

Réfléchir à la gestion du risque inondation par un jeu de rôle informatisé basé sur la simulation multi-agent

Franck Taillandier¹, Annabelle Moatty¹, Pénélope Brueder¹, Bruno Beullac¹, Pascal Di Maiolo¹, Corinne Curt¹

¹INRAE, Aix Marseille Univ, RECOVER, Aix-en-Provence, France, franck.taillandier@inrae.fr

²ADEME, 2 Bd de Gabès - 13008 Marseille

RESUME La gestion des inondations est un enjeu majeur pour de nombreux territoires. Cependant, les stratégies de gestion de ce risque sont souvent peu performantes car elles ne sont pas pensées dans un cadre multicritère, sur le long-terme et en impliquant les citoyens. Pour répondre à cet enjeu, nous avons conçu un jeu sérieux Sim-MANA basé sur un modèle multi-agent (MANA-Flo) visant à sensibiliser le grand public à la gestion de ce risque en intégrant une grande variété de solutions structurelles (digue, noues, végétalisation, délocalisation...). Les joueurs, qui incarnent chacun un rôle, doivent discuter et négocier pour choisir des projets sur leur territoire qui sont alors évalués sur plusieurs critères au travers du modèle MANA-Flo qui permet de simuler une inondation. Différents éléments matériels tels qu'une maquette 3D du territoire permettent de renforcer l'immersion des joueurs. Un dispositif d'évaluation des apprentissages du jeu a été conçu et des ateliers test seront menés en 2023.

Mots-clefs Inondation, gestion des risques, jeu sérieux, modèle multi-agent, Solution fondée sur la nature

I. INTRODUCTION

La combinaison des effets du changement climatique avec l'augmentation des enjeux exposés, et parfois de leur vulnérabilité, notamment dans les zones urbaines côtières, a fait de la gestion des risques un enjeu majeur pour le développement de ces territoires (Wang et al., 2023). Différentes stratégies structurelles et non structurelles peuvent être envisagées pour faire face aux risques naturels, notamment les inondations (Curt et al., 2020). Les stratégies structurelles classiques reposent avant tout sur une "protection dure", c'est-à-dire un élément anthropique (digue, barrage, etc.) visant à protéger des enjeux d'un aléa. Cette approche, si elle est efficace, pose plusieurs problèmes car ces structures donnent souvent une impression trompeuse de protection totale à la population, encourageant ainsi l'urbanisation et à des comportements à risque, et par ailleurs, génèrent des dégradations sur l'environnement et le paysage. Une stratégie alternative consiste à utiliser des solutions fondées sur la nature (SfN). L'UICN définit les SfN comme des "actions visant à protéger, gérer durablement et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés afin de répondre directement aux défis sociétaux d'une manière efficace et adaptative tout en garantissant le bien-être humain et les avantages de la biodiversité" (UICN, 2016). Ainsi, au-delà des enjeux de protection, les SfN procurent des co-bénéfices pouvant être très diversifiés et

concerner des aspects socioculturels et économiques tels que l'amélioration de l'attractivité des lieux, la création d'emplois verts, la qualité de vie et la santé (Curt et al., 2022; Raymond et al., 2017).

Les résultats du projet H2020 NAIAD (2016-2019) révèlent que les SfN mises en œuvre en milieu urbain pour réduire les hauteurs d'eau ou les débits de crues sont efficaces pour les événements de faible période de retour mais le sont moins pour les événements extrêmes (Degache-Maspero, 2019). De plus, l'efficacité des SfN est conditionnée par la bonne santé écologique des systèmes. Les SfN sont techniquement efficaces à certaines échelles spatiales et dépendent fortement du contexte local (social, économique, culturel). En tant que tel, leur déploiement pour mettre en œuvre la transition vers un mode de développement plus durable implique de surmonter des obstacles techniques, institutionnels, réglementaires, économiques et financiers. En effet, les questions de dimensionnement, de mise en œuvre, d'évaluation et de suivi des SfN et de leurs co-bénéfices impliquent des connaissances et des compétences spécifiques à différentes échelles (du sous-écosystème à l'échelle de la région administrative) qui font défaut (Giordano et al., 2020). Le manque de retour d'expérience et de protocoles standardisés pour évaluer l'efficacité des SfN en termes d'atténuation des risques est un obstacle au financement de ces actions. Une autre contrainte est liée à la temporalité de l'efficacité de ces solutions, en effet certaines d'entre elles atteignent leur efficacité maximale en plusieurs années voire décennies (lorsqu'elles impliquent la plantation et la croissance d'arbres par exemple) (Degache-Maspero, 2019). Les incertitudes, notamment en ce qui concerne l'efficacité de la prévention, sont à l'origine de nombreux obstacles sociaux et culturels à la mise en œuvre des SfN [(Giordano et al., 2020).

