RSTE
Revue des Sciences, de Technologies et de l'Environnement Volume 3
Édition spéciale, Université d'été 2ème édition Mahajanga, novembre 2020

ESSAI D'ÉVALUATION DES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES INONDATIONS - CAS DE MAHAJANGA

RANAIVOJAONA Sariaka Bianca[1, 2],
TSIAVAHANANAHARY Tsaralaza Jorlin[1] et
RANARIJAONA Hery Lisy Tiana[1]

1: Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement (FSTE), Université de Mahajanga.
2: École Doctorale Écosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
ranaivojaona.sariaka@gmail.com; +261 32 61 005 04

Résumé
Madagascar se situe dans la région la plus exposée aux catastrophes naturelles en Afrique. La position de l'île à l'extrême ouest de l'Océan Indien la rend plus vulnérable aux cyclones. Les cyclones tropicaux s'accompagnent souvent de pluies diluviennes, et sont à l'origine des inondations. Outre, la déforestation et le changement climatique aggravent les inondations. Une hypothèse est avancée que le réchauffement climatique aurait augmenté la vulnérabilité aux inondations. Ce travail contribue à évaluer la relation entre les indices climatiques (la température et la précipitation) et l'exposition aux inondations. La ville de Mahajanga constitue le site cible d'étude. Pour ce faire, une analyse climatique est réalisée à partir des données du site World Bank Group – Climate Change Knowledge Portal (WBG-CCKP) sur l'historique du climat (1986-2016) et la projection du climat futur (2020-2099). Les perturbations cycloniques, ayant favorisé des inondations, sont analysées à partir des données du site régional du Sud-ouest de l'Océan Indien ainsi que celui du site national, respectivement le Firinga et la Direction Générale de la Météorologie (DGM). Les résultats d'analyse ont montré le raccourcissement de la saison pluvieuse. Seuls les mois de décembre à février ont vu une précipitation de plus 250 mm au cours des 30 dernières années. Les fortes précipitations coïncident au passage des cyclones. L'exposition de la ville de Mahajanga est moyenne par rapport à l'inondation côtière et faible à l'inondation urbaine. Entre 2000 et 2015, le niveau de la mer varie annuellement de -47,63 mm à 94,25 mm. A partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE), les zones à risque aux inondations sont soulevées. Ces zones de basse altitude correspondent à des anciennes zones de mangroves. Les failles sur les infrastructures d'assainissement et la planification en milieux urbains, notamment les occupations informelles dans les zones inondables accentuent les dégâts. Les séries d'inondations correspondent à la saison pluvieuse, notamment au passage du cyclone pouvant être aggravé par une marée montante. Selon le scénario RCP4.5, relatif à une stagnation des émissions des gaz à effet de serre, les résultats de simulation montrent une tendance à la hausse de 1,2°C à 1,4°C à partir de 2020. Par ailleurs, cette tendance implique, entre autres, l'augmentation de température de surface de la mer, favorable à la formation des cyclones tropicaux. Outre les effets du réchauffement climatique, la topographie et l'aménagement du site constituent ainsi les facteurs déterminants de la vulnérabilité de la population face au risque d'inondation.

Mots-clés : changement climatique, inondation, mangrove, MNE, télédétection, Mahajanga.

Abstract
Madagascar is located in the most exposed region to natural disasters in Africa. The island's position in the tropics and the far west of the Indian Ocean increases its vulnerability to cyclones. Tropical cyclones are often accompanied by torrential rain which caused floods. Also deforestation and climate change aggravate floods. It is hypothesized that global warming has increased the flood's vulnerability. This study contributes to evaluate the relationship between climatic indices (temperature and precipitation) and the flood exposure. Mahajanga town was chosen as study site. Climate analysis was carried out from data on the WBG-CCKP site (World Bank Group – Climate Change Knowledge Portal) on the climate history (1986-2016) and the projection of future climate (2020-2099). Cyclone disturbances, having favored floods, are analyzed using data from the regional site of Southwest

