



HAL
open science

Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar)

Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Aude Nuscia Taïbi, Mathias Rouan, Sébastien Caillault, Théodore Razakamanana, Aziz Ballouche

► To cite this version:

Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Aude Nuscia Taïbi, Mathias Rouan, Sébastien Caillault, et al.. Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar). *Cybergeo: Revue européenne de géographie / European journal of geography*, 2018, 857, pp.1-30. 10.4000/cybergeo.29144 . hal-01807637

HAL Id: hal-01807637

<https://hal.science/hal-01807637>

Submitted on 15 Mar 2019

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.



Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar)

*Assessing vulnerability to flooding using a multi-agent model: case of the
villages around Fiherenana river (Madagascar)*

**Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Aude Nuscia Taibi, Mathias
Rouan, Sébastien Caillault, Théodore Razakamanana et Aziz Ballouche**



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29144>

DOI : 10.4000/cybergeo.29144

ISSN : 1278-3366

Éditeur

UMR 8504 Géographie-cités

Ce document vous est offert par INRA Institut National de la Recherche Agronomique



Référence électronique

Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Aude Nuscia Taibi, Mathias Rouan, Sébastien Caillault, Théodore Razakamanana et Aziz Ballouche, « Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar) », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], GeOpenMod - Modèles et logiciels, document 857, mis en ligne le 31 mai 2018, consulté le 15 mars 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29144> ; DOI : 10.4000/cybergeo.29144

Ce document a été généré automatiquement le 15 mars 2019.

© CNRS-UMR Géographie-cités 8504

Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar)

Assessing vulnerability to flooding using a multi-agent model: case of the villages around Fiherenana river (Madagascar)

Mahefa Mamy Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Aude Nuscia Taibi, Mathias Rouan, Sebastien Caillaut, Théodore Razakamanana et Aziz Ballouche

Les travaux de recherche présentés dans cet article ont été soutenus par le Collège Doctoral RAMI du programme "Horizons Francophones" de l'AUF (Agence Universitaire de la Francophonie) et par la région Pays de la Loire.

Introduction

- 1 Une « catastrophe » correspond à un événement effectif qui peut être nommé, daté et caractérisé par une intensité. En revanche, on parle, plutôt de « risques » pour désigner la potentialité ou la probabilité d'occurrence de ces phénomènes (Tobin, 1997 ; Dauphiné, 2003 ; Richemond et al., 2004 ; Léone et al., 2010). La catastrophe est donc de l'ordre du réel et le risque de l'ordre du probable. En ce qui concerne les phénomènes naturels tels que les inondations, le risque est souvent défini comme la « conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable » (Bourrelier, 1997, p. 22). C'est cette vision du risque qui a fait naître des systèmes de réglementation qui visent notamment à contrôler l'urbanisation des zones à risques, comme par exemple les plans de préventions de risques (PPR) en France.

- 2 La partie qui nous intéresse ici est la vulnérabilité, une notion qui prend des formes différentes dans le temps et l'espace. Elle peut représenter les dégâts purement matériels ou caractériser le vécu des populations (Scarwell et Laganier, 2004). A. Dauphiné, (2003) a établi plusieurs types de vulnérabilités selon leurs caractéristiques et la manière dont on les aborde. On parle notamment de la vulnérabilité biophysique qui exprime essentiellement les dommages matériels engendrés par l'aléa. Mais il y a aussi la vulnérabilité sociale qui représente la capacité à anticiper l'aléa et à y faire face c'est-à-dire, la manière dont le système réagit face à la catastrophe (Wisner, 2004). Son analyse peut être complètement dissociée de l'aléa surtout dans le cas où l'on n'a pas de certitudes sur ce dernier. Cette vulnérabilité peut alors être considérée de manière individuelle ou de manière collective. C'est le cas par exemple lors de l'utilisation de la courbe de Farmer, qui divise le risque en trois catégories : le risque individuel, le risque moyen ou le risque collectif (Glatron, 1999 ; Pigeon, 2012). On peut aussi aborder l'aspect spatial du phénomène. On parle alors de vulnérabilité territoriale qui concerne surtout l'identification des espaces dommageables et des lieux stratégiques (Cutter, et al., 2000 ; Demoraes, 2004).
- 3 La vulnérabilité peut donc apparaître comme un concept flou et difficile à mesurer, alors qu'elle constitue un enjeu fondamental pour la gestion des risques. C'est pourquoi on peut néanmoins essayer de classer les techniques classiquement utilisées pour l'évaluation de la vulnérabilité. En pratique, on observe deux types d'approches : l'approche rétrospective qui vise à prendre des mesures postérieures à l'évènement perturbateur, et l'approche prospective qui se base sur des scénarios possibles. La première approche consiste en la traduction de toutes les données en termes de pertes monétaires ou humaines. Elle s'apparente aux méthodes comptables souvent utilisées par les compagnies d'assurance. Dans cet article, on s'intéresse plutôt à la deuxième approche qui concerne l'aspect prospectif de la vulnérabilité. En effet la plupart des définitions de la vulnérabilité (Ionescu et al., 2009 ; Wolf et al., 2013) acceptent l'idée que la vulnérabilité est une mesure « d'une possibilité d'occurrence d'un dommage futur » (Hinkel, 2011, p. 199). Cette mesure se réfère aux dommages que le système aurait subis. Les « mesures de dommages » les plus communément utilisées sont le nombre de personnes affectées par les inondations ou encore la mortalité de l'évènement. Le fait qu'il s'agisse d'une possibilité « future » et non d'un état actuel est très important dans la définition de la vulnérabilité. Ce « futur » peut se réaliser, mais il peut aussi ne pas se réaliser.

Contexte de l'étude

- 4 Le Sud Ouest de Madagascar est l'une des régions les plus concernées par les catastrophes naturelles, tout particulièrement par les inondations. Ces dernières décennies, de nombreux cyclones ont ravagé cette zone causant d'importants dégâts. La ville de Toliara, capitale stratégique de la région (voir localisation dans la partie application du modèle : figure 6), se trouve confrontée presque chaque année à des inondations rapides et dévastatrices dont la principale cause est le débordement du fleuve Fiherenana, la ville se trouvant exactement à l'exutoire du bassin versant de ce fleuve. Ce cours d'eau, qui prend sa source dans le massif de l'Isalo, traverse la vallée du plateau calcaire, puis draine la plaine de Toliara pour se déverser dans le canal de Mozambique. L'occurrence des inondations est parfois accrue par la rupture des ouvrages de protection. En effet, la principale protection de la ville de Toliara est une digue située en rive gauche du fleuve

au nord de la ville, qui se rompt fréquemment notamment lors de cyclones. Cela a été le cas en février 2013 lors du passage du cyclone Haruna, accompagné de pluies torrentielles. Une grande partie de la ville, ainsi que la plupart des villages aux alentours, ont été gravement touchés avec de multiples dommages matériels et humains. Les impacts pour les centaines de familles qui vivent chaque année ces phénomènes d'inondation sont plus ou moins fréquents et importants. Les réponses apportées à chaque évènement restent insuffisantes, la plupart des efforts financiers des structures en charge de la gestion de ce risque étant portée sur la digue. Dans ce contexte, et face à la difficulté d'intervenir sur l'aléa lui-même, on se propose d'intervenir sur la vulnérabilité de ces ménages face aux intempéries liées aux inondations, en mettant en œuvre une méthodologie pour l'évaluer.

Peut-on mesurer la vulnérabilité ?

- 5 Mesurer est le processus qui vise à assigner une valeur à un phénomène. Plus précisément, il s'agit d'évaluer une distance par rapport à un référentiel. De plus, cela implique aussi la mise en place d'une unité de mesure adéquate. Un phénomène se définit comme quelque chose qu'on peut observer (par exemple, le phénomène "chaleur" peut être mesuré en associant une valeur nommée « température »). Le fait de mesurer met en situation des entités quantitatives appelées des variables (Bernard, 2013). Ces variables peuvent être alors comparées dans le temps et dans l'espace. Cette notion de comparaison est la clé dans l'évaluation de la vulnérabilité (Barnett et al., 2008 ; Ionescu et al., 2009 ; Wolf et al., 2013). Mais la vulnérabilité peut-elle être mesurée ? En principe non, puisque la vulnérabilité n'est pas un phénomène observable, mais un concept théorique (contrairement à la chaleur par exemple). Cette distinction entre concept théorique et observable a fait l'objet de beaucoup de débats (Carnap, 2012). Comme la vulnérabilité est un concept théorique, on parle donc plutôt de « rendre le concept opérationnel » plutôt que de le mesurer. Rendre le concept opérationnel consiste à fournir une méthode pour le rendre observable (Bernard, 2013 ; Copi et al., 2011). Dans le cas de la vulnérabilité, cette opération peut être appelée "méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité". Diverses méthodes existent pour cela, mais la plus utilisée est l'indicateur de vulnérabilité. Cette approche se propose de classer la vulnérabilité en plusieurs niveaux (par exemple : faible, moyen, fort). Elle identifie des facteurs pertinents auxquels on affecte un coefficient. Une synthèse de vulnérabilité est alors faite à travers le croisement des valeurs des différents coefficients afin d'aboutir à un indicateur synthétique. Et selon les seuils choisis, on pourra classer le niveau de vulnérabilité suivant cet indicateur. On parle alors de vulnérabilité synthétique souvent combinée avec le SIG pour une approche statique (Creach et al., 2015 ; Léone et al., 2010 ; Propeck-Zimmerman et al., 2009). Cette approche indiciaire est très pratique car les méthodes sont immédiatement opérationnelles et offrent une connaissance des risques simple et facile à interpréter pour l'aide à la décision (pour les élus par exemple). Toutefois, elle présente des inconvénients majeurs car elle fournit par exemple des résultats empiriques souvent subordonnés aux pondérations où les seuils sont généralement arbitraires (Rufat, 2007).

L'aspect prospectif d'un indicateur de vulnérabilité - vers le lien avec les modèles de simulation ?

