

ESCAPE: Simulation à base d'agents pour l'évacuation de populations lors des situations d'urgence

Olivier Gillet^a Eric Daudé^a Arnaud Saval^b Clément Caron^a
olivier.gillet@univ-rouen.fr eric.daude@cnrs.fr arnaud.saval@univ-rouen.fr caron.clement@gmail.com

Sébastien Rey-Coyrehourcq^a Patrick Taillandier^c Pierrick Tranouez^b
sebastien.rey-coyrehourcq@univ-rouen.fr patrick.taillandier@inrae.fr pierrick.tranouez@univ-rouen.fr

^aCNRS, Normandie Université, UMR 6266 IDEES

^bUniversité de Rouen Normandie, EA LITIS

^cUniversité de Toulouse, INRAE, UR MIAT

Résumé

L'évacuation des populations face aux risques naturels ou technologiques est un défi complexe qui requiert une planification et des exercices de préparation pour identifier les éventuels verrous et dangers. La simulation informatique, comme les modèles multiagents, est une alternative aux exercices grandeur nature pour tester divers scénarios tout en évitant les contraintes associées à ces exercices. Le projet ESCAPE a pour objectif de développer un corpus d'outils d'aide à la modélisation et à la simulation d'évacuation d'un territoire. L'analyse des scénarios simulés permet alors de comprendre la complexité d'une évacuation et sa mise en œuvre pratique. Cet article présente l'environnement ESCAPE, de la construction de l'environnement de simulation à la production d'indicateurs statistiques.

Mots-clés : évacuation, simulation à base d'agents, gestion de crise, risques naturels

Abstract

Mass evacuation from natural and technological hazards is a complex challenge that requires planning. Exercises must be used to prepare crisis managers and population, and they can also highlight the possible obstacles and dangers of an evacuation. Computer simulation, and in particular agent-based models, is then used as an alternative to these exercises because of its capacity to reproduce situations close to real systems and its ability to test a wide range of scenarios, while avoiding the constraints associated with full-scale exercises. The ESCAPE project aims to develop a set of tools to help model and simulate the evacuation of a territory. The analysis of the simulated scenarios allows to understand the complexity of such a strategy and its ope-

rationnalization. From simulation environment construction to the production of statistical indicators, this article presents the entire ESCAPE environment.

Keywords: evacuation, agent based simulation, crisis management, natural hazards

1 Introduction

Les aléas naturels et technologiques peuvent être à l'origine des crises qui constituent des menaces potentielles pour les biens, l'environnement et les personnes qui y sont exposées. L'expression de ces aléas est très variable en intensité, en fréquence et en probabilité d'occurrence. Elle peut être isolée, combinée ou en séquence [7]. Or, la vulnérabilité des territoires dépend à la fois des enjeux exposés et de la capacité à anticiper la nature et l'importance des dangers qui les menacent. Les risques se définissent comme une combinaison localisée d'un aléa et d'enjeux exposés. La réduction des risques porte à la fois sur une meilleure connaissance des aléas (surveillance, prédiction) et sur la réduction des vulnérabilités des enjeux exposés (mesures de mitigation, culture du risque)[16]. Selon la localisation de l'aléa et sa nature, l'évacuation massive de la population peut être une mesure phare de la gestion de crise. Cette stratégie peut s'avérer efficace pour soustraire toute ou une partie de la population d'une menace réelle mais peut entraîner des conséquences catastrophiques en cas de manque de préparation [3]. La préparation concerne à la fois les acteurs de la gestion de crise et la population. Les premiers doivent identifier les zones potentiellement exposées, connaître le nombre de personnes exposées ainsi que leurs vulnérabilités, préparer des centres d'accueil,

des moyens de transports collectifs et identifier des itinéraires d'évacuation. Les seconds doivent être conscients des dangers, connaître les consignes de sécurité et les systèmes d'alerte, être prêts à suivre les recommandations et à faire les choix qui s'imposent en contexte de crise.

Dans nombre de territoires soumis aux aléas naturels, la préparation des autorités et des populations s'est acquise au fil des crises passées. Une catastrophe majeure a dans bien des cas été l'élément déclencheur d'une prise de conscience de la nécessaire préparation à la stratégie de l'évacuation. C'est le cas du super cyclone qui a touché le Bangladesh en 1991 et causé la mort de plus de 140 000 personnes [10]. Cette tragédie a conduit l'Inde à inscrire dans la loi la planification et la gestion de crise. Le pays conduit chaque année, notamment pendant la période des cyclones, des évacuations massives de plusieurs milliers voire millions de personnes en limitant ainsi le nombre de décès [11]. Mais de nombreux territoires exposés à la menace d'un aléa n'ont heureusement pas encore connu de catastrophe, et la préparation à l'évacuation massive n'est pas encore une doctrine de gestion de crise pour les autorités. Et même lorsque celle-ci est inscrite dans des plans, l'opérationnalisation de ceux-ci en l'absence de crises ou d'exercices laisse de nombreuses zones d'ombre sur son efficacité et sur les réactions des acteurs en cas de déclenchement. C'est dans ce contexte que la modélisation et la simulation spatiale peuvent être un outil intéressant pour explorer les dynamiques possibles d'un tel événement.

