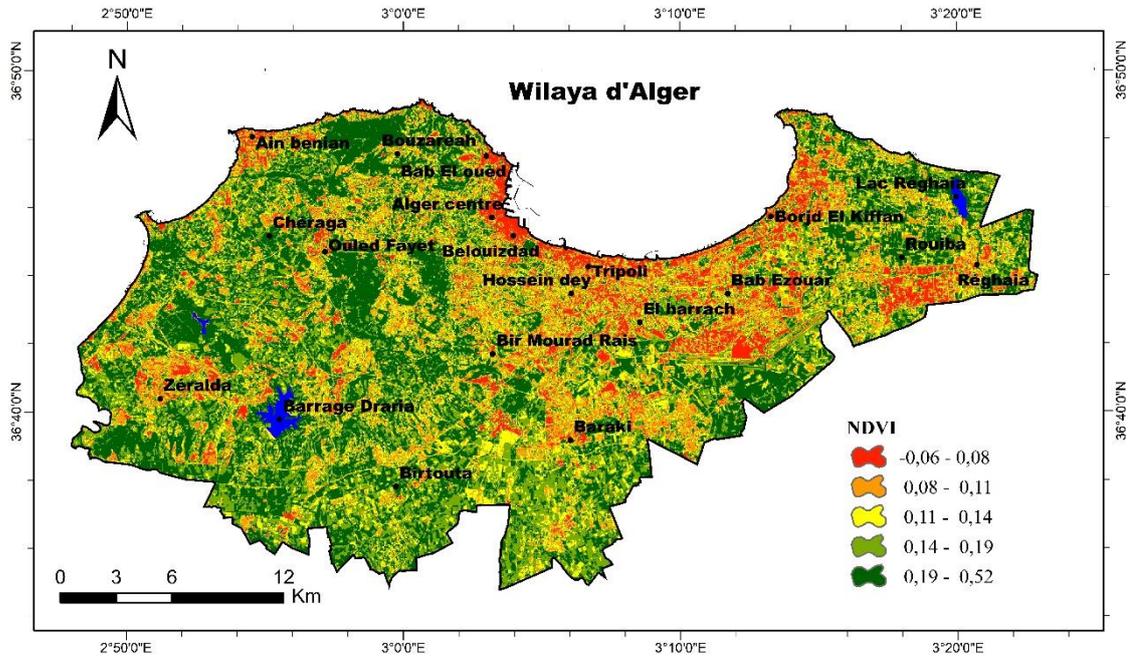


Figure 4- 6: Carte de variation de NDVI

#### 4.2.1.7 NDWI

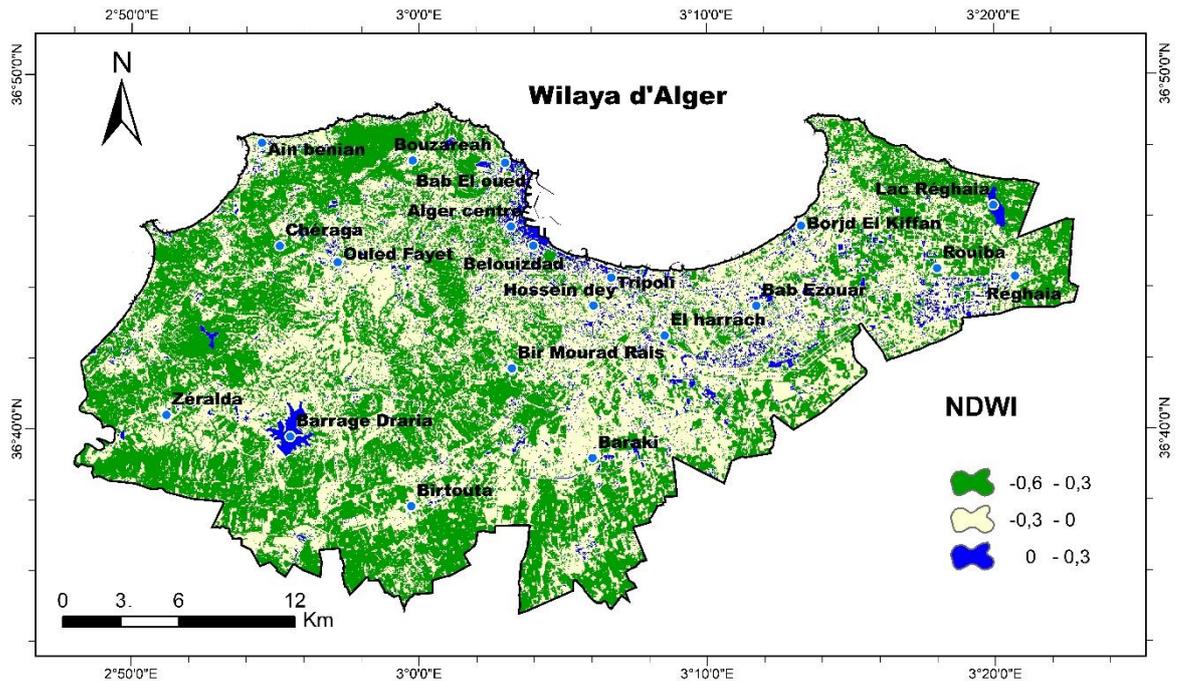


Figure 4- 7 : Carte de variation de NDWI

La figure 4-7 représentant la carte du NDWI est divisée en trois classes, la première classe ayant des valeurs allant de -0,6 jusqu'à -0,3 indique les parties végétalisées de la zone d'étude, distribuée considérablement sur les parties Est, Ouest et Sud de la région. La deuxième classe variant de (-0,3 à 0) représente les parties urbanisées et les sols nus, situées au centre de la zone (El -Harrach, Dar El-Beida, Draria et Hossein day), et la dernière classe de 0 à 0,3 indique les plans d'eau et les surfaces dans lesquelles l'eau stagne.

