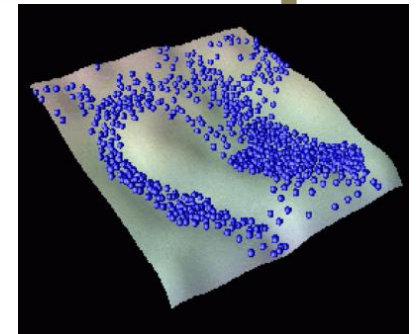


Etude des risques hydrologiques dans les bassins versants sous contrôle anthropique. Modélisation de l'aléa, de la vulnérabilité et des risques.

Cas de la région Sud-Ouest de Madagascar.



Mahefa Rakotoarisoa, Cyril Fleurant, Razakamana Théodore, Nuscia Taibi, Sebastien Caillault, Mathias Rouan, Aziz Ballouche.



Contexte et problématique

Manifestation des aléas sous diverses formes

- Perturbations importantes sur le cycle hydrologique
- Conséquences sur les activités anthropiques

Augmentation des phénomènes climatiques extrêmes (cyclones etc.)

- inondations violentes
- influence sur la vie sociale et économique des populations locales.



Objectifs de la thèse

Comprendre le comportement des risques hydrologiques dans le cas des zones les plus vulnérables.

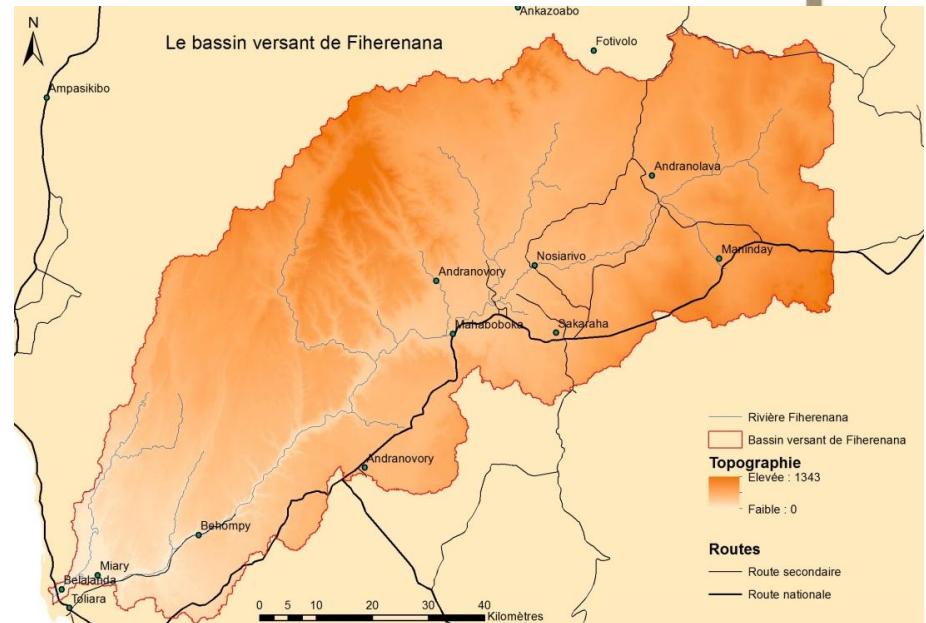
Caractériser l'évolution de l'**Aléa**.

Comment quantifier la **vulnérabilité** et augmenter la capacité de résilience?

Evaluer les conséquences des **risques** sur la société.



Choix du site d'étude



Superficie : 7500 km²

Le Fihierenana prend sa source dans le massif de l'Isalo. Il traverse la vallée du plateau calcaire, draine la plaine de Toliara pour se déverser dans le Canal de Mozambique. Son parcours est d'environ 208 km.

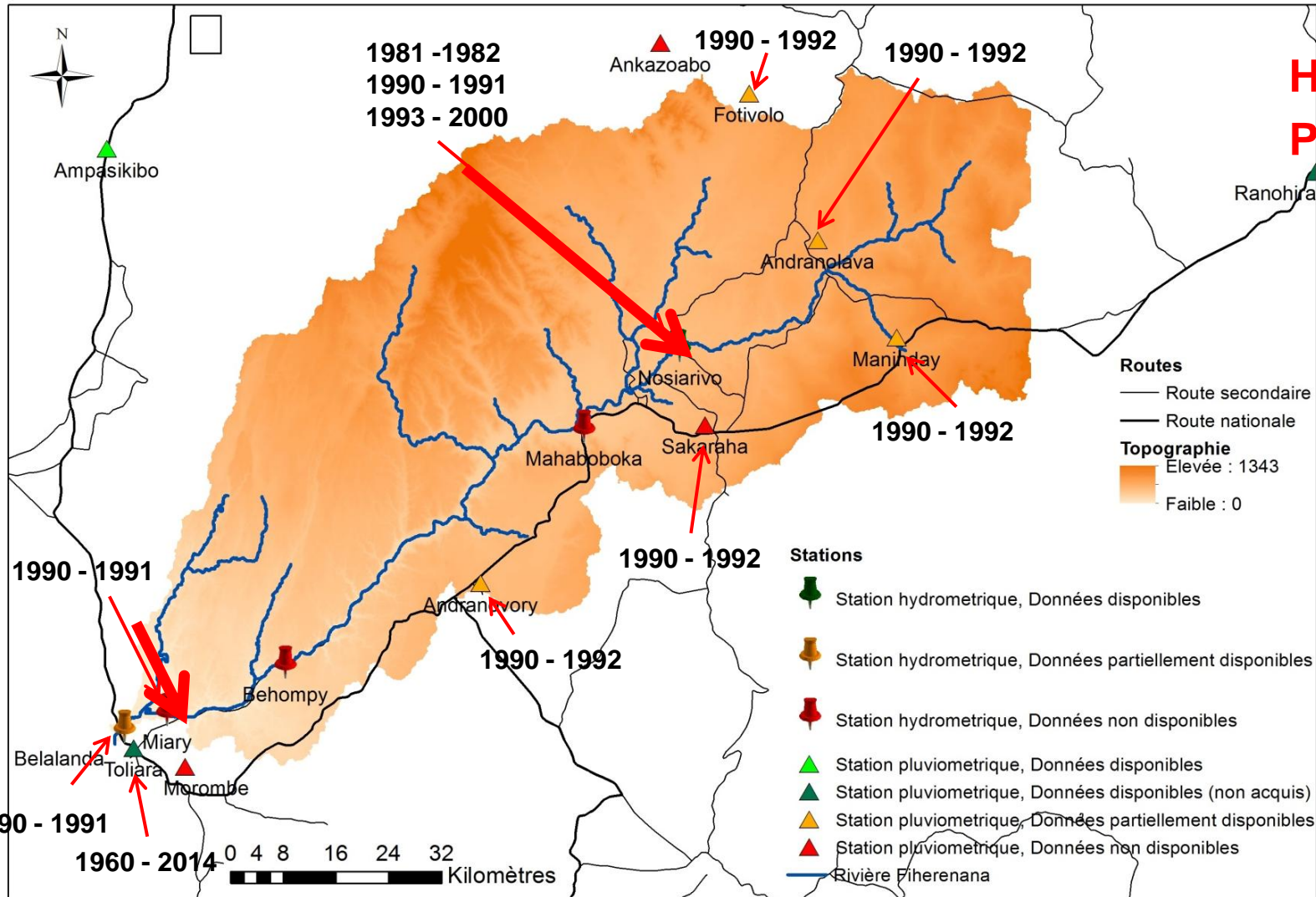
C'est le fleuve qui cause chaque année des dégâts liés aux inondations dans la ville de Toliara.

EVOLUTION DE L'ALEA HYDRO-CLIMATIQUE

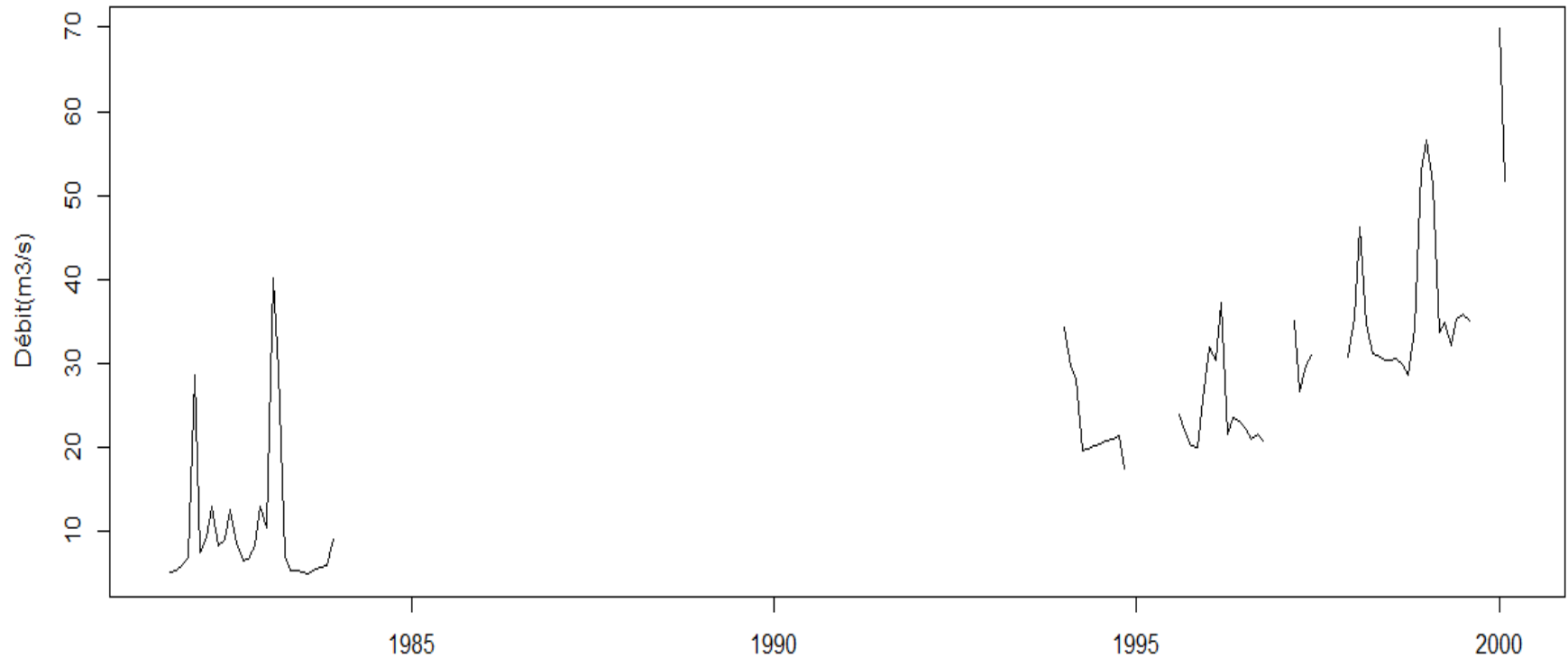
Analyse des données et Utilisation des techniques de prévisions à Court termes pour compenser les données manquantes

Répartition spatiale des données

Hydrométrie
Pluviométrie



Aperçu des Chroniques hydrométriques



- **Données Hydrométriques (Station Nosiarivo - Antalarava)**

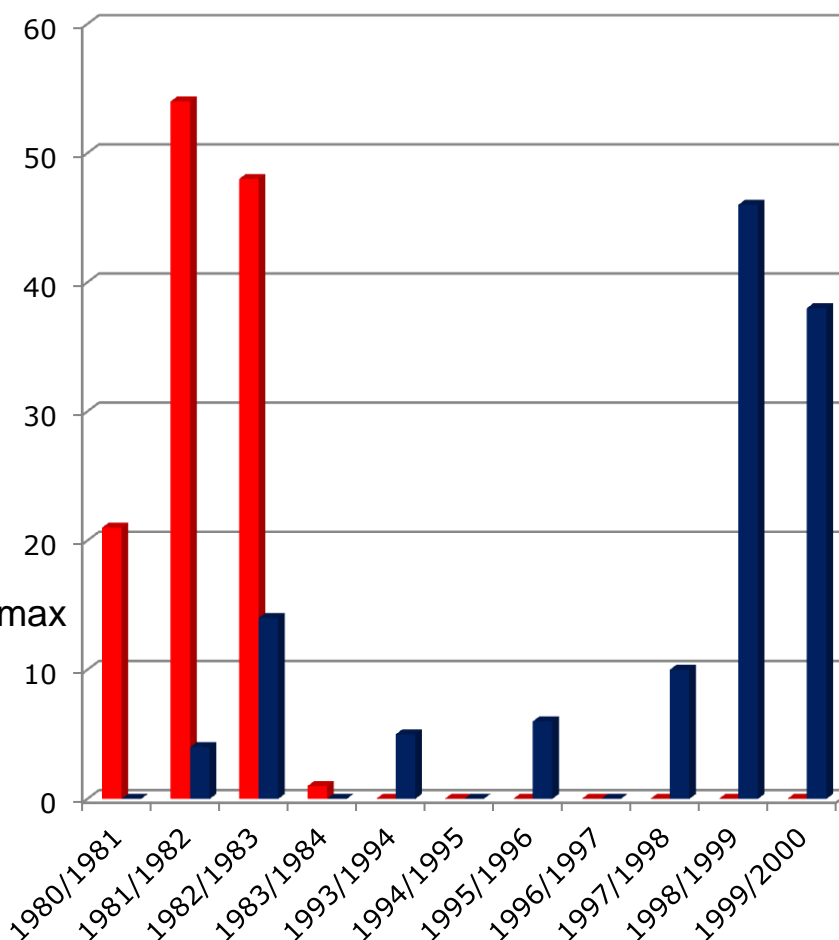
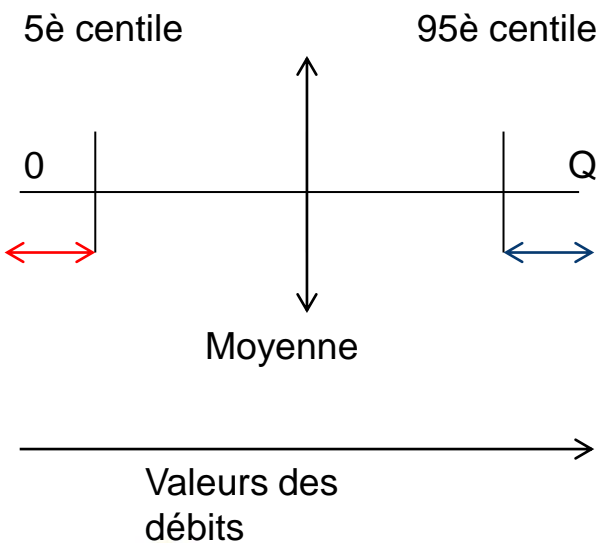
- **Années 80 et Années 90 mais présentant des trous.**

