

# Modélisation de comportements humains en situation de crise à partir d'entretiens : application aux incendies de forêt de Melbourne

Carole Adam<sup>1</sup>

Benoit Gaudou<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble-Alpes - LIG, UMR 5217 CNRS - Grenoble

<sup>2</sup> IRIT, Université de Toulouse, Toulouse, France

carole.adam@imag.fr  
benoit.gaudou@ut-capitole.fr

## Résumé

*Dans cet article nous nous intéressons à la sensibilisation des décideurs aux comportements réels, irrationnels et subjectifs, de la population en situation de crise. Nous partons d'entretiens collectés après les graves incendies de forêt qui ont eu lieu autour de Melbourne en février 2009, dans lesquels les habitants décrivent leur expérience. Nous en déduisons un modèle de comportement basé sur la distinction entre attributs objectifs (capacités, danger) et subjectifs (confiance en soi, aversion au risque). Nous montrons que ce modèle permet de reproduire les archétypes de comportement établis par les rapports d'enquête.*

## Mots Clef

Modélisation de comportement humain, simulation sociale multi-agents, gestion de crise.

## Abstract

*In this paper we are interested in raising the deciders' awareness of the real (irrational and subjective) behaviours of the population in crisis situations. We analyse interviews gathered after Victoria Black Saturday bushfires in 2009, where the inhabitants describe their experience. We deduce a model of human behaviour based on the distinction between objective (capabilities, danger) and subjective (confidence, risk aversion) attributes. We show that this model allows us to reproduce the behaviour archetypes that were defined by the Bushfire Research Commission.*

## Keywords

Human behaviour modelling, agent-based social simulation, crisis management.

## 1 Introduction

Les désastres naturels se multiplient dernièrement suite au réchauffement climatique, et ces événements font de nombreuses victimes chaque année : incendies graves en Australie en 2009, séisme et tsunami au Japon en 2011 ou en Indonésie en 2004, séisme au Népal en 2015, récente tempête de neige sur la côte est des Etats-Unis, inondations

en Chine et en Russie en 2015, etc. Dans ce contexte, il est particulièrement important, afin de diminuer le nombre de victimes, d'essayer d'optimiser la réaction de la population (évacuation ou autre action appropriée) en leur envoyant des messages appropriés (informations, alertes, ordre d'évacuation...). Les stratégies des autorités diffèrent selon les pays et selon le type de désastre. Dans ce projet nous nous intéressons en particulier à la réponse de la population australienne, dans l'état du Victoria, face aux feux de forêt très fréquents l'été.

La politique publique actuelle est intitulée "Prepare, stay and defend, or leave early" (préparez-vous, restez et défendez, ou partez tôt). Concrètement les autorités donnent deux choix à la population : évacuer très tôt, avant l'arrivée des feux dans la zone de résidence, car "de nombreuses personnes sont mortes en tentant de fuir au dernier moment" [3] ; ou rester défendre sa maison, à condition d'être bien préparé "physiquement et mentalement" ; dans les deux cas chacun doit prendre sa décision et préparer son plan d'action à l'avance. Mais en janvier et février 2009, des incendies d'une rare gravité ont ravagé une partie de l'état du Victoria, en Australie, culminant dans la journée du 7 février, le "Black Saturday", qui fit 173 morts malgré ces efforts de sensibilisation. Plusieurs rapports ont cherché à comprendre les raisons de ce nombre élevé de victimes et ont identifié des incohérences sur plusieurs aspects : comportement (la population ne réagit pas comme les décideurs l'attendent) ; informations (les informations envoyées ne sont pas toujours jugées pertinentes par la population) ; et moyens de communication (les moyens utilisés ne sont pas efficaces, en particulier le *broadcast*).

En particulier, un rapport du Centre de Recherche créé en réponse à ces incendies [11] a étudié les réactions de la population à partir de témoignages, et en a tiré 10 leçons. On retiendra en particulier que les habitants, dans l'incertitude, imitent les autres : copient leurs comportements et adoptent leurs (fausses) croyances d'être en sécurité. Ils sont particulièrement sensibles aux conseils et informations personnalisés provenant de leurs proches ou des autorités, mais ces derniers envoient des messages d'alertes

trop génériques leur conseillant de suivre leur plan d'action. Au contraire l'engagement ferme sur un plan donné, sans condition ni solution de rechange, donc sans adaptation à l'évolution de la situation, mène à des catastrophes. La commission d'enquête créée après les incendies de 2009 (Victorian Bushfires Royal Commission, VBRC) a aussi rédigé un rapport [13] qui établit plusieurs raisons possibles aux nombreuses victimes : malgré cette politique de sensibilisation, les habitants ont tendance à "rester et voir", attendant le dernier moment pour évacuer ; et la plupart des habitants n'ont pas préparé de plan d'action et se trouvent démunis, attendant un déclencheur pour évacuer (proximité du feu, ordre personnel d'évacuation) alors que les autorités, considérant qu'ils ont déjà un plan, ne diffusent lors des alertes que des messages génériques. Or les personnes trop impliquées dans leurs actions individuelles (par exemple défense de leur propriété) sont incapables de prêter attention à des messages diffusés à tous (*broadcast*) [5]. Ce rapport se conclut donc par 67 recommandations pour améliorer la réponse aux incendies : en particulier améliorer l'information vers la population, de manière engageante, et répétée chaque année.

