



HAL
open science

Évacuation et systèmes multi-agents, prise en compte des réponses comportementales individuelles

Cyril Orengo, Florian Tena-Chollet, Sophie Sauvagnargues

► **To cite this version:**

Cyril Orengo, Florian Tena-Chollet, Sophie Sauvagnargues. Évacuation et systèmes multi-agents, prise en compte des réponses comportementales individuelles. Management des Technologies Organisationnelles (2014-..), 2022, Le design dans la cité: Nouvelles manières d’appréhender la conception, 14. hal-03844302

HAL Id: hal-03844302

<https://hal.science/hal-03844302v1>

Submitted on 8 Nov 2022

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.

Évacuation et systèmes multi-agents, prise en compte des réponses comportementales individuelles.

Cyril ORENGO, Florian TENA-CHOLLET, Sophie SAUVAGNARGUES.

La récente crue de la Meuse, ayant nécessité l'organisation d'évacuations en Allemagne et en Belgique en juillet 2021 a rappelé la nécessité d'anticiper le déclenchement de tels dispositifs. Lorsque les structures de génie civil permettant d'atténuer un aléa ne suffisent pas, les populations doivent être évacuées. L'évacuation est un dispositif de gestion de crise, une réponse à une crise territoriale. Elle responsabilise les individus, qui doivent alors appliquer une série de consignes afin d'assurer leur sécurité et celle de l'ensemble des personnes concernées. Les retours d'expérience montrent cependant qu'une partie de la population est susceptible de déroger à ces consignes. La question de l'impact de ces réponses comportementales inadaptées sur la performance du dispositif se pose.

L'objectif de cet article est de proposer une méthode de simulation d'une évacuation préventive permettant la prise en compte des réponses comportementales individuelles. La contribution présentée s'inscrit dans une démarche plus large de compréhension, modélisation et simulation des mobilités en situation de crise. Elle s'inscrit dans la continuité des travaux menés au Laboratoire des Sciences des Risques de L'IMT Mines Alès. La section 1 présente le contexte théorique et opérationnel autour des évacuations de populations. La section 2 présente un état de l'art des méthodes de simulation appliquées à différents types d'évacuations. La section 3 introduit et discute la méthodologie conçue. La section 4 présente la mise en œuvre de la méthodologie, depuis le cas d'application jusqu'au type de résultats attendus.

L'EVACUATION, UNE MESURE DE GESTION DE CRISE.

Par leur caractère soudain et imprévu, les évacuations de populations s'inscrivent au sein des méthodes et outils propres à la gestion de crise.

Crise et gestion de crise.

La crise est une rupture soudaine du fonctionnement d'un territoire, testant les mécanismes de défense à disposition pour y répondre (Lagadec, 1991). Elle peut par définition être évitée, par une série de mesures en amont de l'événement, mais une fois qu'elle se réalise, elle nécessite la mise en place d'une organisation

spécifique mélangeant plusieurs services de l'état pour en limiter les effets (Wybo, 2011) ainsi qu'un ensemble d'acteurs publics regroupés dans un Poste de Commandement de Crise (PC Crise).

La gestion de crise mobilise des concepts issus des sciences de gestion et du risque. Elle poursuit un but précis, la limitation des effets d'une crise sur un organisme, une entreprise, un territoire. La gestion de crise possède des outils spécifiques au sein de la gestion des risques. L'évacuation préventive en est l'un de ces outils. Il s'agit de déplacer une population menacée par un aléa avant la manifestation de celui-ci. Par son poids logistique et économique, l'évacuation est considérée comme une mesure de dernier recours. Les communes et intercommunalités sont peu enclines à déclencher un processus sur lequel elles n'ont que peu de maîtrise.

Organiser une évacuation.

En effet, l'organisation d'une évacuation implique une implication directe de la population. Cette implication, dans sa traduction opérationnelle, peut être hétérogène. Le nombre de personnes impliquées est également un enjeu important. Le partage d'un réseau routier dans un laps de temps très court par plusieurs milliers de personnes, pose un certain nombre de questions. Plusieurs éléments contribuent au succès d'une évacuation. La performance de l'organisation en charge de sa gestion et l'application des consignes par la population en sont les deux principaux.

