



HAL
open science

Modélisation de la résilience à long terme des îles hautes de Polynésie française (Tahiti, Moorea) : mise en oeuvre d'une analyse systémique

Bastien Bourlier, Charlotte Heinzlef, Franck Taillandier, Picot Octave,
Corinne Curt, Damien Serre

► To cite this version:

Bastien Bourlier, Charlotte Heinzlef, Franck Taillandier, Picot Octave, Corinne Curt, et al.. Modélisation de la résilience à long terme des îles hautes de Polynésie française (Tahiti, Moorea) : mise en oeuvre d'une analyse systémique. Congrès Lambda Mu 22 " Les risques au cœur des transitions " (e-congrès) - 22e Congrès de Maîtrise des Risques et de Sécurité de Fonctionnement, Institut pour la Maîtrise des Risques, Oct 2020, Le Havre (e-congrès), France. hal-03453574

HAL Id: hal-03453574

<https://hal.science/hal-03453574>

Submitted on 28 Nov 2021

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.



Modélisation de la résilience à long terme des îles hautes de Polynésie française (Tahiti, Moorea) : mise en œuvre d'une analyse systémique

Modelling long-term resilience of the high islands of French Polynesia (Tahiti, Moorea): implementation of a systemic analysis

Bourlier Bastien
Unité RECOVER

INRAE, Aix Marseille Univ.
Aix-en-Provence, France
UNIV. POLYNESIE FRANCAISE,
IFREMER, ILM, IRD, EIO UMR 241,
Tahiti, Polynésie-Française
bastien.bourlier@inrae.fr

Taillandier Franck
Unité RECOVER

INRAE, Aix Marseille Univ.
Aix-en-Provence, France
franck.taillandier@inrae.fr

Curt Corinne
Unité RECOVER

INRAE, Aix Marseille Univ.
Aix-en-Provence, France
corinne.curt@inrae.fr

Heinzlef Charlotte

UNIV. POLYNESIE FRANCAISE,
IFREMER, ILM, IRD, EIO UMR 241,
Tahiti, Polynésie-Française
charlotte.heinzlef@upf.pf

Picot Octave

UNIV. POLYNESIE FRANCAISE,
IFREMER, ILM, IRD, EIO UMR 241,
Tahiti, Polynésie-Française
picot.octave@upf.pf

Serre Damien

UNIV. POLYNESIE FRANCAISE,
IFREMER, ILM, IRD, EIO UMR 241,
Tahiti, Polynésie-Française
damien.serre@upf.pf

Résumé - Le projet ILOTS vise à concevoir un observatoire de la résilience face au risque d'inondation dédié aux îles hautes de Polynésie Française. Le travail explique les enjeux et les verrous scientifiques pour mener à bien un tel objectif ainsi que les premiers éléments d'un modèle d'évaluation de la résilience fondé sur une analyse systémique de ces territoires.

Mots clés - Modélisation de la résilience, Système spatial d'aide à la décision, Îles hautes Polynésiennes, Approche systémique, Risque inondation

Abstract - The ILOTS project aims to design an observatory of resilience to flood risk dedicated to the high islands of French Polynesia. The work explains the stakes and the scientific hurdles to achieve such an objective. It also presents the first elements of a model for assessing resilience based on a systemic analysis of these territories.

Keywords - Resilience modelling, Spatial decision support system, Polynesian High Islands, systemic approach, flooding

I. INTRODUCTION

Dans un contexte de changement global, les catastrophes naturelles ont augmenté d'environ 2% par an dans le monde au cours des 15 dernières années [1]. Parmi celles-ci, le risque d'inondation est l'un de ceux qui causent le plus de dommages humains matériels et financiers [2]. En effet,

depuis 1960, le nombre d'inondations a considérablement augmenté, atteignant par exemple, plus de 600 événements pour l'année 2007 [3], et en 2013, « les dommages causés par les inondations étaient de 90 % supérieurs à leurs moyennes annuelles 2003-2012 » [4]. Bien que le nombre de décès ait diminué face à ce risque, les inondations restent les catastrophes les plus coûteuses, et on estime qu'elles pourraient atteindre "100 milliards d'euros par an d'ici la fin du siècle" [5].

Dans le même temps, la complexité croissante des systèmes sociotechniques rend la gestion des risques d'inondation difficile. De plus, au cours des dix dernières années, la moitié de la population mondiale est devenue urbaine [6]. La concentration de la population dans les zones urbaines contribue à augmenter les risques d'inondation dans ces zones. L'urbanisation est passée de 10 % dans les années 1990 à 50 % en seulement deux décennies [7]. Ce processus très rapide a augmenté la vulnérabilité du territoire car de nombreuses villes sont peu (voire pas) préparées ou équipées pour gérer les besoins d'une telle concentration de population. Cette vulnérabilité a été rendue très visible lors d'événements majeurs. La population, par manque de terrains disponibles, vient s'installer dans les zones à risque.

Des espaces auparavant laissés libres sont progressivement grignotés par l'urbanisation sans respecter le fonctionnement naturel des bassins versants, des rivières... Cela conduit notamment à des sols imperméables, empêchant la nécessaire infiltration des eaux de pluie. Alors que les systèmes urbains devraient permettre d'assurer la sécurité et le développement des populations, les récentes catastrophes liées au climat dans le monde (ouragan Katrina à la Nouvelle-Orléans (États-Unis), 2005 ; tempête Xynthia (France), 2010 ; inondations à Paris (France), 2016 ; tempête Ophelia (Irlande), 2017 ; ouragans Harvey et Maria (États-Unis), 2017 ; etc.) ont révélé la vulnérabilité des villes à de tels événements [8]. Depuis plus de dix ans, les experts s'interrogent sur de nouvelles manières de gérer les risques. En politique, en économie, en urbanisme, en architecture et en recherche scientifique, l'accent est désormais mis de plus en plus sur les stratégies visant à rendre les systèmes urbains, à la fois moins vulnérables et plus résistants aux catastrophes liées au climat, tout en relevant les défis à long terme de la durabilité et de la qualité de vie [9]. Les objectifs récents en matière de gestion des risques venant des autorités internationales [10] sont de fonder une nouvelle gestion des risques capable de « faire une transition vers une culture générale de prévention et d'atténuation des risques » [11]. Cela a conduit les chercheurs et les gestionnaires à examiner de nouvelles approches pour gérer les risques naturels. L'une d'entre elles se base sur le concept de résilience urbaine [6].

Toutefois, tous les territoires ne possèdent pas la même maturité quant aux approches de gestion des risques. Beaucoup de territoires particulièrement vulnérables ont des systèmes de gestion des risques naturels très limités et lacunaires. C'est le cas, notamment, des territoires d'outre-mer français. En effet, un rapport interministériel français (septembre 2014) [12] traitant des risques de crues éclaira a conclu que ces territoires sont très concernés par ces phénomènes, mais que le risque associé est mal pris en compte par le gouvernement national et les autorités locales [12]. Le rapport fait également quelques recommandations pour améliorer les stratégies de gestion des risques, parmi lesquelles le développement de systèmes d'aide à la décision qui est une priorité. Depuis 2014, certains acteurs ont tenté d'aborder ces sujets, mais encore séparément à ce stade et sans soutien suffisant des autorités nationales et locales.

