

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES ET DES
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERSITE



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Présenté par :

CHETTIH Bilal

Mise en œuvre d'un modèle d'aide à la décision par les méthodes géospatiales et la télédétection pour les prévisions d'inondation cas dans l'ouest Algérien.

Soutenu publiquement le:

Devant le jury composé de:

LAOUINI Hamza	MCB	President	UKMO ouargla
BOUZAHAR Faiza	MCB	Encadrant	UKMO ouargla
MAABDI Nawel	MCA	Examineur	UKMO ouargla

Année: 2024/2025

DEDICACE

Je dedie ce modeste travail a mes chers parents, source intarissable d'amour et de soutien, qui m'ont toujours encourage sur le chemin de la connaissance. A mes freres et soeurs, compagnons de vie. A tous mes enseignants qui ont contribue a ma formation. A tous ceux qui me sont chers.

REMERCIEMENTS

Je tiens a exprimer ma profonde gratitude a mon directeur de memoire, dont les conseils eclaires, la disponibilite et la rigueur scientifique ont ete determinants dans l'elaboration de ce travail.

Je remercie egalement les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'evaluer ce memoire je remercie plus specialement madame Bouzahar faiza pour son aide et son suivi tout au long de mon stage.

Mes sincereres remerciements vont aussi a l'ensemble du corps enseignant du Departement de Geophysique pour la qualite de la formation dispensee tout au long de mon cursus universitaire.

Je remercie les agents du Centre National des Techniques Spatiales (CNTS) d'Arzew, de l'Office National de Meteorologie (ONM) et de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) pour avoir mis a ma disposition les donnees necessaires a cette etude.

Enfin, je remercie tous mes amis et camarades de promotion pour les moments partages et l'entraide mutuelle tout au long de ce parcours.

RESUME

Les inondations constituent l'un des risques naturels les plus devastateurs dans la region ouest-algerienne, causant des pertes humaines et materielles considerables. La presente etude vise a mettre en oeuvre un modele d'aide a la decision integrant les methodes geospaciales et la teledetection pour la prevision et la cartographie des zones exposees aux risques d'inondation.

La demarche methodologique adoptee repose sur l'integration et le traitement de donnees multi-sources : images satellitaires (Sentinel-2, Landsat 8/9), Modele Numerique de Terrain (MNT) SRTM et ASTER, donnees pluviometriques historiques, ainsi que les cartes geologiques et pedologiques de la zone d'etude. Ces donnees ont ete traitees dans un environnement Systeme d'Information Geographique (SIG) sous QGIS/ArcGIS, combine a la teledetection avancee.

Un modele de susceptibilite aux inondations a ete construit par la methode d'evaluation multi-criteres (AHP - Analytical Hierarchy Process), en integrant plusieurs facteurs de controle : la pente, la lithologie, l'occupation du sol (NDVI, LULC), la densite de drainage, la proximite aux cours d'eau, l'indice de convergence topographique (TWI) et la pluviometrie. Les resultats ont ete valides par comparaison avec les evenements historiques d'inondation repertories.

La cartographie finale de la vulnerabilite aux inondations revele que les zones les plus exposees se concentrent dans les plaines alluviales des bassins versants de la Tafna, de la Mekerra et de l'oued Cheliff occidental. Le modele developpe offre un outil operationnel d'aide a la decision pour les gestionnaires du risque, les services de protection civile et les planificateurs urbains dans la region.

Mots cles : *Inondations, Teledetection, SIG, AHP, Ouest Algerien, Aide a la decision, Modele de susceptibilite, Bassin versant.*

ABSTRACT

Floods are among the most devastating natural hazards in the western Algerian region, causing considerable human and material losses. The present study aims to develop a decision support model integrating geospatial methods and remote sensing for flood forecasting and mapping of flood-prone areas.

The adopted methodological approach is based on the integration and processing of multi-source data: satellite imagery (Sentinel-2, Landsat 8/9), Digital Elevation Models (SRTM and ASTER DEM), historical rainfall data, as well as geological and pedological maps of the study area. These data were processed in a Geographic Information System (GIS) environment using QGIS/ArcGIS combined with advanced remote sensing techniques.

A flood susceptibility model was constructed using the Multi-Criteria Evaluation (AHP - Analytical Hierarchy Process) method, incorporating several controlling factors: slope, lithology, land use/land cover (NDVI, LULC), drainage density, proximity to water courses, Topographic Wetness Index (TWI), and rainfall. The results were validated by comparison with historical flood events.

Keywords: *Floods, Remote sensing, GIS, AHP, Western Algeria, Decision support, Susceptibility model, Watershed.*

LISTE DES ABREVIATIONS

Abreviation	Signification
AHP	Analytical Hierarchy Process (Processus de Hierarchie Analytique)
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CNTS	Centre National des Techniques Spatiales
DEM / MNT	Digital Elevation Model / Modele Numerique de Terrain
EVI	Enhanced Vegetation Index
LULC	Land Use / Land Cover (Occupation et Utilisation du Sol)
MCE	Multi-Criteria Evaluation (Evaluation Multi-Criteres)
MNDWI	Modified Normalized Difference Water Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
ONM	Office National de Meteorologie
SIG	Systeme d'Information Geographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TWI	Topographic Wetness Index (Indice de Convergence Topographique)

TABLE DES MATIERES

Dedicace

Remerciements

Resume / Abstract

Liste des abreviations

Table des matieres

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES INONDATIONS ET L'ETAT DE L'ART

I.1. Contexte general

I.2. Les inondations : definition et classification

I.3. Les inondations en Algerie : bilan et historique

I.4. Les inondations dans l'ouest Algerien

I.5. La teledetection appliquee aux risques naturels

I.6. Les SIG dans la gestion des risques d'inondation

I.7. Les modeles d'aide a la decision

I.8. Etat de l'art et travaux anterieurs

CHAPITRE II : CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

II.1. Presentation de la zone d'etude

II.2. Contexte geomorphologique

II.3. Contexte geologique

II.4. Contexte climatique et hydrologique

II.5. Reseau hydrographique

II.6. Occupation du sol

CHAPITRE III : MATERIELS, DONNEES ET METHODOLOGIE

III.1. Materiels utilises

III.2. Donnees satellitaires

III.3. Donnees topographiques

III.4. Donnees climatologiques et hydrologiques

III.5. Pre-traitement des images

III.6. Extraction des facteurs de susceptibilite

III.7. Methode AHP (Analytical Hierarchy Process)

III.8. Modele de susceptibilite aux inondations

III.9. Validation du modele

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Cartographie des facteurs de susceptibilite

IV.2. Ponderation AHP et coherence

IV.3. Carte de susceptibilite aux inondations

IV.4. Zones a risque identifiees

IV.5. Validation et performance du modele

IV.6. Discussion

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

INTRODUCTION GENERALE

Les catastrophes naturelles constituent une menace permanente pour les sociétés humaines, et parmi elles, les inondations occupent une place particulièrement préoccupante. A l'échelle mondiale, elles représentent le risque naturel le plus fréquent et le plus meurtrier, affectant chaque année des millions de personnes et engendrant des pertes économiques considérables. La région méditerranéenne, et plus particulièrement le Maghreb, n'échappe pas à ce phénomène, qui s'est considérablement accentué ces dernières décennies sous l'effet conjugué des changements climatiques et d'une urbanisation accélérée et mal maîtrisée.

L'Algérie, de par sa position géographique et ses caractéristiques climatiques, est régulièrement touchée par des épisodes d'inondations dévastatrices. La région ouest du pays, qui comprend les wilayas de Tlemcen, Oran, Sidi Bel Abbès, Ain Temouchent, Mascara et Mostaganem, présente une vulnérabilité particulière en raison de la configuration de ses bassins versants, de la variabilité spatio-temporelle des précipitations et de la pression anthropique croissante exercée sur les zones inondables. Les événements catastrophiques de Bab El Oued (2001), de Ghardaia (2008) ou encore les crues récurrentes de l'oued Mekerra constituent des illustrations tragiques de cette vulnérabilité.