Dans cet article nous nous intéressons plus particulièrement au décalage entre le comportement attendu de la part de la population par les décideurs, qui détermine leurs actions d'information, et le comportement réel de la population pendant les incendies, qui détermine de quelles informations ils ont besoin et à quoi ils sont sensibles. Nous proposons d'expliquer cette différence par un décalage entre les valeurs objectives et subjectives de deux déterminants du comportement : le niveau de danger et la capacité à y faire face. Les autorités se basent sur les valeurs objectives pour prévoir le comportement de la population, alors que chaque individu a une perception biaisée à la fois du risque et de ses compétences.

Notre approche est celle de la modélisation et simulation multi-agent. Nous avons analysé des entretiens avec la population (Section 2), pour en extraire un modèle du comportement individuel (Section 3). Nous avons implémenté ce modèle dans GAMA et réalisé des simulations qui mettent en évidence les profils de comportement établis dans la littérature (Section 4). Pour conclure, nous discutons ces résultats et nos travaux futurs (Section 5).

## 2 Entretiens avec la population

Nous partons des interviews recueillies par la VBRC après le Black Saturday auprès de 100 résidents des zones affectées [14]. Nous discutons ci-dessous certains extraits particulièrement parlants de ces entretiens, permettant d'illustrer différents types de décalages entre comportement attendu et comportement effectif : sous-estimation du danger, passivité, déni, sur-estimation des capacités...

### 2.1 Fascination du feu et mise en danger

Anna Macgowan est une formatrice commerciale indépendante qui vivait à 2km du centre-ville de Bendigo

depuis 2 ans au moment des incendies. Elle n'avait aucune conscience du danger, se pensant protégée par la proximité de la ville. Elle avait pensé vaguement à la nécessité de se préparer pour les incendies sans jamais réaliser aucune action concrète, mais prévoyait toutefois de rester défendre sa maison si un incendie se produisait. Le 7 février, elle avait conscience des éléments de risque (sécheresse, chaleur, vent) et du fait que des incendies allaient forcément se produire, mais elle n'en a pas déduit qu'elle pourrait être affectée (*"at no point did I think that I was going to be at risk of a bushfire"*). Quand des pompiers du CFA sont venus chez elle lui conseiller d'évacuer, elle a refusé ; ils lui ont alors demandé de rester abritée dans sa maison, mais sans s'en rendre compte, elle est restée dehors à regarder le feu se rapprocher (*"This was not a conscious decision"*), se disant ensuite fascinée par la beauté du feu, jusqu'à se retrouver dépassée quand les flammes sont arrivées jusqu'à une dizaine de mètres seulement de sa maison (*"[flames] came so suddenly that I just didn't have time to do anything"*). Elle a eu la chance que le feu change soudain de direction et évite sa maison, et n'a réalisé qu'à posteriori son manque de préparation.

Ce témoignage montre l'inconscience du danger de certaines personnes, et donc leur passivité face au feu jusqu'à ce qu'il soit trop tard, leur donnant après coup une impression que tout s'est passé très vite. Ni les conseils directs d'évacuation ou de mise à l'abri, ni la proximité immédiate du feu, n'ont réussi à tirer ce témoin de sa fascination du feu et à déclencher une action, et seule la chance l'a sauvée.

### 2.2 Changement de plan et abri d'urgence

Greg Weir est un père de famille qui avait stocké beaucoup de possessions dans la ferme récréative de sa mère. Malgré sa grande expérience des incendies, il n'avait pas l'intention de rester défendre la ferme. Mais le matin de l'incendie il s'y est rendu avec son fils de 14 ans pour préparer la propriété et emballer quelques affaires. A ce moment les feux étaient encore à bonne distance et il ne se pensait pas en danger. Après avoir passé quelques heures à préparer la ferme pour les feux, il pensait pouvoir repartir en sécurité avant l'arrivée de l'incendie, et était d'autant plus confiant qu'il observait les pompiers contenir l'incendie avec succès en haut d'une colline proche. Mais l'arrivée soudaine du feu dans la vallée a rendu le trajet prévu (à travers 5km de forêt) trop dangereux et il a décidé qu'il était moins risqué de rester et défendre. Il a préparé psychologiquement son fils et ils se sont préparés physiquement (équipement, vêtements...), ont essayé en vain de joindre les secours, puis quand le feu a été trop proche ils se sont réfugiés dans leur retenue d'eau d'Am50 de profondeur. Ils ont souffert de la chaleur rayonnante intense mais ont survécu sans blessures, tout en surveillant que leurs voisins allaient bien. Plus tard ils ont pu rassurer leur famille (qui avaient été informés de leur mort) grâce à un voisin, puis un autre voisin a déblayé la route, leur permettant de rentrer chez eux malgré le danger encore présent (arbres

s'effondrant sur la route, troncs en travers...) vers minuit. Ce témoignage montre la prise de risque de personnes dont le plan n'était pourtant pas de défendre, à cause d'une minimisation des risques (le feu est encore loin) ou d'une sur-estimation du contrôle sur la situation (les pompiers contrôlent, tout ira bien). Leurs actions de préparation avant le feu prennent plus de temps que prévu, ou le feu arrive plus vite que prévu, et leur plan initial d'évacuation devient trop dangereux, les forçant à rester sur place. Dans ce cas le témoin avait heureusement une bonne préparation et a trouvé un abri correct pour se protéger à temps.