Face à ces constats d'augmentation du risque, de changement de paradigme du risque vers la résilience, et de limites des approches en outre-mer, il est donc pertinent de travailler sur l'amélioration de la résilience sur ces territoires. Les développements présentés ici s'inscrivent dans un travail de thèse (UPF, INRAE) et s'insèrent notamment dans le projet ILOTS (CNRS et IRD) qui a vocation à répondre à ces questions liées aux territoires d'outre-mer en interrogeant leur capacité de résilience face aux risques naturels spécifiques que sont les risques d'inondation et de submersion marine [13]. Les territoires d'études sont plus particulièrement les îles hautes de Polynésie Française concernées par ces risques et notamment les îles de Tahiti et Moorea. Ce travail de thèse vise à atteindre deux objectifs principaux :

- Proposer une approche pour évaluer le niveau de résilience de Tahiti et Moorea aux inondations ;
- Jeter les bases d'une recherche sur le long terme avec la conception d'un observatoire des risques et de la résilience dans les îles du Pacifique.

A terme, l'objectif de ce travail est d'aider les parties prenantes à mieux rationaliser les choix d'aménagement du territoire, et à faire face aux défis des risques dans un contexte de changement global, en améliorant la résilience de leur territoire.

Dans cette communication, nous présenterons dans un premier temps le concept de résilience appliqué au risque d'inondation et les perspectives en termes d'opérationnalisation. Ensuite nous exposerons le contexte local de la Polynésie Française relatif à la gestion des risques. Enfin nous proposerons une première analyse du système à l'étude en vue de produire des modèles d'évaluation de la résilience sur les territoires de Tahiti et Moorea. Cette analyse est basée sur des approches de sûreté de fonctionnement.

II. CADRE DE LA RECHERCHE ET CONTEXTE TERRITORIAL

A. *Résilience et gestion des risques*

Le concept de résilience est discuté dans la littérature scientifique sur les risques et les catastrophes [14] depuis les années 1970, mais il a été réellement étudié au début du 21^e siècle, tant sur le plan politique que scientifique. Sur le plan politique, la Conférence mondiale de Hyogo sur la réduction des risques de catastrophe (janvier 2005) a mis en évidence la nécessité de construire des nations et des communautés résistantes aux catastrophes. Quelques mois après cette conférence, les travaux scientifiques ont montré que la catastrophe liée aux inondations causées par l'ouragan Katrina a révélé des faiblesses dans la prévision et la prévention, ainsi que l'organisation insuffisante des personnes chargées de la gestion des crises, notamment à la Nouvelle-Orléans. Cet événement, qui n'est qu'un parmi tant d'autres à l'échelle mondiale, démontre la nécessité de se préparer aux catastrophes et crises "systémiques" (structure décisionnel, planification...). Katrina a mobilisé le monde de la recherche, qui a revisité le concept de résilience, notamment pour analyser les modèles traditionnels de réponse à un événement inattendu et les mécanismes de gestion post-crise. Plus récemment, la conférence de Sendai en 2015 a également développé le concept de résilience. Ainsi, largement utilisée ces dernières années dans le discours politique et scientifique sur la question des risques, la résilience est devenue le nouveau cadre, la nouvelle référence pour la politique de gestion des catastrophes. Le concept de résilience est de plus en plus utilisé dans divers domaines scientifiques et sociétaux : écologie, psychologie, géographie (populations et territoires confrontés à des risques), analyse des risques, politique et secteur bancaire et des assurances, etc. Cependant, il recouvre une variété de sens selon les disciplines et le contexte dans lequel il est utilisé [15]. L'analyse de la littérature scientifique révèle qu'il n'existe pas un mais plusieurs types de résilience, bien que, paradoxalement, le terme "résilience" soit principalement utilisé au singulier, dans le discours scientifique et politique.

Dans le domaine territorial, opérationnel et institutionnel, mais aussi biologique et psychologique, la résilience décrit une capacité ou plusieurs capacités. On peut en distinguer différents types [16]–[18] en fonction des échéances : avant, pendant et après un choc.

Ainsi, avant le choc, on parle de :

- la capacité à anticiper, notamment des scénarios imprévisibles et inconcevables, afin de garantir les capacités opérationnelles des systèmes et des organisations, même en "mode dégradé" ;
- la capacité de gérer ou de préserver les fonctions, structures et organisations essentielles afin de les adapter à une situation future (adaptation anticipative) ;
- la capacité d'apprendre.

Pendant l'événement, la résilience peut correspondre à :

- la capacité à résister et à faire face à un choc ;
- la capacité à absorber un choc, ce qui implique une certaine flexibilité.

Après le choc, la résilience se révèle être :

- la capacité à se remettre et à se reconstruire, ici ou ailleurs. Ces capacités mobilisent les ressources internes et/ou externes d'un système, qu'il s'agisse d'un individu, d'un quartier, d'une ville, d'un pays, etc. ;
- la capacité d'un système à maintenir son intégrité et à revenir (ou rebondir) à l'état d'équilibre antérieur ou à un nouvel état ;
- la capacité d'un individu ou d'une communauté à s'adapter, à tirer profit d'une situation négative et à renouveler et transformer le système.

Ces différentes facettes de la résilience ne sont pas toujours compatibles et suscitent des débats, notamment sur les notions de "résistance à" ou d'"absorption d'un choc". Ces notions sont, synonymes pour certains, combinant résistance et persistance, la persistance impliquant force et durée, ou alors étroitement liées pour ceux qui pensent que la résistance donne au système le temps de s'adapter. Alors que d'autre part les deux concepts sont totalement opposés pour ceux pour qui la capacité d'adaptation suppose souplesse et flexibilité, tandis que la résistance implique opposition et rigidité [19]. Il est également possible d'adopter une position intermédiaire plus nuancée. En effet, si certaines formes d'atténuation des risques peuvent accroître la résilience, d'autres peuvent la réduire à long terme [20], [21]. Tout dépend du type d'aléa (récurrent et anticipé par opposition à exceptionnel et imprévu). Par exemple, lors d'une inondation, les structures de défense collectives, telles que les digues et les murs anti-tsunami, peuvent contribuer à la résilience d'un territoire pour un niveau d'aléa et une intensité donnés, en confinant l'aléa en limitant les dégâts, aidant ainsi le système à se rétablir plus rapidement. Mais ces mécanismes de défense structurels peuvent également créer et même renforcer la vulnérabilité des populations lors d'aléas exceptionnels et imprévus [22]. Par exemple, la tempête Xynthia, qui a traversé l'Europe occidentale entre le 26 et le 28 février 2010, a montré que ces structures de défense, en raison de leur vulnérabilité

intrinsèque, n'offrent pas une protection absolue et donnent parfois à la population un faux sentiment de sécurité. Toutes ces définitions partagent cependant une idée : l'équilibre et le rétablissement ou le renouvellement d'un système nécessitent des capacités d'absorption et d'adaptation anticipative ou réactive aux chocs, en particulier dans un environnement dynamique. La résilience ne concerne donc pas seulement la phase de reconstruction, mais se déploie sur une période en trois temps : avant, pendant et après la catastrophe. Travailler sur la résilience d'un territoire va impliquer des mesures très variables selon la temporalité prise en compte.