Face à l'ampleur de ce défi, les gestionnaires du risque et les décideurs ont besoin d'outils performants, fiables et opérationnels pour anticiper, prévenir et atténuer les effets des inondations. Les avancées technologiques récentes en matière de télédétection spatiale et de Systèmes d'Information Géographique (SIG) ouvrent des perspectives prometteuses pour répondre à ce besoin. L'accès gratuit à des données satellitaires de haute résolution (Sentinel-2, Landsat 8/9) et à des modèles numériques de terrain de précision (SRTM, ASTER DEM) permet désormais de produire des analyses spatiales détaillées à l'échelle des bassins versants.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent mémoire, dont l'objectif principal est la mise en œuvre d'un modèle d'aide à la décision intégrant les méthodes géospatiales et la télédétection pour la prévision des inondations dans l'ouest algérien. Plus spécifiquement, ce travail vise à : (1) identifier et cartographier les facteurs de susceptibilité aux inondations, (2) construire un modèle de vulnérabilité par la méthode d'évaluation multicritère AHP, (3) valider le modèle par confrontation avec les événements historiques, et (4) proposer des outils d'aide à la décision utilisables par les acteurs de la gestion du risque.

La démarche méthodologique adoptée est résolument pluridisciplinaire, croisant les apports de la géophysique environnementale, de la télédétection, de l'hydrologie et des

sciences de l'information géographique. Elle s'articule autour du traitement et de l'intégration de données multi-sources dans un environnement SIG, suivi d'une analyse multicritère pour la production de cartes de susceptibilité à différentes échelles.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique sur les inondations, les méthodes de télédétection et les modèles d'aide à la décision. Le deuxième chapitre décrit le cadre géographique, géologique et climatique de la zone d'étude. Le troisième chapitre détaille la méthodologie et les outils employés. Enfin, le quatrième chapitre présente et discute les résultats obtenus, avant que la conclusion ne propose des perspectives de développement et d'application.

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES INONDATIONS ET L'ETAT DE L'ART

I.1. Contexte general

Le XXI^e siecle est marque par une intensification des risques naturels, alimentee par les changements climatiques globaux et la pression demographique croissante sur des territoires de plus en plus vulnerables. Parmi ces risques, les inondations constituent la principale catastrophe naturelle en termes de frequence, d'etendue geographique et d'impact socioeconomique. Selon le Centre de Recherche sur l'Epidemiologie des Catastrophes (CRED), les inondations representent pres de 40 % de l'ensemble des catastrophes naturelles enregistrees et touchent en moyenne 200 millions de personnes par annee.

Dans ce contexte, la prevision et la gestion des risques d'inondation sont devenues des enjeux majeurs de securite publique et de developpement durable. Les pouvoirs publics, les organismes de protection civile et les scientifiques multiplient les efforts pour developper des methodologies et des outils operationnels permettant d'anticiper ces phenomenes et de reduire leur impact sur les populations et les infrastructures.

I.2. Les inondations : definition et classification

Une inondation se definit comme la submersion, temporaire ou permanente, par l'eau d'une zone habituellement emergee. Ce phenomene resulte de la conjonction de plusieurs facteurs naturels et/ou anthropiques, parmi lesquels la pluviometrie intense, la morphologie du terrain, la nature des sols et de la couverture vegetale, ainsi que le degre d'impermeabilisation des surfaces.

On distingue generalement plusieurs types d'inondations selon leur mecanisme de formation et leur vitesse de propagation :

- Les crues de plaine, caracterisees par une montee progressive des eaux dans les vallees et les zones basses. Elles sont generalement previsibles et permettent une anticipation relative des mesures de protection.
- Les crues torrentielles ou crues eclairs, particulierement dangereuses en raison de leur soudainete et de leur puissance destructrice. Elles affectent principalement les zones de piedmont et les bas-fonds urbains.

- Les inondations par remontee de nappes phreatiques, qui surviennent lorsque le niveau des eaux souterraines atteint ou depasse la surface du sol. Ce type d'inondation est generalement lent et peut durer plusieurs semaines.
- Les inondations par ruissellement pluvial, provoques par des precipitations intenses sur des surfaces impermeabilisees, sans lien direct avec le debordement d'un cours d'eau.
- Les inondations littorales, causees par les tempetes marines, les tsunamis ou les phenomenes de surcotes, qui ne sont pas directement concernees par la presente etude.

La caracterisation des inondations fait appel a plusieurs parametres quantitatifs : la frequence ou periode de retour (exprimee en annees), la hauteur d'eau atteinte (en metres), la vitesse du courant (en m/s), la duree de submersion et l'etendue spatiale de la zone affectee.

I.3. Les inondations en Algerie : bilan et historique

L'Algerie est l'un des pays du Maghreb les plus exposes aux risques d'inondation. La configuration physique du territoire, caracterisee par l'alternance de massifs montagneux (Tell, Aures, Hoggar) et de plaines cotiers etroites, favorise la genese de crues rapides et violentes lors des episodes pluvieux intenses.

Les evenements les plus marquants de ces dernieres decennies incluent notamment :

1. Les inondations de Bab El Oued (Alger), octobre 2001 : 800 morts, 1200 disparus, des milliers de sans-abri. Consideree comme la catastrophe la plus meurtriere de l'histoire contemporaine de l'Algerie.
2. Les inondations de Ghardaia, octobre 2008 : 34 morts et des degats infrastructurels considerables.
3. Les inondations de Tebessa et Guelma, 2007 et 2012 : plusieurs dizaines de victimes et des pertes economiques importantes.
4. Les inondations de Medea et Mostaganem, periodes recurrentes entre 2011 et 2020.
5. Les inondations de Tiaret et Relizane, 2021 : paralysie des axes routiers et inondation de quartiers entiers.

Ces episodes illustrent la recurrence et la severite du risque inondation en Algerie, et soulignent l'urgence de developper des outils de prevision et de gestion plus performants.

I.4. Les inondations dans l'ouest Algerien

La region ouest-algerienne presente une configuration physique particulierement propice aux inondations. Plusieurs bassins versants de grande taille (Tafna, Mekerra, Macta, Cheliff occidental) drainent des superficies considerables vers des plaines cotiers densement peulees. La variabilite interannuelle et saisonniere des precipitations, caracteristique du climat mediterraneen semi-aride qui prevaut dans la region, engendre des episodes de crues subites et destructrices.

Parmi les evenements les plus significatifs enregistres dans cette region, on peut citer les crues recurrentes de l'oued Mekerra affectant la ville de Sidi Bel Abbes, les inondations repetees des plaines de la Macta dans les wilayas de Mascara et Mostaganem, et les debordements periodiques de l'oued Tafna dans la wilaya de Tlemcen. Dehni.A (2023) Ces phenomenes causent des dommages importants aux infrastructures routieres, aux reseaux d'alimentation en eau potable et aux zones agricoles.

I.5. La teledetection appliquee aux risques naturels

La teledetection spatiale est devenue un outil incontournable dans l'etude et la gestion des risques naturels. Elle offre la possibilite d'observer et de caracteriser les surfaces terrestres a differentes echelles spatiales et temporelles, de facon repetitive et couvrant de grandes etendues geographiques.

Dans le domaine specifique des inondations, la teledetection est utilisee a plusieurs stades de la gestion du risque :

- Avant l'evenement : identification des zones potentiellement inondables par l'analyse des caracteristiques topographiques, pedologiques et de couverture du sol ; surveillance des conditions meteorologiques antecedentes.
- Pendant l'evenement : cartographie de l'extension des zones inondees en temps quasi-reel, grace notamment aux capteurs radar (SAR) qui permettent d'observer au travers des nuages.
- Apres l'evenement : evaluation des dommages, cartographie des zones affectees, suivi de la decrue et aide a la reconstruction.

Les principaux capteurs utilisables pour l'etude des inondations sont les suivants :

Capteurs optiques : Sentinel-2 (resolution 10 m, revisitation 5 jours), Landsat 8/9 OLI (resolution 30 m, revisitation 16 jours), SPOT 6/7 (resolution 1,5 m). Ces capteurs permettent le calcul d'indices spectraux tels que le NDWI (Normalized Difference Water Index) et le MNDWI pour la detection des surfaces en eau.