- **Pas de temps journalier.**

Analyse des données hydrométriques

- Premiers traitements pour apprécier la tendance : méthode inspirée de Drapeau et *al.*, 2011

Nombre de jours ayant des débits extrêmes (méthode des quantiles)



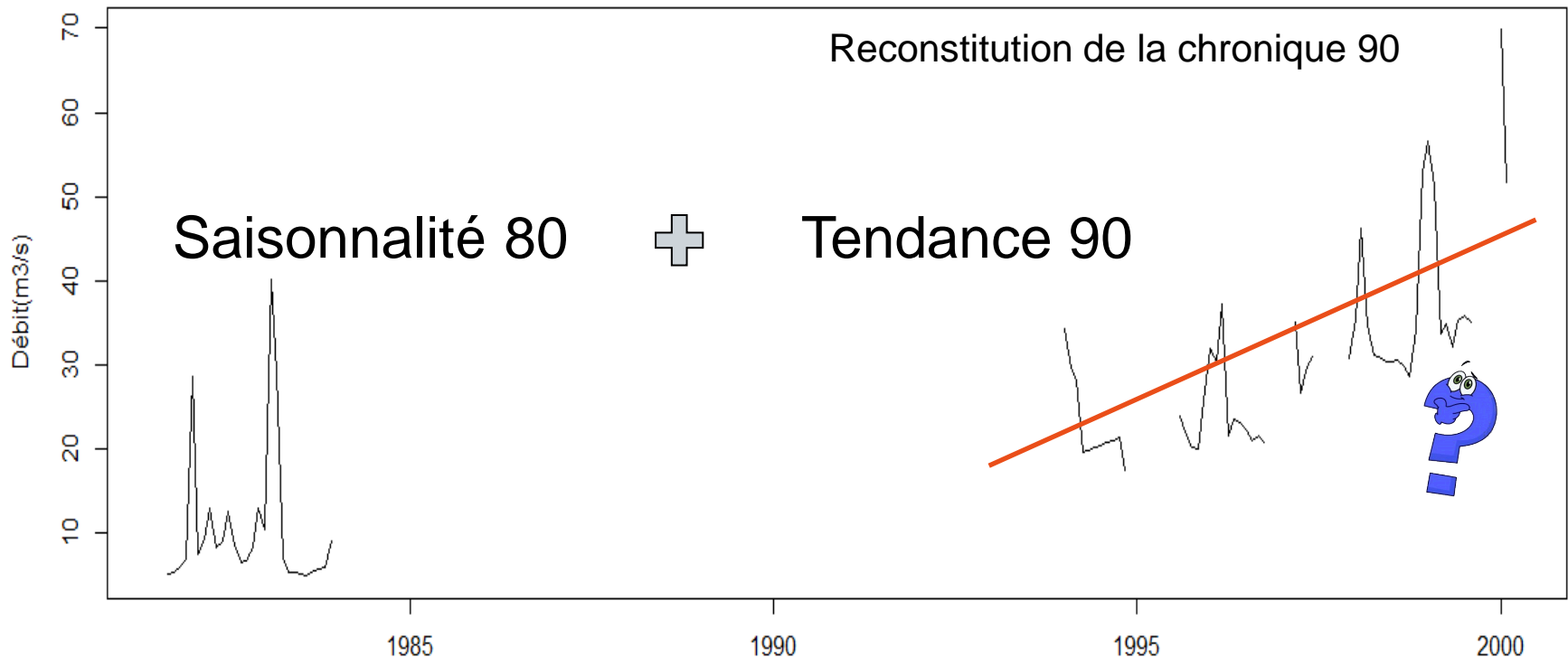
- Débit moyen journalier inférieur au 5è centile
- Débit moyen journalier supérieur au 95 centile



Analyse de la chronique de débits en tant que série temporelle. Reconstitution.

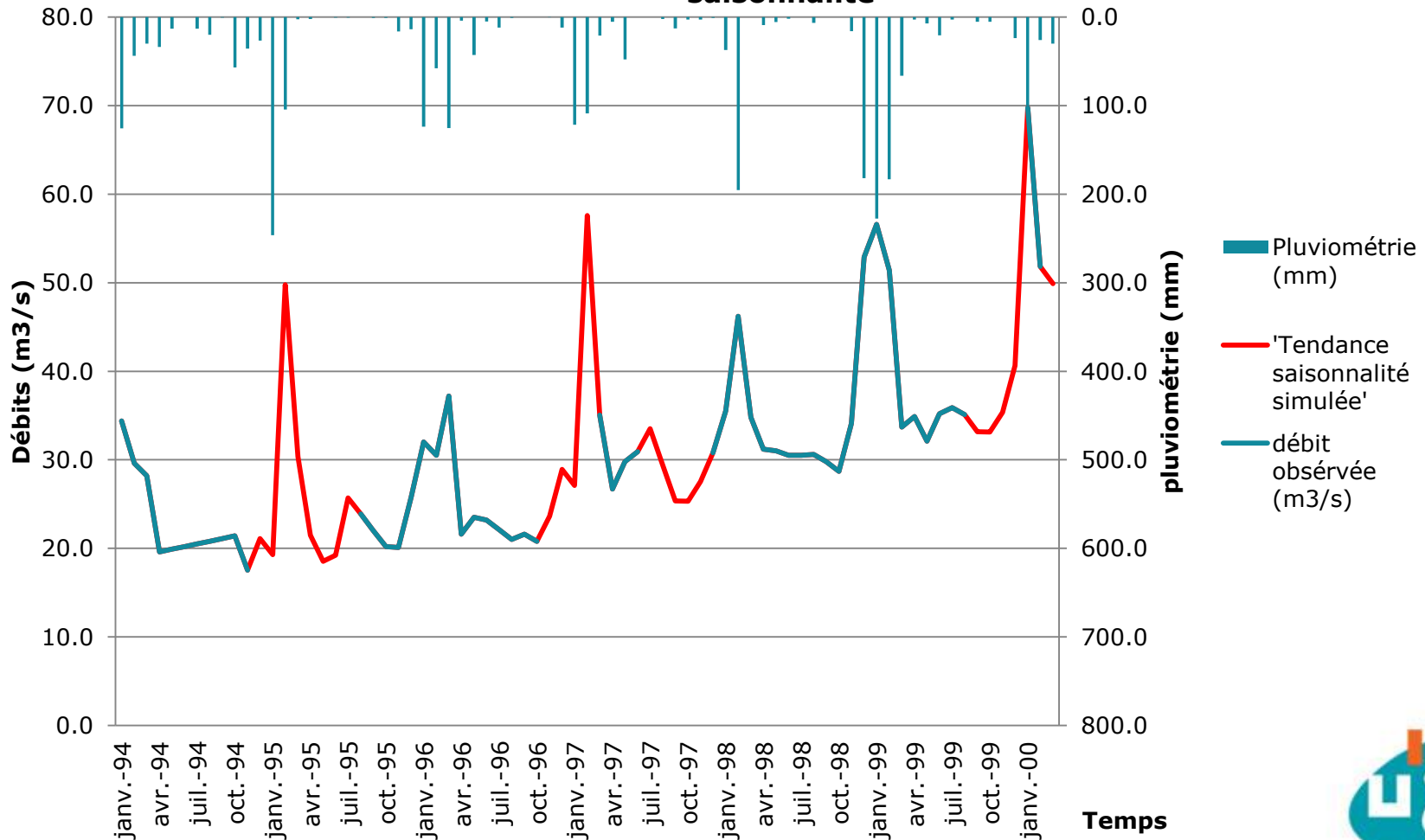
- **Les composantes d'une série temporelle :**

- **Tendance**
- **Saisonnalité**
- **Composante irrégulière**
- **Cycle**



Série 90 : Pluie et débit (observée + simulée)