Ces obstacles et incertitudes rendent l'implémentation des SfN encore marginale ; les solutions d'ingénierie classiques étant largement privilégiées. Au travers de ce travail, nous proposons un dispositif permettant de sensibiliser les différents acteurs d'un territoire aux SfN, afin de leur permettre de mieux les connaître et de mieux appréhender leurs intérêts et leurs limites. Ce dispositif cherche à intégrer toutes les parties prenantes, depuis les techniciens, les élus jusqu'aux habitants, dans le processus de prise de décision, afin que ces différents acteurs discutent collectivement des stratégies possibles pour gérer les inondations. Pour cela, nous avons proposé un jeu sérieux Sim-MANA qui combine jeu de rôle et simulation informatisée basée sur un modèle multi-agent (SMA). Sim-MANA a été conçu pour 5 à 15 joueurs, plus un maître de jeu. Il ne nécessite aucune connaissance ou compétence initiale pour les joueurs, bien qu'il soit tout à fait jouable par des experts dans le domaine des inondations, ou par une équipe mixte (experts et béotiens). Il place les joueurs à la tête d'un conseil municipal au cours duquel ils doivent prendre des décisions relatives à l'aménagement du territoire et à la gestion des inondations (inondations et ruissellement) en zone urbaine. Le jeu a été conçu autour de trois objectifs associés aux connaissances à transférer aux joueurs : 1) sensibiliser aux différents enjeux liés au développement d'un territoire soumis aux inondations ; 2) informer sur les différentes stratégies pour faire face aux inondations et en particulier les SfN, et leurs avantages et inconvénients ; 3) montrer le compromis entre les différents enjeux et les perceptions des différentes parties prenantes, et donc la complexité du système. En outre, Sim-MANA vise à initier et développer la discussion, partager opinions et idées, et permettre un débat collectif sur la gestion des inondations dans le cadre de la planification urbaine.

II. ETAT DE L'ART

Différents jeux ont été proposés pour sensibiliser aux inondations et/ou fournir des connaissances pour la gestion des risques. Une revue de littérature a identifié 37 jeux liés à la gestion des risques d'inondation (Forrest et al., 2022). Ces jeux présentent des caractéristiques variées : informatisés ou non, prenant en compte la phase pré-événement, la phase de gestion de crise et/ou les phases post-événement, pour un ou plusieurs joueurs, etc. Nous nous concentrerons plus précisément dans cette partie sur les jeux qui intègrent la phase pré-événement (gestion du territoire avant l'événement) et offrent l'opportunité d'utiliser des stratégies avec des SfN en zone urbaine.

Jeux de société et/ou jeux de rôle. Il existe quelques jeux sérieux de type jeu sur table axés sur la gestion des inondations, mais peu d'entre eux s'intéressent à la phase précédant l'événement et encore moins aux SfN. Par exemple, Flood control game (Ernst et al., 2012) et AnyCare (Terti et al., 2019) sont consacrés à la gestion de crise. Le jeu Floodplain Management Game propose aux joueurs d'élaborer une stratégie pour atténuer les inondations (Magnuszewski et al., 2012), mais il se concentre sur le rôle des agriculteurs et les stratégies sont axées sur la production agricole et sur les solutions grises (digues et canaux). À notre connaissance, aucun jeu de ce type n'est consacré aux SfN pour la prévention des risques d'inondation.

Jeux basés sur des simulations informatiques. Plusieurs jeux sérieux informatisés ont été proposés pour sensibiliser les acteurs à la gestion des inondations. Mais, à notre connaissance, seuls deux jeux dans la littérature considèrent des stratégies basées sur les SfN : LittoSIM (Becu et al., 2017) et SPRITE (Taillandier and Adam, 2018). LittoSIM est un modèle de simulation participatif développé pour sensibiliser aux inondations côtières sur l'île d'Oléron. Il vise à rendre les connaissances scientifiques accessibles aux élus locaux et aux agents communaux, et à leur permettre de faire le lien entre ces connaissances et les stratégies de gestion. Si LittoSIM a été calibré à l'origine pour l'île d'Oléron, des développements récents (LittoSIM-GEN (Laatabi et al., 2022)) ont permis de le transposer à d'autres territoires (comme la Camargue ou la Normandie) via la mise en place d'un système d'archétypes définis selon le type de littoral inondable. SPRITE s'appuie également sur le cas de l'île d'Oléron. Il vise à fournir un support pour l'enseignement de la gestion des risques aux étudiants de premier cycle. Ces deux modèles proposent de jouer le rôle du maire, dont l'objectif est d'améliorer la sécurité des habitants, notamment en utilisant les SfN, tout en tenant compte des enjeux économiques et environnementaux, sur plusieurs années.