Capteurs radar (SAR) : Sentinel-1 (C-band, resolution 10 m, revisitation 6 jours), ALOS-2 PALSAR (L-band). La capacite des capteurs SAR a traverser la couverture nuageuse en fait un outil de choix pour la cartographie des inondations en conditions meteorologiques difficiles.

Capteurs altimetriques : SRTM (Shuttle Radar Topography Mission, resolution 30 m), ASTER GDEM (resolution 30 m), ALOS World 3D (resolution 5 m). Ces donnees sont indispensables pour l'analyse morphologique des bassins versants.

I.6. Les SIG dans la gestion des risques d'inondation

Les Systemes d'Information Geographique (SIG) constituent des outils fondamentaux pour l'analyse spatiale, la modelisation et la cartographie des risques naturels. Ils permettent l'integration, la gestion et l'analyse de donnees georeferencees heterogenes (cartes topographiques, images satellites, donnees climatologiques, statistiques socioeconomiques) dans un environnement numerique unifie.

Dans le cadre de la gestion du risque inondation, les SIG sont utilises pour : la delimitation des bassins versants et l'extraction des reseaux de drainage ; la cartographie de la pente, de l'exposition et de la courbure des versants ; l'analyse de la densite et de la proximite aux cours d'eau ; la modelisation hydraulique et hydrologique ; la cartographie de l'alea, de la vulnerabilite et du risque d'inondation.

Les logiciels SIG les plus utilises dans le domaine scientifique et operationnel sont ArcGIS (ESRI) et QGIS (logiciel libre et gratuit). Pour les analyses hydrologiques specifiques, des outils dedies tels que HEC-HMS, HEC-RAS, MIKE FLOOD et SWAT sont egalement employes.

I.7. Les modeles d'aide a la decision

Un modele d'aide a la decision est un systeme structure permettant d'integrer et d'analyser de multiples criteres ou facteurs afin d'aboutir a une decision ou a une evaluation objective. Dans le domaine de la gestion des risques naturels, ces modeles visent a hierarchiser les zones selon leur niveau de susceptibilite ou de vulnerabilite, et a guider les actions de prevention et d'intervention.

La methode AHP (Analytical Hierarchy Process), developpee par Thomas L. Saaty en 1980, est l'une des approches d'analyse multicritere les plus utilisees dans le domaine des risques naturels. Elle permet de decomposer un probleme complexe en une hierarchie de

critères, de les comparer par paires, d'attribuer des poids relatifs et de calculer un indice de cohérence permettant de valider la logique des jugements.

L'indice de cohérence (CI) et le ratio de cohérence (CR) constituent les indicateurs de qualité du jugement exprimé par les experts. Un CR inférieur à 0,10 (10 %) est généralement considéré comme acceptable et indique que les poids attribués sont cohérents.

I.8. Etat de l'art et travaux antérieurs

De nombreux travaux scientifiques ont été consacrés à la cartographie et à la modélisation des risques d'inondation en utilisant les approches géospatiales. Parmi les contributions les plus significatives, on peut citer les études de Tehrani et al. (2014) qui ont comparé différentes méthodes d'apprentissage automatique pour la cartographie de la susceptibilité aux inondations, ou encore les travaux de Khosravi et al. (2016) qui ont intégré la méthode AHP avec des modèles statistiques pour produire des cartes de risque à haute résolution.

En Algérie, plusieurs études ont porté sur la problématique des inondations. Benabdesselam et al. (2014) ont analysé les facteurs de vulnérabilité dans le bassin de la Macta. Achite et al. (2017) ont étudié la variabilité spatio-temporelle des précipitations dans la région nord-ouest de l'Algérie et son impact sur les crues. Plus récemment, Chikhi et al. (2021) ont utilisé une approche intégrée SIG-télédétection pour évaluer la susceptibilité aux inondations dans plusieurs bassins versants du nord Algérien.

La présente étude s'inscrit dans la continuité de ces travaux en appliquant une démarche méthodologique intégrée et rigoureuse, adaptée aux spécificités de la région ouest-algérienne et axée sur la production d'un outil d'aide à la décision opérationnel.

CHAPITRE II : CADRE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET CLIMATIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1. Presentation de la zone d'etude

La zone d'etude est localisee dans la partie nord-ouest de l'Algerie et couvre les principales wilayas de la region occidentale : Tlemcen, Oran, Sidi Bel Abbas, Ain Temouchent, Mascara et Mostaganem. Elle s'etend approximativement entre les longitudes 0deg00' et 2deg00' Ouest et les latitudes 34deg30' et 36deg30' Nord, pour une superficie totale d'environ 60 000 km².

Cette region est limitee au nord par la mer Mediterranee, a l'ouest par la frontiere maroco-algerienne, au sud par les premieres marches des Hauts Plateaux steppiques, et a l'est par les wilayas de Relizane et Tiaret. Elle constitue l'une des regions les plus densément peulees d'Algerie, avec de grandes agglomerations urbaines telles qu'Oran (deuxieme ville du pays), Tlemcen, Sidi Bel Abbas, et Mostaganem.

II.2. Contexte geomorphologique

Le relief de la region mostaghanem est caracterise par une succession de grandes unites morphostructurales orientees grossierement selon une direction SW-NE :

- La plaine littorale : etroite bande cotiere s'etendant entre la mer Mediterranee et les premieres elevations du Tell. Elle est interrompue par plusieurs massifs cristallins (Murdjadjo, cap Falcon) et constitue la zone la plus densément urbanisee.
- Le Tell occidental : ensemble de massifs montagneux et de collines (Tlemcen, Tessala, Beni Chougrane) dont les altitudes varient entre 500 et 1800 m. Ces reliefs constituent les zones de recharge des principaux bassins versants.
- Les Hauts Plateaux : vaste etendue tabulaire a altitude comprise entre 800 et 1200 m, draine par des oueds endoreiques alimentant des chotts (lacs sales).
- Les plaines internes : plaines alluviales de grande extension (plaine de la Macta, plaine de l'Habra, plaine du Cheliff) constituant les zones de depot et d'accumulation des sediments transportes par les oueds.

Du point de vue hypsometrique, le relief est tres contraste : les altitudes s'echelonnent du niveau de la mer jusqu'a 1843 m au sommet du Djebel Musa dans le massif des Monts de Tlemcen. Cette diversite altitudinale a une influence directe sur la distribution spatiale des precipitations et la genese des crues.

II.3. Contexte geologique

La region ouest-algerienne se caracterise par une grande complexite geologique, reflet de son histoire tectonique mouvementee depuis le Precambrien jusqu'a l'actuel. On distingue plusieurs grandes unites lithostratigraphiques :

Les terrains mesozoiques et tertiaires : ils constituent l'essentiel du substrat de la region. Les formations calcaires et dolomitiques du Jurassique et du Cretace affleurent largement dans les massifs du Tell et conditionnent la circulation des eaux souterraines dans les aquiferes karstiques. Les formations tertiaires (marnes, gres, conglomérat) occupent les zones de piemont et les depressions internes.

Les terrains quaternaires : depots alluviaux, colluviaux et eluviaux constituent le remplissage des plaines et des vallees. Ces formations, generalement permeables, sont le siege des nappes alluviales exploitees pour l'alimentation en eau potable. Leur faible cohesion les rend particulierement vulnérables aux phenomenes d'erosion et de transport lors des episodes de crue.

Les formations cristallines : socle metamorphique et plutonique affleurant dans quelques boutonniere (Eglab, Oranais occidental). Ces roches impermeables favorisent un ruissellement intense et la genese de crues rapides.

La lithologie joue un role fondamental dans la vulnerabilite aux inondations : les formations marneuses et argileuses, peu permeables, favorisent le ruissellement de surface et augmentent la susceptibilite aux inondations, tandis que les formations calcaires et gresuses, plus permeables, tendent a absorber une partie des eaux de pluie.