Compensation des manquants par simulation de la tendance et de la saisonnalité

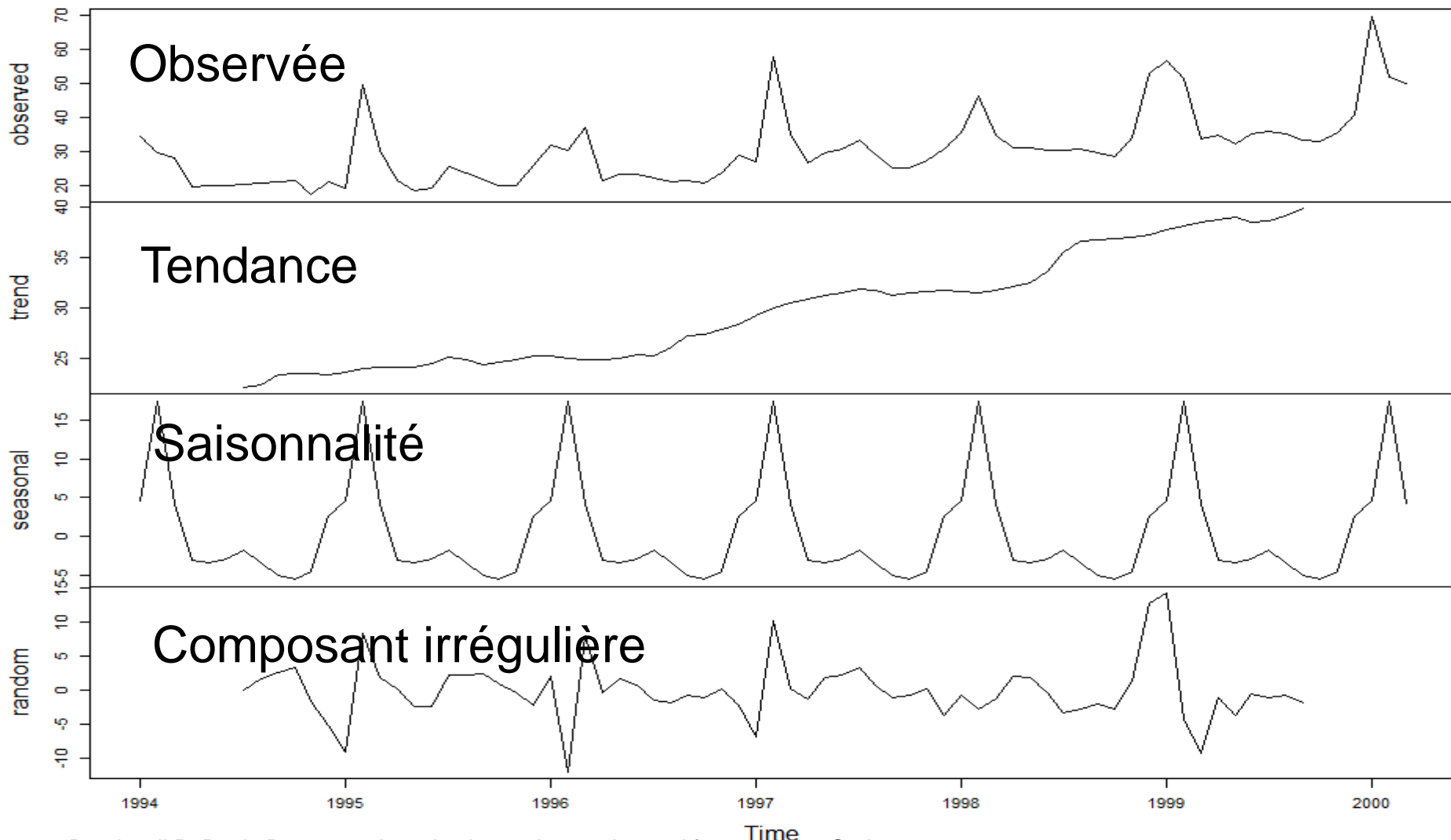


● **Obtention de la série simulée :**

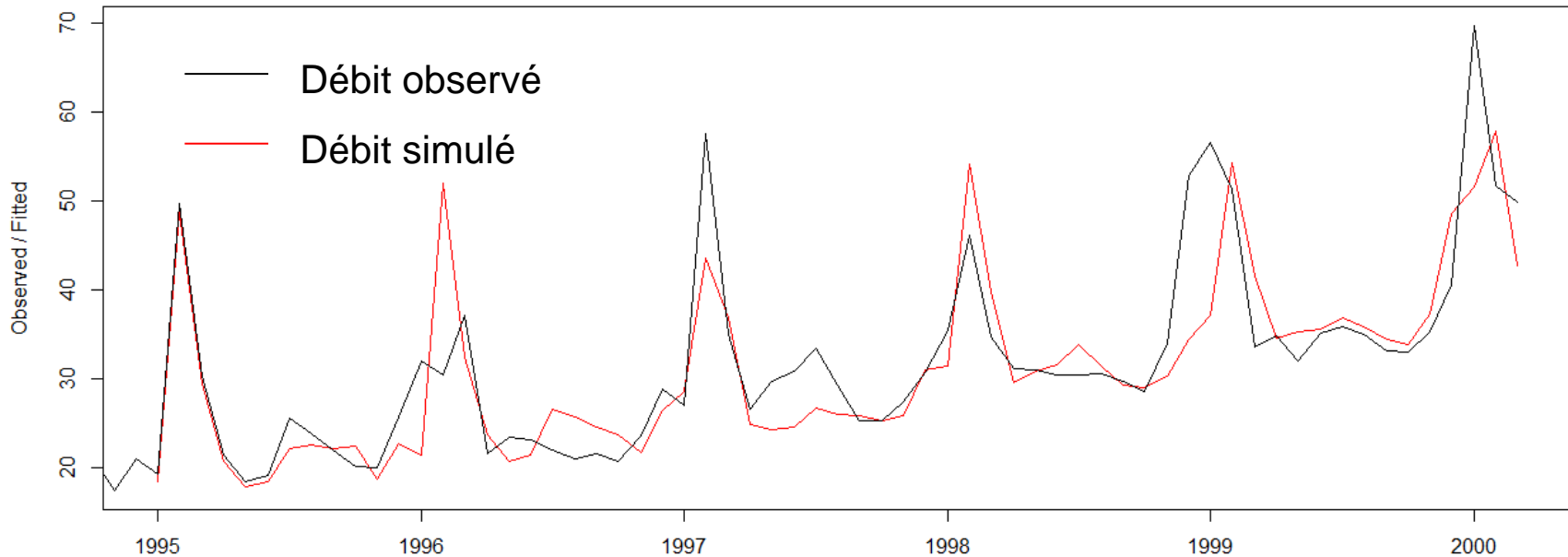
10 ■ **Saisonnalité de la série 80 + Tendence linéaire obtenue par régression à partir des données 90.**

Décomposition par Moyenne Mobile de la série 90 compensée

Décomposition par moyenne mobile avec le package cash chrono de R (Brocwell et Davis, 2011)



Holt-Winters filtering



- **Le lissage exponentiel est un modèle de prévision qui utilise les valeurs passées d'une série temporelle. Il se base sur un simple principe de moyenne pondérée des valeurs passées (Brocklebank et Dickey, 2003).**

$$\hat{y}_t = c_0 y_t + c_1 y_{t-1} + c_2 y_{t-2} + \dots$$

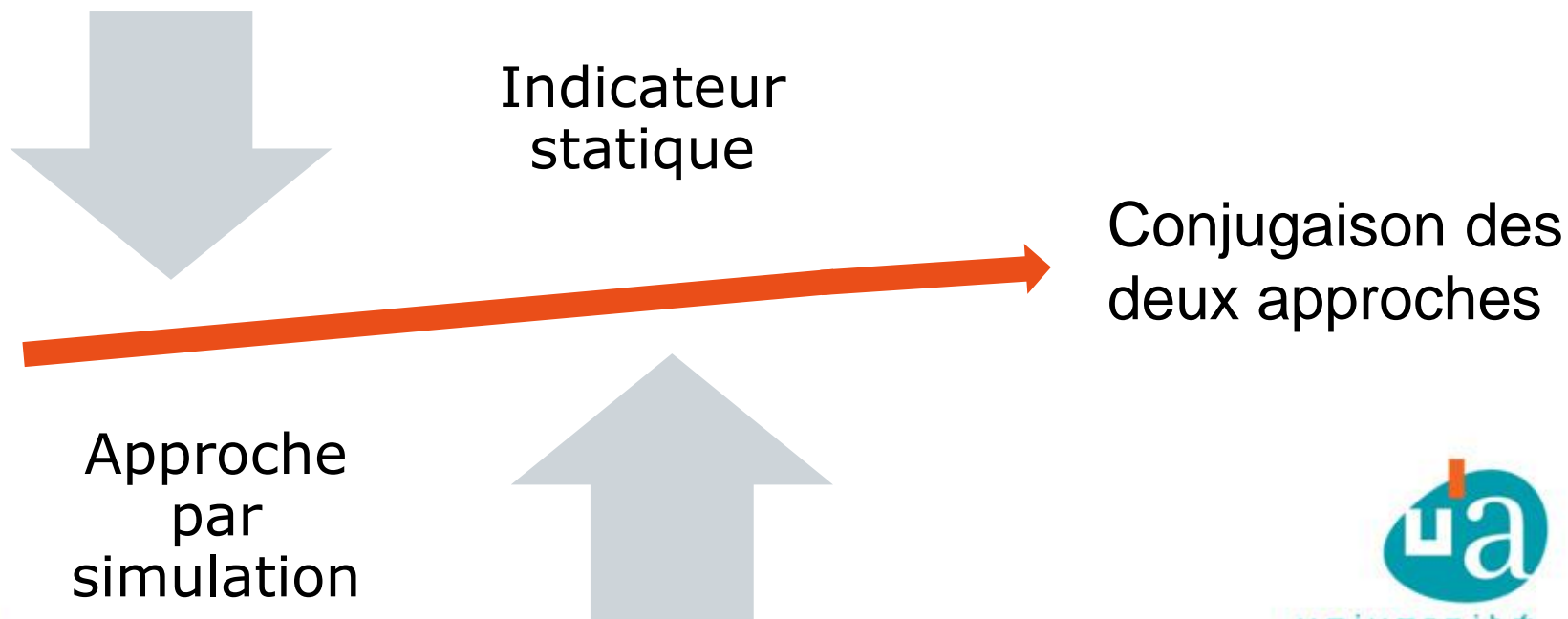
- Paramètres: $\alpha = 0.0104$ $\beta = 0.0104$ $\gamma = 0.0476$
- Etats initiaux: niveau initial = 22.7572 pente initial = -0.0028
- Coefficients saisonniers initiaux:

2.6497	-4.3324	-5.5198	-4.4642	-3.3641	-2.4488	-2.7982	-3.1532	-2.8113	5.5902	16.5488	4.1032
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	--------	---------	--------

CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE DE LA VILLE DE TOLIARA ET DE SES ENVIRONS FACE AUX INONDATIONS

Peut-on mesurer la vulnérabilité ?

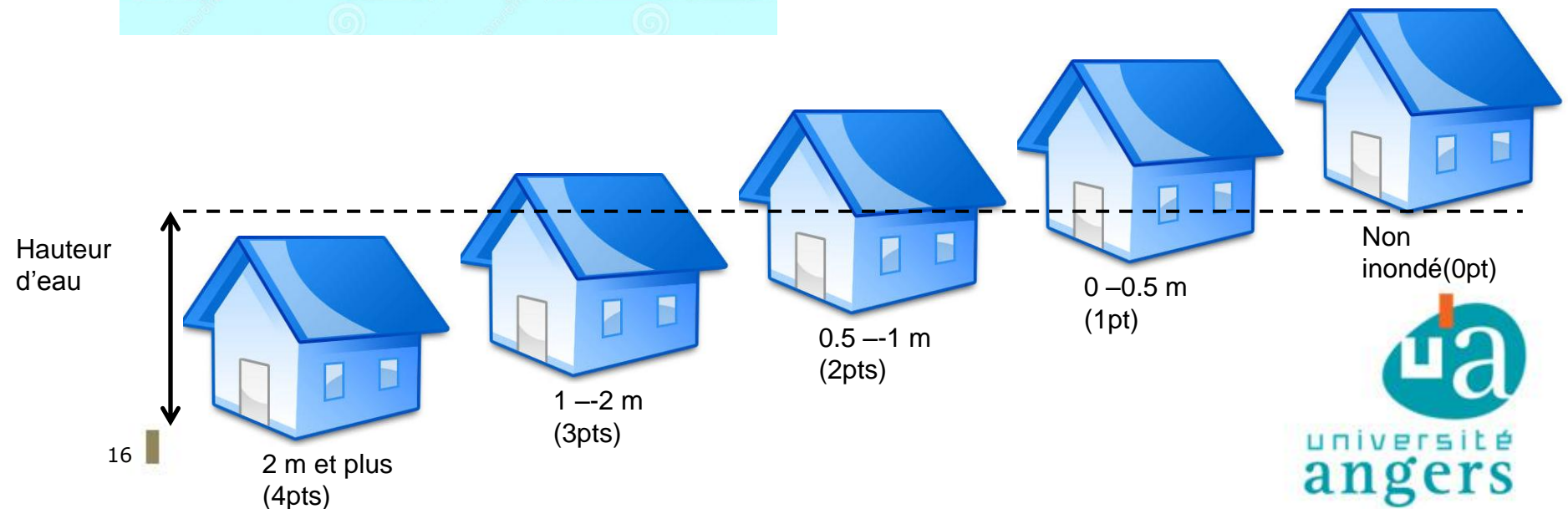
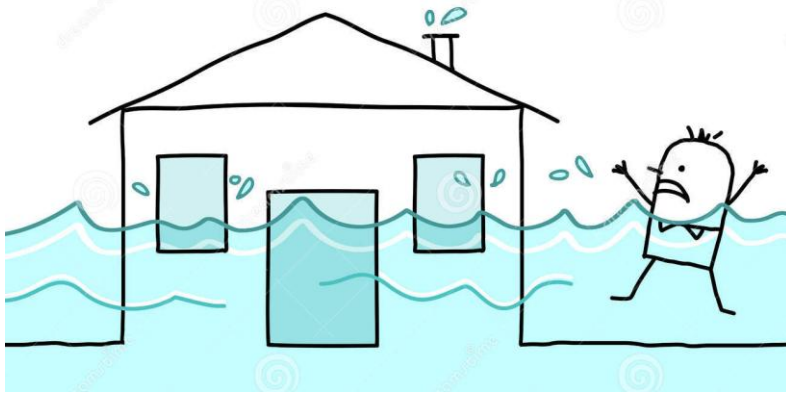
- En l'occurrence non car la vulnérabilité est un concept théorique.
- Mesurer est le processus qui vise à assigner un nombre à un phénomène – utilisation de variables.
- Fournir une méthode pour rendre ce concept observable – « Rendre le concept opérationnel » (Bernard 2013; Copi, Cohen, et McMahon 2011).
- la vulnérabilité est une mesure d' « une possibilité d'occurrence d'un dommage futur » : mise en avant de l'aspect **prospectif**.
- Deux méthodes proposées



L'INDICATEUR STATIQUE

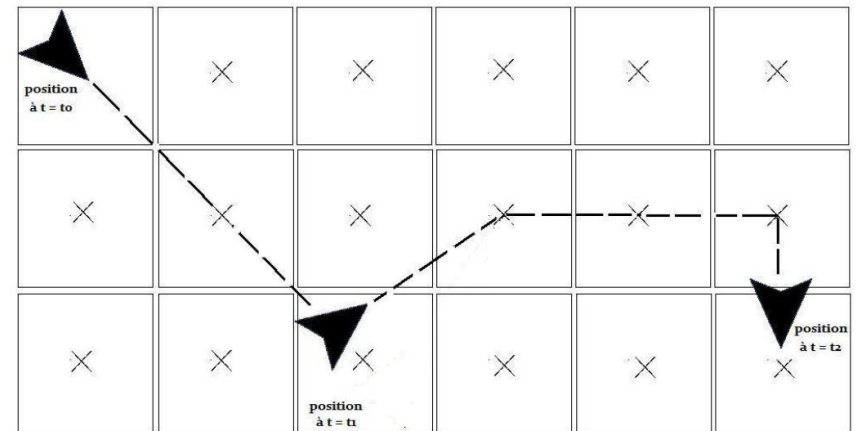
Hauteur d'eau potentiel

- Plus la valeur de la hauteur d'eau potentielle est grande, plus l'habitation est vulnérable.