Ces deux jeux présentent des différences avec nos objectifs : (i) ils ciblent un public spécifique (élus et agents communaux pour LittoSIM, puis gestionnaires des risques pour LittoSIM-GEN ; et étudiants pour SPRITE) ; (ii) ils se focalisent sur la submersion marine et non sur les inondations (crues et ruissellement) ; (iii) le territoire étudié est celui de l'île d'Oléron dans son ensemble (SPRITE) ou de plusieurs communes de l'île (LittoSIM), alors que le territoire visé dans notre cas est plus restreint (commune/quartier) ; (iv) ces jeux proposent de jouer des rôles de maires, alors que nous souhaitons pouvoir jouer le rôle de différents acteurs locaux. Nous pouvons mentionner un troisième jeu issu de la littérature et qui a des liens avec notre travail : Virtual River (den Haan et al., 2020). Ce jeu hybride combine jeu de société et jeu vidéo afin de permettre une réflexion collective sur la gestion d'une rivière aux Pays-Bas. Bien que la problématique soit différente de la nôtre (pas centré sur les inondations et les SfN), certains éléments sont pertinents pour nos

objectifs dans Sim-MANA : la notion de rôles différenciés, la combinaison d'éléments virtuels et physiques, et l'utilisation d'une interface physique pour gérer la simulation informatique.

III. MODELE MANA-Flo

A. Principes

Afin de sensibiliser et de fournir des connaissances sur la gestion du risque d'inondation (actions de prévention et d'atténuation), nous avons conçu un modèle Agent (SMA) appelé MANA-Flo. Ce modèle est basé sur SiFlo (Taillandier et al., 2021), qui est un SMA dédié à la simulation des inondations dans les zones urbaines. SiFlo prend en compte à la fois l'aléa (déversement de l'eau) et la réaction de la population, qui peut effectuer différentes actions : protéger sa maison, évacuer, partager des informations, etc. SiFlo est capable de simuler différents scénarios, mais chaque scénario doit être instancié dans le modèle via les paramètres du modèle. Toutefois, le temps de calcul de la simulation ne permet pas d'utiliser SiFlo dans le cadre d'un jeu où le participant doit obtenir rapidement des résultats. MANA-Flo est donc une version simplifiée et interactive de SiFlo, destinée à être utilisée dans le cadre d'un jeu.

B. Agents

MANA-Flo considère 10 types d'agents : Grille, Bâtiment, Route, Rivière, Digue, Voiture, Habitant, Piscine, Réseau d'eaux pluviales et Monde (agent global). La **grille** est le support du monde virtuel et peut être considérée comme le plateau de jeu. Elle est composée d'un ensemble de cellules de dimensions de 10 m x 10 m. Chaque cellule a une altitude (la grille intègre les informations topographiques). La dynamique de l'écoulement de l'eau utilise la grille. L'agent **rivière** constitue le chemin préférentiel pour l'écoulement de l'eau. Chaque segment de rivière est caractérisé par une largeur et une profondeur. Les précipitations et l'eau arrivant de l'amont vont modifier le remplissage de la rivière et peuvent conduire à son débordement. L'agent **bâtiment** couvre tous les types de bâtiments : résidentiels, commerciaux (magasins ou bureaux) et recevant du public (ERP). L'eau peut pénétrer dans les bâtiments et les endommager. Ils sont caractérisés par leur hauteur et leur nombre d'étages, qui peuvent servir d'abri aux habitants en cas de crue. L'agent **digue** regroupe tous les types d'éléments dont le but est de faire obstacle à l'eau. Il peut s'agir d'un barrage en remblai, d'un mur, etc. Les digues sont caractérisées par leur hauteur et leur résistance. L'agent **bassin**, caractérisé par un volume, représente toute structure ou dispositif permettant de capter et de stocker l'eau. L'agent **route** correspond à tout élément routier. Les routes constituent le réseau sur lequel les agents habitant se déplacent (à pied ou en voiture). L'agent **réseau d'eaux pluviales** correspond à tous les éléments du réseau permettant l'évacuation des eaux pluviales. Comme la route, il est géolocalisé et caractérisé par une capacité d'évacuation. L'agent **voiture** est le moyen de déplacement privilégié des agents habitant. Les agents habitant peuvent les utiliser pour se déplacer rapidement, mais elles représentent aussi un danger. L'eau peut endommager les voitures et les empêcher de quitter une zone ; les agents qui voyagent en voiture dans des zones inondées sont particulièrement vulnérables. Les agents **habitant** modélisent un ménage. Leur comportement s'inspire de SiFlo (Taillandier et al., 2021) en utilisant les mêmes actions possibles : évacuer, rester à la maison, sortir, évacuer l'eau, sécuriser leur

voiture, protéger leurs biens, protéger la maison contre les intempéries, informer d'autres personnes. MANA-Flo utilise pour leur comportement un modèle réactif basé sur des "profils archétypaux" qui donnent aux agents habitant des préférences pour certains comportements (par exemple, fuir, protéger les biens, attendre). L'agent **projet** correspond aux actions possibles qui peuvent être choisies par les joueurs. La mise en œuvre d'un projet peut donner lieu à plusieurs sous-actions, comme par exemple la construction de nouveaux bâtiments et de nouvelles routes.