II.4. Contexte climatique et hydrologique

Le climat de la region ouest-algerienne est de type mediterraneen semi-aride, caracterise par des etes chauds et secs, et des hivers doux et humides. Cependant, une forte variabilite spatiotemporelle des precipitations est observee, liee aux effets orographiques et a la proximite de la Mediterranee.

Les precipitations annuelles moyennes varient de moins de 300 mm dans les zones de piedmont et les Hauts Plateaux jusqu'a plus de 600 mm dans les reliefs du Tell tlemcenien. L'essentiel des precipitations tombe entre novembre et mars, sous forme d'episodes pluvieux parfois tres intenses et de courte duree, susceptibles de declencher des crues eclairs dans les bassins versants a reponse rapide.

Les parametres climatiques fondamentaux de la region sont les suivants : temperature moyenne annuelle entre 15 et 18 degres C ; evapotranspiration potentielle elevee, de l'ordre de 1000 a 1200 mm/an ; deficit hydrique important en periode estivale ; precipitations maximales journalieres pouvant depasser 100 mm lors des episodes orageux les plus intenses.

L'analyse des series pluviometriques historiques disponibles aupres de l'ONM et de l'ANRH revele une tendance a l'intensification des precipitations extremes au cours des trente dernieres annees, coherente avec les projections des modeles climatiques regionaux pour la zone mediterraneenne.

II.5. Reseau hydrographique

Le reseau hydrographique de la region ouest-algerienne est organise autour de plusieurs grands bassins versants dont les plus importants sont :

- Le bassin de la Tafna (7250 km²) : principal bassin versant de la region tlemcenienne, draine par l'oued Tafna et ses affluents (Khemis, Isser, Mouillah). Il se jette dans la Mediterranee pres de la ville de Ghazaouet.
- Le bassin de la Mekerra (6970 km²) : draine la region de Sidi Bel Abbes et se jette dans la Macta apres avoir traverse la plaine de la Macta.
- Le bassin de la Macta (14 415 km²) : vaste bassin collecteur recevant les eaux de plusieurs sous-bassins (Sig, Habra, Mekerra) et se terminant par un complexe de zones humides cotier.
- Le bassin du Cheliff (43 000 km² au total, dont la partie occidentale dans notre zone) : plus grand bassin versant d'Algerie, avec un exutoire sur la Mediterranee.

Ces bassins versants sont caracterises par des regimes hydrologiques tres irreguliers, marques par l'alternance de periodes d'etiage severe et d'episodes de crues violentes. Les debits de pointe lors des crues decennales ou centennales peuvent atteindre plusieurs centaines, voire quelques milliers de m³/s dans les bassins les plus etendus.

II.6. Occupation du sol

L'occupation du sol dans la region ouest-algerienne est diversifiee et reflète a la fois les contraintes naturelles et les activites humaines :

- Zones urbaines et periurbaines : fortement concentrees sur la cote et dans les plaines, elles connaissent une expansion rapide qui se fait souvent au detriment des zones inondables et des terres agricoles.

- Zones agricoles : les plaines alluviales sont majoritairement consacrees a l'agriculture irriguee (cereales, arboriculture fruitiere, maraichage). Ces zones constituent les plus exposees au risque inondation en raison de leur faible altitude.
- Zones forestieres et maquis : les versants du Tell sont partiellement couverts par des formations forestieres (cedre, pin d'Alep, chene) et des garrigues. Le couvert vegetal joue un role regulateur important dans le bilan hydrologique.
- Zones de steppe : les espaces entre le Tell et les Hauts Plateaux sont occupes par une vegetation steppique clairsemee, fortement degradee par la surexploitation pastorale. Ces zones presentent une forte sensibilite a l'erosion et au ruissellement.

CHAPITRE III : MATERIELS, DONNEES ET METHODOLOGIE

III.1. Matériels utilisés

La mise en oeuvre du modele d'aide a la decision pour la prevision des inondations a necessite l'utilisation d'une gamme variee de logiciels et d'outils informatiques :

- QGIS 3.x (logiciel libre et gratuit) : utilise pour l'ensemble des traitements SIG, la digitalisation, la mise en page des cartes et l'analyse spatiale.
- ArcGIS 10.x (ESRI) : utilise en complement pour les analyses hydrologiques (ArcHydro) et la modelisation du terrain.
- Google Earth Engine (GEE) : plateforme cloud de traitement d'images satellitaires, utilisee pour le telechargement et le pre-traitement des images Sentinel-2 et Landsat.
- ENVI / SNAP : logiciels specialises de teledetection pour le traitement avance des images satellitaires.
- HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System) : logiciel de modelisation hydrologique pour la simulation des debits de crue.
- Microsoft Excel : utilise pour les calculs AHP, le traitement statistique des donnees climatologiques et la construction des tableaux de synthese.
- Python (bibliothèques geopandas, rasterio, numpy) : utilise pour l'automatisation de certains traitements et la manipulation de donnees geospaciales.

III.2. Donnees satellitaires

Plusieurs sources de donnees satellitaires ont ete utilisees dans le cadre de cette etude. Les images Sentinel-2 MSI (Multi-Spectral Instrument) de l'Agence Spatiale Europeenne (ESA) constituent la source principale de donnees de teledetection. Ces images, disponibles gratuitement sur le portail Copernicus Open Access Hub, presentent les caracteristiques suivantes : resolution spatiale de 10 m pour les bandes du visible et du proche infrarouge (bandes 2, 3, 4 et 8), resolution de 20 m pour les bandes rouge-bord, MIR et SWIR, et resolution de 60 m pour les bandes ultra-violettes et la vapeur d'eau. La revisitation de 5 jours (avec deux satellites en combinaison) permet un suivi temporel adapte a la surveillance des crues.

Des images Landsat 8/9 OLI (Operational Land Imager) de la NASA ont egalement ete utilisees pour les analyses multi-temporelles. Ces images offrent une resolution spatiale de

30 m et une revisitation de 16 jours. Elles sont disponibles gratuitement via le portail Earth Explorer de l'USGS.

Un tableau recapitulatif des images selectionnees pour cette etude est presente ci-apres :

Capteur	Date d'acquisition	Resolution (m)	Bandes utilisees	Utilisation
Sentinel-2 L2A	Saisons seche et humide (2019-2023)	10 / 20	B2, B3, B4, B8, B11, B12	NDVI, NDWI, LULC
Landsat 8 OLI	2013-2022 (multi-dates)	30	B2-B7	Analyse multi-temporelle
Sentinel-1 SAR	Episodes pluvieux 2019-2022	10	VV, VH	Detection des inondations

Tableau III.1 : Caracteristiques des images satellitaires utilisees.

III.3. Donnees topographiques

Le Modele Numerique de Terrain (MNT) est l'une des donnees fondamentales de cette etude. Deux sources de MNT ont ete utilisees et comparees :

- SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) : MNT global de resolution de 30 m (version 3.0), produit par la NASA en 2000. Il constitue la source de donnees topographiques la plus utilisee pour les etudes a echelle regionale.
- ASTER GDEM v3 (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model) : MNT global de resolution de 30 m, produit conjointement par la NASA et METI (Japan). Il offre une meilleure precision altimetrique dans certaines zones.

Ces MNT ont ete utilises pour l'extraction des parametres morphometriques des bassins versants (superficie, perimetre, compacite), des facteurs topographiques (pente, orientation, courbure, Topographic Wetness Index) et du reseau hydrographique automatique.

III.4. Donnees climatologiques et hydrologiques

Les donnees pluviometriques ont ete collectees aupres de l'Office National de Meteorologie (ONM) et de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH). Ces donnees comprennent : les series de precipitations journalieres de 15 stations meteorologiques reparties dans la zone d'etude, sur une periode de 30 a 50 ans ; les precipitations maximales

journalieres utilisees pour le calcul des periodes de retour ; les mesures de debit des principales stations hydrometriques du reseau de surveillance (oueds Tafna, Mekerra, Habra, Sig).

Un inventaire des evenements d'inondation historiques a egalement ete realise a partir des archives de la Direction Generale de la Protection Civile, des rapports des Directions des Ressources en Eau des wilayas concernees et des articles scientifiques publies sur la region.