Hauteur d'eau potentiel

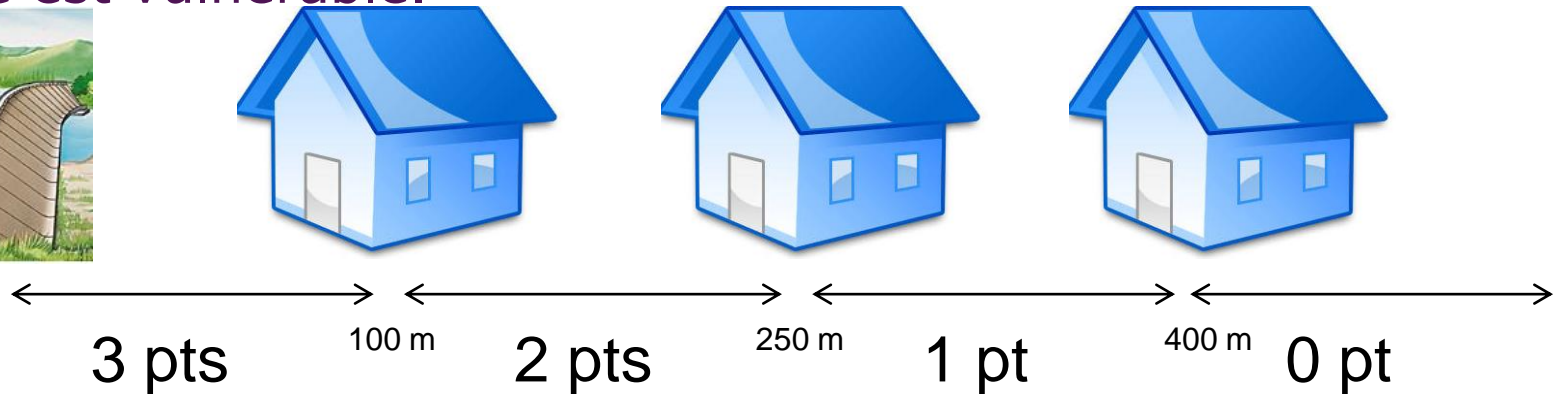
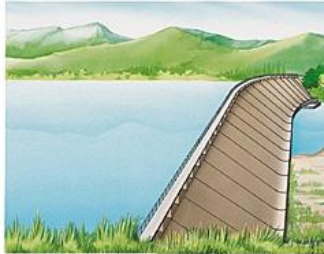
- **Modèle Numérique de Terrain : Aster (Résolution 30 m);**
- **Algorithme de détermination du h potentiel pour chaque maille (et pour chaque habitation);**
- **SMA :** Simulation d'inondation dynamique : déplacement topographique d'agents transmettant à chaque fois les hauteurs d'eau.
- **Algorithme utilisée dans la partie dynamique ;**



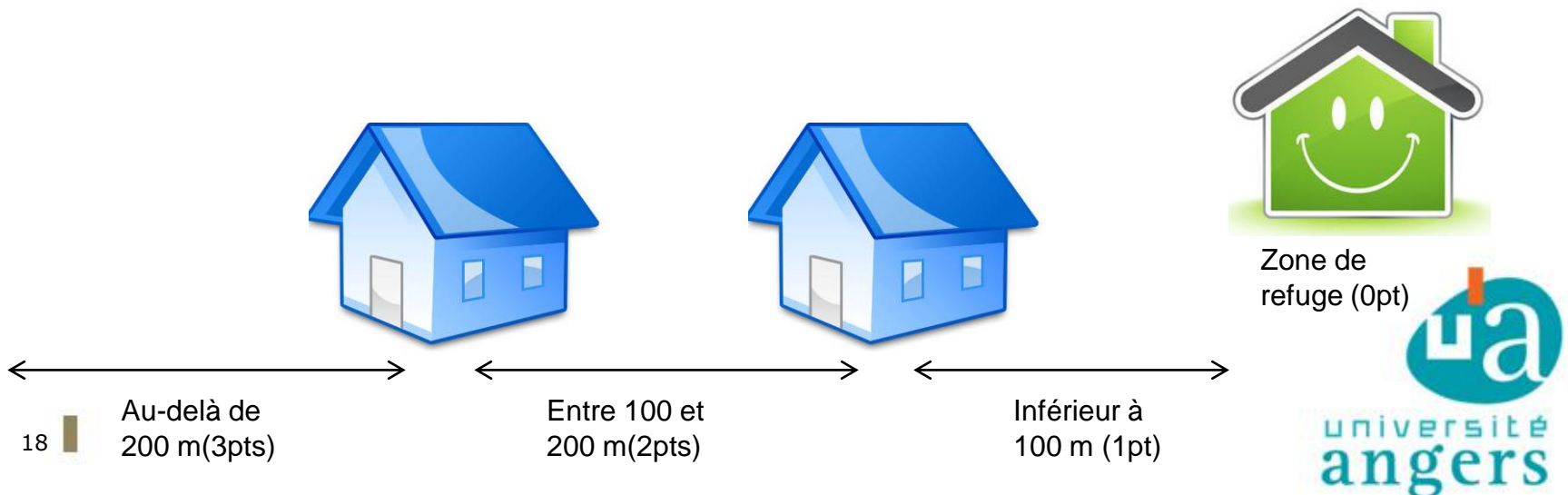
Simulation de l'écoulement par système multi-agent (Rakotoarisoa et al., 2014)

Critères de vulnérabilité

- Plus l'habitation est proche de la digue et de la rivière, plus elle est vulnérable.



- Plus l'habitation est proche d'une zone en hauteur, moins elle est vulnérable.



Typologie des habitations

- Les caractéristiques architecturales des habitations de Toliara sont des facteurs importants de vulnérabilité aux inondations.
- Identification des typologies par des habitations sur google earth (correspondance toit/ombre/Type).
- Validation sur le terrain – descente dans les villages avec l'aide des étudiants de Toliara.



Maison vondro (roseau) ou feta sans plancher et sans réel fondation (4pts)



Maison en bois ou en tôle (3pts)



Maison en briques (2pts)



Maison disposant d'un étage (1pt)

Indicateur statique = Somme des Critères



- V index = 1
- Construction de type solide à étage situé dans une zone non inondée.



- $1 < V \text{ index} < 6$
- Vulnérabilité certaine face au risque d'inondation : inadaptation du bâti OU valeur élevée des hauteurs d'eau potentielles.

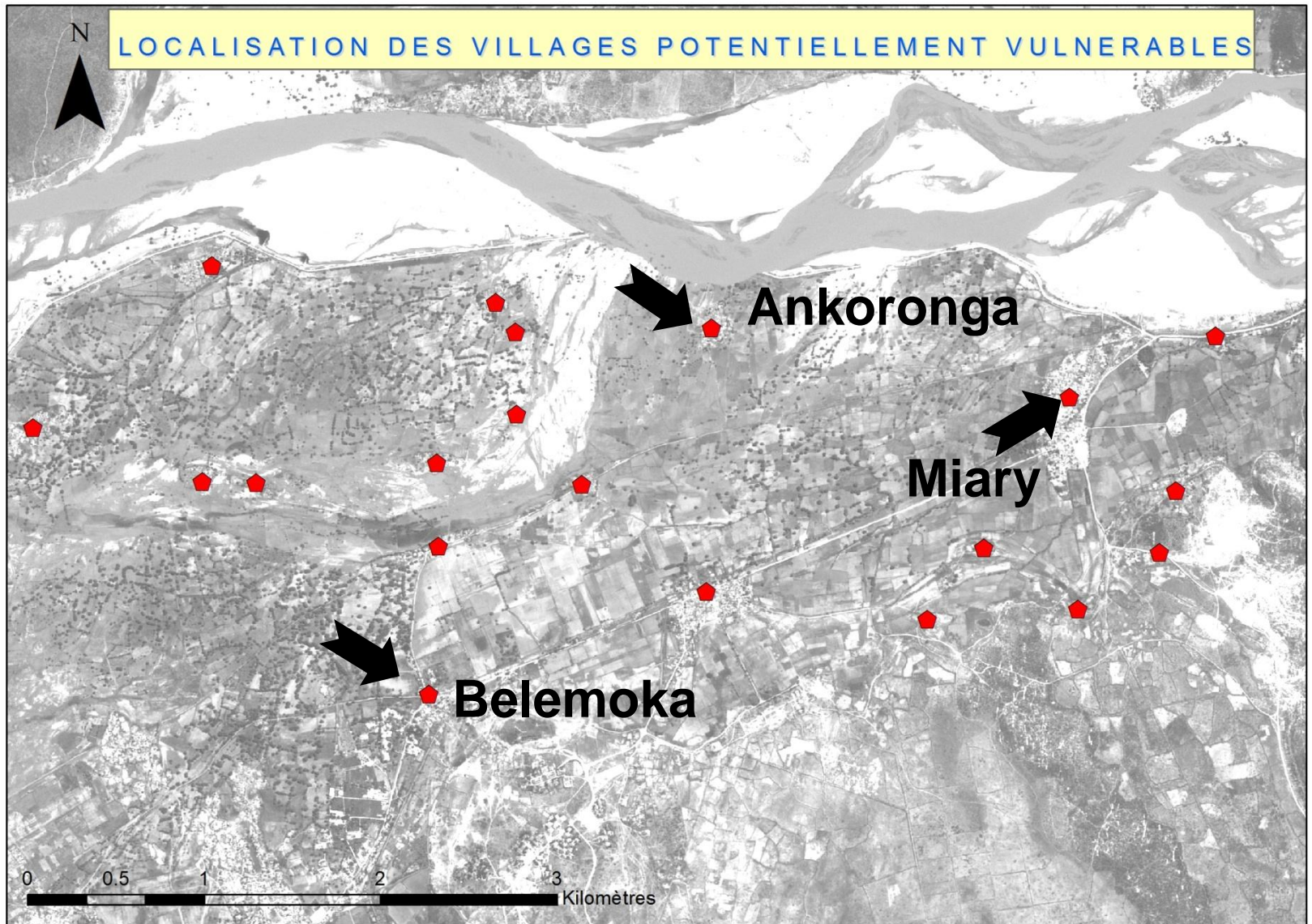


- $6 < V \text{ index} < 10$
- Vulnérabilité forte face au risque d'inondation : inadaptation du bâti ET valeur élevée des hauteurs d'eau potentielles.

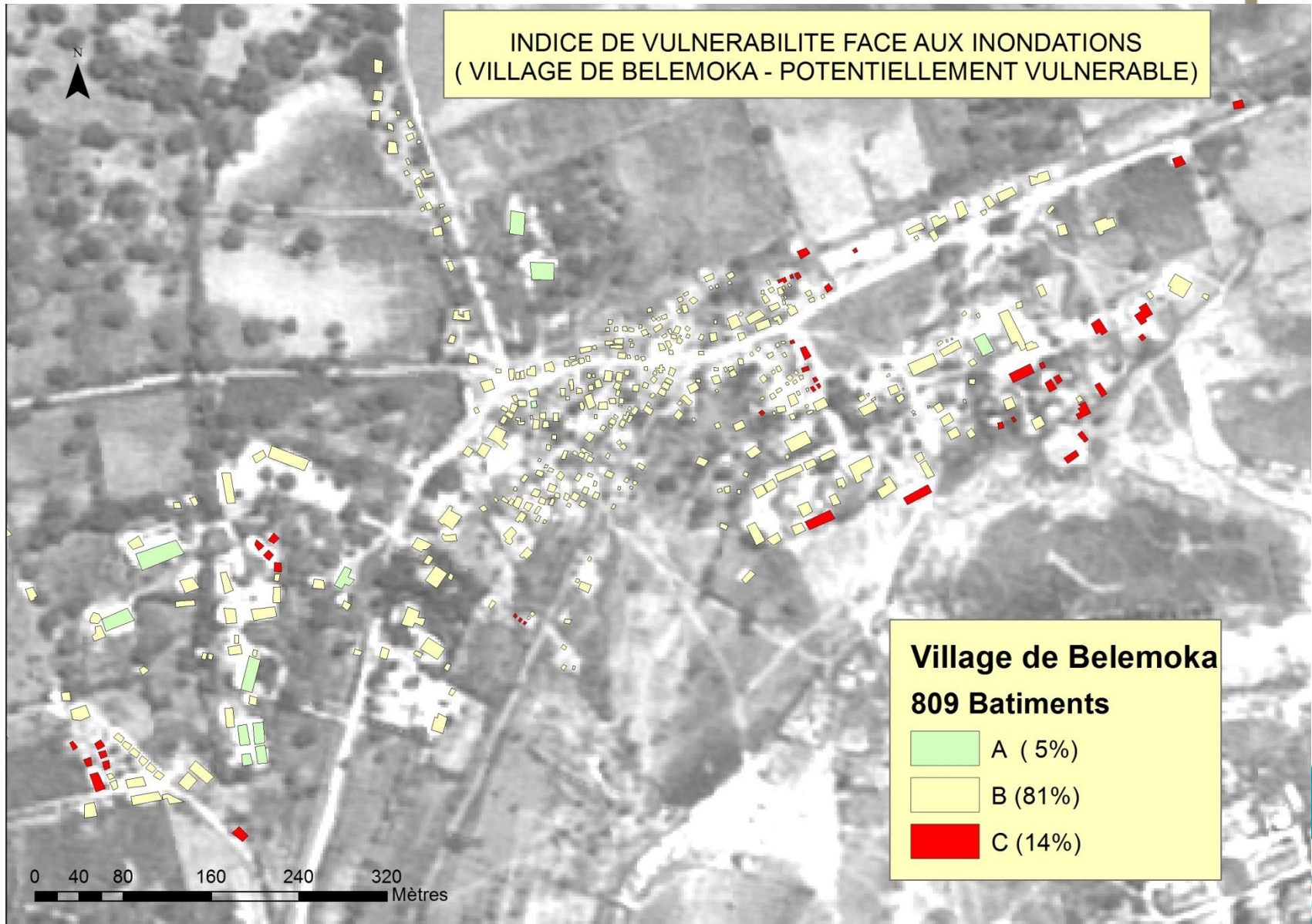


- V index > 10.
- Vulnérabilité extrêmement forte avec risque de décès.