C. Dynamique

Le modèle MANA-Flo utilise une double dynamique : l'inondation et la gestion du risque ; le passage de l'une à l'autre est géré par le modèle. L'inondation utilise un pas de temps de 30 s et simule le déroulement de l'événement. La gestion se met en œuvre sur 2 ans et intègre la composante interactive du modèle, en proposant à l'utilisateur de choisir des projets à mettre en œuvre.

Dynamique d'inondation. La simulation de l'inondation est basée sur le modèle SiFlo. Tout d'abord, l'agent monde met à jour les données environnementales (par exemple l'eau provenant de l'amont, la pluie) à partir de scénarios prédéfinis. Cela nous permet de définir le nouvel apport d'eau dans le système. Ensuite, un sous-modèle de déversement est utilisé pour simuler l'écoulement de l'eau. À chaque pas de temps, l'eau s'écoule vers les cellules voisines d'altitude inférieure (en tenant compte de la topographie, de la hauteur d'eau, du lit de la rivière et des ouvrages de protection) ; l'écoulement est réparti entre les cellules en fonction de la pente. Il en résulte un niveau d'eau actualisé pour chaque cellule de la grille. À partir de ces niveaux d'eau, MANA-Flo calcule l'état des routes ; les routes inondées peuvent ralentir la vitesse des véhicules, être dangereuses ou impraticables. Après la route, MANA-Flo met à jour l'état des bâtiments. En fonction de la perméabilité des bâtiments, l'eau sur la cellule peut plus ou moins pénétrer dans le bâtiment. Comme pour la route, l'eau dans le bâtiment peut causer des dommages (par exemple, la détérioration des meubles, des revêtements de sol, etc.). Enfin, les agents habitant vont agir. Dans un premier temps, ils "perçoivent" leur environnement. Selon leur situation, leur vie peut être menacée (mort ou blessure). Ils agissent en fonction de leur archétype et de ce qu'ils connaissent de la situation (e.g. présence d'eau proche). Le même processus est reproduit à chaque pas de temps jusqu'à la fin de l'événement d'inondation (paramètre du scénario).

Processus de gestion. Au début de cette dynamique, MANA-Flo informe sur les conséquences de l'inondation précédente et remet à jour neuf indicateurs appartenant à trois catégories : l'environnement (biodiversité, changement climatique et espaces naturels), l'attractivité (nombre d'habitants, services et entreprises, et satisfaction de la population) et la sécurité face à l'inondation (humaine, matérielle publique, matérielle privée). Il calcule ensuite le coût des réparations que les différents joueurs doivent payer. Il est à noter que la partie financière du jeu se fait par le biais de pièces de monnaie réelles et en dehors du cadre du modèle. Les joueurs peuvent ensuite agir sur le territoire en choisissant des projets à mettre en œuvre. Le modèle propose 18 projets différents déclinés en 3 niveaux de protection ou variantes en termes de localisation. Ces projets couvrent à la fois des projets d'infrastructure de protection (barrage écrêteur de crue, digues...), des SfN (jardins de pluie, bassins arborés...), et des actions d'aménagement (construction d'un nouveau quartier, d'établissement de service, de

commerces...). Chaque action contribue positivement à certains indicateurs et peut en dégrader d'autres. MANA-Flo met à jour les indicateurs après chaque nouvelle action.

D. Implémentation

MANA-Flo a été implémenté sous GAMA 1.9 (Taillandier et al., 2019), plateforme de simulation multi-agents, en open-source, qui offre de nombreuses fonctions intéressantes pour MANA-Flo. GAMA permet une intégration native des données SIG. GAMA offre différentes fonctionnalités permettant d'intégrer de l'interactivité dans la simulation. Il fournit notamment, via un plugin spécifique, une fonction permettant de lire et de transcrire un QR code en une action au cours de la simulation.

En entrée, MANA-Flo utilise des fichiers OSM et ASC pour tous les éléments géographiques (bâtiments, routes, topographie...). Si, théoriquement, le modèle peut être appliqué à n'importe quel territoire, dans le cadre de la simulation interactive, il a été conçu pour être appliqué à un territoire virtuel spécifique. Ce territoire appelé La Vita rassemble de nombreuses caractéristiques des zones urbaines du sud-est de la France, conçu sous SIG (depuis le modèle numérique de terrain jusqu'à l'occupation des sols).