Daudé et al., (2019) [8] propose une ontologie du système ESCAPE. Ce cadre conceptuel s'articule autour de quatre modules principaux : (1) L'environnement ; (2) L'aléa ; (3) Processus de prise de décision des agents ; (4) La gestion des situations d'urgence. Cet article veut présenter l'opérationnalité du projet ESCAPE et de la généralité des outils développés [8]. Cette suite d'outils a pour objectif d'identifier des verrous thématiques dans un territoire dont la population pourrait être amenée à évacuer. Une première série d'outils mobilise les méthodes des systèmes d'information géographiques pour décrire l'environnement de simulation. L'ensemble de ces données est compilé et utilisé dans un modèle de simulation qui permet de spécifier les dynamiques du système. Un ensemble de modèles permet alors de simuler les dynamiques spatiales (modèles de déplacement individuels et collectifs) et temporelles (injection d'événements). ESCAPE permet ainsi d'explorer de

nombreuses thématiques à partir de différents scénarios, qu'il s'agisse de l'évolution des conditions de trafic, de la capacité de réponse des populations ou encore des itinéraires d'évacuation. Selon différents plans d'expériences prédéfinis et stratégies d'exploration de modèle, de nombreuses sorties standardisées sont enfin traitées dans une dernière suite d'outils utilisant de nouveau les méthodes des systèmes d'information géographique et de statistique spatiale. Une application web de visualisation de données hébergées par l'infrastructure de recherche Humanités Numériques¹ permet d'explorer les résultats des simulations de manière intuitive afin de poursuivre les investigations et/ou de discuter avec les opérateurs de gestion de crise sur les connaissances produites par le système.

En continuité avec la partie introductive, la section 1 présente comment le système ESCAPE se positionne vis-à-vis des travaux existant dans le domaine de la simulation informatique des évacuations massives. La Section 2.1 présente en détails le système ESCAPE de la génération des inputs à l'analyse des sorties statistiques des simulations. Enfin, la Section 3.4 propose deux cas d'application (l'un sur le risque d'inondation à Saumur, l'autre sur le risque volcanique en Guadeloupe) pour illustrer l'outil ESCAPE.

2 Contexte

2.1 Modéliser les évacuations massives

La modélisation informatique des évacuations massive de la population est un sujet de recherche complexe. La modélisation nécessite une approche intégrée qui doit permettre de coupler des données spatiales hétérogènes. Elles incluent des données de population, les réseaux de transport ou encore les circuits de sirènes mobiles. Elle doit également intégrer les scénarios probables d'évolution de l'aléa et être en capacité de reproduire par la simulation la variété des comportements individuels et collectifs qui pourraient être observés dans des situations analogues. Cette chaîne de traitement doit fournir des outils d'exploration spécifiques à l'évacuation, telle que la localisation optimale de centres de refuge ou des itinéraires de collecte des personnes non autonomes.

Les modèles spatialisés de simulation à base d'agents ont investi le champ de la recherche

1. Site web de l'infrastructure de recherche Humanités Numériques
<https://www.huma-num.fr/>

sur les évacuations massives de populations [5]. Ceux-ci sont dans la plupart des cas décomposés en deux sous-systèmes qui interagissent, celui des humains qui décrit les enjeux et celui du système physique qui décrit l'aléa. Le premier est composé d'individus qui prennent des décisions en fonction de descripteurs individuels plus ou moins hétérogènes au sein de la population et de normes collectives qui représentent les règles de l'institution à laquelle ils appartiennent. Le second sous-système représente le comportement du système physique modélisé, en lien avec les enjeux environnementaux qui peuvent être affectés. Le système complet repose alors sur les interactions à de multiples échelles spatiales, temporelles et organisationnelles, avec des comportements régis par des informations imparfaites et des logiques qui peuvent être contradictoires entre les acteurs. La modélisation des déplacements est ainsi au cœur de ces modèles et repose pour la plupart sur des développements ad hoc. Même s'il existe des outils de modélisation de trafic reconnus (MATSim, TRANSIMS, SUMO, SimMobility) qui permettent de modéliser le trafic urbain au jour le jour, la plupart d'entre eux présentent des limites lorsqu'ils sont utilisés pour étudier les perturbations induites par des événements extrêmes [6]. Pour dépasser cette contrainte, des extensions ont été proposées afin d'adapter ces cadres à l'étude de l'évacuation de masse : MATSim fournit une extension dédiée à l'étude de l'évacuation [14]. D'autres travaux utilisent ce modèle [12, 25] pour simuler l'évacuation en cas de tsunami ou d'ouragan avec une simplification de la modélisation.

Puisqu'il est extrêmement difficile de réaliser des exercices grandeur nature pour préparer les autorités et la population, ESCAPE propose un système de modélisation et d'exploration de simulation d'évacuation générique et relativement simple à prendre en main. ESCAPE tente également de répondre à certains verrous liés à la simulation informatique des évacuations massives tels que la non-intégration des modules spécifiques pour modéliser une organisation responsable de gestion de crise. La validation de ces simulations est bien souvent difficile [24]. Les raisons sont multiples : données manquantes, incertitudes épistémiques, etc, Cependant il est indispensable de calibrer et de valider les modèles développés. Pour faire face à cette difficulté, certains sont calibrés via des données terrains (e.g calibration des vitesses de déplacements via des enregistrements GPS, définition des agendas synthétiques via des Enquêtes Ménages - Déplacements, définition des comporte-

ments réflexes via des enquêtes terrains). Puis les modèles sont soumis à des experts pour évaluer la cohérence des concepts et des sorties par rapport à la question de modélisation posée.

3 ESCAPE : un outil générique et complet

L'ontologie conceptualisée dans le cadre du projet ESCAPE décompose le système en quatre composantes : l'environnement, les aléas, le processus de prise de décision des individus et la gestion de crise par les autorités [8]. Le système ainsi envisagé est donc intégratif ; il envisage la combinaison et les interactions entre des composants de différentes natures allant des théories du comportement humain en passant par les dynamiques géophysiques des aléas, tout en mobilisant un cadre méthodologique informatique robuste afin de proposer un outil fiable et opérationnel. En se fondant sur des cas d'application réels, le modèle a été élaboré selon une approche analytique en coordination et concertation avec divers acteurs et experts. La chaîne de traitements nécessaires à l'évaluation d'un tel processus requiert une attention particulière dans la construction de l'environnement de simulation ainsi que la définition de scénarios d'aléas et d'évacuation afin de proposer une modèle réaliste, robuste et calibré.

