



HAL
open science

Contribution à la simulation des mobilités piétonnes sur un territoire urbain en contexte d'évacuation préventive

Cyril Orengo

► **To cite this version:**

Cyril Orengo. Contribution à la simulation des mobilités piétonnes sur un territoire urbain en contexte d'évacuation préventive. Géographie. IMT - MINES ALES - IMT - Mines Alès Ecole Mines - Télécom, 2023. Français. NNT : 2023EMAL0015 . tel-04551119

HAL Id: tel-04551119

<https://theses.hal.science/tel-04551119>

Submitted on 18 Apr 2024

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.

**THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR
DE L'INSTITUT MINES-TELECOM (IMT) –
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES D'ALÈS (IMT MINES ALÈS)**

En Géographie

École doctorale 583 R&S – Risques et Sociétés portée par l'Université de Nîmes

Unité de recherche Laboratoire des Sciences des Risques

**Contribution à la simulation des mobilités
piétonnes sur un territoire urbain en contexte
d'évacuation préventive**

Présentée par Cyril ORENGO

Le 12 décembre 2023

Sous la direction de Sophie SAUVAGNARGUES et de Florian TENA-CHOLLET

Devant le jury composé de

Thierry VERDEL, Professeur des universités, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy	Rapporteur
Emmanuel GARBOLINO, Enseignant-Chercheur HDR, ISIGE, Mines ParisTech	Rapporteur
Chihab HANACHI, Professeur des universités, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse	Président du jury
Aurélia BONY-DANDRIEUX, Enseignant-Chercheur HDR, IMT Mines Alès	Examinatrice
Laurent APRIN, Professeur, IMT Mines Alès	Examineur
Florian TENA-CHOLLET, Enseignant-Chercheur, IMT Mines Alès	Directeur de thèse
Pierre-Alain AYRAL, Ingénieur de recherche, Centre National de la Recherche Scientifique	Membre invité



SOMMAIRE GENERAL

Introduction générale	10
I Enjeux de la simulation des évacuations préventives de la population dans les risques majeurs	18
I.1 Évacuations de population : difficultés et facteurs d'incertitude	18
I.2 Complexité des simulations d'évacuations	39
II Méthodologie proposée pour la simulation des évacuations	58
II.1 Démarche de modélisation	58
II.2 Architecture de la simulation	89
III Analyse des paramètres de la simulation	110
III.1 Démarche expérimentale	110
III.2 Comportement de la simulation	126
III.3 Analyse croisée des paramètres	176
III.4 Conclusion intermédiaire	194
IV Méthode d'application du modèle de simulation	198
IV.1 Contextualisation géographique du modèle de simulation	198
IV.2 Résultats	218
IV.3 Analyse des résultats	245
IV.4 Conclusion intermédiaire	255
Conclusion générale	257
Bibliographie	267
Résumé	281

TABLE DES ABBREVIATIONS

GAMA	Gis Agent-based Modeling Architecture
GAML	Gama Modeling Language
UML	Unified Modeling Language
PRE	Point de Rassemblement des Evacués
IRIS	Îlots Regroupés pour l'Information Statistique
ERP	Etablissements Recevant du Public
ORSEC	Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
PCC	Poste de Commandement de Crise
PPI	Plan Particulier d'Intervention
PCS	Plan Communal de Sauvegarde
DOS	Directeur des Opérations de Secours
PPMS	Plan Particulier de Mise en Sureté
SFM	Social Force Model
BDI	Believe Desire Intention architecture
SMA	Système Multi-Agents
ZPI	Zone de Proximité Immédiate
SIG	Système d'Information Géographique
HLM	Habitation à Loyer Modéré
TRI	Territoire à Risque d'Inondation
PPRI	Plan de Prévention du Risque Inondation
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
EHPAD	Etablissement d'Hébergement pour Personnes Agées Dépendantes
OSM	Open Street Map

