

**Travail de fin d'études[BR] - Travail de recherche personnel,
COLLÉGIALITÉ[BR] - Travail d'expertise interdisciplinaire, COLLÉGIALITÉ**

Auteur : Baga, Wendzoodo Amédée

Promoteur(s) : Dewals, Benjamin

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master de spécialisation en gestion des risques et des catastrophes à l'ère de l'Anthropocène

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/18895>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**ULiège - Faculté des Sciences - Département des Sciences et Gestion de
l'Environnement**

THÈME :

**Évaluation du risque d'inondation pluviale dans la
ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar**

Wendzodo Amédée BAGA

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER DE SPECIALISATION EN GESTION DES RISQUES ET DES CATASTROPHES A L'ERE DE
L'ANTHROPOCENE**

ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023

REDIGE SOUS LA DIRECTION DE : Pr. Benjamin DEWALS

COMITE DE LECTURE :

PRENOM NOM DU LECTEUR 1 : BERNARD TYCHON

PRENOM NOM DU LECTEUR 2 : PIERRE OZER

Copyright

Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique* de l'Université de Liège.

*L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre(s) du personnel enseignant de l'Université de Liège.

Le présent document n'engage que son auteur.

Auteur du présent document: BAGA W. Amédée et email: bagaamedee6@gmail.com.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à toute ma famille.

Retrouvez tous à travers cette dédicace, l'expression de mon profond amour et respect.

REMERCIEMENTS

Le présent rapport n'aurait pu être réalisé sans le concours et le soutien de plusieurs personnes physiques ou morales. A cet effet, nous tenons à témoigner notre reconnaissance, notre gratitude et notre respect à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce document.

Nous tenons d'abord à manifester notre reconnaissance à l'Académie de Recherche et d'Enseignement Supérieur (ARES) pour avoir financé notre formation.

Nos remerciements s'adressent ensuite au Professeur Pierre OZER, Coordonnateur du programme de formation du master en gestion des risques et des catastrophes à l'ère de l'anthropocène, au personnel et au corps professoral du Campus Environnement et du département de Géographie de l'université de Namur, pour la qualité de la formation et leur disponibilité.

Nous tenons à remercier également le promoteur du mémoire, Professeur Benjamin DEWALS, pour avoir accepté diriger ce travail et sa disponibilité malgré ses multiples occupations.

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à la Direction Générale de la Météorologie (DGM) de Madagascar, au Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC) et à l'Université de Tuléar, qui nous ont fourni les données et des informations nécessaires pour l'étude.

Enfin, nous remercions nos parents, notre famille et les collègues pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements tout au long de l'année académique 2022-2023.

LISTE DE TABLEAUX

Tableau 1 : Facteurs déclencheurs sélectionnés	17
Tableau 2 : Matrice de confusion	25
Tableau 3 : Facteurs significatifs du modèle de régression logistique.....	29
Tableau 4 : Performance des modèles	33
Tableau 5 : Répartition des superficies de la ville en fonction du modèle.....	34
Tableau 6 : Matrice de comparaison par paire	35

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	7
Figure 2 : Aspect topographique de la ville de Tuléar	8
Figure 3 : Infrastructures de la ville de Tuléar	10
Figure 4 : Variation de l'indice standard de précipitation.....	11
Figure 5 : Structures de coordination de gestion des risques et catastrophes	14
Figure 6 : Facteurs explicatifs d'inondation : (a) Elévation, (b) Pente, (c) Aspect, (d) Courbure, (e) Précipitations journalières maximales de la période 1991-2022, (f) Occupation de sol	18
Figure 7 : Facteurs explicatifs d'inondation : (g) Argile, (h) Limon, (i) Sable, (j) Densité, (k) TWI, (l) DHPLO, (m) DPRR, (n) DHPRC	19
Figure 8 : Facteurs de la vulnérabilité : (a) Densité, (b) DPCMH, (c) LULC, (d) Type maison	20
Figure 9 : Types de maison de la ville de Tuléar : (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, (d) type 4	21
Figure 10 : Schéma de la méthodologie d'évaluation du risque d'inondation urbaine.....	23
Figure 11 : Courbes des fonctions de distributions des lois.....	28
Figure 12 : Evènements historiques des inondations, des cyclones et des pluies	29
Figure 13 : Effets marginaux des différents facteurs sur la survenue d'inondation.....	30
Figure 14 : Océan (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes d'altitude	31
Figure 15 : Rivière (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes d'altitude....	32
Figure 16 : Route (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes des distances	32
Figure 17 : Courbes ROC des modèles RL et RF	33
Figure 18 : Cartes d'aléa inondation de la ville de Tuléar	34
Figure 19 : Carte de vulnérabilité à l'inondation de la ville de Tuléar	36
Figure 20 : Carte du risque d'inondation de la ville de Tuléar.....	36

SIGLES ET ABREVIATIONS

AHP	: Processus Analytique Hiérarchique
AIC	: Critère d'Information d'Akaïké
ARES	: Académie de Recherche et de l'Enseignement Supérieur
AUC	: Aire sous la Courbe
BIC	: Critère d'Information Bayésien
BNGRC	: Bureau National pour la Gestion des Risques et des Catastrophes
CNGRC	: Conseil National de Gestion des Risques et des Catastrophes
CPGU	: Cellule de Prévention et de Gestion des Urgences
CRIC	: Comité de Réflexion des Intervenants aux Catastrophes
DCPMH	: Distance par rapport à un Centre Médical ou Hôpital
DGM	: Direction Générale de la Météorologie
DHPAC	: Différence d'Altitude par rapport aux points les plus proches du Cours d'eau
DHPLO	: Différence d'Altitude par rapport aux points les plus proches de l'Océan
DPRR	: Distance par rapport au Réseau Routier
LOAT	: Loi portant Orientation de l'Aménagement du Territoire
LUH	: Loi relative à l'Urbanisme et l'Habitat
LULC	: Land Use Land Cover
ORSEC	: Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
PADEVE	: Programme d'Appui et de Développement des Villes d'Equilibre
PIC2	: Pôles Intégrés de Croissance et Corridors
PNGRC	: Politique Nationale de la Gestion des Risques et des Catastrophes
PNRRC	: Plateforme Nationale de Réduction des Risques et des Catastrophes
PUDi	: Plan d'Urbanisme Directeur
RF	: Random Forest (Forêts Aléatoires)
RL	: Régression Logistique binaire
SNGRC	: Stratégie Nationale de Gestion des Risques et des Catastrophes
SPI	: Indice Standard de Précipitations

TABLE DE MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DE TABLEAUX	iii
LISTE DES FIGURES	iii
SIGLES ET ABREVIATIONS	iv
TABLE DE MATIERES.....	1
RESUME.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCTION.....	5
CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DE L'ETUDE.....	7
1.1. Présentation de la zone d'étude	7
1.1.1. Situation géographique	7
1.1.2. Climat et relief.....	7
1.1.3. Démographie	8
1.1.4. Infrastructures	9
1.2. Aléas climatiques	10
1.3. Outils de gestion des risques naturels	11
1.3.1. Outils de planification de la gestion des risques.....	12
1.3.2. Organes de gestion des risques et des catastrophes	13
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE	15
2.1. Données utilisées.....	15
2.1.1. Evènements historiques d'inondation à Tuléar.....	15
2.1.2. Données physiques et socio-économiques.....	15
2.2. Traitements des données	21
2.2.1. Historique des inondations pluviales	21

2.2.2. <i>Caractérisation de la vulnérabilité</i>	24
2.2.3. <i>Evaluation de l'aléa inondation</i>	25
CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION	27
3.1. <i>Caractéristiques des inondations pluviales</i>	27
3.2. <i>Cartographie des zones inondables de la ville de Tuléar</i>	29
3.2.1. <i>Cartographie de l'aléa inondation pluviale</i>	29
3.2.2. <i>Cartographie de la vulnérabilité aux inondations</i>	35
3.3. <i>Discussion</i>	37
CONCLUSION	40
BIBLIOGRAPHIE	41
ANNEXES	I

RESUME

Tuléar à l'instar des autres villes de Madagascar est confronté aux problèmes d'inondation pluviale. Cet aléa hydrologique est le plus souvent associé aux cyclones dans la région du sud-ouest du pays. A Tuléar, chef-lieu de la région Atsimo Andrefana, les pluies journalières associées aux inondations sont comprises entre 20 mm et 192 mm avec des périodes de retour de 5 ans à plus de 10000 ans. Dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation, l'élaboration d'une carte à risque d'inondation est importante pour améliorer l'adaptation et la résilience de la population. La fiabilité d'une telle carte est fortement liée à la disponibilité des données et aux méthodes utilisées pour sa production. Pour ce faire, la présente étude combine des approches innovantes pour déterminer la vulnérabilité de la population et caractériser l'aléa hydrologique. Le processus de hiérarchie analytique (AHP) a consisté à mesurer la cohérence des jugements des gestionnaires de risque et à évaluer le poids des facteurs tels que la densité de la population, le type de maison et la distance par rapport au centre de santé sur la vulnérabilité des habitants de Tuléar. Deux modèles d'apprentissage automatique à savoir la régression logistique binaire (RL) et les forêts aléatoires (RF) ont été utilisés pour identifier les zones inondables de Tuléar. Les simulations effectuées avec ces modèles de Machine Learning indiquent que le modèle RF présente les meilleures performances (Précision globale=0,86 ; AUC=0,86 ; TP=0,89) de prédiction des zones d'inondation. La modélisation montre que la distance par rapport aux routes, la morphologie du terrain, la topographie et l'occupation de sol sont les paramètres les plus importants dans l'identification des zones inondables. La carte de risque d'inondation issue de la combinaison des deux méthodes montre que la plus grande partie de la ville (50% de la superficie) est à un niveau de risque d'inondation élevé et environ 10% de la superficie de la ville présente un niveau de risque d'inondation faible à très faible. Cette étude a permis d'évaluer avec peu de données le risque d'inondation urbaine et de déterminer les facteurs de vulnérabilité. Les cartes de risque et de vulnérabilité obtenues sont utiles pour les gestionnaires et les décideurs. Elles constituent aussi un outil indispensable pour la planification de l'occupation de sol de la ville de Tuléar.

Mots clés : Aléa hydrologique, vulnérabilité, risque, apprentissage automatique, Tuléar

ABSTRACT

Tuléar has to contend with the problem of pluvial flooding, as do other cities in Madagascar. Such hydrological hazards are usually associated with cyclones in the southwest of the country. In Tuléar, the capital of Asimo Andrefana region, the daily rainfall associated with the floods ranged from 20 mm to 192 mm, and the return period ranged from 5 years to more than 10,000 years. In the context of climate change and urbanization, creating flood risk maps is important to improve population adaptation and resilience. The reliability of such maps is closely related to the availability of data and the methods used to create it. For this purpose, this study combines innovative methods to determine the vulnerability of populations and characterize hydrological hazards. The Analytic Hierarchy Process (AHP) involved measuring the consistency of risk managers' judgments and assessing the weight of factors such as population density, housing type, distance from health centers, etc. to the vulnerability of Tuléar residents. Two machine learning models, binary logistic regression (LR) and random forest (RF), were used to identify flood zones in Tuléar. Simulations with these machine learning models show that the RF model has the best performance in predicting flood zones (overall accuracy = 0.86; AUC = 0.86; TP = 0.89). The model showed that distance from roads, topography and land use were the most important parameters for identifying flood zones. The flood risk map resulting from the combination of the two methods shows that most of the city (50% of the area) is at high flood risk, and about 10% of the urban area is at low or very low flood risk. This research makes it possible to estimate urban flood risk and identify risk factors with little data. The resulting risk and vulnerability maps are useful for managers and decision makers. They are also an important tool for land use planning in the city of Tuléar.

Key words: Hydrological hazard, vulnerability, risk, machine learning, Tuléar

INTRODUCTION

Madagascar est une île située dans l'océan Indien, au sud de l'Afrique. L'île est exposée à de nombreuses catastrophes naturelles telles que la sécheresse, les inondations, les incendies, les épidémies, les cyclones, les invasions acridiennes. Le pays a connu une série de catastrophes au cours de cette dernière décennie à savoir le cyclone BINGIZA en 2011, le cyclone tropical GIOVANNA en 2012, le cyclone tropical HELLEN en 2014, la tempête tropicale modérée HUBERT en 2010 et des inondations exceptionnelles en 2010, 2013 et 2022 (Rakotoarisoa, 2019; Taïbi et al., 2017). Les manifestations de ces aléas entraînent des perturbations importantes sur la vie sociale et les activités économiques des populations locales.

La grande variabilité climatique du nord au sud dans le pays influence la distribution des aléas climatiques. Dans la partie sud du pays, ces aléas climatiques se manifestent généralement sous diverses formes telles que les cyclones, les dépressions tropicales mais surtout les inondations (Rakotoarisoa, 2019). En effet, la partie sud-ouest de Madagascar est l'une des régions les plus concernées par les catastrophes naturelles particulièrement la ville de Tuléar (Tefison, 2004). Cette ville, de par sa position géographique et sa géologie, est sujette à plusieurs types d'inondations (inondations côtières, inondations pluviales, inondations fluviales et inondations souterraines) et au passage des cyclones. Selon le Bureau national de gestion des risques et des catastrophes, le passage du cyclone Haruna en 2013 a été suivi d'une inondation consécutive à la rupture de la digue protégeant la ville Toliara du fleuve Fiherena.

Ces inondations pluviales urbaines sont généralement causées par des tempêtes tropicales associées au cyclone. Elles peuvent également se produire n'importe où dans les zones urbaines et sont difficiles à prévoir en raison de leur complexité dans le contexte urbain (Grahm & Nyberg, 2017; Miller & Hutchins, 2017). L'occurrence de ces événements pourrait s'accroître car, les projections de changement climatique indiquent une augmentation de l'intensité et de la fréquence de ces événements de précipitations extrêmes (Kundzewicz et al., 2014). A Tuléar, les conséquences économiques et humaines associées aux inondations pluviales s'amplifieront à cause de l'expansion non maîtrisée de la ville et la densité croissante des actifs dans des zones inhabitables (Bulti & Abebe, 2020; Kaspersen & Halsnæs, 2017; Miller & Hutchins, 2017). Au regard de ces tendances, la plaine de Toliara constitue une zone d'intérêt si le risque d'inondation résulte de la combinaison des conséquences de l'aléa inondation et de la probabilité d'occurrence associée. Les recherches antérieures n'ont pas suffisamment abordé les caractéristiques de l'inondation pluviale dans la ville de Toliara (Rakotoarisoa, 2017; Rakotoarisoa, 2019; Rakotoarisoa et al., 2018; Taïbi et al., 2017). Or, pour une meilleure

gestion des risques et des catastrophes, les modèles comme outil de prévision sont nécessaires. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude dont le thème est : « ***Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar*** ».

En utilisant les modèles d'apprentissage automatique dans la prédiction des zones susceptibles au risque d'inondation, cette étude explore un champ de recherche peu abordé. Nous proposons de réfléchir à une méthodologie pour évaluer l'aléa inondation et la vulnérabilité des populations locales à ce risque hydrique. Ces modèles permettent la mise en place d'un système de cartographie rapide des zones en cas d'inondations contrairement aux approches classiques (couteuses en termes de temps et de moyens financiers).

Dans cette optique, notre réflexion s'inscrit dans la dynamique de la contribution à la gestion des inondations dans la ville de Tuléar. Il s'est agi spécifiquement de (i) constituer une base de données des inondations pluviales ; (ii) identifier les facteurs déterminants des composantes du risque d'inondation et (iii) classier les zones en fonction du niveau du risque. Les hypothèses suivantes ont été formulées pour explorer les pistes de recherche de ces travaux :

H1 : l'imperméabilisation des sols par la construction des infrastructures favorise les inondations pluviales dans la ville ;

H2 : l'utilisation des matériaux de construction durable pour réaliser les maisons d'habitation réduit le risque d'exposition aux inondations.

Pour ce faire, le présent rapport est structuré en trois parties. La première partie est consacrée au contexte général de l'étude. La deuxième partie décrit le matériel et la méthodologie adoptée pour l'atteinte des objectifs. La troisième partie présente les résultats suivis de la discussion.

CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DE L'ETUDE

1.1. Présentation de la zone d'étude

1.1.1. Situation géographique

Toliara est un espace géographique situé dans le sud-ouest de Madagascar (Figure 1). La ville est dans le district de Toliara I, la région du sud-ouest Atsimo Andrefana et la province de Toliara. Elle s'étend entre les latitudes (23°16'S et 23°26'S) et les longitudes (43°36'E et 43°46'E) pour une superficie de 94, 34 km². La région Atsimo Andrefana est composée de neuf (9) districts (Toliara I, Toliara II, Morombé, Beroroha, Ankazoabo-sud, Sakahara, Bélioky-sud, Benenitra, Ampanihy) et la province Toliara est constituée de quatre (4) régions (Manebe, Atsimo Andrefana, Androy et Anosy).

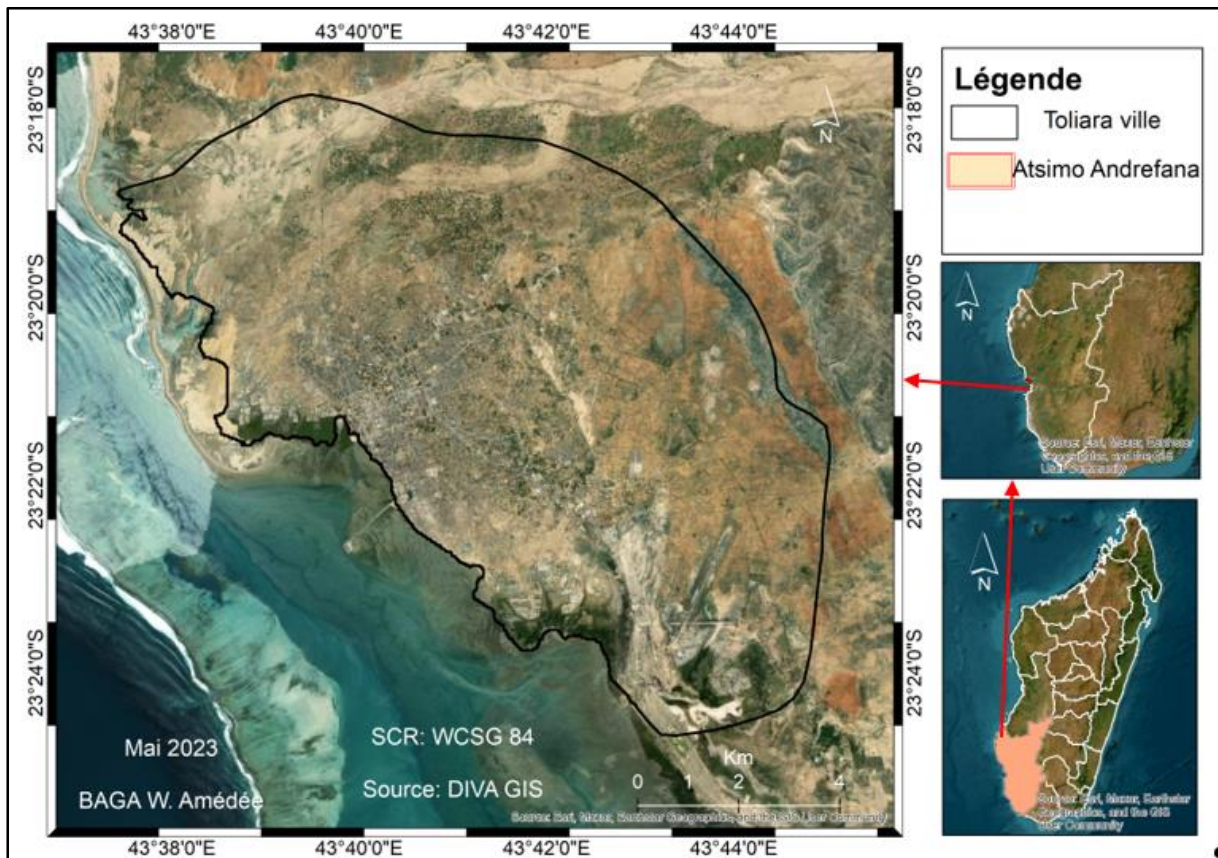


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

1.1.2. Climat et relief

La commune de Toliara est soumise au type de climat semi-aride avec une normale (moyenne annuelle de 1991-2020) de la pluviométrie d'environ 340 mm. La saison sèche dure huit (8) mois (Mars-Octobre) tandis que la période humide se limite à quatre (4) mois (Décembre-avril). Cependant, en saison sèche, une convergence frontale se forme souvent dans le large du canal de Mozambique et engendre des pluies orageuses sur les parties ouest de la ville. Quant aux

températures enregistrées à la station synoptique de Toliara, l'amplitude thermique varie de 7 à 10°C. Les températures moyennes annuelles enregistrées restent toujours au-dessus de 23°C, adoucies par le vent du Sud le « tsiokatsimo ». La plaine connaît une forte insolation pour une moyenne est 225 jours par an.

La commune de Toliara se situe sur une plaine d'altitudes maximale de 51 m et minimale de -15m pour une moyenne de 15 m (Figure 2).