Considérés comme mesure de « derniers recours » dans les PCS d'Alès et de Rouen, par exemple, de nombreux événements passés montrent la réticence des autorités à déclencher un tel processus. L'hésitation autour de l'incendie d'une usine de produits chimiques à Saint-Herblain en 1987 (Gilbert, 1988), la passe d'armes entre Haroun Tazieff et Claude Allègre en 1976 à-propos de l'éruption possible de la Soufrière, ou la fronde populaire après l'évacuation de Vimy en 2001 en sont des exemples.

Quelle place pour les populations ?

La population doit en théorie être déplacée d'un point A vers un ou plusieurs points B. L'évacuation préventive est déclenchée en prévision de la faillite d'autres dispositifs de protection. La décision finale appartient au PC Crise. Plusieurs documents peuvent appuyer cette prise de décision (Plans Communaux de Sauvegarde ou Plans Particuliers d'Intervention). De teneur et composition variable, ces plans peuvent fournir une organisation sommaire du processus d'évacuation, en indiquant des seuils de déclenchement ou indiquer la localisation des points de rassemblement. C'est le cas du Plan Particulier d'Intervention relatif

au barrage de Saitne-Cécile d'Andorge (cas d'application de cet contribution). Ils peuvent être utilisés comme supports tout au long de l'opération. Cependant, en dépit des outils de planification à disposition des organisations, l'aspect stratégique d'une évacuation génère donc une part d'imprévisibilité.

À cet aspect, se greffe également la réception de l'injonction d'évacuer par les populations. Les retours d'expérience montrent en effet, une réalité opérationnelle éloignée du schéma théorique. Définie sous la notion de « réponse comportementale individuelle » toute décision prise par un individu concernant son évacuation s'éloignant des consignes transmises par les autorités de manière à mettre en péril l'individu ou le processus dans son ensemble. Le premier comportement à risque lors d'une évacuation, c'est la décision de ne pas évacuer. Les chiffres sont variables. Ils s'étendent de 13 % à 75 % lors de grands ouragans nord-américains. (*Baker, 1991; Whitehead et al., 2001; Brezina, 2008*). Dans un contexte d'inondations en Europe de l'Ouest ils atteignent 5 % à Nimègue (1995) et 35 % à Arles (2003). D'autres comportements, bien que systématiquement observés, n'ont pas fait l'objet d'études quantitatives. Ainsi, si l'on sait qu'une partie de la population est susceptible d'utiliser un véhicule individuel même si cela est vivement déconseillé (il s'agit d'une question d'accessibilité pour d'éventuelles opérations de secours). En Europe, cela ne fait pas l'objet d'études statistiques à proprement parler, la pertinence de l'évacuation via véhicules individuels dépendant essentiellement du contexte géographique et de la nature de l'aléa. Autre question de taille, les regroupements familiaux, objet de différents travaux de modélisation (*Baňgate et al., 2017*), ils ne font en revanche pas l'objet d'études quantitatives ou statistiques. Est également posée : la question de l'impact d'une forte densité de piétons sur l'apparition de mouvements de foule, relation mise en évidence dans le cadre d'expériences cinématiques (*Moussaïd et al., 2009*).

Dans une démarche d'anticipation, les modélisations et simulations numériques d'évacuations se multiplient depuis vingt ans. Ces réponses comportementales individuelles peuvent-elles être intégrées dans une simulation numérique ?

ÉTAT DE L'ART

Les démarches de simulation d'évacuation sont nombreuses et se multiplient depuis les années quatre-vingt-dix. Il existe une distinction entre les modèles de simulation microscopiques, majoritairement appliqués aux évacuations de bâtiments. Ces derniers sont centrés sur l'aspect mécanique des évacuations (la marche ainsi que les interactions physiques et le rapport densité/vitesse de déplacement). Les modèles de simulation macroscopiques introduisant les questions de routing (itinéraires des évacués) et de multi modalité. Cette deuxième catégorie inclut les modèles de simulation utilisant des systèmes multi-

agents permettant l'intégration des réponses comportementales individuelles et l'étude de leur impact sur les processus d'évacuation.

Les modèles microscopiques.

Une évacuation somme des déplacements formant un système de mobilités. Un déplacement constitue un changement de position dans l'espace. Il nécessite donc trois choses, un espace navigable, le choix d'un itinéraire ainsi qu'une trajectoire dans l'espace navigable. Les modèles de simulation d'évacuations les plus fins, que l'on nomme également modèles de simulation « microscopiques », s'attachent à décrire les déplacements piétons avec précision. Ces méthodes sont généralement utilisées pour simuler des évacuations de bâtiments (Valentin, 2013). Certains travaux proposant une simulation mathématique précisent des interactions locales piétons-piétons et piétons-environnement (Pecol, 2012).