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Indian Ocean (Firinga) and the national site which the General Direction of Meteorology. The analysis shows the shortening of the raining season. Only the months of December to February have seen precipitation over 250 mm in the last 30 years. Heavy precipitation coincides with the passage of cyclones. The exposure of Mahajanga city is medium compared to the coastal flood and low to the urban flood. Between 2000 to 2015, the sea level varied annually from – 47.63 mm to 94.25 mm. The Digital Elevation Model (DEM) put in evidence the risk areas to floods. These low altitude areas are former mangrove areas. The damage in flood zones increases and results by the flaws in sanitation infrastructure planning in urban areas, especially the informal occupations. The series of floods correspond to the rainy season, in particular the passage of cyclone which can be aggravated by a rising tide. According to the RCP4.5 scenario, simulation results show an upward trend of 1.2°C to 1.4°C from 2020. This trend involves the increase in sea surface temperature which is favorable to the formation of tropical cyclones. In addition to the global warming, the topography and the site's amenagement are therefore the determining factors of the population's vulnerability to the risk of flooding.

Keywords: climate change, flood, mangrove, DME, remote sensing, Mahajanga.

Introduction

Le climat à Madagascar est de type tropical caractérisé par des variations régionales selon la position géographique, le relief, l'influence maritime et le régime des vents. La grande île se localise au Sud-ouest de l'Océan Indien et se dresse du Nord au Sud sur la trajectoire privilégiée des cyclones tropicaux qui se forment dans l'Océan Indien et le Canal de Mozambique (DGM, 2008). Les cyclones tropicaux sont parmi les phénomènes météorologiques les plus violents et dévastateurs par l'intensité des vents et des précipitations qui les accompagnent. Ces conditions hydrodynamiques peuvent déclencher une submersion marine sur le littoral. Les dégâts sont considérables lorsque les zones habitées sont touchées. En janvier 2020, le cyclone Diane a laissé un lourd bilan avec 31 décès principalement par noyade, 107 000 personnes sinistrées, 10 600 maisons inondées dont 146 d'entre elles détruites. En effet, 7 districts du Nord de l'île sont fortement impactés que l'état d'urgence a été déclaré par le Gouvernement Malagasy (Firinga, 2020). Par ailleurs, les risques climatiques liés à l'intensité grandissante des évènements météorologiques sont attribués aux influences du changement global (Herring et al., 2019 ; Trenberth et al., 2018). Selon l'Indice mondial des risques climatiques (IRC) de Germanwatch 2020, Madagascar figure parmi les 10 pays les plus touchés en 2018, après le Japon, les Philippines et l'Allemagne (Eckstein et al., 2019). Dans le cas de Madagascar, la ville de Mahajanga est choisie comme site cible afin d'avoir un aperçu du rapport entre les effets du changement climatique et les risques naturels. Une hypothèse a été avancée que la tendance climatique impacterait sur la fréquence et l'intensité des aléas, et de ce fait à la vulnérabilité de la population. L'objet est d'évaluer l'influence du changement climatique sur les inondations. À cet effet, les risques climatiques et non climatiques sont analysés afin d'établir une carte d'exposition globale aux inondations.

Méthodologie

Site d'étude

La ville de Mahajanga, appartenant à la Région Boeny, constitue le site cible d'étude. Cette ville se situe sur la côte Nord-ouest de Madagascar, au bord de l'estuaire de Betsiboka et se localise entre 15°41' de latitude Sud et 46°20' de longitude Est. La ville de

Mahajanga est limitée au Nord et à l'Est par le District de Mahajanga II, à l'Ouest par le Canal de Mozambique et au Sud par la Baie de Bombetoka, et s'étend sur 57 km^2 avec 26 quartiers.

Données et Méthodes

Données climatiques

La température de l'air atmosphérique et la précipitation sont analysées à partir des données du site World Bank Group – Climate Change Knowledge Portal (WBG-CCKP ; http://sdwebx.worldbank.org/climateportal).