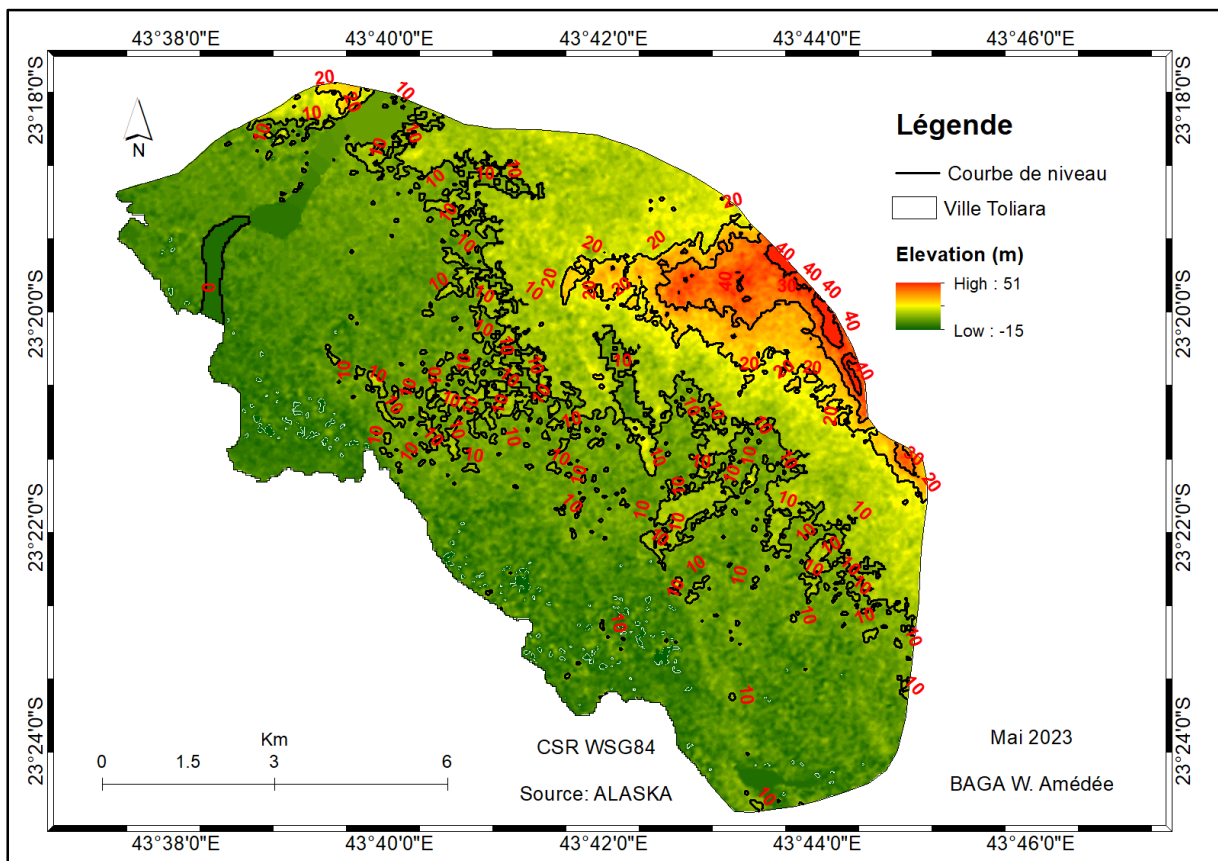


Figure 2 : Aspect topographique de la ville de Tuléar

1.1.3. Démographie

La population de Tuléar est estimée à 168 756 habitants en 2018 avec un taux d'accroissement de 3,5% entre 1973 et 2018 (INSTAT, 2020). La densité de la ville de Toliara était de 43,4 habitants/km² en 2018. Près de la moitié de la population a moins de 17 ans (48,7%) et la ville abrite des migrants internationaux et nationaux. Il s'agit des indiens connus sous le nom « karana », les Betsileo, les Merina, les Mahafaly, les Tanalana, les Masikoro et les Antandroy venus de différentes régions de l'île. Les autochtones de la ville et l'ethnie majoritaire sont des Vezo (Tefison, 2004). Les activités principales menées par les habitants de Tuléar sont entre autres l'agriculture, la pêche, l'élevage, les activités tertiaires (administration, transport) et le commerce. La ville s'est spécialisée dans le commerce de produits variés notamment le sisal,

le coton, le riz, l'arachide et le savon. Les habitants de la zone périurbaine s'illustrent dans l'agriculture (maïs, manioc et riz) et l'élevage (zébus, caprins, bœufs ...) et fournissent les marchés de la ville en produits alimentaires. Les populations de zones côtières de la ville produisent le sel marin sur les marais salants aménagés par endroits ou pratiquent la pêche. La ville de Tuléar reste aujourd'hui la destination phare des circuits touristiques vers le sud de Madagascar grâce à ses multiples infrastructures (hôtels, restaurants, plages) (INSTAT, 2020).

1.1.4. Infrastructures

A l'instar des autres villes de Madagascar, la ville Tuléar connaît une extension anarchique sur ses périphéries. L'aménagement des infrastructures s'effectue principalement au niveau des voies de communication et du port. La typologie des bâtiments à Tuléar est fonction des matériaux de construction et des quartiers. Cette hétérogénéité des habitations traduit l'inégalité socioéconomique des habitants. Le bois, les tôles, les briques cuites et le béton sont les principaux matériaux de construction (Clarisse et al., 2022). Les centres de soin de Tuléar sont au nombre de 14 et sont constitués d'hôpitaux et de centres de santé de base. Le réseau routier de la plaine est composé de routes principales, de routes secondaires, de routes tertiaires et de routes résidentielles. L'essentiel des ouvrages routiers dans le centre-ville est bitumé tandis que les routes dans les quartiers périphériques sont revêtues de terre ou de granite gris. L'ensemble des infrastructures d'évacuation d'eau pluviale existante de la ville de Toliara est composé de deux grands canaux en terre (Anketa, Besakoa), d'un réseau de drainage constitué de buses, des fossés, des canaux et des caniveaux et deux bassins de rétention. Les types d'assainissement des eaux pluviales de la ville sont fonction de la topographie. Dans les zones à altitude inférieure au niveau de la mer, le système par pompage et le système d'infiltration sont utilisés pour évacuer les eaux de ruissellement. Pour les zones de la ville à altitude supérieure à 0, les eaux de pluie sont drainées de manière gravitaire vers le canal de Mozambique (MEAH, 2020).

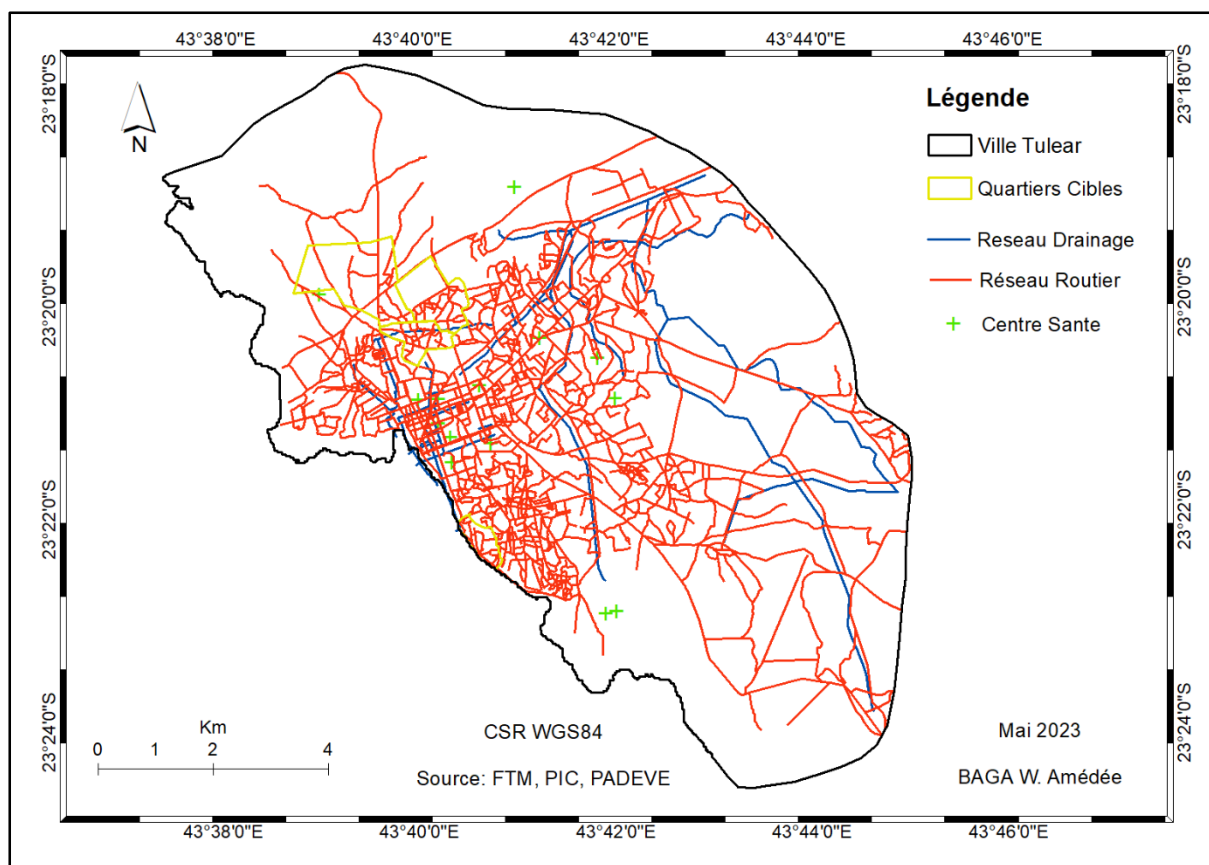


Figure 3 : Infrastructures de la ville de Tuléar

1.2. Aléas climatiques

La ville de Toliara est soumise à plusieurs types d'aléas climatiques. En effet, si la poussière l'envahit en saison sèche, la pluie immerge la ville en saison de pluie. Les événements cycloniques dans la saison des pluies engendrent souvent des inondations dans la ville. La tempête tropicale d'une vitesse de vent comprise entre 17 et 33 m/s, est beaucoup plus fréquente dans la plaine. Chaque deux ou trois ans, un cyclone passait sur Toliara, mais ces dernières années, la ville enregistre annuellement, en moyenne deux événements cycloniques.

Les types d'inondation de la ville de Tuléar sont relativement liés à la géomorphologie du milieu. La plaine deltaïque, située à l'ouest de la ville est à proximité du canal de Mozambique mer et du fleuve Feherana. Du fait de sa position géographique, cette zone est soumise à des inondations fluviales 1978 et 2013, inondations pluviales (niveau d'altitude inférieur au niveau de la mer par endroit) et des submersions par intrusion marine et par la remontée des eaux souterraines. Quant à la plaine alluviale de formation quaternaire, elle est localisée dans les parties sud et est de la ville. A l'instar de la plaine deltaïque, cette partie de la ville est soumise à des submersions par ruissellement due à la topographie relativement faible. Selon la Direction générale de la météorologie, le cumul annuel moyen est compris entre

300 mm et 500 mm avec des intensités relativement faibles (4 à 6 mm par jour). Malgré cela, la ville souffre de stagnation à chaque passage de pluie au cours de la saison des pluies ou au cours de saison sèche sans dépendre de la quantité pluviométrique.

La sécheresse perçue comme un déficit en eau anormal pour une période donnée, dans une région déterminée et des usages spécifiques, se manifeste sous trois formes dans la ville de Toliara. On distingue la sécheresse météorologique caractérisée par des valeurs négatives de l'indice standard de précipitation (SPI) (Figure 4), la sécheresse agricole traduite par l'irrégularité des événements pluvieux dans le temps au cours de la saison des pluies, et la sécheresse hydrologique marquée par le régime non permanent du fleuve de Feherana et caractérisée par des valeurs négatives de l'indice standard des modules (SQI).

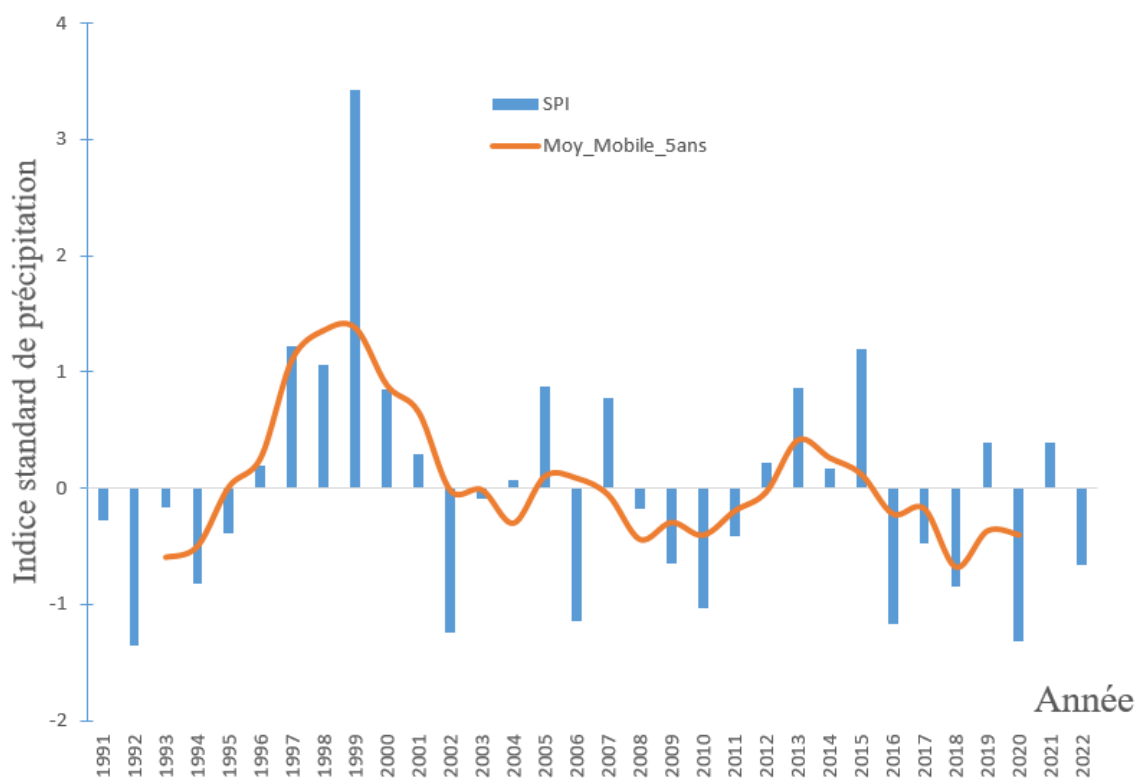


Figure 4 : Variation de l'indice standard de précipitation

1.3. Outils de gestion des risques naturels

La ville de Toliara fait face à plusieurs risques naturels tels que les inondations, les sécheresses, les cyclones et les remontées d'eau souterraine. Les cyclones tropicaux sont fréquents dans la région sud-ouest de Madagascar et Toliara est ainsi souvent touchée, particulièrement lors de la saison cyclonique qui s'étend de novembre à avril, la période la plus active étant située entre

mi-décembre et mi-mars. Les impacts du changement climatique à savoir la montée du niveau de mer pourraient dans l'avenir mettre à rude épreuve les efforts de développement de la ville. Une bonne gestion de ces risques serait orientée par une gouvernance efficace et des dispositions institutionnelles appropriées. Cette gouvernance s'appuie sur des instruments institutionnels essentiels de gestion des risques notamment une plate-forme multisectorielle de coordination et d'orientation stratégique, un dispositif institutionnel de communication et d'alerte précoce harmonisé et une agence nationale de planification et de mise en œuvre.

1.3.1. Outils de planification de la gestion des risques

Parmi les outils de planification spécifiques et essentiels de la préparation aux risques figurent :

- la cartographie des aléas et des risques ;
- le plan d'occupation des sols ;
- le plan de contingence ;
- le plan d'organisation de la réponse de sécurité civile (Plan ORSEC) ;
- le plan d'aménagement du territoire ;
- le plan de gestion intégrée des risques d'inondation.

Le plan de gestion intégrée des risques des inondations vise à prévenir et à gérer les risques d'inondation en définissant les priorités stratégiques en la matière à l'échelle de la zone concernée. Il définit la politique à mener pour assurer la sécurité des populations et réduire les conséquences dommageables des inondations sur la société, l'environnement et les biens. De ce fait, la cartographie des aléas et des risques est un outil efficace de gestion et de planification des actions politiques. Malgré les multiples catastrophes subies par la ville de Toliara, elle ne dispose toujours pas de carte des aléas climatiques (cyclone, inondation et sécheresse) ([Présidence de la République, 2016](#)). Néanmoins, la ville dispose d'un plan d'urbanisme et directeur (PUDI) établi en 2004. Dans le cadre du Programme d'Appui et de Développement des Villes d'Equilibre (PADEVE), ce plan est en cours d'actualisation. Le plan d'urbanisme est, selon l'Article 28 de la Loi n° 2015 - 052 relative à l'urbanisme et à l'habitat (LUH), un outil qui permet de gérer la croissance urbaine et l'aménagement des espaces urbains ([Présidence de la République, 2015](#)). Il détermine aussi les conditions de prévention des risques naturels prévisibles et des risques technologiques et de prévision d'espaces constructibles pour la satisfaction des besoins présents et futurs en matière d'habitat, d'infrastructures et d'équipements. Le plan d'aménagement du territoire est encadré par la Loi n° 2015 - 051 portant Orientation de l'Aménagement du Territoire (LOAT) ([Assemblée Nationale, 2015](#)). La

deuxième section de la loi décrit la compétence d'un organe appelé « Police de l'Aménagement du territoire ». Cette police œuvre sur la surveillance du « respect des dispositions législatives et règlementaires et procédures applicables en termes d'aménagement du territoire ».

1.3.2. Organes de gestion des risques et des catastrophes

Le pays s'est doté d'une Politique Nationale de la Gestion des Risques et des Catastrophes (PNGRC) à travers la promulgation de la Loi n° 2015-031 ([Présidence de la République, 2016](#)). Cette politique doit veiller à entretenir et raffermir la solidarité et la volonté des populations à faire face aux effets des risques et des catastrophes. L'application de cette PNGRC a requis en 2016 la mise à jour de la Stratégie Nationale de Gestion des Risques et des Catastrophes (SNGRC). La mise en œuvre de cette stratégie s'effectue avec l'appui des structures ou des organes à des niveaux stratégique et opérationnel ([Figure 5](#)). Au niveau stratégique, se situent le Conseil National de Gestion des Risques et des Catastrophes (CNGRC), la Cellule de Prévention et de Gestion des Urgences (GPGU) et la Plateforme Nationale de Réduction des Risques et des Catastrophes (PNRRC). Au niveau opérationnel, il y a le Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC), le Comité de Réflexion des Intervenants aux Catastrophes (CRIC) et les Départements Ministériels responsables de la gestion des risques spécifiques et les autres instances concernées.

Le BNGRC est l'organe chargé de la conception, l'organisation, la conduite, la coordination et l'évaluation des activités en lien avec les préparations aux urgences, les opérations de secours et les sauvetages des vies humaines, de réponses humanitaires et de relèvements précoces.

A cet effet, au niveau district comme la ville de Toliara, la préfecture en matière de gestion des risques et des catastrophes doit se concentrer essentiellement sur (i) les analyses des risques et des vulnérabilités ; (ii) la surveillance, les observations et les études des aléas, des risques et des vulnérabilités.

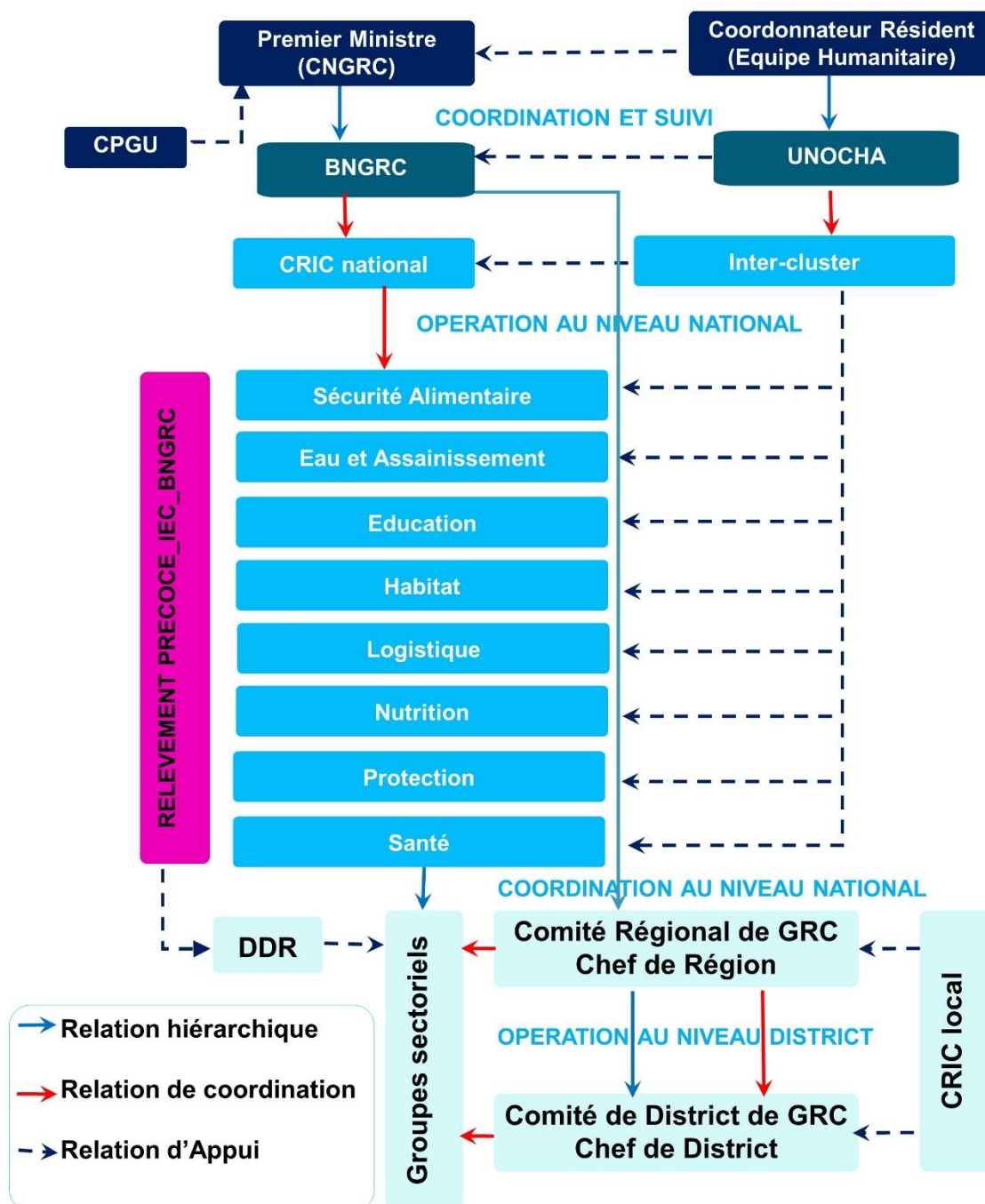


Figure 5 : Structures de coordination de gestion des risques et catastrophes

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES D'ETUDE

2.1. Données utilisées

2.1.1. Evènements historiques d'inondation à Tuléar

Les évènements historiques à Tuléar ont été recensés à travers les bases de données en ligne EM-DAT (www.emdat.be) et DFO (<https://floodobservatory.colorado.edu>), des enquêtes sur le terrain auprès de la préfecture de Tuléar et la Direction Générale de la Météorologie. Le choix de cette démarche s'explique par l'inexistence d'une base de données nationale officielle sur l'historique d'inondations.

La collecte des données auprès de la population a consisté à administrer un questionnaire à des habitants des quartiers ayant déjà subi plusieurs types d'inondation (Ankéta, Antaravay, Tsongobory et Ankiembé). Pour chaque évènement d'inondation, les informations sur la date l'évènement et la cause probable étaient recherchées dans les sources.

2.1.2. Données physiques et socio-économiques

2.1.2.1. Facteurs explicatifs de l'aléa

Nous avons choisi initialement 12 facteurs de déclenchement jugés pertinents pour l'évaluation de l'aléa d'inondation à Tuléar sur la base de la revue littéraire et des données collectées. Pour la variable dépendante, les coordonnées géographiques des 243 points situés dans des zones inondables ou pas ont été enregistrées après un évènement pluvieux et sur la base des connaissances de la population du milieu (ANNEXE I). Le **Tableau 1** résume les principales caractéristiques des variables explicatives.