### 2.3 Différences de point de vue

Elaine Mary Postlethwaite est une institutrice retraitée de 72 ans qui vivait à Marysville avec son mari de 82 ans Len, depuis près de 30 ans au moment des incendies. Son mari avait déjà combattu plusieurs incendies et avait bien l'intention de rester défendre encore une fois, mais il devenait vieux et malade. Objectivement, ses capacités actuelles ne lui permettaient plus de défendre sa maison, mais sa femme rapporte un mélange d'entêtement, de fierté, de manque de confiance et de déni, qui l'ont conduit à refuser obstinément d'évacuer, malgré toutes les tentatives de sa femme pour le convaincre. En effet celle-ci, inquiétée par les informations à la radio, les appels téléphoniques de famille ou d'amis, puis par l'observation directe de l'avancée du feu, voulait évacuer avec lui, d'autant plus qu'elle n'avait pas le permis de conduire. Le comportement de son mari semble montrer une stratégie de régulation émotionnelle connue, le déni ("[I] tried several times to persuade him to leave, but he would not budge. I could smell the fire, I could hear the fire and I could see it with my own eyes. But I couldn't get my husband to accept that it was coming. He just sat and sat and sat."). Elle raconte avoir espéré qu'un pompier ou policier vienne lui dire d'évacuer, pensant qu'il leur ferait peut-être plus confiance, mais personne n'est venu. Finalement la femme quittera la maison à pieds, rapportant un fort sentiment de culpabilité d'avoir abandonné son mari, avant d'être conduite vers un abri par un voisin qui passait. Son mari resté chez eux mourra dans l'incendie.

Ce témoignage montre les différences inter-individuelles dans les décisions : deux personnes se trouvant exactement dans la même situation n'ont ni la même perception du risque ni les mêmes intentions en réponse. Il montre aussi les freins émotionnels à l'évacuation (fierté, déni, culpabilité) et la nécessité de déclencheurs extérieurs pour convaincre certains de remettre en question leur plan.

### 2.4 Regret a posteriori

Patricia et Lindsay Easterbrook sont des professeurs à la retraite d'une soixantaine d'années vivant depuis 25 ans dans la maison qu'ils avaient construite dans un tout petit village. Ils complétaient leur retraite par les bénéfices tirés de leur bétail et de leur oliveraie. Des incendies les années précédentes les avaient rendus très conscients du risque et de la nécessité d'être bien préparés, et ils avaient

équipé leur propriété en conséquence, bien que n'ayant jamais discuté de leur plan ("The issue of whether to stay or go was not something we ever consciously discussed"). Le jour des feux, ils ont préparé leur maison (arrosage, protection des fenêtres, etc) tout en écoutant les informations à la radio et en surveillant l'extérieur (fumée, etc). Ils ont prévenu par téléphone leurs voisins qui étaient eux totalement inconscients du danger, regardant la télé, et déclinant le conseil d'écouter les informations à la radio en disant qu'ils ne recevaient pas cette chaîne ; ils ont quand même remercié de l'avertissement et répondu qu'ils allaient se préparer, puis une voiture a quitté leur maison et Patricia les a crus évacués. A l'arrivée du feu, elle et son mari ont combattu les flammes et protégé avec succès leur maison, jusqu'à l'arrivée de quelques pompiers venus les aider, les trouvant en état de choc. Elle racontent que le feu était très différent et bien pire que ce à quoi ils s'attendaient. La police les a prévenus le lendemain que leurs voisins étaient en fait morts chez eux. A posteriori, malgré leur succès, la femme regrette d'être restée ("*Despite saving our lives and our house, I don't think I would ever stay and defend again. We were physically very well prepared [...] but I don't think anything can prepare you for the psychological impact of facing the inferno that hit us on Black Saturday*").

Ce témoignage montre que même très bien préparés, les habitants peuvent sous-estimer le danger et les capacités (notamment psychologiques) nécessaires pour le combattre. Il montre aussi que la conscience du danger est essentielle pour rendre les habitants actifs dans la recherche d'informations et la réaction adaptée et rapide aux informations reçues (même prévenus, les voisins n'ont pas évacué).

## 3 Le modèle de comportement

A partir de l'analyse de ces entretiens, nous avons construit un modèle relativement simple du comportement de la population, destiné à mettre en évidence l'influence de facteurs subjectifs dans les décisions individuelles. En effet, les entretiens montrent clairement que la population agit en se basant sur une interprétation subjective du danger (qui peut être mal évalué ou sous-estimé) et de ses capacités pour y faire face ou y échapper (qui peuvent être surestimées), et peut être trop attachée à un plan prédéfini. Tous ces facteurs conduisent à des prises de risques plus importantes que le comportement "rationnel" attendu par les autorités, qui serait basé sur une vision objective du danger et des capacités de chacun.

### 3.1 Modèle de l'environnement

L'environnement est une grille de taille 50 par 50 cellules dans lequel nous avons placé deux refuges dans deux coins opposés. Il contient différents types d'agents : bâtiments, feux, et habitants, détaillés ci-dessous.

