



HAL
open science

Méthode d'analyse de la vulnérabilité aux inondations à Toliara (sud-ouest Madagascar)

Aude Nuscia Taïbi, Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Laura Champin, Cyril Fleurant, Théodore Razakamanana, Stéphane Guyard

► **To cite this version:**

Aude Nuscia Taïbi, Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Laura Champin, Cyril Fleurant, Théodore Razakamanana, et al.. Méthode d'analyse de la vulnérabilité aux inondations à Toliara (sud-ouest Madagascar). *Geo-Eco-Trop*, 2017, 41 (3), pp.455-462. hal-01703318

HAL Id: hal-01703318

<https://hal.science/hal-01703318v1>

Submitted on 25 Feb 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Numéro spécial

Méthode d'analyse de la vulnérabilité aux inondations à Toliara (sud-ouest de Madagascar)

Methodology of flood vulnerability analysis in Toliara (South-West of Madagascar)

Aude-Nuscia TAÏBI¹, Mahefa RAKOTOARISOA^{1,2}, Laura CHAMPIN¹, Cyril FLEURANT¹,
Théodore RAZAKAMANANA² & Stéphane GUYARD³

Abstract : The city of Toliara, located in the southwest of Madagascar, is frequently subjected to hurricane hazards and floods from the Fiherenana river. Risks are the result of the conjunction of hazard and vulnerabilities. Hazard is mainly what is studied and studies relating to the vulnerability are more recent and exceptional ; research combining hazard and vulnerability is even more so.

This study seeks to assess the vulnerability of the population of Toliara using a twin quantitative and qualitative approach, focusing on the 2013 Haruna flood. First, we evaluate the degree of vulnerability of homes from flooding using a vulnerability index which is the arrangement of several static criteria (potential water depth, flow rate, architectural typology of the buildings) from CREACH *et al.* (2015). Secondly, the qualitative dimension of the local population response capacity have been assessed with a survey.

Keywords : Flood, risks, vulnerability, indexes, survey, Madagascar, Toliara

Résumé : La ville de Toliara dans le sud-ouest malgache, est soumise à des inondations catastrophiques récurrentes par le fleuve Fiherenana en lien en général avec le passage de cyclones. Les dégâts majeurs occasionnés à chaque inondation malgré la digue censée protéger la ville, nécessitent une meilleure compréhension du risque. Les risques résultant de la conjonction d'un aléa et de vulnérabilités, nous proposons ici de réfléchir à une méthodologie pour caractériser la vulnérabilité des populations et du territoire à ce risque.

L'analyse des facteurs de vulnérabilité associe des mesures quantitatives de l'exposition des éléments aux inondations et des mesures qualitatives de la capacité de réponse des individus ou des groupes exposés, en nous basant sur la dernière inondation de 2013 liée au cyclone Haruna. Les mesures quantitatives de l'exposition des éléments aux inondations s'appuient sur la création d'un indice de vulnérabilité à partir de plusieurs critères statiques. Les mesures qualitatives de la capacité de réponse des individus ou des groupes exposés aux sinistres utilisent une enquête de terrain.

Mots clés : Risques, inondation, vulnérabilité, indicateurs, enquête, Madagascar, Toliara

INTRODUCTION

La plaine côtière de Toliara située dans le SO de Madagascar est ceinturée à l'est par le bord ouest du plateau calcaire de l'Eocène, au sud par la falaise de Tsinjoriake, et à l'ouest par le canal de Mozambique (Figure 1). Elle est soumise à des inondations récurrentes par le fleuve Fiherenana en lien en général avec le passage de cyclones dans un contexte d'augmentation de ces phénomènes climatiques extrêmes (RABEFITIA *et al.*, 2008). Les dégâts majeurs occasionnés à chaque inondation posent le problème de l'efficacité de la gestion de ce risque à Toliara. Le cyclone Haruna, passé au plus près de Toliara le 22 février 2013, et l'inondation consécutive à la rupture de la digue protégeant

¹LETG-Angers (UMR 6554 CNRS), Université d'Angers, UBL. Courriel : audenousia.taibi@univ-angers.fr

² Université de Toliara, Madagascar

³ Station Seas-Oi, La Réunion

la ville du fleuve Fiherenana le 23 février, dont on étudiera ici les conséquences, se sont soldés par 6 décès, 16 disparus, 127 blessés, et plus de 40 000 sinistrés (BNGRC, 2013 cité par GUYARD, 2014).