L'*Aspect* est calculé à l'aide de l'outil SAGA de QGIS grâce au Modèle numérique de terrain (DEM) de la zone. Il définit la direction de la pente maximale de la surface et affecte les conditions hydrologiques du milieu (Bathrellos et al., 2018). La mesure s'effectue dans le sens des aiguilles d'une montre en degrés de 0 (plein nord) à 360. La valeur -1 est attribuée aux zones plates qui ne possèdent pas de pente descendante. Nous avons considéré quatre (4) catégories d'aspect en fonction des différentes plages d'angles : nord (0°-45° et 315°-360°), est (45°-135°), sud (135°-225°) et ouest (225°-315°) (Figure 6 c) et de la sensibilité du modèle au nombre de classes.

La *Courbure* détermine la morphologie de la zone puisqu'elle exprime le degré de déformation de la surface. Elle a été réalisée à partir du Modèle numérique de terrain (DEM) et différenciée en trois catégories : convexe (-0,06-0), plate (0) et concave (0-0,14) (Figure 6 d).

La *Pente* est l'inclinaison de la surface. Elle affecte la vitesse de ruissellement et le taux d'infiltration d'eau de pluie. Cette pente a été obtenue à partir du Modèle numérique de terrain (DEM) avec l'outil SAGA de QGIS et considérée comme variable numérique (Figure 6 b).

Les *Précipitations* sont les pluies journalières maximales de la période 1991-2022 issues du site CHIRPS (https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/). Ces données ont peu de biais par rapport à celles des stations d'observation de Madagascar (Randriatsara et al., 2022). Vu la résolution des images de CHIRPS (4km×4km), les données de pluies journalières ont été extraites à partir de quatre (4) stations fictives pour couvrir la ville de Toliara d'une superficie de 94, 34 km² (Figure 6 e). Les inondations pluviales sont fonction des caractéristiques pluviométriques et de la capacité de drainage du système. En plus de précipitations de courte durée et de forte intensité sur un petit bassin versant, il faut dépasser un seuil d'accumulation journalière pour engendrer des submersions d'eau (Tian et al., 2019).

L'*Élévation* détermine la position de la surface par rapport au niveau moyen de l'océan. Le modèle numérique de terrain utilisé montre qu'elle varie entre -15 m et 51 m (Figure 6 a). Elle influe sur la genèse d'écoulements de surface. En conséquence, des élévations faibles peuvent conduire à une probabilité élevée d'inondation pluviale (Tien Bui et al., 2019).

L'*Occupation de sol* est un facteur important dans le processus d'écoulement des eaux de surface. Elle modifie la capacité d'infiltration d'eau selon la classe d'occupation. Plus les sols sont imperméables (zones bâties), moins l'infiltration est importante et plus le ruissellement est élevé. La couche d'occupation utilisée compte quatre (4) classes d'occupation obtenues par la méthode de maximum de vraisemblance de l'extension SCP de QGIS (Figure 6 f). Il s'agit des classes de sol nu, de végétation, de plan d'eau et des zones bâties définies en fonction de la réalité de la ville et de la sensibilité du modèle au nombre de classes et sous classes.

Le *sol* est une caractéristique importante de détermination de potentielles zones inondables. La perméabilité de la surface est en fonction de la composition granulométrique du sol (sable, limon et argile). Les trois couches de la composition granulométrique de sol ont été téléchargés sur le site ISRIC (<https://soilgrids.org>) et ont été considérées comme des variables numériques dans les modèles pour expliquer les inondations pluviales de la ville de Tuléar (Figure 7 g, h et i).

Tableau 1 : Facteurs déclencheurs sélectionnés

Nom	Résolution spatiale (m)	Type	Source
Aspect	12,5×12,5	Catégoriel (4)	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Courbure	12,5×12,5	Catégoriel (3)	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Différence d'altitude par rapport à la rivière	12,5×12,5	Numérique	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Distance par rapport à la route	12,5×12,5	Numérique	FTM https://observatoire-territoire.mg/partenaire/ftm/
Différence d'altitude par rapport à l'océan	12,5×12,5	Numérique	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Indice d'humidité topographique (TWI)	12,5×12,5	Numérique	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Densité de drainage	12,5×12,5	Numérique	DRTP, projet PIC, SDAUM
Élévation	12,5×12,5	Numérique	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Utilisation des sols	30×30	Catégoriel (4)	LandSat 8 du 31/01/2022 https://earthexplorer.usgs.gov
Précipitations	4000×4000	Numérique	https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_daily/netcdf/p05/ Pluies journalières de 1991-2022
Pente	12,5×12,5	Numérique	DEM du site Alaska https://search.asf.alaska.edu/
Sol (composition argile, sable et limon)	250×250	Numérique	https://soilgrids.org SoilGrids250m : Global gridded soil information

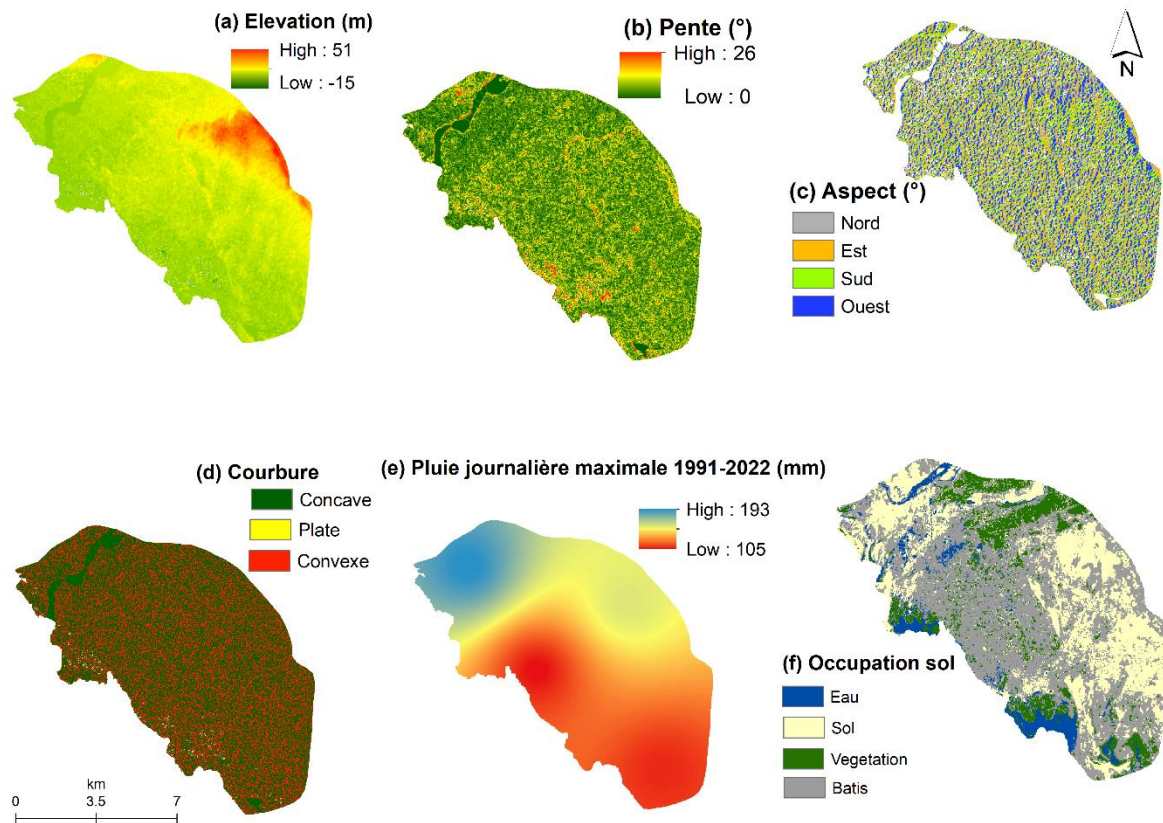


Figure 6 : Facteurs explicatifs d'inondation : (a) Elévation, (b) Pente, (c) Aspect, (d) Courbure, (e) Précipitations journalières maximales de la période 1991-2022, (f) Occupation de sol

L'indice d'humidité topographique (TWI) mesure la tendance d'une zone à retenir les eaux de ruissellement (Figure 7 k). Cet indice est utilisé pour identifier les zones les plus susceptibles d'être inondées. En effet, les plaines ont des valeurs élevées de l'indice TWI (Saravanan et al., 2023). La couche de TWI est obtenue à l'aide de l'extension SAGA de l'outil QGIS (Mattivi et al., 2019) qui calcule l'indice à partir de la pente et l'aire spécifique d'un bassin versant (SCA).

La Différence d'altitude par rapport aux points les plus proches de la rivière (DHPRC) représente la variation de hauteur entre les altitudes des points de notre échantillon et les points situés à côté des cours d'eau (Figure 7 n). Cette caractéristique a été considérée comme variable numérique dans les modèles utilisés. En effet, les zones à proximité des rivières peuvent être les plus sensibles aux inondations dans la mesure où ces endroits sont des zones préférentielles d'évacuation et d'expansion des crues des rivières (Chapi et al., 2017).

La Distance par rapport à la route (DPRR) est une caractéristique importante dans la prédiction des zones inondables. Les routes représentent des zones à haute imperméabilité d'où leur proximité constitue des zones sensibles aux inondations pluviales. La couche de DPRR a été obtenue par le calcul des distances euclidiennes du réseau routier existant (Figure 7 m).

La *Différence d'altitude par rapport aux points les plus proches de l'Océan (DHPLO)* est prise en compte du fait de la proximité de la ville de Tuléar au canal de Mozambique. Il s'agit de la différence d'altitude des points situés au niveau de la limite côtière des hautes marées par rapport aux points de l'échantillon d'étude. Elle a été considérée comme une caractéristique numérique dans la modélisation de l'aléa (Figure 7 l).

La *Densité de drainage* définit la longueur totale du réseau de drainage des eaux pluviales par rapport à la surface totale du milieu. Une zone avec une densité de drainage élevée est moins susceptible d'être inondée par rapport à une zone à faible réseau de drainage. Plus la densité de drainage est élevée, plus la capacité d'évacuation des eaux de ruissellement est élevée. Elle a été calculée à partir du réseau de drainage existant avec la fonction line density de l'outil ARCGIS (Figure 7 j).

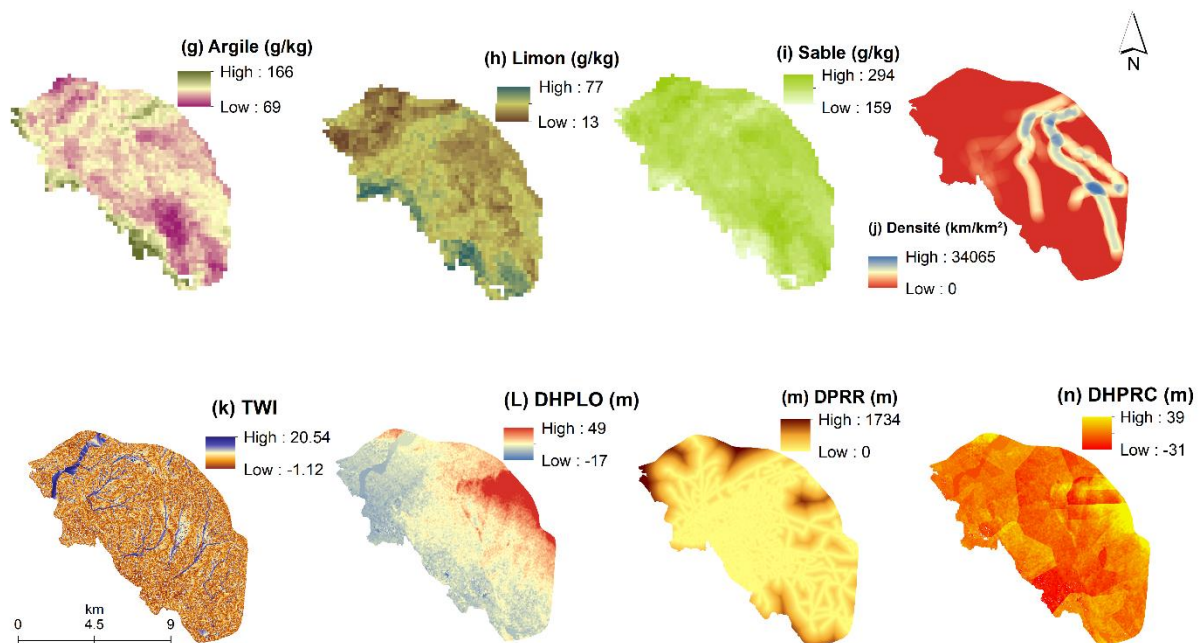


Figure 7 : Facteurs explicatifs d'inondation : (g) Argile, (h) Limon, (i) Sable, (j) Densité, (k) TWI, (l) DHPLO, (m) DPRR, (n) DHPRC

2.1.2.2. Facteurs de la vulnérabilité

Les facteurs socioéconomiques sont généralement les indicateurs de sensibilité d'une société à un aléa naturel. En conséquence, les facteurs tels la densité de la population, la distance par rapport à un centre de santé (DCPMH), l'occupation de sol et le type de maison ont été considérés pour évaluer la vulnérabilité de la population de Toliara à l'inondation pluviale.

La *Densité de la population* est considérée comme une caractéristique numérique dans l'évaluation de la vulnérabilité des habitants de la ville de Toliara (Figure 8 a). La couche de ce facteur a été obtenue sur le site de WorlPOP (<https://hub.worldpop.org/geodata/listing?id=77>).

La *Distance à un centre de santé* est un facteur social pour estimer la capacité de réponse en termes de prise en charge des sinistrés en cas d'une survenue d'un aléa. Cette variable a été obtenue par la méthode de distance euclidienne à l'aide de l'outil ARCGIS à partir de données issues du site des Nations Unies sur les affaires humanitaires (<https://data.humdata.org/dataset/health-facilities-in-sub-saharan-africa>). Elle a été considérée comme une variable numérique dans l'évaluation de la vulnérabilité de la population de Toliara (Figure 8 b).

Les *Types de maisons* sont des facteurs catégoriels collectés sur la base d'un échantillon aléatoire de 136 habitations réparties dans les quatre (4) quartiers (Anketa, Antaravay, Tsongobory et Ankiembe) puis complétés avec les données des travaux de [Clarisse et al., \(2022\)](#) (Figure 8 d). Les différentes maisons ont été classées en quatre (4) types selon les matériaux de construction : Type 1 (Figure 9 a) pour les constructions en paille et en tôle, Type 2 (Figure 9 b) pour les maisons en bois, Type 3 (Figure 9 c) pour les habitations en terre ou en béton, Type 4 (Figure 9 d) pour les constructions en hauteur et en béton. Ces modes de construction de la population reflètent leur capacité de résister aux inondations pluviales.

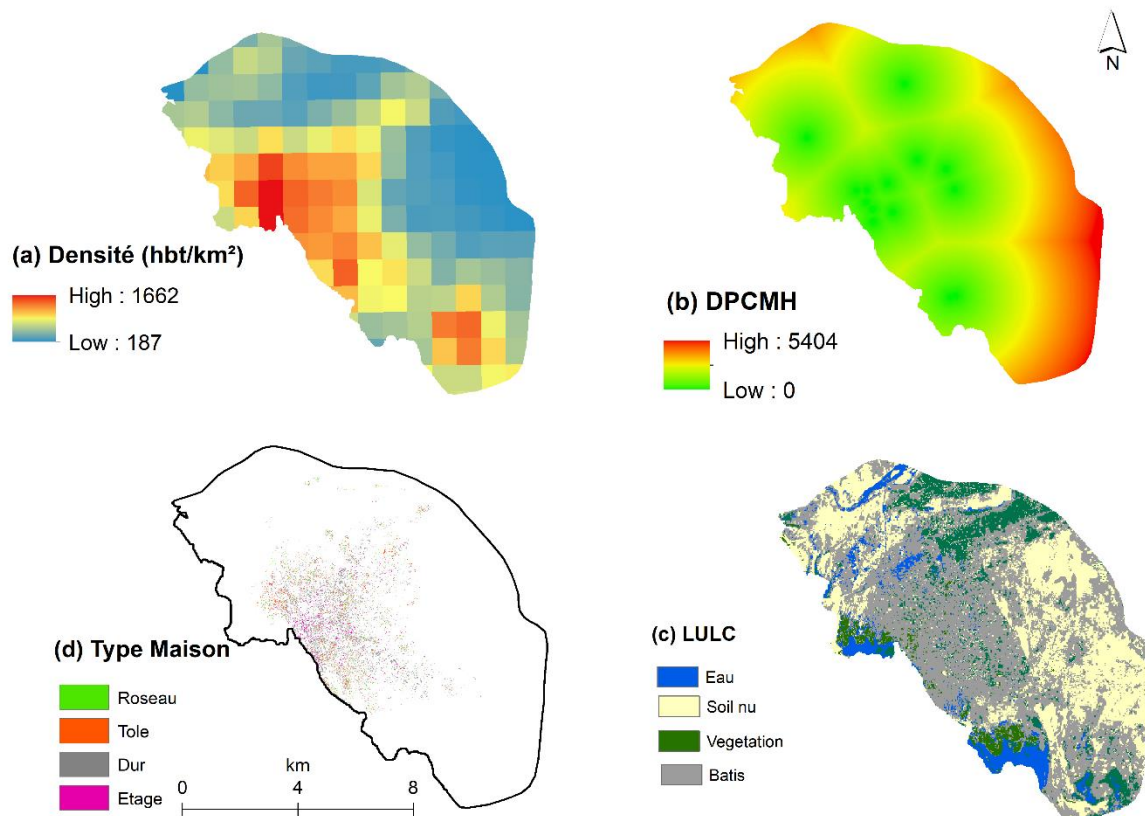


Figure 8 : Facteurs de la vulnérabilité : (a) Densité, (b) DPCMH, (c) LULC, (d) Type maison

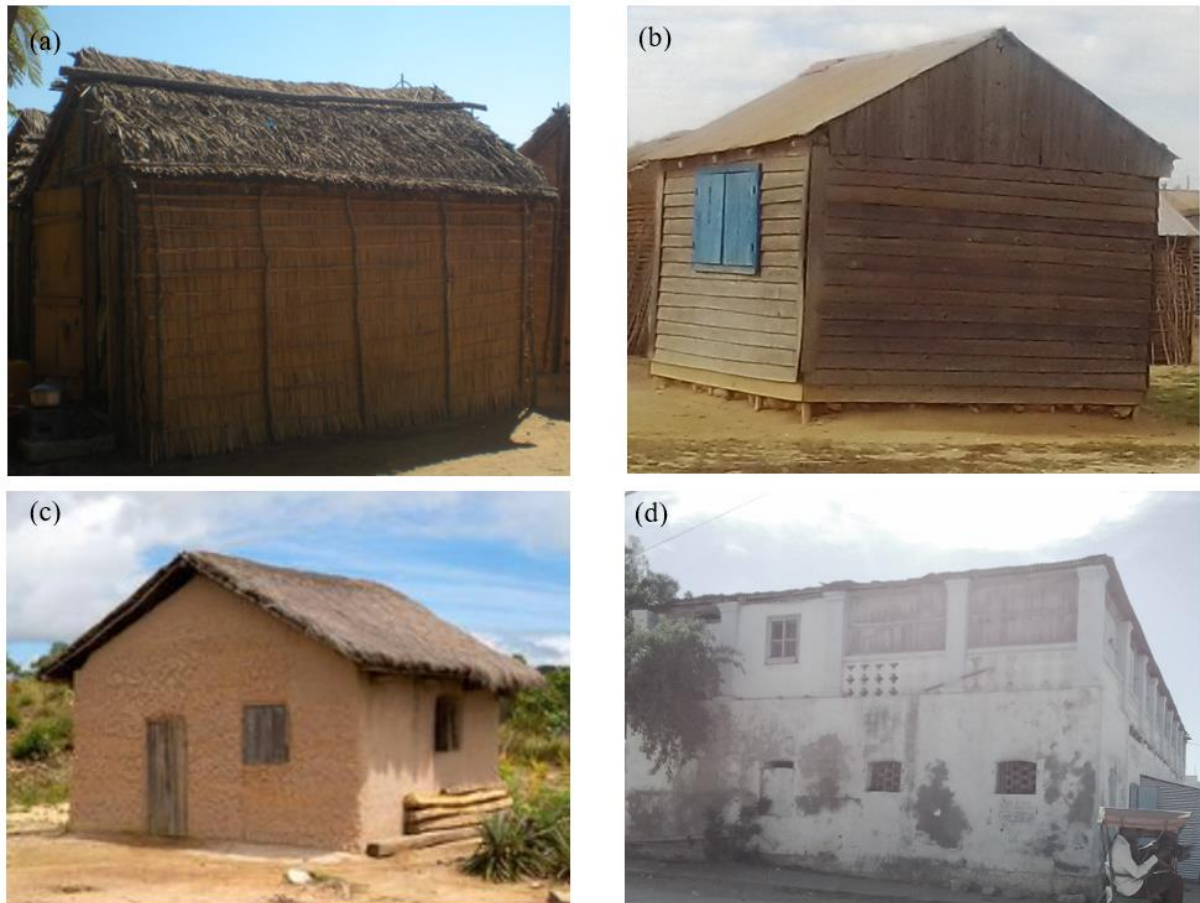


Figure 9 : Types de maison de la ville de Tuléar : (a) type 1, (b) type 2, (c) type 3, (d) type 4

2.2. Traitements des données

2.2.1. Historique des inondations pluviales

Les évènements pluviométriques susceptibles d'entraîner des inondations pluviales dans la zone d'étude ont été identifiés à l'aide d'un seuil. Ce seuil est la moyenne journalière des pluies de la période 1991-2020. Les évènements d'inondations recensés ont été associés aux évènements pluvieux sélectionnés pour constituer une base de données des inondations pluviales de la ville de Tuléar. Une analyse fréquentielle de la série de pluies a permis de déterminer pour chaque évènement une période de retour. Il s'agit de trouver une loi théorique montrant une bonne représentation de la fonction de distribution du processus étudié. Quatre (4) lois statistiques ont été ajustées aux observations (pluies journalières sélectionnées) afin de choisir la meilleure selon des critères : la loi normale, la loi Log normale, la loi de Weibull (loi exponentielle des valeurs extrêmes) et la loi de Gumbel (loi doublement exponentielle des valeurs extrêmes). Le test de Kolmogorov-Smirnov (KS-test), l'examen visuel des graphiques

d'ajustement réalisés et les critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) ont été adoptés pour comparer les différentes lois de probabilité (Dormann, 2020).

La carte du risque d'inondation pluviale est produite pour Tuléar sur la base des cartes de vulnérabilité et de l'aléa d'inondation (Taromideh et al., 2022; Zêzere et al., 2008) :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \quad (1)$$

Les risques d'inondations pluviales sont généralement évalués à l'aide d'indices (Ikirri et al., 2022), des observations satellitaires des zones inondées et de la modélisation. Cette dernière est composée de modèles hydrodynamiques bidimensionnels (2D) et de modèles d'apprentissage automatique appelés Machine Learning (Régression Logistique, Random Forest, Réseau de neurones, Support Vector Machine, Arbre à décision ...) (Prasad et al., 2022; Taromideh et al., 2022; Towfiqul Islam et al., 2021; Z. Wang et al., 2015).