- 6 La première étape dans le développement d'un indicateur de vulnérabilité est la définition de ce qui doit être « indiqué » par l'indicateur. Dans notre cas, il s'agit de la vulnérabilité aux inondations fluviales. La deuxième étape correspond à la sélection des variables indicatrices et peut être suivie par l'agrégation de ces variables. La troisième étape est la définition de la fonction d'indication, qui va traduire la variable observable en une variable théorique.
- 7 Le souci majeur avec les indicateurs classiques, que l'on pourrait considérer comme des indicateurs statiques, concerne la considération de l'aspect prospectif de la vulnérabilité. La plupart des indicateurs existants ne prennent pas en compte cet aspect. La vulnérabilité intègre dans sa définition une possibilité d'occurrence. Selon son degré de vulnérabilité, une entité a plus ou moins de chance d'être endommagée. Il s'agit donc d'un état qui pourrait se produire ou non dans le futur (Ionescu et al., 2009). L'indicateur doit donc indiquer une potentialité au lieu d'indiquer l'état actuel ou la référence à un événement passé. En tenant compte de cette réflexion, il faudrait donc distinguer « indicateur d'endommagement » et « indicateur de vulnérabilité ». Un indicateur d'endommagement évalue l'état d'une entité en se basant sur une définition objective de ce que peut être un « bon » état ou un « mauvais » état tandis qu'un indicateur de vulnérabilité se doit de représenter une possibilité d'endommagements.
- 8 À cause de cet aspect prospectif de la vulnérabilité, le développement d'un indicateur de vulnérabilité pourrait inclure la construction d'un modèle de prédiction. Il s'agit là d'une tâche classiquement attribuée aux modèles de simulation. Dans les deux cas – indicateur de vulnérabilité ou modèle de prédiction - on développe une fonction basée sur l'observation de l'état présent. Cette fonction sera utilisée pour évaluer un état futur qui possède une certaine probabilité d'occurrence. L'intérêt de l'intégration d'un outil de simulation dans un indicateur de vulnérabilité est qu'il ajoute une nouvelle dimension à la méthode sans altérer son caractère simple et directement opérationnel. Dans cet article, la fonction utilisée pour rendre la variable théorique « vulnérabilité » opérationnelle sera donc une simulation multi-agents pour évaluer le degré de vulnérabilité des entités concernées (villages, habitations, villageois). Elle prend en compte le paramètre temps dans le sens où il s'agit d'un programme informatique qui représente un système dynamique itéré au fil du temps.

Démarche proposée pour évaluer la vulnérabilité aux inondations dans les villages au Sud Ouest de Madagascar

- 9 Dans un contexte plus global, le but de ce travail est donc d'aboutir à une méthodologie pour la caractérisation de la vulnérabilité aux inondations en couplant un indicateur statique, déjà validé dans d'autres régions (Creach et al., 2015), avec un modèle de simulation utilisant les systèmes multi-agents (Rakotoarisoa et al., 2014). Cet article présentera essentiellement l'approche qui utilise les simulations multi-agents. L'idée de base ici est d'utiliser les occurrences retrouvées lors de simulations répétées afin d'estimer la vulnérabilité des individus à l'échelle de leurs habitations. Une fois le modèle mis en œuvre, c'est-à-dire une fois qu'on a pu y intégrer tous les phénomènes jugés

primordiaux, on explore plusieurs scénarios différents. Certains scénarios sont moins catastrophiques que d'autres. Ce sont les résultats de ces scénarios qui vont être combinés afin d'évaluer la vulnérabilité des villageois à l'échelle de leurs habitations.

- 10 Nous présenterons donc d'abord ici la description du modèle multi-agent suivant la structure ODD (Grimm et al., 2006) et puis une application à la région du Sud Ouest de Madagascar sera montrée et commentée suivant différents scénarios.

Description du modèle suivant le protocole ODD

- 11 Nous avons utilisé la plate-forme GAMA 1.6.1 (GIS and Agent-based Modelling Architecture) pour le développement du présent modèle. Son implémentation est en Java, mais elle propose aussi le langage GAML (Grignard et al., 2013) pour l'élaboration des modèles. Il s'agit d'une plate-forme libre qui vise à appuyer la conception de modèles spatialisés, de multiples paradigmes et de multiples échelles. En particulier, GAMA est très efficace pour la gestion de données issues du SIG, pour la modélisation multi-niveaux et également pour la visualisation 3D.

Vue d'ensemble

Objectifs

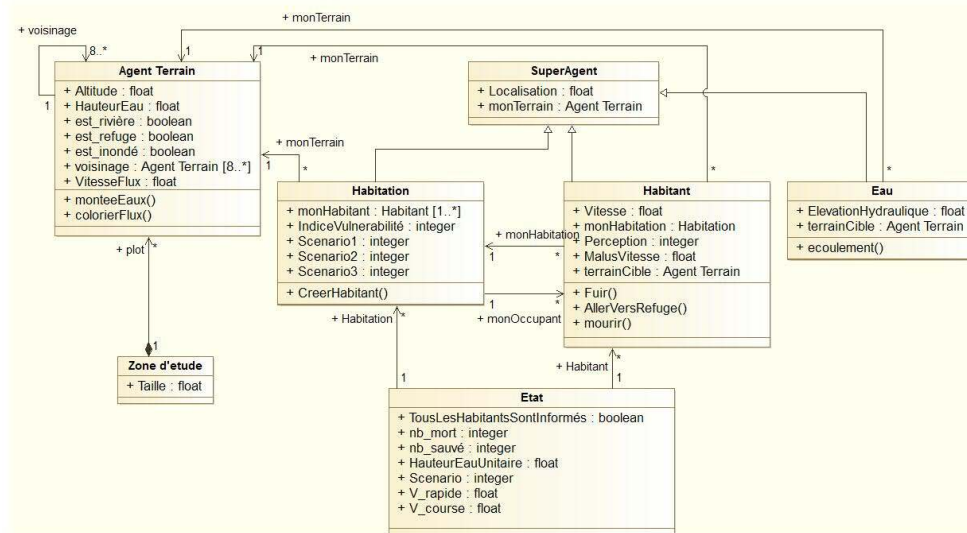
- 12 Les questions auxquelles le modèle se propose de répondre concernent la vulnérabilité par rapport à un aléa particulier : l'inondation. Il s'agit de savoir quels sont les impacts des inondations sur les villages, les villageois et leurs habitations, d'évaluer la vulnérabilité des habitations et des habitants par rapport à l'emplacement de leurs maisons, et les effets que pourraient produire l'information et la sensibilisation des habitants par l'État, notamment concernant le développement d'une culture du risque.
- 13 Pour cela, le modèle se propose de simuler un évènement fictif d'inondation catastrophique. À travers plusieurs scénarios, on pourra évaluer le degré de vulnérabilité des villages concernés à l'échelle des habitations. Le modèle pourra au final fournir la cartographie d'un indicateur de vulnérabilité à une échelle fine.

Entités

- 14 Les entités qui interviennent dans le modèle sont des agents. Un agent se définit comme étant « une entité physique ou virtuelle agissant dans un environnement donné et dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit » (Ferber, 1995, p.13). Afin de formaliser la présentation des différents agents nous utilisons un diagramme de classe (Figure 1) issu du langage Unified Modeling Language (UML) qui propose une notation standard pour la modélisation des applications construites à base d'agents (Muller et Gaertner, 2000). Ainsi la zone d'étude est composée d'agents-terrain qu'on nomme aussi cellules et qui possèdent des caractéristiques topographiques et hydrologiques issues des données d'entrée, notamment d'un modèle numérique de terrain (MNT). Le modèle comporte aussi des villageois (habitants) qui se déplacent dans la zone en suivant certains comportements. Ces villageois possèdent des habitations. Le flux d'eau est caractérisé par

des agents hydrologiques qui se déplacent à une certaine vitesse dans une certaine direction. Et enfin, il existe un État dont les interventions vont influencer le comportement des agents.

Figure 1 : Diagramme de Classe.



Échelles spatiales et temporelles

L'espace

- 15 Les simulations se font dans un espace qui s'étend sur une surface incluant un village et une portion du fleuve supposée être à l'origine de l'inondation du village. Dans le cadre de notre application, on s'intéressera au village qui a été l'un des plus impactés lors d'un événement dévastateur en 2013, le village d'Ankoronga. Dans le modèle, on aura à gérer plusieurs topologies en même temps. La topologie est le mode d'implantation de l'entité spatiale. Ce mode d'implantation peut être associé à une grille, à un espace continu ou à un graphe. Ainsi, chaque agent peut agir et se déplacer dans son espace topologique tout en interagissant avec les autres agents qui ont aussi leur propre espace topologique. Pour les agents « terrain » (ou cellule), la topologie de base est une grille. Sa résolution dépend de celle du modèle numérique de terrain (MNT) qu'on utilisera pour les simulations. Dans le cas présent, le SRTM 90 (Shuttle Radar Topography Mission) a été utilisé. Un agent terrain a donc une dimension de 90 m x 90 m correspondant à la résolution du MNT SRTM. Certaines de ces cellules sont des zones de refuge, c'est-à-dire des zones considérées comme hors de danger et que la population s'empresse d'atteindre lors d'une inondation. La règle pour pouvoir considérer une cellule donnée comme zone de refuge s'appuie sur des enquêtes sur le terrain à partir desquelles on a pu définir quelle est la zone de fuite préférentielle des habitants. On a donc considéré un rectangle qui englobe complètement les zones considérées comme refuge selon le retour d'expérience. Toutes les cellules qui sont à l'intérieur du rectangle sont considérées comme des zones de refuges.
- 16 Les autres entités (villageois, eau, habitations) utilisent en revanche l'espace continu pour se déplacer et interagir. Un village est composé de plusieurs habitations (leur nombre varie de 50 à 2 000, suivant le village considéré) qui contiennent chacune un habitant en

début de simulation. Les emplacements exacts de toutes les constructions ont été intégrés à partir d'un SIG (Système d'Information Géographique). Il en est de même aussi pour l'emplacement du fleuve. Notons que dans cet article, l'application présentée ne concerne que le village d'Ankoronga.

Le temps

- 17 La simulation se fait par une succession d'itérations pour lesquelles le pas de temps est fixé à 30 secondes. Ce pas de temps est défini de manière à ce que la distance de déplacement pendant une itération d'un agent « eau », qu'on va nommer agent hydrologique, ne dépasse pas la dimension d'une cellule. En effet la vitesse moyenne d'un flux d'eau rapide variant autour de 1 ou 2 m/s, un agent hydrologique très rapide ne pourra se déplacer que d'environ 60 mètres en 30 secondes. Or la dimension de notre cellule est de 90 m. Le pas de temps de 30 secondes est donc acceptable. Si on utilise un MNT de résolution différente, le pas de temps peut être adapté en conséquence.
- 18 La durée simulée est d'une heure et 40 minutes, soit 200 cycles. Cette durée correspond à un évènement catastrophique brusque et rapide. Ce choix a été fait car il correspond le mieux aux caractéristiques des évènements types dans notre zone d'étude (voir partie : Application du modèle). Cette durée reste modifiable pour l'application à d'autres zones. La simulation se divise en deux phases, qui se distinguent par le comportement du flux d'eau :
 - 19 Une phase de « montée des eaux », qui dure 30 minutes (soit 60 cycles), comprend deux actions des agents hydrologiques : la création des agents hydrologiques au niveau des cellules du fleuve pour simuler la montée des eaux, et le déplacement de ces mêmes agents pour simuler l'écoulement.
 - 20 La deuxième phase sera « l'écoulement » durant laquelle la montée des eaux s'arrête mais l'écoulement continue. À partir de ce moment, il n'y aura plus de nouveaux agents hydrologiques créés au niveau du fleuve, mais les agents hydrologiques déjà sur le terrain vont continuer de se déplacer pour simuler l'écoulement. Pendant cette phase, il n'y aura donc plus qu'une seule action pour les agents hydrologiques.
 - 21 Pendant ces deux phases, les autres entités (villageois, habitations) continuent à agir en suivant leurs règles de comportement.