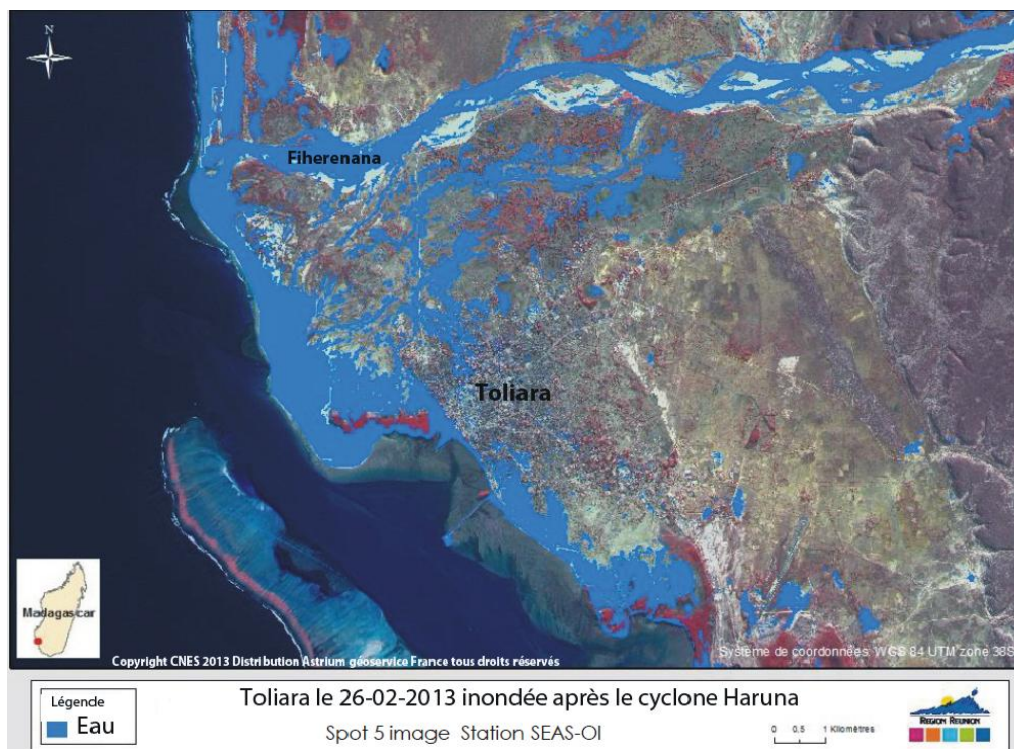


Figure 1 : Toliara inondée.

La caractérisation de l'aléa est difficile dans cette région de Toliara en raison des lacunes de données sur le fonctionnement hydrométéorologique permettant de reconstituer en partie ces données pour le Fiherenana. Alors, nous proposons de réfléchir à une méthodologie pour caractériser la vulnérabilité des populations et du territoire à ce risque en prenant comme élément repère l'inondation de février 2013. Par ailleurs, l'étude des risques, notamment dans des objectifs appliqués de gestion, a profondément évolué ces dernières décennies. Plutôt concentrée sur l'analyse des aléas, les travaux s'intéressent de plus en plus aux dimensions de la vulnérabilité (PROVITOLLO, 2007). En effet, le risque n'est pas seulement contenu dans cet aléa, mais résulte de cette deuxième composante qu'est la vulnérabilité.

La notion de vulnérabilité est en général vue comme la mesure des conséquences d'un aléa, le risque inondation se caractérisant par de nombreuses victimes, un coût important de dégâts matériels et des impacts sur l'environnement. Elle est alors analysée par une approche analytique qui a pour objectif d'identifier les enjeux, c'est-à-dire les éléments vulnérables, et à évaluer leur perte après un événement catastrophique. Cette approche classique, qui est notamment développée dans les Plans de Prévention des Risques en France, consiste à établir une évaluation des dommages pour chaque enjeu (correspondant aux personnes, biens, activités et équipements et milieux naturels) soumis à un aléa. Cependant, la vulnérabilité inclut également les difficultés qu'une société mal préparée rencontre pour réagir à la crise, puis pour restaurer l'équilibre en cas de sinistre (perturbations directes et indirectes, immédiates et durables). Or, cette dimension est de manière générale très mal prise en compte dans les politiques et les outils de gestion des risques. Pourtant, comprendre les conditions ou les facteurs propices aux endommagements ou influant sur la capacité de réponse à une situation de crise apparaît de plus en plus fondamental pour agir sur la réduction de cette vulnérabilité. Cette vulnérabilité obéit à une série de facteurs structurels (socio-démographiques et économiques, socio-culturels, cognitifs ou éducatifs et perceptifs, techniques ou physiques, fonctionnels et institutionnels ou politico-administratifs), géographiques et conjoncturels, dont l'analyse permet de prévoir l'amplitude des préjudices potentiels (THOURET & D'ERCOLE, 1996).