Dans cette étude, nous avons caractérisé l'aléa à l'aide de deux modèles d'apprentissage automatique que sont la Régression Logistique binaire (RL) et les forêts aléatoires (RF)) et analysé les facteurs de vulnérabilité par le processus de hiérarchie analytique (AHP) associant des données quantitatives de l'exposition des éléments aux inondations et des données qualitatives de la capacité de réponse de la population (Bui et al., 2022). La Figure 10 décrit les différentes étapes de l'approche utilisée pour caractériser le risque d'inondation. L'approche méthodologique a consisté à la collecte des points sur le terrain, l'entretien avec la population et le recensement de plusieurs facteurs afin de cartographier les zones à risque d'inondation. Pour identifier les zones susceptibles d'être inondées, les points inondés ou pas ont été recensés sur le terrain suite à un événement pluvieux et sur la base des entretiens avec les responsables de la gestion des risques. Il s'agissait d'utiliser les modèles d'apprentissage automatique pour déterminer l'importance, le poids et l'effet de chaque facteur sur les inondations historiques de du chef-lieu de la région Atsimo Andrefana. Pour la vulnérabilité de la population à l'inondation, une analyse croisée des facteurs à travers des indicateurs a permis de déterminer le poids de chaque facteur (voir détails 2.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité).

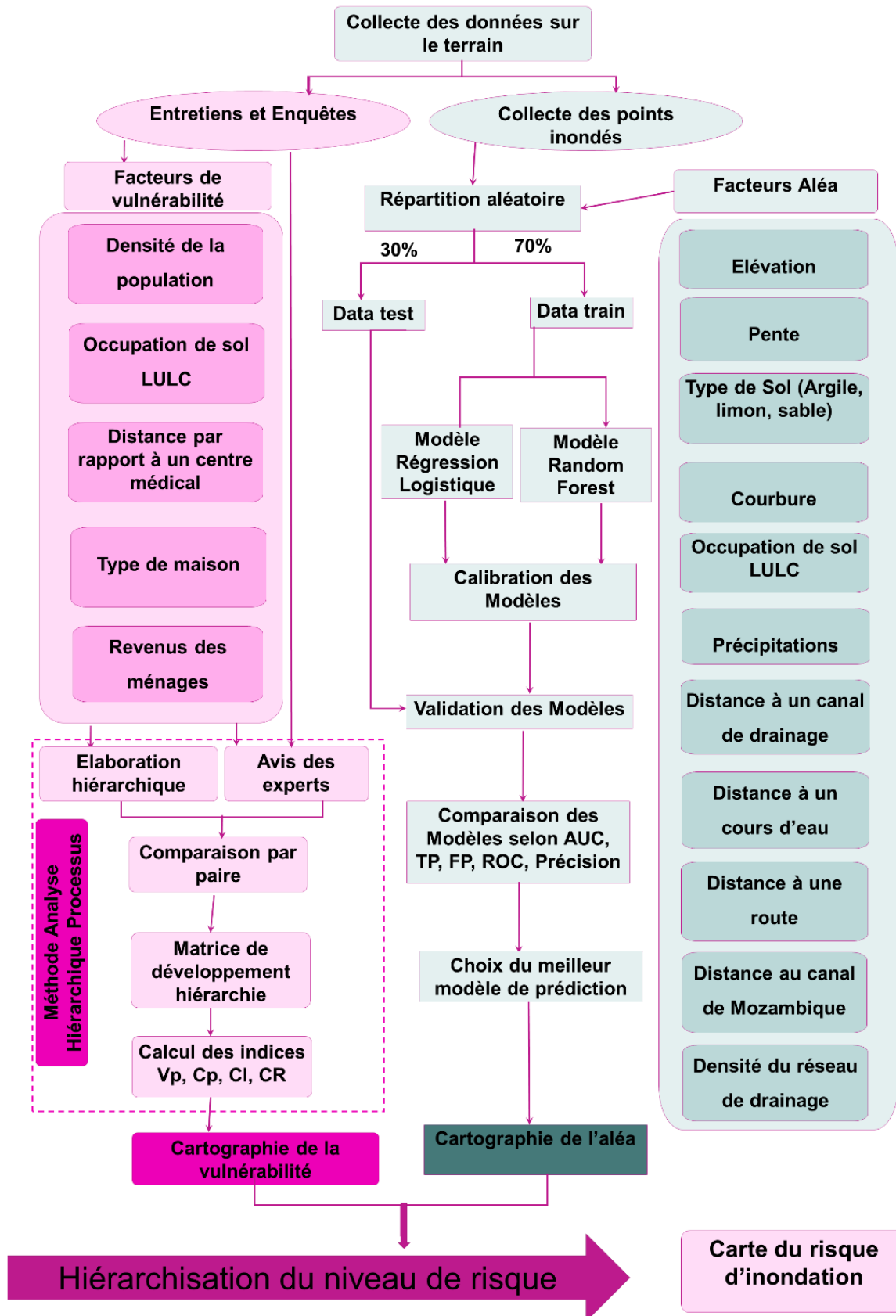


Figure 10 : Schéma de la méthodologie d'évaluation du risque d'inondation urbaine

2.2.2. Caractérisation de la vulnérabilité

Le processus de Hiérarchie Analytique (AHP) est l'une des méthodes les plus utilisées pour évaluer la vulnérabilité d'une population à un aléa (Gudiyangada Nachappa et al., 2020; Vojtek & Vojteková, 2019). La méthode est fondée sur des comparaisons par paires des facteurs déterminants de la vulnérabilité selon les connaissances des experts (ANNEXE II). Ces experts au nombre de sept (7) incluaient des chercheurs de l'université de Toliara, les autorités locales (Directeurs régionaux de l'éducation, de la météorologie, des travaux publics), le point focal du BNGRC et le chef de service de l'aménagement du territoire. Les facteurs socioéconomiques utilisés dans cette étude sont la densité de la population, la typologie des maisons, la distance des ménages par rapports aux centres de soins et l'occupation de sol. Les critères d'évaluation et leur pondération ont été déterminé en fonction de leur importance. Le processus consiste à : i) l'élaboration hiérarchique, ii) la comparaison par paires et iii) la création d'une matrice de développement et de priorisation (Danumah et al., 2016). La comparaison par paire est fondée sur l'échelle de Saaty (1980). Le facteur le plus important récolte la note de 9 tandis le paramètre le moins important reçoit la note de 1. Le développement de la matrice consiste à déterminer les vecteurs propres (\mathbf{V}_p) de chaque facteur, leurs coefficients de pondération (\mathbf{C}_p) et la valeur propre maximale (λ_{max}). Ces indices sont décrits par les équations (2), (3) et (4) :

$$\mathbf{V}_p = \sqrt[k]{W_1 \times \dots \times W_k} \quad (2)$$

$$\mathbf{C}_p = \frac{V_p}{V_{p1} + \dots + V_{pk}} \quad (3)$$

$$\lambda_{max} = \frac{E}{K} \quad (4)$$

Avec k le nombre de facteur, \mathbf{W}_k la note attribuée à chaque facteur par les experts

L'indice de cohérence (CI) et le ratio de référence (CR) ont permis de vérifier la cohérence des réponses des experts de la gestion des catastrophes naturelles de Toliara. En effet, si la valeur de CR est inférieure à 10% alors les jugements des experts sont cohérents mais lorsqu'elle dépasse 10% on doit procéder à des révisions des évaluations (Saaty, 1980). Les formules pour calculer CR et CI sont données par les équations (5) et (6) :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6) \text{ avec :}$$

n le nombre de facteur, **RI** l'indice aléatoire fonction du nombre de facteur (RI=0,9 pour n=4). Après l'obtention des poids (**C_p**) des différents facteurs, la carte de vulnérabilité aux inondations est créée à l'aide des outils de calcul matriciel de QGIS selon l'expression de l'indice de vulnérabilité (FV) :

$$FV = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} W_i \times N_i}{\sum_{i=1}^{i=n} W_i} \quad (7) \text{ avec :}$$

FV : la vulnérabilité aux inondations, **W_i** : le poids de la ième variable calculée par AHP, **N_i** : la couche normalisée de la variable i, et n : le nombre de variables.

2.2.3. Evaluation de l'aléa inondation

La prévision des inondations pluviales vise à prédire si une zone est susceptible d'être inondée ou non, et à explorer la relation existante entre les facteurs d'explication (précipitation, aspect, courbature, relief, pente, occupation de sol, texture, distances des points inondés ou pas par rapport aux routes, à l'océan, aux cours d'eau et aux canaux) et la variable de réponse (inondation) (Marco et al., 2022; Taromideh et al., 2022). La régression logistique binaire et les forêts aléatoires ont été utilisés pour apprendre la relation entre les zones d'inondation et les facteurs d'explication. Les données collectées (facteurs et points inondés ou pas) ont été subdivisées pour calibrer (70 %) et valider (30%) les deux modèles (Figure 10).

Pour évaluer la performance de chaque modèle, les critères tels que la courbe ROC, l'aire sous la courbe (AUC), la sensibilité, la spécificité, la prédiction des valeurs positives (TP), la prédiction des valeurs négatives (TF) et la précision globale ont été utilisés (Omar & Ivrisimtzis, 2019). La courbe ROC est la représentation de la sensibilité (taux de vrais positifs) en fonction de la spécificité (taux de faux positifs) pour les différentes valeurs de la matrice de confusion (Tableau 2).

Tableau 2 : Matrice de confusion

Vraie Classe	Classe Prédite		
	NON	OUI	
NON	T_n	F_p	C_n
OUI	F_n	T_p	C_p
	R_n	R_p	N

Un test diagnostique d'une précision raisonnable présente une courbe ROC dans le triangle supérieur, au-dessus de la ligne diagonale $y = x$ (Hoo et al., 2017). En effet, une courbe ROC similaire à cette droite produit des résultats faussement négatifs au même taux que les résultats réellement négatifs.

Les critères d'aide à la décision tels que la précision globale, la sensibilité, la spécificité, les taux de valeurs positive et négative prédites sont également calculés à partir de la matrice de confusion à l'aide des formules suivantes :

$$\text{Précision Globale} = \frac{T_p + T_n}{C_p + C_n} \quad (8)$$

$$\text{Sensitivité } (1-\beta) = \frac{T_p}{C_p} \quad (9)$$

$$\text{Spécificité } (1-\alpha) = \frac{T_n}{C_n} \quad (10)$$

$$\text{Prédiction des valeurs positives} = \frac{T_p}{R_p} \quad (11)$$

$$\text{Prédiction des valeurs négatives} = \frac{T_n}{R_n} \quad (12)$$

L'aire sous la courbe ROC (AUC) est une mesure globale de la capacité d'un test à discriminer la présence ou l'absence d'une condition spécifique. Elle est obtenue à l'aide de l'intégration trapézoïdale suivante (Bradley, 1997) :

$$\text{AUC} = \sum_i \left\{ (1 - \beta_i \times \Delta\alpha) + \frac{1}{2} [\Delta(1 - \beta) \times \Delta\alpha] \right\} \quad (13)$$

Si l'aire sous la courbe (AUC) tend vers 1, alors le test a une capacité de discrimination parfaite et les résultats issus ne sont pas le fruit du hasard (AUC=0,5).

CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Caractéristiques des inondations pluviales

Tuléar subit plusieurs types d'inondations (fluviale, pluviale, immersion des vagues) et la plus fréquente est l'inondation pluviale. Avec une superficie d'environ 94 km², la faible topographie et les sols sédimentaires de la ville favorisent une stagnation des eaux de pluie. La caractérisation de ce type d'inondations de la ville de Tuléar a consisté aux collectes des événements historiques des inondations et à l'analyse des pluies journalières excédentaires. Les données issues des satellites CHIRPS ont été comparées à la moyenne journalière de la période 1991-2020 pour identifier les pluies supérieures à cette moyenne. Il ressort que seulement 11% des hauteurs de précipitations sont supérieures à la moyenne. Ces pluies journalières survenues en période de cyclone ou pas sont les principales sources d'inondation de la ville de Tuléar. Les hauteurs de précipitation associées aux événements d'inondation varient entre 20 mm et 193 mm. La moyenne interannuelle sur la période 1991-2022 est de 339,5 mm pour un écart type de 87,4 mm. La ville de Tuléar a enregistré la quantité de pluie la plus importante (192,9 mm) lors du passage du cyclone Ernest en 2005. Selon le BNGRC, cette pluie a engendré des inondations qui ont causé d'importants dégâts matériels, au moins 7 morts et 79 disparus. L'analyse fréquentielle des pluies journalières supérieures à la moyenne montre que la série de données suit la loi de Weibull (Figure 11). La mesure de la distance maximale entre la courbe de la fonction de distribution des trois lois et la courbe de la fonction de distribution cumulative empirique montre une meilleure adéquation de la distribution de Weibull. Les critères de précision de cette loi sont meilleurs par rapport aux lois Normale et Gumbel. Les critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) de la loi de Weibull sont de 8063,8 et 8074,2 alors que les lois normale et Gumbel ont des valeurs d'évaluation respectivement de AIC=9099,4 et BIC= 9109,8 et AIC=8336,7 et BIC = 8347.

La plus petite quantité de pluie associée à un événement d'inondation a une période de retour de 5 ans tandis que la plus grande quantité d'averse a une période de retour de plus 10000 ans. De nos sources de données, depuis 1991 la ville de Tuléar a connu dix (10) inondations associées aux cyclones et deux (2) inondations dues à des fortes pluies. Des causes probables des inondations de la ville de Tuléar recensées à partir des entretiens et des questionnaires selon les sinistrés, figurent l'insuffisance et la défaillance des ouvrages d'assainissement pluvial, l'intensité de l'averse et l'incivisme des populations.

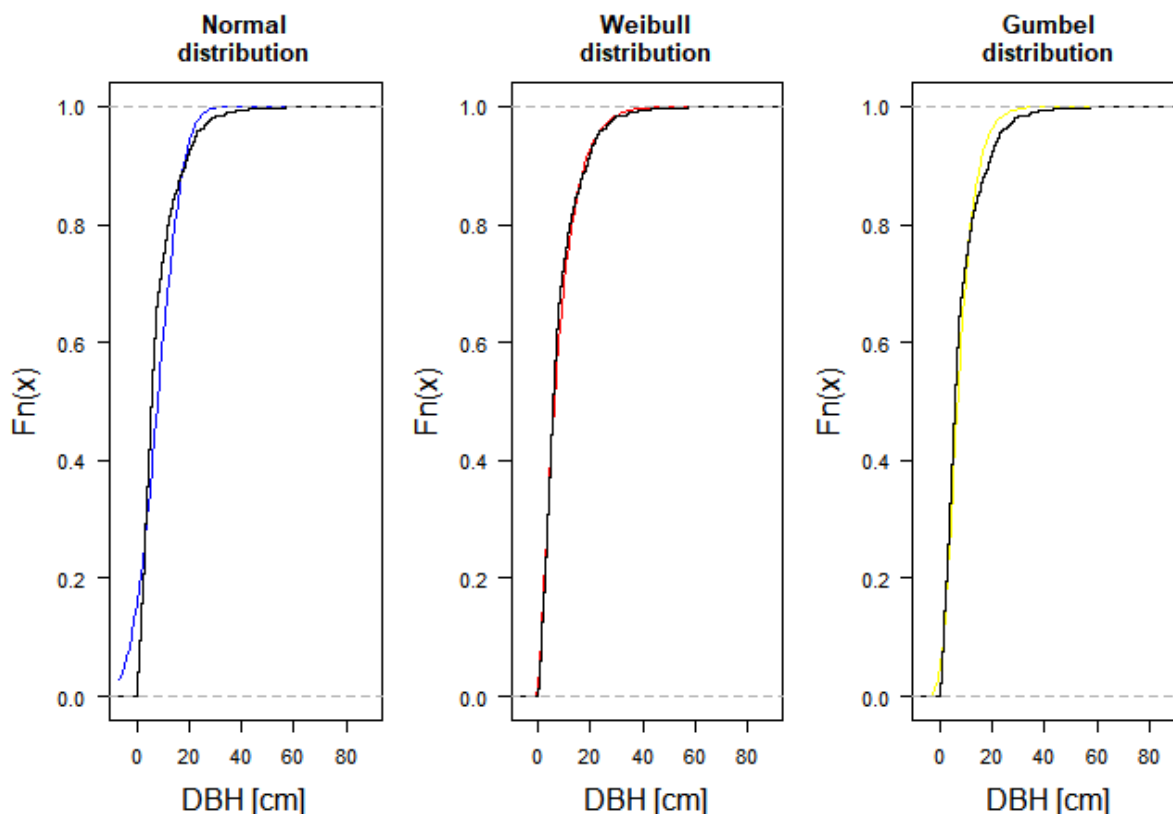


Figure 11 : Courbes des fonctions de distributions des lois

La relation entre cyclone et pluie est telle que tous les cyclones ne sont pas associés à des pluies et la période de la saison des pluies est plus étendue (Octobre-Avril) que celle des cyclones (Décembre-Février). Quant aux inondations, la [Figure 12](#) illustre bien la relation entre inondation, cyclone et pluie. Au cours des années 2004, 2005, 2009, 2012, 2013, 2019 et 2023, la ville a été submergée d'eau lors de la période cyclonique (**CF**). Toutefois, la ville de Tuléar a subi d'inondations hors d'une période cyclonique. Il s'agit des inondations de 2018 et 2022 qui ont eu lieu respectivement aux mois de septembre et décembre (**FNC**). Cette ville a connu également des cyclones non associés (**CNF**) à d'autres aléas climatiques (1991, 1994, 1997, 2000, 2002, 2022). En 1994, Toliara a subi deux passages de cyclones (Daisy et Geralda) et aucun de ces événements n'a été associé à une inondation. Cependant, en 2000, le cyclone Eline a occasionné des inondations dans la ville et celui de Hudah est passé sans faire des dégâts hydriques. Les événements cycloniques Galifo et Elita de 2004 ont tous submergé la plaine et causé d'énormes pertes matérielles à la population. L'année 2022 a été particulière dans la mesure où la ville a subi trois (3) cyclones (Dumako, Jasmine, Emnati) sans être inondée et c'est la pluie du 21 décembre de 24,4 mm qui a submergé quelques quartiers de la ville.

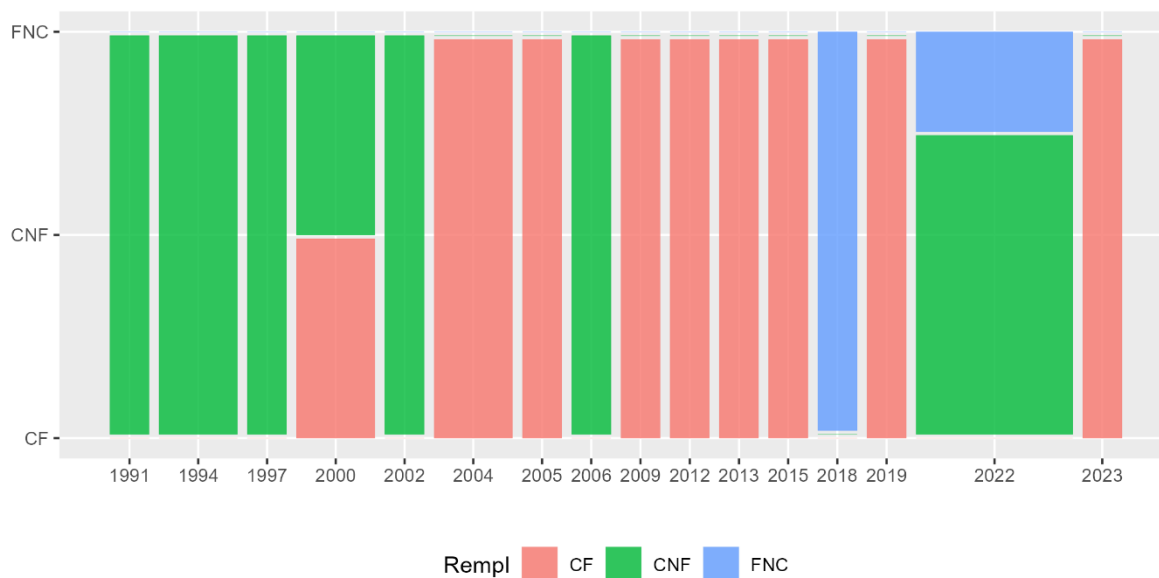


Figure 12 : Evènements historiques des inondations, des cyclones et des pluies

3.2. Cartographie des zones inondables de la ville de Tuléar

3.2.1. Cartographie de l'aléa inondation pluviale

La production des cartes d'aléa a été faite avec deux modèles d'apprentissage automatique dont l'aire sous la courbe est supérieure à 70%. Dans cette étude, pour expliquer l'avènement de l'inondation dans un lieu, douze (12) facteurs explicatifs ont été utilisés pour calibrer puis valider les deux modèles (RL et RF).

Le test de multi-colinéarité appliqué aux facteurs indique que seules les classes granulométriques du sol (limon, sable et argile) sont corrélées les unes aux autres ($VIF > 10$). Autrement dit, il existe une corrélation élevée de ces variables explicatives avec d'autres variables explicatives. En effet, les valeurs VIF des autres facteurs explicatifs sont proches de 1 tandis que celles de la composition du sol sont supérieures à 10. Le modèle de régression logistique retenu, montre que la courbure, l'occupation de sol, la distance par rapport à une route et la différence d'altitude entre les points les plus proche de l'océan et les points de l'échantillon sont les facteurs les plus importants de la submersion de la ville (Tableau 3).

Tableau 3 : Facteurs significatifs du modèle de régression logistique

Facteurs	P-value	Significativité
Aspect	0,1112396	
Courbure	0,0296677	*
Diff_Altitude_Ocean	7,96E-09	***
Diff_Altitude Rivière	0,1193207	
Dist_Route	0,0008579	***
LULC	0,0025702	*

Significativité codes : p-value 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1

D'après l'échantillon, ces facteurs influencent significativement dans l'avènement des inondations avec une chance de 5% de se tromper. En effet, les p-value de la courbure (p-value= 0,0296), de l'occupation de sol (p-value= 0,0025), de la différence d'altitude par rapport à l'océan (p-value<0,001) et la distance par rapport à la route (p-value= 0,0008) sont inférieures à 0,05. Les poids de ces facteurs dans le modèle sont de $-2,02 \pm 0,78$, $-2,29 \pm 0,83$, $-0,004 \pm 0,001$, $-0,35 \pm 0,08$ pour la courbure, l'occupation de sol, la DPRR et la DHPLO respectivement. Ils contribuent tous alors à réduire l'accumulation des eaux dans la ville. L'analyse de l'évolution des paramètres topographiques (altitude, courbure, sol) et de position (distance) en fonction du risque hydrologique (inondation) indique une corrélation entre les inondations et l'occupation de sol, les caractéristiques topographiques et les distances. La Figure 13 montre les effets marginaux des facteurs d'altitude, de courbure, d'aspect et de distance dans la survenue d'une inondation dans la ville de Tuléar.