Processus et étapes

- 22 Au début de la simulation, l'eau monte et déborde du fleuve. La hauteur de cette élévation d'eau, caractéristique de l'aléa, peut être fixée par l'utilisateur du modèle. Dans le cas présent, c'est une montée d'eau de 0.5 m. Ainsi, à chaque itération de 30 secondes, un agent hydrologique sera créé sur chaque cellule « fleuve », et chaque agent portera une certaine quantité d'eau correspondant à la hauteur de 0.5 m. L'eau se déplace ensuite selon la topographie en suivant en suivant une règle qui dépend de la pente hydraulique. Les agents hydrologiques se déplacent dans l'espace continu en suivant la loi de Manning (1890) qui dépend de la pente, de la hauteur d'eau et de la rugosité du sol.
- 23 Dans un premier temps, seule l'eau se déplace. Dans un second temps, les villageois se déplaceront à leur tour en réaction à la montée des eaux. Ces villageois adoptent un certain comportement qui sera déterminé en fonction du scénario choisi, des informations qui leur ont été transmises ainsi que du niveau d'expérience qu'ils

possèdent en matière d'inondation. Leur perception de leur environnement influence leur comportement. Selon le scénario, une fois qu'ils auront choisi le type de comportement qu'ils vont adopter, ils pourront se déplacer en suivant certaines modalités données.

- 24 Selon leur position atteinte à la fin du pas de temps de 30 secondes, ces villageois peuvent être affaiblis (s'ils sont positionnés sur une cellule « en eau » mais non dangereuse), mourir (sur une cellule « en eau » dangereuse), ou être sauvés (sur une cellule « zone de refuge »). La dangerosité d'une cellule dépend des caractéristiques du flux d'eau observé sur cette cellule (hauteur d'eau et vitesse d'écoulement).
- 25 Pour chaque habitation, selon que son propriétaire meurt ou est sauvé lors de la simulation, on attribue ensuite une valeur de vulnérabilité qui sera intégrée à l'indicateur de vulnérabilité développé auparavant.
- 26 À la toute fin d'une simulation, on réévaluera le degré de vulnérabilité de chaque habitation en fonction du devenir de ses occupants. La question ici est de savoir si l'emplacement de l'habitation permet à l'occupant de survivre en cas de montée rapide des eaux. Si à la fin de la simulation, l'habitant se retrouve dans un endroit hors de l'eau, cela veut dire que l'emplacement de sa maison lui a permis de s'en sortir indemne, car l'habitation a été suffisamment proche d'une zone de refuge (du moins dans ce scénario), on met donc zéro à la valeur de l'indicateur de vulnérabilité. Il est clair que la notion de proximité ici ne concerne pas que l'aspect spatial, mais tient en compte tous les aspects du scénario considéré. Si à la fin de la simulation, le villageois se trouve dans un endroit submergé par l'eau, on peut considérer que la proximité de sa maison à une zone de refuge ne lui a pas permis de fuir correctement l'inondation, on va donc attribuer un (1) point de vulnérabilité à l'habitation. Dans le dernier cas, celui d'un décès du villageois à la fin de la simulation, on a une vulnérabilité encore plus prononcée d'où l'attribution de deux (2) points de vulnérabilité.

Élaboration des concepts

- 27 Nous présenterons ci-dessous les grands concepts du modèle selon l'ordre préconisé par (Grimm et al., 2006)
- 28 - Principes de base : à travers plusieurs simulations comparant divers scénarios, on cherche à évaluer le degré de vulnérabilité des habitations aux inondations. Il ne s'agit pas ici de donner un critère relatif à l'habitation en tant que bâtiment physique, telle que la typologie architecturale, la solidité ou l'existence ou non d'étages. Les critères que l'on se propose de mesurer reposent sur la pertinence de l'emplacement de la maison. On cherche à savoir quelles seraient les chances pour que les occupants puissent sortir indemnes d'une catastrophe fluviale. Divers scénarios seront effectués afin de prendre en compte l'effet de certaines décisions prises par les entités en charge de la gestion des risques (l'État, la région, la commune, le chef de village, le chef de famille). La simulation comprendra deux parties essentielles qui se dérouleront simultanément : la simulation de la montée des eaux et de l'écoulement qui adaptera les fonctions hydrologiques classiques (fonction de transfert et fonction de production) dans un cadre de modélisation multi-agents et la simulation du comportement des personnes face à l'aléa.
- 29 - Émergence : les simulations mettent en évidence les habitations qui sont potentiellement vulnérables à l'aléa inondation même si leur emplacement n'est pas

forcément considéré comme dangereux si on se réfère uniquement aux critères statiques de distance au fleuve, d'altitude, de distance à un ouvrage de protection, etc. La vulnérabilité de la maison ne se mesure donc pas ici à la vulnérabilité du bâtiment lui-même mais à 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'État permet de mettre en évidence la vulnérabilité de chaque village à l'échelle des habitations. Des zones considérées comme relativement sûres si on se base sur des indicateurs statiques peuvent apparaître en réalité comme très vulnérables lorsque l'on considère plusieurs simulations et différents scénarios.

- 30 - Adaptation : le comportement individuel de l'agent villageois est un processus d'adaptation à chaque pas de temps. Selon son état (informé, en fuite, etc.) et selon sa position (proche ou loin d'une zone dangereuse/sécurisée), il adapte son comportement (direction, vitesse). Il en va de même pour l'agent hydrologique. Selon le nombre d'agents hydrologiques situés sur une cellule, la hauteur d'eau de la cellule change. Or, la vitesse d'écoulement, c'est-à-dire la vitesse des agents hydrologiques, dépend de cette hauteur d'eau. Par conséquent, plus il y a d'agents hydrologiques sur une cellule, plus ils se déplacent vite.
- 31 - Objectifs : l'objectif des agents hydrologiques (agent eau) est de se déplacer suivant l'élévation hydraulique en suivant les règles établies par les fonctions hydrologiques. Pour les agents habitants en revanche, ces objectifs ne sont pas fixes mais dépendent des paramètres et des scénarios. En règle générale, l'objectif des habitants est d'atteindre une zone de refuge à la fin du scénario.
- 32 - Apprentissage : dans l'état actuel du modèle, le comportement et les attributs des agents sont soumis aux paramètres choisis. Les agents ne sont pas influencés par les événements antérieurs à la simulation.
- 33 - Perception : pour les agents hydrologiques et les agents cellules, la connaissance de l'environnement se limite aux cellules voisines et aux agents qui s'y trouvent (voisinage de Moore de niveau 1). Les agents habitants par contre ont une perception qui se traduit par un cercle centré sur l'agent lui-même. Ce cercle peut couvrir d'autres cellules que les cellules voisines. Les agents habitant peuvent aussi recevoir des messages en provenance d'autres habitants. Les autres agents n'ont aucune perception de leur environnement, mais ils peuvent s'influencer entre eux comme le fait que les habitations se voient attribuer une valeur de vulnérabilité selon le devenir de leurs occupants.
- 34 - Interaction : tous les agents ont de très fortes interactions entre eux. Dans un premier temps, les agents hydrologiques interagissent avec les cellules à travers l'écoulement suivant la pente, ainsi qu'à travers le calcul de la hauteur d'eau. L'attribut « Hauteur d'Eau » de chaque cellule est calculé en considérant la hauteur d'eau de tous les agents hydrologiques situés sur cet agent cellule. Rappelons que tous les agents hydrologiques sont caractérisés par la même hauteur d'eau mais que c'est la hauteur d'eau de la cellule terrain qui est variable. C'est à partir de cette hauteur d'eau totale contenue dans la cellule que l'on va calculer les vitesses d'écoulements des agents hydrologiques (Rakotoarisoa et al., 2014). Une autre interaction existe entre les agents hydrologiques, les agents cellules et les agents habitants. Dès qu'un agent hydrologique est situé sur un agent cellule, cet agent cellule sera considéré comme « en eau » (est_inondé = vrai). Le comportement des agents habitant sera influencé par les caractéristiques de ces cellules « en eau ». En effet, si un agent habitant est sur une cellule non inondée, il peut se déplacer normalement, selon le scénario donné, avec une vitesse propre, qui peut être

variable selon les habitants. Si par contre, l'habitant se trouve sur une cellule « en eau », il sera considéré comme affaibli par l'eau. Si la hauteur d'eau (HauteurEau) et la vitesse du flux (VitesseFlux) dans la cellule sont inférieures à des seuils donnés (par défaut, ce seuil est de 2 mètres pour la hauteur d'eau et de 2 m/sec pour la vitesse de flux), l'agent habitant peut encore se déplacer mais avec une vitesse ralentie. Si la hauteur d'eau ou la vitesse de flux au niveau de cette cellule est supérieure aux seuils décrits auparavant, la personne est considérée comme incapable de se déplacer et ne survivra pas à la catastrophe. Ainsi, si un agent habitant se trouve sur une cellule en eau (`est_inondé = vrai`), il pourra être considéré comme mort si l'une des deux conditions suivantes est observée : (i) La hauteur d'eau de la cellule dans laquelle il se trouve est supérieure au seuil vital. Beaucoup de travaux montrent qu'au-dessus de deux mètres, le seuil de danger critique est dépassé (Creach et al., 2015 ; MEDDE, 2014 ; Sahal, 2011). Des retours d'expérience le confirment notamment dans les écrits de Creach (2015) où il a estimé que « la totalité des décès survenus lors de la tempête Xynthia ont été recensés dans des constructions où la hauteur d'eau a été supérieure à un mètre (...), au-dessus de deux mètres, le seuil de danger critique est dépassé » (Creach et al., 2015). (ii) La vitesse des agents hydrologique situés sur l'agent cellule est supérieure au seuil vital quelle que soit la hauteur d'eau dans la cellule (ce seuil vital est égal à 2 m/s) (Milanesi et al., 2015). De la même manière, quand un agent habitant atteint un agent cellule considéré comme « zone de refuge » (`est_refuge = vrai`), il est considéré comme ayant été sauvé de l'inondation. L'interaction agent habitant / agent hydrologique se traduit par le fait que le comportement de l'habitant sera fonction du nombre et de la position des agents hydrologiques qui sont dans sa zone de proximité (ou plus précisément dans sa zone de perception – voir Sous-modèle 2 : Comportement des habitants). On peut aussi parler d'une certaine interaction entre les agents habitant et les agents habitation ; en effet, en début de simulation, chaque agent habitation sera relié à un agent habitant. Chaque habitant sera relié à une et une seule habitation. En début de simulation, ces habitants seront situés à l'emplacement de leurs habitations. Au cours du scénario, les habitants vont transmettre des messages à leurs habitations respectives qui vont stocker ces informations. Ainsi, un habitant qui se trouve sur un agent cellule « en eau » et dont les conditions citées plus haut sont remplies transmettra aussitôt un message à son agent habitation pour que celui-ci gagne immédiatement l'attribut « vulnérable ». Un indicateur chiffré va traduire cet état de vulnérabilité. Cet indicateur aura la valeur 1 si l'habitant se trouve dans une zone inondée à la fin de la simulation et il aura la valeur 2 si le villageois meurt à la fin de la simulation. De même, quand un habitant atteindra une zone de refuge, il va transmettre un message à son agent habitation qui bénéficiera tout de suite de l'attribut « non vulnérable » (l'indicateur chiffré aura alors la valeur 0). Cette façon de transmettre l'information équivaut à un bilan des maisons en fin de simulation qui attribue un indice de vulnérabilité en fonction de la survie de leur occupant.