#### 4.2.1.8 TWI

La carte ci-dessous montre que la partie centre-ouest de la zone est caractérisée par des valeurs de TWI relativement faibles variant de 3,16 à 6,85 représentant une humidité faible et une forte génération de ruissellement, alors que la partie Est et Sud-Est représentée par la plaine de la Mitidja est caractérisée par des valeurs moyennes à élevées variant de 6,85 à 23,13 et qui indiquent une forte humidité.

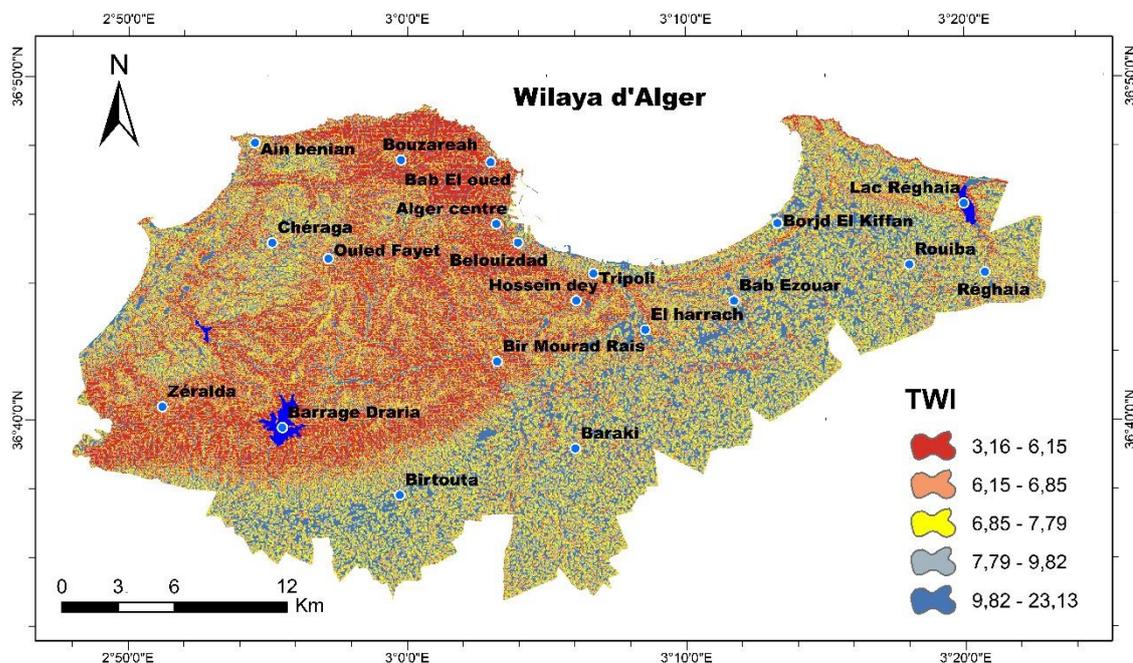


Figure 4- 8 : Carte de variation de TWI

#### 4.2.2 L'importance des facteurs

L'une des caractéristiques les plus importantes des modèles d'apprentissage automatique est qu'ils peuvent fournir des estimations sur l'importance des facteurs.

Pour AdaBoost, l'indice de teneur en eau par différence normalisée (NDWI), la Précipitation et la distance par rapport à la rivière ont été respectivement identifiés comme les facteurs les plus importants, suivis de NDVI, TWI, l'aspect, la pente et l'élévation.

Pour l'arbre de décision (DT), les facteurs NDWI, distance par rapport à la rivière et la précipitation viennent en premier comme étant les plus importants, suivis du TWI, NDVI, l'aspect puis la pente et l'élévation.