Par ailleurs, la définition du concept de résilience implique l'identification d'un territoire plus ou moins résilient. De nombreuses études se concentrent sur les territoires urbains, pour lesquels la résilience est mesurée par l'étude des systèmes complexes sur lesquels les services urbains reposent [23]–[25]. Penser les territoires comme des systèmes permet d'avoir une approche globale de la résilience [24]. L'étude de la résilience des territoires urbains permet également d'identifier les Infrastructures Critiques (IC). Ce sont souvent des réseaux, mais aussi d'autres composantes de la ville tels que les bâtiments administratifs, de soins, de gestion de crise dont le fonctionnement est primordial pour l'activité de la ville [26]. D'autres travaux montrent l'intérêt d'une vision multi-échelle de la résilience des territoires urbains (quartier, ville, région, bassin versant) [24] avec des infrastructures critiques qui peuvent être appréhendées à différents niveaux et qui peuvent impacter le système de différentes manières [5]. Plus largement les travaux sur la résilience des territoires permettent également de réfléchir au choix de l'échelle la plus pertinente pour l'analyse. Le système fonctionnera différemment selon l'échelle choisie. Pour analyser la résilience de la ville, l'échelle des quartiers est pertinente en termes de planification et de conception d'un système résilient à une échelle limitée [27]. Pour autant, une vision plus large peut se révéler pertinente en intégrant aussi des aspects sociologiques, environnementaux, économiques et politiques [28]. Or, la gouvernance des territoires, les processus de décision, les choix d'aménagement, façonnent l'évolution d'un territoire sur le long terme, et ce sont donc autant de variables à intégrer à cette réflexion. Au final, définir la résilience dans le contexte de la gestion des risques implique d'examiner tous les aspects du risque et de la crise. Cela permet ensuite de comprendre dans quelle mesure cette notion est pertinente pour rendre compte des temporalités, des échelles, ainsi que des territoires et leurs composants structurels et organisationnels. En ce sens, la mise en œuvre de méthodes systémiques de type sûreté de fonctionnement apparaît comme une solution pertinente pour évaluer la résilience territoriale. Dans ce cadre différents travaux mettant en œuvre ce type d'approches ont été réalisés depuis une quinzaine d'années : ils portent un regard principalement tourné vers la performance des composants physiques du territoire (réseaux de transport, bâtiments, ouvrages de protection...) [29], [30]. Par ailleurs, le projet RESILIS a abordé la question des interactions entre les infrastructures sur un territoire pouvant générer des effets dominos [25]. Le modèle DS3 porte sur l'analyse d'un quartier et de ses composants [23], [27].

Si ces travaux sont intéressants, premièrement, ils n'intègrent que très rarement les questions de gouvernance et d'acteurs impliqués dans la gestion de la résilience et qui contribuent également eux-mêmes au « niveau » de résilience d'un territoire, deuxièmement, ils considèrent rarement plusieurs échelles. C'est une limite importante de ces approches pour appréhender la résilience de façon holistique.

B. Territoire d'étude: Tahiti et Moorea

En septembre 2014, un rapport interministériel français traitant des risques de crues soudaines a conclu que les territoires d'outre-mer français sont fortement concernés par les crues soudaines mais que ce risque est mal pris en compte par le gouvernement national et les autorités locales. En effet, l'outre-mer est fortement exposé aux ouragans, tremblements de terre et tsunamis, mais les crues rapides qui peuvent en résulter ne sont pas suffisamment bien gérés par rapport à la France métropolitaine [12].

Cependant, plusieurs facteurs tels que la géographie, le climat, les contraintes d'aménagement du territoire et les structures sociales, augmentent la vulnérabilité aux risques en général de ces territoires. Le rapport met également en évidence un partage des responsabilités entre les autorités nationales et locales dans les processus de gestion des risques. À titre d'exemple, les responsables de l'outre-mer français ne sont pas représentés dans une commission nationale chargée de préparer des plans de prévention pour faire face aux crues éclair. En outre, l'observatoire national des risques ne couvre pas les territoires d'outre-mer. Dans le même temps, les autorités locales ne semblent pas disposées à s'engager pleinement dans la gestion des risques, sauf pour les questions liées aux ouragans, en raison d'une bonne culture de la population face à ce type de danger. L'un des problèmes qui se pose et qui explique en partie ces lacunes en termes de gestion des risques est le manque de contrôle

des autorités locales sur le développement foncier et urbain. Le rapport souligne l'importance de la prise en compte du contexte ultramarin dans les stratégies de réduction des risques. Pour aborder ce dernier point, le rapport expose plusieurs sujets cruciaux sur lesquels des efforts sont attendus

- La submersion des côtes causée par les ouragans ;
- La conjonction des submersions côtières et des inondations fluviales ;
- Le ruissellement dans les zones tropicales ;
- Les incidences du changement climatique.

A ces titres, notre recherche vise à répondre à ces besoins de gestion des risques en Polynésie française et en particulier dans les îles de Tahiti et de Moorea. Tahiti abrite l'agglomération de Papeete (170 000 habitants) regroupant une large part de la population Polynésienne ainsi que l'essentiel des services et infrastructures. Par ailleurs c'est une agglomération soumise à un fort étalement urbain dans un espace contraint avec une plaine côtière (seule surface plane) ne dépassant pas les quelques dizaines de mètres [31] Ces îles sont vulnérables aux risques d'inondation et de submersion marine en particulier. La Polynésie française a récemment été frappée par des cyclones majeurs, notamment Oli en 2010, qui a touché les îles de la Société et les îles Australes. Le cyclone est passé à 300 km de Tahiti dans la nuit du 3 au 4 février 2010, avec quelques débordements sur la ville de Papeete [32]. La vulnérabilité de Papeete est en partie liée à la forte densité urbaine dans les zones basses (Figure 1). Les limites quant à la gestion des risques sur ces territoires se situant en partie aux niveaux politiques et organisationnels, il est important dans le cadre de notre recherche d'identifier précisément quels sont les acteurs du risque en Polynésie Française qui est un territoire soumis à des problématiques propres dans un cadre institutionnel original [33], [34].

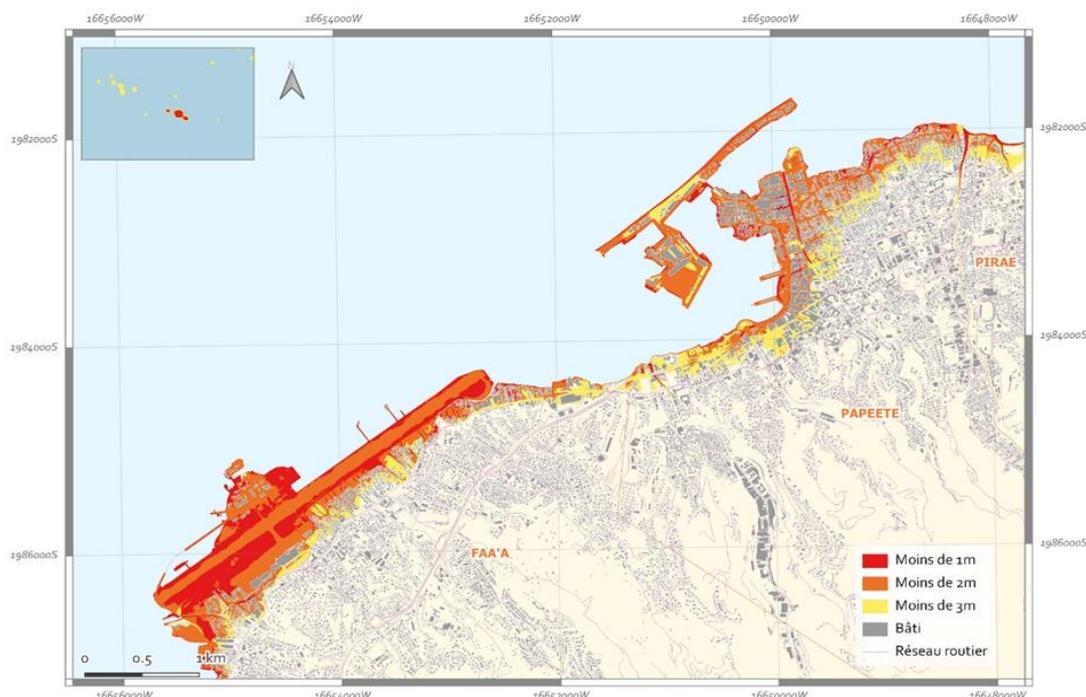


Fig 1. Etendue des zones basses sur les communes de Faa'a et Papeete (source: LIDAR SHOM)