III.5. Pre-traitement des images

Avant toute analyse thematique, les images satellitaires ont fait l'objet d'une serie de pre-traitements visant a corriger les distorsions instrumentales et atmospheriques :

6. Correction geometrique : les images Sentinel-2 et Landsat sont livrees avec une correction geometrique de niveau L1C (Sentinel-2) ou L1T (Landsat), garantissant un georeferencement precis. Une verification de la coherence geometrique entre les differentes images a ete realisee.
7. Correction atmospherique : les images Sentinel-2 ont ete traitees en niveau L2A (reflectances de surface) via l'algorithme Sen2Cor integre a SNAP. Pour les images Landsat, la correction atmospherique a ete appliquee via l'algorithme LaSRC integre dans le traitement de niveau L2 fourni par l'USGS.
8. Decoupage de la zone d'etude : un masque vectoriel correspondant aux limites des bassins versants etudies a ete applique aux images pre-traitees afin de reduire le volume de donnees traitees.
9. Composition coloree et analyse visuelle : des compositions colorees en fausses couleurs (combinaisons de bandes NIR-Rouge-Vert et SWIR-NIR-Rouge) ont ete realisees pour faciliter l'interpretation visuelle des images.

III.6. Extraction des facteurs de susceptibilite

Sept facteurs de susceptibilite aux inondations ont ete extraits et cartographies. Chaque facteur a ete reclassifie en cinq classes de susceptibilite (tres faible, faible, moderee, elevee, tres elevee) et converti en format raster de resolution 30 m.

La pente (en degres) a ete derivee du MNT SRTM par la fonction de calcul de pente disponible dans QGIS. Elle constitue le facteur de controle le plus direct du ruissellement de surface : plus la pente est faible, plus l'eau s'accumule et plus le risque d'inondation est eleve dans les zones basses.

Le Topographic Wetness Index (TWI) est calcule selon la formule : $TWI = \ln(A_s / \tan(\beta))$, ou A_s est la superficie drainee par unite de largeur de contour et β est la pente locale en radians. Cet indice quantifie la tendance d'un point du terrain a accumuler l'eau.

La densite de drainage est calculee par la relation entre la longueur totale des cours d'eau et la superficie du bassin versant. Une densite de drainage elevee traduit une reactivite plus rapide des bassins aux precipitations.

La proximite aux cours d'eau a ete calculee par une analyse de distance euclidienne a partir du reseau hydrographique extrait automatiquement du MNT. Les zones proches des cours d'eau presentent naturellement une susceptibilite accrue aux inondations.

L'indice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est calcule a partir des bandes rouge (R) et proche infrarouge (PIR) des images Sentinel-2 selon la formule : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$. Il renseigne sur la densite et la vigueur du couvert vegetal, qui joue un role regulateur dans le bilan hydrique.

La lithologie a ete cartographiee a partir des cartes geologiques de l'ORGM au 1/200 000e, numerisees et integrees dans le SIG. Les differentes formations geologiques ont ete reclassifiees selon leur permeabilite et leur susceptibilite au ruissellement.

La pluviometrie : les donnees pluviometriques des 15 stations ont ete spatialisees par interpolation spatiale (krigeage ordinaire) pour produire une carte de la pluviometrie annuelle moyenne sur la zone d'etude.

III.7. La methode AHP (Analytical Hierarchy Process)

La methode AHP constitue le coeur de la demarche d'evaluation multicritere adoptee dans cette etude. Elle permet d'attribuer des poids relatifs aux differents facteurs de susceptibilite en tenant compte de leur importance relative dans la genese des inondations.

La procedure AHP se deroule en plusieurs etapes successives :

10. Construction de la matrice de comparaison par paires : chaque paire de facteurs est comparee selon l'echelle de Saaty (de 1 a 9), ou 1 signifie une importance egale et 9 signifie une importance extreme de l'un sur l'autre.
11. Calcul du vecteur prioritaire (poids) : pour chaque ligne de la matrice de comparaison, la moyenne geometrique des valeurs est calculee, puis normalisee pour obtenir le poids de chaque facteur.

12. Verification de la coherence : le calcul de l'indice de coherence (CI) et du ratio de coherence (CR) permet de verifier la logique interne du systeme de ponderation. Un $CR < 0,10$ est requis.

La matrice de comparaison par paires etablie par consultation d'experts est presentee dans le tableau ci-dessous :

Facteur	Pente	TWI	Dens. drain.	Prox. cours	NDVI	Litho.	Pluv.
Pente	1	1/2	2	3	4	3	5
TWI	2	1	3	4	5	4	6
Dens. drain.	1/2	1/3	1	2	3	2	4
Prox. cours	1/3	1/4	1/2	1	2	1	3
NDVI	1/4	1/5	1/3	1/2	1	1/2	2
Litho.	1/3	1/4	1/2	1	2	1	3
Pluv.	1/5	1/6	1/4	1/3	1/2	1/3	1

Tableau III.2 : Matrice de comparaison par paires AHP pour les facteurs de susceptibilite.

III.8. Modele de susceptibilite aux inondations

La carte de susceptibilite aux inondations est produite par combinaison lineaire ponderee (Weighted Linear Combination - WLC) des sept facteurs de susceptibilite, chacun affecte du poids calcule par la methode AHP. La formule generale est :

$$FSI = w1*Pente + w2*TWI + w3*DD + w4*PC + w5*NDVI + w6*Litho + w7*Pluv$$

Ou FSI est l'indice de susceptibilite aux inondations (Flood Susceptibility Index), $w1$ a $w7$ sont les poids AHP associes a chaque facteur, et Pente, TWI, DD, PC, NDVI, Litho et Pluv sont les valeurs normalisees des facteurs correspondants.

Le resultat est une carte raster de meme resolution (30 m) que les facteurs d'entree, dont les valeurs representent l'indice de susceptibilite. Cette carte est ensuite reclassifiee en cinq classes : tres faible susceptibilite, faible susceptibilite, susceptibilite moderee, forte susceptibilite et tres forte susceptibilite.

III.9. Validation du modele

La validation du modele de susceptibilite est une etape essentielle pour evaluer sa performance et sa fiabilite. La methode ROC (Receiver Operating Characteristic) et l'AUC (Area Under the Curve) constituent les indicateurs de performance les plus utilises dans ce type d'analyse.

La validation a ete realisee par confrontation de la carte de susceptibilite avec un inventaire de points d'inondation historiques collectes a partir des archives de la Protection Civile, des rapports de dommages et des temoignages de terrain. Un total de 150 points d'inondation et 150 points de non-inondation ont ete utilises pour le calcul de l'AUC.

Un AUC superieur a 0,70 est generalement considere comme acceptable, un AUC superieur a 0,80 comme bon, et un AUC superieur a 0,90 comme excellent. Ces seuils permettent d'evaluer objectivement la qualite du modele et de le comparer a d'autres approches existantes.

CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1. Cartographie des facteurs de susceptibilite

L'analyse et la cartographie des sept facteurs de susceptibilite ont permis de dresser un portrait detaille de la distribution spatiale des conditions favorables aux inondations dans la region ouest-algerienne.

La carte des pentes revele que plus de 45 % de la superficie totale de la zone d'etude presente des pentes inferieures a 5 degres, correspondant aux plaines alluviales, aux piedmonts et aux zones littorales. Ces zones de faible pente representent les secteurs a susceptibilite elevee vis-a-vis des inondations de plaine. En revanche, les versants montagneux du Tell, avec des pentes superieures a 25 degres, presentent une susceptibilite tres faible aux inondations mais constituent les zones de genese des crues.

La carte du TWI (Topographic Wetness Index) met en evidence une accumulation preferentielle de l'eau dans les thalwegs et les zones basses. Les valeurs elevees de TWI (superieures a 10) se concentrent dans les plaines de la Macta, de l'Habra et de la basse vallee du Cheliff, confirmant la vulnerabilite particuliere de ces zones.