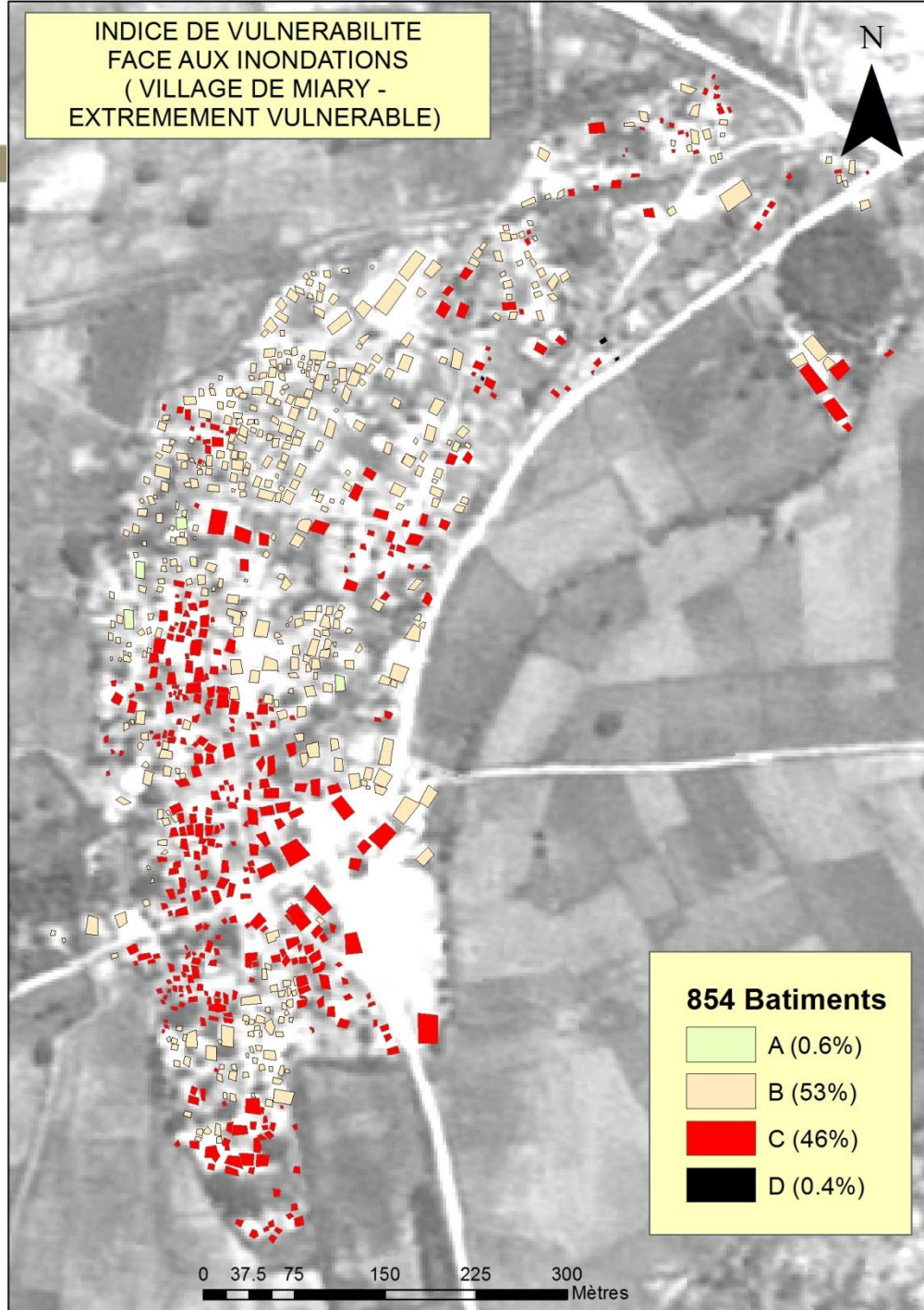
LOCALISATION DES VILLAGES POTENTIELLEMENT VULNERABLES



VILLAGE DE BELEMOKA

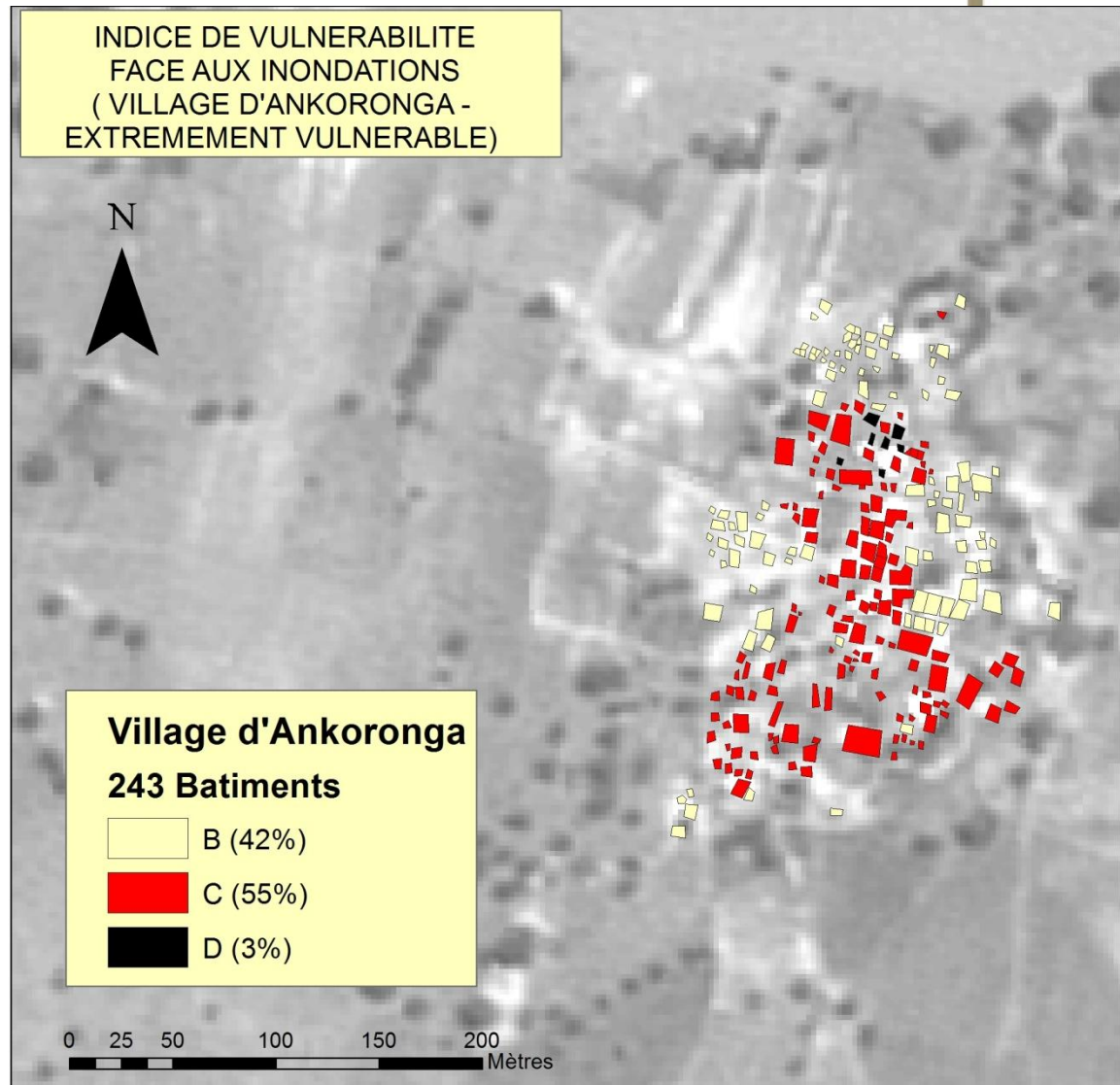


INDICE DE VULNERABILITE FACE AUX INONDATIONS (VILLAGE DE MIARY - EXTREMEMENT VULNERABLE)

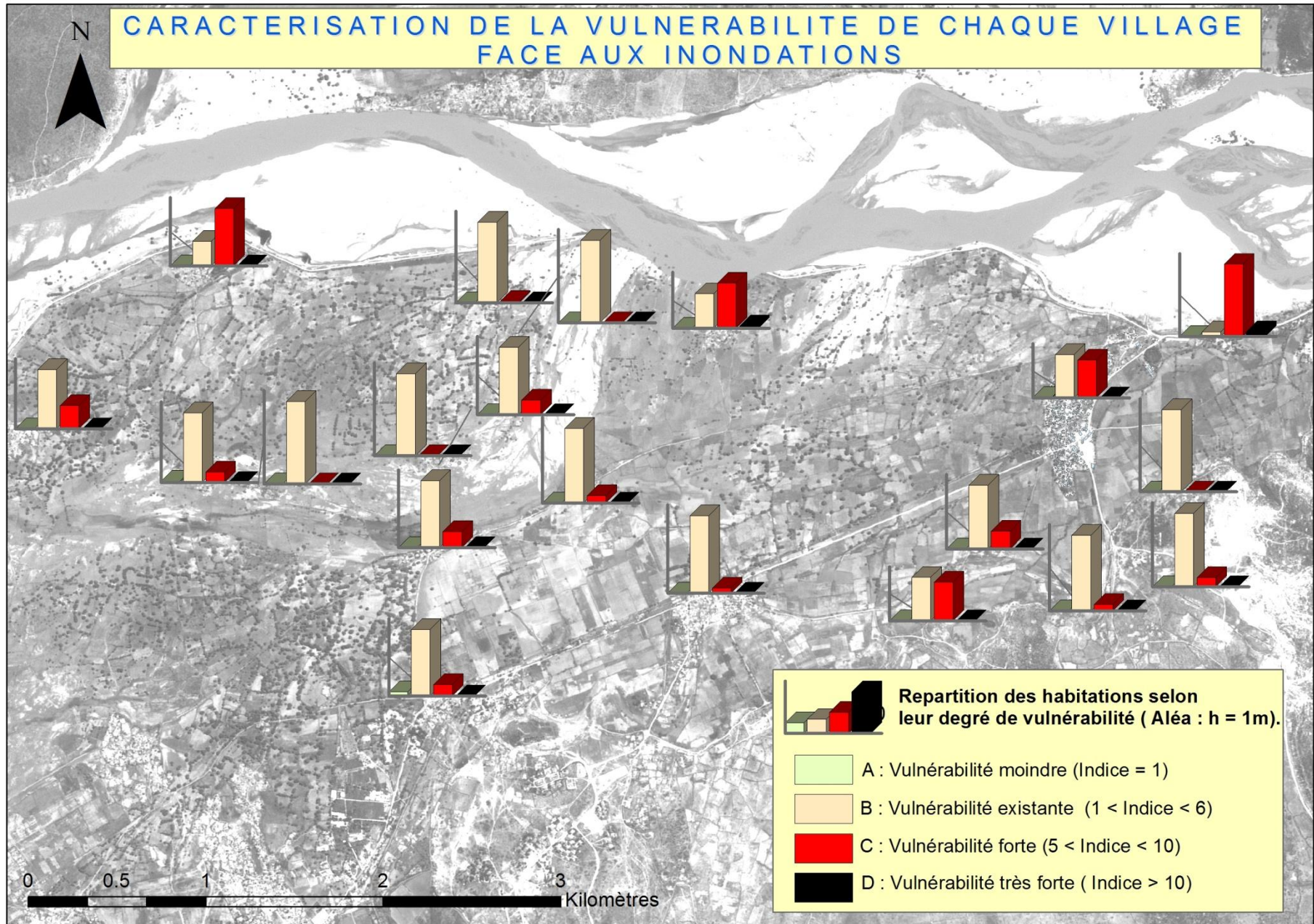


V INDEX : VILLAGE D'ANKORONGA

- **Village extrêmement vulnérable**
- **A proximité de la rupture de digue lors du passage de Haruna en 2013.**