3.1 Construction de l'environnement de simulation via R-Shiny

À l'heure de l'open data, il est relativement aisé de construire un environnement réaliste via des données géographiques libres d'accès. Le système a été spécialement conçu pour utiliser les données issues d'OSM. Malgré les limites bien connues de ces données, c'est la plus grande base de données spatialisées libres du monde. Il est donc possible à partir de ces données de modéliser un environnement dans lequel vont se mouvoir les agents - piétons et automobilistes. Les outils ESCAPE permettent de modéliser, à partir d'un fichier OSM XML, un territoire et ses infrastructures telles que le réseau routier ou les réseaux de transports en commun si la donnée est renseignée. Tous les éléments de l'environnement sont "agentifiés". Les réseaux sont décomposés en nœuds et tronçons où chacun a ses méthodes et attributs [21]. Il en va de même pour les bâtiments qui possèdent un certain nombre d'attributs comme le nombre d'individus ou de ménages s'il s'agit d'un habitat collectif. La défi-

inition de cet attribut suppose donc de générer et de ventiler une population synthétique sur l'ensemble de la zone d'étude. Cela fait référence à la génération d'une population synthétique qui simule les caractéristiques d'une population réelle lorsque les données réelles sont insuffisantes ou inaccessibles [17]. Les méthodes de génération de population synthétique sont nombreuses (avec ou sans échantillon, déterministe ou stochastique) et bien souvent fonction des données disponibles et du niveau de détails que l'on souhaite intégrer dans le système [5, 9]. Dans le système, chaque agent "humain" est doté d'attributs socio-démographiques, appartient à un ménage et possède un lieu de résidence. La génération d'une population synthétique peut être réalisée à l'aide de diverses techniques, mais l'algorithme le plus utilisé est l'IPF (Iterative Proportional Fitting) [22, 5, ?, 9]. Cette méthode de reconstruction avec échantillon a été utilisée pour l'un des cas d'application, la Guadeloupe. Les recensements de la population en France fournissent, via la base de données "Individus localisés au canton-ou-ville" [?], des données très précises sur les caractéristiques éco-socio-démographiques d'un échantillon représentatif de la population. D'autres données telles que les données carroyées à 200m de l'INSEE, les Enquêtes Ménages - Déplacements (EMD) ou les enquêtes de fréquentation peuvent être mobilisées dans les mêmes buts de générer une population ou d'apporter des précisions sur les mobilités quotidiennes des individus et ménages. Ces dernières incluent non seulement des informations sur les résidents permanents, mais aussi sur les individus qui entrent régulièrement (migration pendulaire) ou de manière ponctuelle, comme les touristes, dans les zones exposées. La population est ensuite ventilée sur le territoire selon les caractéristiques du bâti (fonction, superficie, nombre d'étages) [20].

La conception d'un environnement de simulation passe également par l'intégration d'une dynamique spatio-temporelle réaliste des aléas. Les sorties des modèles numériques modélisant la géodynamique d'aléas naturels comme technologiques constituent les entrées du système ESCAPE. Statique ou dynamique, l'agent "aléa" peut impacter les autres agents du système et modifier l'environnement de simulation. Il convient donc de définir au préalable les règles d'exposition à l'aléa des autres agents. Par exemple, l'exposition à un écoulement pyroclastique lors d'une crise éruptive, aussi brève soit-elle, est fatale alors que les conséquences directes des retombées de cendres volcaniques sont moindres

[2]. Concernant l'aléa inondation, la hauteur et la vitesse d'eau peuvent également avoir un impact plus ou moins important sur les capacités de déplacement des agents. L'intégration des aléas et ses interactions avec les autres agents n'est pas automatique. La grande diversité d'aléas et des gradients d'intensité compliquent le développement d'un outil générique. Il est nécessaire de programmer en GAML (GAMA Modeling Language) le processus de diffusion et d'interaction de l'aléa. Le GAML est le langage "haut niveau" orienté "objet-agent" de la plateforme de simulation GAMA. Il a été développé pour être utilisé par des non-informaticiens [23]. Il s'agit ici de définir un agent "aléa" et ses interactions avec les autres agents.

En plus de caractériser le territoire, les enjeux exposés, l'aléa et ses dynamiques possibles, il est possible de caractériser les outils de gestion de crise lorsqu'ils existent. Il s'agit par exemple de localiser des zones de refuges, des itinéraires d'évacuation ou bien encore des circuits de transport collectif pour évacuer les personnes non-autonomes. Une application Web a été développée en R via le package « shiny » [4] pour générer, sur les bases d'un savoir expert, de nombreuses réponses d'urgence conformes au formalisme du système ESCAPE. La figure 1 présente le visualiseur dynamique et interactif de l'application Web. Cette interface permet, aux experts ou non, d'éditer et de spatialiser diverses mesures telles que les points de rassemblement ou les itinéraires d'évacuation. L'application génère ensuite une archive contenant une liste de shapefiles (EPSG : 4326) pouvant être utilisés dans GAMA par l'extension logicielle ESCAPE.

3.2 Une extension logicielle de GAMA

Le système ESCAPE est une série d'outils qui permet de simuler l'évacuation de la population d'un territoire à des échelles temporelles et géographiques fines. Une attention particulière a été portée sur la modélisation des déplacements. Si de nombreux modèles dédiés à simuler des évacuations existent, peu sont capables de prendre en compte la réalité d'une évacuation massive de la population qui impliquerait des déplacements multi-modaux (à pied, en deux roues, en voiture privée, par les transports publics). Ainsi, si ESCAPE a été développé via la plateforme de simulation à base d'agents open-source GAMA [23, 5], il intègre en plus des extensions permettant de prendre en compte de façon fine ces différents types de mobilités [21]. La plateforme permet également d'exporter les données brutes