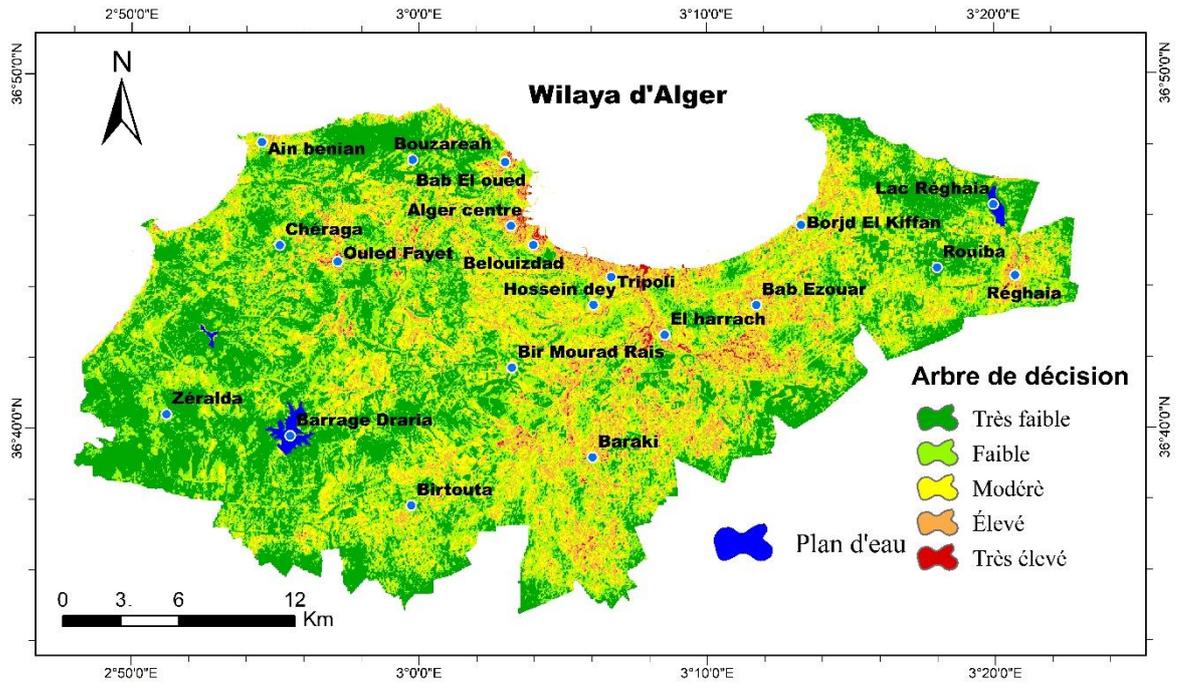
En résumé, des ressemblances significatives ont pu être observées dans les classements d'importance pour les deux modèles (Tableau 4.1).

**Tableau 4.1 : Classement d'importance des facteurs**

<b>Classe</b>	<b>AdaBoost</b>	<b>Arbre de décision</b>
1	NDWI	NDWI
2	Précipitation	La distance à la rivière
3	La distance à la rivière	Précipitation
4	NDVI	TWI
5	TWI	NDVI
6	Aspect	Aspect
7	Pente	Pente
8	Élévation	Élévation

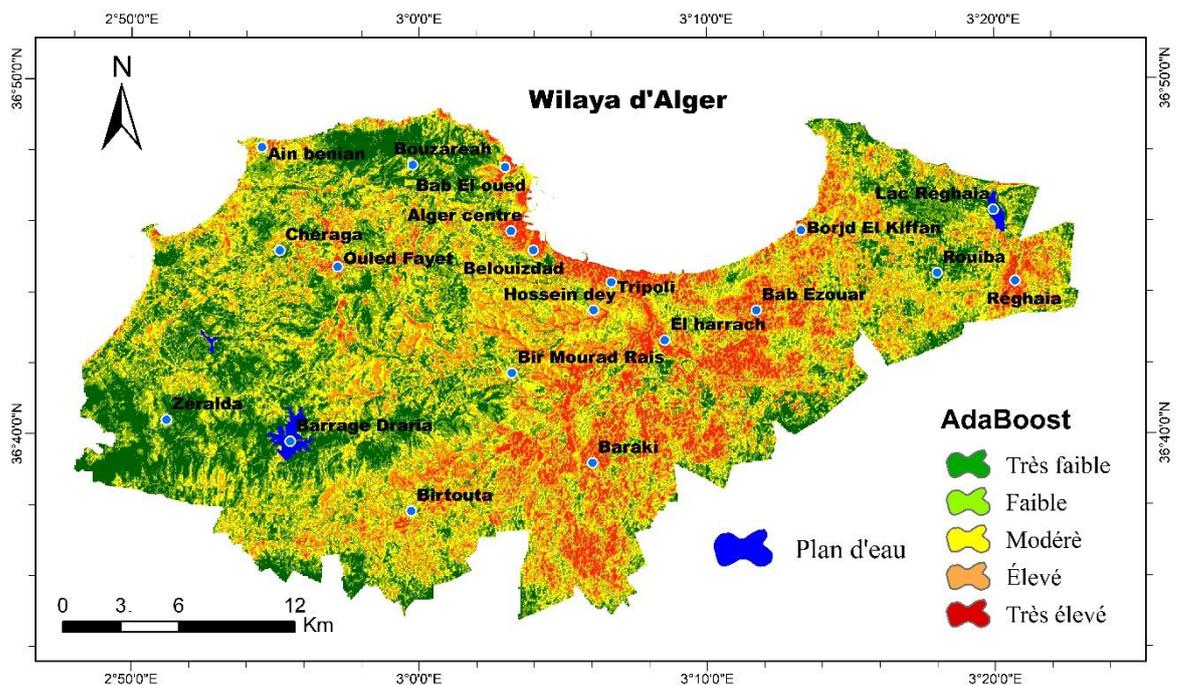
#### **4.2.3 Elaboration de la carte de vulnérabilité**

Selon le modèle « Arbre de décision », La carte de vulnérabilité présentée dans la (figure 4-9), a été générée en utilisant pour la classification la méthode des ruptures naturelles (natural breaks). Elle comprend cinq classes de vulnérabilité, la couverture spatiale des zones sensibles aux inondations très élevées et élevées est respectivement de 8,95% et 18,18% de la surface totale de la zone. Ces zones sont principalement situées dans la région près des Oueds et dans le littorale (de Bab El-oued à Bordj EL-kiffan) (tableau 4.2). Le reste de la zone est associé à des régions de vulnérabilité modérée, faible et très faible. Les pourcentages de superficie couvertes par ces zones sont respectivement 19,57%, 24,50% et 28,80%.