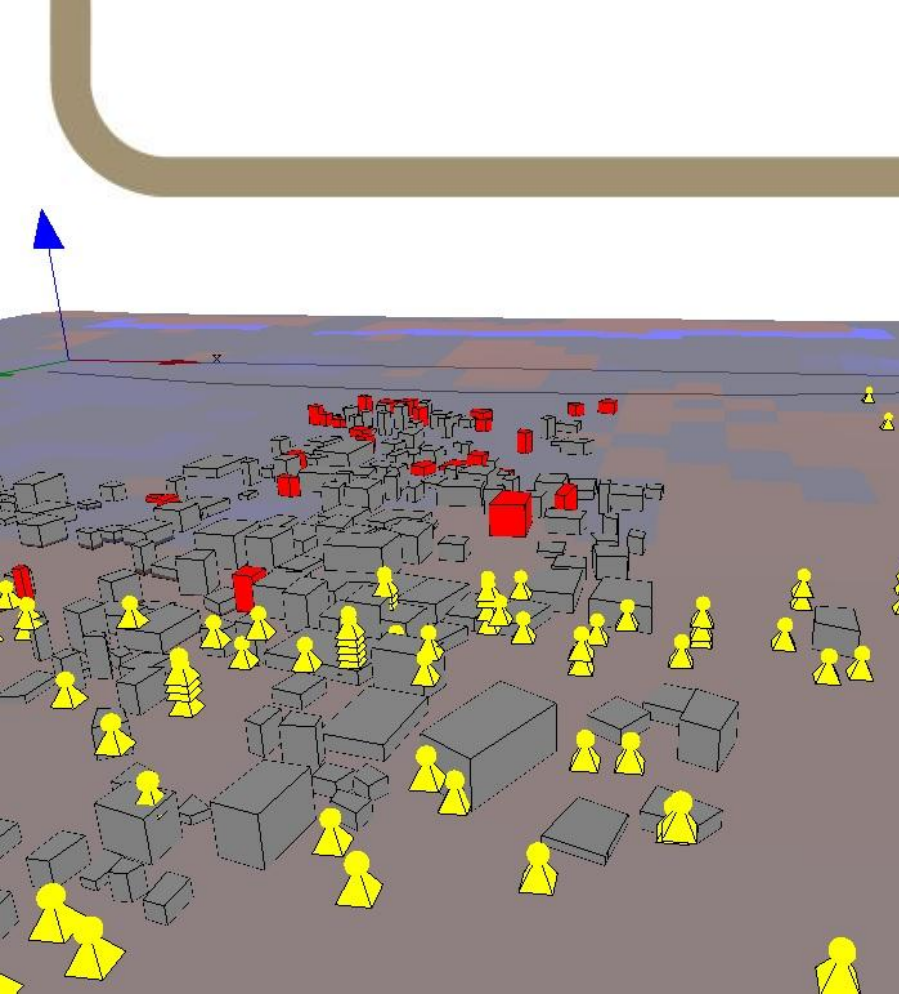
Résultats préliminaires pour aléa h = 1m



- **Les indicateurs de vulnérabilité** doivent refléter la **possibilité d'occurrence d'un état futur (Hinkel 2011).**

La plupart des indicateurs usuels actuels n'indiquent malheureusement que l'état actuel (Pat et al., 2008 ; Ionescu et al., 2009).

- Développer un indicateur de vulnérabilité revient donc à essayer de construire **un modèle de prédiction.**
- Un lien avec les approches par simulation ?!



**FLEE_ Un simulateur
d'inondation à base de
système multi-agent
pour évaluer la
vulnérabilité**

L'INDICATEUR DYNAMIQUE PAR SIMULATION

But du modèle

- Un modèle qui simule **un évènement d'inondation catastrophique fictif** afin de répondre aux questions :
- Quel est l'impact des inondations provoquées par la crue de Fiherenana sur les villages environnants, la ville de Toliara, les habitants, et leurs habitations ?
- Comment peut-on évaluer leur vulnérabilité ?



Les entités principales

- **Flux :**

Vitesse

Hauteur d'eau

- **Habitants :**

Vitesse

Capacité de perception

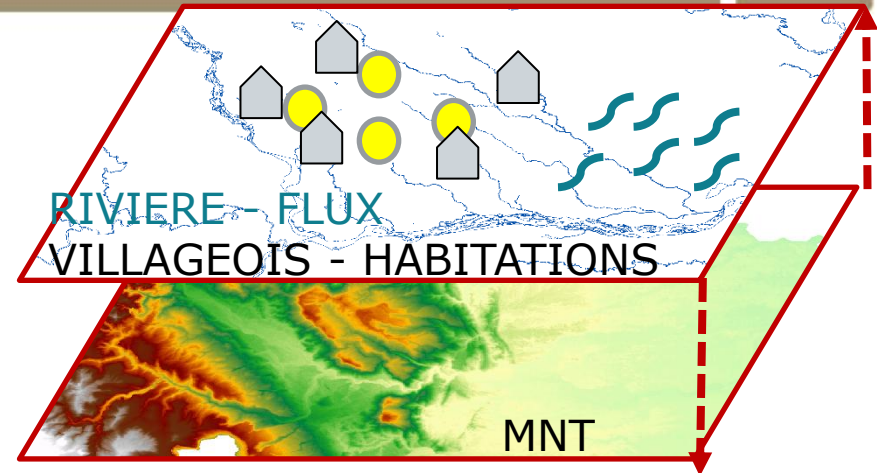
- **Habitations :**

Degré de vulnérabilité (en fin de simulation)

- **Agent cellule terrain :**

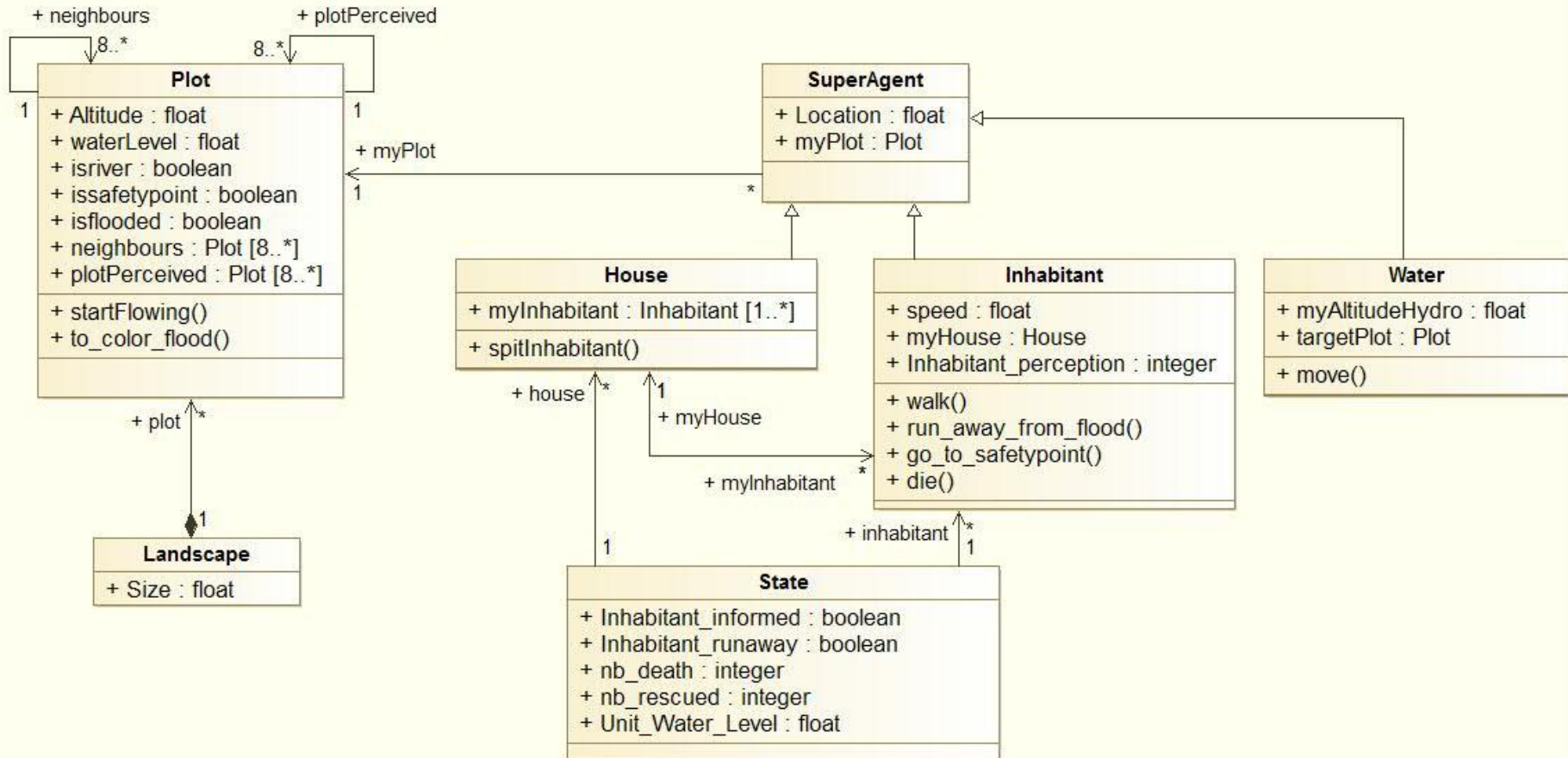
Altitude

Élévation hydraulique (altitude +
somme des hauteurs d'eau des agents
flux situées sur la cellule)



université
angers

Diagramme de classe de l'état actuel du modèle



Processus principaux

Déplacement du flux

Déplacement des habitants

FIN DE SIMULATION : Assignation du degré de vulnérabilité des habitations

- Si le villageois se retrouve sur un zone non inondée: + 0 de vulnérabilité à son habitation.

- Si le villageois est pris dans l'eau : + 1 de vulnérabilité à son habitation.

- Si le villageois est décédé : + 2 de vulnérabilité à son habitation.



Processus principaux

- **Déplacement du flux :**
 - Création d'agents hydrologiques sur les cellules qui intersectent la rivière (pendant la durée de la **montée des eaux** : 30 minutes) – hauteur de remontée d'eau : 0.5m .
 - Déplacement des agents flux vers la cellule ayant l'élévation hydraulique la plus petite. L'agent flux se déplace avec une vitesse donnée – vitesse de manning. **Ecoulement des eaux.**
 - Quand l'agent flux emporte avec lui sa quantité d'eau pour alimenter la cellule sur laquelle il se trouve.



Processus principaux

- **Déplacement des agents villageois - différent selon les scénarios :**

- Si la personne est sur une zone non inondée, elle se déplace, selon le scénario donné, avec une vitesse propre.
- Si la personne est prise dans l'eau < 2m : sa vitesse de déplacement diminue.
- Si la personne est prise dans l'eau > 2m : elle meurt.