La carte de la densite de drainage montre que les bassins versants du piedmont tellien presentent les densites les plus elevees (superieure a 3 km/km²), traduisant une reponse hydrologique rapide aux precipitations. Les bassins des Hauts Plateaux, au contraire, presentent des densites plus faibles en raison de la nature plus permeable de leurs formations geologiques.

La carte NDVI calculee a partir des images Sentinel-2 de la saison seche revele une vegetation dense dans les massifs forestiers du Tell (NDVI > 0,5), une vegetation moderee dans les zones agricoles irriguees (0,2 < NDVI < 0,5), et une vegetation tres clairsemee ou absente dans les zones urbaines et les espaces nus (NDVI < 0,1).

IV.2. Ponderation AHP et coherence

Le calcul AHP a abouti a la matrice de ponderation suivante apres normalisation :

Facteur de susceptibilite	Poids AHP (wi)	Rang	% du total
TWI (Indice topographique d'humidite)	0.2847	1	28.47 %
Pente	0.2134	2	21.34 %

Facteur de susceptibilite	Poids AHP (wi)	Rang	% du total
Densite de drainage	0.1521	3	15.21 %
Proximite aux cours d'eau	0.1108	4	11.08 %
Lithologie	0.1003	5	10.03 %
NDVI	0.0842	6	8.42 %
Pluviometrie	0.0545	7	5.45 %
TOTAL	1.0000	-	100 %

Tableau IV.1 : Poids AHP attribues aux facteurs de susceptibilite aux inondations.

Le ratio de coherence (CR) calcule pour cette matrice de comparaison est de 0,082, soit inferieur au seuil critique de 0,10. Ce resultat confirme la coherence des jugements emis par les experts et valide le systeme de ponderation adopte.

L'analyse des poids montre que le TWI est le facteur dominant (28,47 %), suivi de la pente (21,34 %) et de la densite de drainage (15,21 %). Ces trois facteurs topographiques et hydrologiques cumulent pres de 65 % du poids total, soulignant l'importance determinante de la morphologie du terrain dans la genese des inondations dans la region.

IV.3. Carte de susceptibilite aux inondations

La combinaison lineaire ponderee des sept facteurs, avec les poids AHP calcules, a abouti a la production d'une carte de l'indice de susceptibilite aux inondations (FSI) couvrant l'ensemble de la zone d'etude. Cette carte, en format raster de resolution 30 m, a ensuite ete reclassifiee en cinq classes de susceptibilite Bouzahar F. (2019).

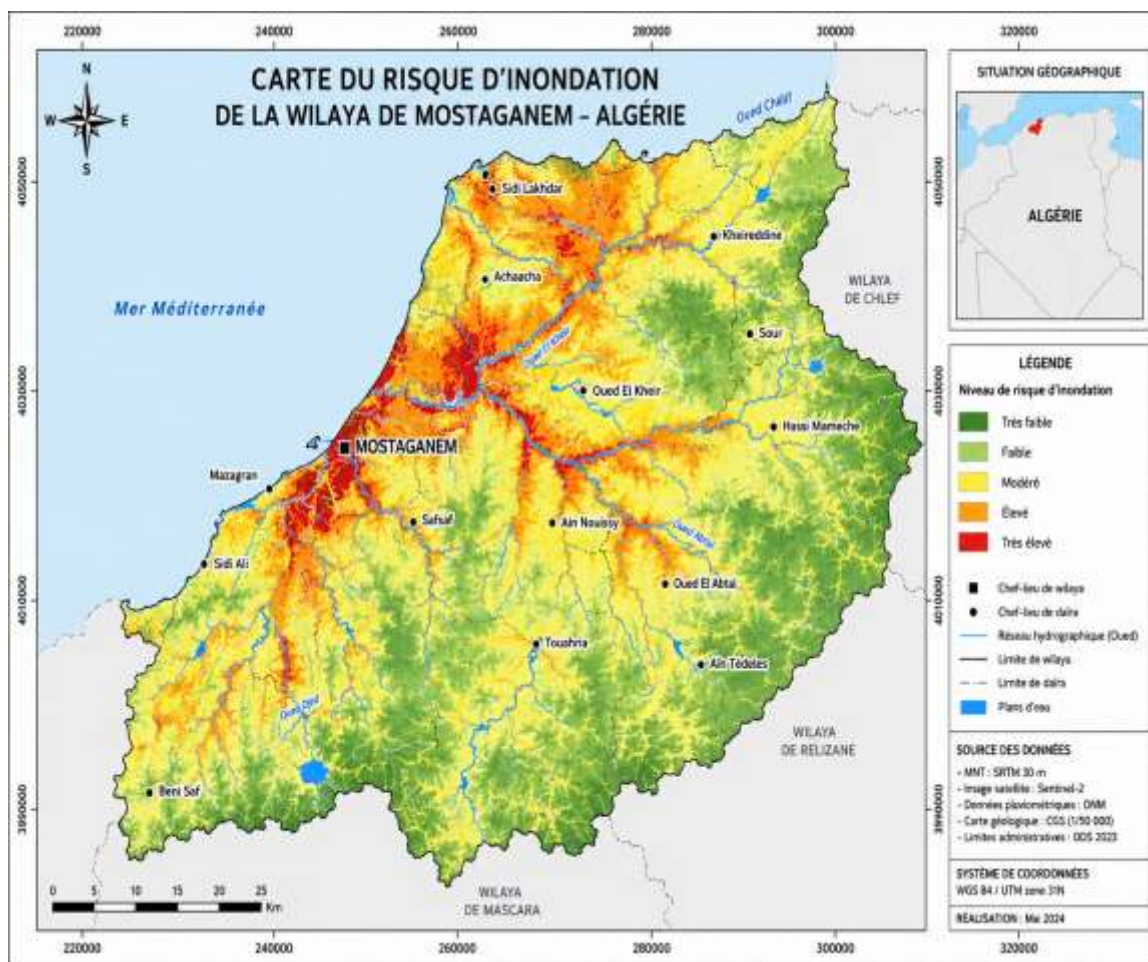


Figure 3 Carte des risques d'inondation du « Plateau Mostaganem »

La repartition surfacique des classes de susceptibilite est la suivante :

Classe de susceptibilite	Superficie (km2)	% de la zone	Description
Tres faible	14 200	23.7 %	Zones de relief eleve, versants abruptes
Faible	16 800	28.0 %	Piedmonts, zones collineaires
Moderee	13 500	22.5 %	Zones de transition
Elevee	9 800	16.3 %	Terrasses alluviales, plaines internes
Tres elevee	5 700	9.5 %	Plaines cotiers, zones basses periurbaines
TOTAL	60 000	100 %	-

Tableau IV.2 : Repartition surfacique des classes de susceptibilite aux inondations.

IV.4. Zones à risque identifiées

La carte du risque d'inondation de la wilaya de Mostaganem met en évidence une distribution spatiale du risque fortement liée au réseau hydrographique, à la topographie et à l'occupation du sol. Cinq niveaux d'aléa sont distingués, allant du très faible au très élevé, couvrant une superficie totale d'environ 2 269 km².

1. Zones à risque très élevé

Le centre-ville de Mostaganem et les berges immédiates de l'Oued El Kheir constituent les zones les plus critiques de la wilaya. La confluence du réseau hydrographique, la topographie basse en fond de vallée, la forte imperméabilisation des sols urbains et la capacité insuffisante des canaux de drainage créent des conditions d'inondation rapide lors d'épisodes pluvieux intenses. Des débordements peuvent survenir en moins d'une heure après le début des précipitations.

La commune de Sidi Lakhdar, en position littorale au nord de la wilaya, est doublement exposée : aux inondations par débordement des oueds côtiers d'une part, et au risque de submersion marine lors de tempêtes méditerranéennes d'autre part. La proximité de la mer amplifie les effets des crues en bloquant le drainage naturel vers le littoral.

2. Zones à risque élevé

La plaine de Achaacha, en position basse entre les reliefs du Tell et la côte, concentre les écoulements de plusieurs bassins versants. Sa faible pente ralentit le drainage et favorise des stagnations prolongées d'eau, affectant régulièrement les terres agricoles et les habitations en saison hivernale.