L'historique du climat de 1986 à 2016 a servi de référence pour une projection climatique de 2020 à 2099 selon le scénario RCP4.5. Les perturbations cycloniques sont analysées à partir de leur fréquence, leur vitesse et le cas échéant de la pluie apportée en 24 heures. La variation du niveau de la mer est également évaluée. Une matrice d'évaluation de risque, d'impact et de vulnérabilité est réalisée. A chaque degré est attribuée une note. Faible: lorsque le risque d'exposition est occasionnel touchant le milieu pendant une courte période; l'impact atteint une minorité de la population. Moyen: si le risque affecte le milieu en une période déterminée; l'impact touche une proportion de la population. Fort: le risque affecte le milieu pendant une longue période et indéterminée; l'impact touche une proportion importante de la population. Ces notes ont servi de base de données pour l'évaluation de l'exposition aux inondations urbaine et côtière (faible à forte) et l'exposition globale du site (très faible à très forte) par interpolation spatiale.

Données cartographiques et enquête

Les images satellitaires SRTM, Landsat 5, 7 et 8 sont utilisées pour l'analyse cartographique. Le niveau d'altitude de l'ensemble de la ville de Mahajanga est représenté à partir d'un modèle numérique d'élévation ou MNE, avec l'image SRTM. Ce modèle a permis de soulever les zones de basse altitude qui correspondent aux zones vulnérables aux inondations. Les images Landsat ont servi pour l'analyse de l'évolution d'occupation du sol (1990 à 2020), couplée à des vérités de terrain. Outre, une enquête sur les mangroves est menée en 2015, avec comme population d'étude les personnes du troisième âge ayant vécu plus de 30 ans dans la ville de Mahajanga. Une étude descriptive et analytique transversale sur les zones de mangroves de Mahajanga est ainsi réalisée.

Résultats

Analyse climatique

Historique

Pour l'analyse des données climatiques, la température de l'air atmosphérique et la précipitation de la ville de Mahajanga sont représentées ci-après (fig. 1).

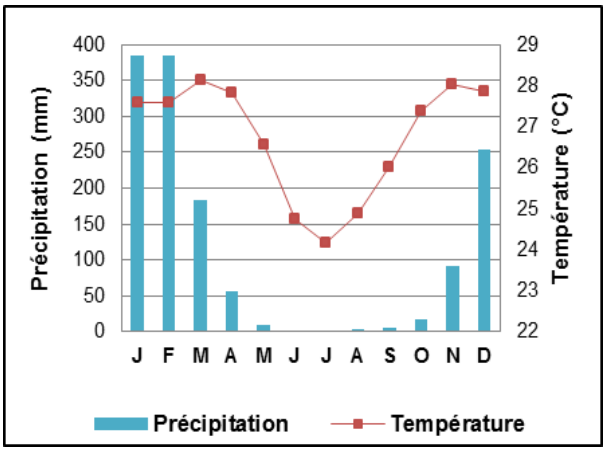

Figure 1. Températures et précipitations moyennes mensuelles de 1986 à 2016 (WBG-CCKP, 2020)

Les températures et les précipitations moyennes varient selon les saisons, diminuant respectivement à 24,2°C (juin) et 0,9 mm (mai) en saison sèche et

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

fraîche. Les valeurs moyennes de ces indices climatiques augmentent jusqu'à 28,1°C et 385,4 mm en février, relatives à la saison chaude et humide (fig. 1).

Projection climatique

Une simulation climatique sur la précipitation de 2020 à 2099 prévoit une variation de - 10 mm à + 6 mm. Au cours de ces prochaines années, les mois de décembre et novembre verront une baisse de précipitation, respectivement de l'ordre de - 10 mm et - 7 mm. Tandis qu'une augmentation de + 6 mm s'annonce vers la fin de la saison de pluie en avril (fig. 2). Pour la température, les résultats de simulation montrent une tendance à la hausse de l'ordre de + 1,2°C à 1,4°C dans la ville de Mahajanga.