**Figure 4- 9 :** Carte de vulnérabilité avec le modèle Arbre de décision

Selon la carte présentée dans la (figure 4-10), qui a été générée en utilisant pour la classification la méthode des ruptures naturelles (natural breaks), la zone présente cinq classes de vulnérabilité. Elles sont divisées comme suit : vulnérabilité très faible, faible, modérée, élevée et très élevée. Les deux premières classes (très faible et faible) représentent, respectivement, 9,33% et 19,85% de la surface totale, alors que les trois classes restantes (modérée, élevée et très élevée) représentent, respectivement, 28,59%, 24,21% et 18,03% de la surface totale de la zone.



**Figure 4- 10 :** carte de vulnérabilité avec le modèle AdaBoost

Finalement, les résultats sont représentés dans le tableau suivant.

**Tableau 4. 2 : Classes des zones de vulnérabilité aux inondations**

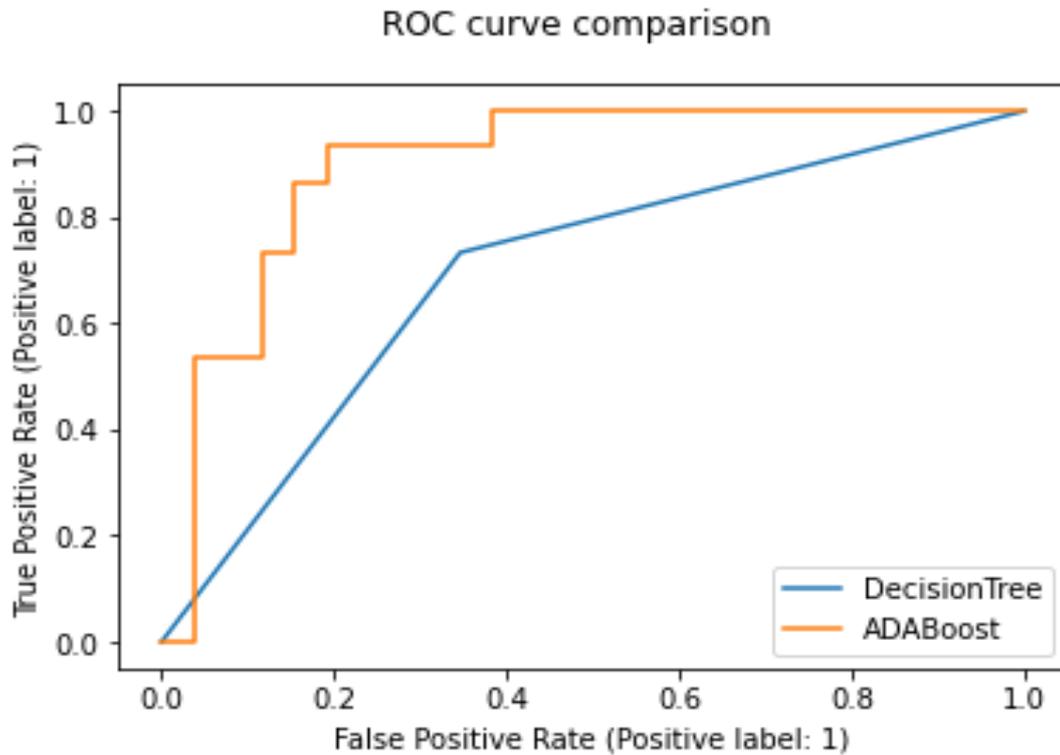
Modèle	Surface	Classe de vulnérabilité				
		Très élevée	Élevée	Modérée	Faible	Très faible
Arbre de décision	%	8,95	18,18	19,57	24,5	28,80
AdaBoost	%	18,03	24,21	28,59	19,85	9,33

#### 4.2.4 Validation

La validation des deux modèles a été effectuée à l'aide des valeurs AUC de la courbe ROC. D'après la courbe ROC présentée dans la figure (4-11), le meilleur modèle est AdaBoost avec un AUC égale à 0,90, alors que la valeur AUC de l'autre modèle qui est l'arbre de décision est de 0.68 (*Tableau 4.3*). La valeur de l'AUC a été estimée en tenant compte des valeurs des vrais positifs (VP) et des faux positifs (FP) de la modélisation. L'axe vertical et l'axe horizontal de cette courbe représentent les valeurs VP et FP. Les VP sont les pixels qui ont été correctement estimés comme étant sensibles aux inondations, et dans le cas contraire, les FP sont les pixels qui ont été incorrectement estimés comme étant sensibles aux inondations. Quarante pour cent (40%) des données globales ont été considérées comme des données d'apprentissage du modèle et les vingt pour cent (20%) restantes ont été considérées pour la validation. Plus les valeurs AUC sont élevées, plus la performance est meilleure, et vice versa. Dans notre cas, le modèle AdaBoost est le plus performant pour prédire la susceptibilité aux inondations avec une valeur AUC de 90%. Tous les résultats de validation sont résumés dans le tableau 4.3 .