- 35 - Stochasticité : dans les types de modèles mettant en scène les agents hydrologiques, les règles principales sont adaptées des fonctions hydrologiques (fonction de transfert et fonction de production), donc forcément déterministes. Dans la plupart de ces modèles, les agents hydrologiques se déplacent en suivant la plus grande pente hydraulique (Rakotoarisoa et al., 2014). Ces modèles se basent essentiellement sur l'algorithme D8 de Jenson et Domingue (1988) qui choisit la direction d'écoulement selon la plus grande pente. Ceci amène à l'émergence d'une ligne d'écoulement préférentielle qui peut être assimilée à un filet d'eau dans lequel l'eau va s'écouler comme une rivière. Il n'y a donc aucune stochasticité dans cet algorithme puisque la direction d'écoulement reste toujours

la même. Or dans le cas présent, nous voulons simuler une inondation. Ainsi, lors de son choix de direction de déplacement, l'agent hydrologique ne va pas forcément se déplacer vers la cellule terrain avec la plus petite élévation hydraulique, il va choisir aléatoirement l'une des cellules les plus basses. Ainsi au fur et à mesure de la simulation, il y a plus de probabilité que toutes les cellules basses soient inondées, ce qui est cohérent avec le phénomène que l'on cherche à expliquer. Cette méthode est plus cohérente que l'algorithme D8 mais rajoute une plus grande part de stochasticité. Une autre source de stochasticité provient du choix de la direction que les villageois vont prendre. Dans l'un des scénarios, les habitants vont se diriger vers une zone de refuge. Dans ce cas là, une zone de refuge est composée de plusieurs cellules. L'habitant va choisir aléatoirement l'une de ces cellules refuges. La cellule cible peut donc être différente pour chaque agent habitant. D'autre part, lors de sa fuite, sa vitesse de déplacement est prise de manière aléatoire au sein d'une fourchette donnée. Cette vitesse est donc différente pour chaque individu tout en restant dans la fourchette correspondante à la vitesse normale d'une personne.

- 36 - Collectivité : les agents hydrologiques agissent individuellement et se déplacent sur un espace continu. Mais l'agrégation des agents hydrologiques sur un même agent cellule se traduit par une relation entre la somme des caractéristiques (ici le volume d'eau transporté) de ces agents hydrologiques et de l'agent cellule sur lequel ils se trouvent. Ainsi le flux d'eau considéré sur une cellule résulte de la prise en compte de l'ensemble de ces agents hydrologiques. Et c'est ce flux d'eau qui sera utilisé pour interagir avec les autres entités telles que les agents habitant. Dans certains scénarios, les agents habitants peuvent communiquer entre eux, de proche en proche ou à distance. Cette communication les amène à se comporter de manière collective.

Détails

Initialisation

- 37 À la phase d'initialisation, les agents qui ont été intégrés à partir des fichiers géolocalisés provenant du SIG sont créés et déposés à leurs emplacements respectifs (habitations ou rivières). Les informations altitudes provenant du modèle numérique de terrain sont transférées aux attributs des agents cellules (Terrain). Les scénarios sont choisis (fuite aléatoire, fuite contrôlée ou fuite collective).
- 38 L'emplacement des zones qui seront considérées comme zone de refuge est fixé à l'initialisation. Les cellules considérées comme étant des cellules fleuves sont aussi fixées. L'emplacement des zones de secours correspond idéalement à des endroits existant réellement sur le terrain (voir application du modèle), mais on peut aussi en créer de manière fictive.
- 39 Les agents habitation bénéficieront de tous les attributs provenant des *shapefile* (fichiers SIG .shp) habitation. De plus, à la phase d'initialisation, un agent habitant sera créé au même emplacement que les habitations. Chaque villageois sera associé à une habitation, son habitation d'origine. Cette habitation restera son habitation (*monHabitation*) jusqu'à la fin de la simulation.
- 40 De la même manière chaque villageois sera associé à un agent cellule, son agent cellule d'appartenance (*monTerrain*). Par contre sa cellule d'appartenance étant la cellule sur

laquelle il se situe à chaque instant, elle changera au cours de la simulation. Par la suite, les caractéristiques des villageois seront aussi initialisées (Perception, etc.).

- 41 Une fois l'initialisation terminée, la simulation de la montée des eaux va être lancée à travers la création d'agents hydrologiques sur les cellules fleuves. Rappelons que la durée du débordement de la rivière est de 30 minutes. Ensuite, les agents hydrologiques ne sortent plus de la rivière mais l'eau continue à s'écouler.

Données d'entrée

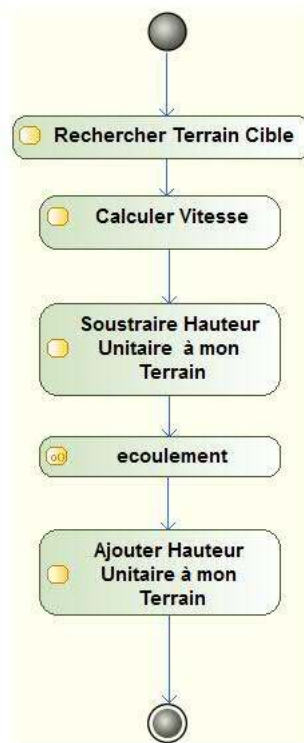
- 42 Les données d'entrée proviennent essentiellement des fichiers géoréférencés préalablement.
- 43 Le modèle numérique de terrain de résolution 90m x 90m représente la topographie du terrain. Ces données proviennent du SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).
- 44 L'emplacement et les caractéristiques (typologie architecturale) des maisons sont intégrés par l'intermédiaire de fichiers vecteurs (*shapefile*). Dans le cadre de notre application, les intrants utilisés dans le modèle ont été créés suite à des travaux de terrain.
- 45 Le *shapefile* du fleuve est aussi intégré dans le modèle.
- 46 Éventuellement un fichier vecteur peut être aussi intégré pour définir les limites spatiales de la simulation.
- 47 Le positionnement des postes de secours situés en zones hautes a aussi été communiqué au modèle.

Les sous-modèles (Les fonctions)

Sous-modèle 1 : Comportement du flux

- 48 Pendant la durée de la montée des eaux (dans notre cas, fixé à 30 minutes), des agents hydrologiques (Eau) vont être créés sur les agents cellules qui intersectent le fleuve représenté à partir du SIG. À chaque itération, un agent hydrologique va être créé sur chaque cellule rivière (*est_rivière = vrai*), puis tous les agents hydrologiques existant vont se déplacer en exécutant l'action « écoulement ». Tous les agents hydrologiques posséderont une hauteur d'eau qui leur est propre. Dans l'état actuel du modèle cette hauteur d'eau est de 0.5m ; elle est la même pour tous les agents hydrologiques et correspond à la hauteur d'eau unitaire qui est donc une variable globale : *HauteurEauUnitaire*.
- 49 Quand le temps de la montée des eaux sera écoulé, les agents hydrologiques présents continueront à se déplacer. Le processus de déplacement des agents hydrologiques sera le suivant (Figure 2) :

Figure 2 : Diagramme d'activité de l'entité de l'agent hydrologique.



- 50 L'agent hydrologique va calculer l'élévation hydraulique de l'agent cellule sur laquelle il se trouve. On désigne par élévation hydraulique l'altitude de l'agent cellule en question à laquelle on ajoute la somme des hauteurs d'eau de tous les agents hydrologiques se trouvant sur cette cellule ($\text{HauteurEauUnitaire} \times \text{nombre d'agents sur la cellule}$).
- 51 L'agent hydrologique va ensuite regarder les élévations hydrauliques des cellules voisines de sa cellule courante. Dès qu'il voit une cellule avec une élévation plus faible, il se dirige vers cette cellule.
- 52 Sa vitesse de déplacement dépendra de la pente hydraulique, de la hauteur d'eau dans l'agent cellule et de la rugosité du terrain. Cette vitesse est déterminée à l'aide de l'équation de Manning (Équation 1). Suivant cette équation, la vitesse dépend de la hauteur d'eau dans la cellule. Cette hauteur est la somme de toutes les hauteurs d'eau des agents hydrologiques situés sur la cellule. Cette hauteur d'eau est une mesure approximative du rayon hydraulique normalement utilisé dans les écoulements en rivières par l'équation de Manning. La vitesse dépend aussi de la pente de la lame d'eau. Cette pente de lame d'eau ou pente hydraulique est calculée selon la méthode de Zevenbergen et Thorne (1987). En ce qui concerne la valeur de la rugosité de Manning, une valeur globale a été prise. Cette valeur correspond à la classe de sols la plus représentée dans la zone : c'est-à-dire les sols ferrallitiques. Selon cette approche, on calcule d'abord la hauteur d'eau puis la pente hydraulique de chaque cellule à partir de la nouvelle hauteur d'eau et de l'altitude de la cellule. Les valeurs de hauteur d'eau, de la pente et de la vitesse peuvent donc changer dynamiquement avec des conditions différentes d'écoulement.

$$v = \frac{h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (1)$$

- 53 Avec v , la vitesse d'écoulement (en m/s), h la hauteur d'eau dans la cellule d'appartenance de l'agent (m), I la pente de la lame d'eau selon la méthode choisie et n le coefficient de Manning.
- 54 Lors des simulations, on a pu constater que les vitesses d'écoulement des agents hydrologiques variaient de 0.3 m/s à 2 m/s. Ces vitesses correspondent à des écoulements forts et dangereux qui sont les cas que l'on veut justement simuler dans notre modèle. Quand l'agent hydrologique quitte son ancienne cellule, la hauteur d'eau de la cellule (HauteurEau - HauteurEauUnitaire) sera diminuée d'une unité, et la nouvelle cellule sur laquelle il est situé ajoutera une unité à son attribut hauteur d'eau (HauteurEau + HauteurEauUnitaire).
- 55 Le tableau suivant (Tableau. 1) montre l'ordre de grandeur des vitesses de flux qu'on pourrait rencontrer dans la simulation. Ces vitesses sont rapportées à des classifications selon leur degré de dangerosité.

Tableau 1 : ordre de grandeur des vitesses d'écoulement lors des évènements d'inondation.