D'abord on peut identifier que de nombreuses compétences reviennent au gouvernement de Polynésie Française. Le gouvernement Polynésien est compétent pour tous les volets de prévention des risques (Plan de Prévention des Risques (PPR), urbanisme général, Plan Général d'Aménagement (PGA), information préventive...). Sont associés au gouvernement, l'ensemble des services compétents en matière de gestion des risques, à commencer par le service de l'urbanisme (SUT). Ensuite les communes sont en charge des Plans Communaux de Sauvegarde (PCS), compétence partagée avec l'état français. Enfin l'Etat Français, via le Haut-Commissariat, est compétent en matière de gestion de crise et de sécurité civile avec par exemple la mise en place Plan de secours CYCLONE (information, alerte, évacuation).

Une analyse du système de gestion des risques sur le territoire de la Polynésie Française, et en particulier sur Tahiti et Moorea, met en évidence de nombreuses lacunes. En effet, un seul PPR (plan de prévention des risques) a été approuvé sur Tahiti dans la municipalité de Punaauia. Un autre a été approuvé à Rurutu, dans les îles du Sud Archipel. La principale explication de cette absence de PPR est la difficulté pour les décideurs de les mettre en œuvre à cause du régime foncier particulier en Polynésie-française [34]. En effet, le contexte foncier est très particulier avec de nombreuses propriétés indivises ou "transactions foncières" qui ne permettent pas d'établir clairement un propriétaire pour chaque parcelle. Cela conduit à de nombreux litiges donnant lieu à des actions en justice [34]. Une caractéristique majeure du foncier polynésien est que « la sortie de l'indivision à l'amiable devant le notaire est l'exception, tandis que le partage judiciaire apparaît comme la règle » [33]. Par ailleurs il n'existe pas de dispositifs assurantiels en cas de crise de la part du gouvernement Polynésien pourtant compétent en la matière [34].

Il existe d'autre part, parfois, une défiance des autorités politiques locales envers ces documents de gestion des risques perçus comme contraignants, et occasionnant de véritables blocages dans les procédures de mise en place des PPR [34]. Enfin le côté prospectif n'est pas du tout présent dans les PPR dans des régions où la prise en compte du changement climatique semble pourtant devoir être une priorité [34]. Pour autant la prise en compte des risques naturels n'est pas complètement absente du dispositif juridique et des mesures ont été mises en place dans les plans généraux de développement et de l'aménagement du territoire (équivalent des PLU métropolitains) qui comportent des indications particulières sur les inondations (zones inconstructibles sur les parcelles littorales par exemple) [34].

Ainsi, le territoire polynésien est un territoire à risque dont les procédures et le droit en gestion des risques sont à améliorer [34]. Une approche intégrant la gouvernance du risque semble donc être une étape importante pour caractériser les manques, ainsi que les vulnérabilités structurelles et organisationnelles du territoire.

III. DEMARCHE ET METHODE PROPOSEES

A. Une démarche en 3 étapes majeures

Dans ce contexte, notre approche s'articule en plusieurs temps (figure 2). Nous proposerons des méthodes d'évaluation de la résilience des îles hautes Polynésiennes avec dans un premier temps, une analyse du système étudié. Ce travail nous aidera, dans un second temps, dans l'élaboration d'indicateurs pertinents de la résilience associant méthodes issues de la sûreté de fonctionnement et construction d'indicateurs socio-économiques issus de la littérature. Ce travail donnera lieu à des modèles d'agrégation de ces indicateurs suivi d'une phase de validation auprès d'experts.

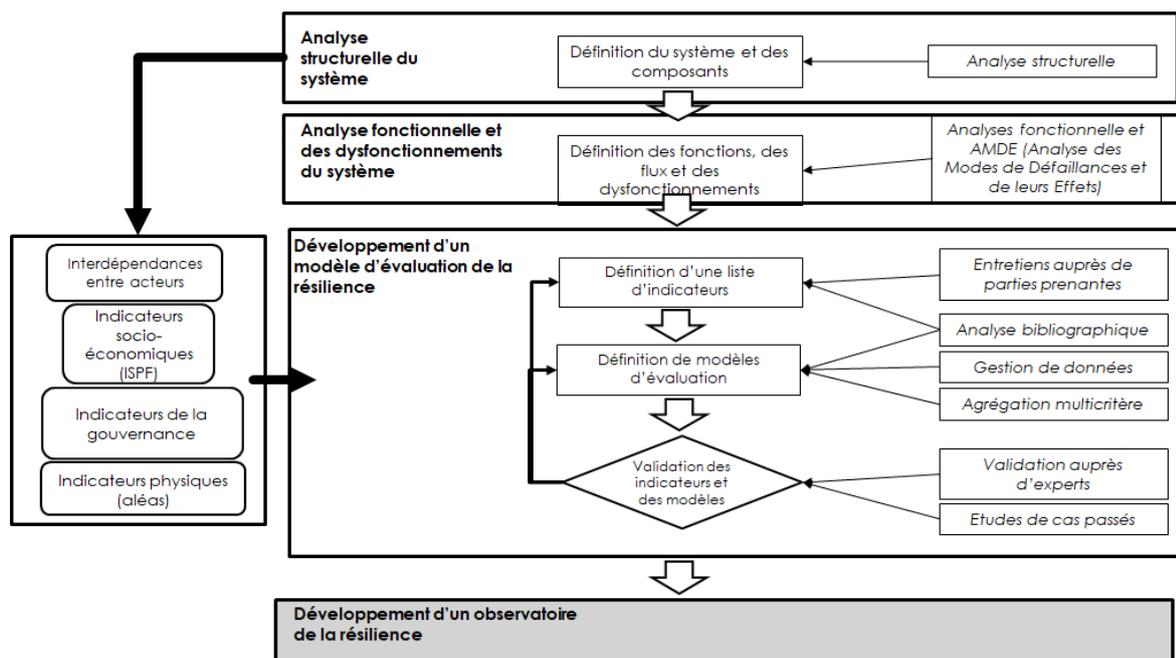


Fig 2. Approche méthodologique mise en œuvre

Enfin nous poserons les bases d'un futur observatoire ayant pour objectif la valorisation et le partage des connaissances produites par cette analyse préalable. L'objectif est in fine de construire des démarches d'aide à la réflexion sur l'aménagement à long terme du territoire. Dans ce document nous présenterons de façon détaillée la première partie de la démarche, correspondant à la définition du système étudié. À la date du congrès des indicateurs seront définis au regard de l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE) ainsi qu'au travers de la littérature abondante portant sur la mesure de la résilience aux inondations.