**Tableau 4. 3 : Performance des deux modèles**

Modèle	AUC (%)
Arbre décision	90
AdaBoost	68



**Figure 4- 12** : La courbe ROC avec le modèle l’AdaBoost et l’Arbre de décision

### 4.3 Discussion

Alger est généralement exposée à des inondations fréquentes dans différentes régions. Les modèles qui ont été mis en œuvre pour la cartographie des inondations dans le présent travail sont l’Arbre de décision (DT) et l’AdaBoost. Dans cette étude, la carte de vulnérabilité aux inondations que nous avons produite était basée sur deux modèles différents qui ont été évalués et comparés. En outre, la distance par rapport à la rivière, la pente, l’élévation, la précipitation, l’aspect, le TWI, le NDWI et le NDVI sont reconnus comme les facteurs les plus influant et comme données d’entrée pour les modèles utilisées. La validation par la méthode de l’aire sous la courbe (AUC) a fourni une performance de 90 % et 68 % pour AdaBoost et l’arbre de décision, respectivement. Par conséquent, le modèle AdaBoost présentée dans ce travail a fourni de meilleures performances pour la cartographie des inondations.

Dans cette étude, les facteurs qui ont une influence importante sur les modèles de vulnérabilité aux inondations sont principalement des facteurs hydrologiques et topographiques comme la précipitation, la distance à la rivière et l’aspect. Les résultats obtenus à partir des modèles d’inondation ont révélé que les zones de faible élévation, de faible pente et proches des cours d’eau sont plus sensibles aux inondations. De plus, il est évident que les zones qui sont urbanisées et semi urbanisées sont affectées par les inondations parce que le facteur NDVI qui inclue la distribution d’urbanisation, a un poids important selon le résultat des modèles.

Tous ces résultats sont analogues aux données relevées sur terrain , ce qui affirme la fiabilité de ces méthodes d'apprentissage automatique dans la modélisation de vulnérabilité aux inondations. par conséquent, l'incorporation de la modélisation par l'apprentissage automatique est cruciale pour l'identification des zones sensibles et l'établissement des stratégies appropriées de la surveillance et de la gestion de ce risque naturel. Donc, une modélisation et une cartographie efficaces peuvent minimiser l'impact des inondations et réduire les risques de destruction des moyens de subsistance, de l'économie et des infrastructures des personnes.

#### **4.4 Conclusion**

Dans cette étude, deux algorithmes d'apprentissage automatique (l'arbre de décision et AdaBoost) ont été adoptés pour estimer les zones sensibles aux inondations avec une performance optimale pour le modèle AdaBoost. Dans la plupart des études liées à ce domaine, l'accent est mis sur l'utilisation de divers algorithmes d'apprentissage automatique appropriés pour estimer la vulnérabilité aux inondations. L'application de ces techniques dans ce domaine a non seulement permis de gagner du temps et de réduire les coûts, mais elle a également permis d'obtenir une précision significative en modélisation .

Dans notre étude, le modèle AdaBoost s'est avéré le plus performant en termes de capacité de prédiction et en terme de précision compte tenu des valeurs de l'AUC.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

L'inondation est un risque naturel aux conséquences environnementales, humaines et matérielles assez lourdes. Dans le cadre d'une stratégie de prévention contre les inondations, nous avons eu recours à la modélisation comme un outil utilisé pour délimiter l'emprise des zones sensibles à l'inondation dans la Wilaya d'Alger

La modélisation de vulnérabilité aux inondations est utile pour identifier les zones sensibles aux inondations et évaluer les moyens de prévention adéquats. La probabilité d'inondations de forte intensité est généralement faible, mais ses effets sur le développement socio-économique de la zone sont considérables. La gestion de risque des inondations nécessite des informations importantes sur les zones susceptibles d'être inondées. Cette étude a analysé la vulnérabilité de la wilaya d'Alger aux inondations en utilisant des techniques modernes de modélisation en faisant appel à l'apprentissage automatique. Deux modèles d'apprentissage automatique ont été utilisés pour la cartographie de vulnérabilité aux inondations qui sont AdaBoost et Arbre de décision DT.

La validation des deux modèles s'est faite à l'aide de la méthode AUC et elle a montré que l'AdaBoost est très performant et l'Arbre de décision a une performance modérée, avec des valeurs de validation de 90% pour la AdaBoost et 68 % avec Arbre de décision. La carte de vulnérabilité produite par les deux modèles est classée en cinq classes comme suit : très faible, faible, modérée, élevée et très élevée. L'AdaBoost a donné les pourcentages suivants : très faible (28,80 %), faible (24,5 %), modérée (19,57 %), élevée (18,18%) et très élevée (8,95%), et l'Arbre de décision : très faible (9,33%), faible (19,85 %), modérée (28,59 %), élevée (24,21 %) et très élevée (18,03%).

Ces résultats obtenus peuvent aider les responsables de la planification à mettre en œuvre des stratégies de prévention contre les risques liés à ce phénomène.

Ces techniques de modélisation affirment que l'intégration de l'intelligence artificielle dans le domaine de gestion de risque des inondations est très efficace il est donc recommandé de les appliquer pour l'établissement des cartes de vulnérabilité spécialement dans les zones où il y a un manque de données.

## Références bibliographiques

**ALCRUDO, Francisco.** Mathematical modelling technique for flood propagation in urban areas [en ligne].2005.[Consulter le 23/05/2021].Article: Proceedings 1st IMPACT project. Disponible à l'adresse: [https://www.researchgate.net/publication/242561773\\_Mathematical\\_modelling\\_techniques\\_for\\_flood\\_propagation\\_in\\_urban\\_areas](https://www.researchgate.net/publication/242561773_Mathematical_modelling_techniques_for_flood_propagation_in_urban_areas).