Crue	Faible	Moyenne	Forte et dangereuse (à partir de ces valeurs, le courant est dangereux pour l'homme)			
Vitesse en m/s	0.20	0.25	0.5	1	1.25	1.5

Source : <http://www.noe.gard.fr/index.php/le-gard-et-le-risque-inondation/comprendre-le-phenomene-inondation>

Sous-modèle 2 : Comportement des habitants

- 56 Les villageois adoptent un comportement qui sera déterminé en fonction de plusieurs paramètres. Une fois qu'ils auront choisi le type de comportement qu'ils vont adopter, ils se déplacent. Selon leur position à la fin du pas de temps, ces villageois peuvent mourir (sur une cellule « en eau », et suivant certaines conditions) ou être sauvé (sur une cellule « zone de refuge »). Pour chaque habitation, on attribue une valeur de vulnérabilité selon que son propriétaire est tué ou sauvé lors de la simulation.
- 57 Les villageois peuvent adopter deux comportements différents : rejoindre une zone de refuge ou fuir l'inondation. Selon leur comportement, ils auront deux vitesses différentes : une vitesse de déplacement correspondant à celle d'une personne en situation de stress (V_{rapide}) et une vitesse correspondant à celle d'une personne en panique (V_{course}). Ce sont des variables globales ; c'est-à-dire qu'elles affectent tous les agents. Des valeurs par défaut ont été données à ces vitesses mais ce sont des paramètres que l'utilisateur peut changer ces valeurs en début de simulation, voire pendant.
- 58 Néanmoins, il faut remarquer que la vitesse V_{course} (en situation de panique) n'est pas la même pour tous les villageois, même si c'est une variable globale. En effet, une valeur de base est spécifiée mais la vitesse de chaque habitant sera comprise dans l'intervalle :

cette valeur de base plus ou moins 0.5 m/s. Par exemple, supposons que la valeur de V_{course} de base est de 2 m/s (ce qui est la valeur par défaut). Dans ce cas, la valeur de la vitesse des villageois est prise aléatoirement entre 1.5 m/s et 2.5 m/s selon une loi uniforme.

- 59 On a voulu considérer le fait que, une fois pris dans l'eau, le villageois ne se déplace plus de la même manière que si il était sur une zone non inondée. On a caractérisé cela par une diminution de sa vitesse de déplacement. Selon la littérature la vitesse de déplacement d'un piéton en l'absence d'obstacles importants peut varier de 0.9 m/s à 1.5 m/s (Leone et al., 2014 ; Moussaïd, 2010). On peut donc en déduire qu'en l'absence d'obstacles importants, la vitesse de déplacement d'un piéton est de l'ordre de 1.3 m/s. Pour représenter la diminution de vitesse due au déplacement dans l'eau nous avons fait le choix de choisir un malus de vitesse qui soit suffisamment conséquent (pour représenter les cas où les personnes se retrouvent vraiment dans une situation où le fait de se déplacer devient vraiment pénible) mais qui ne soit pas assez grand pour pouvoir annuler complètement sa vitesse de déplacement. C'est pour cela que l'on a choisi une valeur de 1 m/s, qui diminue drastiquement la vitesse mais n'est pas assez grande pour l'annuler puisque la valeur de la vitesse de déplacement des villageois est supérieure à 1 m/s par défaut (c'est le cas pour V_{course} et pour V_{rapide}), ce qui implique que le villageois cherchera toujours à se déplacer sauf s'il est considéré comme décédé. Cette variable correspond donc à la vitesse que l'on doit retrancher à la vitesse initiale spécifiée pour chaque comportement afin de simuler le fait que le villageois est pris dans l'eau ou pas. Ainsi, si le villageois est pris dans l'eau mais qu'il est toujours vivant, il lui sera donné un malus de vitesse de 1 m/s.
- 60 Chaque villageois possède aussi un attribut « perception » qui correspond à sa capacité de perception ; ou en d'autres termes à la vision de son voisinage. Il s'agit concrètement du rayon d'un cercle ayant l'habitant comme centre. Tout autre agent à l'intérieur de ce cercle pourra influencer le comportement de l'habitant. Plus cette perception est grande plus il pourra apercevoir à temps les agents hydrologiques et mieux il pourra agir en conséquence.
- 61 Une dernière variable globale concerne les villageois et prend une importance variable selon les scénarios. Il s'agit de la variable « TousLesHabitantsSontInformés », si cette variable est vraie, cela veut dire que tous les villageois sont au courant de la montée des eaux, même s'ils n'aperçoivent pas encore d'agents hydrologiques dans leur zone de perception. De plus, ils sont aussi au courant au préalable de l'emplacement des zones de secours.
- 62 Les différents comportements de villageois que l'on pourra rencontrer dans le modèle sont les suivants :

Rejoindre une zone de refuge

- 63 Quand un habitant décide de rejoindre une zone de refuge, cela signifie qu'il a été préalablement informé de l'emplacement de cette dernière. Pour se diriger vers cette zone de secours, le villageois va faire face à la zone de refuge qu'il a choisi (de manière aléatoire parmi les zones de secours existantes) et va se diriger vers elle. Sa vitesse de déplacement est la vitesse de déplacement d'un individu en situation de stress (V_{rapide}). Par défaut, cette vitesse est réglée à 1.5 m/s.

Fuir l'inondation

- 64 La plupart du temps, le villageois aura à fuir l'inondation. Quand il perçoit dans son champ de perception un agent hydrologique et qu'il décide de fuir, il va se déplacer dans la direction opposée à cet agent. Sa vitesse de déplacement sera la vitesse de déplacement d'un individu en situation de panique (V_{course} , par défaut = 2 +/- 0.5 m/s). Les coordonnées de la cellule destination seront calculées de la manière suivante :
- 65 Soit X_T abscisse de la cellule destination, X_A abscisse de la cellule où se trouve l'agent habitant et X_0 abscisse de la cellule en eau que l'agent habitant a aperçue, on a $X_T + 2(X_0 - X_A) = X_0$, ce qui nous amène à obtenir l'abscisse de la cellule destination : $X_T = 2X_A - X_0$.
- 66 Cette relation est aussi valable pour les ordonnées. Notons que les coordonnées obtenues sont celles de la cellule destination. L'agent habitant va se diriger vers cette cellule mais dans l'espace continu et en suivant sa vitesse propre. Dans la plupart des cas, l'agent ne pourra même pas atteindre cette destination puisque qu'elle est réactualisée à chaque pas de temps. Par contre, avec cette approche, on va pouvoir simuler la fuite.

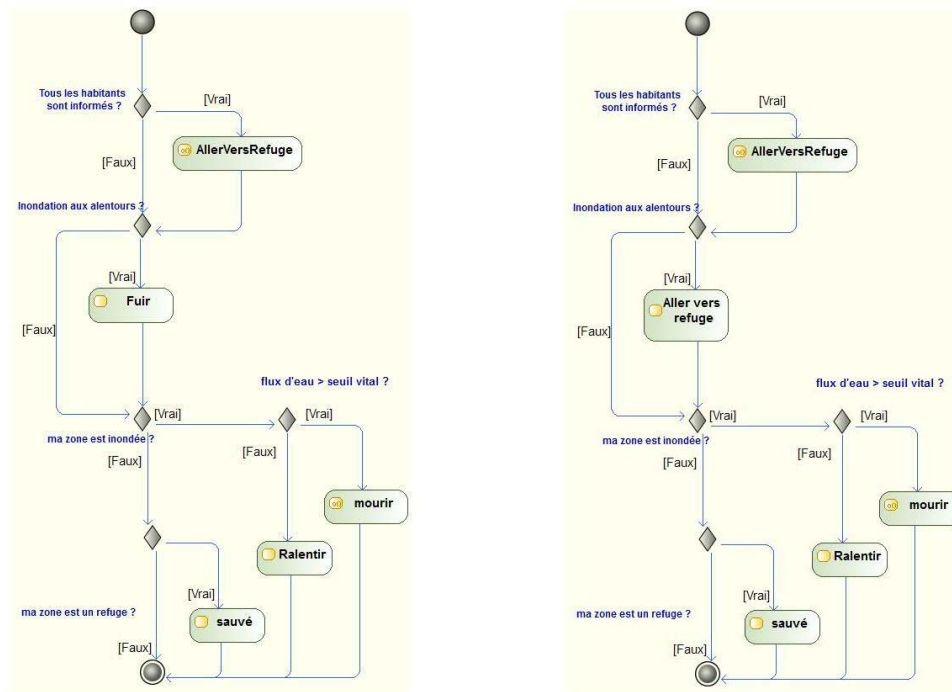
Les scénarios

- 67 Plusieurs scénarios ont été mis en place. À la fin de chaque scénario, on aboutira à des résultats qui permettent de comparer l'effet des décisions associées à chaque scénario (par exemple, le fait de fuir vers les zones de refuge en sachant où elles se trouvent). De plus, on pourra mettre en commun ces résultats et les combiner afin d'aboutir à un indicateur de vulnérabilité à l'échelle des habitations. Chaque scénario se déroulera durant 200 cycles (1h 40 minutes).

Scénario 1 : fuite sans but précis

- 68 Le villageois n'a aucune connaissance préalable concernant les risques naturels. Lors de la catastrophe, son seul but est de fuir pour survivre. Aucune information concernant les éventuels postes de secours ne lui a été fournie.
- 69 Dès qu'un villageois aperçoit un agent hydrologique dans sa zone de perception, il se déplace dans la direction opposée en adoptant le comportement « fuir l'inondation ». Son mouvement n'a donc aucune destination fixe car il ne sait pas où se trouve les zones de refuge. S'il n'aperçoit pas d'agents hydrologiques dans sa zone de perception il ne fait rien (Figure 3).

Figure 3 : Diagramme d'activité des habitants : Scénario 1 (à gauche) et Scénario 2 (à droite).



Scénario 2 : fuite contrôlée

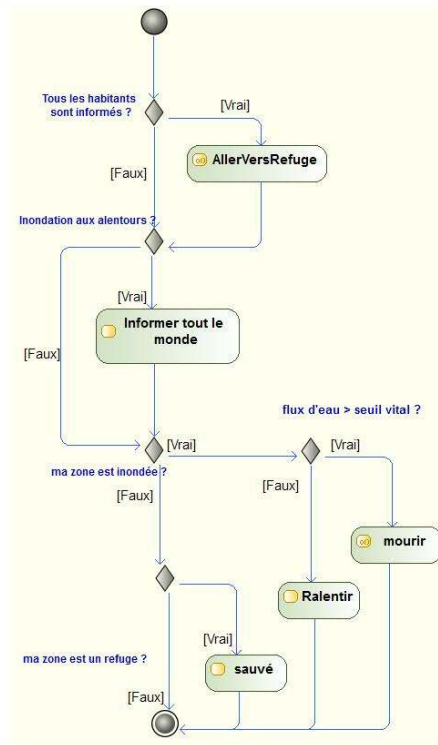
- 70 Ce scénario mettra en scène des villageois qui ont été sensibilisés préalablement sur la connaissance du risque d'inondation. On suppose que des campagnes de sensibilisation ont été effectuées par les organismes concernés auprès des villages et qu'ils ont les informations nécessaires pour faire adopter le meilleur comportement face à l'inondation. Plus précisément, dans ce cas de figure, les villageois savent déjà où se trouvent les zones de refuges.
- 71 Dès qu'un villageois aperçoit un agent hydrologique dans sa zone de perception, il se déplace immédiatement vers une destination qu'il connaît, la zone de refuge, en adoptant le comportement « Rejoindre une zone de refuge ».