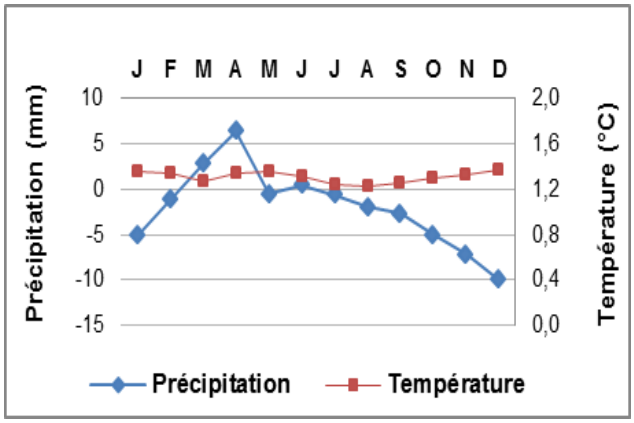

Figure 2. Variation de température et précipitation de 2020 à 2099 (WBG-CCKP, 2020)

Analyse des risques

Risques climatiques

Les cyclones et les inondations constituent les principaux risques climatiques. Les tempêtes et les cyclones tropicaux dans le Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien depuis 1969 sont représentés par la figure ci-après (fig. 3).

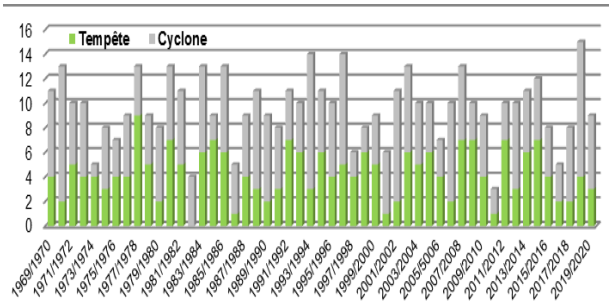

Figure 3. Répartition des tempêtes et cyclones tropicaux dans le Sud-ouest de l'Océan Indien de 1969 à 2020 (Firinga, 2020)

Les tempêtes ont une vitesse de vent de 63 km/h à 117 km/h, et les cyclones tropicaux ont une vitesse de vent de plus de 118 km/h. Le nombre total de tempêtes et de cyclones passant dans le Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien varie de 4 à 15 par an depuis 1969 à 2020. Le tableau 1 informe sur le nombre et le pourcentage de cyclones tropicaux par décennie.

Tableau 1. Cyclones tropicaux dans le Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien (Firinga, 2020)

1970-1979		1980-1989		1990-1999		2000-2009		2010-2019	
N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
50	43	56	53	52	48	55	53	52	54

Selon le tableau 1, le pourcentage de cyclones tropicaux présente une tendance à la hausse au cours de ces 5 décennies. Les risques d'inondations sont, par ailleurs, fonction de la tendance climatique notamment l'intensité et la durée de précipitation. Le tableau ci-après donne les informations sur les cyclones, de 2004 à 2020, touchant la ville de Mahajanga.

Tableau 2 : Forts cyclones engendrant des inondations à Mahajanga (Firinga, 2020)

Date	Nom	Pression (mb)	Vitesse des vents (km/h)	Pluie en 24h (mm)
28/01/2004	ELITA	981,5	< 180	222
07/03/2004	GAFILO	977,9	300	238,4
31/03/2014	HELLEN	925	205	-
09/12/2019	BELNA	960	180	-
24/01/2020	DIANE	980	102	129

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Outre, la submersion marine résultant du réchauffement climatique actuel ainsi que la situation topographique constituent les facteurs principaux responsables du déclenchement des inondations. La figure suivante donne un aperçu sur la variation du niveau de la mer au cours des 15 dernières années.