**Feu.** Ce modèle n'étant pas focalisé sur le comportement réaliste du feu, nous avons développé un modèle simpliste de celui-ci, suffisant pour visualiser différentes réactions de la population. Des modèles très complexes et détaillés

existent déjà [4] et pourront être intégrés ultérieurement. Le feu est donc composé d'agents avec une architecture à base de réflexes, chacun ayant pour attributs sa position sur la grille et son intensité (qui constitue aussi son rayon d'action) et les réflexes suivants :

- Changement aléatoire d'intensité, augmentation (forte probabilité) ou diminution
- Propagation vers une cellule voisine, créant un nouvel agent feu sur une cellule libre
- Infliction de dégâts aux bâtiments dans son rayon d'action, selon intensité et distance
- Infliction de blessures aux personnes dans son rayon d'action, selon intensité, distance, et protection offerte par un bâtiment.
- Disparition quand son intensité devient nulle

**Bâtiments.** L'environnement contient initialement 100 bâtiments (maisons) chacun habité par un agent (dans une version ultérieure nous considérerons des familles), chacun étant un agent avec les attributs suivants :

- Propriétaire : l'agent habitant ce bâtiment
- Résistance : a une valeur initiale (bâtiments de solidités diverses), qui peut être augmentée par les actions de préparation entreprises par l'habitant, puis diminuée par les dégâts du feu. Cette résistance offre une certaine protection à son habitant.
- Dégâts : les dégâts déjà reçus

Les bâtiments s'écroulent sous l'effet du feu quand leur résistance tombe à 0. Ils cessent alors d'offrir une protection, et la motivation à les défendre devient aussi nulle.

**Abris.** Deux abris dans les coins de la grille sont connus de tous les habitants. Ils leur offrent une protection totale contre les feux. Un habitant une fois entré dans un abri y reste jusqu'à la fin de la simulation.

### 3.2 Modèle des habitants

Les agents habitants ont une architecture d'automate à états finis, suffisante pour mettre en évidence l'impact de la subjectivité dans les décisions.

**Attributs.** Les agents représentant les habitants sont décrits par les attributs suivants :

- Position sur la grille
- Bâtiment possédé
- Santé : valeur initiale aléatoire, augmentée par la préparation avant l'arrivée du feu, puis diminuée par les blessures subies
- Capacités objectives : initialisées aléatoirement, ont un impact sur l'évaluation des risques (rayon de perception du feu), et sur la réussite des actions pendant l'incendie (préparer sa maison, éteindre le feu, suivre le meilleur chemin vers les abris)
- Capacités subjectives : initialisées aléatoirement, mises à jour par observation des performances face au feu, influencent la motivation à défendre.
- Motivation pour la fuite (aversion au risque) : initialisée aléatoirement, influence le rayon dans lequel l'habitant surveille les feux pour mettre à jour

son évaluation du danger et ses motivations. Elle est mise à jour en fonction du contexte (état de santé, danger subjectif, état de la maison)

- Motivation pour la défense : initialisée aléatoirement, représente la décision que les habitants prennent à l'avance (consciemment ou non, explicitement ou non) de défendre leur maison en cas de feu (p. ex. pour des raisons économiques), puis mise à jour en fonction de l'évaluation subjective des capacités et du danger.

**Actions.** Les habitants disposent des actions suivantes :

- Mise à jour des motivations : à chaque pas de temps les individus mettent à jour leur perception du danger, leur motivation à fuir, et leur motivation à défendre. Cela influence leur changement d'état dans l'automate, et donc leur comportement
- Préparation : c'est l'action réalisée par les agents qui ont décidé de défendre, en attendant l'arrivée du feu, et par les agents qui ont décidé de partir, en attendant qu'ils jugent qu'il est temps de partir. Cette action consiste à ajouter de la résistance à leur maison (simulant les actions de préparation, désherbage, arrosage, protection des fenêtres, etc) et de la santé à eux-mêmes (équipement adapté, entraînement, etc).
- Défense contre le feu : c'est l'action réalisée par les agents qui ont décidé de défendre, une fois le feu arrivé à portée. Elle consiste à diminuer l'intensité du feu, d'une valeur dépendant de leur compétences objectives. Les agents sont conscients de leur performance qui leur donne des indices sur leurs compétences objectives, leur permettant de reconsidérer leur motivation au fil du temps.

Le comportement des habitants est détaillé dans le paragraphe suivant et illustré sur l'automate de la figure 1.

**Déterminants du comportement.** Le comportement des agents habitants est basé sur la distinction entre valeurs objectives et subjectives du danger, et des capacités pour y faire face. Les valeurs objectives sont inaccessibles aux agents, mais influencent la réussite de leurs actions (perception, préparation, défense, évacuation). Les valeurs subjectives ne sont pas forcément correctes mais déterminent les (mauvaises) décisions des agents.

Concrètement, le danger objectif est constitué par l'intensité et la proximité du feu, et détermine les dégâts aux bâtiments et les blessures aux habitants. Mais chaque individu fait sa propre évaluation subjective du danger selon ses capacités de perception (il reste inconscient du danger jusqu'à ce qu'un feu entre dans son rayon de perception) et son aversion au risque (il ne considère dangereux que les feux qui sont dans son rayon d'aversion). Un individu peut donc longtemps ignorer le danger, puis le sous-estimer, et se retrouver surpris tout à coup, d'où les témoignages de feu "arrivé tellement vite que je n'ai rien pu faire". C'est ce danger subjectif qui (avec sa motivation personnelle) influence sa décision de défendre ou évacuer.