Ces travaux apportent des concepts valables lors d'évacuations sur de larges portions de territoire et qu'il est possible d'adapter dans le cadre d'une simulation à l'échelle macroscopique. Ainsi, les piétons tendent à adopter une « vitesse de confort » (Venel, 2008), le niveau de stress (Pecol, 2012) ou la densité d'usagers sur le réseau (Guy et al., 2010) influent sur cette vitesse. Ainsi, il est prévu que l'outil de simulation intègre la multi-modalité, avec notamment le déplacement piéton, il en devient essentiel d'aborder la nature physique du déplacement.

Les modèles macroscopiques.

La problématique des évacuations sur de larges portions de territoire introduit de nouvelles questions. En effet, le nombre de déplacements devant être simulés est plus conséquent. L'application de techniques et technologies utilisées dans les simulations à l'échelle microscopique à plus large échelle se heurte à des limitations de puissance de calcul. Le cheminement des individus est également moins déterministe, complexifiant encore les algorithmes mis en œuvre.

Les premiers modèles de simulation d'évacuation utilisent un graphe, avec un report d'usagers entre les nœuds suivant un pas de temps régulier (Tweedie et al., 1986). Utilisés principalement pour les évacuations automobiles, ils considéraient le choix des usagers comme déterministes (plus courts chemins). Certains modèles de simulation utilisent une pondération sur les tronçons de route en fonction de différents paramètres comme la congestion (Sheffi, Mahmassani and Powell, 1982).

Toute une série de modèles de simulation cherche à obtenir un temps total d'évacuation, que l'on retrouve souvent sous l'appellation anglophone de « network clearance time ». (Sheffi, Mahmassani and Powell, 1982). Des travaux

plus récents poussent la réflexion plus loin en recherchant à spatialiser l'émergence de phénomènes exceptionnels, comme les bouchons (Czura, 2017).

L'observation de la redondance de phénomènes émergents lors des évacuations (bouchons, mouvements de foule, non-application des consignes) a fait glisser la problématique des évacuations du côté des sciences Humaines. À l'origine purement physiques, les mobilités lors d'évacuations sont maintenant considérées comme la concaténation d'un déplacement mécanique et d'aspects comportementaux, pouvant faire varier ce déplacement. Il a donc fallu l'avènement de nouvelles technologies d'intelligence artificielle pour étudier le processus sous cet angle caractérisé par une forte incertitude.

Les systèmes multi-agents.

Les systèmes multi-agents (SMA) sont un outil appartenant à la branche distribuée de l'intelligence artificielle. L'intelligence artificielle distribuée fait référence à un ensemble d'agents autonomes censés permettre l'observation de l'émergence de systèmes intelligents (Drogoul, 1993). Les SMA possèdent trois caractéristiques qui les rendent efficaces pour répondre à ce genre de problématiques (Chaib-draa, 2001), ils sont situés, autonomes et flexibles. C'est également une méthode orientée objet (Daudé and Langlois, 2006). En tant qu'objet, les agents occupent, et ce, à tout instant de la simulation, une position dans un environnement. Ils disposent de compétences et de ressources pour satisfaire un objectif (Ferber, 1997), mais ils n'y arrivent jamais de façon déterministe. Ils permettent donc de simuler des comportements individuels complexes (Almeida, Rosseti and Coelho, 2013). La somme de ces comportements individuels permet d'observer des systèmes humains complexes. En l'occurrence un système de mobilités, une évacuation.

Le comportement de l'agent représente parfois une stratégie simple, comme un simple évitement de l'aléa (Plattard, 2017). La stratégie peut inclure des aspects psychologiques tels que l'impatience (Czura, 2017). L'agent était alors possiblement capable d'enfreindre le code de la route, afin d'évacuer au plus vite. Certaines simulations donnent la possibilité aux individus de calculer un coût théorique d'itinéraire et de développer une stratégie de déplacement en fonction de ce dernier (Banos et al., 2005). D'autres simulations incorporent l'attachement social (à travers une mesure de proximité) comme déterminant du choix stratégique des individus lors d'une évacuation (Bañgate et al., 2017). D'un point de vue technique, l'implémentation de stratégies comportementales simples sera préférable. L'utilisation de stratégies trop complexes à l'échelle de l'individu freine les possibilités d'émergence de phénomènes collectifs.