En sortie, MANA-Flo fournit une carte du territoire simulé avec les principaux éléments (bâtiments, routes, digues...) (Fig. 1). Il est possible d'afficher sur la carte des informations sur l'inondation actuelle (c'est-à-dire la hauteur d'eau, les bâtiments et les routes endommagés), et sur les inondations passées, sur le PLU et ou encore sur la topographie. Outre la carte, le modèle fournit un histogramme avec les valeurs actualisées des indicateurs. Il propose aussi différentes informations au maître du jeu : des éléments narratifs liés à l'inondation (par exemple, météo), les conséquences de l'inondation et des éléments liés aux projets mis en œuvre.

Chaque projet a un QR-code, et pour réaliser un projet pendant la simulation, l'utilisateur doit passer son QR-code devant la caméra ce qui permet d'implémenter directement le projet dans le monde simulé. La carte et les indicateurs sont mis à jour en tenant compte de ce nouveau projet.

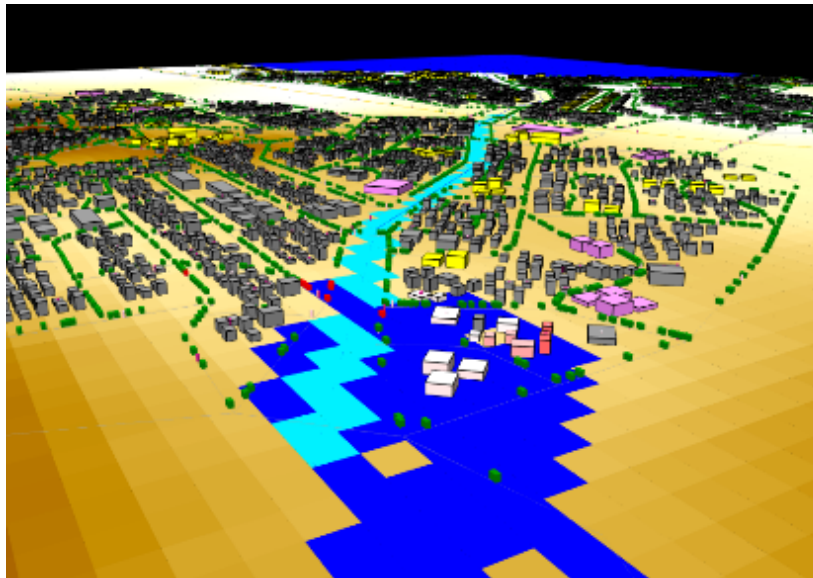


FIGURE 1. Exemple de vue sur la carte pendant une simulation d'inondation (GAMA)

III. JEU SIM-MANA

A. Principes et composants

Sim-MANA a été conçu dans le but de réunir des joueurs ayant différents niveaux de connaissances et points de vue sur la gestion des inondations. Les joueurs endossent l'un des cinq rôles suivants : équipe municipale, services techniques, syndicat de l'environnement, représentant des habitants et représentant des entreprises. Trois tours sont organisés, chaque tour représentant deux années, soit les six années d'un mandat municipal français. A chaque tour, les joueurs sont informés de la situation grâce à la carte et aux indicateurs. En fonction de leur rôle, les joueurs choisissent les projets qu'ils souhaitent porter parmi les 18X3 projets possibles. Les projets sont de différentes natures : projet d'aménagement (construction de nouveaux quartiers, de bâtiments de services, de parcs, modification du PLU...), projets de désartificialisation (jardins de pluie, désimperméabiliser, végétaliser...), projet d'ouvrage de protection (barrage, murets de protection ...), projet de SfN (bassin de rétention arboré, noue...). Un joueur qui souhaite porter un projet doit le présenter aux autres joueurs au sein du Conseil municipal. S'il est retenu, il est implémenté dans la simulation par la lecture de son QR-code et changement du module de la maquette (*cf. Infra*). Chaque projet ayant un coût, il est bien sûr nécessaire que les joueurs puissent le payer pour que le projet soit implémenté. Une inondation est ensuite simulée avec une intensité allant d'une crue décennale à une crue centennale. Le jeu utilise un scénario d'aléa inspiré de celui de SRPITE (Taillandier and Adam, 2018) : une petite inondation (N1) au tour 0 (avant le premier tour des joueurs) pour expliquer le principe des inondations, une inondation moyenne (N2) au T1 pour permettre aux joueurs de tester leurs premiers choix, une inondation très forte (N4) au T2 pour mettre en difficulté les joueurs et véritablement éprouver leur stratégie, en leur permettant potentiellement de la réviser, et pour finir une inondation forte (N3) pour qu'il puissent tester et valider leur proposition finale. Le scénario de jeu est ainsi à chaque fois unique car dépendant des

choix des joueurs. L'impact des inondations dépendra des projets implémentés ; il est à noter qu'il y a des effets d'interactions entre les projets vis-à-vis de l'inondation, induisant que l'apport en termes de protection d'un ouvrage dépend aussi des autres ouvrages implémentés. Cela justifie le recours à un modèle agent pour simuler les inondations plutôt que de précalculer l'impact de toutes les stratégies possibles (plusieurs milliards de stratégies différentes).