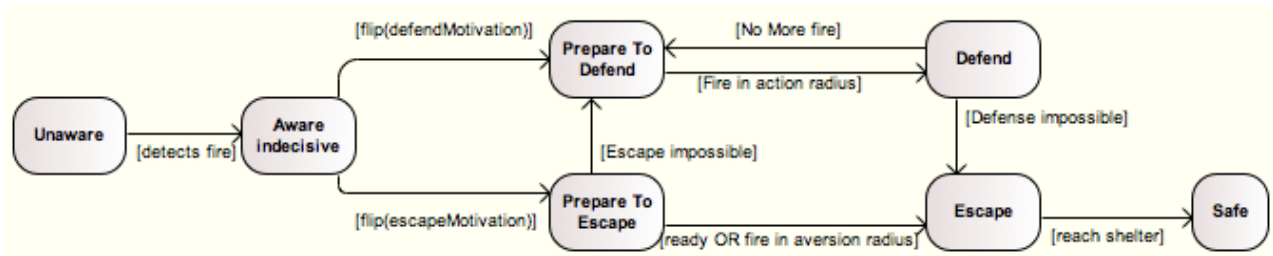


FIGURE 1 – Automate de comportement des habitants

Les capacités objectives et l'état de santé (blessures reçues) influencent la réussite des actions des agents. Ainsi de meilleures capacités conduisent à percevoir le feu plus tôt, puis à avoir de meilleures chances de l'éteindre. Les agents qui évacuent calculent un chemin optimal, leurs capacités objectives influencent le choix du meilleur chemin plutôt qu'un déplacement plus aléatoire, ainsi que leur vitesse de déplacement sur ce chemin. Mais encore une fois, chaque habitant n'a accès qu'à son évaluation subjective de ses capacités, qu'il peut surestimer ou sous-estimer.

**Comparaison avec la psychologie du stress.** Notre modèle est ainsi en accord avec la théorie psychologique de Lazarus [9] concernant l'évaluation cognitive et le stress. Il distingue en effet deux processus simultanés :

- l'évaluation primaire ("demand appraisal") consistant à évaluer la signification de la situation pour l'individu (bonne, stressante, ou pas importante), et dans le cas d'un stress, à déterminer s'il est positif (défi), négatif (menace) ou actuel (perte ou blessure déjà établie). Correspond à notre danger subjectif.
- l'évaluation secondaire ("resource appraisal") consistant à évaluer les capacités (compétences, support social et matériel, ressources) dont dispose l'individu pour faire face à la situation stressante détectée. Correspond à nos capacités subjectives.

**Automate de comportement.** Il s'agit bien sûr d'un modèle simplifié de comportement, visant uniquement à mettre en évidence l'importance pour les décideurs de considérer les déterminants subjectifs du comportement de la population. Les états et les transitions de l'automate de comportement sont décrits ci-dessous (cf figure 1) :

- Inconscient : état initial, l'agent n'est pas conscient du danger (à tort ou à raison) et ne fait rien
- Conscient indécis : état atteint par un agent inconscient qui détecte un feu dans son rayon de perception, il évalue alors le danger et ses motivations jusqu'à prendre une décision
- Préparation au départ : état atteint quand un agent décide de partir ; il se prépare alors à partir jusqu'à être prêt ou surpris par le feu (transition vers "évacuation") ou bloqué sur place (transition vers "préparation à la défense")
- Evacuation : état des agents qui sont en route vers

le refuge le plus proche. Ils peuvent se tromper de chemin et avancer plus ou moins vite, subissant des blessures s'ils passent à proximité du feu.

- Préparation à la défense : état des agents qui ont décidé ou été forcés de rester défendre leur maison. Les agents se préparent jusqu'à détecter le feu dans leur rayon d'action.
- Défense active : état des agents qui sont en train de combattre activement le feu présent dans leur rayon d'action. Ils repassent en état de préparation à la défense si le feu s'éloigne à nouveau. Ils passent en état "évacuation" quand leurs motivations s'inversent (danger trop grand, confiance plus faible après avoir échoué à contrôler le feu).
- En sécurité : état des agents qui ont atteint un abri après avoir évacué.
- Mort : état des agents dont la santé tombe à 0 à cause des blessures infligées par le feu.
- Survivant : état final des agents non morts une fois tous les feux contrôlés ou arrêtés par l'utilisateur.

### 3.3 Implémentation et initialisation

Nous avons implémenté le modèle dans la plateforme de simulation multi-agents GAMA [7]. L'environnement est une grille 50 par 50 cellules (cf figure 2). On y place deux abris dans les coins Nord-Est et Sud-Ouest (cercles bleu-vert) et 100 habitants inconscients positionnés dans autant de bâtiments. Leurs attributs sont initialisés aléatoirement (santé et résistance entre 100 et 200, capacités, confiance, motivations entre 0 et 1). L'incendie démarre par la création de 10 feux d'intensité 1 (cellules rouges) qui se propagent et grossissent ensuite, leur rayon d'action étant représenté par la zone jaune qui les entoure. Les cellules vertes sont celles non touchées par l'incendie. Les habitants sont représentés par un cercle de couleur selon leur état : bleu foncé (inconscient), rose (conscient indécis), orange (préparation à la défense), rouge (défense), violet (défenseur en fuite), bleu clair (évacuation), vert (en sécurité), noir (mort).