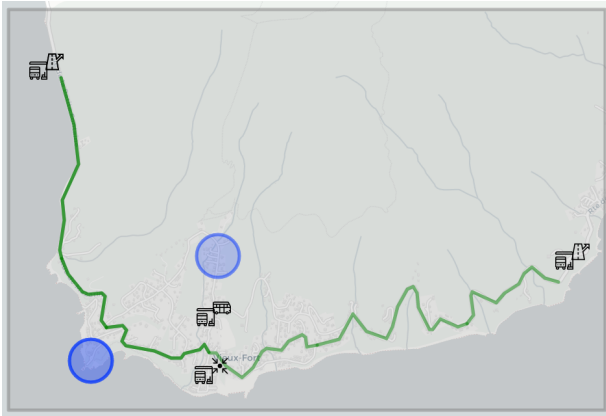


FIGURE 1 – Viewer dynamique et interactif de l'application R-Shiny. Les pictogrammes indiquent la localisation des points de rassemblement et des points de fuite. Le linéaire vert correspond aux itinéraires d'évacuation. Les cercles bleus indiquent l'emplacement des sirènes. Il s'agit d'un exemple entièrement fictif sur la commune de Vieux-Fort, Guadeloupe.

issues des simulations mais aussi des résumés statistiques. Le système se veut précis et exhaustif dans la récolte d'information sur les agents et leurs actions au cours des simulations.

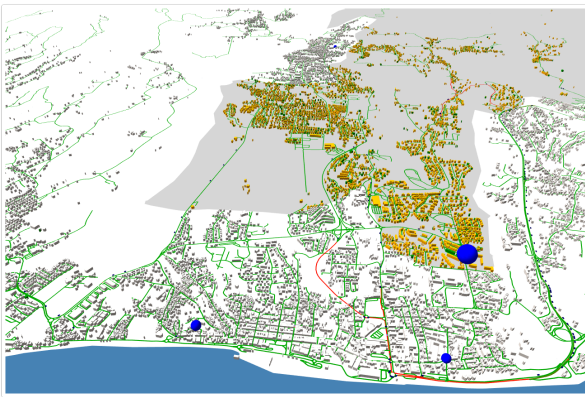


FIGURE 2 – Interface graphique de la plateforme de simulation GAMA. La figure présente l'évacuation polyphasée du sud de la région de Basse-Terre. Les axes routiers embouteillés sont en rouge, les sphères bleues représentent les points de rassemblement et la zone grisée est la zone à évacuer.

L'environnement de développement GAMA offre une interface de visualisation graphique des simulations en 2D ou 3D. La figure 2 présente une situation d'évacuation polyphasée des communes de Basse-Terre et Saint-Claude en Guadeloupe. Cette stratégie consiste à définir un

séquençage des départs afin de faciliter l'évacuation des populations et l'action des intervenants. La plateforme propose également un mode "headless". Cela permet d'exécuter une ou plusieurs instances de GAMA sans interface utilisateur, de sorte que les modèles et les expériences peuvent être lancés sur une grille ou un cluster de calcul. Ces simulations concernent généralement des dizaines de milliers d'agents et exigent des ressources de calcul importantes. L'accès aux infrastructures de calculs intensifs est requis pour l'exécution de plans d'expérience conséquents.

3.3 Exploration de scénarios "how-to" et "what-if" via OpenMole

Simuler l'évacuation de plusieurs dizaines voir des centaines de milliers d'agents qui interagissent entre eux, avec l'environnement et avec un aléa lui-même dynamique est un véritable défi en matière de temps de calcul. Ce défi se couple avec la complexité des scénarios explorés et des plans d'expérience programmés. ESCAPE permet de définir et d'explorer des scénarios "How-to" et "What-if" via le logiciel OpenMOLE (Open MOdeL Experiment) sur des environnements de calculs intensifs [19]. Dans ESCAPE, un scénario "what-if" consiste à introduire des événements perturbateurs pour voir comment ils affectent le déroulement d'une simulation (e.g. absence d'alerte ou route bloquée). En revanche, un scénario "how-to" a pour objectif de minimiser certaines variables telles que le temps total d'évacuation ou le nombre d'individus exposés aux aléas. Le cas d'application sur le risque d'inondation présenté dans la Section 3.4 ci-après est un exemple de scénario "what-if" dans lequel le temps de réaction des autorités est évalué. L'objectif, à travers ce scénario, est d'évaluer les conséquences sur les populations d'une réaction tardive des autorités ?

3.4 Une diversité d'indicateurs pour analyser un processus complexe via R-Shiny

Une simulation produit entre 1 et 2 Go de données, en fonction de la durée de la simulation et de l'intervalle d'enregistrement des données. Le choix d'exporter un volume important de données brutes a été fait pour étudier la robustesse ou la sensibilité du modèle aux variations de nombreux indicateurs. Au total, une trentaine d'indicateurs sont exportés afin d'étudier ce processus complexe. Une seconde application R-shiny [4] a été développée pour explorer

ces données sous la forme de résultats statistiques et cartographiques. Tout cela requiert un travail d'agrégation de données préalable pour produire des résumés statistiques pour chaque combinaison de paramètres. Le modèle est stochastique à plusieurs égards. Certains attributs des ménages, selon les scénarios, sont générés de manière aléatoire. Le choix d'évacuer, l'itinéraire d'évacuation ou encore le temps de réponse individuelle sont des potentielles sources de stochasticité qui doivent être prises en compte dans l'analyse. Le couplage d'OpenMOLE et des moyens de calcul intensifs haute-performance du CRIANN, le Centre Régional Informatique et d'Applications Numériques de Normandie, permet la parallélisation à large échelle afin d'explorer la combinatoire des paramètres et de saisir la stochasticité des modèles. Cela représente parfois plusieurs milliers d'exécutions dont certaines peuvent mettre plusieurs heures à s'exécuter. Les résultats statistiques agrégés des simulations correspondent à une moyenne de 30 réplifications au minimum d'une combinaison de paramètres pour capturer toute la stochasticité du système. L'archive contient des informations très précises sur, par exemple, l'exposition des individus aux aléas ou sur l'évolution de l'état de l'évacuation. Dans ESCAPE, il est possible de paramétrer tous les aspects, que ce soit l'intervalle de temps d'enregistrement ou la liste des indicateurs à exporter. Par défaut, le système sauvegarde la position de chaque agent "véhicules" toutes les secondes ainsi que diverses informations telles que le nombre de personnes en sécurité ou le nombre de véhicules bloqués toutes les minutes. Le parallélisme des traitements sous R permet l'exploration massive de plusieurs téraoctets de sorties statistiques (shapefiles et autres fichiers "text/csv"). Des listes d'indicateurs au format ".RData" sont alors créées pour faciliter l'exploration et la visualisation dans l'interface web (figure 3). Elle offre un aperçu général d'un plan d'expérience via des indicateurs mais permet également d'explorer, via des sliders, chaque combinaison de paramètres du plan. L'application offre, par exemple, la possibilité de visualiser l'état du trafic routier au cours de la simulation (nombre de véhicules sur les routes, temps d'embouteillage des tronçons routiers) ou d'identifier les "hotspots" d'exposition des individus aux aléas (nombre d'individus exposés, localisation des "victimes").