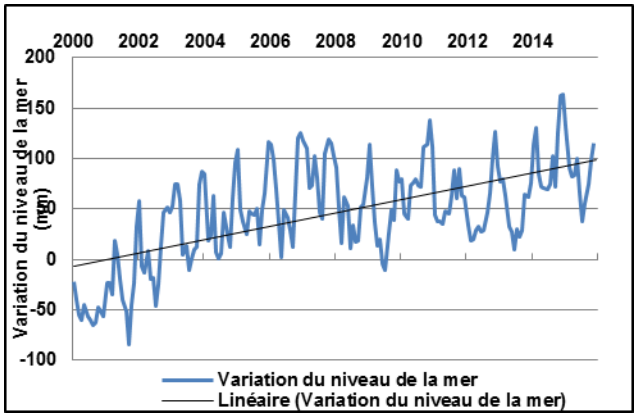

Figure 4. Variation mensuelle du niveau de la mer de 2000 à 2015 (WBG-CCKP, 2020)

Le niveau de la mer varie en fonction de la saison. Les pics de valeurs au cours des années correspondent à la saison pluvieuse. Une tendance à la hausse des variations du niveau de la mer est remarquée à partir de la figure 4. La moyenne annuelle maximale est enregistrée en 2014 avec une valeur de 94,25 mm.

Risques naturels et croissance démographique

L'évolution de l'occupation du sol sous la pression démographique, l'urbanisation voire des occupations informelles accentuent les risques d'origine naturelle. L'inondation constitue le principal risque où les habitations se développent dans des zones inondables telles que la mangrove. Plusieurs quartiers de Mahajanga correspondent à des anciennes zones de mangrove notamment Mahavoky Avaratra, Tsaramandroso Ambany, Tsararano Ambany, Ambalavola, Fiofio et Aranta (fig. 5).

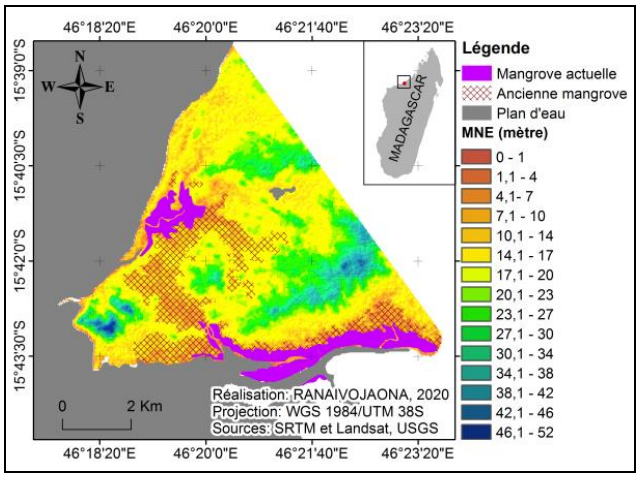

Figure 5: Modèle numérique d'élévation et zone de mangrove à Mahajanga

Selon les enquêtes réalisées en 2015, la figure suivante montre les anciennes zones de mangroves les plus connues par la population locale (fig. 6). Antsahambingo, Manapatanana et Maroala sont ralliés au quartier de Mahavoky Avaratra. Manapatanana et Antsahambingo sont les plus connus comme anciennes zones de mangroves, bien qu'il y ait davantage une mangrove mais avec une perte considérable en superficie.

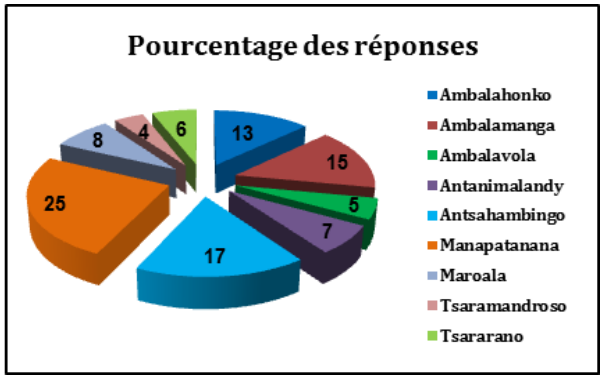

Figure 6 : Anciennes zones de mangroves

Exposition aux inondations

A partir des données sur les indices climatiques, la topographie et la vulnérabilité liée à la présence

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

de la population, l'exposition de la ville de Mahajanga aux inondations est présentée par la figure suivante.