DEMARCHE

La contribution se présente sous la forme d'une réflexion autour de la construction d'une simulation d'un processus d'évacuation préventive multimodal. La simulation doit prendre en compte les facteurs humains évoqués précédemment. Observables individuellement, ces facteurs humains ont des conséquences sur l'évacuation dans sa globalité. Ce rapport entre individu et collectif oriente la démarche de réflexion vers les systèmes multi-agents. Ils sont composés d'agents intelligents autonomes, capables d'interagir entre eux et avec leur environnement. Grâce à ces interactions, ils peuvent faire évoluer leur niveau de connaissances de l'environnement et adapter leur stratégie d'évacuation en fonction de ce dernier. Ils sont alors tout indiqués dans le contexte de la problématique

Le développement d'un modèle de simulation implique la construction d'un environnement géographique de référence, au travers de ses infrastructures et de son réseau viaire. De l'implémentation d'un algorithme de déplacement pour les évacués, puisque ceux-ci doivent choisir une destination, mais également un chemin pour s'y rendre. Enfin, nous proposons d'utiliser une architecture BDI (« Beliefs », « Desire », « Intention », afin d'intégrer les comportements individuels.

L'utilisation d'un système multi-agents implique la présence « d'agents » intelligents. Il existe plusieurs classes d'agents dans le modèle de simulation. Chaque objet appartient à une classe d'agent.

Les agents « bâtiment » : agent réactif dont le rôle consiste en la génération des agents « population ».

Les agents « route » : agent réactif permettant le déplacement des agents « véhicules » et « population ».

Les agents « population » : agent cognitif : dont les objectifs peuvent varier au cours de la simulation.

Les agents « véhicule » : peuvent être utilisés par les agents « population » afin d'accomplir certains objectifs.

L'environnement géographique du modèle.

L'environnement est défini comme le cadre géographique du modèle. Il comprend le réseau, les surfaces bâties et les panneaux de signalisation. Le réseau connecte l'ensemble des surfaces bâties entre-elles. Les agents ne peuvent se déplacer qu'au sein de cet environnement.

La constitution d'un environnement géographique implique l'utilisation de données géoréférencées. Elles arborent trois types de géométries, points, lignes, surfaces. L'environnement comporte donc des surfaces, polygones de tailles et formes variables, représentant les éléments architecturaux de l'environnement de modélisation (bâtiments, parkings, parcs...). Certains sont navigables (les piétons peuvent les traverser), d'autres non. Le réseau routier est en réalité un assemblage d'agents de type « routes », chaque tronçon est donc une entité à part entière, dotée de ses propres variables. L'ensemble des agents « routes » forme un graphe composé d'arcs et de nœuds.

Puisqu'il s'agit d'un modèle de simulation multimodal, il est une distinction entre les piétons et les véhicules motorisés, au moment de la construction de l'espace navigable. Les piétons ont accès à certains espaces impraticables pour un véhicule motorisé (parkings, jardins et d'une manière générale toute surface artificialisée non bâtie). Cela peut largement modifier le chemin qu'ils empruntent, il s'agit donc de construire deux espaces navigables.

Gestion des déplacements

Le modèle de simulation doit intégrer le déplacement d'un nombre important de personnes dont chaque individu doit être instancié par un agent unique. Étant donné la quantité de population à déplacer, et tenant compte du calcul d'itinéraire individualisé pour chacun des évacués, l'algorithme retenu doit être optimisé selon des considérations de ressources et puissance de calcul. L'algorithme le plus fréquemment utilisé dans ce type de travaux est celui développé par Dijkstra, et ses dérivés comme le A*. Algorithme des plus courts chemins, il cherche à minimiser le temps de trajet d'un agent sur le réseau.

C'est un algorithme considéré comme simple, et efficace en termes de calcul. Son fonctionnement oblige à formuler le postulat d'omniscience des agents « population », en effet, le calcul se fait sur la totalité du réseau, dès le démarrage de la simulation. Ils connaissent donc l'entièreté du graphe et ces caractéristiques en démarrage de simulation. Cela s'oppose à des méthodes dites « myopic » ou l'agent « population » ne peut choisir son itinéraire seulement d'un nœud au suivant.