Nous présentons dans la section qui suit deux exemples d'applications développées dans le cadre de collaborations avec des opérateurs de gestion de crise, préfecture et communauté de

communes notamment.

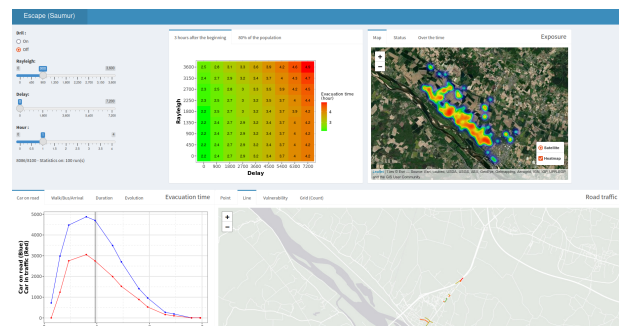


FIGURE 3 – Application web « R-shiny » d'analyse et d'exploration des sorties statistiques des modèles. L'application est composée de quatre grands blocs dans lesquels sont présentés des indicateurs globaux sur l'ensemble du plan d'expérience ainsi que des informations sur chaque combinaison de paramètres du plan. Les divers blocs présentent des informations relatives à l'exposition des individus (e.g. heatmap des "victimes"), l'évolution de l'évacuation (e.g. nombre de personnes en sécurité) et l'état du trafic routier (e.g. temps d'embouteillage).

4 Études de cas - Application du système ESCAPE

Nous illustrons le système ESCAPE par l'étude de deux cas de gestion de crise : l'évacuation massive de la ville de Saumur et ses environs (France) suite à une rupture de digues ; et l'évacuation spontanée et réactive du sud de la région de Basse-Terre durant une crise éruptive de La Soufrière de Guadeloupe (France).

4.1 Inondation et rupture de digues à Saumur

La ville de Saumur est située dans le sud-est du département du Maine-et-Loire, dans la région des Pays de la Loire. La commune compte plus de 26 000 habitants intra-muros et environ 30 000 habitants dans son agglomération. C'est le lieu de la confluence du Thouet avec la Loire. Pour se protéger, la ville s'est dotée d'ouvrages de protection, mais en cas de crue extrême, ces ouvrages pourraient ne pas suffire. La ville de Saumur a donc élaboré un dispositif ORSEC d'évacuation en cas de crue de la Loire. Ce dispositif se décline en trois phases et niveaux d'actions en fonction de l'intensité de la crue de la Loire : (1) La phase de vigilance renforcée inclut des actions préparatoires à une évacuation et des

actions d'information ; (2) La phase de préoccupations sérieuses avec les premières évacuations des personnes vulnérables ; (3) La phase de péril imminent qui prévoit l'évacuation totale de la population.

Le modèle est testé pour un scénario d'évacuation et d'aléa dans lequel l'alerte est au niveau de vigilance renforcée et où la rupture de digue est programmée pour 7 heures du matin, lorsque la plupart des gens sont chez eux provoquant l'évacuation réactive et totale des zones de danger.

La ville de Saumur et la population synthétiques ont été recréés numériquement à partir des données OSM² et de l'INSEE³ ainsi que les points-clés des outils de la gestion de crise du Plan Communal de Sauvegarde de la ville de Saumur. Plus précisément, le système intègre la localisation de sirènes fixes et mobiles pour alerter la population en cas de danger. Les abris et les centres d'accueil sont également localisés et définis dans le système. Pour les populations du centre-ville, un découpage en 4 zones est réalisé avec un abri associé à chacune d'entre elles pour permettre aux personnes non autonomes de se rendre à pied en lieu sûr. Les lieux de collecte décrits dans les PCS permettent aux personnes non-autonomes d'être transportées par des bus depuis des points de collecte vers des centres d'accueil (1 seul de référencé dans le PCS) ou hors de la zone de danger. Le scénario d'aléa correspond au scénario n°6 établi et détaillé dans le cadre de l'étude de danger de la digue réalisé par un bureau d'études pour la DREAL Centre-Val-de-Loire en 2014. ESCAPE offre la possibilité d'intégrer divers comportements 'réflexes' face aux aléas, tels que le refus d'évacuer ou la panique. Ici, le temps de réponse des individus est modélisé par la loi de Rayleigh [18, 1] et l'ensemble des individus exposés évacuent dès qu'ils ont reçu l'alerte (sirènes mobiles et fixes).