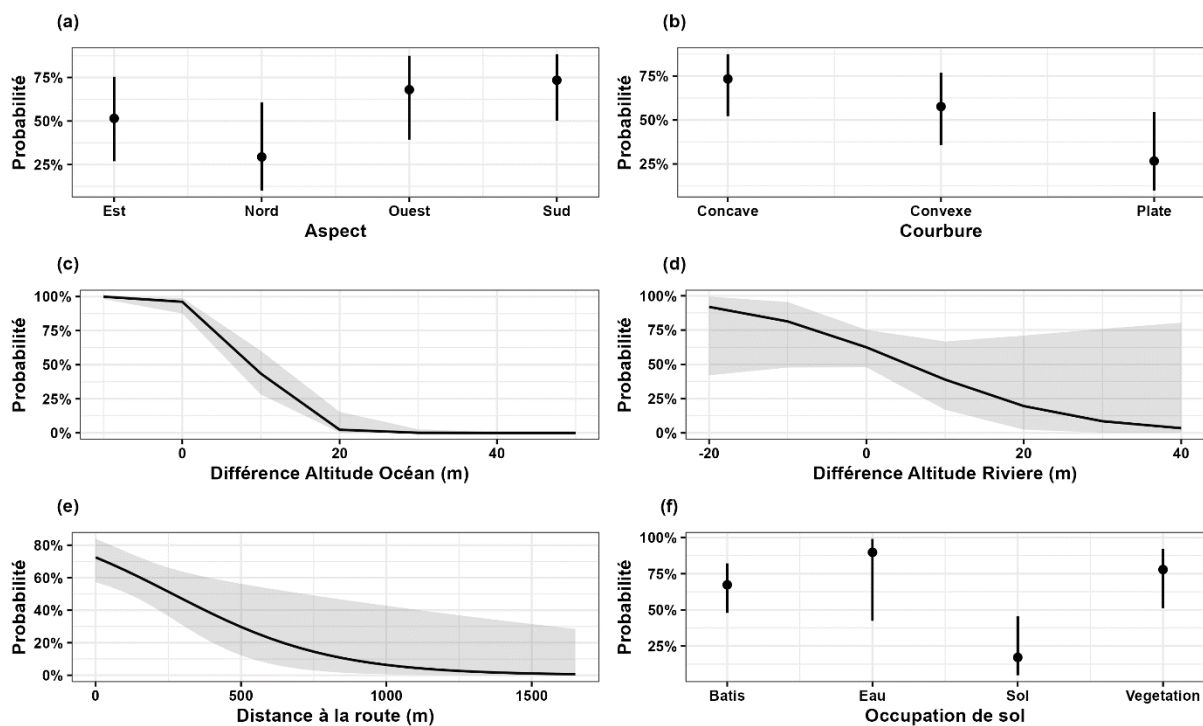


Figure 13 : Effets marginaux des différents facteurs sur la survenue d'inondation

Si la pente maximale de la surface a une direction nord, la probabilité d'inondation est faible par rapport aux autres directions (Est, Ouest et Sud). Les eaux de pluies tombées sur ces surfaces s'écoulent vers le fleuve Fiherana via le ruissellement dans les affluents du fleuve. La concavité du terrain favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration. Cependant, cela pourrait entraîner une augmentation de la submersion des milieux situés en aval s'ils ont une

morphologie convexe et constitués de matériaux imperméables. Aussi, l'imperméabilisation des zones est un facteur aggravant le phénomène d'inondation (Figure 13 f). Plus les sols sont imperméables, plus la probabilité d'inondation augmente. Cette probabilité diminue avec des sols nus et augmente avec des sols couverts de végétaux dans la mesure où ces milieux réduisent et favorisent respectivement la stagnation des eaux de pluie. Par ailleurs, une augmentation de la différence d'altitude entre les points les plus proches de l'océan ou des cours d'eau engendre une diminution de la probabilité d'inondation de la zone d'étude (Figure 13 c, d). Il en est de même de l'éloignement des enjeux à une route (Figure 13 e) dans la mesure où les routes constituent des zones imperméables. Le test non paramétrique de Wilcoxon appliqué à l'échantillon indique que les moyennes des points inondés sont inférieures à celles des points non inondés pour la distance à la route et les différences d'altitude (Figure 14, Figure 15, Figure 16). Un point situé à une altitude inférieure à celle d'un point proche d'un cours d'eau est susceptible d'être inondé facilement indépendamment de sa position par rapport au cours d'eau.

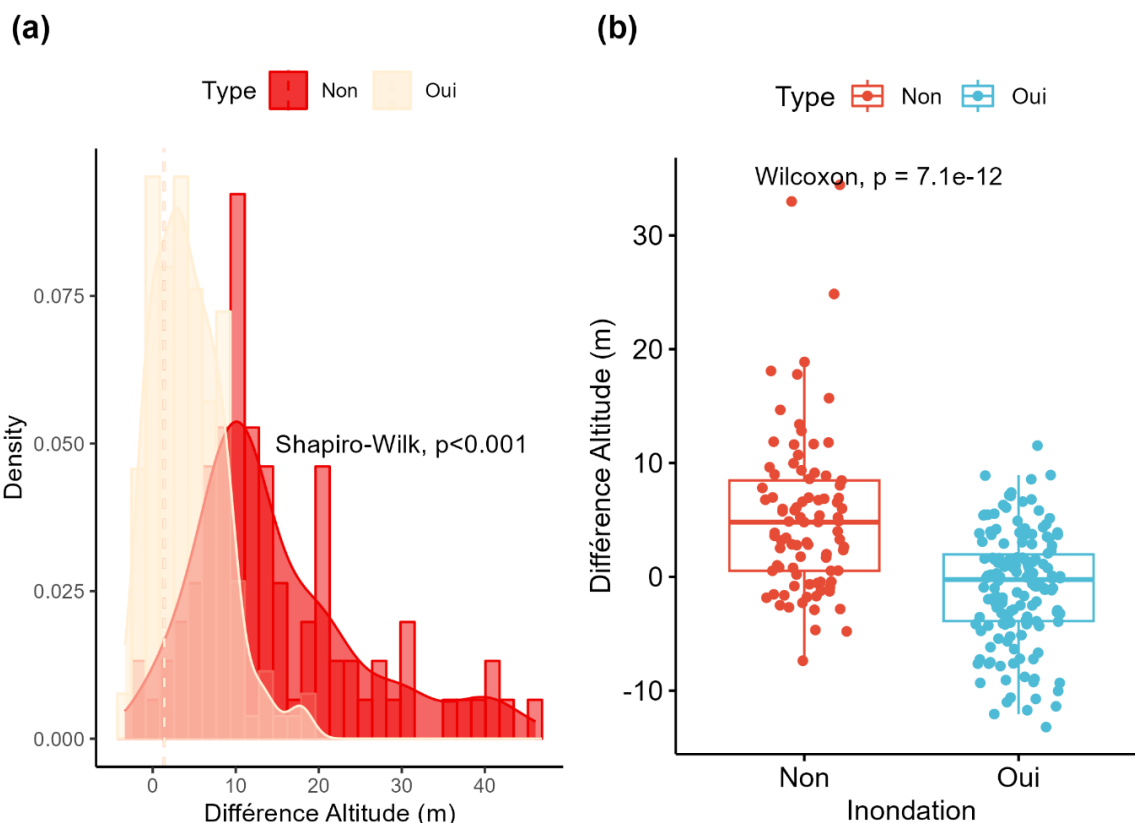


Figure 14 : Océan (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes d'altitude

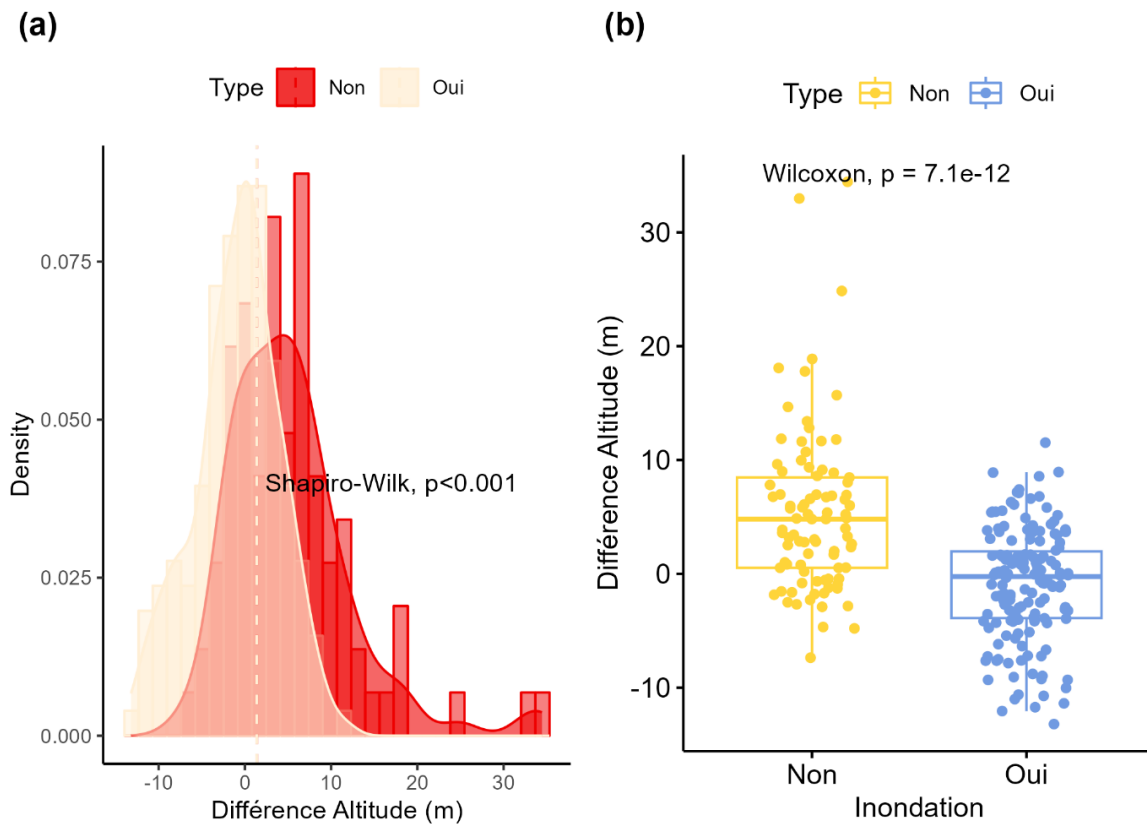


Figure 15 : Rivière (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes d'altitude

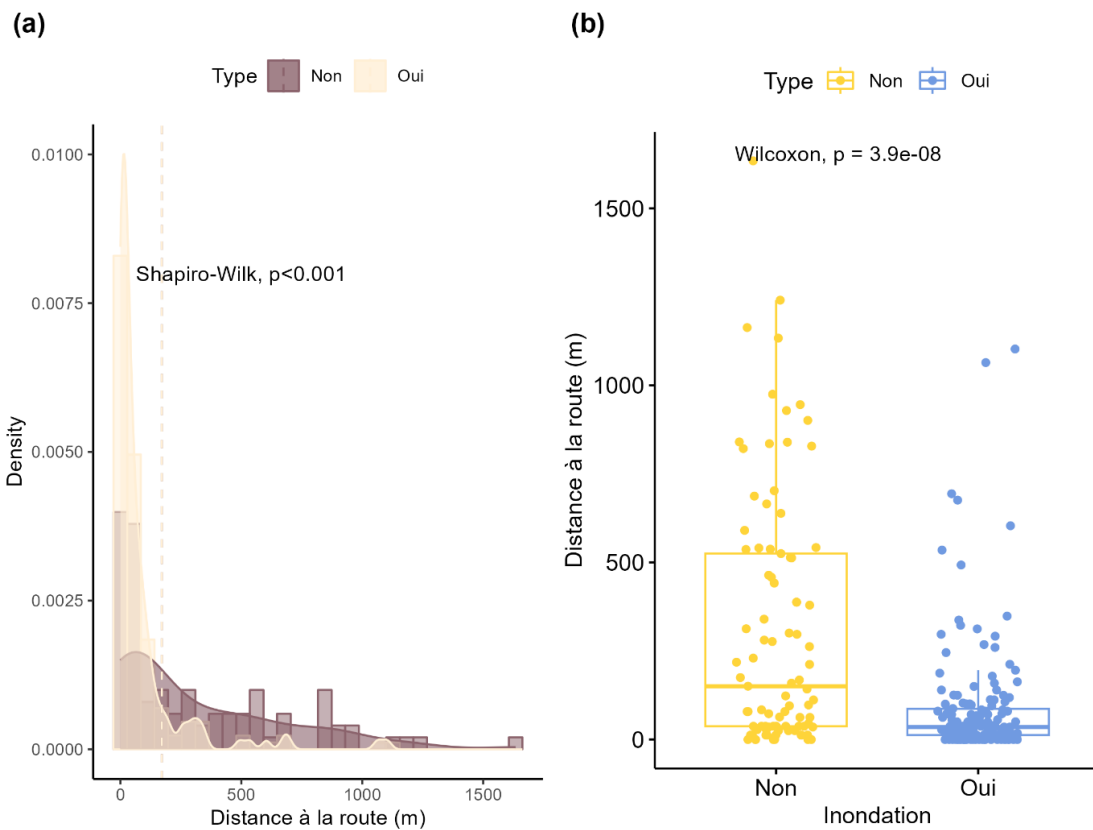


Figure 16 : Route (a) Densité de distribution, (b) Comparaison des moyennes des distances

Les deux modèles ont des courbes ROC situées dans le triangle supérieur (Figure 17), ils peuvent alors effectuer des prédictions raisonnables des zones susceptibles d'inondation. Le taux de prédiction des zones inondées (TP) est de 0,93 pour le modèle de régression logistique alors qu'il est de 0,89 pour le modèle Random Forest. Pour les zones non inondées, les taux (FP) sont de 0,75 et 0,79 pour le modèle de régression logistique et le modèle Random Forest respectivement.

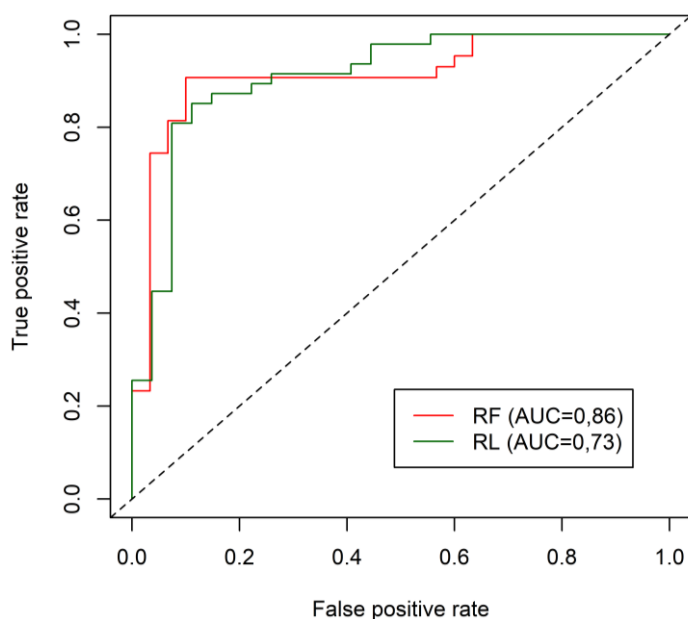


Figure 17 : Courbes ROC des modèles RL et RF

Les résultats montrent que le modèle RF (AUC=0,86) a une meilleure capacité de prédiction de l'aléa que le modèle RL (AUC=0,73). Selon le Tableau 4 la valeur de AUC varie entre 0,99 et 0,86 avec le modèle RF tandis qu'elle est comprise entre 0,89 et 0,73 avec le modèle RL. Le Tableau 4 indique également que le modèle RF affiche la meilleure performance (Précision globale=0,86 ; Test AUC=0,86 ; TP=89%, FP=79%) par rapport au modèle RL (Précision globale=0,85 ; Test AUC=0,73 ; TP=93%, FP=75%).

Tableau 4 : Performance des modèles

Modèles	Régression Logistique	Rrandom Forest
Critères		
Précision Globale	0,85	0,86
Sensitivité	0,83	0,88
Spécificité	0,89	0,82
Train AUC	0,89	0,99
Test AUC	0,73	0,86
TP	0,93	0,89
FP	0,75	0,79

Les cartes d'inondation de la ville de Tuléar obtenues à l'aide des deux modèles sont illustrées par la Figure 18. Le choix d'intervalle égal de 0,1 a permis la classification des valeurs de l'aléa normalisées (0-1). Cinq (5) classes ou niveaux sont issus de cette classification à savoir 'Très Faible', 'Faible', 'Modéré', 'Elevé' et 'Très Elevé' pour les cartes d'inondations (RF et RL). La carte d'aléa créée à l'aide du modèle RL (a) indique que la partie est de la ville est soumise aux aléas d'inondation modérés à très faibles. Elle montre également que les quartiers situés au nord, au centre et à l'ouest de la plaine sont à de niveaux élevé à très élevé de submersion d'eau. En termes de superficie, le niveau élevé occupe environ la moitié de la ville (46,50%) et les autres niveaux se partagent l'autre moitié (Très faible, Faible, Modéré, Elevé). Le modèle RF a donné une carte d'aléa d'inondation (b) dont la classe de danger élevé couvre la plus grande surface, 52,74 %, suivie de la classe modéré (19,8%). Les classes de danger très élevé, faible et très faible ne couvrent qu'environ 28% de la superficie de la ville (Tableau 5).

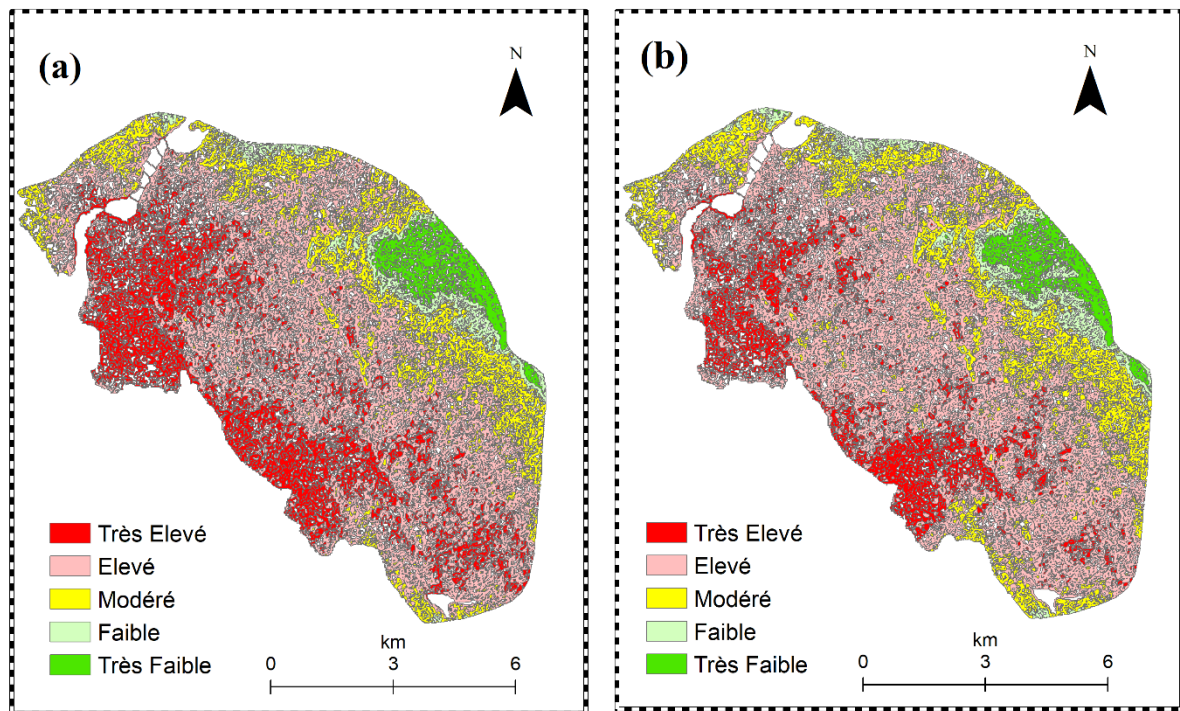


Figure 18 : Cartes d'aléa inondation de la ville de Tuléar

Tableau 5 : Répartition des superficies de la ville en fonction du modèle

Niveau aléa	RL		RF	
	km ²	%	km ²	%
Très Faible	3,72	5,03	3,42	4,62
Faible	3,23	4,37	4,03	5,44
Modéré	12,68	17,14	14,73	19,88
Elevé	34,39	46,50	39,08	52,74
Très Elevé	19,94	26,96	12,84	17,33

3.2.2. Cartographie de la vulnérabilité aux inondations

La carte de vulnérabilité a été obtenue à l'aide de l'application de la méthode AHP avec des facteurs tels que la densité de la population, l'occupation de sol, le type de maison et la distance par rapport à un centre de santé. Avant d'être utilisés dans la réalisation de la carte, ces facteurs ont été normalisés (0-1) afin d'éviter l'effet de poids. Selon la méthode AHP, le facteur type de maison a une influence majoritaire ($C_p=0,54$) sur la vulnérabilité des populations aux inondations (Tableau 6). Les valeurs de l'indice de référence ($CI=0,06$) et du rapport de cohérence ($CR=0,05$) indiquent une cohérence des réponses des experts de la gestion des catastrophes naturelles de Toliara (valeurs inférieures à 10%).

Tableau 6 : Matrice de comparaison par paire

	Densité	DCPMH	LULC	Maison	Vp	Cp	λ_{max}	CI	CR
Densité	1	3	2	0,25	1,11	0,22			
DCPMH	0,33	1	0,33	0,2	0,39	0,08			
LULC	0,5	3	1	0,33	0,84	0,16			
Maison	4	5	3	1	2,78	0,54			
Somme	10,83	16	9,33	3,78	5,12	1			

La méthode de classification à intervalle égal (0,1) a permis de subdiviser la vulnérabilité en cinq (5) classes : 'Très Faible', 'Faible', 'Modéré', 'Elevé' et 'Très Elevé' (Figure 19). Le modèle AHP a donné une carte de vulnérabilité dont les classes de niveau élevé et très élevé couvrent 87 km² soit 95% de la superficie de la ville. Les quartiers situés au nord et au sud de la ville tels que (Tanadava, Belemboka, Andranomena, Tsongobory) sont plus vulnérables que les quartiers situés au centre et à l'Ouest de celle-ci (Toliara centre, Antaravay, Mahavatse, Ankiembé bas Ankèta Bas). Dans les quartiers de l'ouest, il existe quelques endroits où le niveau de vulnérabilité est faible ou très faible. C'est dans ces quartiers que l'on retrouve les grandes infrastructures de la ville : routes, immeubles, canaux...