L'implémentation d'une architecture comportementale permet cependant d'éviter l'écueil du modèle déterministe.

Architecture BDI et gestion des comportements individuels.

En effet, le choix d'un itinéraire est assujéti au choix d'une action au préalable. Ce choix peut être remis en question durant l'évacuation. L'intégration des

comportements individuels dans une simulation d'évacuation à grande échelle constitue un problème majeur traité de différentes manières. La plus simple, également la moins gourmande en ressources informatiques, consiste en une intégration directe comme variable d'entrée (Uno and Kashiyama, 2008). D'autres méthodes utilisent des arbres de décision (Adam, Beck and Dugdale, 2015).

Les architectures BDI pour « beliefs » « desire » « intentions » (« Croyance », « Désirs » et « Intentions ») sont utilisées dans les modèles de simulation à base d'agents intelligents. Retrascriptant le processus de prise de décision d'un agent, elles sont largement utilisées pour modéliser des comportements complexes lors d'évacuations (Bangate, 2020). À l'aide de cette méthode, l'agent devient cognitif. Il est capable de traiter l'information reçue (au travers de filtres qu'il possède) et d'adopter une stratégie en conséquence. Elle s'oppose aux approches « réactives », qui se voulaient plus simples se basant sur des considérations uniquement biologiques, dans lesquelles l'agent se contente uniquement de réagir au danger imminent.

L'agent « population » évalue la situation sous le filtre de l'information qu'il possède. Il choisit ensuite un « plan », les plans sont des séquences d'actions simples mises en œuvre par l'agent. Pour faire ce choix, il dispose de critères d'évaluations (« désirs »), il sélectionne donc un plan fonction de ces critères. Les désirs sont pondérés en fonction des croyances. Ils prendront la forme d'une représentation informatique des comportements cognitifs des individus face à la manifestation d'un risque (Valentin, 2013).

Les plans : ils représentent des enchaînements d'actions simples, à disposition des agents dotés d'un module BDI (en l'occurrence les agents « population »). Base du modèle, et communs à tous les agents « population », ils vont être évalués par chacun des agents.

Les croyances : les croyances représentent la perception que l'agent a de son environnement. Dans la simulation, cela se matérialise par un niveau de risque perçu. L'agent « population » adopte alors une croyance sur le niveau de risque auquel il est exposé durant l'ensemble de la simulation. L'agent « population » peut, par l'observation d'autres agents « population », ou la réception d'informations ou de consignes, faire évoluer ses croyances.

Les désirs : les désirs de l'agent sont des volontés propres à chacun des agents « population » en démarrage de simulation. L'agent souhaite se trouver dans un état particulier (sain et sauf, proche des membres de sa famille, protéger son habitation, continuer son activité). Il va donc faire en sorte de remplir cet objectif lors de la simulation. Les agents peuvent avoir plusieurs désirs, c'est alors leur croyance (en l'occurrence le niveau de risque qu'ils perçoivent) qui se fera juge.

Les intentions : ce sont les actions que l'agent va mettre en place afin de satisfaire ses objectifs, donc le choix d'un plan, la conservation du plan actuel ou le changement.

Selon les travaux du philosophe Michaël E. Bratman, notre action s'exprime sur deux temporalités (Bratman and Mele, 1987). Une temporalité courte, caractérisée par des processus réactionnels à un stimulus extérieur, et des temporalités plus longues, permettant à l'individu une planification interne de son action (Bratman and Mele, 1987). Ce qu'il appelle « prior intentions » pose la question de l'influence d'une planification préalable sur l'action directe. Les architectures BDI peuvent peiner à retranscrire cette influence de la planification sur l'action directe. Ainsi les personnes ignorant de manière consciente une information donnée par l'environnement, ne seraient pas représentées. Pourtant, certains comportements à risques se matérialise dans cette configuration (tout particulièrement les personnes souhaitant récupérer leurs enfants dans les écoles). La modification automatique de l'intention en cas de réception de nouvelles informations ne permet pas la prise en compte de cet aspect. Cependant l'architecture BDI permet de doter les agents d'un SMA d'un système décisionnel complexe (Adam *et al.*, 2011). Les architectures BDI constituent un bon compromis entre un fonctionnement cognitif réaliste d'un agent, et facilité de lecture pour un modélisateur non informaticien. Elle représente également l'application des démarches de modélisation « bottom-up », par opposition à l'autre grande catégorie, les démarches « top-down » (Thomas, Bourjot and Chevrier, 2007). L'approche bottom-up, que l'on peut traduire littéralement par « de bas en haut » permet à l'agent de développer une pluralité de stratégie pour sa propre mise en sécurité (Bonney, Bousquet and Rouchier, 2001). La nature du processus étudié et l'objectif de recherche de l'émergence de phénomènes collectifs justifie l'intégration d'un module BDI.