Le plan d'expérience élaboré a un double objectif. D'une part, il vise à évaluer les conséquences d'une alerte précoce comme tardive des autorités sur les évacuations, et d'autre part, il intègre une réaction différenciée des populations à l'alerte afin d'analyser les conséquences des comportements individuels sur la réussite de l'évacuation. Ces mouvements de populations vont également engendrer le départ spontané des individus localisés en dehors de la zone de danger. La figure 4 montre un résultat intéressant de cette exploration. On observe que le déclenchement différé

de l'alerte (entre 0 et 180 minutes après la rupture de digue) à des conséquences importantes sur l'évacuation pour ce scénario d'aléa. En effet, alors que 4 heures sont en moyenne nécessaire pour évacuer la population si la réaction des autorités est immédiate, une alerte tardive entraîne l'exposition en moyenne de plus d'un millier d'individus à l'aléa. L'estimation d'un temps moyen d'évacuation permet ainsi de donner une durée de référence pour étalonner les prises de décisions durant la crise.

4.2 Éruption phréatique de La Soufrière de Guadeloupe

L'activité du stratovolcan de La Soufrière de Guadeloupe a lentement augmenté depuis 1992 jusqu'à atteindre un seuil critique en 2017. Depuis, et compte tenu de l'augmentation de l'activité du système hydrothermal, l'observatoire volcanologique et sismique de Guadeloupe exerce une vigilance accrue. Une future intensification de l'activité du volcan n'est pas exclue. Et bien souvent, la seule protection possible contre les aléas volcaniques violents est de s'échapper de ces zones de danger. Il est donc important de planifier la réponse d'urgence à une future crise éruptive et d'identifier les problèmes ou les dangers potentiels d'une évacuation de masse de la région du sud de la Basse-Terre où se concentrent enjeux stratégiques et structurels [15].

Le modèle intègre seulement la phase phréatique de la dernière éruption magmatique majeure de la Soufrière en 1530 [13]. Le but de ce scénario est de mesurer les effets d'une forte sédimentation de cendres sur les mobilités des individus, via un plan d'expérience qui fera varier à la fois les réponses individuelles (accepter d'évacuer ou non, délais de la prise de décision) et celles des autorités. Les véhicules se trouvant donc dans la zone de danger, où l'épaisseur des dépôts de cendres est supérieure à 100 mm, sont considérés comme bloqués et ne peuvent plus être utilisés pour fuir. L'environnement de simulation représente une zone d'étude de 319 km² soit 7 communes de la Communauté d'agglomération Grand Sud Caraïbe. En ce qui concerne la population, 58478 agents synthétiques ont été créés et répartis dans plus 28000 ménages à partir du recensement de population de 2017. Les ménages véhiculés comme les piétons se déplacent sur plus de 3200 kilomètres de linéaire routier pour s'échapper des zones de danger.

La Soufrière, sans signe précurseur, entre en éruption tôt le matin à 8h55 pendant les vacances

2. *OpenStreetMap* <https://www.openstreetmap.org/>

3. *Données carroyées – Carreau de 200m* <https://www.insee.fr/>

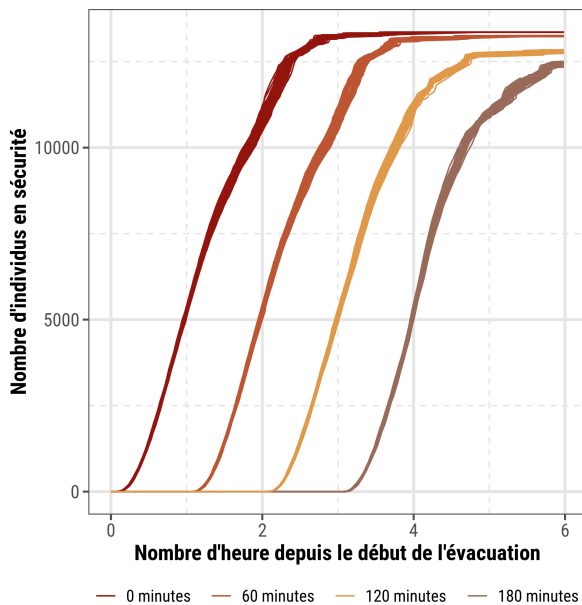
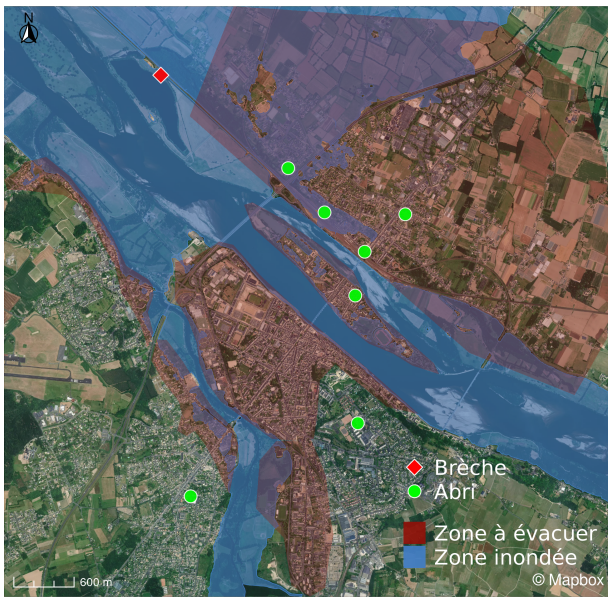


FIGURE 4 – La carte illustre l’extension spatiale de la crue de la Loire 6 heures après l’ouverture de la brèche. Les zones rouges correspondent aux zones à évacuer, 4 zones au total. Pour chaque zone, il y a un ou plusieurs centres d’accueil dont certains sont situés à l’intérieur de la zone de danger, évacuation verticale de la population. La figure présente l’évolution du nombre de personnes en sécurité au cours de l’évacuation et selon quatre modalités du temps d’alerte des autorités. Ces temps de réaction correspondent aux divers temps de l’alerte. Dans ce plan d’expériences, la population est alertée immédiatement ou quelques heures après l’ouverture de la brèche.