**ALLIER, D ; TOMO, F et BRUGERON, A.** Evaluation préliminaire du risque d'inondations par remontées de nappes [en ligne]. [Consulter le 23/04/2021]. France : Rapport intermédiaire.2011. 61p. Disponible à l'adresse: <https://www.google.com/search?q=inondation+par+remontee+de+nappes+phreatiques&aq=onondation+par+remontee+des+nappes+phreatiques&aqs=cchrome..69i57j33i22i29i30i2.9728j0j4&source=utm8>.

**ALPAYDIN, Ethem.** Introduction to machine Learning.US: PHI.2015.613 p. ISBN-13: 978-0262028189.

**APS.** Algérien presse service [en ligne].[Consulter le 23/04/2021].Disponible à l'adresse : <https://www.aps.dz/>

**BENMAMAR, Saâdia.** AménagementHydraulique. Alger :École Nationale Polytechnique. Support de cours.2021.Version imprimé.

**BENMOSTAFA, Majda-Amina.** Télédétection de la végétation maritime par radiomètres optiques passifs:cas du littoral Algérien [en ligne].[Consulté le 01/05/2021].2012. Disponible à l'adresse : [http://www.univ-usto.dz/theses\\_en\\_ligne/docnum.php?expln\\_umid=303](http://www.univ-usto.dz/theses_en_ligne/docnum.php?expln_umid=303)

**BOLSTAD, Paul.** GIS Fundamentals.5 édition.US : XanEdu.2016.546 p. ISBN-13 :978-150 66 9 5877.

**BOURENANE, Hamid et BOUHADAD, Youcef.** Flood hazard mapping in urban area using the hydrogeomorphological approach: Case study of the Boumerzoug and Rhumel alluvial plains (Constantine city, NE Algeria) [En ligne]. Journal of African Earth Sciences 160:103602. 2012. [ Consulté le 01/05/2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.researchgate.net/publication/335434497\\_Flood\\_hazard\\_mapping\\_in\\_urban\\_area\\_using\\_the\\_hydrogeomorphological\\_approach\\_case\\_study\\_of\\_the\\_Boumerzoug\\_and\\_Rhumel\\_alluvial\\_plains\\_Constantine\\_city\\_NE\\_Algeria](https://www.researchgate.net/publication/335434497_Flood_hazard_mapping_in_urban_area_using_the_hydrogeomorphological_approach_case_study_of_the_Boumerzoug_and_Rhumel_alluvial_plains_Constantine_city_NE_Algeria).

**BOUBCHI, M-A.** Risques d'inondation et occupation des sols dans le thore (région de labruguiere et de mazamet).2007. [Consulté le 25/05/2021]. Toulouse. 75 p.

**BUTLER, M et OUCHOT, C.** Application de la télédétection à la pêche marine : manuel d'initiation. [En ligne]. FAO Document technique sur les pêches. Rome : FAO.1992.203p. Disponible sur : <http://www.fao.org/3/t0355f/T0355F00.htm>.

**CCT.** Notions fondamentales de télédétection [En ligne].2019. [Consulté le 23/05/2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.rncan.gc.ca>.

**CCT.** Centre canadien de la télédétection. Notions fondamentales de télédétection Introduction [En ligne]. [Consulté le 23/05/2021].2015. Disponible à l'adresse : <http://www.ccrs.rncan.gc.ca>.

**CHABANE, Rabah et LABBOUI, Thanina.** Etude de protection contre les inondations de la ville d'EL BAYADH (OUED DEFFA).Mémoire de fin d'étude. Béjaia : Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2016.

**CHACHOU, Abdeldjalil.** Gestion de crue dans un bassin versant Etude hydrologique hydraulique et aménagement [en ligne] : Mémoire de Magister :Génie Hydraulique . Tlemcen :Université de Tlemcen. Disponible sur l'adresse : <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/handle/112/14098>.

**CHAKHAR, Salem.** Cartographie décisionnelle multicritère: formalisation et implémentation informatique [en ligne].2006.Université Paris Dauphine-Paris IX, 2006. [Consulté le 14/04/2021]. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00143960>.

**CHERIGUI, Ammar et BITAM, H.** Contexte Géologiques structural de la région Est Algéroise( Algerie) affectée par le seisme du 21 mai 2003. 2004 [en ligne]. [Consulté le 14/04/2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.research\\_gate.net/publication/256670726Contexte\\_geologique\\_et\\_structural\\_de\\_la\\_region\\_algeroise\\_Algerie\\_affectee\\_par\\_le\\_seisme\\_du\\_21\\_Mai\\_2003\\_In\\_Le\\_Seisme\\_de\\_ZemmouriBoumerdes\\_Algerie\\_du\\_21\\_Mai\\_2003](https://www.research_gate.net/publication/256670726Contexte_geologique_et_structural_de_la_region_algeroise_Algerie_affectee_par_le_seisme_du_21_Mai_2003_In_Le_Seisme_de_ZemmouriBoumerdes_Algerie_du_21_Mai_2003).