Scénario 3 : fuite collective

- 72 Dans ce scénario, on pourra répondre à la question : quel est l'effet des moyens de communication dans le cas d'un évènement catastrophique ? En effet, on considère ici que les villageois peuvent communiquer entre eux à travers divers moyens (cris, textos, appels téléphoniques, internet, etc.). Tout comme dans le scénario 2, des campagnes de sensibilisation ont déjà été menées, ce qui implique que les villageois savent très bien où se trouvent les zones de refuges.
- 73 Le principe du scénario est simple, dès qu'un villageois aperçoit de l'eau dans sa zone de perception, il prévient tout le monde qu'il y a une montée des eaux et tous (y compris lui) se déplacent vers une zone de refuge. Ils savent où se trouvent les zones de refuge, leur mouvement sera donc un déplacement avec une destination précise, tout comme pour le scénario 2. Dès qu'ils ont été prévenus, tous les villageois vont aller vers une zone de

refuge même s'ils n'aperçoivent pas d'agents hydrologiques dans leur zone de perception. En pratique, l'action « communiquer à tout le monde » a été simulée avec l'aide de la variable globale « TousLesHabitantsSontInformés » (Figure 4).

Figure 4 : Diagramme d'activité des habitants : Scénario3.



Présentation de l'interface utilisateur

- 74 L'interface utilisateur est présentée dans la figure 5. Elle est intuitive et personnalisable. Si besoin, les paramètres sont modifiables durant la simulation. L'utilisateur peut appeler plusieurs fenêtres en même temps selon ses besoins : fenêtre de visualisation de la simulation, fenêtre de visualisation des graphiques, fenêtre de gestion des données d'entrée et de sortie, fenêtre de gestion des paramètres. Pour des besoins purement esthétiques et visuels, une option de visualisation en trois dimensions est proposée mais facultative.

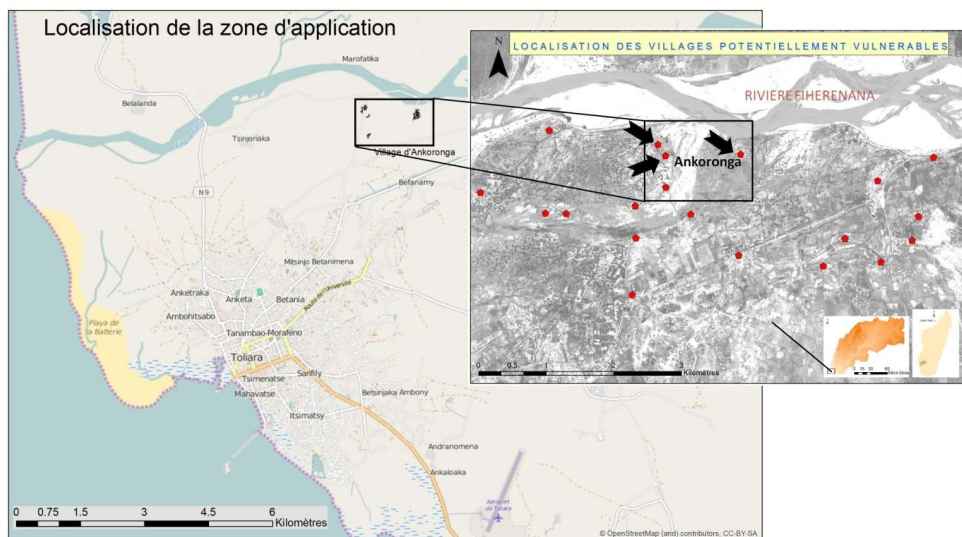
Figure 5 : Présentation de l'interface utilisateur.



Application du modèle et premiers résultats

- 75 Le terrain d'étude qui sert de support pour le modèle est un agencement de plusieurs villages proches de la ville de Toliara dans le Sud Ouest de Madagascar. Pour appliquer le modèle, on a choisi le village d'Ankoronga qui est l'un des villages le plus souvent affecté lors de la montée des eaux. La zone choisie, délimitée dans la figure 6, comprend quatre petits villages ; le village principal d'Ankoronga situé à l'Est, est composé de 243 habitations et trois autres villages plus petits composés respectivement de 141, 30 et 65 habitations (Figure 6).

Figure 6 : Délimitation de la zone d'application du modèle.

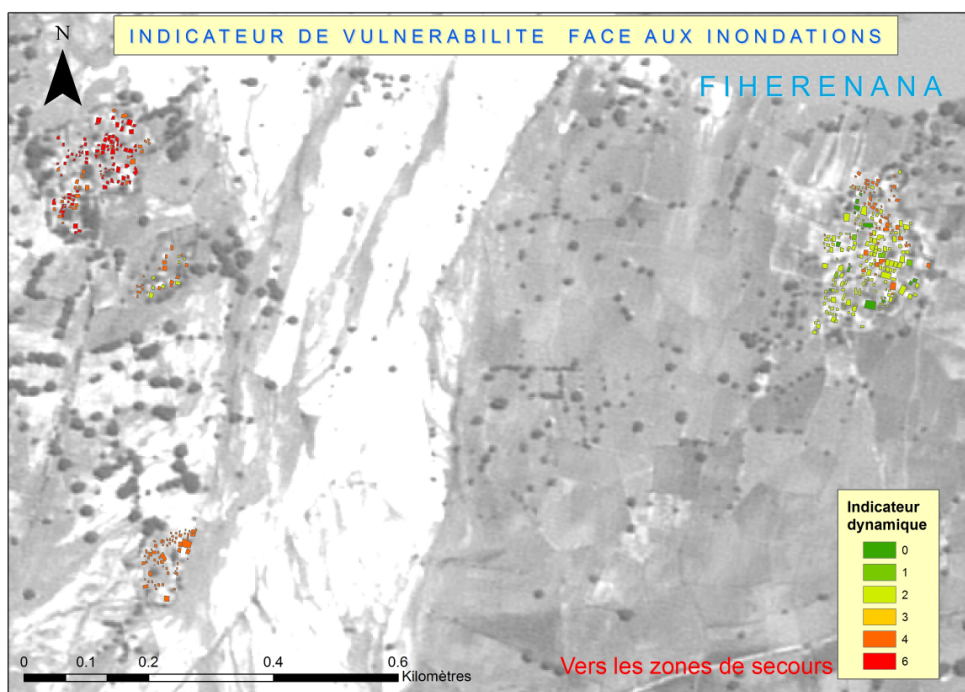


- 76 Les trois scénarios décrits dans la partie précédente ont été exécutés l'un après l'autre. En fin de simulation, chaque habitation a un état selon le devenir de ses occupants ; si son occupant est sauf, son indice de vulnérabilité sera égal à zéro ; si son occupant est pris dans l'eau, l'indice sera égal à un, et si l'occupant est mort, l'indice sera égal à deux. À la

fin, on fait la somme des indices des trois scénarios pour obtenir la valeur de l'indicateur de vulnérabilité par habitation, qui varie entre 0 et 6.

- 77 Le plan d'expérience est le suivant. Pour chaque scénario, on a effectué un nombre de simulation donné (20 répliques). On aura donc 20 valeurs de points de vulnérabilité pour chaque habitation. On fera la moyenne de ces valeurs (arrondi à l'entier près) pour avoir la valeur de l'indice de vulnérabilité pour une maison donnée, et pour un scénario donné. Les valeurs des paramètres qui ont été prises pour les simulations sont les valeurs par défaut décrites dans les paragraphes précédents.
- 78 On aboutit donc à une cartographie de vulnérabilité (Figure 7) résultant d'un modèle de simulation de catastrophe inondation. On constate alors que les trois petits villages à l'Ouest présentent un nombre conséquent d'entités vulnérables par rapport au village principal d'Ankoronga. Ce premier résultat soulève déjà un résultat intéressant qu'un simple indicateur statique n'aurait sans doute pas trouvé. En effet, un indicateur statique basé sur la distance au fleuve et la topographie par exemple, aurait pu donner un autre résultat en considérant le village principal, le plus proche du danger, comme étant le plus vulnérable. Une telle approche, appliquée dans la même zone peut être trouvée dans les travaux de (Rakotoarisoa, 2017). La prise en compte du comportement des villageois remet en cause cette hypothèse et appelle à plus de réflexion.

Figure 7 : Cartographie du degré de vulnérabilité des habitations face au risque d'inondation, résultant du simulateur à base de système multi-agents.



Discussions et conclusion

- 79 La question de la « mesure de la vulnérabilité et de la capacité d'adaptation » par des indicateurs fait l'objet d'un grand débat actuellement. Alors que les responsables politiques sont de plus en plus impliqués dans l'utilisation de ces indicateurs, ils sont très critiqués dans la littérature scientifique (Hinkel, 2011). L'ajout d'une dimension

prévisionnelle à un tel indicateur nous semble pouvoir améliorer significativement son efficacité et ainsi être un atout non négligeable. Toutefois, malgré son intérêt, il faut le manier avec prudence. Les techniques de prévisions sont variées et on peut globalement en caractériser trois types : empirique, déterministe et probabiliste. Dans notre cas, on a choisi un autre moyen de prévision : la méthode des scénarios par simulation qui a la particularité de pouvoir se rattacher aux démarches empiriques aussi bien que probabilistes. Tout comme les méthodes empiriques de terrain, elle ne fait pas forcément appel à un formalisme mathématique. En ce qui concerne la simulation de l'écoulement de l'eau par exemple, il existe beaucoup de modèles hydrologiques déterministes qui modélisent très bien le ruissellement. Il existe aussi des modèles hydrologiques couplés à une démarche de simulation mettant en scène un système multi-agents ou un automate cellulaire (Gaillard et al, 2008). Pour cette étude, notre choix s'est porté sur une adaptation de l'équation de Manning. Ici, l'objectif n'est pas de simuler les débits d'écoulements. Il ne s'agit pas non plus de comparer des hydrogrammes réels et simulés à l'exutoire du bassin versant. On veut avant tout représenter l'évènement ponctuel catastrophique de montée des eaux et ses conséquences sur les entités vulnérables. Dans notre cas donc, si la démarche adoptée peut paraître essentiellement qualitative, elle consiste à définir le chemin potentiel que pourrait emprunter le phénomène à risque dans le futur à partir de la caractérisation de l'état présent. Le recours aux modèles de simulation à base de système multi-agents ajoute donc une autre dimension aux méthodes dites « statiques ». Les premiers résultats présentés dans cet article témoignent déjà de l'intérêt de cette approche. Comme dit précédemment, une approche sans simulation aurait considéré plutôt le village le plus proche, le village d'Ankoronga comme étant le plus vulnérable, et non les autres. La prise en compte du comportement des villageois remet en cause cette hypothèse et appelle à plus de réflexion.