La carte de risque d'inondation pluviale de la ville de Tuléar est produite par le biais de la carte de l'aléa (modèle RF) et la carte de vulnérabilité (modèle AHP). La Figure 20 indique que la plus grande partie de la ville (60% de la superficie) est à un niveau de risque d'inondation très élevé et environ 5% de la superficie de la ville représente un niveau de risque d'inondation faible et très faible. Les quartiers situés au nord et au sud de la ville (Tanadava, Belemboka, Andranomena, Tsongobory) sont plus susceptibles d'être inondés au cours des averses que ceux du centre, de l'est et de l'ouest (Ankiéta bas, Toliara centre, Ankiembe-bas...).

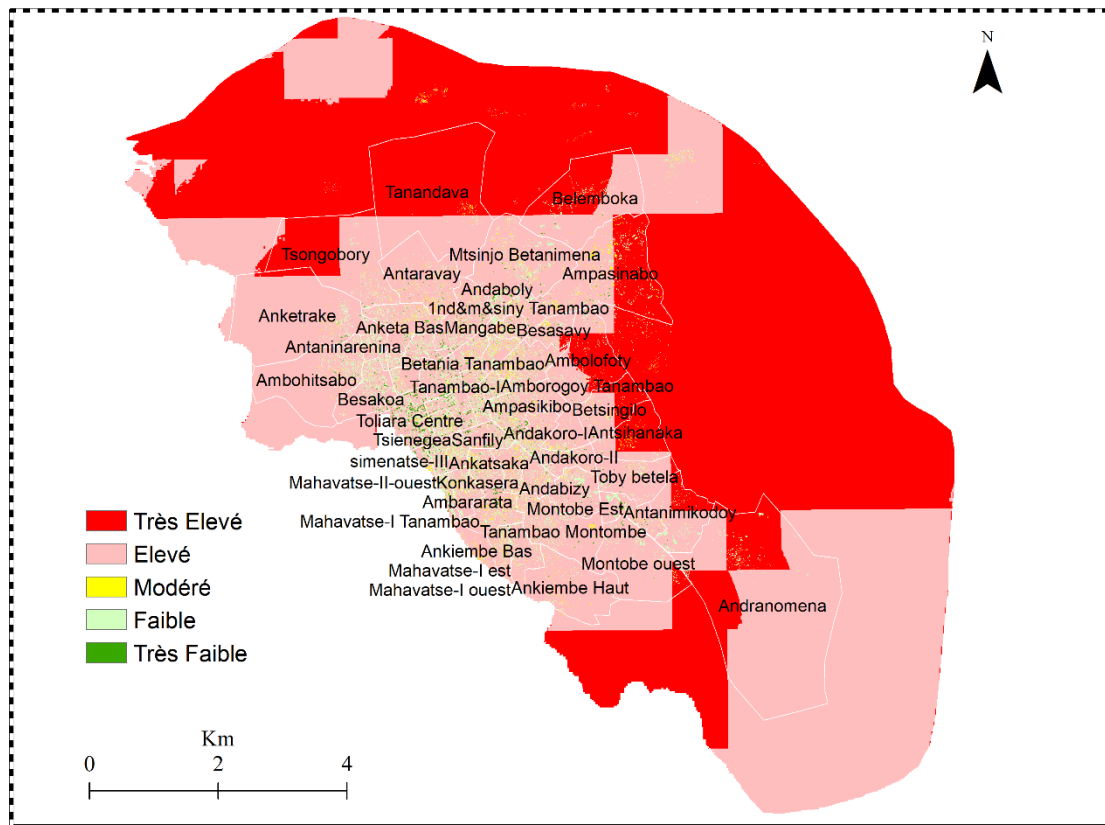


Figure 19 : Carte de vulnérabilité à l'inondation de la ville de Tuléar

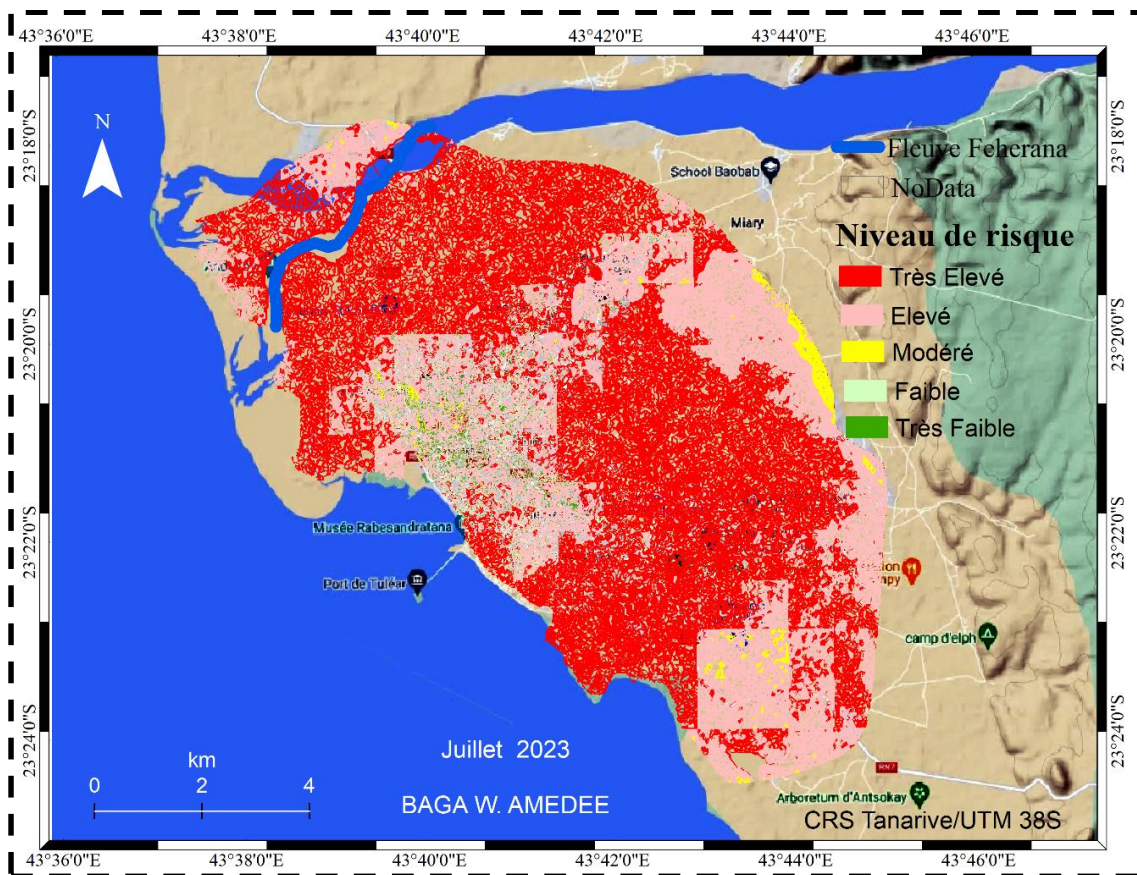


Figure 20 : Carte du risque d'inondation de la ville de Tuléar

3.3. Discussion

L'analyse fréquentielle des précipitations journalières a permis de déterminer les périodes de retour des pluies associées aux inondations. A Tuléar, les cumuls journaliers de précipitations associés aux événements d'inondation varient entre 20 mm et 193 mm avec une période de retour allant de 5 ans à plus de 10000 ans. Ce qui prédit l'occurrence des inondations pluviales sur la base des accumulations journalières de pluie (Jiang et al., 2018) puisque le dépassement d'un seuil d'accumulation journalière est nécessaire pour engendrer des submersions d'eau (Tian et al., 2019). Il en ressort que la prévision des cumuls de précipitations journalières est autant important que l'intensité et la durée de la pluie dans la gestion des inondations pluviales urbaines. Par ailleurs, les modèles d'apprentissage automatique (RL et RF) montrent que la fréquence des inondations à Tuléar est fortement liée aux caractéristiques morphologiques et topographiques du milieu, à l'occupation de sol et à la distance des zones par rapport aux routes. Cette situation corrobore les résultats obtenus à Bangladesh, en Inde, en Iran par d'autres auteurs telles que Prasad et al., (2022); Taramideh et al., (2022); Towfiqul Islam et al., (2021). Les résultats montrent que les forêts aléatoires prédisent correctement 89% de tous les cas d'inondation et 79% de tous les cas de non-inondation. Pour le modèle de régression logistique binaire, il prédit correctement 93% et 75% de tous les cas d'inondation et non-inondation respectivement. Ces deux modèles présentent alors de bonnes performances compte tenu des incertitudes associées à la collecte de données (résolution, crédibilité des citoyens). Les facteurs significatifs (p -value $<0,05$) du modèle RL tels que la courbure, l'occupation de sol, la différence d'altitude par rapport à l'océan et la distance à la route expliquent seulement 60% ($R^2=0,60$) de la survenue des inondations dans un lieu donné. La relation établie ainsi entre les inondations et les paramètres explicatifs montre que les facteurs significatifs du modèle RL ne sont pas les seules causes des inondations dans la ville de Tuléar. Ces résultats corroborent les études menées dans la ville de Ouagadougou par Tazen et al., (2019) et dans la bande de Gaza par (Al-Juaidi et al., 2018). A Ouagadougou, les auteurs indexent le manque de canaux de drainage des eaux de pluie et l'incivisme des populations. Ce constat est confirmé à Tuléar car le niveau de risque d'inondation est élevé dans les zones où la densité de la population est élevée et la densité du réseau de drainage est faible (Figure 20). Dans les zones où le système de drainage existe, sa capacité de drainage a été réduite par les mauvais comportements de la population notamment le jet des ordures. La résolution des images utilisées (4km*4km) pourrait expliquer la non significativité du facteur pluie. Seules quatre (4) pixels de la pluviométrie couvrent notre zone d'étude, d'où les valeurs de pluies des points inondés et des points non

inondés de l'échantillon sont très proches. Aussi, les données de précipitations journalières utilisées dans le cadre de cette étude n'ont pas été corrigées, elles comportent alors des biais. Ces biais peuvent provenir de la calibration des capteurs, de l'algorithme et de l'échantillonnage des champs de pluie (Delahaye, 2013). Quant à la pente, le test non paramétrique de Wilcoxon indique qu'il n'existe pas une différence significative entre les moyennes des pentes des zones inondées et non inondées. La différence entre ces deux moyennes est probablement due à la fluctuation des valeurs dans l'échantillon (ANNEXE III).

Le modèle AHP montre que le type de maison, la densité de la population et l'occupation de sol ont une forte influence sur la vulnérabilité des personnes aux inondations à Tuléar. Ces résultats corroborent les études menées par Clarisse et al., (2022) et Rakotoarisoa et al. (2018) dans le chef-lieu de la région du sud-ouest de Madagascar. Dans les quartiers situés au centre et à l'ouest de la ville caractérisés par une forte densité de population par rapport aux autres quartiers, les habitations améliorées réduisent la vulnérabilité de la population. Plus les maisons sont construites avec des matériaux durables (type 4) moins elles sont exposées aux inondations (Figure 19). Le mode de construction de l'habitation et la nature des matériaux utilisés contribuent fortement à l'exposition des quartiers aux aléas hydrologiques (Clarisse et al., 2022). D'une manière générale, les quartiers tels que Andranomena, Andaboly, Ankieta Bas, Ankiembe et Beleboka sont les plus exposés au risque d'inondation au niveau de la ville. Pour améliorer l'adaptation de ces quartiers, des initiatives de développement par l'accroissement du réseau de drainage et la sensibilisation dans le cadre du projet Pôles Intégrés de Croissance et Corridors (PIC2) sont menées par les autorités locales.

Des précipitations plus extrêmes sont attendues dans la partie occidentale de l'île (Chesney, 2016) et l'intensité des cyclones devrait augmenter dans le futur (Rakotoarison et al., 2018). Ainsi, malgré les bonnes performances des modèles de prédiction (RL et RF), la prévision des inondations dues à des pluies extrêmes ou de cyclones deviendrait difficile dans la mesure où le changement climatique engendrait une augmentation de la fréquence et de l'intensité des risques d'inondations.

La complexité des inondations à Tuléar s'explique non seulement par le caractère aléatoire des cyclones associés à des pluies mais aussi par les difficultés de drainage gravitaire des eaux de pluie et le niveau piézométrique très proche du sol. La diversité des inondations impose la mise en œuvre d'un plan de gestion intégrée des risques d'inondations (pluviale, fluviale, montée des eaux de mer) (H. Wang et al., 2021). Ce plan permettra l'identification des zones à haut risque, la quantification des pertes économiques et l'identification des mesures structurelles d'adaptation les plus avantageuses sur le plan technique. Les autorités locales sont

également confrontées à la gestion de plusieurs risques naturels à savoir les cyclones, les inondations (pluviale, fluviale, montée des eaux de mer, remontée des eaux souterraines) et la sécheresse. Voilà pourquoi une analyse systémique de ces risques naturels s'avère importante pour une gestion efficace multirisque par l'élaboration des outils de planification spécifiques et essentiels de la préparation (cartes multirisques, plans de contingence, plan d'organisation de la réponse de sécurité civile).

La carte de risque d'inondation de la ville devrait être mise à jour pour répondre à la dynamique d'occupation, à l'urbanisation et aux projections futures du climat. Elle pourrait aussi être comparée par d'autres cartes de risques d'inondation de la ville issues d'autres méthodes d'évaluation afin d'aider les décideurs dans la prise de décision. L'amélioration de la résolution des données de pluies et de la densité de la population contribuerait également à augmenter la précision de la carte de vulnérabilité et combler les données manquantes dans la carte à risque d'inondation.

CONCLUSION

La ville de Tuléar est confrontée aux problèmes d'inondation et de cyclones ces dix dernières années. La présente étude a permis de comprendre la relation entre les deux risques naturels (inondation et cycle) et d'établir une carte à risque d'inondation de la ville. L'analyse des pluviométries journalières de la période 1991-2022 a montré que les pluies associées aux événements d'inondation suivent la loi de Weibull. Ces pluies caractéristiques varient entre 20 mm et 193 mm avec une période de retour comprise entre 5ans et 10000 ans. Il ressort également de cette analyse que la relation entre les cyclones et les inondations dans la ville de Tuléar est de type aléatoire.

Quant à la carte de risque d'inondation, outil important pour le développement durable de la plaine côtière, elle a été produite à partir des données pluviométriques, des données topographiques et des données sociologiques. Des nouvelles approches basées sur les modèles d'apprentissage automatique et le processus d'analyse hiérarchique ont fourni des cartes de l'aléa inondation et de la vulnérabilité de la population. Les simulations effectuées avec les modèles de régression logistique binaire (RL) et de forêts aléatoires (RF) ont montré que le modèle RF a les meilleures performances (Précision globale=0,86 ; Test AUC=0,86 ; TP=89%) de prédiction des zones d'inondation. La courbure, la topographie, la distance à la route et l'occupation de sol sont les facteurs les plus importants de l'aléa. Cette modélisation indique que les classes de danger élevé et très élevé couvrent la plus grande surface, environ 70 %, et les classes de danger faible et très faible ne couvrent qu'environ 10 % de la superficie de la ville. Le modèle AHP révèle que les habitants des quartiers situés à l'Ouest de la ville tels que (Ankèta Bas, Tsongobory, Antaravay, Mahavatse, Toliara Centre...) sont en majorité vulnérables face aux inondations. La connaissance des zones à risque d'inondation selon les niveaux de danger orientera les actions des autorités locales. Ainsi, elles devraient mettre l'accent sur les quartiers à niveau de risque d'inondation très élevé notamment les quartiers périphériques : Andranomena, Tsongobory, Balemboka et Tanandava. Toute chose qui contribue à accroître la résilience de la population face au risque hydrique et naturel.

Toutefois, il serait judicieux de mener une analyse de la perception de la population des inondations pluviales dans un contexte de changement climatique. Suite à cette étude des sensibilisations pourraient s'effectuer afin de préparer et d'entraîner les personnes situées dans les zones à risque très élevé d'inondation. Par ailleurs, il faudrait effectuer la mise à jour de la carte en tenant compte des facteurs de revenus des ménages, d'occupation du sol « imperméabilisé » et du changement climatique (scénarios socioéconomiques).

BIBLIOGRAPHIE

- Al-Juaidi, A. E. M., Nassar, A. M., & Al-Juaidi, O. E. M. (2018). Evaluation of flood susceptibility mapping using logistic regression and GIS conditioning factors. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(24), 10. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4095-0>
- Assemblée Nationale. (2015). *LOI n° 2015 – 051 Portant Orientation de l'aménagement du Territoire*.
- Bathrellos, G., Skilodimou, H., Soukis, K., & Koskeridou, E. (2018). Temporal and Spatial Analysis of Flood Occurrences in the Drainage Basin of Pinios River (Thessaly, Central Greece). *Land*, 7(3), 18. <https://doi.org/10.3390/land7030106>
- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern Recognition*, 30(7), 1145–1159. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00142-2](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00142-2)
- Bui, Q. D., Luu, C., Mai, S. H., Ha, H. T., Ta, H. T., & Pham, B. T. (2022). Flood risk mapping and analysis using an integrated framework of machine learning models and analytic hierarchy process. *Risk Analysis*, 18. <https://doi.org/10.1111/risa.14018>
- Bulti, D. T., & Abebe, B. G. (2020). Analyzing the impacts of urbanization on runoff characteristics in Adama city, Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1151. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2961-3>
- Chapi, K., Singh, V. P., Shirzadi, A., Shahabi, H., Bui, D. T., Pham, B. T., & Khosravi, K. (2017). A novel hybrid artificial intelligence approach for flood susceptibility assessment. *Environmental Modelling & Software*, 95, 229–245. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.012>
- Chesney, R. (2016). *Climate , Conflict , and Governance in Africa : Pinpointing Risks and Opportunities Final Program Report : 2009-2016 Climate , Conflict , and Governance in Africa : Pinpointing Risks and Opportunities Final Program Report : 2009-2016*. <https://www.strausscenter.org/news/ccaps-final-program-report-on-climate-conflict-and-governance-in-africa>
- Clarisse, R., Gaspariel, Z., Antoni, R., & Théodore, R. (2022). Mode of Habitation Architectural in the City of Toliara , (Southwest- Madagascar), Factor of Exposure to the Risks of Hydroclimatic Hazards. *International Journal of Advanced Multidisciplinary Research and Studies*, 2(6), 956–962.
- Danumah, J. H., Odai, S. N., Saley, B. M., Szarzynski, J., Thiel, M., Kwaku, A., Kouame, F. K., & Akpa, L. Y. (2016). Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using

- multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire). *Geoenvironmental Disasters*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>
- Delahaye, F. (2013). Analyse comparative des différents produits satellitaires d'estimation des précipitations en Amazonie brésilienne. *Thèse de Doctorat, Université Rennes 2 Haute-Bretagne*, 228.
- Dormann, C. (2020). *Environmental Data Analysis* (Springer). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-55020-2>
- Grahn, T., & Nyberg, L. (2017). Assessment of pluvial flood exposure and vulnerability of residential areas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 367–375. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.01.016>
- Gudiyangada Nachappa, T., Tavakkoli Piralilou, S., Gholamnia, K., Ghorbanzadeh, O., Rahmati, O., & Blaschke, T. (2020). Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. *Journal of Hydrology*, 590(2019), 17. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125275>
- Hoo, Z. H., Candlish, J., & Teare, D. (2017). What is an ROC curve? *Emergency Medicine Journal*, 34(6), 357–359. <https://doi.org/10.1136/emermed-2017-206735>
- Ikirri, M., Faik, F., Echogdali, F. Z., Antunes, I. M. H. R., Abioui, M., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., Wanaim, A., Id-Belqas, M., Boutaleb, S., Sajinkumar, K. S., & Quesada-Román, A. (2022). Flood Hazard Index Application in Arid Catchments: Case of the Taguenit Wadi Watershed, Lakhssas, Morocco. *Land*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/land11081178>
- INSTAT, I. de la S. (2020). *Troisième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-3)*.
- Jiang, Y., Zevenbergen, C., & Ma, Y. (2018). Urban pluvial flooding and stormwater management: A contemporary review of China's challenges and “sponge cities” strategy. *Environmental Science & Policy*, 80, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.11.016>
- Kaspersen, P. S., & Halsnæs, K. (2017). Integrated climate change risk assessment: A practical application for urban flooding during extreme precipitation. *Climate Services*, 6, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.06.012>
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., Mechler, R., Bouwer, L. M., Arnell, N., Mach, K., Muir-Wood, R., Brakenridge, G. R., Kron, W., Benito, G., Honda, Y., Takahashi, K., & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1–28. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.857411>

- MEAH. (Ministère de l'Eau de l'Assainissement et de l'Hygiène). (2020). *Rapport du schéma directeur d'assainissement urbain: Ville de Toliara*.
- Marco, Z., Elena, A., Anna, S., Silvia, T., & Andrea, C. (2022). Spatio-temporal cross-validation to predict pluvial flood events in the Metropolitan City of Venice. *Journal of Hydrology*, 612, 128150. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128150>
- Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A., & Bitelli, G. (2019). TWI computation: a comparison of different open source GISs. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 4(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s40965-019-0066-y>
- Miller, J. D., & Hutchins, M. (2017). The impacts of urbanisation and climate change on urban flooding and urban water quality: A review of the evidence concerning the United Kingdom. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12, 345–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.006>
- Omar, L., & Ivrisimtzis, I. (2019). Using theoretical ROC curves for analysing machine learning binary classifiers. *Pattern Recognition Letters*, 128, 447–451. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2019.10.004>
- Prasad, P., Loveson, V. J., Das, B., & Kotha, M. (2022). Novel ensemble machine learning models in flood susceptibility mapping. *Geocarto International*, 37(16), 24. <https://doi.org/10.1080/10106049.2021.1892209>
- Présidence de la République. (2015). *Loi n° 2015- 052 relative à l'Urbanisme et à l'Habitat*.
- Présidence de la République. (2016). *Loi n 2015-031 relative à la Politique nationale de gestion des risques et des catastrophes*.
- Rakotoarisoa, M. (2017). *Les risques hydrologiques dans les bassins versants sous contrôle anthropique : modélisation de l' aléa , de la vulnérabilité et des conséquences sur les sociétés . : Cas de la région Sud-ouest de Madagascar Mahefa Rakotoarisoa To cite this version : HAL*. Université d'Angers; Université de Tuléar.
- Rakotoarisoa, M. M. (2019). Évaluer la vulnérabilité face aux inondations dans la région sud-ouest de Madagascar. *Mappe Monde*, 5. <https://doi.org/10.4000/mappemonde.1226>
- Rakotoarisoa, M. M., Fleurant, C., Taibi, A. N., Rouan, M., Caillault, S., Razakamanana, T., & Ballouche, A. (2018). Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations :le cas des villages aux alentours du fleuve Fiherenana. *Cybergeo: European Journal of Geography*, 28. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.29144>
- Rakotoarison, N., Rahoijao, N., Razafindramavo, L., Rakotomavo, Z., Rakotoarisoa, A., Guillemot, J., Randriamialisoa, Z., Mafilaza, V., Ramiandrisoa, V., Rajaonarivony, R., Andrianjafinirina, S., Tata, V., Vololoniaina, M., Rakotomanana, F., & Raminosoa, V.