L'étude présentée ici, encore en cours, se propose de développer une méthode pour analyser les facteurs de vulnérabilité associant des mesures quantitatives de l'exposition des éléments aux inondations et des mesures qualitatives de la capacité de réponse des individus ou des groupes exposés aux sinistres à partir de relevés de terrain et de l'utilisation du SIG.

METHODOLOGIE

En nous basant sur l'inondation catastrophique de février 2013, nous avons développé une double approche pour caractériser l'aléa, malgré les lacunes importantes de données, et la vulnérabilité, en nous intéressant à la fois à l'évaluation des dommages pour les différents enjeux (ici les maisons), ainsi qu'aux conditions et facteurs propices aux endommagements ou influant sur la capacité de réponse à l'inondation. La méthodologie s'appuie sur la création d'indices de vulnérabilité, « biophysique » pour cerner les dommages matériels engendrés par l'aléa, et « sociaux » (DAUPHINE, 2003) pour appréhender les comportements pendant l'inondation. Les indicateurs de vulnérabilité sont collectés et calculés à partir de différentes sources de données ; topographiques, images satellites et enquête par questionnaire pour l'essentiel.

Le contexte social et économique de la ville de Toliara à Madagascar, pays qui occupe la 154^e place sur les 188 pays du rapport sur le développement humain de 2015 des Nations Unies, réduit drastiquement les possibilités de gestion des risques pour la réduction des dégâts. Dans un contexte similaire, D'ERCOLE (1991), travaillant en Equateur, préconisait de cerner le comportement des différents acteurs en utilisant une enquête par questionnaire, la seule connaissance des zones à risque dans cette région ne permettant pas la réduction des dégâts lors d'évènements catastrophiques.

Cette analyse de la vulnérabilité est réalisée à l'échelle des maisons dans les quartiers nord de la ville (Betanimena, Andamasina Tanambao, Tanandava et Tsongobory) (Figure 2) inondés en 2013. Dans un premier temps, toutes les maisons ont été digitalisées et géolocalisées à partir des fonds d'images téléchargés sur Google Earth. On a également défini à ce moment là par photo-interprétation leur type architectural en distinguant les maisons en roseau, en bois, en dur et à étage.

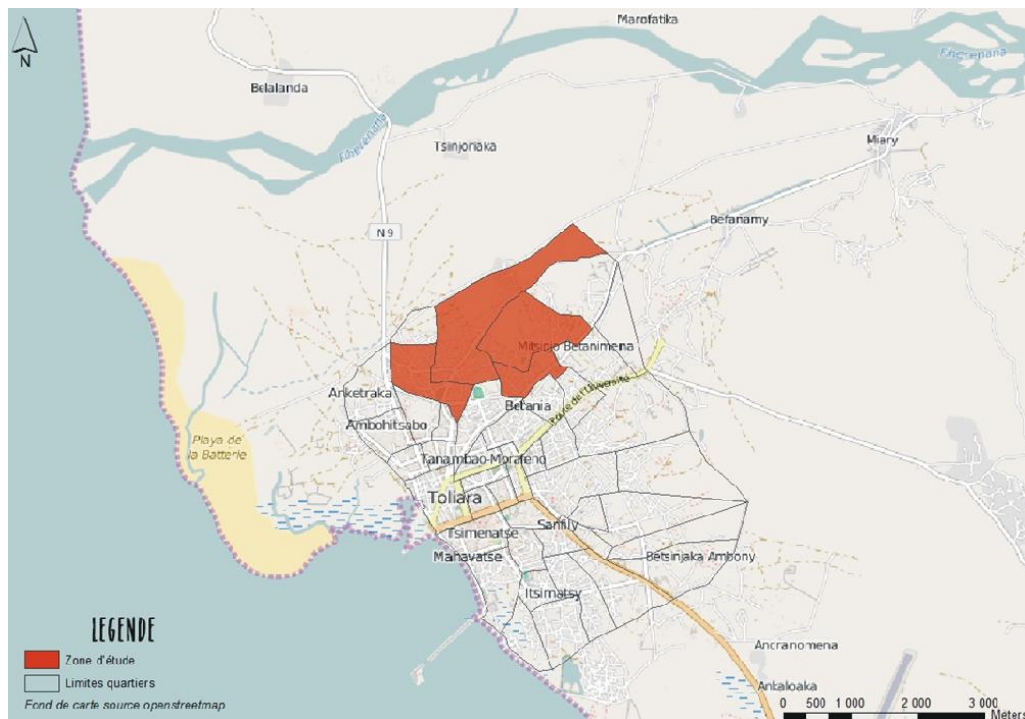


Figure 2 : Toliara quartiers.