## 4 Evaluation du modèle

L'objectif de ce modèle étant la reproduction de comportements humains réalistes, et pas le réalisme de la situation initiale ou du déroulement de l'incendie, il n'a pas vocation

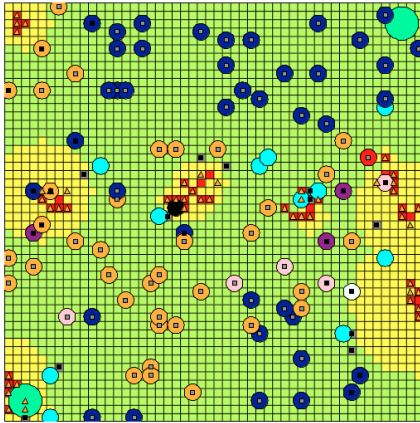


FIGURE 2 – Capture d’écran de la simulation dans GAMA

à être validé dans son ensemble. Nous nous concentrons plutôt ici sur la capture de différents archétypes connus de comportements de la population, dont nous montrons que notre modèle permet de les reproduire, et que nous tentons de mettre en correspondance avec les attributs des agents. Ces archétypes sont détaillés ci-dessous.

#### 4.1 Archétypes de comportements

A partir d’observations et d’interviews de la population recueillis après les incendies de 2009 autour de Melbourne, les enquêteurs [1, 6] ont identifié 7 archétypes (ou profils) de comportement dans les incendies. Ils ajoutent que ces profils ne sont pas forcément liés à des caractéristiques socio-démographiques :

- **Défenseurs compétents** (can-do defenders) : déterminés à protéger leur maison, connaissant bien la région, expérimentés et compétents, orientés vers l’action, autonomes, confiants ;
- **Défenseurs réfléchis** (considered defenders) : fortement engagés à rester et défendre leur maison, conscients des risques, efforts délibérés de préparation et d’entraînement ;
- **Défenseurs économiques** (livelihood defenders) : engagés à rester et défendre ce qu’ils considèrent comme leur moyen de subsistance (ferme, hôtel...) et donc bien préparés ;
- **Observateurs de menace** (threat monitors) : n’ont pas l’intention de rester face à une menace sérieuse, ni de partir avant qu’ils le jugent nécessaire, attendent de voir ;
- **Eviteurs de menace** (threat avoiders) : conscients du risque et de leur vulnérabilité, planifient de partir tôt avant toute menace réelle, mais pas de plan s’ils sont surpris ;
- **Réactifs inconscients** (unaware reactors) : inconscients du risque, ne se sentent pas concernés, aucune connaissance des réactions appropriées ni préparation (p. ex. touristes) ;
- **Isolés vulnérables** (isolated and vulnerable) : phy-

siquement ou socialement isolés (p. ex. personnes âgées ou handicapées) ce qui limite leur capacité à répondre adéquatement.

#### 4.2 Caractérisation des archétypes

Notre modèle permet de caractériser ces archétypes de comportement de deux manières : en termes de comportement, et en terme de valeurs de leurs attributs.

**Trajectoires d’états correspondantes.** Les archétypes peuvent être caractérisés en termes de comportements attendus dans la simulation, et plus spécifiquement en terme des trajectoires attendues suivantes dans l’automate.

- Défenseurs compétents : transition très tôt vers l’état “Conscient” (alors que le feu est encore loin), puis transition immédiat vers “préparation à la défense” ; préparation efficace (santé et résistance fortes en sortie d’état) ; passage dans l’état Défense alors que le feu est encore loin ; défense efficace (intensité du feu diminue beaucoup, plusieurs foyers éteints) ; transition vers l’état “évacuation” si le danger est trop élevé (trop de blessures subies) ; donc fort taux de survie en fin de simulation
- Défenseurs réfléchis : transition très tôt vers l’état Conscient (un peu moins tôt) ; transition immédiate vers Préparation ; préparation efficace (un peu moins) ; défense efficace (un peu moins) ; transition éventuelle mais moins fréquente vers Evacuation (plus de blessures subies) ; taux de survie moyen, meurent en “défense” ou “évacuation”
- Défenseurs économiques : idem mais pas de transition vers Evacuation, taux de survie plus faible, meurent dans l’état “défense”.
- Observateurs de menace : transition vers l’état Conscient moins rapide ; transition tardive vers la préparation à l’évacuation ; transition tardive vers l’évacuation ; transition éventuelle vers préparation à la défense à cause de l’impossibilité de fuir ; taux de survie moyen, certains meurent avant d’avoir commencé à fuir (dans l’état préparation)
- Eviteurs de menace : transition vers l’état conscient variable mais plutôt tard ; transition immédiate vers préparation à évacuer ; transition très rapide vers évacuation effective ; taux de survie élevé ; ceux qui meurent le font depuis l’état “évacuation”
- Réactifs inconscients : transition très tardive vers l’état Conscient ; transition tardive vers un état de préparation (selon motivations et capacités subjectives) ; taux de survie faible (meurent en état Inconscient ou Indécis).