MISE EN ŒUVRE

Face à un processus qu'il est difficile de tester en situation réelle, nous proposons un modèle de simulation à même de tester le déroulement du processus au travers de différents scénarios d'application. Le territoire originel d'application est l'agglomération d'Alès, plus spécifiquement les dix communes concernées par l'aléa rupture de barrage. Cependant, la reproductibilité de la méthode et son application à d'autres territoires constitue un objectif secondaire de ce travail. Le modèle de simulation est développé en utilisant la plateforme GAMA (Taillandier *et al.*, 2019).

Cas d'application.

Une fois le support de simulation entièrement développé et validé, il sera appliqué sur le territoire de l'agglomération d'Alès (Gard) afin de simuler une évacuation préventive. L'évacuation préventive de l'agglomération d'Alès est prévue en réponse à une rupture imminente du barrage de Sainte-Cécile d'andorge, situé dans la commune éponyme, au nord de l'agglomération. Une rupture de ce dernier entraînerait une onde de submersion qui suivrait le talweg du Gardon, et dont l'intensité et l'extension spatiale serait supérieure aux PHEC (Plus Haute Eaux Connues) actuelles.

L'agglomération d'Alès est une intercommunalité regroupant 72 communes et 131 717 habitants. Située dans le Gard, elle est traversée par le Gardon d'Alès, affluent du Gard. À l'aide de ce modèle de simulation, nous souhaitons tester l'évacuation des dix communes de l'agglomération concernées par l'aléa rupture de barrage. De Sainte-Cécile d'andorge au nord jusqu'à Saint-hilaire de Brethmas et Saint-Christol-lez-Alès au sud.

En théorie, les populations concernées (zone submersible en cas de rupture de barrage) doivent évacuer à pied, de manière à sortir de la zone d'impact. Elles peuvent se diriger vers un PRE (Point de Rassemblement des Evacués). Ces informations sont mises à disposition dans le plan particulier d'intervention (Figure 1).

Figure 1 : Cartographies des points de rassemblement des évacués (extrait du PPI de Sainte-Cécile d'Andorge.

Scénarios

La nature incertaine de certaines variables contextuelles et organisationnelles nécessite l'élaboration de scénarios. Les variables contextuelles regroupent l'ensemble des éléments susceptibles de varier lors du déclenchement d'une évacuation et sur lesquels l'organisation en charge de la gestion de crise ne peut avoir aucun contrôle. Cela inclut le contexte hydro-météorologique, l'évacuation va-t-elle se dérouler lors d'un épisode pluvieux. Il peut également s'agir de la temporalité de l'évènement (périodes de forte fréquentation touristique), ou de la journée (évacuation nocturne). La sphère organisationnelle représente l'ensemble des variations possibles d'un processus d'évacuation du ressort de l'organisation en charge de la gestion de crise. Quelle emprise spatiale à évacuer ? Certains axes sont-ils bouclés ? Enfin, l'incertitude autour des réponses comportementales individuelles sont prises en charge par le module BDI.

Résultats attendus

Le modèle a deux objectifs principaux. La mesure du temps total d'évacuation pour plusieurs scénarios d'événements et la cartographie des axes congestionnés, et le lien de ces congestions avec les recours non souhaités aux véhicules individuels.

La mesure du temps total d'évacuation trouve son intérêt dans la comparaison de plusieurs scénarios. Variations contextuelles, mais également comparaison entre une simulation incluant les réponses comportementales individuelles et une simulation sans ces derniers ; les agents seraient alors uniquement dans un comportement réactif et appliqueraient les consignes transmises. Ces comparaisons s'inscrivent dans une démarche de développement des connaissances autour du processus d'évacuation préventive. Elles fournissent une information d'intérêt pour les gestionnaires de risques du territoire d'application. Bien que la précision de l'information reste limitée, ne la rendant pas encore suffisamment fiable pour être utilisée en contexte opérationnel, elle constitue une première donnée. Le modèle de simulation pouvant encore être amélioré, ces résultats seront complétés par d'autres, plus précis.