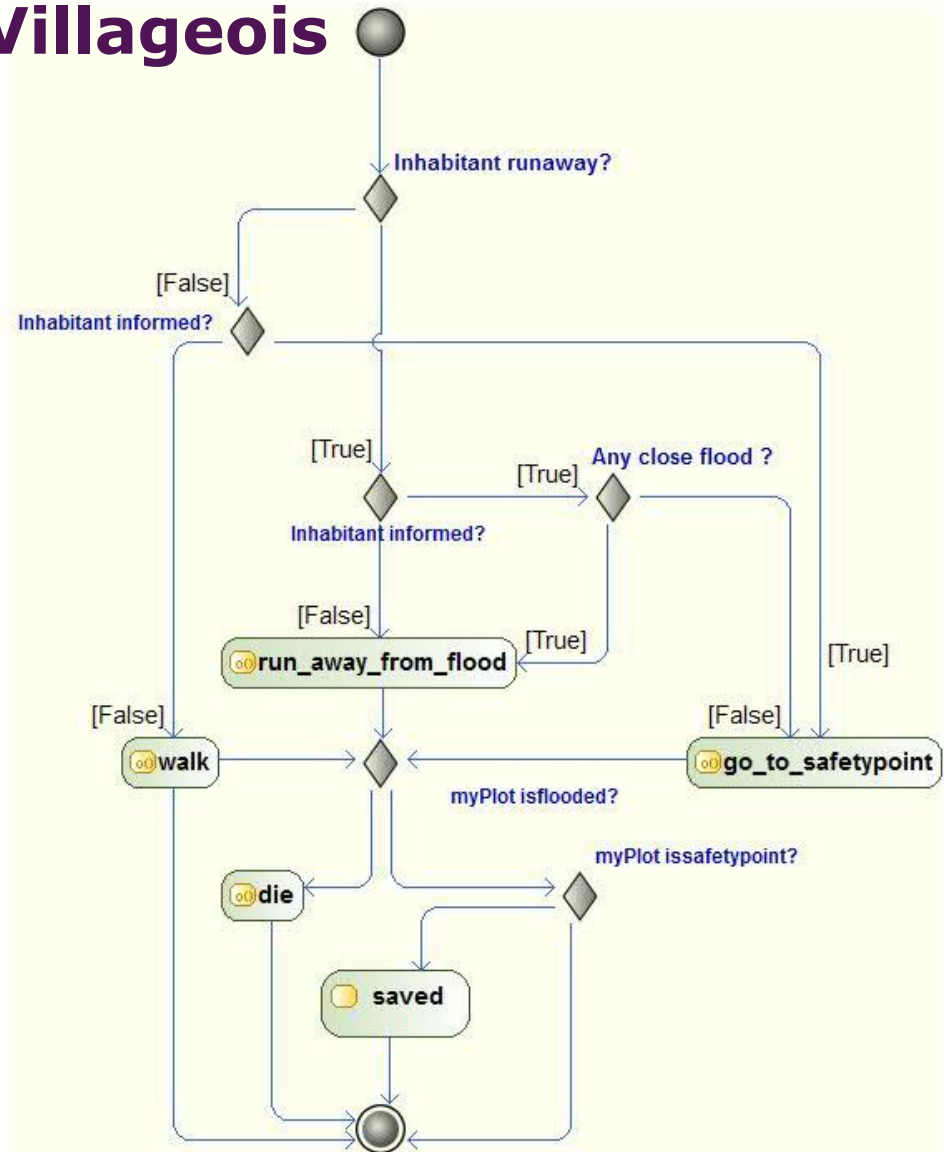


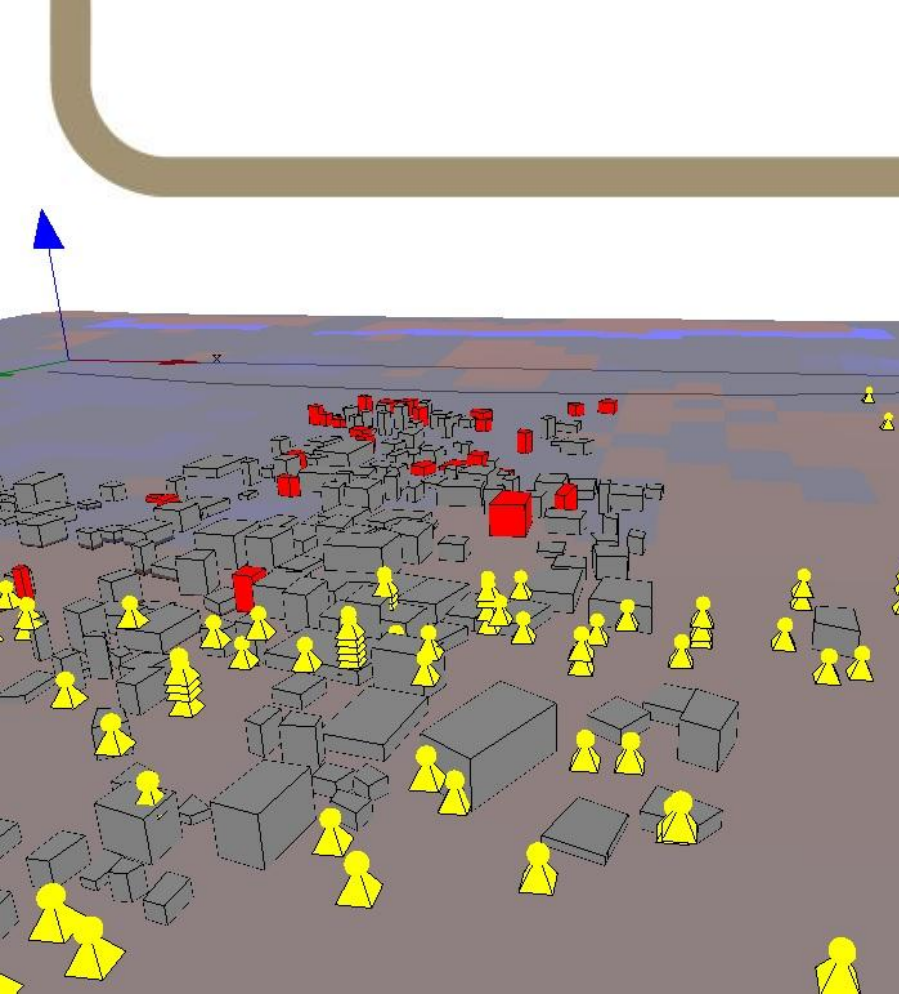
Diagramme d'activité pour un exemple de scénario

Flux



Villageois





GAMA
...modeling made easy...

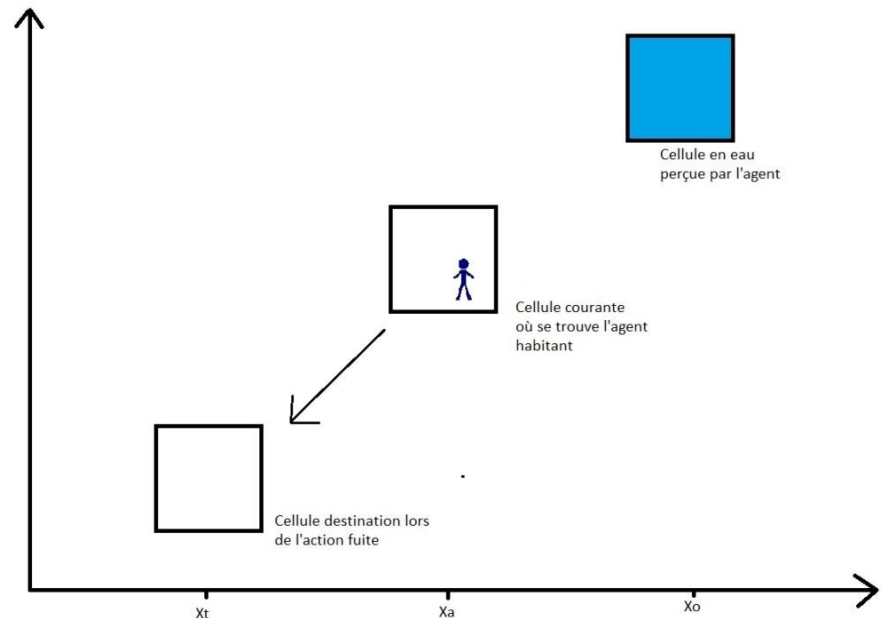


SCENARIOS ET APERÇU DES PREMIERS RÉSULTATS

Scenarior 1

- **Fuite sans but précis** : dès qu'un villageois aperçoit de l'eau dans sa zone de perception, il se déplace vers la direction opposée (il ne sait pas où se trouve la zone de refuge).

- Fuite de l'inondation :
Direction : opposée à la cellule la plus proche qui contient un ou des agents hydrologiques – **dans un rayon qui dépend de sa capacité de perception**.
Vitesse : vitesse d'un individu en situation de panique ($3 < V < 4 \text{ m/s}$).



Scenario 2

- **Fuite contrôlée** : Dès qu'un villageois aperçoit de l'eau dans sa zone de perception, il se déplace vers une zone de refuge (il sait où se trouve la zone de refuge, effet de la **sensibilisation** sur la connaissance du risque).
 - Déplacement vers une zone de refuge.
Direction : une des zones de refuges
Vitesse : vitesse d'un individu en situation de stress (2m/s).



université
angers

Scenario 3

- **Fuite collective** : dès qu'un villageois aperçoit de l'eau dans sa zone de perception, il prévient tout le monde qu'il y a montée des eaux et tout le monde (y compris lui) se déplace vers une zone de refuge (il sait où se trouve la zone de refuge). Effet de la **communication**.

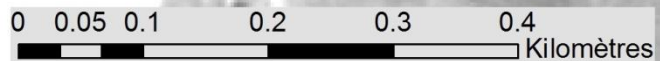
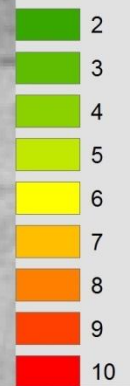


Indicateur de vulnérabilité



Rivière Fiherenana

Indicateur Statique

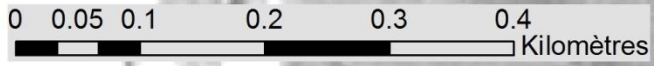
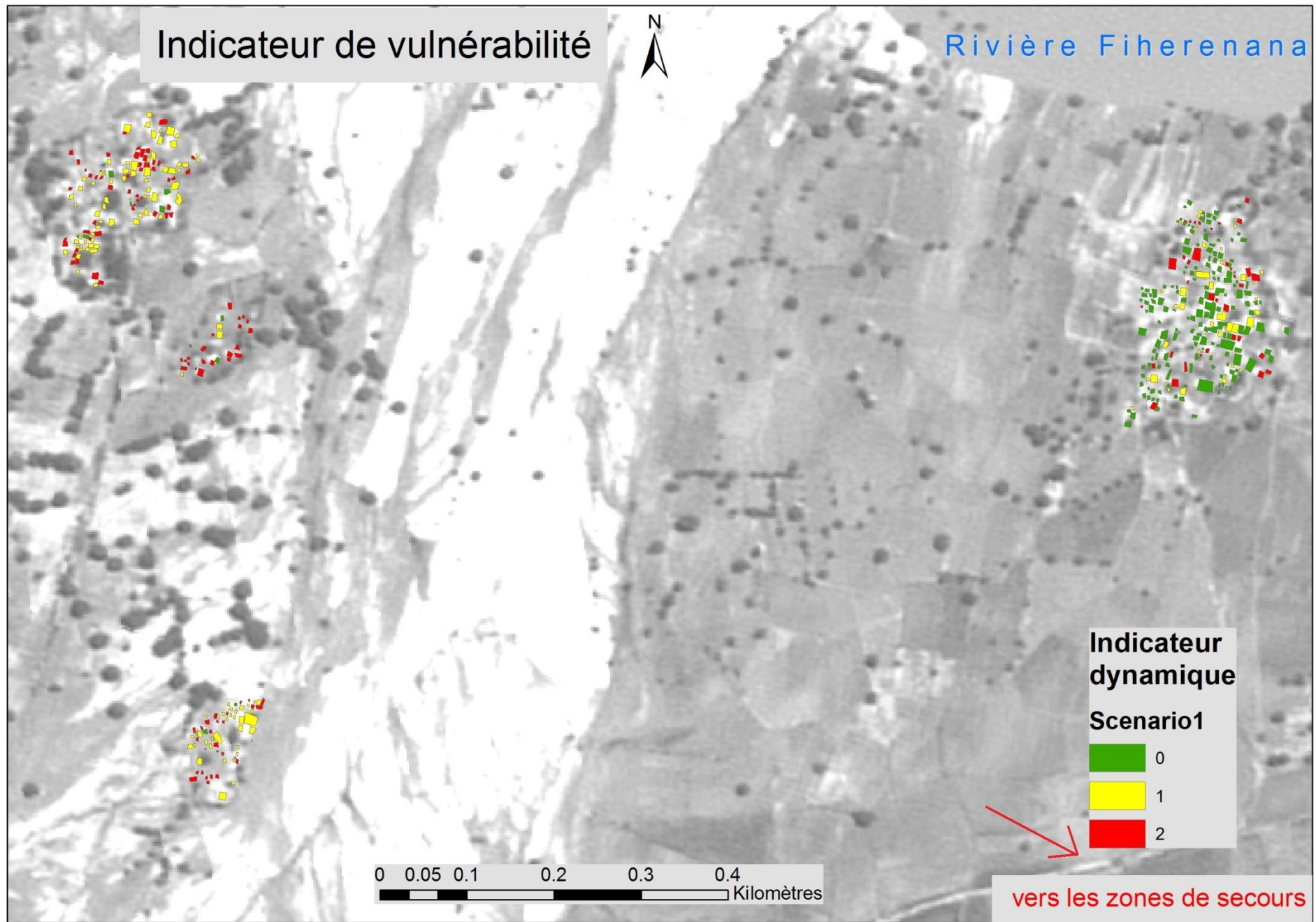


vers les zones de secours

Indicateur de vulnérabilité



Rivière Fiherenana



Indicateur dynamique

Scenario1

- 0 (Green)
- 1 (Yellow)
- 2 (Red)