ANALYSE DE L'ALEA

La caractérisation de l'aléa inondation s'appuie ordinairement sur la définition des limites des zones inondables et de différents niveaux d'aléa (quatre degrés en général, de faible à très fort) selon la profondeur de submersion (inférieure à 1 mètre, entre 1 mètre et 2 mètres et supérieure à 2 mètres) et la vitesse du courant (nulle, faible, moyenne, marquée). Dans notre cas, ces données sont inconnues ou très incomplètes. En effet, le fonctionnement hydrologique du fleuve Fiherenana, à l'origine des inondations à Toliara, est très mal connu. Les données hydrométriques sont extrêmement lacunaires et ne permettent donc pas de caractériser l'aléa en cause dans les inondations récurrentes. Nous avons donc défini les zones inondables à partir de l'évènement repère qui est l'inondation catastrophique de février 2013 associée au passage du cyclone Haruna. Dans le cadre de la charte internationale « espace et catastrophes naturelles », une image Spot 5 du 26 février 2013 fournie par le CNES (station Seas-Oi de la Réunion) a été traitée par le SERTIT (2013), fournissant notamment une cartographie des zones inondées pour la gestion de crise dès le 27 février. Cependant, il s'agit là des surfaces inondées trois jours après l'évènement. Les eaux s'étant alors déjà en partie retirées à cette date, ces surfaces sont très probablement incomplètes. Nous avons donc préféré calculer la hauteur d'eau potentielle à partir d'un modèle numérique de terrain (Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de 30m) en effectuant des simulations d'écoulements basées sur le SIG et sur les systèmes multi-agents selon une méthodologie développée sur d'autres sites (RAKOTOARISOA *et al.*, 2014a et b) sous Gama et NetLogo. Après avoir assigné un niveau d'élévation de la rivière, on a simulé l'écoulement avec un déplacement topographique d'agents « eau » transmettant à chaque fois les hauteurs d'eau dans les cellules de la grille créée pour la simulation. L'eau se déplace selon la topographie en suivant le sens de la plus grande pente hydraulique. La simulation se fait par une succession d'itérations pour lesquelles le pas de temps est fixé à 30 secondes, défini de manière à ce que la distance de déplacement pendant une itération d'un agent « eau », ne dépasse pas la dimension d'une cellule. A la fin de la durée de la simulation, qui est d'environ 1 heure et 40 minutes, soit 200 cycles, correspondant à un évènement catastrophique brusque et rapide typique de notre zone d'étude, les cellules contiennent une certaine hauteur d'eau qui peut être mesurée.

La comparaison entre les résultats de cette simulation et la cartographie réalisée par le SERTIT à partir des images Spot 5, montre une nette sous-estimation de cette dernière.

Cette approche de l'aléa reste incomplète. Une modélisation du débit et de la vitesse du courant est en cours à partir des critères de la rugosité de surface et de la pente. Cependant, cette approche nous a permis de localiser toutes les maisons potentiellement situées en zones inondables, donnée utilisée par la suite dans l'analyse de la vulnérabilité.

ANALYSE DE LA VULNERABILITE

Les mesures quantitatives de l'exposition des éléments aux inondations s'appuient sur la création d'un indice de vulnérabilité à partir de plusieurs critères statiques selon une méthodologie développée par CREACH *et al.* (2015).

Le premier critère correspond à la hauteur d'eau potentielle calculée précédemment. Le principe est qu'au delà de 0,50 m, les véhicules terrestres ne sont plus utilisables, perturbant les secours et l'évacuation, au delà de 1 m, une personne en bonne santé ne peut plus se déplacer normalement (MEDDTL *et al.*, 2011) et au delà de 2 m, les gens peuvent être piégés dans les constructions (VINET *et al.*, 2012). Le deuxième critère est la distance aux ouvrages de protection en raison de l'effet de surprise que peut engendrer une rupture soudaine de la digue et du sentiment de fausse sécurité que donne la proximité à un ouvrage. Le troisième critère est la distance aux zones de refuges qui prend en compte la distance que doit parcourir un occupant pour arriver dans une zone non inondée (maximum 200 m). Le quatrième critère correspond à la typologie des habitations basée sur leur solidité (maison en roseau, maison en bois, maison en dur et maison à étage). Un score est affecté à chacun des éléments de chaque critère selon le degré de vulnérabilité qu'il génère.

Cet indice est cartographié à l'échelle des habitations préalablement digitalisées à partir d'images Google Earth. Pour chaque maison, on somme les scores des différents critères de vulnérabilité pour obtenir un indice de vulnérabilité.