**Corrélation avec les attributs.** On rappelle les attributs des habitants initialisés aléatoirement dans la simulation : compétences (capacités objectives, santé, résistance de la maison), confiance (capacités subjectives), aversion au risque (motivation pour la fuite), et motivation (pour la défense). Dans le tableau 1 nous montrons la corrélation attendue entre ces profils et des valeurs (ou plages de valeurs)

particulières des attributs. Ce tableau montre en particulier que nos attributs permettent de caractériser et différencier les 6 profils identifiés. Par ailleurs, en initialisant la simulation avec des agents créés avec ces combinaisons de valeurs de leurs attributs, on pourrait montrer qu'ils exposent bien le comportement associé au profil correspondant.

### 4.3 Evaluation du modèle

Pour évaluer le modèle, nous lançons la simulation avec une initialisation aléatoire des attributs des agents. Nous utilisons alors les trajectoires attendues pour classer les agents dans les 6 archétypes selon leur comportement observé. Pour cela nous avons sauvegardé au cours de la simulation pour chaque agent l'historique des états par lesquels il est passé, avec pour chaque état le temps passé, la santé à l'entrée, et la variation de santé avant d'en sortir.

En analysant l'historique de chaque agent en fin de simulation et en le comparant aux trajectoires attendues détaillées ci-dessus, nous pouvons associer cet agent à un archétype. Par exemple (pour des questions de place nous nous n'en détaillons ici que 2) : les défenseurs économiques défendront leur maison à tout prix, beaucoup risquent de mourir en défendant, et leurs derniers états seront donc 'défense' puis 'mort' ; les observateurs de menace eux ont tendance à attendre de voir, et peuvent mourir avant d'avoir décidé comment agir, on recherche donc un historique se terminant par 'mort' juste après 'conscient indécis'.

Pour ces deux archétypes, nous mesurons à l'issue de la simulation les valeurs moyennes et l'écart-type de chaque attribut, sur tous les agents identifiés ainsi comme membres de cet archétype. Ces valeurs en seront donc caractéristiques mais sont cependant biaisées par le fait qu'on n'identifie que les agents qui ne survivent pas, la liste d'agents n'est donc pas exhaustive. Le tableau 2 rapporte les mesures effectuées. On peut comparer ce tableau avec les plages de valeurs attendues du tableau 1. On retrouve certains résultats attendus comme la confiance supérieure à la moyenne des défenseurs économiques.

## 5 Discussion et conclusion

### 5.1 Comparaison avec l'état de l'art

Des travaux comme [4] fournissent un modèle très réaliste du comportement du feu et de sa propagation, mais à notre connaissance aucun modèle aussi réaliste n'existe pour le comportement de la population humaine. De nombreuses simulations à base d'agents se concentrent en effet sur la simulation d'évacuation et de déplacements de foules, souvent homogènes, en particulier lors d'incendies de bâtiments. [8] a proposé un des premiers modèles à base d'agents décrivant le comportement des individus au cas de déplacement en foule et en particulier d'évacuation ; celui-ci intègre un ensemble d'agents homogènes soumis à des forces sociales. Les modèles d'évacuations se sont complexifiés par la suite en intégrant des agents hétérogènes, ayant des comportements influencés par des facteurs tels que leurs émotions [10, 12] ou les liens sociaux [2] qu'ils

ont avec les autres agents. La particularité de ces travaux est de se baser sur des études psychologiques des comportements individuels et sociaux pour améliorer les modèles. Au contraire nous nous basons ici sur des entretiens donnant un aperçu précis du comportement de la population et de ses déterminants.

### 5.2 Simplifications

Notre modèle est cependant lui aussi relativement simple et repose sur de nombreuses simplifications, afin de nous concentrer sur la vérification de notre hypothèse. Des travaux futurs permettront d'élaborer plus ce modèle afin de le rendre plus réaliste.

En particulier, les agents sont toujours chez eux au début de la simulation, alors qu'on pourrait envisager qu'ils soient à l'extérieur, au travail, chez des amis, sur la route, quand les incendies commencent. On observerait alors des comportements différents (vouloir rentrer chez soi ou pas, etc). Il faudra compléter notre modèle avec d'autres actions, comme de se réfugier dans un abri de fortune (dans un étang, un bâtiment quelconque) en urgence avant d'avoir pu atteint sa maison ou un refuge. La faisabilité des actions devrait aussi dépendre des ressources disponibles (le stock d'eau en particulier étant limité) pour différencier les personnes plus ou moins bien préparées et équipées.

Dans ce premier modèle, les agents sont aussi seuls dans leur maison, alors qu'il faudrait tenir compte des autres occupants du logement, qui peuvent fournir une aide précieuse pour lutter contre le feu (améliorant les capacités de défense) mais aussi une motivation supplémentaire pour évacuer (mise en sécurité d'enfants ou autres personnes à charge). On a aussi vu dans les témoignages que les avis des différents occupants peuvent différer, les conduisant à négocier le comportement à tenir, leur décision ne dépendant alors plus seulement de leurs seules capacités et perceptions. Nous n'avons pas non plus pour l'instant intégré de communication entre voisins. Pour rendre le modèle plus réaliste, il sera nécessaire d'étudier la communication et les relations entre les individus, la confiance dans les différentes sources d'information disponibles (les voisins, la télé ou radio, les autorités, l'observation) et son rôle dans l'adoption de croyances et intentions, ou encore la contagion émotionnelle. Il faudra aussi ajouter des actions de solidarité, les témoignages montrant que beaucoup de voisins s'entraident pour faire face au feu.