- 80 Une problématique à prendre en compte, surtout en ce qui concerne notre zone d'étude, est l'effet de la digue. Les discussions avec des villageois ont montré qu'ils réclamaient systématiquement que la digue soit renforcée. Cela exprime donc le fait que les habitants comptent beaucoup sur cette digue pour les protéger des inondations. Or, dans la majeure partie des cas, les inondations les plus dévastatrices résultent de la rupture de cette digue (comme dans le cas du cyclone Haruna en 2013 par exemple). C'est pourquoi le choix a été fait, dans cette version du modèle, de ne pas considérer la présence de la digue. Les éventuelles habitations qui seraient moins vulnérables grâce à cet ouvrage de protection sont au contraire considérées comme vulnérables dans notre approche. Cette digue qui est supposée protéger, donc participer à une certaine résistance à l'aléa, peut devenir dans certains cas une source de vulnérabilité. C'est le cas surtout quand les villageois s'installent tout près de l'ouvrage en pensant qu'ils sont dans une zone sécurisée alors qu'une rupture inopinée engendrerait des dégâts plus importants que s'ils s'étaient installés ailleurs. Ce faux sentiment de sécurité accroît donc leur vulnérabilité et, de ce fait, la digue, au lieu de participer à la protection, aurait plutôt fait le contraire. Cette réflexion peut être valable pour tous les autres types d'ouvrages de protection. Dans une amélioration future du modèle, il est envisageable d'intégrer différents scénarios avec ces ouvrages de protection, en ciblant bien les zones de ruptures potentielles de digue et en prenant en compte tous les paramètres de ces ouvrages tel que leur solidité.
- 81 En ce qui concerne les données d'entrée, le modèle numérique de terrain (MNT) est primordial. Si l'emplacement des habitations et leur type ont été définis et collectés lors d'une campagne de terrain et d'enquêtes précises, le modèle numérique topographique

utilisé ici est composé de données altimétriques d'une résolution de 90 m (SRTM - Shuttle Radar Topography Mission). Le MNT n'est pris en compte que dans la simulation de l'écoulement de l'eau, mais n'est pas considéré dans le déplacement des villageois. Cette résolution nous permet d'avoir des temps de simulation acceptables tout en gardant un écoulement représentatif de l'évènement. En effet, des simulations ont été testées avec un MNT de résolution 30 m, mais les temps de calcul deviennent alors considérables. Le problème se posera d'autant plus si on envisage d'étendre les simulations à d'autres villages et à la grande ville de Toliara. Notons aussi le fait que le SRTM provient d'une base de données mondiale dont la résolution a été altérée. Ainsi la marge d'erreur pour la résolution verticale peut être considérable pour certaines régions. Mais dans notre cas, les simulations n'ont pas pour but de reproduire des écoulements précis au même titre que les modèles pluie-débit. Elles visent à simuler qualitativement un évènement catastrophique représentatif. Ainsi le choix du MNT SRTM de 90 m semble être un bon compromis.

- 82 Avec cette question de topographie resurgit aussi l'influence de la pente du terrain sur les phénomènes qu'on veut simuler. Dans le modèle, la pente intervient dans le déplacement des agents hydrologiques mais pas dans le déplacement des agents habitants, or des travaux montrent que la pente (et l'occupation du sol) influencent ces déplacements (Leone et al., 2014). Toutefois nous avons plutôt voulu mettre en exergue l'influence de la remontée d'eau sur la vitesse des habitants (un villageois pris dans l'eau se déplace moins vite) ainsi que la différence de vitesse de déplacement selon les scénarios. L'ajout d'autres paramètres influençant la vitesse des habitants comme la pente aurait « noyé » l'influence des paramètres cités plus haut et aurait sans doute aussi alourdi le modèle. Nous avons donc fait le choix de ne pas prendre en compte l'effet de la pente sur le déplacement des villageois.
- 83 Pour les améliorations du modèle, mis à part la question des ouvrages de protection, d'autres extensions sont envisageables. Ainsi, comme on l'a constaté sur le terrain, le rôle des voies de communications est à prendre en considération. En effet, non seulement elles influencent l'écoulement du flux (écoulement préférentiel, imperméabilité) mais elles vont aussi jouer sur le comportement des villageois et sur leur façon de se déplacer. Il serait donc intéressant d'ajouter les routes et les sentiers au modèle et de les considérer comme étant des agents spécifiques qui interagissent avec les autres entités.
- 84 Enfin, il est bon de rappeler que le modèle multi-agents développé ici ne se suffit pas à lui-même pour l'évaluation de la vulnérabilité. Il a pour vocation d'être couplé avec un indicateur statique. Cet indicateur statique a déjà été développé et son application sur la zone est basée sur un agencement de plusieurs critères statiques. Cependant, la question sur la manière de combiner ces deux approches se pose toujours, au même titre que la réflexion globale sur le choix des pondérations dans les indicateurs de vulnérabilité.

BIBLIOGRAPHIE

- BARNETT J., LAMBERT S., FRY I., 2008, "The Hazards of Indicators: Insights from the Environmental Vulnerability Index", *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 98, N° 1, 102-119.
- BARROCA B., POTTIER N., LEFORT E., 2005, "Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'Orge aval", *Septièmes Rencontres de Théo Quant*, 12.
- BERNARD H. R., 2013, *Social research methods: qualitative and quantitative approaches*. Los Angeles, SAGE, 789 p.
- BOURRELIER P.-H., 1997, *La prévention des risques naturels : rapport de l'instance d'évaluation*. Paris, Documentation Française, 702 p.
- CARNAP R., 2012, *Introduction to the Philosophy of Science*. Dover Publications.
- COPI I. M., COHEN C., MCMAHON K. D., 2011, *Introduction to logic*. Upper Saddle River, NJ, Pearson Education, 627 p.
- 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 Storm Xynthia on the French Atlantic coast", *Natural Hazards*, vol. 77, No.3, 1679-1710.
- CUTTER S. L., MITCHELL J. T., SCOTT M. S., 2000, "Revealing the Vulnerability of People and Places: A Case Study of Georgetown County, South Carolina", *Annals of the Association of American Geographers*, vol. 90, No.4, 713-737.
- DAUPHINÉ A., 2003, *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris, A. Colin.
- DEMORAES F., 2004, *Mobilité, enjeux et risques dans le district métropolitain de Quito (Equateur)*. Le Bourget du Lac, Université de Savoie.
- FERBER J., 1995, *Les Systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. Paris, InerEditions.
- GAILLARD D., DELAHAYE D., DOUVINET J., LANGLOIS P., 2008, "Modélisation du ruissellement érosif par automate cellulaire. Du diagnostic à l'aménagement concerté", *Revue internationale de géomatique*, vol. 18, No.3, 305-326.
- GLATRON S., 1999, "Une évaluation géographique des risques technologiques ... L'exemple du stockage et de la distribution des carburants en Île-de-France", *Espace géographique*, vol. 28, No.4, 361-372.
- GRIGNARD A., TAILLANDIER P., GAUDOU B., VO D. A., HUYNH N. Q., DROGOUL A., 2013, "GAMA 1.6: Advancing the Art of Complex Agent-Based Modeling and Simulation", 117-131 in: G. Boella, E. Elkind, B. T. R. Savarimuthu, F. Dignum, & M. K. Purvis (Éd.), *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg.
- GRIMM V., BERGER U., BASTIANSEN F., ELIASSEN S., GINOT V., GISKE J., ET AL., 2006, "A standard protocol for describing individual-based and agent-based models", *Ecological Modelling*, vol. 198, No.1-2, 115-126.
- HINKEL J., 2011, "« Indicators of vulnerability and adaptive capacity »: Towards a clarification of the science-policy interface", *Global Environmental Change*, vol. 21, No.1, 198-208.

- IONESCU C., KLEIN R. J. T., HINKEL J., KAVI KUMAR K. S., KLEIN R., 2009, "Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change", *Environmental Modeling & Assessment*, vol. 14, No.1, 1-16.
- LEONE F., PÉROCHE M., GUTTON R., 2014, "Le risque tsunami en Martinique : planifier une évacuation préventive en optimisant l'accessibilité de sites refuges", *Vertigo*, vol. 14, No.2. <http://vertigo.revues.org/15046>
- LÉONE F., RICHEMOND N. M. DE, VINET F., 2010, *Aléas naturels et gestion des risques*. Paris, Presses universitaires de France.
- MANNING R., 1890, *On the flow of water in open channels and pipe*. LF Vernon-Harcourt.
- MEDDE., 2014, *Stratégie Nationale de Gestion des Risques d'Inondation*.
- MILANESI L., PILOTTI M., RANZI R., 2015, "A conceptual model of people's vulnerability to floods", *Water Resources Research*, vol. 51, No.1, 182-197.
- MOUSSAÏD M., 2010, *Étude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*. Université Toulouse II - Paul Sabatier, 225 p .
- MULLER P.-A., GAERTNER N., 2000, *Modélisation objet avec UML*. Paris, Eyrolles.
- PIGEON P., 2012, "Apports de la résilience à la géographie des risques : l'exemple de La Faute-sur-Mer (Vendée, France)", *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 12, N° 1. <http://vertigo.revues.org/12031>
- PROPECK-ZIMMERMAN E., SAINT-GÉRAND T., BONNET E., 2009, "Nouvelles approches ergonomiques de la cartographie des risques industriels", *Mappemonde*, vol. 4, No.96.
- RAKOTOARISOA M. 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*. Université d'Angers, 518 p .
- RAKOTOARISOA M. M., FLEURANT C., AMIOT A., BALLOUCHE A., COMMUNAL P.-Y., JADAS-HÉCART A., ET AL., 2014, "Un système multi-agent pour la modélisation des écoulements de surface sur un petit bassin versant viticole du Layon.", *Revue internationale de géomatique*, vol. 24, No.3, 307-333.
- RICHEMOND N. M. DE, GARRY G., VEYRET Y., 2004, "Risques naturels et aménagements en Europe : répartition des compétences, niveaux territoriaux de gestion des risques et acteurs", *Bulletin de l'Association de géographes français*, vol. 81, No.1, 103-113.
- RUFAT S., 2007, "L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque", *Géocarrefour*, vol. 82, No.1-2, 7-16.
- SAHAL A., 2011, *Le risque tsunami en France : contributions méthodologiques pour une évaluation intégrée par scénarios de risque*. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne.
- SCARWELL H.-J., LAGANIER R., 2004, *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Villeneuve d'Ascq, Presses universitaires du Septentrion, 239 p .
- TOBIN G. A., 1997, *Natural Hazards : Explanation and Integration*. Guilford Press, 404 p .
- WISNER B., 2004, *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. London ; New York, Routledge, 471 p.
- WOLF S., HINKEL J., HALLIER M., BISARO A., LINCKE D., IONESCU C., ET AL., 2013, "Clarifying vulnerability definitions and assessments using formalisation", *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, vol. 5, No.1, 54-70.