Une deuxième approche a été menée en parallèle à partir d'une enquête par questionnaire pour compléter ces premiers facteurs géographiques (hauteur d'eau à partir de la topographie, urbanisation, distance aux refuges et ouvrage de « protection »), notamment concernant la récurrence des inondations, et structurels techniques ou physiques (liés au bâti et aux matériaux exposés). Les nouveaux facteurs structurels permanents de la vulnérabilité identifiés sont basés sur des données socio-démographiques et économiques, socio-culturelles et institutionnelles et politico-administratives. En effet, les mesures qualitatives de la capacité de réponse des individus ou des groupes exposés aux sinistres sont également indispensables, car le risque est un construit social qui renvoie aux modes de vie des sociétés et à leur rapport avec leur environnement. Il est donc nécessaire d'appréhender les caractéristiques globales de la population concernée, mais également leurs représentations et perceptions des risques, c'est-à-dire la dimension sociale des risques.

Pour cela, nous avons mis en œuvre une enquête réalisée dans les quatre quartiers du nord de la ville de Toliara, inondés en 2013, sur la base d'un échantillonnage aléatoire stratifié permettant de sélectionner le même nombre de maisons pour chacun des quatre types architecturaux identifiés. Au final, c'est 10% de l'ensemble des maisons de ces quatre quartiers qui a été enquêté, soit 350 maisons.

Le questionnaire vise à compléter les facteurs géographiques et conjoncturels avec la hauteur d'eau subie au dernier événement et la récurrence de l'événement. Il permet de cerner également les facteurs structurels permanents avec les facteurs physiques techniques et fonctionnels en vérifiant la typologie des constructions définie préalablement par interprétation des images Google earth et en identifiant les systèmes d'alertes. Ces facteurs structurels permanents incluent aussi les facteurs socio-démographiques avec le niveau de scolarisation du chef de famille, les ressources et activités professionnelles et le capital santé, ainsi que des facteurs socio-culturels avec la connaissance du risque, la connaissance des actes à faire en cas d'événement, la prévention mise en place par les particuliers sur leur habitation et la capacité à agir lors du dernier événement. Enfin, on s'est également intéressé aux facteurs institutionnels et politico-administratifs avec l'importance de l'aide reçue. Des informations ont aussi pu être glanées lorsque des discussions ouvertes se sont engagées avec les enquêtés.

A partir des réponses à cette enquête a été calculé un indice de vulnérabilité synthétique sommant trois indices thématiques. Le premier indice « biophysique » s'appuie sur les facteurs géographiques et conjoncturels ainsi que des facteurs physiques techniques et fonctionnels qui représentent bien les dimensions que sont l'exposition, la sensibilité et la résistance au risque (ADGER 2006). Cet indice permet d'évaluer quantitativement les dommages matériels mais également la capacité de résistance. Deux autres indices ont été calculés pour mettre en évidence la vulnérabilité sociale. Le premier de « capacité d'action » s'intéresse au comportement des individus lors de la catastrophe et le deuxième de « résilience » à la capacité du système à se reconstruire après. Pour cela, les réponses ont tout d'abord été recodées de manière à ce qu'elles aient une valeur forte lorsqu'elles expriment une forte vulnérabilité et inversement. Ensuite, ces différentes variables intégrées dans les 3 indices ont été pondérées selon leur influence sur la vulnérabilité matérielle en les corrélant par régression linéaire avec une variable endogène expliquée qui correspond aux dégâts subis lors de la dernière inondation.

La vulnérabilité biophysique étant obtenue pour les maisons enquêtées, la donnée a été spatialisée à l'échelle de toute la zone d'étude en affectant la moyenne de l'indice de toutes les maisons contenues dans les cellules de 50m de côté (permettant de leur faire contenir 5 à 10 maisons) d'une grille appliquée sur l'ensemble de la zone.

RESULTATS

Il ressort des enquêtes que 90% des personnes interrogées ont déjà subi une inondation avec des dégâts importants dans 66% des cas (12% avec incident grave, 26% avec accident grave et 28% avec accident majeur). C'est l'inondation de 2013 qui a touché le plus de personnes (environ 80%), la deuxième inondation citée étant celle de 1978 (environ 40%) associée au cyclone Angèle. Le troisième événement cité est l'inondation liée au cyclone Gafilo de 2004. Plus de 50% des personnes ont été inondées au moins deux fois.