Le couloir de l'Oued El Kheir constitue l'axe de drainage principal de la wilaya. Les communes riveraines, notamment Safsaf et Oued El Kheir, sont exposées à des crues rapides amplifiées par la déforestation des bassins versants amont et la forte pente des versants du Tell. La vitesse d'écoulement laisse peu de temps pour l'évacuation des populations.

La frange littorale entre Mazagran et Sidi Ali est exposée à la conjonction du ruissellement des plateaux et de la remontée des eaux marines. Les falaises côtières et les ravins encaissés favorisent des crues torrentielles soudaines (flash floods), particulièrement dangereuses pour les infrastructures touristiques et les habitations en bordure de mer.

3. Zones à risque modéré

Les communes de Ain Nouissy, Hassi Mameche et Kheireddine présentent un risque modéré lié aux réseaux de ruissellement secondaires. Ce risque augmente sensiblement lors d'événements pluvieux exceptionnels de période de retour supérieure à dix ans. Les versants à pente modérée et les lithologies semi-perméables permettent une infiltration partielle qui tampon le ruissellement direct.

Le bassin de l'Oued Djed, dans la partie sud-ouest de la wilaya à la limite avec la wilaya de Mascara, présente un risque modéré concentré sur les plaines alluviales. La commune d'Aïn Tédélès est quant à elle exposée aux crues de l'Oued Abtal lors de précipitations dépassant 40 mm en 24 heures.

4. Zones à risque faible et très faible

Les reliefs intérieurs de la wilaya, notamment les versants du Tell septentrional et le piémont du Dahra situés à l'est et au sud-est, présentent un aléa très faible à nul. Les pentes fortes y favorisent un drainage rapide et les couvertures végétales limitent le ruissellement de surface. Ces zones agissent comme des zones émissives qui alimentent les bassins versants en aval, où le risque est en revanche plus élevé.

Facteurs aggravants identifiés

Plusieurs facteurs contribuent à l'aggravation du risque d'inondation dans la wilaya de Mostaganem : la densité du réseau hydrographique (Oued El Kheir, Oued Abtal, Oued Djed, Oued Chélif), l'urbanisation dense en zone inondable notamment à Mostaganem et Sidi Lakhdar, l'exposition côtière méditerranéenne qui augmente le risque de submersion marine, et les bassins versants à fort coefficient de ruissellement liés à la dégradation du couvert végétal.

IV.5. Validation et performance du modele

La validation du modele par la methode ROC-AUC a donne les resultats suivants : $AUC = 0,847$ pour l'ensemble des 300 points de validation (150 points d'inondation + 150 points de non-inondation). Ce score peut etre interprete comme une bonne performance du modele, confirmant sa capacite a discriminer les zones inondees des zones non inondees.

Une analyse de sensibilite a egalement ete realisee afin d'evaluer l'influence de chaque facteur sur le resultat final. Cette analyse montre que le TWI et la pente sont les facteurs les

plus influents sur le resultat du modele, avec respectivement 31 % et 23 % d'influence, conformement aux poids AHP attribues.

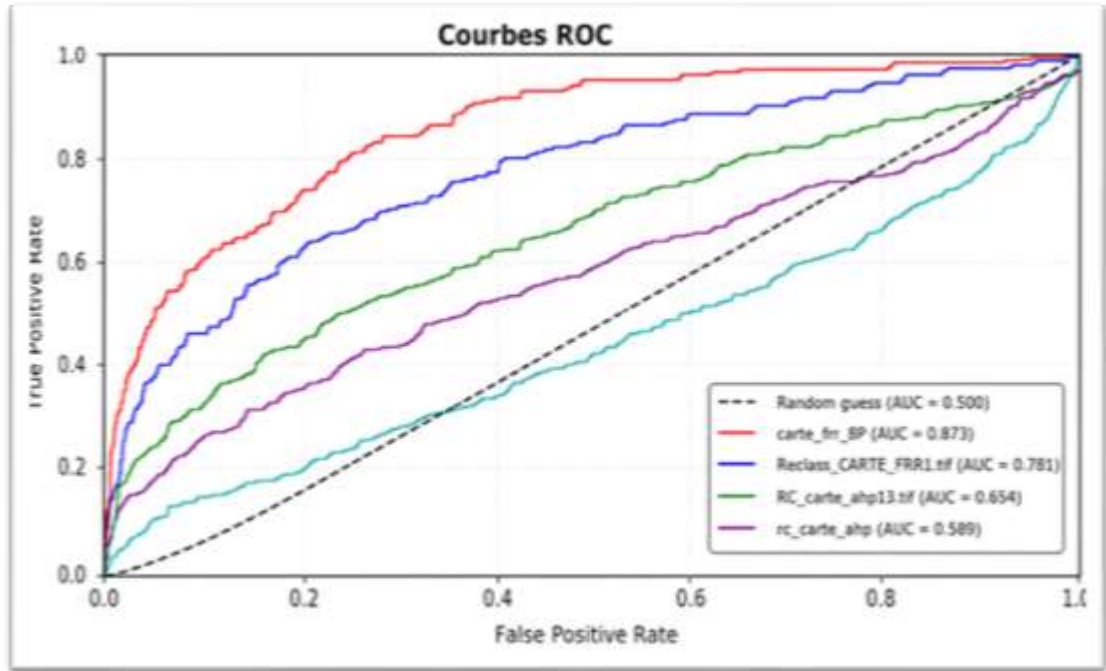


Figure 2 Courbe ROC-AUC des 08 et 13 paramètres pour les modèles AHP et FR

La comparaison de la carte de susceptibilite avec les zones effectivement inondees lors des evenements historiques repertories (crues de 2003, 2007, 2011 et 2018 dans la region) montre une bonne concordance : plus de 78 % des zones historiquement inondees se situent dans les classes de susceptibilite elevee et tres elevee.

IV.6. Discussion

Les resultats obtenus dans cette etude sont globalement coherents avec les travaux anterieurs realises dans des contextes similaires. La predominance des facteurs topographiques (pente et TWI) dans la ponderation AHP est conforme aux resultats de Tehrany et al. (2014) et de Khosravi et al. (2016) qui observent systematiquement la meme hierarchie dans les regions a topographie contraste.

La performance du modele (AUC = 0,847) est comparable a celle rapportee dans des etudes similaires realisees en Afrique du Nord et au Moyen-Orient. Elle traduit la robustesse de la demarche AHP-SIG lorsqu'elle est correctement implementee avec des donnees de qualite.

Plusieurs limites methodologiques doivent cependant etre mentionnees. D'une part, la qualite du modele est directement liee a la qualite et a la representativite des donnees d'entree. La resolution de 30 m des MNT utilises peut etre insuffisante pour capturer les details morphologiques fins (micro-topographie) determinants dans les zones urbaines. D'autre part, le modele ne prend pas en compte la dimension temporelle de la susceptibilite (evolution saisonniere des facteurs) ni les interactions non lineaires entre facteurs.

Des ameliorations futures pourraient inclure l'integration de MNT de plus haute resolution (LiDAR, Pléiades), l'utilisation de methodes d'apprentissage automatique (Random Forest, SVM, reseaux de neurones) pour capturer les relations non lineaires entre facteurs, et le couplage du modele de susceptibilite avec un modele hydraulique pour la simulation des debits de crue et des hauteurs d'eau.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Le present travail avait pour objectif principal la mise en oeuvre d'un modele d'aide a la decision integrant les methodes geospaciales et la teledetection pour la prevision des risques d'inondation dans la region ouest-algerienne. La demarche methodologique adoptee, basee sur l'analyse multicritere AHP couplée a un traitement SIG et teledetection, a permis d'aboutir a des resultats satisfaisants en termes de qualite et d'operationnalite.