- (2018). Assessment of Risk, Vulnerability and Adaptation to Climate Change by the Health Sector in Madagascar. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(12), 14. <https://doi.org/10.3390/ijerph15122643>
- Randriatsara, H. H. H., Hu, Z., Xu, X., Ayugi, B., Sian, K. T. C. L. K., Mumo, R., & Ongoma, V. (2022). Evaluation of gridded precipitation datasets over Madagascar. *International Journal of Climatology*, 42(13), 7028–7046. <https://doi.org/10.1002/joc.7628>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation* (Resource a). Mc Graw-Hill.
- Saravanan, S., Abijith, D., Reddy, N. M., KSS, P., Janardhanam, N., Sathiyamurthi, S., & Sivakumar, V. (2023). Flood susceptibility mapping using machine learning boosting algorithms techniques in Idukki district of Kerala India. *Urban Climate*, 49, 19. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101503>
- Taïbi, A. N., Rakotoarisoa, M. M., Champin, L., Taïbi, A. N., Rakotoarisoa, M. M., Champin, L., Fleurant, C., & Razaka-, T. (2017). Méthode d'analyse de la vulnérabilité aux inondations à Toliara (sud-ouest Madagascar). *Geo-Eco-Trop*, 41(3), pp.455-462. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01703318>
- Taromideh, F., Fazloula, R., Choubin, B., Emadi, A., & Berndtsson, R. (2022). Urban Flood-Risk Assessment: Integration of Decision-Making and Machine Learning. *Sustainability (Switzerland)*, 14(8), 22. <https://doi.org/10.3390/su14084483>
- Tazen, F., Diarra, A., Kabore, R. F. W., Ibrahim, B., Bologo/Traoré, M., Traoré, K., & Karambiri, H. (2019). Trends in flood events and their relationship to extreme rainfall in an urban area of Sahelian West Africa: The case study of Ouagadougou, Burkina Faso. *Journal of Flood Risk Management*, 12(S1), 41. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12507>
- Tefison, J. M. (2004). *Le fleuve Fiherenana et ses impacts dans la ville de Toliara*.
- Tian, X., ten Veldhuis, M., Schleiss, M., Bouwens, C., & van de Giesen, N. (2019). Critical rainfall thresholds for urban pluvial flooding inferred from citizen observations. *Science of The Total Environment*, 689, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.355>
- Tien Bui, D., Khosravi, K., Shahabi, H., Daggupati, P., Adamowski, J. F., M.Melesse, A., Thai Pham, B., Pourghasemi, H. R., Mahmoudi, M., Bahrami, S., Pradhan, B., Shirzadi, A., Chapi, K., & Lee, S. (2019). Flood Spatial Modeling in Northern Iran Using Remote Sensing and GIS: A Comparison between Evidential Belief Functions and Its Ensemble with a Multivariate Logistic Regression Model. *Remote Sensing*, 11(13), 27. <https://doi.org/10.3390/rs11131589>
- Towfiqul Islam, A. R. M., Talukdar, S., Mahato, S., Kundu, S., Eibek, K. U., Pham, Q. B.,

- Kuriqi, A., & Linh, N. T. T. (2021). Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 18. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.006>
- Vojtek, M., & Vojteková, J. (2019). Flood Susceptibility Mapping on a National Scale in Slovakia Using the Analytical Hierarchy Process. *Water*, 11(2), 364. <https://doi.org/10.3390/w11020364>
- Wang, H., Zhou, J., Tang, Y., Liu, Z., Kang, A., & Chen, B. (2021). Flood economic assessment of structural measure based on integrated flood risk management: A case study in Beijing. *Journal of Environmental Management*, 280(111701), 9. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111701>
- Wang, Z., Lai, C., Chen, X., Yang, B., Zhao, S., & Bai, X. (2015). Flood hazard risk assessment model based on random forest. *Journal of Hydrology*, 527, 12. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.008>
- Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S. C., & Reis, E. (2008). Probabilistic landslide risk analysis considering direct costs in the area north of Lisbon (Portugal). *Geomorphology*, 94(3–4), 467–495. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.040>

ANNEXES

ANNEXE I : Données utilisées pour la modélisation de l'aléa inondation à Tuléar	II
ANNEXE II: Questionnaire d'entretien	XI
ANNEXE III : Statistiques descriptives des variables de l'échantillon	XIII

ANNEXE I : Données utilisées pour la modélisation de l'aléa inondation à Tuléar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Non	96.67	25	0	540.83	27.17	12.51	276.17	Sud	Convexe	Batis	3.43	7.78	177.3	7.9
Non	101.67	25	0	168.17	39.5	3.89	256.33	Nord	Concave	Sol	15.7	20.06	181.1	5.54
Non	91.5	16	0	464.02	31.67	5.11	279.17	Sud	Convexe	Sol	6.09	8.61	185.7	10.07
Non	102.83	18	0	142.52	45.67	3.15	250.67	Ouest	Concave	Sol	6.54	10.56	183.9	5.15
Non	100.33	12	0	828.59	35.67	1.71	264.67	Est	Concave	Batis	6	10.35	171.5	7.34
Non	98.5	9	0	840.39	35.5	2.29	267.5	Ouest	Convexe	Sol	6.77	9.41	188.6	5.66
Non	96.5	6	0	1133.58	43	2.16	263	Nord	Convexe	Sol	3.02	7.02	189.5	5.05
Non	106.67	18	0	901.39	39.17	2.16	254.17	Sud	Concave	Vegetation	5.22	16.1	154.7	6.59
Non	117.67	13	0	1241.03	43	4.11	239.33	Ouest	Convexe	Vegetation	6.96	11.31	158.9	7.04
Non	100.5	6	0	975.08	43.17	2.29	253.83	Ouest	Convexe	Batis	1.77	7.94	189.4	4.48
Oui	120	16	0	1102.98	44	2.29	236	Nord	Concave	Vegetation	3.69	8.04	162.5	6.66
Non	91.17	9	0	276.7	37.33	1.71	269.67	Nord	Convexe	Batis	5.23	9.58	180.6	7.06
Non	106.83	14	0	513.87	39.67	4.11	251	Nord	Concave	Vegetation	5.38	9.73	168.9	7.3
Oui	110.5	15	0	268.39	35.17	3.89	254.33	Ouest	Concave	Sol	-8.79	8.41	152.5	7.65
Oui	98.17	16	0	245.59	28.67	4.57	271.67	Nord	Plate	Batis	5.46	9.81	172.8	7.97
Oui	124	14	0	603.76	40.33	2.29	234.17	Sud	Concave	Sol	-1	9.88	154.5	14.86
Oui	114.67	8	0	676.04	43.17	2.16	242.17	Sud	Concave	Batis	-2.7	-0.21	190.8	6.23
Oui	123.67	13	0	297.12	40	1.71	237.33	Ouest	Convexe	Eau	3.82	8.17	169.2	6.32
Oui	129	16	0	35.36	51.67	2.29	219.33	Sud	Convexe	Vegetation	2.92	12.94	152.1	6.61
Non	121.17	19	12176.8	35.36	40.17	1.71	238.5	Ouest	Concave	Batis	2.35	16.15	153.4	5.84
Non	117	14	0	12.5	54.17	3.24	230.67	Sud	Convexe	Sol	3.99	14.88	152.1	8.35
Non	114.83	14	0	513.11	45.5	2.29	237.17	Sud	Concave	Vegetation	-1.22	10.54	156.7	7.22
Non	107.17	12	0	839.74	38.17	4.11	254.67	Nord	Concave	Batis	-1.7	10.06	161.4	6.34
Non	99.17	7	0	542.28	37.5	4.11	263.33	Ouest	Convexe	Sol	-4.79	-1.29	192.2	13.7
Oui	116.67	19	14688.5	12.5	39.17	6.14	245.17	Est	Concave	Batis	2.88	18.27	153.4	5.84
Oui	115.83	10	0	260.11	35.17	4.11	249	Ouest	Convexe	Sol	-2.17	4.46	178.9	10.06
Non	110.17	7	0	63.74	40.67	3.41	247.5	Sud	Plate	Sol	2.83	6.33	192.3	3.76
Oui	140.33	7	0	1064.48	48.5	3.89	209.83	Ouest	Convexe	Vegetation	-0.04	-2.49	184.2	11.18

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Oui	96.67	6	0	493.08	37.5	1.08	266.67	Sud	Convexe	Sol	-1.95	-1.53	188.2	9.51
Oui	107.17	13	0	27.95	48.67	2.41	244.33	Est	Convexe	Vegetation	-4.29	8.8	152.1	8.43
Non	120	16	13772.2	111.8	48	2.41	232	Nord	Concave	Batis	2.62	12.44	153	8.01
Non	139.17	14	16008.1	45.07	51	1.71	209.83	Sud	Convexe	Batis	6.92	17.8	151.3	6.32
Non	112.83	10	710.78	159.1	47.17	3.89	240	Nord	Convexe	Vegetation	-0.45	12.64	153.7	5.14
Non	123.67	19	15239.4	62.5	40.5	1.71	234.83	Nord	Concave	Vegetation	-1.28	14.11	154.5	8.7
Oui	109	19	22590.7	187.5	37.67	3.15	253.33	Nord	Convexe	Vegetation	-7.63	14.88	155	12.58
Non	97.17	6	0	702.79	28.5	3.24	273.33	Est	Plate	Sol	6.6	7.02	186.9	5.7
Non	114.17	2	0	297.12	31.83	3.15	253.33	Nord	Convexe	Sol	1.99	4.35	190.5	7.99
Non	153.17	4	0	1634.25	27.67	1.71	219.5	Sud	Convexe	Sol	-2.5	-1.47	179.6	10.25
Oui	110.17	18	19748.9	0	53.5	4.11	236.17	Ouest	Concave	Batis	-4.09	9	149.6	6.31
Non	97.67	6	0	687.5	23	2.16	277.83	Nord	Plate	Sol	3.19	5.51	186.7	5.2
Non	114.17	8	0	1163.57	24.67	4.11	261.17	Ouest	Convexe	Sol	-1.54	0.82	183	5.86
Oui	115.33	17	5874.17	97.63	36.5	1.71	247.17	Ouest	Concave	Vegetation	7.41	17.22	151.9	4.33
Oui	108.67	15	18660	70.71	40.67	2.29	247.67	Sud	Convexe	Vegetation	-2.98	10.06	150.5	8.18
Non	106.67	26	20182.1	37.5	38.17	6.88	253.67	Ouest	Concave	Sol	0.79	25.88	155.4	8.1
Non	131.5	12	1603.2	0	53.5	2.16	216.83	Nord	Plate	Sol	3.61	15.84	149.2	6.74
Oui	114.17	7	0	79.06	47.83	2.16	238.5	Est	Plate	Batis	0.1	2.55	156.3	10.77
Oui	105.67	8	0	27.95	49.17	2.16	242.67	Est	Plate	Batis	-2.35	9.88	151.9	8.79
Non	101.67	15	10858.1	37.5	39.83	8.17	257.5	Est	Plate	Batis	9.36	22.41	150.2	4.73
Non	100.17	16	26272.7	27.95	36.83	2.16	264.67	Ouest	Convexe	Batis	-1.62	23.48	154.3	6.33
Oui	101.17	4	0	348.66	28.5	2.29	271.17	Sud	Convexe	Vegetation	3.41	5.75	187.5	5.37
Oui	119.5	9	0	139.75	29.67	2.16	249.83	Nord	Concave	Sol	-3.55	-1.1	176.6	8.3
Non	100.67	32	0	458.43	37.5	2.29	262.67	Nord	Convexe	Sol	13.4	39.23	156.2	5.28
Non	117.67	4	0	945.8	16.67	2.41	264.33	Nord	Convexe	Sol	-0.92	1.35	180.3	10.19
Oui	111.17	9	0	12.5	44.33	4.57	241.17	Ouest	Plate	Batis	-0.11	2.33	155.2	10.49
Non	107.17	39	0	525.15	39.67	2.29	253.17	Nord	Convexe	Batis	8.61	40.84	152.8	8.26
Non	116.83	14	15748.8	12.5	55	3.89	228.17	Ouest	Concave	Batis	0.84	13.07	144.7	6.09
Non	117.33	2	0	536.77	23	2.29	259.67	Est	Convexe	Batis	0.53	2.88	180.9	5.69
Non	97	37	1782.97	388.1	33.67	3.15	267.83	Ouest	Concave	Sol	8.88	36.75	155.9	5.39

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Non	109	6	0	0	43.17	1.71	247.83	Est	Convexe	Batis	0.55	2.99	164.4	5.86
Non	107.17	27	16409.8	12.5	36.33	2.41	255.5	Est	Concave	Batis	9.97	24.17	146.3	5.43
Non	89.67	26	0	95.2	37.67	2.41	274.67	Ouest	Concave	Batis	6.74	19.79	150.7	8.38
Non	101.17	37	0	821.68	41.67	2.41	258.17	Sud	Concave	Batis	9.63	41.86	155.2	5.48
Non	103.5	38	0	665.44	39.17	2.29	256.67	Sud	Concave	Sol	-0.81	31.42	153.5	5.88
Oui	100.67	5	0	0	43.67	1.71	252.33	Nord	Convexe	Batis	-1.88	0.57	160.8	14.05
Non	106.5	14	15.9	12.5	44.67	3.24	249.33	Sud	Convexe	Batis	-0.42	11.81	140.6	7.02
Oui	114.67	17	0	150	47.17	3.24	237.67	Est	Concave	Vegetation	-6.35	5.88	142.7	8.47
Non	108.67	18	3829.95	12.5	40.5	2.16	250.83	Ouest	Convexe	Sol	0.53	12.93	147.7	6.74
Oui	102	10	0	125	44.67	2.41	252.67	Est	Concave	Sol	-1.11	1.34	162.9	6.74
Oui	115.67	7	0	72.89	35	2.29	249.33	Ouest	Convexe	Eau	-1	-1.46	173.8	10.09
Oui	100	6	0	25	47.67	1.08	253.17	Est	Convexe	Eau	-2.88	-0.43	159	10.38
Non	101.67	34	24737.7	387.7	37.67	4.31	258.83	Est	Plate	Sol	1.7	29.56	155.4	5.29
Non	108.67	31	0	929.13	39.67	3.24	252.67	Est	Concave	Sol	-4.67	27.56	153.5	7.4
Oui	107.67	5	0	291.82	36.5	3.41	255.83	Sud	Plate	Eau	-3.91	-1.67	174.6	12.23
Oui	96	6	0	80.04	50.17	2.16	252.33	Ouest	Plate	Batis	-4.16	-1.16	159	9.03
Oui	98.5	7	0	67.31	46.17	2.16	256.33	Nord	Concave	Batis	0.43	-0.21	162.1	8.57
Oui	98.5	4	0	25	46.17	2.75	256.33	Nord	Convexe	Batis	-0.99	0.54	159.8	11.54
Non	113.5	15	16814.8	27.95	40.83	1.71	246.67	Est	Concave	Vegetation	11.62	20.51	139	4.55
Oui	98.5	4	0	35.36	46.17	3.89	256.33	Sud	Convexe	Batis	0.95	2.48	160.4	6.74
Non	96.5	42	0	340.04	40.17	1.08	262.83	Est	Convexe	Sol	32.98	46.11	149.2	6.54
Non	106.17	27	0	590.82	43.17	1.08	250.67	Sud	Concave	Batis	18.09	31.12	150.9	6.08
Oui	96.5	4	1323.97	125	51.17	6.45	253.33	Est	Plate	Eau	0.29	3.29	152.3	0
Oui	100.67	5	0	95.2	46.17	1.71	253.17	Ouest	Convexe	Vegetation	0.32	1.25	159.3	5.97
Non	101.5	31	1579	835.63	34.17	5.39	264.67	Sud	Convexe	Sol	17.79	30.83	154.3	6.91
Oui	105.17	8	3319.2	25	45.5	3.15	249.33	Sud	Convexe	Batis	1.12	3.11	132.3	8.73
Oui	100.67	9	3508.47	12.5	45.17	2.29	254.17	Sud	Concave	Eau	1.61	2.27	145.1	6.62
Oui	111.17	10	3276.87	0	45.5	3.89	241.83	Ouest	Convexe	Batis	0.82	2.81	132.2	10.12
Oui	100.67	5	0	162.98	46.17	2.29	253.17	Est	Concave	Batis	-0.12	-3.34	156.6	8.63
Oui	107.5	3	0	35.36	46.33	4.31	243.83	Est	Plate	Eau	-0.14	-1.45	156.1	9.17

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Oui	110.17	5	0	118.59	44.5	3.89	244.5	Sud	Convexe	Batis	-1.17	0.15	158.9	6.11
Oui	108	7	3216.82	55.9	51.67	1.71	240.33	Ouest	Convexe	Batis	0.18	2.17	135.8	12.36
Non	100.5	26	4438.88	312.75	39.17	2.41	258.83	Est	Convexe	Batis	6.97	20.01	151.2	8.37
Non	110.83	10	2627.95	25	50	3.89	239.67	Nord	Convexe	Vegetation	-0.55	1.45	126.7	7.47
Oui	105.67	10	5831.01	0	41.67	2.16	252.67	Sud	Convexe	Batis	-4.19	6.88	126	10.27
Oui	110.83	8	2542.14	37.5	50	2.29	239.67	Ouest	Concave	Batis	3.75	5.74	126.6	6.79
Non	105.5	16	13199.6	83.85	46.17	1.08	246.83	Nord	Concave	Batis	-2.68	8.4	132.6	7.93
Oui	110.17	5	0	87.5	39.17	3.24	248.17	Ouest	Convexe	Sol	-1.93	-1.48	159.2	6.76
Non	105.67	27	0	37.5	39.67	5.11	253.67	Ouest	Concave	Sol	11.8	21.73	148.5	8.57
Oui	106.83	5	0	100	44.5	1.08	248.67	Sud	Concave	Batis	-0.93	-0.49	156.1	6.77
Non	94.5	7	2703.38	0	47.67	3.15	257.17	Sud	Convexe	Batis	12.83	9.6	141.7	5.46
Oui	110.67	11	966.17	0	44	3.41	243.33	Ouest	Concave	Vegetation	3.89	5.88	124.5	8.34
Oui	111.67	13	4986.44	12.5	45.5	1.08	241.33	Ouest	Concave	Batis	-3.5	7.57	121.1	6.21
Oui	108.67	8	2206.78	0	40.67	2.29	250.5	Nord	Concave	Batis	0.89	2.88	121.8	11.41
Oui	104.17	24	16368.4	312.5	40.17	2.16	256.67	Sud	Concave	Batis	4.91	17.95	151.3	6.85
Oui	116.83	11	765.56	12.5	45.5	4.57	238.67	Nord	Plate	Batis	3.89	5.88	124.3	8.5
Non	102.33	14	0	0	51.5	3.15	246	Nord	Convexe	Batis	-7.37	3.71	121.5	8.4
Oui	108	9	757.36	25	55	6.27	237.17	Ouest	Plate	Batis	2.74	-0.49	141.4	8.22
Non	109.33	37	0	212.13	39.17	1.71	250.5	Sud	Convexe	Batis	34.44	41.03	144.3	7.41
Non	102.17	17	5578.8	79.06	42.17	3.15	257.17	Est	Convexe	Sol	11.67	20.41	138.8	5.8
Non	116.83	10	938.1	35.36	45.5	3.41	238.67	Sud	Plate	Batis	2.78	4.77	122.4	7.01
Oui	111.67	11	3626.94	12.5	43	2.29	245.33	Ouest	Convexe	Batis	-1.97	9.1	117.8	5.65
Non	105.67	8	2757.46	0	52.67	8.48	242.83	Nord	Concave	Batis	8.47	12.77	124.6	6.47
Oui	115.83	10	0	27.95	52.5	3.41	231.67	Est	Plate	Batis	-3.19	7.88	117.6	12.42
Oui	110.83	12	3027.7	62.5	46.5	2.29	240.67	Est	Convexe	Vegetation	-4.75	6.32	115.3	6.35
Oui	113.33	14	2190.52	12.5	43	3.41	242.67	Sud	Plate	Batis	-3.1	7.97	115.3	8.65
Oui	113.67	10	2260.12	12.5	47	2.29	236.17	Sud	Convexe	Batis	11.53	12.15	113.5	4.91
Non	107.33	21	16265	79.06	47.17	3.15	245	Ouest	Convexe	Sol	11.87	18.46	144.7	5.9
Oui	109.67	12	2700.44	0	55	3.24	235.33	Est	Concave	Batis	6.61	7.23	112.3	10.31
Oui	107.83	13	0	12.5	56.67	5.39	235.5	Sud	Concave	Batis	-2.93	8.14	112.8	5.89