L'indice « biophysique » de vulnérabilité matérielle classé en 4 classes faible, moyen, fort et critique, indique, à l'échelle des quatre quartiers enquêtés, que 43% des maisons présentent une

vulnérabilité matérielle critique et 42% une vulnérabilité forte. Cette vulnérabilité matérielle est avant tout liée aux hauteurs d'eau subies. En effet, lors de ces inondations, plus de la moitié du panel enquêté a subi des hauteurs d'eau égales ou supérieures à 1 mètre, seuil marquant la limite de déplacement debout d'un adulte sportif stressé (DDT Vaucluse, 2014) (et plus de 60% ont subi plus de 75 cm d'eau). Le poids, moins marqué, du type de maison et du nombre de dates d'inondation subies jouent à part égale.

Le deuxième indice de « capacité d'action » indique que plus de 80% des personnes ont une faible capacité d'action pour réduire leur vulnérabilité. Pourtant, paradoxalement, 90% des habitants interrogés savent que leur maison est en zone inondable et le savaient à priori avant l'inondation. Cependant, 55% des personnes n'étaient pas informées de l'imminence de l'inondation avant d'en être victimes. Les personnes informées l'ont été par d'autres personnes ou par la radio, car il n'existe pas de système d'alerte de type sirène à Toliara. Si plus de 80% des personnes interrogées estiment avoir su agir de manière adéquate lors du dernier événement, le fait de ne pas avoir été alertés à temps ne leur a pas permis de mettre leurs biens à l'abri. Par ailleurs, il n'est pas certain que ce qu'ils estiment être les bons actes à faire, le soient réellement.

Le croisement de cette variable « connaissance du risque » avec la variable « dégâts subis » montre que cette connaissance, comme d'ailleurs le capital scolaire, à priori corrélé à la compréhension du risque et la capacité d'action, et le capital santé, influencent peu la capacité à réduire la vulnérabilité. Au contraire, la connaissance des actes à faire, dont l'influence globale reste cependant très faible, semble être finalement contreproductive. Les personnes pensent savoir ce qu'il faut faire, mais si ces actions ne sont pas pertinentes, elles accroissent alors au contraire leur vulnérabilité.

L'indice de résilience combinant les variables « aide reçue », « profession du chef de foyer » et « occupation du chef de foyer » pour évaluer la catégorie sociale et les revenus, montre que tous les foyers interrogés sont dans une situation critique de très faible résilience. Dans un contexte de pauvreté générale (32% des foyers sont de catégorie sociale « faible », 20% « moyennement faible » et 25% « moyenne », sachant que cette classification a été définie en croisant les variables « profession », « occupation du chef de foyer » et « type d'habitat », et que la catégorie sociale « élevée » reste modeste au regard des standards européens), les ressources propres sont insuffisantes la plupart du temps pour se reconstruire et cette résilience dépend avant tout de l'aide reçue. Or, 55% des foyers n'ont reçu aucune aide après la dernière inondation. Ceux qui en ont reçus ont dû se contenter pour 40% de premiers secours. Seuls 4% ont reçu des dons de matériaux pour reconstruire leur maison.

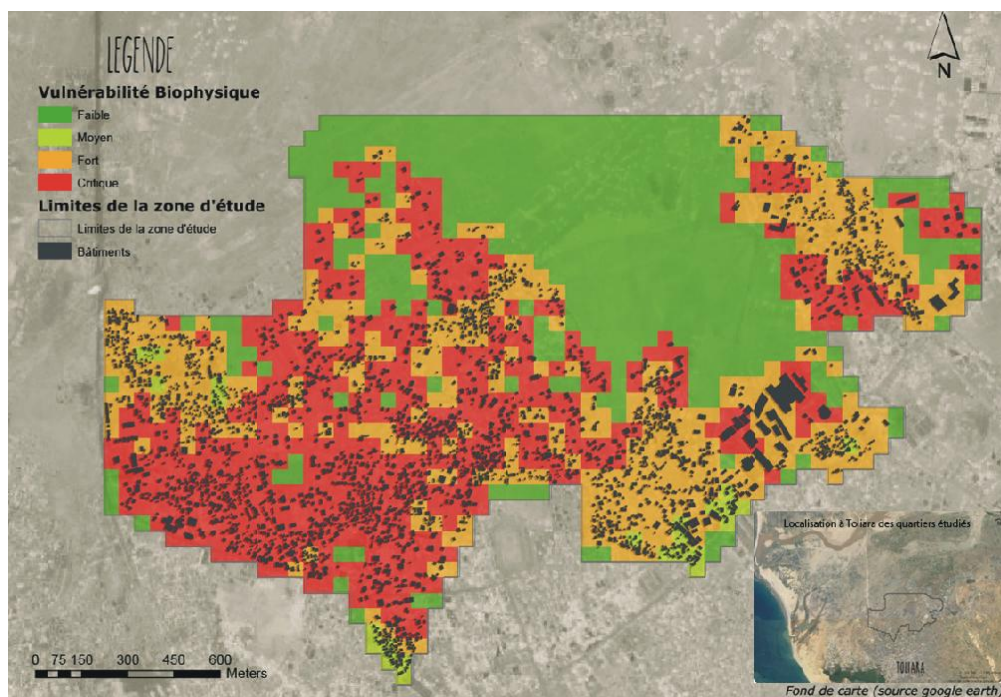


Figure 3 : Toliara – Vulnérabilité biophysique.