Le jeu utilise différents éléments matériels. Il nécessite un ordinateur capable de faire tourner la simulation dans un temps raisonnable (pour les tests, un Intel(R) Core(TM) i7-9850H CPU 2.60GHz avec 32 GB de ram a été utilisé) avec une caméra (de n'importe quel type). La simulation est projetée sur une maquette en 3D du territoire, décomposée en 48 modules de 14 cm de côté (la maquette totale a une dimension de 1,20 m x 0,90 m). La maquette permet aux joueurs de mieux se représenter la topographie et la localisation des éléments. En outre, les projets sont associés à des modules. Pour mettre en œuvre des projets, les joueurs doivent remplacer le module actuel par le module avec le projet (par exemple avec un barrage en plus).

Le jeu comprend également un ensemble de fiches : une pour chaque rôle précisant les objectifs de chacun, leurs moyens d'action sur le territoire (budget et projets qu'ils peuvent réaliser) ainsi que des éléments narratifs de contexte. Chaque projet dispose également d'une fiche, donnant une brève présentation, expliquant qui peut le porter (quel rôle) et qui peut s'y opposer, sa localisation, ses conséquences en termes d'indicateurs et son coût. L'argent dans le jeu est une monnaie virtuelle appelée "espego" représentée par des pièces de métal de valeur 1 à 100.

B. Session de jeu

Le jeu se déroule dans le cadre d'un atelier composé de 4 phases : mise en place, briefing, session de jeu et débriefing. La mise en place se déroule avant l'arrivée des joueurs. Elle a pour but d'installer le matériel et de vérifier le fonctionnement du modèle. Le briefing commence par l'accueil des joueurs. Le maître du jeu explique ensuite rapidement le déroulement de la session et demande aux joueurs de remplir un questionnaire préliminaire sur leurs connaissances des inondations, des SfN et leurs perceptions des mesures de gestion des inondations. Le maître du jeu attribue ensuite un rôle à chaque joueur - ou équipe. Chaque joueur doit lire aux autres sa carte de rôle. Ces informations peuvent être utilisées dans le jeu pour négocier, par exemple. Après l'attribution des rôles, le maître du jeu expose le contexte général de La Vita, et lance la simulation qui commence par une première inondation décennale. Pendant cette simulation, le maître du jeu peut expliquer des éléments plus spécifiques tels que le rôle de la rivière Vitello pour la ville, les types de bâtiments qui se trouvent dans les zones à risque, etc. Cette étape lance le jeu. Le maître du jeu expose les conséquences, et les nécessités de réparations et de reconstruction. La première phase de négociation/décision peut alors commencer.

Le jeu se termine par une dernière inondation et ses conséquences, avant de passer au débriefing, moment de réflexion qui permet de comparer l'expérience du jeu avec la réalité (Crookall, 2010). Il commence par la réponse individuelle à un questionnaire permettant d'identifier les apprentissages associés au jeu et de recueillir le ressenti de chaque joueur (il fait écho au premier questionnaire rempli en début de session). Ensuite, le maître du jeu demande aux joueurs leur retour sur le jeu ; leur perception et leur vécu, ce qui favorise les échanges entre joueurs, ensuite, ce qu'ils ont compris ou appris du jeu ; et enfin, ce qu'ils auraient dû faire pour

obtenir un meilleur résultat. Cela devrait les amener à repenser aux différentes possibilités qui s'offrent à eux, y compris l'utilisation des SfN. Une fois cette phase terminée, on demande aux joueurs s'ils pensent que ce type de stratégie est possible sur leur territoire de vie et quelles sont les stratégies spécifiques qu'ils pourraient envisager. L'objectif est ici de revenir à la réalité et de confronter leur expérience de jeu aux contraintes et opportunités que peut avoir leur propre ville. Cela devrait conduire à des échanges entre joueurs et les motiver à s'engager dans un processus de réflexion sur les stratégies alternatives de gestion des risques d'inondation.