### 5.3 Extensions futures

Notre but à plus long-terme est de développer un jeu sérieux permettant aux décideurs d'expérimenter différentes stratégies de gestion de crise sur une population simulée. Pour cela, il faudra un modèle réaliste non seulement de la population, mais aussi du feu lui-même et de sa propagation en fonction du vent, du terrain, etc. De tels modèles existent déjà pour le feu (par exemple Phoenix [4]) et nous pourrions étudier comment les intégrer dans notre simulation. Concernant la population, nous souhaitons passer à un modèle BDI (Belief, Desire, Intention)

Profil	Compétences	Confiance	Aversion au risque	Motivation
Défenseur compétent	+++	+++	++	+
Défenseur réfléchi	++	+++	+	++
Défenseur économique	+++	+++	-	+++
Observateur de menace	+/?	-	++	--
Eviteur de menace	+/?	--	+++	---
Réactif inconscient	-/?	?	-/?	--

TABLE 1 – Corrélation entre profils de comportement et valeurs des attributs

	Observateur de menace		Défenseur économique		Tous les agents	
	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type	Moyenne	Ecart-Type
Compétences	0.308	0.214	0.395	0.172	0.45	0.299
Confiance	0.54	0.284	0.602	0.287	0.485	0.282
Aversion au risque	0.467	0.312	0.506	0.309	0.504	0.280
Motivation	0.452	0.233	0.528	0.239	0.49	0.209

TABLE 2 – Corrélation mesurée entre profils de comportement et valeurs des attributs

permettant de décrire un comportement plus complexe à base de délibération sur des désirs contradictoires. Nous intégrerons aussi les stratégies de gestion émotionnelle (*coping*) décrites par Lazarus dans son modèle du stress, comme par exemple le déni dont nous avons cité un exemple dans un témoignage. Une fois le modèle plus réaliste, nous le rendrons plus interactif pour permettre à l'utilisateur de réaliser différentes actions (modifier la situation) et de tester différentes stratégies de gestion de la crise (positionnement des pompiers, mode d'alerte aux habitants, entraînement vs évacuation obligatoire, etc).

## Références

- [1] A. Rhodes. Why don't they do what we think they should ? In *AFAC. Emergency Mangmt Vic*, 2014.
- [2] Mei Ling Chu, Paolo Parigi, Kincho Law, and Jean-Claude Latombe. Safegress : a flexible platform to study the effect of human and social behaviors on egress performance. In *Symposium on Simulation for Architecture & Urban Design*, 2014.
- [3] Country Fire Authority. *Your guide to survival*, December 2014.
- [4] Thomas J. Duff, Derek M. Chong, and Kevin G. Tolhurst. Quantifying spatio-temporal differences between fire shapes : Estimating fire travel paths for the improvement of dynamic spread models. *Environmental Modelling and Software*, 46 :33–43, 2013.
- [5] Julie Dugdale, Narjes Bellamine Ben Saoud, Fedia Zouai, and Bernard Pavard. Coupling agent based simulation with dynamic networks analysis to study the emergence of mutual knowledge as a percolation phenomenon. *Journal of Systems Science and Complexity (JSSC)*, 2015. To appear.
- [6] Fire Services Commissioner. Review of the community response in recent bushfires. Technical report, NOUS group, 12 September 2013. <http://goo.gl/wJcGn3>.
- [7] A. Grignard., P. Taillandier, B. Gaudou, N.Q. Huynh, D.-A. Vo, and A. Drogoul. Gama v. 1.6 : Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation. In *PRIMA*, 2013.
- [8] Dirk Helbing and Peter Molnar. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical review E*, 51(5) :4282, 1995.
- [9] R. S. Lazarus. *Emotion and adaptation*. Oxford University Press, London, 1991.
- [10] Van Minh Le, Carole Adam, Richard Canal, Benoit Gaudou, Ho Tuong Vinh, Patrick Taillandier, et al. Simulation of the emotion dynamics in a group of agents in an evacuation situation. In *Principles and Practice of MAS*, pages 604–619. Springer, 2010.
- [11] Jim McLennan and Glenn Elliott. Community members decision making under the stress of imminent bushfire threat - murrindindi fire. Technical report, Bushfire CRC Extension, School of Psychological Science, La Trobe University, Bundoora, Victoria, Australia, 2011. <http://goo.gl/cyVgY3>.
- [12] Van Tho Nguyen, Dominique Longin, Tuong Vinh Ho, and Benoit Gaudou. Integration of emotion in evacuation simulation. In *ISCRAM-Med*, pages 192–205. Springer, 2014.
- [13] Bernard Teague, Ronald McLeod, and Susan Pascoe. Final report. Technical report, 2009 Victorian Bushfires Royal Commission, 2009. Summary at <http://goo.gl/ulCt4U>.
- [14] Victorian Bushfires Royal Commission. Final report - volume 4 - the statements of lay witnesses. Technical report, 2009.