La spatialisation de l'indice de vulnérabilité à l'échelle de l'ensemble des quatre quartiers (figure 3) montre que la quasi-totalité des zones bâties sont classées en vulnérabilité forte et critique. Seules, quelques petites zones au sud se classent en vulnérabilité moyenne. Les zones apparaissant en faible vulnérabilité sont celles où il n'y a pas de bâti. Cependant, il s'agit de zones agricoles qui subissent également des dégâts lors des inondations, expliquant que nous ne les ayons pas exclues de la cartographie.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Les résultats présentés ici restent encore très imparfaits et ce travail est encore en cours. Tout d'abord, ils sont très insuffisants en ce qui concerne l'analyse de l'aléa. En effet, les stations hydrométriques du fleuve Fiherenana ne fournissent que des données très lacunaires difficilement exploitables, et la modélisation que nous avons réalisée pour reconstituer les hauteurs d'eau pendant l'inondation doit encore être confrontée aux hauteurs d'eau réelles collectées lors de l'enquête pour chaque maison, avec le risque d'erreur liée à la subjectivité des enquêtés. Or, toute étude complète de risque doit intégrer l'aléa et la vulnérabilité « sous peine de n'identifier qu'une seule des deux composantes qui qualifient une situation de risque » (GILARD & GENDREAU 1998).

D'autre part, la vulnérabilité identifiée ici concerne un évènement particulier et n'est pas applicable à toutes les inondations qui peuvent prendre des formes très différentes, selon la nature de l'aléa climatique à l'origine de l'inondation, mais aussi selon qu'il y ait ou non rupture de la digue rive gauche du Fiherenana, censée protéger la ville, et selon le lieu où elle se produit.

Il reste également à intégrer les deux approches menées ici en parallèle, chacune apportant une partie des éléments d'identification de la vulnérabilité aux inondations. Des données doivent encore être intégrées pour affiner les résultats. Ainsi la densité de population n'est pas prise en compte alors que la moyenne des ménages est de 6.36 habitants par foyer. Le raisonnement actuel se base sur un habitant par maison.

Cependant, si cet indice de vulnérabilité ne permet pas de mesurer la vulnérabilité future lors d'un prochain évènement, il permet d'en comprendre les facteurs généraux. Il fournit alors de précieuses indications sur les lacunes principales dans la gestion du risque et donne des orientations pour les actions de prévention, d'alerte et de suivi post-crise. Il sera possible de proposer des plans de gestion de crise en intégrant par exemple les zones refuges identifiées, en positionnant des systèmes d'alerte par sirène, en impulsant des informations préventives ciblées (par les écoles ?).

Il faut cependant rester attentif qu'une approche trop « techniciste » risque de ne pas répondre aux réels besoins et ignorer les perceptions et représentations de la population. Ainsi, même si la très grande majorité des habitants est consciente du risque et de sa gravité, il faut également prendre en compte le caractère souvent assez fataliste vis-à-vis de ce risque qui est « de la volonté de Dieu » selon la plupart. La dimension économique du problème relativise également toutes les solutions clés en main qui pourraient être proposées. Parce que la pauvreté d'un grand nombre d'habitants, dans un contexte d'absence ou insuffisance d'aide, ne leur permet pas de réduire efficacement leur vulnérabilité, même en ayant connaissance des actes à réaliser pour cela.

La focalisation des actions et efforts financiers sur la digue de protection en rive droite du Fiherenana est par contre un élément à repenser totalement. Tout d'abord, le pillage systématique des blocs rocheux la constituant est à l'origine de la plupart de ses ruptures, et en raison de l'effet de fausse sécurité qu'elle procure aux habitants, augmentant beaucoup leur vulnérabilité.