B. Définition du système, échelles d'analyse et temporalités

L'application de méthodes systémiques impose, comme leur nom l'indique, de définir le système étudié. La Polynésie Française a la particularité d'être un territoire insulaire, contraint, très inégalement peuplé et urbanisé. Nous considérons d'abord deux îles : Tahiti et Moorea avec des caractéristiques très différentes et de fortes disparités internes mais regroupant l'essentiel de la population de Polynésie française ainsi que les infrastructures majeures du territoire. Une approche qui sera qualifiée de "multi-échelle" est donc nécessaire pour la poursuite de ce travail afin de pouvoir considérer les disparités du territoire. Le changement d'échelle de l'analyse peut, dans ce cas, permettre d'aborder plusieurs aspects de la résilience pour une vision aussi englobante que possible, intégrant la résilience des zones côtières, insulaires et urbaines, chacune ayant ses propres spécificités.

Comme nous l'avons vu plus haut, les travaux reposant sur la sûreté de fonctionnement ne considèrent en général qu'une seule échelle géographique.

Il s'agit donc ici de développer une approche spécifique. Ainsi, nous distinguons trois échelles d'analyse distinctes rendant compte des disparités territoriales en termes de densité de population, de flux de personnes et de répartition des infrastructures et des activités :

- Le système Tahiti/Moorea (liaisons entre les îles, répartitions des infrastructures)
- La zone urbaine de Papeete (qui s'étend sur 6 communes)
- Un quartier exposé à des risques (submersion/inondation). Le quartier peut être défini comme suit : "une partie d'une ville ayant une apparence propre et caractérisée par des traits distinctifs qui lui confèrent un degré d'unité et d'individualité" [35].

En raison de la nécessité d'intégrer ces trois échelles, il a été choisi d'articuler notre évaluation de la résilience autour d'une approche multi-scalaire. La première étape du travail portera sur le système du quartier particulièrement adapté à l'application de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement [23]. D'autre part, ce travail a pour vocation de faire des questions de temporalité un des axes principaux de la réflexion à venir.

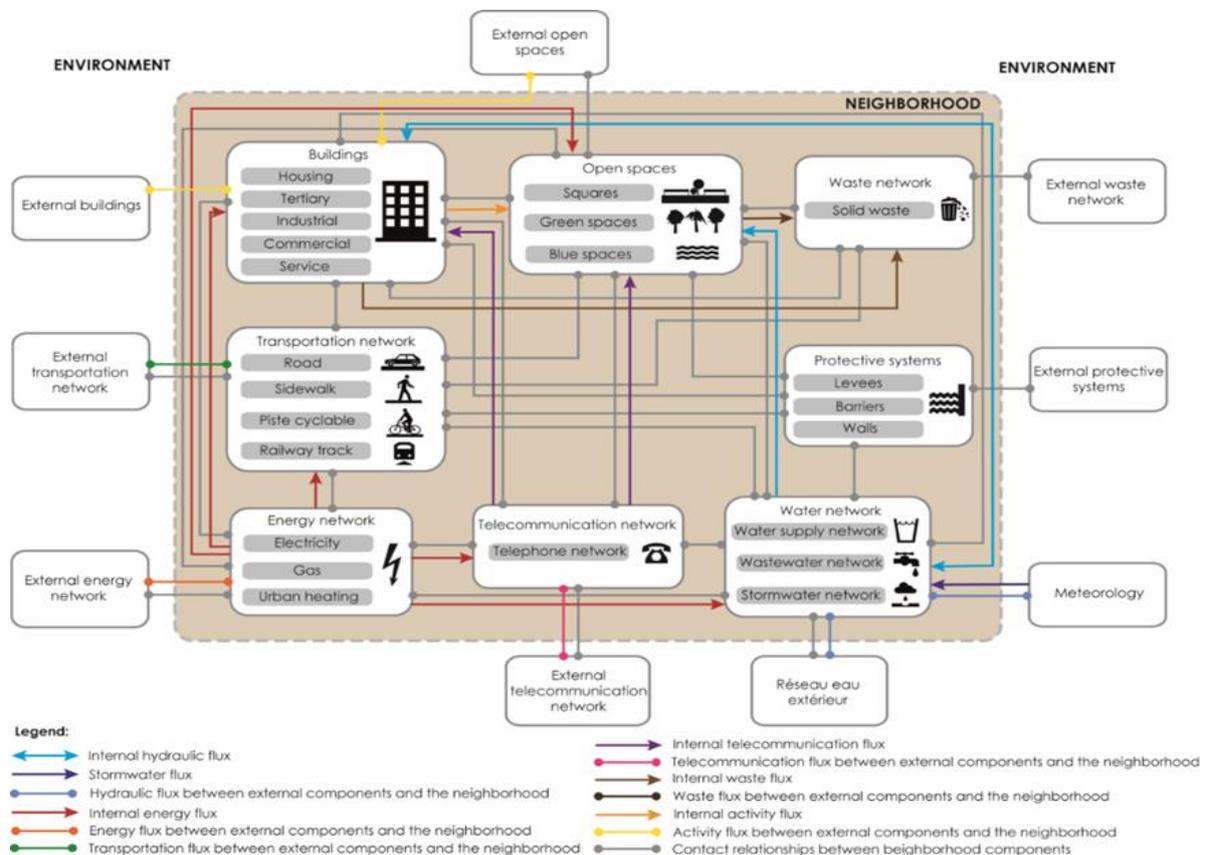


Fig 3. Diagramme fonctionnel du système quartier (Serre et al, 2018)

Il a été mis en avant que la résilience impliquait l'occurrence d'une crise et de la prise en compte d'éléments en amont de la crise, d'éléments pendant la crise (efficacité de la gestion de crise...) et des éléments de récupération après le temps de la crise. L'évaluation de la résilience doit prendre en compte ces trois temps. Cela pourra passer par exemple par une diversité d'indicateurs rendant compte de ces temporalités, ou par une analyse plus qualitative de la gouvernance en fonction de ces mêmes temporalités. En plus de ces trois temps liés au choc lui-même, se pose la question de la résilience de long terme. Si la prise en compte de trajectoire de la résilience pour un territoire semble pertinente, notamment dans un contexte de changement climatique, évaluer ce phénomène est difficile. En effet, considérer la trajectoire de résilience nécessite la prise en compte des phénomènes plus anciens et évaluer une évolution sur le temps long de tous les aspects de la résilience, que ce soit d'un point de vue technique mais aussi socio-économique voire environnemental. Cela pose la question des données disponibles et constitue aussi un fort verrou méthodologique et scientifique. Dans tous les cas, prendre en compte les temporalités de la crise de la manière la plus précise possible semble être prioritaire pour la production d'une information pertinente pour les acteurs locaux de l'aménagement. Deux principaux verrous scientifiques ont ainsi été identifiés pour évaluer la résilience du territoire Tahiti et Moorea : la multi-temporalité et le multi-échelle. S'ajoute à ceci la question de la gouvernance qui n'a été, en outre, que peu traitée dans les travaux publiés.

Dans la volonté d'utiliser une approche pragmatique pour répondre à ces enjeux, la première phase de ce travail s'est portée sur la mise en œuvre de méthodes issues de la sûreté de fonctionnement à l'échelle du quartier.

Bien que définie à une échelle donnée, cette approche sera conçue avec l'idée de pouvoir l'extrapoler ou de pouvoir extrapoler ses résultats, aux différentes échelles temporelles et spatiales.

IV. ANALYSE ET EVALUATION DU SYSTEME URBAIN

A. Analyse du système urbain par des méthodes issues de la sûreté de fonctionnement

Le système étudié est complexe car composé d'un grand nombre d'éléments qui interagissent entre eux de façon non linéaire. Aussi les méthodes d'analyse systémique paraissent adaptées pour sa modélisation.