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Oui	107.17	17	62.67	0	49.5	1.08	243.33	Est	Concave	Vegetation	-3.82	7.25	111.1	7.3
Oui	110.17	6	1556.65	12.5	55	4.31	234.83	Sud	Convexe	Batis	-4.02	0.28	126.7	7.4
Oui	112.67	2	1083.33	12.5	52.33	8.38	234.83	Sud	Convexe	Batis	8.57	12.87	130.5	2.89
Non	111.83	12	10545.3	37.5	52.67	1.71	235.5	Nord	Concave	Vegetation	4.87	13.61	123.7	7.47
Oui	102.67	14	4935.1	37.5	48	6.14	248.33	Ouest	Convexe	Batis	-2.29	8.79	114.7	8.74
Non	104.17	23	14545.2	37.5	47.83	1.71	248.83	Est	Concave	Sol	14.67	21.26	141.2	5.4
Oui	107.67	15	5108.46	12.5	67	2.29	225.17	Sud	Concave	Batis	-5.66	4.3	116.1	8.28
Oui	108.67	13	392.52	0	45.5	2.16	245.83	Est	Plate	Vegetation	-3.23	7.85	109.3	9.64
Non	112.83	10	0	79.06	38.17	4.88	250.67	Nord	Concave	Sol	3.86	12.48	135.8	5.91
Oui	105.17	13	819.11	0	50.17	1.08	244.67	Nord	Concave	Batis	5.4	6.02	109.2	9.58
Oui	107.67	11	2702.38	0	61.5	2.29	230.83	Est	Concave	Batis	5.46	6.08	112.2	8.22
Oui	108.17	16	12697.1	35.36	50.33	3.15	241.67	Est	Concave	Batis	-0.81	7.93	122.2	6.85
Oui	110.67	13	13639.1	70.71	43	2.29	246.33	Est	Concave	Batis	0.83	9.57	116.9	7.07
Oui	115.17	11	17344.7	212.5	41.17	3.81	243.67	Est	Concave	Batis	0.09	11.03	142.7	6.75
Oui	126.83	4	4034.24	27.95	73.5	3.81	199.67	Nord	Convexe	Batis	-7.23	-2.93	121.3	10.57
Oui	94.17	9	997.11	0	48.67	2.41	256.33	Sud	Convexe	Batis	5.82	6.44	107.8	6.87
Oui	125.83	4	718.07	50	73.5	6.54	201.67	Ouest	Concave	Batis	-2.5	1.8	123.5	5.77
Oui	106.17	13	867.8	0	57.5	2.75	236.33	Nord	Concave	Vegetation	-2.51	8.56	107.6	5.83
Oui	94.17	14	1836.76	0	51.67	2.75	253.17	Ouest	Concave	Batis	4.61	5.23	107.5	9.97
Oui	103.17	10	1550.63	0	47.67	3.89	248.67	Est	Concave	Batis	4.36	4.98	106.5	8.88
Oui	125.33	7	5054.23	12.5	65.5	2.29	208.67	Sud	Concave	Batis	-9.32	0.63	116.5	6.65
Oui	104.17	9	5506.78	45.07	57.5	2.75	238.33	Est	Convexe	Batis	-7.61	2.34	114.4	6.48
Oui	112.67	11	13388.6	37.5	48.67	2.41	238.83	Est	Concave	Batis	-1.95	6.79	121.3	12
Oui	97.67	12	2102.25	0	62	2.41	240.33	Nord	Convexe	Batis	7.11	7.73	106.1	7.83
Non	108.83	13	0	218.3	36.5	3.41	255.33	Est	Plate	Sol	7.81	18.67	134.9	6.82
Oui	104.5	8	4915.65	0	55.67	4.11	239.67	Est	Convexe	Vegetation	3.7	4.32	109	9.1
Oui	102	10	4732.15	17.68	60.67	2.41	237.33	Sud	Convexe	Batis	2.06	2.68	107.6	9.51
Oui	126.83	8	4763.86	45.07	59.67	5.11	214.17	Sud	Convexe	Batis	0.24	0.86	113.3	7.88
Oui	100.17	12	2250.37	0	59.67	3.41	240.17	Sud	Plate	Batis	4.19	6.58	105.4	9.7
Oui	106.17	11	5676.24	25	57.67	2.41	237.17	Sud	Convexe	Batis	3.08	3.7	106.4	9.17

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Non	101.83	11	7062.56	0	50.17	4.57	248.17	Est	Plate	Batis	5.76	6.38	108.9	6.77
Non	101.83	10	7146.3	25	50.17	1.08	248.17	Est	Concave	Batis	6.86	7.48	108.7	5.86
Non	98.17	31	7225.78	37.5	38.17	5.39	266.67	Nord	Concave	Sol	24.85	35.93	133.5	7.56
Non	101.83	12	6941.86	12.5	50.17	2.29	248.17	Sud	Concave	Vegetation	4.81	5.43	109	7.96
Non	101.83	11	7091.41	12.5	50.17	4.57	248.17	Est	Plate	Batis	5.85	6.47	108.8	6.35
Non	92.67	11	7157.97	0	52.67	1.71	256.67	Est	Concave	Sol	5.96	6.58	108.8	7.2
Oui	109.67	10	0	72.89	49.67	2.29	240.67	Sud	Concave	Batis	8.9	8.79	112.4	5.38
Oui	92.67	11	7451.88	12.5	52.67	1.08	256.67	Est	Concave	Vegetation	7.18	7.8	108.2	7.09
Oui	102.33	9	1598.97	12.5	57.67	2.75	240	Est	Convexe	Batis	3.67	6.07	105.5	5.9
Oui	92.67	14	6341.33	0	52.67	1.71	256.67	Sud	Concave	Batis	5.54	6.16	108.9	6.02
Oui	103	9	6983.84	63.74	65.5	1.08	232	Est	Concave	Batis	1.54	2.16	107.7	7.68
Non	103.67	13	0	229.81	35.67	6.14	261.17	Ouest	Convexe	Batis	2.52	19.79	133.7	4.86
Non	98.83	27	7551.95	37.5	36.17	6.27	264	Est	Plate	Sol	18.88	27.72	130.8	5.86
Non	116.83	14	11513.6	280.9	43.83	2.16	238.33	Nord	Plate	Sol	2.86	13.94	131.4	9.7
Oui	106	10	0	112.5	47	0.76	249.17	Nord	Concave	Vegetation	6.8	6.69	114.9	6.91
Oui	103	8	5685.69	12.5	65.5	1.08	232	Ouest	Concave	Batis	1.14	3.54	107.2	8.16
Oui	109.17	11	0	0	51	3.89	239.83	Sud	Concave	Batis	6.09	5.98	111.5	7.5
Oui	103.33	8	7515.98	37.5	43	2.41	253.67	Nord	Concave	Batis	-5.12	5.94	123.5	9.34
Oui	105.33	8	12508.8	55.9	41.17	3.81	254.17	Ouest	Convexe	Batis	-4.32	6.74	121.8	11.63
Oui	110.33	9	2564.22	25	64.33	1.08	226.33	Ouest	Concave	Batis	1.52	3.91	106.6	7.04
Oui	100.83	8	0	39.53	64.33	2.41	234.83	Nord	Convexe	Batis	-2.99	0.14	106.7	8.04
Oui	106.5	8	0	12.5	33.17	2.29	257.17	Est	Convexe	Batis	-5.43	5.63	126.2	7.77
Oui	113.33	6	0	12.5	63.67	2.29	222.17	Nord	Concave	Batis	0.41	3.54	107.3	6.98
Non	97.67	15	0	12.5	48.17	2.41	253.17	Nord	Convexe	Sol	1.01	11.43	129.5	7.75
Oui	99.17	11	0	80.04	46.17	1.71	253	Est	Concave	Batis	5.15	5.05	113.4	9.56
Oui	113.33	7	1162	12.5	63.67	4.57	222.17	Nord	Plate	Batis	-0.7	2.43	107.6	7.01
Oui	106.67	8	2587.38	35.36	67.17	7.63	226.17	Est	Concave	Eau	1.33	4.46	107.8	6.66
Oui	112.67	5	0	50	63.67	1.53	226.17	Est	Convexe	Sol	-0.02	-0.12	108.7	10.46
Oui	116.33	7	702.48	50	64.5	2.41	218.17	Sud	Convexe	Batis	-3.54	-0.41	108.5	6.24
Non	89.67	15	0	25	42.67	2.16	266.67	Sud	Plate	Sol	-1.78	9.28	127.2	7.13

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Oui	106.33	9	0	0	42	3.81	251.67	Ouest	Concave	Batis	8.94	8.53	116.7	5.82
Oui	109.33	1	0	0	66	2.75	223.67	Nord	Convexe	Batis	1.45	1.34	109.7	7.17
Oui	101.33	7	0	0	56	5.39	242	Est	Concave	Batis	0.78	0.67	110.6	6.8
Oui	103.5	8	9064.88	103.08	40.5	2.16	256	Sud	Convexe	Batis	-1.83	9.23	121.9	5.29
Oui	124.17	4	2411.98	37.5	53.5	2.16	222.33	Ouest	Plate	Batis	-0.84	2.29	109.5	5.04
Oui	116.33	5	2016.81	12.5	64.5	4.88	218.17	Est	Concave	Batis	1.55	4.69	109.3	4.86
Oui	139.83	9	2099.09	80.04	46	4.57	216.67	Est	Plate	Batis	-4.16	-1.02	110.1	8.03
Oui	129	5	1645.68	50	56.5	5.8	213.5	Nord	Convexe	Batis	1.7	4.84	110	5.95
Oui	121.33	3	0	25	68.5	1.71	211.67	Ouest	Concave	Batis	-0.33	-0.44	110.4	6.12
Oui	105.83	10	0	0	52	3.89	242.17	Ouest	Concave	Batis	-1.68	-1.79	113.3	8.68
Non	112.17	17	0	262.5	51.67	3.89	236.17	Sud	Convexe	Sol	3.29	12.13	124.2	9.37
Non	104.33	14	0	97.63	41.67	2.75	252	Ouest	Convexe	Sol	4.9	12.99	124.1	6.07
Oui	117.33	7	0	12.5	59	2.29	223.67	Nord	Concave	Batis	1.64	4.21	112.9	6.04
Oui	110.83	6	0	0	46.67	4.45	243.67	Sud	Convexe	Batis	6.31	5.89	115.1	6
Oui	121.17	4	0	17.68	61.5	1.08	216.33	Est	Convexe	Batis	0.04	2.62	112.5	7.54
Non	119	12	0	37.5	47.83	5.11	233.17	Ouest	Convexe	Sol	9.14	18.02	122.8	5.3
Oui	88.5	6	8689.29	0	47.67	3.24	263.33	Sud	Convexe	Sol	-11.38	-0.96	122.5	6.69
Oui	137.33	8	0	0	57.33	1.71	205.33	Est	Convexe	Batis	1.01	3.59	113.1	5.08
Oui	94	8	7591.77	35.36	51	1.71	255.83	Nord	Convexe	Batis	-10.61	2.48	118.5	6.55
Oui	73.5	8	6382.97	12.5	43.67	2.75	282.33	Est	Concave	Batis	-0.6	9.82	121.8	5.35
Oui	75.17	9	272.9	37.5	43.67	5.11	281.17	Sud	Convexe	Batis	-7.63	3.53	122.1	13.62
Oui	129.33	6	0	12.5	50.17	3.89	221.17	Est	Plate	Batis	4.25	2.62	114.2	11.88
Oui	143.83	6	0	50	59	4.88	198.17	Ouest	Concave	Batis	-1.72	-1.31	113.7	12.08
Oui	130.67	8	0	50	47	3.41	222.17	Sud	Concave	Batis	-3.94	-0.42	116.4	7.39
Oui	94.33	10	13555.4	17.68	52.17	2.29	252.33	Ouest	Concave	Batis	-11.72	1.37	119.6	5.92
Oui	93.33	4	0	62.5	50.17	5.8	256.5	Nord	Concave	Eau	-7.2	3.86	121.4	6.3
Oui	93.33	9	12655.9	12.5	48.17	2.75	258.5	Ouest	Concave	Batis	-5.24	5.82	120.7	6.53
Oui	142.17	4	0	0	58	3.24	199.67	Est	Convexe	Batis	2.29	0.65	114.4	9.04
Oui	76.17	8	0	25	43.67	4.11	279.67	Ouest	Convexe	Batis	-11.01	0.14	120.7	7.55
Oui	84.17	9	587.93	0	47	3.24	271.33	Nord	Plate	Batis	-7.84	5.18	119.3	7.61

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Oui	76.5	5	0	12.5	46.17	1.71	277.5	Sud	Concave	Batis	-7.51	3.65	120.7	8.72
Oui	92	7	0	70.71	47.67	2.75	259.67	Ouest	Convexe	Batis	-6.18	3.27	121.2	9.74
Oui	132.33	4	0	12.5	63	3.05	203.67	Ouest	Plate	Batis	-1.36	0.1	115	5.44
Oui	130.83	3	0	0	49.5	6.14	218.67	Ouest	Concave	Vegetation	0	0	117	0
Oui	148.33	7	0	37.5	52.5	5.8	196.67	Est	Concave	Eau	-12.06	1.03	116.1	7.54
Oui	108.33	8	0	178.97	47.17	3.89	245.83	Sud	Concave	Batis	-9.24	0.21	120.6	7.49
Oui	79.67	2	0	27.95	41.5	2.16	278.83	Sud	Convexe	Batis	-7.26	2.19	120.2	6.89
Oui	103.17	4	10033.2	159.1	45.5	3.41	251.17	Sud	Convexe	Sol	-10.72	2.37	120	6.79
Oui	118	8	6215.42	100.78	45.5	3.24	237.33	Est	Concave	Batis	-9.07	4.02	119.2	6.54
Non	96	14	0	72.89	35.67	4.57	268.33	Sud	Plate	Batis	0.2	13.22	116.1	6.2
Oui	135	8	0	35.36	52.5	3.24	212.33	Ouest	Concave	Vegetation	-13.2	-0.1	118.4	8.43
Non	78.67	9	0	62.5	39	3.24	284.33	Ouest	Convexe	Sol	-2.83	8.33	118.2	7.03
Oui	99.33	4	0	322.59	46.17	3.89	254.5	Sud	Convexe	Batis	0	0	119.3	0
Oui	115.17	7	0	195.66	47.67	1.53	236.33	Est	Plate	Batis	-10.03	-0.58	119.6	9.77
Oui	88.67	5	0	139.75	35.67	2.75	273.17	Sud	Concave	Vegetation	-6.67	4.48	118.5	5.35
Oui	122.17	3	0	39.53	44.67	2.75	234.17	Sud	Convexe	Sol	-8.97	4.12	118.6	5.35
Oui	112.67	8	0	535.02	62.17	3.24	225.17	Sud	Concave	Batis	-9.32	0.13	117.9	6.94
Oui	96.83	7	0	100.78	41.5	3.81	261.83	Sud	Convexe	Vegetation	1.02	7.81	112.3	5.65
Non	116.33	9	0	441.77	58.17	6.54	225.5	Nord	Concave	Vegetation	-2.29	9.19	119	7.37
Non	132.33	2	0	638.85	62.83	2.16	204.67	Sud	Concave	Vegetation	-0.65	10.84	118	4.35
Oui	95	4	0	111.8	51.67	3.41	253.33	Est	Convexe	Batis	1.53	3.89	114.8	7.6
Non	119.67	7	0	379.56	73.5	1.08	206.67	Est	Concave	Eau	8.04	10.4	115.9	5.05
Non	162.67	6	0	123.11	50.17	1.71	186.83	Sud	Concave	Vegetation	-2.9	10.2	119.3	4.85
Non	134.67	14	0	537.65	74.83	8.21	191.83	Est	Concave	Vegetation	10.71	9.33	117.6	4.17
Oui	106.83	6	0	83.85	57.5	3.05	235.67	Ouest	Plate	Vegetation	3.04	2.72	110.3	11.85
Non	145.67	4	0	175	54.17	3.41	200.17	Ouest	Plate	Vegetation	-1.84	9.64	118.7	5.25
Oui	163.83	6	0	337.5	50.33	1.71	185.33	Ouest	Concave	Eau	1.25	13.52	118.8	4.37
Oui	95.83	7	0	51.54	56.5	3.24	247.67	Ouest	Convexe	Vegetation	1.55	2.66	111.9	9.12
Oui	105.5	10	0	125.62	59.67	3.81	234.83	Est	Concave	Batis	1.67	1.35	108.7	9.23
Oui	103.83	6	0	106.8	55.67	2.16	240.5	Sud	Plate	Batis	3.53	2.53	108.6	10.98

Evaluation du risque d'inondation pluviale dans la ville de Tuléar au sud-ouest de Madagascar

Type	Argile	Elevation	Densite_Dr	Dist_Road	Limon	Pente	Sable	Aspect	Courbure	LULC	Diff_AltR	Diff_AltOc	Pluie_Jr	TWI
Non	100.67	9	0	150.52	43.17	3.89	256.17	Est	Convexe	Sol	8.99	9.63	109.6	6.96
Oui	92.83	7	0	83.85	55	3.24	252.17	Nord	Convexe	Batis	-1.12	2.86	109.1	11.66
Oui	94.83	5	0	72.89	59	2.41	247	Nord	Convexe	Sol	1.68	3.21	108.7	6.62
Non	105.33	4	0	300.52	62.17	2.16	232.5	Est	Plate	Batis	4.81	9.99	109.1	7.79
Oui	118.83	4	0	694.29	55	3.24	226.17	Sud	Concave	Sol	3.98	3.66	110.1	5.11

ANNEXE II: Questionnaire d'entretien

SECTION A : CARACTERISTIQUES SOCIO-DEMOGRAPHIQUES

A1. Milieu d'habitation : R/ **A.** Urbain **B.** Rural

A2. Nom de la commune : R/.....

A3. Genre de l'enquêté R/ **A.** Homme **B.** Femme

A4. Quel est votre profession ? R/.....

A5. Depuis combien de temps êtes-vous installé à votre poste ?

R/ **A.** Moins de 5 ans **B.** 5 à 10 ans **C.** 10 à 20 ans **D.** 20 à 30 ans
 E. 30 ans et plus

SECTION B : PERCEPTION DE LA VULNERABILITE

B1. Noter de 1 à 9 le facteur qui contribue plus à favoriser l'inondation (1 = Très faible et 9= Très élevé) :

Risque	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Densité									
DCMPH									
LULC									
Maison									
Revenu									

B2. Comparaison entre les facteurs deux à deux (1 = Très faible et 9= Très largement)

	Densité	DCMPH	LULC	Maison	Revenu
Densité					
DCMPH					
LULC					
Maison					
Revenu					

SECTION C : EXPERIENCE DU RISQUE

- **Expérience directe du risque d'inondation**

C1. A quand remonte votre dernière inondation vécue ?

R/ **A.** L'année dernière **B.** 2 ans passé
 C. 5 ans passés **D.** Plus de 5 ans

C2. Combien d'inondation avez-vous déjà vécu ? (Préciser les années pour chaque inondation et celle qui vous ont causé plus de dégâts).

R/.....
.....

C3. Quels sont les quartiers qui subissent plus de conséquences néfastes à cause l'inondation?

R/.....

C4. Qui dans la communauté est le plus susceptible de souffrir d'une catastrophe ? (Plusieurs réponses possibles)

R/ A. Tout le monde dans la communauté B. Les agriculteurs C. Les éleveurs
 D. Les fonctionnaires G. Autres à préciser

Préciser autres causes

.....
.....

- **Expérience indirecte**

C5. Quels sont les principaux canaux auxquels vous utilisez pour informer et former sur les risques d'inondation et les actions d'adaptation ? --Choix multiple

R/ (1) Radio (2) TV, (3) Téléphone/internet (4) Internet
 (5) Revue/Brochure/bulletin (6) autre à préciser

SECTION D : CARACTERISTIQUES INONDATION

D1. Selon vous, quelles sont les causes des inondations ?

- **Inondation (Plusieurs réponse sont possibles)**

R/ A. Forte pluie B. Cyclone C. Déforestation et culture sur
brulis D. Mauvais état du réseau de *drainage* E. Malédiction divine ou des
ancêtres F. Changement climatique G. Autre à préciser

Préciser autres causes

.....
.....

D2. Comment voyez-vous l'évolution future de l'inondation ? (choix unique)

- A. Augmentation des inondations
- B. Diminution des inondations
- C. Stagnation des inondations

D3. Quelles sont les mesures mises en place dans les quartiers pour protéger la population contre les inondations ?

A. Barrage B. Digue C. Canaux de drainage D. Délocalisation des populations
 E. Alerte précoce (SAP) F. Autres à préciser

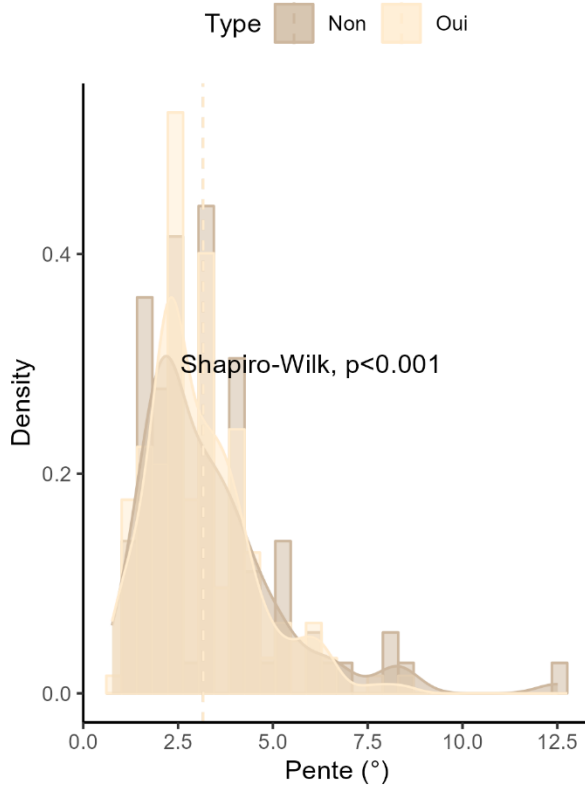
Préciser autres mesures

.....

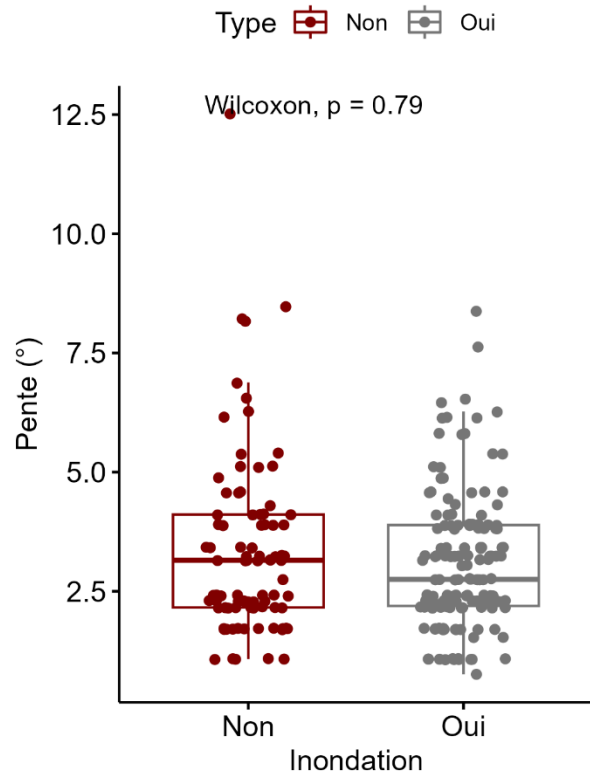
Merci d'avoir répondu à nos questions !

ANNEXE III : Statistiques descriptives des variables de l'échantillon

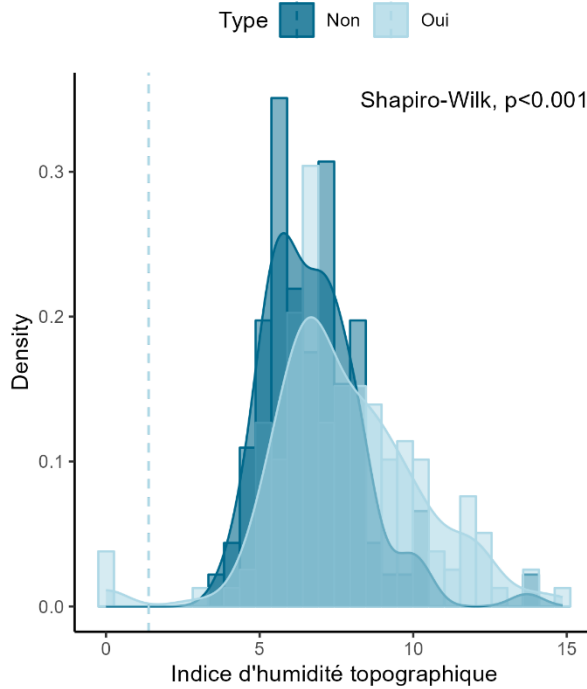
(a)



(b)



(a)



(b)