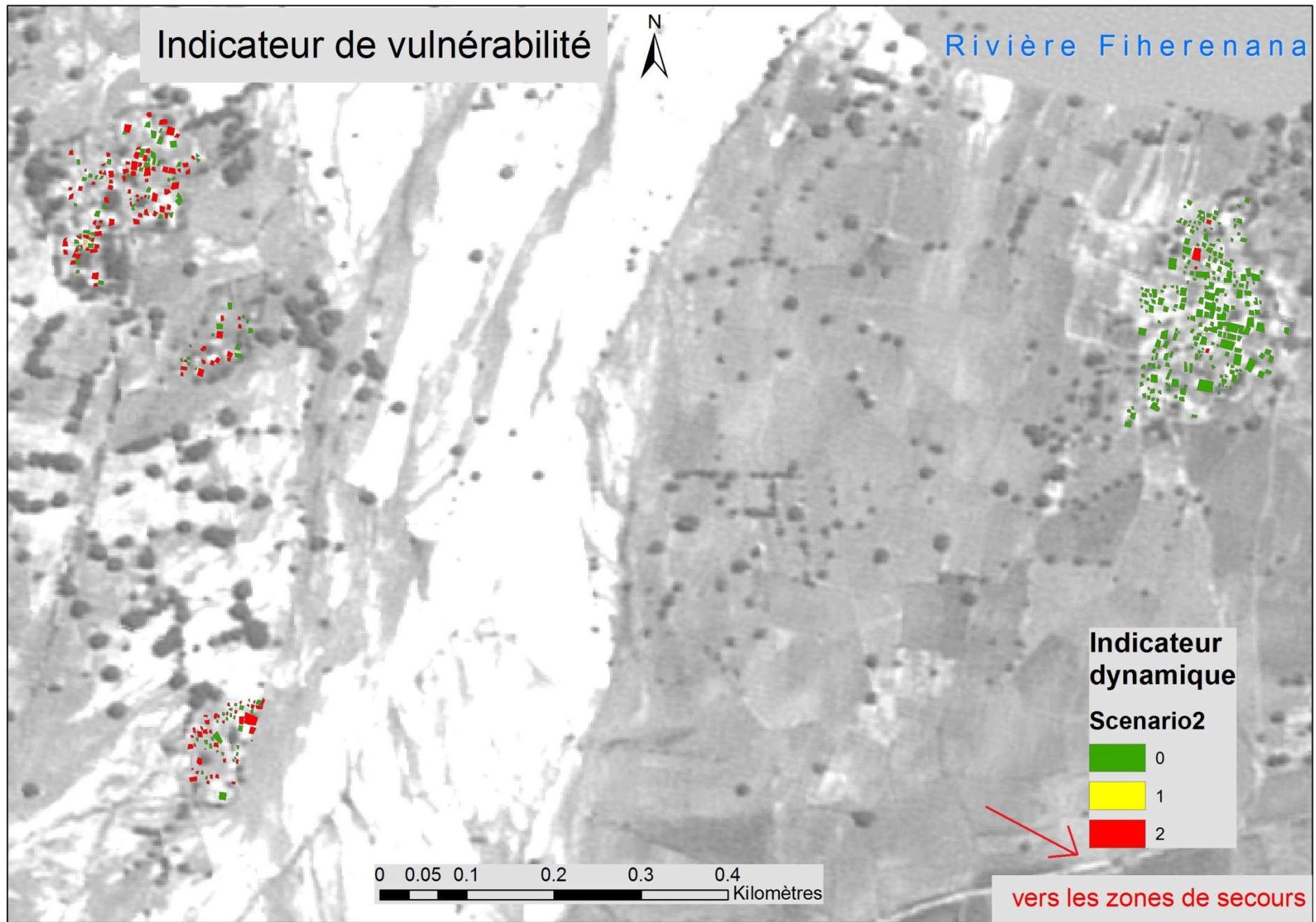


vers les zones de secours

Indicateur de vulnérabilité






Rivière Fiherenana



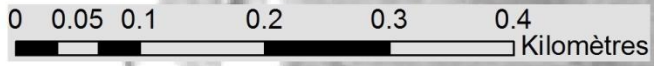
Indicateur dynamique

Scenario2

-  0
-  1
-  2



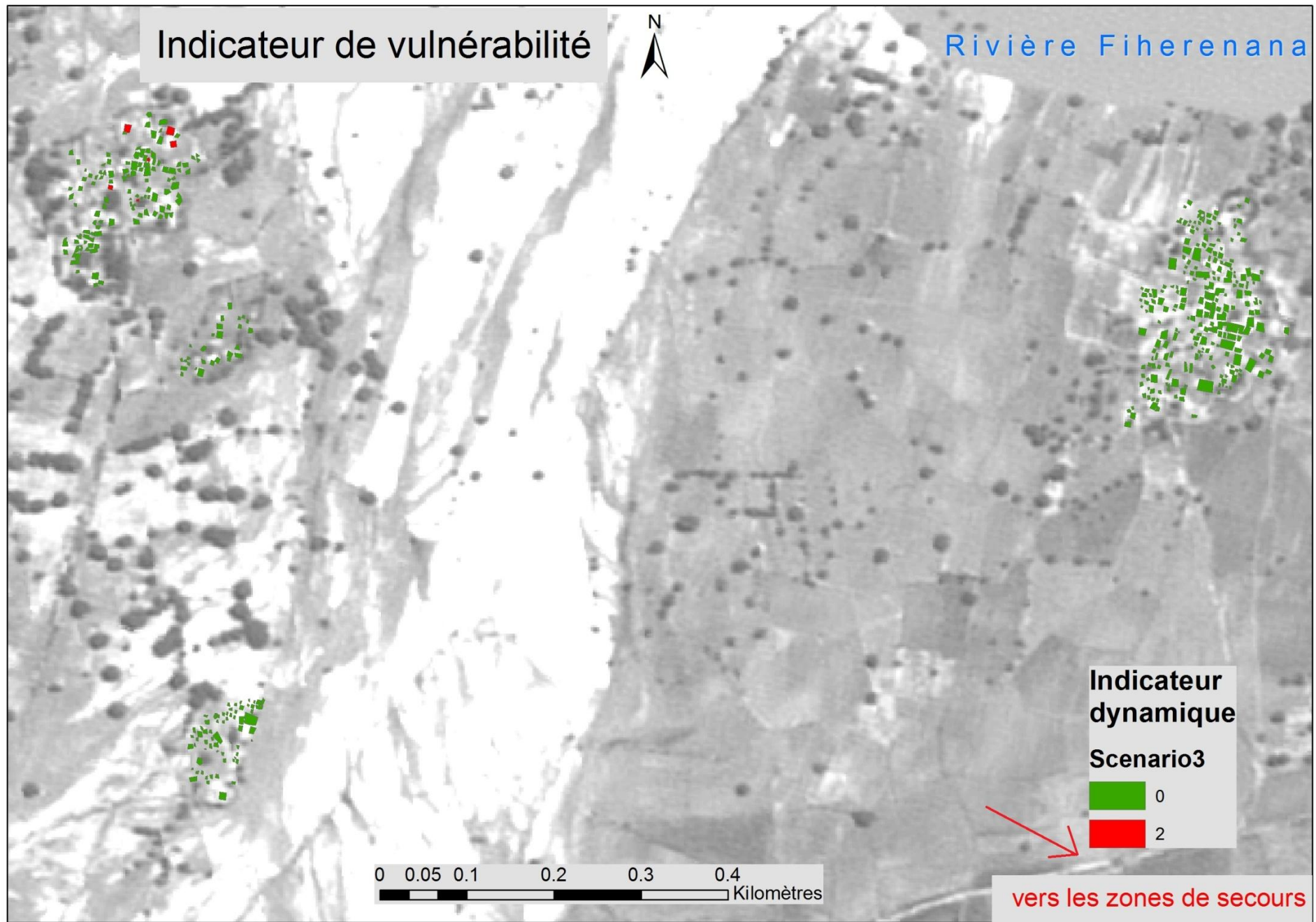
vers les zones de secours



Indicateur de vulnérabilité



Rivière Fiherenana

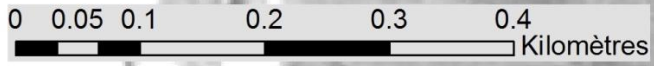


Indicateur dynamique

Scenario3

0

2

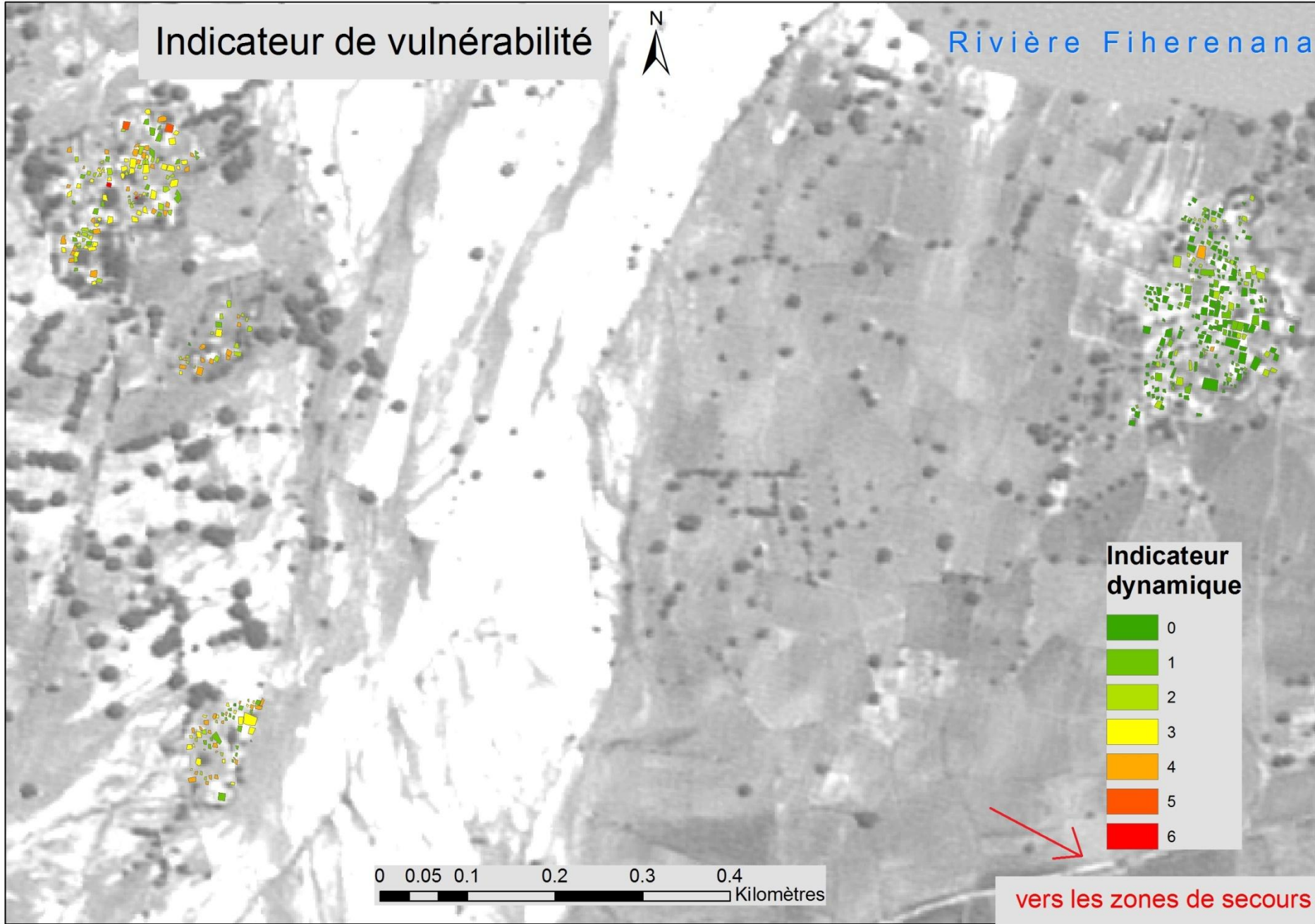


vers les zones de secours

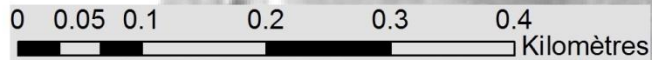
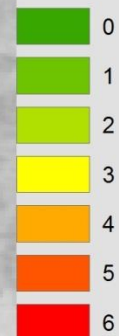
Indicateur de vulnérabilité



Rivière Fiherenana



Indicateur dynamique



vers les zones de secours

Avantages du couplage des deux approches

- Les simulations permettent de mettre en place et d'observer des **scenarios** qui seraient impossible à exécuter dans la cas réel.
- Possibilité de validation à travers des enquêtes et observations terrains suite à des évènements qui se sont réellement produits (haruna).
- Les résultats des simulations peuvent devenir un (ou plusieurs) critères de vulnérabilité , combiné avec l'indicateur statique, moyennant les bonnes pondérations.
- La plate-forme gama et la langage gaml:
 - Manipulation aisée de la combinaison Géographie/SIG / SMA.
 - Gestion de plusieurs topologie en même temps

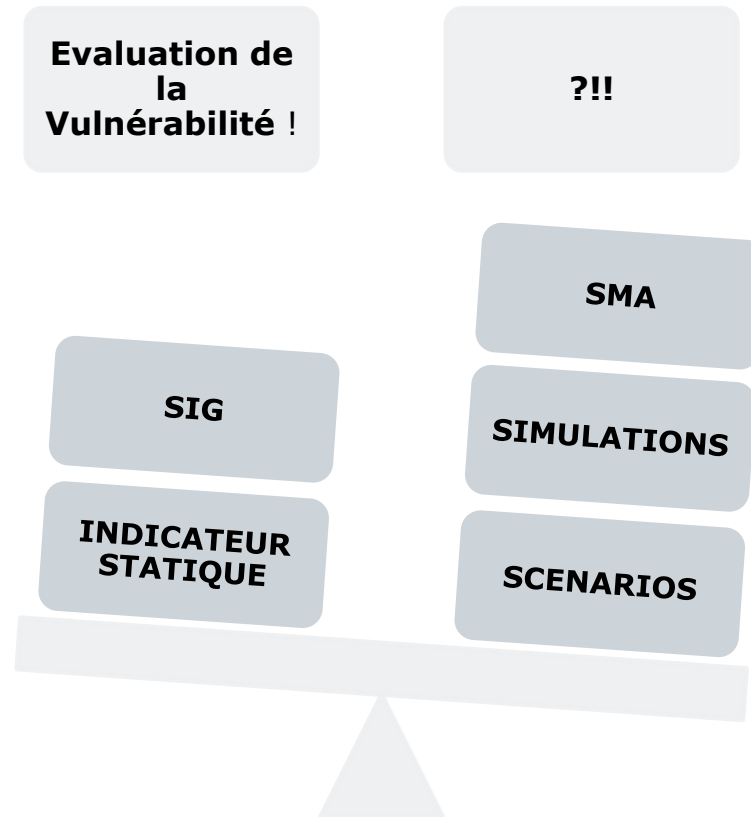
GAMA
...modeling made easy...



université
angers

Limites et difficultés

- La question de la **pondération dans le couplage**. Quelle méthode est plus importante que l'autre ?



- Utiliser la série temporelle prédictive en tant qu'intrant aux modèles de vulnérabilité ?

Merci de votre attention



Merci de votre attention