Le modèle DS3 [6], [36], construit selon une approche systémique se concentre sur la capacité des systèmes techniques à faire face aux inondations. La figure 3 issue de [23], présente un modèle DS3 dédié à la modélisation du système quartier dans un contexte de risque d'inondation. Ce système basé sur les réseaux urbains se veut exhaustif sur le plan structurel en prenant en compte le plus grand nombre possible de composants. Les relations entre les composants correspondent à des flux, qui peuvent être des flux d'énergie, de personnes, de déchets... Plusieurs études [26], [37] ont porté sur l'application de cette approche, à l'échelle d'un quartier pour évaluer la résilience des composants techniques du système. Cette méthode repose sur une analyse fonctionnelle du système. L'objectif de l'analyse fonctionnelle est sur la base de l'analyse structurelle, de définir les limites du système, son environnement, puis de définir les composants de ce système et de leur associer des fonctions [23], [38]. Elle peut être couplée à d'autres méthodes permettant d'observer les défaillances du système telle que l'Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets (AMDE).

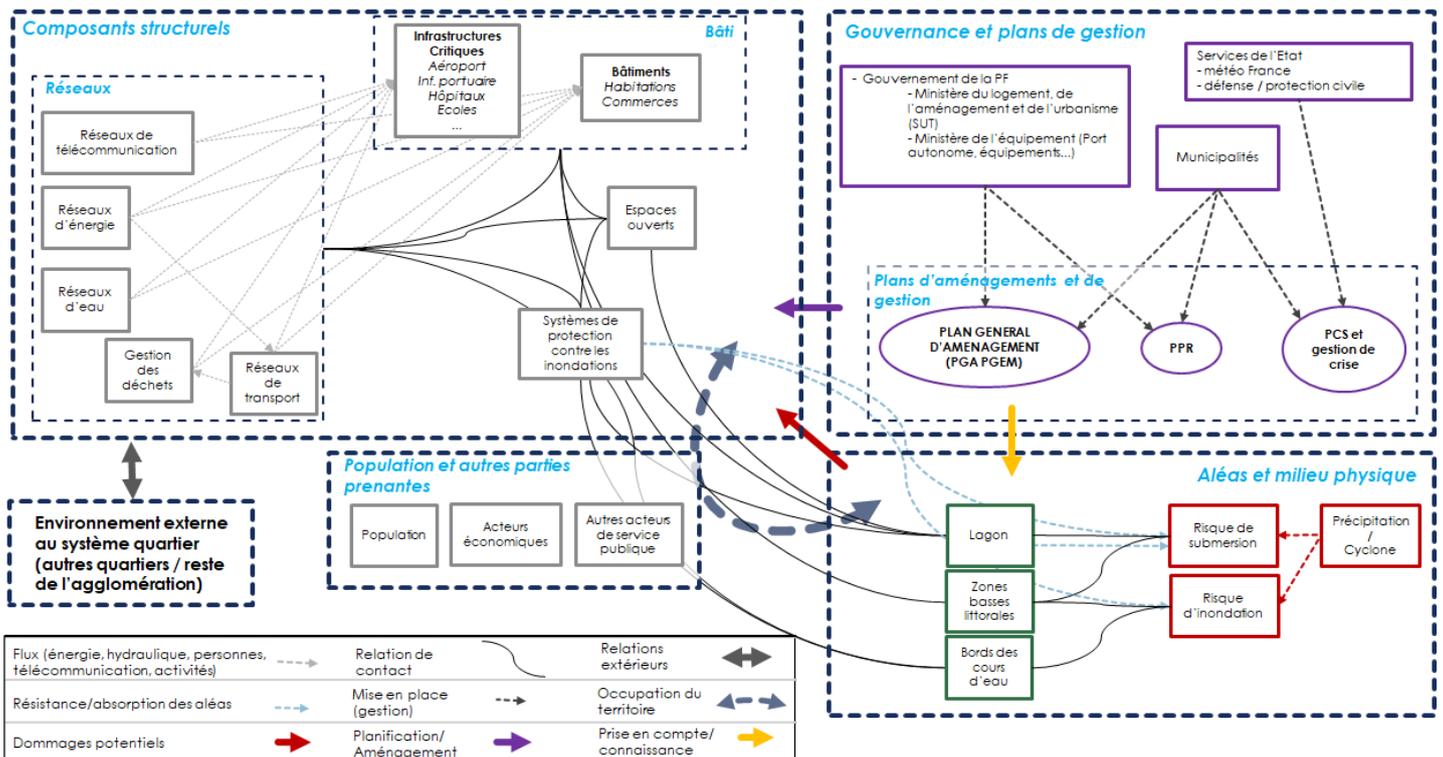


Fig 4. Composants et dynamiques du système quartier à Papeete.

L'analyse des dysfonctionnements peut être le support de construction des indicateurs de la résilience du système et de scénarios via l'analyse, des causes et des effets possibles des défaillances, et cela à différentes périodes de la crise. Nous réalisons une analyse fonctionnelle afin de formaliser l'interdépendance des réseaux et des infrastructures critiques de la zone étudiée. Ainsi, on peut observer les effets domino et la notion de chaînes d'impacts. Par exemple, elle pourrait permettre d'évaluer l'impact d'une panne de générateur d'électricité sur les autres composants du système et notamment sur les infrastructures critiques. Cette méthode offre donc des outils pour décrire un système, en particulier via le bloc diagramme fonctionnel, qui aide à comprendre et formaliser les relations entre les composants [39].

La démarche est très adaptée à l'analyse à l'échelle du quartier et en particulier pour les composantes techniques du système, permettant une analyse fine des composantes du système et de leurs interactions. Dans cette optique, La méthode DS3 se focalise sur les aspects techniques du système. Ce travail propose d'étendre le périmètre de l'analyse au travers d'une approche beaucoup plus englobante du système en abordant tous les aspects du concept de résilience pour en extraire des indicateurs pertinents de résilience et développer une approche plus quantitative complémentaire. Ainsi, dans un premier temps, l'enjeu est d'étendre la structure du modèle DS3[23] aux autres enjeux de la résilience et de l'adapter au contexte polynésien et à Papeete en particulier. Ainsi, en plus des composants techniques, structurels, il est nécessaire d'ajouter des éléments liés à la gouvernance et aux compétences des acteurs sur les différents éléments du système ainsi que le milieu physique et les aléas submersion et inondation. Cette première analyse est d'abord intéressante pour le diagnostic du territoire. La formalisation de l'ensemble des relations et des compétences des acteurs impliqués dans la gestion des risques permet d'explicitier le fonctionnement du système, puis éventuellement une évaluation des blocages organisationnels. La figure 4 expose une première proposition de cette formalisation.

Une telle approche rend compte des très nombreuses inter-relations : relations de contact, flux, relations décisionnelles, etc. De plus, intégrer des données portant sur les aléas et les milieux physiques permet de rendre compte de l'aspect extrêmement contraint de la ville de Papeete, qui est une ville dense soumise à un fort étalement urbain sur des plaines littorales étroites. Les espaces soumis aux risques d'inondation sont avant tout les zones basses littorales et les bords des cours d'eau. De fait, par extension de nombreux enjeux bâtis, et notamment les Infrastructures Critiques se situent effectivement sur ces zones vulnérables. Dans un second temps l'étude des flux permet de montrer les relations entre les différents réseaux techniques mettant en relation l'ensemble des composants structurels du territoire. Un autre aspect important du territoire investigué est le rôle particulier de l'environnement naturel dans le système urbain étudié et en particulier le lagon. On observe des relations de contacts directs entre les enjeux littoraux et les espaces lagonaires.