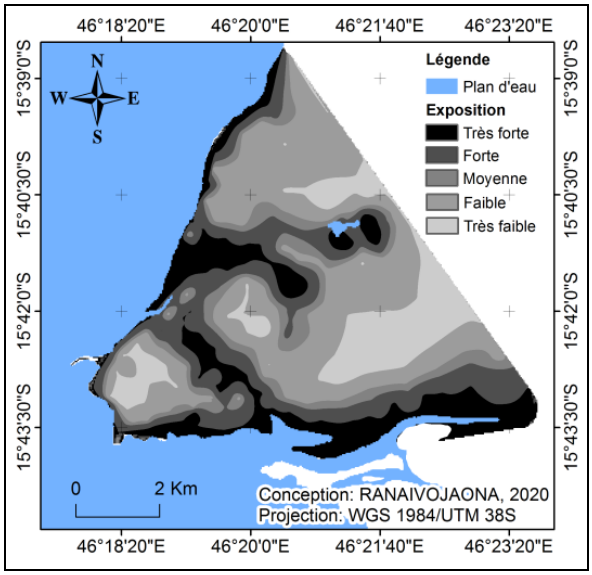

Figure 7. Carte d'exposition globale aux inondations à Mahajanga

L'exposition aux inondations est surtout fonction de l'emplacement des habitations. Sur la superficie totale de 57 km² de Mahajanga, l'inondation urbaine affecte fortement près de 1 km² et l'inondation côtière près de 4 km². La mangrove actuelle est exclue de la superficie exposée.

Discussion

A Madagascar, la période cyclonique correspond à la saison chaude et humide. Les cyclones tropicaux Kamisy (1984) et Gafilo (2004) ont été les plus intenses, ayant touché Mahajanga, avec plus de 250 km/h (Firinga, 2020), laissant des dégâts catastrophiques considérables. La période cyclonique 2019-2020 est, par ailleurs, marquée par de graves inondations consécutives dues au passage des cyclones Belna et Diane (tab. 2). Dans l'Atlantique, l'augmentation de l'activité cyclonique intense sur la période passée et actuelle est affirmée en corrélation avec l'augmentation de température de surface de l'océan (André et *al*., 2008), due à l'augmentation de température de l'air. Ces analyses reposent sur les résultats d'observation du quatrième rapport du GIEC. Le réchauffement climatique présente également une menace pour les côtes par l'élévation du niveau de la mer engendrant une érosion et une submersion. Pour la Région Boeny, une vitesse moyenne de recul de 2 à 3 m par an des côtes est enregistrée (MEDD, 2019). La saison cyclonique à Madagascar correspond à la saison pluvieuse de novembre à avril avec en moyenne 3 à 4 cyclones par an (DGM, 2008). Un nombre maximal de 11 cyclones est enregistré pour la saison 2018-2019 dans le Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien (fig. 3). Les changements sur les paramètres climatiques fondamentaux dont la température et la précipitation (fig. 2) modifieraient le régime climatique dans les prochaines décennies. Les résultats de projection climatique montrent que la fréquence des cyclones tropicaux à Madagascar serait de l'ordre de 3 à 5 par an en moyenne vers 2100. Toutefois, les cyclones intenses seront plus fréquents et dans la plupart des cas, pourraient passer dans le Nord de l'île (MEF, 2010). De 2010 à 2019, 54 % des systèmes dépressionnaires sont devenus des cyclones tropicaux (tab. 1) dans le Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien.

Quant à l'aménagement du territoire, le Vallon Metzinger est construit, en 2001, à Mahajanga en vue de protéger les habitants des quartiers de basse altitude pendant la saison pluvieuse. Ce canal de 3 km suit la trajectoire du chenal approvisionné en eau de mer lors des marées montantes, qui divisait la ville en deux parties (fig. 5). La durée d'inondation a ainsi diminué par l'évacuation rapide des eaux vers la mer ou l'estuaire de la Betsiboka. Toutefois, ces zones drainées ont suscité la migration de la

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

population en s'y installant de manière illicite. En outre, l'urbanisation du vallon a conduit à la dégradation des infrastructures, l'obstruction du canal par l'accumulation des déchets et des boues et à l'inondation des latrines lors des marées vives (Ircod, 2001). De fortes précipitations peuvent ainsi causer la stagnation des eaux aux alentours de ce vallon engendrant une inondation. En cas de forte pluie, l'inondation est devenue inévitable surtout si la période correspond aux marées montantes.