Conclusion

La méthode proposée dans cette contribution a pour objectif une meilleure prise en compte des réponses comportementales individuelles dans la simulation numérique d'une évacuation de population. La prise en compte des facteurs humains au sein de processus de gestion de crise est une question centrale dans le développement des capacités de réponses des territoires face aux risques et aux crises à venir. L'intégration d'une architecture BDI dans la simulation d'une évacuation permet une meilleure prise en compte de ces facteurs humains. La simulation, couplée avec une scénarisation des aspects organisationnels et contextuels peut permettre de faire des premiers retours aux acteurs opérationnels.

Une telle simulation pourrait également être couplée avec la modélisation de l'aléa, lorsque cela est possible. Les crues éclairées en sont un exemple. Le développement d'une simulation capable d'interagir avec les utilisateurs à destination des acteurs opérationnels serait également pertinent.

BIBLIOGRAPHIE

- Adam, C. *et al.* (2011) 'Agents BDI et simulations sociales: Unis pour le meilleur et pour le pire', *Revue d'Intelligence Artificielle*, 25(1), pp. 11–42. doi: 10.3166/RIA.25.11-42.
- Adam, C., Beck, E. and Dugdale, J. (2015) 'Modelling the tactical behaviour of the Australian population in a bushfire', in *Lecture Notes in Business Information Processing*. doi: 10.1007/978-3-319-24399-3_5.
- Almeida, J. E., Rosseti, R. J. F. and Coelho, A. L. (2013) 'Crowd Simulation Modeling Applied to Emergency and Evacuation Simulations using Multi-Agent Systems'. Available at: <http://arxiv.org/abs/1303.4692>.
- Baker, E. (1991) 'Hurricane evacuation behavior', *International journal of mass emergencies and disasters*.
- Bangate, J. (2020) 'Multi-agent modelling of seismic crisis To cite this version : HAL Id : tel-02613082'.
- Bañgate, J. *et al.* (2017) 'A review on the influence of social attachment on human mobility during crises', in *Proceedings of the International ISCRAM Conference*.
- Banos, A. *et al.* (2005) 'Simulating the swarming city: a MAS approach', *Proceedings of the 9th international conference on computers in urban planning and urban management*, pp. 29–30.
- Bonnefoy, J. L., Bousquet, F. and Rouchier, J. (2001) 'Modélisation d'une interaction individu, espace et société par les systèmes multi-agents: Pâture en forêt virtuelle', *Espace Géographique*. doi: 10.3917/eg.301.0013.
- Bratman, M. E. and Mele, A. R. (1987) 'Mind Association', *Mind*, LXVIII(272), pp. 576-a-576. doi: 10.1093/mind/lxviii.272.576-a.
- Brezina, T. (2008) 'What went wrong in New Orleans? An examination of the welfare dependency explanation', *Social Problems*, 55(1), pp. 23–42. doi: 10.1525/sp.2008.55.1.23.
- Chaib-draa, B. (2001) *Systèmes multi-agents: principes généraux et applications*. Edition He.
- Czura, G. (2017) *Modélisation à base d'agents de l'évacuation automobile dans un contexte d'accident technologique Application à la ville de Rouen, PhD Thesis*, Université de Rouen.
- Daudé, É. and Langlois, P. (2006) 'Introduction à la modélisation multi-agents des systèmes complexes en géographie'.
- Drogoul, A. (1993) *De la simulation Multi-Agent à la résolution collective de problèmes*.
- Ferber, J. (1997) 'Les systèmes multi-agents: un aperçu général', *Techniques et sciences informatiques*, 16(8), pp. 1–30.
- Gilbert, C. (1988) 'Au-dessous du nuage. Nantes, 29-10-87 : analyse d'une situation de crise', *Les Annales de la recherche urbaine*, 40(1), pp. 25–36. doi: 10.3406/aru.1988.1403.
- Guy, S. J. *et al.* (2010) 'PLEdestrians: A least-effort approach to crowd simulation', *Computer Animation 2010 - ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium Proceedings, SCA 2010*, pp. 119–128.
- Lagadec, P. (1991) 'La Gestion Des Crises Gouvernementales', *Là, tout de suite?*, pp. 41–58. doi: 10.2307/j.ctv10qxp2.9.
- Moussaïd, M. *et al.* (2009) 'Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds', *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1668), pp. 2755–2762. doi: 10.1098/rspb.2009.0405.