Par ailleurs il a été mis en évidence que ces systèmes naturels participaient activement à la réduction de la vulnérabilité côtière contre la submersion en périodes cycloniques [40]–[42].

Enfin le graphe en figure 3 intègre en plus des éléments physiques ou structurels, des composants liés à la gouvernance rendant compte des acteurs de l'aménagement et des risques sur le territoire polynésien ainsi que des outils à leur disposition. Ces outils de gouvernance (PPA, PPG...) vont alors être mis en relation avec les composants du territoire par la planification ou la prise en compte des risques. Si le système quartier est une échelle pertinente d'analyse de la résilience urbaine, la démarche proposée a pour but d'être étendue à d'autres échelles telles que l'île ou l'archipel. L'Analyse fonctionnelle permet en soit une approche multi-échelle en articulant une analyse externe (système/environnement) et interne du système. Elle doit permettre donc le passage d'une échelle à l'autre par des logiques d'agrégation/désagrégation. Cela sous-tend des enjeux scientifiques spécifiques qui devront être traités.

B. Indicateurs d'évaluation de la résilience issus de la littérature

Une revue de la littérature montre qu'un certain nombre d'indicateurs peuvent rendre compte de la résilience d'un territoire, des indicateurs techniques de performance des infrastructures, associés à des approches issues de la sûreté de fonctionnement. Pour autant notre approche, malgré une démarche holistique dans la prise en compte des composants du territoire pourrait ne pas prendre en compte dans son entièreté le concept de résilience. On s'aperçoit que certaines variables pouvant influencer la vulnérabilité territoriale ne peuvent être traitées que difficilement dans ce cadre, et en particulier des éléments liés à la population (vulnérabilité sociale, économique, culture du risque...). Des critères strictement économiques tels que la reprise d'activités sur un territoire donné sont également difficiles à intégrer.

Ainsi, ces résultats pourront être complétés par ceux obtenus par d'autres approches de l'évaluation de la résilience proposant des grilles d'indicateurs à différentes échelles spatiales autour de considérations plus socio-économiques. Les indicateurs développés par [43] sont basés sur un grand nombre de travaux et en particulier la méthode BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities) [28], [44]. Ce travail va identifier trois grandes catégories d'indicateurs de la résilience :

- La résilience sociale (âges de la population, emploi, sécurité sociale, accès aux soins...)
- La résilience technique (accessibilité et diversité des réseaux...)
- La résilience urbaine (vétusté du bâti, Infrastructures critiques...)

Outre l'objectif de compléter l'approche de la résilience territoriale dans ce travail, aborder la résilience à travers une grille d'indicateurs semble pertinent dans le cadre de l'approche qui se veut multi-échelle. Cette méthode a prouvé son efficacité à des échelles plus larges telles que l'aire urbaine voire l'échelle régionale [45].

Une adaptation à un système insulaire comme Tahiti et Moorea semble envisageable et tout à fait pertinente pour rendre compte des disparités territoriales de ces îles en terme d'accessibilité, répartition des services, vulnérabilité sociale et économique...

V. CONCLUSION

Le développement du concept de résilience dans la gestion des risques est relativement récent, flou et difficile à mettre en œuvre. Cependant, la production scientifique autour de ce concept permet de répondre de manière pertinente à de nombreuses questions de la gestion des risques. De même, le développement de modèles opérationnels d'évaluation abouti à des résultats variés que ce soit dans la définition du concept, ou dans les dimensions prises en compte par le modèle (dimensions thématiques, temporelles, etc.).

Les méthodes issues de la sûreté de fonctionnement semblent une approche pertinente pour évaluer la résilience d'un territoire. Il a été mis en évidence que l'analyse fonctionnelle, au travers d'une évolution du modèle DS3, s'avère être un outil efficace dans l'étude de la résilience urbaine et des réseaux techniques. L'objectif de ce travail est donc de prendre en compte l'ensemble des spécificités des îles hautes Polynésiennes au travers d'une approche holistique et de proposer une analyse qualitative et fine dans son diagnostic. La finalité de cette démarche sera la mise en évidence d'indicateurs quantitatifs et qualitatifs pertinents sur un territoire plus large (zone urbaine, archipel) en mettant en œuvre des méthodes variées.

L'objectif de ces travaux est de mettre en place, à terme, un observatoire de la résilience adapté aux îles polynésiennes. Dans notre cas, l'objectif de l'observatoire sera de soutenir les décideurs en charge du développement sur le territoire de Tahiti et Moorea. L'objectif sera alors de valoriser une donnée issue des processus d'évaluation énoncés en amont. L'outil aura pour vocation de faciliter la prise en compte des processus de résilience des territoires littoraux et insulaires pour les gestionnaires dans une perspective d'aide à la réflexion sur les différentes politiques relatives à la gestion des risques en Polynésie française. Par ailleurs, un tel outil pourrait être partagé sous d'autres formes par un plus grand nombre d'utilisateurs tels que les organismes de recherche ou le grand public. Ainsi, l'élaboration des bases pour la création d'un futur observatoire permettra de mieux comprendre la complexité de la zone d'étude. Le développement d'un outil pertinent d'aide à la décision nécessite une compréhension précise des enjeux de la gouvernance des risques sur le territoire. Ainsi, ce processus implique une co-construction ; le processus d'élaboration doit être participatif, intégrant les acteurs, afin d'être significatif pour eux et ensuite réellement opérationnel.

La participation des acteurs du territoire s'avère être un élément important dans l'ensemble du processus que ce soit dans la construction du modèle d'évaluation ou de l'observatoire.

VI. REMERCIEMENTS

Le projet ILOTS a reçu le soutien financier du CNRS à travers les programmes interdisciplinaires du MITI et de l'IRD. Cette thèse fait l'objet d'un financement conjoint de l'Université de Polynésie Française et d'INRAE (UMR RECOVER, Aix-en-Provence).