C. Validation

Le protocole d'évaluation des apprentissages des ateliers Sim-MANA s'articule autour de deux outils, le questionnaire en deux parties, et une fiche d'observation (basée sur le modèle des observations non participantes) remplie par l'équipe scientifique. Le jeu a été testé dans 3 ateliers, et de nouveaux sont prévus. Les résultats obtenus ne sont donc pas définitifs et doivent être complétés. Actuellement, 15 personnes ont joué à Sim-MANA : principalement des personnels d'INRAE ou de Aix-Marseille Université, occupant des postes variés (stagiaire, chercheur, appui à la recherche) et avec des connaissances très variables sur les inondations et les SfN.

Dans l'ensemble, de nombreux joueurs ont apprécié l'aspect jeu de rôle et l'idée de travailler ensemble pour trouver des solutions. Plusieurs joueurs ont souligné qu'ils trouvaient intéressant de confronter, à travers les rôles, plusieurs points de vue sur les inondations et sur l'aménagement du territoire. Certains ont dit que le jeu les avait amenés à développer des connaissances et des compétences, et à adopter une nouvelle perception du risque d'inondation en relation avec l'aménagement du territoire. Ils ont tous été capables de donner une définition des SfN à la fin de l'atelier, alors que beaucoup n'en avaient pas été capables auparavant. Parmi les critiques, le manque de lisibilité de leur action, notamment sur l'interaction de chaque projet avec les indicateurs, a été mentionné. D'autres ont souligné le fait qu'ils avaient reçu trop d'informations au début de l'atelier et qu'ils ne se sont sentis à l'aise avec les projets qu'au troisième tour. Pour remédier à ces problèmes, nous avons remanié les fiches projet et de rôle en synthétisant davantage les informations (et en particulier les conséquences des projets sur les indicateurs) et nous avons modifié la présentation avant le jeu, en ajoutant des éléments au discours du maître du jeu tels qu'une présentation très synthétique des différents projets. Lors du deuxième atelier, à l'initiative d'un des joueurs, l'équipe a souhaité proposer une nouvelle action, non disponible dans le jeu (faire une étude d'impact sur un projet). Le maître du jeu a pu le faire (grâce à sa connaissance de l'aléa et du territoire), et cette "nouvelle" action a donc été intégrée à la session de jeu. Ainsi, même si le jeu est lié à la simulation et au modèle, ce qui limite la capacité d'intégrer des solutions nouvelles et imprévues, il reste une marge de créativité que nous encourageons. Le rôle du maître du jeu est très important à cet égard pour définir ce qui peut et ne peut pas être fait, et pour trouver des solutions permettant de suivre la créativité des joueurs.

En complément des éléments qualitatifs et en attendant que suffisamment de questionnaires aient été remplis pour les éléments quantitatifs, nous avons proposé de calculer quelles étaient les stratégies optimales du jeu. Sim-MANA est un type de jeu où les joueurs doivent choisir et planifier des actions, en maximisant un ensemble d'indicateurs tout en respectant des contraintes (par exemple, le budget versus les coûts des actions). Ceci peut être pensé comme un problème

d'optimisation multi-objectif que nous avons modélisé et avons résolu par algorithmes génétiques. Les résultats, présentés sous forme de fronts de Pareto, fournissent des informations sur les différentes stratégies optimales (les stratégies non dominées). Sans entrer dans les détails, cette approche a permis de justifier que les SfN sont particulièrement intéressantes dans le jeu, en raison notamment de leurs co-bénéfices. Ainsi, le jeu tendrait à favoriser ce type d'approche sans pour autant obliger les joueurs à ne faire que des SfN ; les solutions classiques restent très efficaces en termes de protection des biens et des populations, et la plupart des stratégies optimales combinent projets d'infrastructure protection et d'aménagement avec des SfN. L'idée de MANA-Flo n'est ainsi pas de favoriser les SfN ou d'en faire une panacée, mais d'élargir le spectre de réflexion habituel en poussant les acteurs à aborder la gestion des inondations avec une vision multicritère, dans laquelle les SfN ont un réel intérêt et se montrent très complémentaires d'autres stratégies.

IV. CONCLUSION

Nous avons présenté le jeu Sim-MANA qui vise à sensibiliser les différents acteurs d'un territoire à la gestion des risques d'inondation, en particulier par l'utilisation des SfN. Il est basé sur un SMA, MANA-Flo, qui permet de simuler une inondation en prenant en compte les choix d'aménagement faits par les joueurs, et d'évaluer les différentes dimensions de la gestion du territoire. Sim-MANA est avant tout un support pour inciter les acteurs à se pencher sur ce sujet, à discuter ensemble, à comprendre les enjeux et les compromis de la gestion des risques d'inondation. Le jeu et le modèle sont opérationnels. Les tests en cours sont susceptibles de les faire évoluer légèrement (notamment au niveau des paramètres), mais le jeu est « jouable » et a montré des résultats encourageants lors des premiers ateliers tests. Ces séances seront poursuivies dans les prochains mois, le prochain enjeu étant de toucher les acteurs de terrain (élus, services techniques, associations, habitants, etc.). Cela, devrait permettre d'apporter des éléments de validation de l'approche.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet MANA, financé par la Fondation MAIF.