Conclusion

La présente étude a ainsi permis de présenter l'historique du climat et la simulation climatique des indices fondamentaux dont la température et la précipitation. La saison pluvieuse s'est écourtée et les pluies violentes ensuivent les cyclones. L'inondation urbaine étant exclusivement occasionnée par les conditions hydrodynamiques dues aux systèmes dépressionnaires, Mahajanga est faiblement exposé à ce risque. Par rapport à l'inondation côtière, cette ville présente une exposition moyenne du fait de son emplacement. En effet, les inondations surgissent dans les quartiers en basse altitude qu'en saison pluvieuse. La projection climatique de 2020 à 2100 annonce un changement de régime se traduisant notamment par une augmentation de température. Cette augmentation impliquerait la fréquence des cyclones tropicaux. Une tendance à la hausse du pourcentage des cyclones tropicaux parmi les systèmes dépressionnaires du Bassin du Sud-ouest de l'Océan Indien a été remarquée. Par ailleurs, ces cyclones seront plus intenses et ayant comme trajectoire le Nord comprenant Mahajanga. La topographie du site constitue, en outre, un facteur aggravant la vulnérabilité de la population. Les habitants des anciennes zones de mangroves sont, en effet, plus vulnérables aux inondations. La mangrove est une zone tampon qui fonctionne telle une éponge en cas de submersion marine. Bien que l'expansion urbaine soit au détriment de cet écosystème naturel, d'une part, le respect des pas géométriques pour la sécurisation de la zone d'aménagement s'avère primordial afin d'amoindrir les risques d'inondation future. D'autre part, la restauration de la mangrove littorale est urgente afin de mieux protéger cette ville côtière.

Références bibliographiques

André, J.C., Royer, J.F et Chauvin, F. (2008). Les cyclones tropicaux et le changement climatique. Comptes Rendus Géoscience. Volume 340, n° 9 – 10 : 575 - 583. Doi : 10.1016/j.crte.2008.07.003

Direction Générale de la Météorologie (2008). Le Changement Climatique à Madagascar. Mars 2008. 19 pages. http://www.meteomadagascar.mg

Eckstein, D., V. Künzel, L. Schäfer, et M. Winges, (2019). Indice mondial des risques climatiques 2020. www.germanwatch.org/en/17307

Firinga, (2020). Cyclones Tropicaux du Sud-Ouest de l'Océan Indien. http://www.firinga.com

Herring, S.C., N. Christidis, A. Hoell, M.P. Hoerling, and P.A. Stott, (2019). Explaining Extreme Events of 2017 from a Climate Perspective. *Bull. Amer. Meteor. Soc.,* **100 (1)**, SI – SII7. https://doi.org/10.1175/BAMS-ExplainingExtremeEvents2017.1

IRCOD (2001). Assainissement du vallon Metzinger, à Mahajanga. Plaquette coll. Ran'Eau n°4 Jan 2011; 2 pages. Ed. CITE – Antananarivo pS-Eau – Paris Ran'Eau- Antananarivo

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2019). *Vulnérabilité et risques climatiques : Informations récentes pour le TBER*

Boeny. Résumé du Tableau de Bord Environnemental de la Région Boeny, Madagascar, DREDD Boeny. 91 p.

Ministère de l'Environnement et des Forêts (2010). Deuxième Communication Nationale au titre de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique. 162 p.

Trenberth, K.E., L. Cheng, P. Jacobs, Y. Zhang, and J. Fasullo, (2018). Hurricane Harvey Links to Ocean Heat Content and Climate Change Adaptation. *Earth's Future,* **6**. http://doi.org/10.1029/2018EF000825