VII. REFERENCES

- [1] Catastrophes naturelles - Observatoire permanent des catastrophes naturelles et des risques, "Bilan Statistique Des Catastrophes Naturelles Survenues Dans Le Monde Entre 2002-2015," 2015.
- [2] F. Vinet, S. Defossez, T. Rey, and L. Boissier, "Le processus de production du risque « submersion marine » en zone littorale : l'exemple des territoires « Xynthia » The production process of flooding risk in coastal area: the example of 'Xynthia' areas," *Norois*, no. 222, 2012.
- [3] C. Zevenbergen, *Urban Flood Management*. 2005.
- [4] G. Pescaroli and M. Nones, "Cascading Events, Technology and the Floods Directive: future challenges," *E3S Web Conf.*, vol. 7, 2016.
- [5] B. Barroca, M. DiNardo, and I. Mboumoua, "De la vulnérabilité à la résilience : mutation ou bouleversement ?," *EchoGéo*, no. 24, pp. 0–18, 2013.
- [6] D. Serre, "La ville résiliente aux inondations : Méthodes et outils d'évaluation," Université Paris-Est, 2011.
- [7] S. Meerow, J. P. Newell, and M. Stults, "Defining urban resilience: A review," *Landsc. Urban Plan.*, vol. 147, no. March, pp. 38–49, 2016.
- [8] B. Quenault, "Du double affrontement ontologique/axiologique autour de la résilience aux risques de catastrophe : les spécificités de l'approche française," *VertigO - la Rev. électronique en Sci. l'Environ.*, vol. 13, no. 3, pp. 1–41, 2013.
- [9] B. Quenault, "La résurgence/convergence du triptyque « catastrophe-résilience- adaptation » pour (re)penser la « fabrique urbaine » face aux risques climatiques," *Développement durable Territ.*, pp. 1–34, 2014.
- [10] United Nations and UNISDR, "Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030," *Aust. J. Emerg. Manag.*, vol. 30, no. 3, pp. 9–10, 2015.
- [11] European Commission, "LIVRE VERT sur les assurances contre les catastrophes d'origine naturelle et humaine," no. Strasbourg 2013.
- [12] P. Bourgeois, T. Galibert, F. Duplin, J.-P. Ridao, and E. Verlhac, "Evaluation du plan de prévention des submersions rapides dans les Outre-Mer," 2015.
- [13] D. Serre, "Resilience observatories in overseas territories: research perspectives," in *SRA 19, 8-12 December, Risk in the data analytics era*, 2019.
- [14] F. White and J. Hass, "Assessment of Research on Natural Hazards," *Color. Univ.*, p. 487, 1975.
- [15] D. Provitolo, "Vulnérabilité et résilience : géométrie variable des deux concepts Le domaine des risques et catastrophes," *Séminaire résilience*, p. 42, 2009.
- [16] J. Twigg, *Characteristics of a Disaster - Resilient Community*, vol. 7, no. 2. 2009.
- [17] M. Reghezza-Zitt, D. Provitolo, and S. Lhomme, "Définir la résilience: quand le concept résiste," in *Résilience - sociétés et territoires face à l'incertitude, aux risques et aux catastrophes*, R.-Z. Magali and R. Samuel, Eds. 2015.
- [18] C. Curt and J. M. Tacnet, "Resilience of Critical Infrastructures: Review and Analysis of Current Approaches," *Risk Anal.*, vol. 38, no. 11, pp. 2441–2458, 2018.
- [19] W. Adger, "Social and Ecological Resilience: Are They Related?," *Prog. Hum. Geogr.*, vol. 24, pp. 347–364, Sep. 2000.

- [20] R. J. Burby, "Hurricane Katrina and the Paradoxes of Government Disaster Policy: Bringing About Wise Governmental Decisions for Hazardous Areas," *Ann. Am. Acad. Pol. Soc. Sci.*, vol. 604, no. 1, pp. 171–191, Mar. 2006.
- [21] A. Boin, L. Comfort, and C. Demchak, "The Rise of Resilience," 2010, pp. 1–12.
- [22] P. Pigeon, "Apports de la résilience à la géographie des risques: l'exemple de La Fauté-sur-Mer (Vendée, France)," *VertigO*, vol. 12, pp. 0–21, 2012.
- [23] D. Serre, B. Barroca, M. Balsells, and V. Becue, "Contributing to urban resilience to floods with neighbourhood design: the case of Am Sandorkai/Dalmankai in Hamburg," *J. Flood Risk Manag.*, vol. 11, pp. S69–S83, 2018.
- [24] S. Lhomme, "Les réseaux techniques comme vecteur de propagation des risques en milieu urbain Une contribution théorique et pratique à l'analyse de la résilience urbaine," 2013.
- [25] G. Bambara, L. Peyras, H. Felix, and D. Serre, "Developing a functional model for cities impacted by a natural hazard Application to a city affected by flooding," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 15, no. 3, pp. 603–615, 2015.
- [26] M. Balsells, B. Barroca, J. R. Amdal, Y. Diab, V. Becue, and D. Serre, "Analysing urban resilience through alternative stormwater management options: Application of the conceptual Spatial Decision Support System model at the neighbourhood scale," *Water Sci. Technol.*, vol. 68, no. 11, pp. 2448–2457, 2013.
- [27] M. Balsells, B. Barroca, Y. Diab, and V. Becue, "Urban design contribution to neighbourhood flood resilience: proposition of a model analysis," *Int. Conf. flood Resil. Exp. Asia Eur.*, no. September, pp. 1–11, 2013.
- [28] S. L. Cutter *et al.*, "A place-based model for understanding community resilience to natural disasters," *Glob. Environ. Chang.*, vol. 18, no. 4, pp. 598–606, 2008.
- [29] M. Gonzva, M. Balsells, and B. Barroca, "Mobilisation de l'analyse fonctionnelle pour l'étude de la résilience des quartiers et des systèmes de transport guidé face au risque inondation," *Tech. Sci. Méthodes*, no. 7–8, pp. 64–75, 2015.
- [30] B. Barroca, D. Serre, and D. Youssef, "Le concept de résilience à l'épreuve du génie urbain," pp. 1–15, 2012.
- [31] O. Bon, "L'insoutenable développement urbain de l'île de Tahiti : politique du « tout automobile » et congestion des déplacements urbains," *Les Cah. d'Outre-Mer*, vol. 58, no. 230, pp. 121–152, 2005.
- [32] M. Garcin, "Projet ARAI 3 : Aménagements et ouvrages côtiers polynésiens – incidence sur l'aléa submersion et impacts environnementaux," 2013.
- [33] T. Bambridge, F. Venayre, J. Vucher-visin, T. Bambridge, F. Venayre, and J. V. La, "La gouvernance du système économique polynésien en question - Comment protection et absence de concurrence obèrent la croissance To cite this version : HAL Id: halshs-00722690 La gouvernance du système économique polynésien en question Comment protection," 2012.
- [34] L. Stahl, "Les défis présents et à venir des plans de prévention des risques naturels polynésiens Present and Future Challenges of French Polynesia Natural Risks Prevention Plans," *Etudes Caribéennes*, no. 41, pp. 0–24, 2018.
- [35] P. Merlin and F. Choay, "Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement," 2009.
- [36] S. Lhomme, D. Serre, Y. Diab, and R. Laganier, "Analyzing resilience of urban networks: A preliminary step towards more flood resilient cities," *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, vol. 13, no. 2, pp. 221–230, 2013.
- [37] D. Serre and C. Heinzlef, "Assessing and mapping urban resilience to floods with respect to cascading effects through critical infrastructure networks," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 30, no. February, pp. 235–243, 2018.
- [38] D. Serre, "Evaluation de la performance des digues de protection contre les inondations Modélisation de critères de décision dans un Système d'Information Géographique," 2005.
- [39] Lhomme S, -Serre D, Y. -Diab, and -Laganier R, "Résilience urbaine et réseaux techniques: Une approche par l'analyse spatiale pour une évaluation possible de la résilience urbaine," 2010.
- [40] V. Duvat, "Changement climatique et risques côtiers dans les îles tropicales," *Ann. Geogr.*, no. 705, pp. 541–566, 2015.
- [41] C. Salmon and V. K. E. Duvat, "Taking into account the natural coastal systems in coastal risk management," *Houille Blanche*, no. 2, pp. 5–12, 2018.
- [42] S. Etienne, "Marine inundation hazards in French Polynesia: Geomorphic impacts of tropical cyclone oli in February 2010," *Geol. Soc. Spec. Publ.*, vol. 361, no. 1, pp. 21–39, 2012.
- [43] C. Heinzlef, V. Becue, and D. Serre, "Operationalizing urban resilience to floods in embanked territories – Application in Avignon, Provence Alpes Côte d'azur region," *Saf. Sci.*, vol. 118, no. February, pp. 181–193, 2019.
- [44] S. L. Cutter, C. G. Burton, and C. T. Emrich, "Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions," *J. Homel Secur. Emerg. Manag.*, vol. 7, no. 1, 2010.
- [45] C. Heinzlef, V. Becue, and D. Serre, "A spatial decision support system for enhancing resilience to floods . Bridging resilience modeling and geovisualization techniques," no. October, pp. 1–29, 2019.