**CLAUDIA, VianaSandra; OLIVEIRA, Sérgio et ROCHA, Jorge.** Land Use Land Cover Change Detection and Urban Sprawl Analysis [en ligne]. Portugal : INSTITUTE OF GEOGRAPHY AND SPATIAL PLANNING, UNIVERSITY OF LISBOA.2019. [Consulté le 10/04/2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.academia.edu/39665963/Land\\_Use\\_Land\\_Cover\\_Change\\_Detection\\_and\\_Urban\\_Sprawl\\_Analysis](https://www.academia.edu/39665963/Land_Use_Land_Cover_Change_Detection_and_Urban_Sprawl_Analysis).

**CORTES Amandine.** L'appropriation active du risque inondation : intérêts et limites de la réglementation.2006. Etude de cas entre Seyssel et Bregnier Cordon (Haut Rhône), Rapport de stage Ingénieur Maître-Institut de la Montagne.

**CRED.** Bilan des catastrophes naturelles dans le monde de 1975 à 2004, The OFCA/CRED International Disaster Database.2007.Belgique : Université Catholique de Louvain.

**DE-RISI, Raffaele; JALAYER, Fatemeh et DEPAOLA Francesco.** From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa. 2019. Article. Natural Hazards. Vol: 100.p387–415.

**DEFRANCE, B.** Plan de prévention des risques naturels d'inondation(PPRNI) Brévenne Turdine.Tarare : Chef du Service Environnement Risques et Développement Durable(CERDD).2009.230 p.

**DGPC.** Direction Générale De La Protection Civile [en ligne]. [ Consulté le 05/06/2021]. Disponible à l'adresse: [www.protectioncivile.dz](http://www.protectioncivile.dz)

**DOUA, Imene-Messaouda.** Recalibrage de l'Oued El Harrach au niveau du centre urbain. Mémoire de fin d'étude. Alger : École Nationale Polytechnique.2011. 120p.

**DUCROT, François.** Qu'est-ce que la modélisation mathématique [En ligne]. France : Université Angers. Départements mathématiques.2008. Support de cours. [ Consulté le 05/06/2021]. Disponible à l'adresse : <http://www.math.univ-angers.fr/~ducrot/CSG/modelisation2008-res.pdf>.

**ESRI.** What is Geographic Information System Mapping Technology [En ligne]. [Consulté le : 21/05/2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>.

**FREUND, Yoav et SCHAPIRE, Robert.** A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting [En ligne]. Journal of computer and system sciences. Vol:55.Pages119-139.1997. [ Consulté le 03/06/2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002200009791504X>.

**GONZALE, Zonzález.** Manuel de Télédétection spatiale [en ligne].337p.2014. Disponible à l'adresse [https://www.grss-ieee.org/content/uploads/2014/07/FR\\_TUTORIAL\\_COMPLETO.pdf](https://www.grss-ieee.org/content/uploads/2014/07/FR_TUTORIAL_COMPLETO.pdf).

**GILARD, Olivier.** Les bases techniques de la méthode Inondabilité [En ligne].France : Cemagref.1998.207p. Disponible à l'adresse :<https://www.quae.com/produit/628/9782759211074/les-bases-techniques-de-la-methode-inondabilite>.

**HARVEY, Lionel.** Les Inondations Les Plus Chères Du Monde [En ligne].2021. Disponible à l'adresse : <https://fr.ripleybelieves.com/most-expensive-floods-in-world-3508>.

**HOSTACHE, Renaud.** Analyse d'images satellitaire d'inondations pour la caractérisation tridimensionnelle de l'aléa et l'aide à la modélisation hydraulique [En ligne].Thèse de Doctorats :France.Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts-Montpellier.ENGREF.2006. Disponible à l'adresse : <http://www.theses.fr/2006ENGR0004>.

**JAVATPOINT.** Machine learning. Regression vs classification in machine learning [En ligne]. [Consulte le 23/04/2021. Disponible à l'adresse : <https://www.javatpoint.com/regression-vs-classification-in-machine-learning>.

**LAHLAH, Salah.** Les inondations en Algerie.Batna :Guide technique.2004.190 p

**LEDOUX, Bruno.** La gestion du risque inondation. Paris : Lavoisier.2006.766p.

**MADI, Reda.** Contribution a l'étude des crues pour une gestion du risque aux inondations.2014. Mémoire De Master : aménagement hydraulique.Blida :Ecole Nationale Supérieure D'hydraulique -Arbaoui Abdellah.116p

**Mahdjoub, Y.** La déformation plastique d'échelle microscopique dans les unités tectoniques du massif d'Alger-Un écaillage contemporain de la mylonitisation épizonale.1981. Thèse de doctorats.3<sup>ème</sup> cycle Alger 140p.

**MAMDOUH, Shahin.**Water resources and hydro-meteorology of the arab region. Water Science and Technology Library[En ligne]. [Consulter le 23.06.2021].2007.589p. Disponible à l'adresse :<https://www.springer.com/gp/book/9781402045776>.

**MARANT, L.** Chapitre 1 connaissance du risque inondation : Comparaison entre la modélisation de rivière unidimensionnelle(1D) et bidimensionnelle(2D) en vue d'une modélisation de la Basse Vallée de la Dollar.Fance :Strasbourg. 2009. 86p.

**MCFEETER, S-K.** The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.[En ligne].Journal: Int.J.Remote Sens. Vol:17.1996-Issue 7. Disponible à l'adresse: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169.608948714>.

**METZ, Chapin-H.** Algeria a country study [en ligne].US.Washington : Library of Congress.5 édition.1996. Disponible à l'adresse :<https://www.worldcat.org/title/algeria-a-country-study/oclc/31434634>.