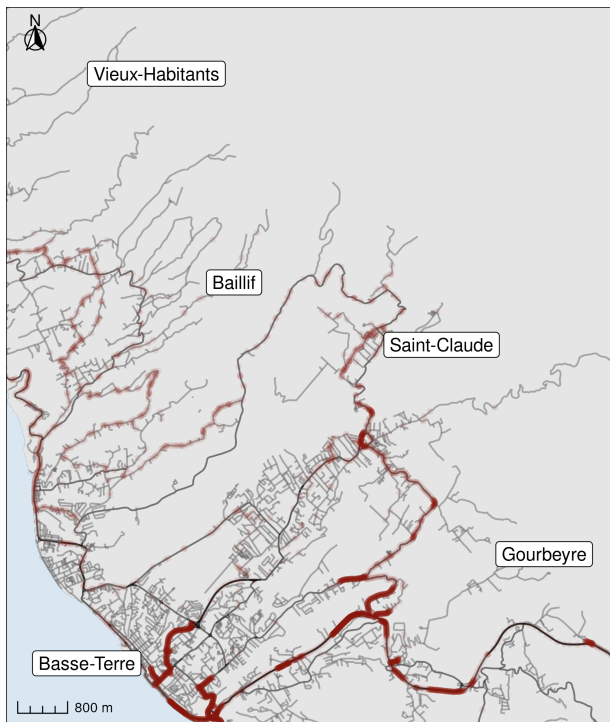
scolaires comme lors de l’éruption phréatique de 1976. Cela signifie que l’ensemble des agents sont chez eux et évacuent spontanément. Les premiers mouvements de population sont fonction de la loi de probabilité Rayleigh dont le paramètre σ varie entre 15 et 90 minutes. En considérant cette configuration de base, nous avons pu estimer que le temps d’évacuation moyen de ménages véhiculés est de 3 heures et 20 minutes.

Le système enregistre la position de chaque agent toutes les secondes. Il est donc possible, en post-traitements, de caractériser l’état des véhicules au cours de la simulation. La classification des tronçons routiers en trois états (fluide, modéré, dense) est basée sur la vitesse moyenne de déplacement, le nombre et la durée de présence des agents sur le tronçon, et tient compte des caractéristiques du tronçon comme sa longueur et son nombre de voies. La figure 5 présente l’état du trafic routier 47 minutes après une évacuation partielle et spontanée de certaines communes exposées au risque volcanique. Le départ massif et rapide provoque une forte congestion du réseau routier, notamment sur les communes de Basse-Terre et Saint-Claude, ralentissant l’évacuation.

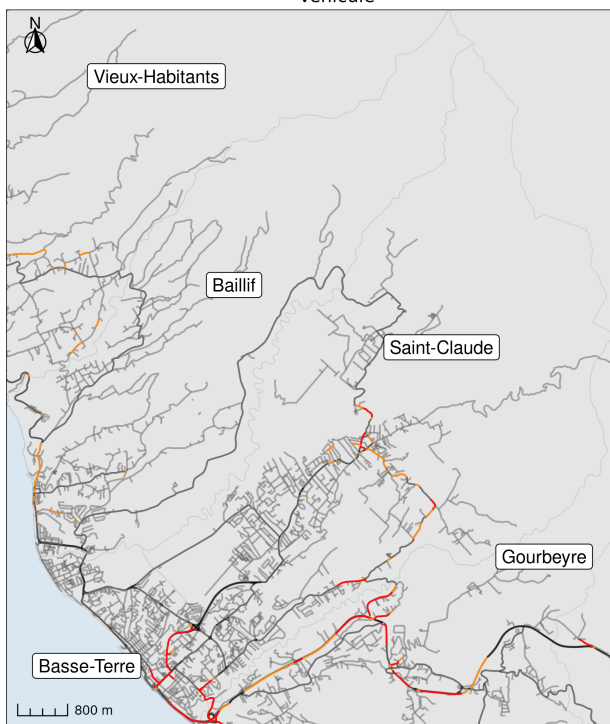
Ces deux exemples d’applications sont développés dans le cadre de collaborations avec des opérateurs de gestion des risques et des crises, la communauté du Val d’Authion d’une part et la Préfecture de Guadeloupe d’autre part. Ces collaborations ont permis de collecter de nombreuses données et informations pour calibrer les modèles. Les simulations nous conduisent maintenant à discuter des premiers résultats afin d’évaluer la pertinence de ces modèles. Si les temps globaux d’évacuation d’un territoire sont des informations qui intéressent au premier plan les acteurs de la gestion de crise, nous avons pu remarquer que la construction du modèle était également un levier pour motiver les acteurs de la gestion des risques. C’est notamment le cas lorsqu’une commune, parmi trois ou quatre, n’a pas encore élaboré son plan de gestion de l’évacuation.

5 Conclusion

La série d’outils développée offre la possibilité de saisir la dynamique complexe des évacuations massives en proposant une variété de scénarios d’aléas et d’évacuation à grande échelle. Plutôt que de proposer une prédiction précise des événements, l’objectif est de proposer un panorama de résultats potentiels, à travers une chaîne de traitements complète et une vaste exploration



• Véhicule



— Dense — Modéré

FIGURE 5 – La carte présente l'état du trafic routier lors d'une évacuation partielle et spontanée de certaines communes de Basse-Terre en réponse aux premières manifestations visibles d'une éruption (45 minutes après le début de l'éruption).

des scénarios, afin de fournir aux responsables de la gestion de crise des informations pour cerner la complexité d'un tel processus et de fournir une aide à la réflexion dans le cadre de sa mise en oeuvre. Il convient toutefois de noter certaines limites du système comme la non-intégration de comportement individuel déviant pouvant générer des incidents néfastes à l'évacuation. Des progrès ont déjà été réalisés en ce sens, il est actuellement possible d'intégrer dans ESCAPE des comportements réflexes complexes tels que rejoindre les membres de sa famille. Le processus d'intégration de ces comportements est toujours en cours et les résultats seront publiés prochainement sur un autre cas d'application et sur pour un autre risque, la métropole de Rouen et le risque industriel.