ZEVENBERGEN L. W., THORNE C. R., 1987, "Quantitative analysis of land surface topography", *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 12, No.1, 47-56.

ANNEXES

Résultats pour chaque scénario

On présente ici les résultats issus des trois scénarios. Ce sont ces résultats qui ont été combinés pour produire la Figure 7.

Figure 8 : Résultats après les simulations suivant le scénario 1

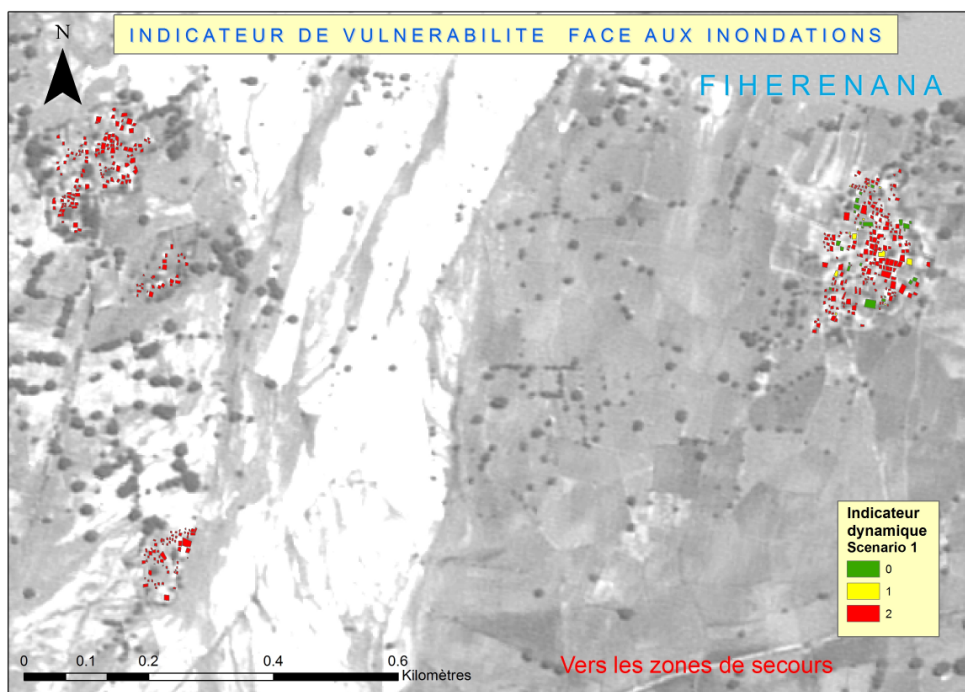


Figure 9 : Résultats après les simulations suivant le scénario 2

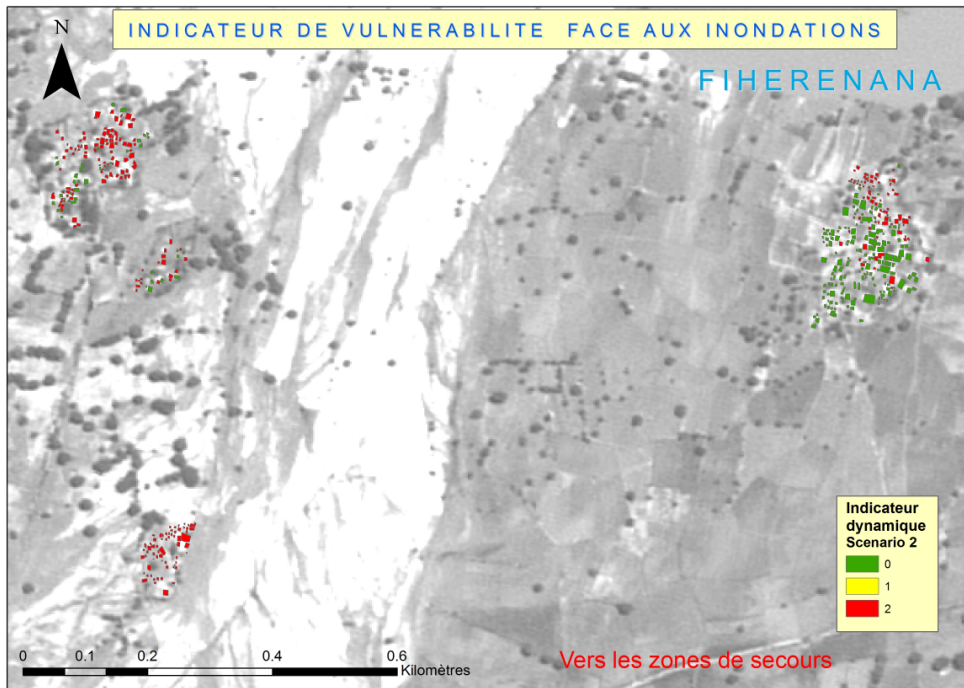
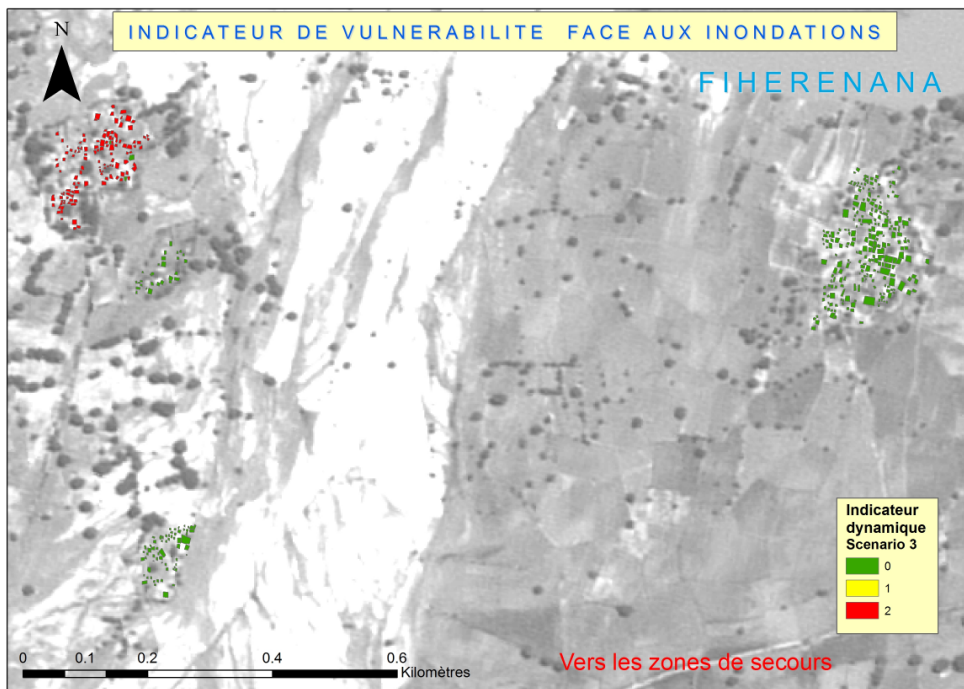


Figure 10 : Résultats après les simulations suivant le scénario 3



RÉSUMÉS

Les catastrophes naturelles sont fréquentes dans la région Sud Ouest de Madagascar, en particulier en ce qui concerne les inondations. Évaluer la vulnérabilité des habitants face à ces

catastrophes se révèle être d'une importance majeure. La vulnérabilité étant un concept théorique, il n'est pas aisé de lui assigner une valeur chiffrée. Il existe cependant plusieurs méthodes pour « mesurer » la vulnérabilité aux inondations. La plus classique est l'utilisation d'un indicateur qui se base sur l'agrégation de plusieurs critères pondérés aboutissant sur un indice synthétique. Dans ce travail, nous voulons ajouter un caractère dynamique à ce type d'indicateur en utilisant une approche modélisatrice : les systèmes multi-agents (SMA). Ainsi les comportements de toutes les entités mises en jeu (habitants, habitations, flux d'eau) lors d'un événement catastrophique seront simulés par un modèle qui met en avant l'utilisation de l'agent : individu autonome qui agit selon des règles spécifiques. Plusieurs scénarios sont pris en compte et comparés afin d'aboutir à un indicateur dynamique à l'échelle de l'habitation. Cette approche permet non seulement une observation intuitive de chaque événement catastrophique mais aussi de pouvoir ajouter une dimension supplémentaire qu'un indicateur statique classique ne peut pas prendre en compte, l'aspect prospectif de la vulnérabilité. À long terme, ce type d'approche pourrait aboutir à un modèle de prédiction.

Natural disasters are frequent in the South West of Madagascar, particularly flooding. Assessing population vulnerability is of major importance. Vulnerability is a theoretical concept; it is not easy to assign it with a numerical value. However, there are several methods to 'measure' vulnerability to flooding. The most traditional approach is the use of an indicator that is based on the arrangement of several criteria leading on a synthetic index. In this work, we want to add a dynamical aspect to that indicator, using a modeling approach called "multi-agent system" (MAS) which is increasingly prized by geographers. The behavior of all entities brought into play (inhabitants, houses, water flows) during a catastrophic event will be simulated by a model using the agent, i.e. an autonomous individual who acts according to specific rules. Several scenarios are taken into account in order to get a dynamic indicator. This approach allows an intuitive observation of every catastrophic event and gives flexibility to add another dimension to the indicator, the forward-looking aspect of vulnerability that a static indicator cannot account for. In the long run, this type of approach can lead to a predictive model.

INDEX

Mots-clés : vulnérabilité, système multi-agents, inondation, Madagascar

Keywords : vulnerability, multi-agent system, flood, Madagascar

geographyun 903, 910, 450

AUTEURS

MAHEFA MAMY RAKOTOARISOA

UMR 6554 CNRS LETG – Angers, UFR Sciences, Université d'Angers, UBL. 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France

CYRIL FLEURANT

UMR 6554 CNRS LETG – Angers, UFR Sciences, Université d'Angers, UBL. 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France)

AUDE NUSCIA TAIBI

UMR 6554 CNRS LETG – Angers, UFR Sciences, Université d'Angers, UBL. 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France

MATHIAS ROUAN

UMR 6554 CNRS LETG – Brest, Institut Universitaire Européen de la Mer, 29280 Plouzané, France

SEBASTIEN CAILLAUT

UMR 6590 CNRS ESO, AgroCampus-ouest, rue Le Notre, 49045 Angers cedex 01, France

THÉODORE RAZAKAMANANA

Département de géologie. Laboratoire de pétrologie, minéralogie, metallogène et gestion des ressources minérales. Faculté des sciences. Université de Toliara, Madagascar

AZIZ BALLOUCHE

UMR 6554 CNRS LETG – Angers, UFR Sciences, Université d'Angers, UBL. 2 Bd Lavoisier, 49045 Angers cedex 01, France