Une autre méthode est actuellement en cours de développement pour pallier certaines de ces limites à travers plusieurs simulations comparant divers scénarios d'inondation et de comportement des individus. La vulnérabilité de la maison ne se mesure pas à partir de la vulnérabilité du bâtiment lui-même, mais à partir de la probabilité de survie des habitants lors d'une inondation. Le comportement individuel des villageois soumis aux règles collectives et aux mesures qui ont été prises par l'Etat, permet de mettre en évidence la vulnérabilité de chaque village à l'échelle des habitations. Deux étapes successives permettront de simuler la montée des eaux et l'écoulement selon des fonctions hydrologiques classiques (fonction de transfert et fonction de production) dans un cadre de modélisation multi-agents, puis de simuler le comportement des personnes face à l'aléa. Cette méthode permettra d'évaluer la vulnérabilité physique des individus et pas seulement matérielle comme jusqu'à présent. En effet, à la fin d'une simulation, on réévalue le degré de vulnérabilité de

chaque habitation en fonction du devenir de son occupant ; s'il a réussi à se sauver et se retrouve en zone non inondée ; s'il se retrouve pris dans l'eau mais est encore vivant, ou si le villageois est décédé.

REMERCIEMENTS

Une partie de ce travail a été financée par une bourse du collègue doctoral RAMI dans le cadre du Programme « Horizon francophone » de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Bureau Océan Indien.

L'enquête terrain à Toliara a pu être réalisée grâce à un financement de l'Agence Universitaire de la Francophonie, Bureau Europe de l'Ouest pour une bourse de stage de 4 mois. La passation de l'enquête a été faite avec l'aide de nombreux étudiants de l'Université de Toliara.

BIBLIOGRAPHIE

- ADGER, W.N., 2006. « Vulnerability. » *Global Environmental Change, Resilience, Vulnerability, and Adaptation: A Cross-Cutting Theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change*, 16, (3): 268-81. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- CREACH, A., PARDO, S., GUILLOTREAU, P. & MERCIER D., 2015. The use of a micro-scale Index to identify potential death risk areas due to coastal flood surges: lessons from Xynthia on the French atlantic coast. *Natural Hazards*, mars, 1-3.
- DAUPHINE, A., 2003. Risques et catastrophes: observer, spatialiser, comprendre, gérer. Paris: A. Colin. 288 p.
- Direction Départementale des Territoires de Vaucluse, 2014. Plan de prévention des risques naturels d'inondation de la Durance. http://www.vaucluse.gouv.fr/IMG/pdf/PPRIDur_RP_84_Appro_VF_-_Copie_cle76117f.pdf
- D'ERCOLE, R., 1991. Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Equateur). Thèse de doctorat, Université J. Fourier. 460 p.
- GILARD, O. & GENDREAU, N., 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. *Revue des sciences de l'eau*, 11, (3): 429-444.
- GUYARD, S. 2014. Utilisation de la haute résolution spatiale pour la caractérisation de la tache urbaine et la gestion du risque inondation sur la ville de Toliara. Pleiades days, 1-3 avril 2014, Toulouse, France. http://espace-ftp.cborg.info/pleiades_days/abstracts2014/RO8_Guyard.pdf
- MEDDTL, MIOMCTI, MEFI & MBCPFPRE., 2011. Plan submersions rapides – Submersions marines, crues soudaines et ruptures de digues. Plan interministériel coordonné par le MEDDTL, 80 p.
- PROVITOLLO, D., 2007. Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Annales de géographie*, 653 : 23-40.
- RABEFITIA, Z., RANDRIAMAROLAZA, L.Y.A, RAKOTONDRAFARA, M.L., TADROSS, M. & YIP, Z.K. 2008. Le changement climatique à Madagascar, Direction Générale de la Météorologie, Antananarivo, 32 p.
- RAKOTOARISOA, M., FLEURANT, C., AMIOT, A., BALLOUCHE, A., COMMUNAL, P.Y., JADAS-HECART, A., LA JEUNESSE, I., LANDRY, D. & RAZAKAMANANA, T., 2014a. Agents-based modelling for hydrological surface processes on a small watershed (Layon, France). *Revue internationale de Géomatique*, 24, (3) : 307-333.
- RAKOTOARISOA, M., FLEURANT, C., RANDRIAMAHERISOA, A. & RAZAKAMANANA, T., 2014b. Mise en œuvre d'un modèle hydrologique conceptuel sur le bassin versant de Sisaony, Région Analamanga, Madagascar. *Madamines*, 6 : 22-37.
- SERTIT. 2013. CHARTE CALL 434 - MADAGASCAR - Toliara, Morombe et Sakaraha. Cyclone Haruna. <http://sertit.u-strasbg.fr/RMS/action.php?id=516752189>
- THOURET, J-C. & D'ERCOLE, R., 1996. Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cahiers des sciences humaines. ORSTOM*. 32 (2) : 407-422.
- VINET, F., DEFOSSEZ, S., REY T. & BOISSIER, L., 2012. Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia ». *Norwis*, 222 : 11-26.