Pecol, P. (2012) 'Modélisation 2D discrète du mouvement des piétons : application à l'évacuation des structures du génie civil et à l'interaction foule-passerelle'.

Plattard, O. (2017) *Repenser l'évacuation d'une population littorale dans un contexte multi-risque par la modélisation multi-agents.*

Sheffi, Y., Mahmassani, H. and Powell, W. B. (1982b) 'A transportation network evacuation model', *Transportation Research Part A: General*. doi: 10.1016/0191-2607(82)90022-X.

Taillandier, P. et al. (2019) 'Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform', *Geoinformatica*. *Geoinformatica*, 23(2), pp. 299–322. doi: 10.1007/s10707-018-00339-6.

Thomas, V., Bourjot, C. and Chevrier, V. (2007) 'Construction de systèmes multi-agents par apprentissage collectif à base d'interactions', *Revue d'Intelligence Artificielle*. doi: 10.3166/ria.21.673-672.

Tweedie, S. W. et al. (1986) 'A methodology for estimating emergency evacuation times', *The Social Science Journal*, 23(2), pp. 189–204. doi: 10.1016/0362-3319(86)90035-2.

Uno, K. and Kashiya, K. (2008) 'Development of Simulation System for the Disaster Evacuation Based on Multi-Agent Model Using GIS', *Tsinghua Science and Technology*, 13(SUPPL. 1), pp. 348–353. doi: 10.1016/S1007-0214(08)70173-1.

Valentin, J. (2013) 'Simulation du comportement humain en situation d'évacuation de bâtiment en feu'.

Venel, J. (2008) 'Modélisation mathématique et numérique de mouvements de foule'. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00346035/en/>.

Whitehead, J. C. et al. (2001) 'Heading for higher ground: Factors affecting real and hypothetical hurricane evacuation behavior', *Environmental Hazards*, 2(4), pp. 133–142. doi: 10.3763/ehaz.2000.0219.

Wybo, J. (2011) 'L'évaluation de la vulnérabilité à la crise : le cas des préfectures en France To cite this version : HAL Id : hal-00613311'.

Évacuation et systèmes multi-agents, prise en compte des réponses comportementales individuelles

L'évacuation préventive est un dispositif déclenché dans un objectif de sauvegarde des populations en anticipation d'un aléa ne pouvant être contenu par des ouvrages de génie civil. Lors d'une évacuation préventive, la population devient actrice de sa propre mise en sécurité. Les ordres d'évacuation sont accompagnés de consignes (évacuer directement, ne pas se regrouper, ne pas aller chercher ses enfants à l'école, ne pas utiliser son véhicule personnel). Pourtant, des comportements déviants de ces consignes sont systématiquement observés lors d'évacuations. Cet article a pour objet l'intégration de ces comportements dans un modèle de simulation d'un processus d'évacuation. L'utilisation d'une technologie issue du domaine de l'intelligence artificielle, les systèmes multi-agents, permet d'obtenir une retranscription satisfaisante des réponses comportementales individuelles lors d'évacuations. La finalité est de mesurer l'impact de ces réponses comportementales sur le processus dans son ensemble. Le modèle de simulation est appliqué à dix communes de l'agglomération d'Alès concernée par un risque d'onde de submersion, relative à la potentielle rupture du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge.

Mots clés : système multi-agent, évacuation, risque, gestion de crise

Évacuation and multi-agent systems, taking into consideration individual behavioral responses

Preventive evacuation is a process triggered to safeguard populations in anticipation of a hazard that cannot be contained by civil engineering works. During a preventive evacuation, the population becomes an actor of its own safety. Evacuation orders are accompanied by instructions (evacuate directly, do not regroup, do not pick up your children from school, do not use your personal vehicle). However, behaviors deviating from these instructions are systematically observed during evacuations. This article aims at integrating these behaviors in a simulation model of an evacuation process. The use of a technology from the field of artificial intelligence, multi-agent systems, allows to obtain a satisfactory transcription of individual behavioral responses during evacuations. The aim is to measure the impact of these behavioral responses on the process as a whole. The simulation model is applied to ten municipalities of the Alès agglomeration concerned by a risk of flooding, related to the potential rupture of the Sainte-Cécile d'Andorge dam.

Keywords: multi-agent system, evacuation, risk, crisis management