Remerciements. Ce travail est financé par le projet ANR ESCAPE, subvention ANR-16-CE39-0011-01 de l'Agence Nationale de la Recherche française.

Références

- [1] A. Beloglazov, M. Almashor, E. Abebe, J. Richter, and K. C. B. Steer. Simulation of wildfire evacuation with dynamic factors and model composition. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 60 :144–159, 2016.
- [2] R. J. Blong. Volcanic Hazards Risk Assessment. In *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, pages 675–698. Springer Berlin Heidelberg, 1996.
- [3] CEPRI. L'évacuation Massive Des Populations : Les Territoires Face à l'inondation. Technical report, Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation., 2014.
- [4] W. Chang, J. Cheng, J. J. Allaire, Y. Xie, and J. McPherson. shiny : Web Application Framework for R, 2017.
- [5] K. Chapuis, P. Minh-Duc, A. Brugière, J. D. Zucker, A. Drogoul, P. Tranouez, E. Daude, and P. Taillandier. Exploring multi-modal evacuation strategies for a landlocked population using large-scale agent-based simulations. *International Journal of Geographical Information Science*, 36(9) :1741–1783, 2022.
- [6] G. Czura, P. Taillandier, P. Tranouez, and E. Daude. MOSAIC : City-level agent-based traffic simulation adapted to emergency situations. In *Springer Proceedings in Complexity*, pages 265–274. Springer, 2015.

- [7] N. R. Dalezios. Environmental Hazards Methodologies for Risk Assessment and Management. *Water Intelligence Online*, 16 :9781780407135, 2017.
- [8] E. Daude, K. Chapuis, P. Taillandier, C. Caron, A. Drogoul, B. Gaudou, and S. Rey-Coyrehourcq. ESCAPE : Exploring by Simulation Cities Awareness on Population Evacuation. *ISCRAM, International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management*, 2019-May(May) :76–93, 2019.
- [9] B. Fabrice Yaméogo, P. Gastineau, P. Hanchach, and P. O. Vandanjon. Comparing Methods for Generating a Two-Layered Synthetic Population. *Transportation Research Record*, 2675(1) :136–147, jan 2020.
- [10] C. E. Haque and D. Blair. Vulnerability to Tropical Cyclones : Evidence from the April 1991 Cyclone in Coastal Bangladesh. *Disasters*, 16(3) :217–229, sep 1992.
- [11] U. Haque, M. Hashizume, K. N. Kolivras, H. J. Overgaard, B. Das, and T. Yamamoto. Reduced death rates from cyclones in Bangladesh : What more needs to be done? *Bulletin of the World Health Organization*, 90(2) :150–156, feb 2012.
- [12] J. Kim, S. Lee, and S. Lee. An evacuation route choice model based on multi-agent simulation in order to prepare Tsunami disasters. *Transportmetrica B*, 5(4) :390–406, 2017.
- [13] J. C. Komorowski, Y. Legendre, B. Caron, and G. Boudon. Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 A.D. Soufrière (Guadeloupe) eruption : Implications for scenario definition and hazards assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178(3) :491–515, 2008.
- [14] G. Lämmel, H. Klüpfel, and K. Nagel. The MATSim Network Flow Model for Traffic Simulation Adapted to Large-Scale Emergency Egress and an Application to the Evacuation of the Indonesian City of Padang in Case of a Tsunami Warning. In *Pedestrian Behavior*, pages 245–265. Emerald Group Publishing Limited, nov 2009.
- [15] F. Leone, J. C. Komorowski, M. Gherardi-Leone, and G. Lalubie. Integrating spatial accessibility in the design of volcano evacuation plans in the French West Indies (Guadeloupe and Martinique). *Journal of Applied Volcanology*, 8(1) :8, dec 2019.
- [16] F. Leone, N. Meschinet de Richemond, and F. Vinet. *Aleas naturels et gestion des risques*. Presses universitaires de France, Paris, France, 2010.
- [17] R. Lovelace, M. Dumont, R. Ellison, and M. Založnik. *Spatial Microsimulation with R*. Chapman and Hall/CRC, sep 2017.
- [18] E. Mas, F. Imamura, and S. Koshimura. Modeling the Decision of Evacuation from Tsunami, based on Human Risk Perception. *Annual Meeting of the Tohoku Branch Technology Research Conference, Japan Society of Civil Engineers*, pages 1–2, 2011.
- [19] R. Reuillon, M. Leclaire, and S. Rey-Coyrehourcq. OpenMOLE, a workflow engine specifically tailored for the distributed exploration of simulation models. *Future Generation Computer Systems*, 29(8) :1981–1990, oct 2013.
- [20] F. X. Robin and V. Demeules. Méthodes d’estimations de population : comparaisons et seuils de validité. 2005.
- [21] Arnaud Saval, Duc Pham Minh, Kevin Chapuis, Pierrick Tranouez, Clément Caron, Éric Daudé, and Patrick Taillandier. Dealing with mixed and non-normative traffic. An agent-based simulation with the GAMA platform. *PLOS ONE*, 18(3) :e0281658, mar 2023.
- [22] F. F. Stephan. Iterative method of adjusting frequency tables when expected margins are known. *Annals of Mathematical Statistics*, 13 (2) :166–178, 1942.
- [23] P. Taillandier, B. Gaudou, A. Grignard, Q-N. Huynh, N. Marilleau, P. Caillou, D. Philippon, and A. Drogoul. Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*, 23(2) :299–322, 2019.
- [24] J. Yu, C. Zhang, J. Wen, W. Li, R. Liu, and H. Xu. Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. *International Journal of Geographical Information Science*, 32(9) :1884–1910, 2018.
- [25] Y. Zhu, K. Xie, K. Ozbay, and H. Yang. Hurricane Evacuation Modeling Using Behavior Models and Scenario-Driven Agent-based Simulations. In *Procedia Computer Science*, volume 130, pages 836–843, 2018.