REFERENCES

- Becu, N., Amalric, M., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Delay, E., Long, N., Marilleau, N., Pignon-Mussaïd, C., Rousseaux, F., 2017. Participatory simulation to foster social learning on coastal flooding prevention. *Environ. Model. Softw.* 98, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.09.003>
- Crookall, D., 2010. Serious Games, Debriefing, and Simulation/Gaming as a Discipline. *Simul. Gaming* 41, 898–920. <https://doi.org/10.1177/1046878110390784>
- Curt, C., Di Maiolo, P., Schleyer-Lindenmann, A., Tricot, A., Arnaud, A., Curt, T., Parès, N., Taillandier, F., 2022. Assessing the environmental and social co-benefits and disbenefits of natural risk management measures. *Heliyon* 8, e12465. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12465>
- Curt, C., Tricot, A., Parès, N., Di Maiolo, P., Curt, T., Taillandier, F., Arnaud, A., Schleyer-Lindenmann, A., 2020. Assessment of the sustainability of risk management measures: an interdisciplinary approach, in: *26th International Association People – Environment Studies*. Québec, Canada.

- Degache-Maspero, A., 2019. Les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature dans le Programme LIFE, Des solutions fondées sur la nature pour s'adapter au changement climatique. Rapport au Premier ministre et au Parlement.
- den Haan, R.J., van der Voort, M.C., Baart, F., Berends, K.D., van den Berg, M.C., Straatsma, M.W., Geenen, A.J.P., Hulscher, S.J.M.H., 2020. The Virtual River Game: Gaming using models to collaboratively explore river management complexity. *Environ. Model. Softw.* 134, 104855. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104855>
- Ernst, L., de Bruijne, J.E., Booister, N., Tretjakova, D., van Weele, E., 2012. The flood control game as a means to improve crisis communication. *Compr. Flood Risk Manag. Res. Policy Pract.* 425.
- Forrest, S.A., Kubíková, M., Macháč, J., 2022. Serious gaming in flood risk management. *WIREs Water* 9, e1589. <https://doi.org/10.1002/wat2.1589>
- Giordano, R., Pluchinotta, I., Pagano, A., Scricciu, A., Nanu, F., 2020. Enhancing nature-based solutions acceptance through stakeholders' engagement in co-benefits identification and trade-offs analysis. *Sci. Total Environ.* 713, 136552. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136552>
- Laatabi, A., Becu, N., Marilleau, N., Amalric, M., Pignon-Mussaud, C., Anselme, B., Beck, E., Bertin, X., Monfort, A., Hayoun, C., Rousseaux, F., 2022. LittoSIM-GEN: A generic platform of coastal flooding management for participatory simulation. *Environ. Model. Softw.* 149, 105319. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2022.105319>
- Magnuszewski, P., Stefanska, J., Sendzimir, J., Romaniuk, P., Taillieu, T., Zsuzsanna, F., Balogh, P., 2012. A Gaming Exercise to Explore Problem-Solving Versus Relational Activities for River Floodplain Management. <https://doi.org/10.2139/ssrn.2079020>
- Raymond, C.M., Frantzeskaki, N., Kabisch, N., Berry, P., Breil, M., Nita, M.R., Geneletti, D., Calfapietra, C., 2017. A framework for assessing and implementing the co-benefits of nature-based solutions in urban areas. *Environ. Sci. Policy* 77, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.008>
- Taillandier, F., Adam, C., 2018. Games Ready to Use: A Serious Game for Teaching Natural Risk Management. *Simul. Gaming* 49, 441–470. <https://doi.org/10.1177/1046878118770217>
- Taillandier, F., Di Maiolo, P., Taillandier, P., Jacquenod, C., Rauscher-Lauranceau, L., Mehdizadeh, R., 2021. An agent-based model to simulate inhabitants' behavior during a flood event. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 64, 102503. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102503>
- Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., Drogoul, A., 2019. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica* 23, 299–322. <https://doi.org/10.1007/s10707-018-00339-6>
- Terti, G., Ruin, I., Kalas, M., Láng, I., Cangròs i Alonso, A., Sabbatini, T., Lorini, V., 2019. ANYCaRE: a role-playing game to investigate crisis decision-making and communication challenges in weather-related hazards. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 19, 507–533. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-507-2019>
- UICN, 2016. Définition des solutions fondées sur la nature.
- Wang, M., Game, P., Gourbesville, P., 2023. Integrated modelling approach for flood forecasting in small Mediterranean catchment – Application to the Cagne Catchment, France. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 1136, 012021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1136/1/012021>