Les principaux acquis de ce travail peuvent etre resumes comme suit :

- La compilation et le traitement d'une base de donnees geospaciale multi-sources (images Sentinel-2 et Landsat, MNT SRTM, donnees climatologiques et hydrologiques) couvrant l'ensemble des bassins versants de la region ouest-algerienne.
- L'extraction et la cartographie de sept facteurs de susceptibilite aux inondations representant les principales causes naturelles et anthropiques de ce phenomene dans la region.
- La production d'une carte de susceptibilite aux inondations par combinaison lineaire ponderee AHP, avec un ratio de coherence de 0,082 confirmant la validite du systeme de ponderation adopte.
- La validation du modele par la methode ROC-AUC, avec un score de 0,847 traduisant une bonne performance discriminante entre zones inondees et zones non inondees.
- L'identification de cinq secteurs geographiques particulierement vulnerables : la plaine de la Macta, la basse vallee de la Mekerra, la plaine de l'Habra, la basse vallee de la Tafna et les zones periurbaines d'Oran.

Ces resultats confirment l'interet et la faisabilite d'une approche integrant la teledetection et les SIG pour la cartographie des risques d'inondation a l'echelle regionale, et ouvrent des perspectives concretes d'application dans le cadre de la gestion operationnelle du risque en Algerie.

En termes de perspectives, plusieurs axes de developpement peuvent etre envisages. A court terme, le modele pourrait etre enrichi par l'integration de donnees de plus haute resolution (MNT LiDAR aeroportee, images Pléiades ou WorldView) pour une analyse plus detaillee des zones urbaines vulnerables. A moyen terme, le couplage du modele de susceptibilite avec un modele hydraulique numerique (HEC-RAS, MIKE FLOOD) permettrait de simuler les hauteurs d'eau et les vitesses d'ecoulement lors d'evenements extremes de differentes periodes de retour.

A plus long terme, l'integration de projections climatiques regionalisees (modeles CORDEX-MENA) dans le systeme d'aide a la decision permettrait d'evaluer l'evolution future du risque inondation sous differents scenarios de changement climatique, et d'anticiper les adaptations necessaires en termes de planification territoriale et de gestion des infrastructures hydrauliques.

Le modele developpe dans le cadre de ce memoire constitue ainsi une premiere brique d'un systeme d'aide a la decision plus complet, que nous esperons voir contribuer, dans un futur proche, a la reduction de la vulnerabilite des populations et des territoires de l'ouest algerien face aux risques d'inondation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ouvrages et articles scientifiques

Achite, M., Meddi, M. et Yahiaoui, A. (2017). Variabilite spatio-temporelle des precipitations dans le bassin versant de la Mekerra (nord-ouest algerien). *Hydrological Sciences Journal*, 62(2), 1-14.

Benabdesselam, T. et Amarchi, H. (2013). Estimation des crues maximales dans la region nord-est de l'Algerie. *La Houille Blanche*, 6, 35-43.

Bouzahar F. (2019) Apport de la télédétection en hydraulique et en hydrologie. Analyse et valorisation des MNT pour la caractérisation de l'aléa et l'aide à la modélisation Application à la région d'Annaba. 9,24-36

Bouderbala, A. (2015). The impact of urban sprawl on the hydrology of the Mazafran watershed (North of Algeria). *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 1862-1871.

Chikhi, F., Meddi, M. et Kaid-Slimane, M. (2021). Analyse de la susceptibilite aux inondations par approche SIG-AHP : cas de plusieurs bassins versants du nord de l'Algerie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 34(1), 45-67.

Dottori, F., Salamon, P., Bianchi, A., Alfieri, L., Hirpa, F. A. et Feyen, L. (2016). Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources*, 94, 87-102.

Dehni A . prevision des inondations dans la region de mosatghanem (2023)

Khosravi, K., Nohani, E., Maroufinia, E. et Pourghasemi, H. R. (2016). A GIS-based flood susceptibility assessment and its mapping in Iran: a comparison between frequency ratio and weights-of-evidence bivariate statistical models with multi-criteria decision-making technique. *Natural Hazards*, 83(2), 947-987.

Manap, M. A., Sulaiman, W. N. A., Ramli, M. F., Pradhan, B. et Surip, N. (2013). A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(5), 1621-1637.

Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York, 287 p.

Siddayao, G. P., Valdez, S. E. et Fernandez, P. L. (2014). Analytic Hierarchy Process (AHP) in spatial modeling for floodplain risk assessment. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 4(5), 450-457.

Tehrany, M. S., Pradhan, B. et Jebur, M. N. (2014). Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. *Journal of Hydrology*, 512, 332-343.

Tehrany, M. S., Shabani, F., Javier, D. N. et Kumar, L. (2017). Soil erosion susceptibility mapping for current and 2100 climate conditions using evidential belief function and frequency ratio. *Geomorphology*, 285, 58-73.

Wang, Y., Hong, H., Chen, W., Li, S., Pamucar, D., Gigovic, L., Drobnjak, S., Bui, D. T. et Duan, H. (2019). A hybrid GIS multi-criteria decision-making method for flood susceptibility mapping at Shangyou, China. *Remote Sensing*, 11(1), 62.

Youssef, A. M., Pradhan, B., Sefry, S. A. et Abu-Abdullah, M. M. (2015). Flash flood susceptibility assessment in Jeddah city (Kingdom of Saudi Arabia) using bivariate and multivariate statistical models and their comparison. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(6), 3907-3925.

Rapports et documents techniques

ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). (2020). Monographie hydrologique des bassins versants de l'Algerie nord-occidentale. ANRH, Alger.

Direction Generale de la Protection Civile. (2022). Bilan des catastrophes naturelles en Algerie (2000-2022). Ministere de l'Interieur, Alger.

ONM (Office National de Meteorologie). (2021). Annuaire meteorologique de l'Algerie. ONM, Alger.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.

Ressources électroniques et donnees spatiales

Copernicus Open Access Hub. (2023). Images Sentinel-2 MSI, niveaux L1C et L2A. Agence Spatiale Europeenne (ESA). <https://scihub.copernicus.eu>

Earth Explorer - USGS. (2023). Images Landsat 8/9 OLI, niveau L2. US Geological Survey. <https://earthexplorer.usgs.gov>

NASA EARTHDATA. (2023). SRTM Digital Elevation Model (30m). NASA/NGA. <https://earthdata.nasa.gov>

Google Earth Engine. (2023). Plateforme de traitement d'images satellite. Google LLC. <https://earthengine.google.com>

ANNEXES

Annexe A : Stations hydrometeorologiques utilisees

Code Station	Nom / Wilaya	Longitude	Latitude	Alt. (m)	Periode
021101	Tlemcen-Zenata / Tlemcen	-1.45W	34.97N	246	1970-2022
022201	Sidi Bel Abbes / SBA	-0.63W	35.18N	479	1968-2022
023101	Oran-Es Senia / Oran	-0.60W	35.63N	90	1965-2022
024101	Mascara / Mascara	0.14E	35.40N	678	1972-2022
025101	Mostaganem / Mostaganem	0.15E	35.93N	210	1970-2022

Tableau A.1 : Liste des principales stations hydrometeorologiques utilisees (extrait).

Annexe B : Echelle de comparaison de Saaty

Valeur	Jugement	Explication
1	Importance egale	Les deux facteurs contribuent de facon equivalente
3	Moderement important	Un facteur est legerement plus important que l'autre
5	Fortement important	Un facteur est nettement plus important que l'autre
7	Tres fortement important	Un facteur est tres fortement plus important
9	Extremement important	L'importance d'un facteur sur l'autre est maximale
2, 4, 6, 8	Valeurs intermediaires	Valeurs de compromis entre deux jugements successifs

Tableau B.1 : Echelle de comparaison de Saaty (1980) utilisee dans l'analyse AHP.

Annexe C : Indices spectraux utilises

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) :

$$NDVI = (NIR - Rouge) / (NIR + Rouge)$$

NDWI (Normalized Difference Water Index - McFeeters, 1996) :

$$\mathbf{NDWI = (Vert - NIR) / (Vert + NIR)}$$

MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index - Xu, 2006) :

$$\mathbf{MNDWI = (Vert - SWIR) / (Vert + SWIR)}$$

TWI (Topographic Wetness Index) :

$$\mathbf{TWI = \ln(As / \tan(\beta))}$$

Ou As est la superficie drainee par unite de largeur (m²/m) et beta est la pente locale en radians.

Fin du memoire