**MIFDAL, Rachid.** Application des techniques d'apprentissage automatique pour la prédiction de la tendance des titres financiers [en ligne]. Mémoire de Maîtrise électronique. Montréal :École de technologie supérieure.2019. Disponible sur : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2422>.

**MIND'J, Richard.** Flood susceptibility modeling and hazard perception in Rwanda.Rwanda: International journal of disaster Risk reduction [En ligne]. [Consulté 15/05/2021]. 2019.V :38. Disponible à l'adresse :<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101211>.

**NOAA.** National Oceanic and Atmospheric Administration. US Department of Commerce [en ligne]. [Consulter le 23/05/2021]. Disponible à l'adresse: <https://www.noaa.gov>

**PANAHI, Mahdi; HONG, Haoyuan et SHIRZAD, Atollah.** Flood susceptibility assessment in Hengfeng area coupling adaptive neuro-fuzzy inference system with genetic algorithm and differential evolution. [en ligne]. Journal: Science of The Total Environment. Disponible à l'adresse: [https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=Shirzadi+A&cauthor\\_id=29074239](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=Shirzadi+A&cauthor_id=29074239).

**PRADHAN, Biswajeet.** Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression. GIS and remote sensing. [en ligne]. Journal of Spatial Hydrology, 9, 1-18. 2009. Disponible à l'adresse [https://www.scirp.org/\(S\(oyulxb452a1nt1aej1nfow45\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1722778](https://www.scirp.org/(S(oyulxb452a1nt1aej1nfow45))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=1722778).

**RÉGIS, Caloz et CLAUDE, Collet.** Analyse spatiale de l'information géographique. Lausanne. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes [En ligne]. Collection Ingénierie de l'Environnement, 2011. p383. Disponible à l'adresse : <https://journals.OpenEdition.org/tem/1952>.

**RIFAI, Nabil ; KHATTABI, Abdellatif et RHAZI, Laila.** River flood modeling for integrated flood risk management: Case of Tahaddart watershed [En ligne]. Journal of Water Science. 2014. [Consulter le 23.06.2021]. Disponible à l'adresse : [https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2014-v27-n1-rseau\\_01120/1021982ar](https://www.erudit.org/fr/revues/rseau/2014-v27-n1-rseau_01120/1021982ar).

**SAADALLAH, Abou-El-Kacem.** Le massif cristallophyllien d'El Djazaïr (Algérie) : Evolution d'un charriage à vergence nord dans les Internides des Maghrébides. Alger: Thèse de doctorat. 160 p.

**SAJEDIHOSSEINI, Farzaneh et MALEKIAN, Arash.** A novel machine learning-based approach for the risk assessment of nitrate groundwater contamination. Science of the Total Environment. 2018. Vol:664. P954-962. [Consulter le 05.06.2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969718325373?via%3Dihub>.

**SCHUMANN, Gunter; BINDER, B-Elisabeth; HOLTE, Arne et BITTER, Istvan.** Stratified medicine for mental disorders. Journal : EUR Neuropsychopharmacologie. 2014. [Consulter le 18.06.2021]. Disponible à l'adresse : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24176673/>.

**SERRAOUI, Lamine ; MAMMERI, Salah et BOUAMRANW, Ali.** Modélisation et cartographie du risque d'inondation en milieu urbain [en ligne]. Mémoire De Fin D'étude : Département De Hydraulique Et Génie Civile. 2018. Disponible à l'adresse : <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/19888>

**SMOLA, Alexander-J.** An Introduction to machine learning [En ligne]. Statistique machine Learning program Canberra.Australia.2018. Disponible à l'adresse: <https://alex.smola.org/drafts/thebook.pdf>.

**SUTTON, Richard et BARTO, Andrew.** Reinforcement Learning: An Introduction.The MIT Press Cambridge. England: Massachusetts.2012. Disponible à l'adresse:<http://incompleteideas.net/book/bookdraft2017nov5.pdf>.

**TANGUY, Marion.** Cartographie Du Risque D'inondation En Milieu Urbain Adaptée À La Gestion De Crise Analyse Préliminaire. Québec : Institut national de la recherche scientifique Centre Eau Terre Environnement.2012. [Consulter le 10.06.2021]. Disponible à l'adresse : <http://espace.inrs.ca/id/epr/int/1641/1/R001395.pdf>.

**TALLUKDAR, Swapan; MAHATO, Susanta et KUNDU, Sonali.** Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models.article: Geoscience Frontiers. Vol: 12. Issue 3. May 2021. 101075. [Consulter le 12.06.2021]. Disponible à l'adresse : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987120302073>.

**USGS.** Landsat 8 (L8) Data Users Handbook.2019. Livre:Version 5.0. Disponible sur: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-data-users-handbook>.

**Munich-Re.** Annual Review: Natural Catastrophes 2010. Analysis's assessments positions. Munich. Topics Geo.2011. 54 p.

**ZADEH, Lotfi et BELLMAN, Richradade.** Decision making in fuzzy environment. 1970.Article: Mangement Science.INFORMS. Vol :17. issue 4. B141-B164. [Consulter le 09.06.2021]. Disponible à l'adresse : <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.17.4.B141>.

**ZAFANE, Ferhat.** Inondations de Bab El oued [En ligne]. Inondation de Bab El oued, 19 ans déjà.2020. [Consulter le 18.06.2021]. Disponible à l'adresse : <https://lapatrienews.dz/>.