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Temporalité de la crise - Adapté depuis (Beraud, 2013).....	13
Figure 2 – « Mille-feuille » de la sécurité civile.....	20
Figure 3 – Schéma synthétique d'une cellule de crise.....	22
Figure 4 – Le concept de mobilité et le substrat d'application	25
Figure 5 - Représentation schématique a) d'un déplacement b) d'une somme de déplacement c) d'un système de mobilités.....	28
Figure 6 – Distribution cumulative des temps de préparation (Lindell et al., 2012)	31
Figure 7 – Estimation des temps de préparation des ménages autour de trois centrales nucléaires.....	32
Figure 8 – Les deux organisations possibles pour une foule.....	36
Figure 9 – Exemple de représentation d'un graphe quelconque.....	48
Figure 10 – Différence entre recherche d'urgence et implémentation directe des comportements humains dans une simulation.....	54
Figure 11 – Opérationnalité et abstraction.....	61
Figure 12 - Incertitude autour du comportement de la population.....	63
Figure 13 – Vue globale schématisée des facteurs impactant une opération d'évacuation de population.....	64
Figure 14 - Vue globale schématisée de l'impact cumulé des principaux groupes de facteurs impactant	65
Figure 15 – Principaux points d'incertitudes observés lors d'évacuations de populations.....	69
Figure 16 – Métamodèle du langage de GAMA (GAML) et modèle de l'interface utilisateur	71
Figure 17 – Exemple d'importation d'un environnement géographique dans GAMA (Orengo et al. 2022) .	72
Figure 18 – Différence entre l'itinéraire et l'action de déplacement.....	73
Figure 19 - Composition d'une classe d'agent.....	75
Figure 20 – Les trois groupes de paramètres du modèle.....	76
Figure 21 – Exemple de courbe cumulative des départs (Tweedie et al., 1986)	80
Figure 22 – Impact de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant sur la motricité des individus.....	82
Figure 23 – Diagramme UML du modèle.....	88
Figure 24 – Implémentation du temps de préparation dans la simulation.....	96
Figure 25 - Les courbes des départs mobilisées.....	96
Figure 26 - Illustration du fonctionnement de B3.....	98
Figure 27 – Illustration du fonctionnement du paramètre D2.....	103
Figure 28 – Schéma de construction d'un agent « groupe » à l'aide de GAMA.....	106
Figure 29 - Courbe de cumul des arrivées pour B1	128
Figure 30 - Courbe de cumul des arrivées pour B2.....	134
Figure 31 - Courbes de cumul et courbes de départs pour B2 (Tw) et B2 (null).....	135
Figure 32 - Cumul des arrivées pour chaque PRE en fonction de B2.....	139
Figure 33 - Nombre de personnes arrivant aux PRE par minutes.....	140
Figure 34 - Courbes cumulatives des arrivées pour B3.....	143
Figure 35 - Cumul des arrivées par PRE	147
Figure 36 - Arrivées en fonction du temps par PRE.....	148
Figure 37 - Courbe cumulatives des arrivées pour D1	150
Figure 38 - Courbes cumulatives des arrivées pour chaque PRE (D1)	157
Figure 39 - Arrivées par minute pour chaque PRE (D1)	158
Figure 40 - Courbe cumulative des arrivées pour D2.....	162
Figure 41 – Courbes cumulatives des arrivées pour chaque PRE.....	165
Figure 42 - Arrivées par minute pour chaque PRE (D2)	166
Figure 43 - Courbes cumulatives des arrivées pour V2.....	168
Figure 44 - Courbe des arrivées pour les croisements de B2 et B3	180
Figure 45 - Courbe cumulatives des arrivées pour le croisement de D1, B2 et B3	186
Figure 46 - Courbes cumulatives des arrivées pour D1 et D2 combinés.....	192
Figure 47 – Illustration de l'espace disponible par personnes (4 classes).....	216

Figure 48 – Double legende utilisée pour l'indicateur « surface disponible par personne »	216
Figure 49 – Illustration des seuils de densité de personne par m ²	217
Figure 50 – Courbes cumulatives des arrivées comparées entre les scénarios S1B et S1C.....	246
Figure 51 – Ecart dans le cumul des arrivées entre les scénarios SxB et SxC.....	247
Figure 52 – Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S1B et S1C.....	247
Figure 53 - Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S2B et S2C.....	248
Figure 54 - Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S3B et S3C.....	249
Figure 55 – Comparaison des temps de parcours S1B/S1C.....	249
Figure 56 – Comparaison des temps de parcours S2B/S2C.....	250
Figure 57- Comparaison des temps de parcours S3B / S3C.....	251
Figure 58 – Comparaison des scénarios avec et sans ouverture des ponts à la circulation.....	252
Figure 59 – Ecart en nombre d'évacuation complétées par minutes entre les scénarios SxB et SxP.....	253

TABLE DES ATLAS

<i>Atlas 1 - Temps de parcours individuels moyennés pour B1</i>	129
<i>Atlas 2 - Fréquentations des axes pour B1 (05)</i>	130
<i>Atlas 3 - Fréquentation des axes pour B1 (35)</i>	130
<i>Atlas 4 - Temps de parcours individuels moyennés pour B2</i>	136
<i>Atlas 5 - Comparaison absolue et relative des temps de parcours (B2 : Tw, null)</i>	137
<i>Atlas 6 - Fréquentation des axes pour B2 (tw)</i>	138
<i>Atlas 7 - Fréquentation des axes pour B2 (null)</i>	138
<i>Atlas 8 - Temps de parcours individuels moyennés pour B3</i>	144
<i>Atlas 9 - Ecart absolu et relatifs pour B3 (0, 100)</i>	144
<i>Atlas 10 - Fréquentation des axes pour B3 (0)</i>	145
<i>Atlas 11 - Fréquentation des axes pour B3 (100)</i>	146
<i>Atlas 12 - Temps de parcours individuels moyennés pour D1</i>	152
<i>Atlas 13 - Alternatives de D1</i>	153
<i>Atlas 14 - Alternatives de D1 et taux d'écart</i>	154
<i>Atlas 15 - Fréquentation des axes pour D1 (PC)</i>	155
<i>Atlas 16 - Fréquentation des axes pour D1 (PG)</i>	156
<i>Atlas 17 - Fréquentation des axes pour D1 (PS)</i>	156
<i>Atlas 18 - Comparaison des temps de parcours individuels moyennés pour D2</i>	162
<i>Atlas 19 - Fréquentation des axes pour D2 (A)</i>	163
<i>Atlas 20 - Fréquentation des axes pour D2 (H)</i>	164
<i>Atlas 21 - Fréquentation des axes pour D2 (P)</i>	164
<i>Atlas 22 - Comparaison des temps de parcours individuels moyennés pour V2</i>	169
<i>Atlas 23 - Vitesse moyenne des évacués en fonction de leur point de départ pour V2</i>	170
<i>Atlas 24 - Fréquentation des axes pour V2 (8)</i>	171
<i>Atlas 25 - Fréquentation des axes pour V2 (43)</i>	171
<i>Atlas 26 - Fréquentation des axes pour V2 (90)</i>	172
<i>Atlas 27 - Temps de parcours individuels moyennés comparés pour B2 = Tw</i>	181
<i>Atlas 28 - Temps de parcours individuels moyennés comparés pour B2 = 5min</i>	182
<i>Atlas 29 - Comparaison de la fréquentation des axes B2 (5) ; B3 (0)</i>	183
<i>Atlas 30 - Comparaison de la fréquentation des axes B2 (5) ; B2 (30)</i>	183
<i>Atlas 31 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2 (Tw) et B3 (0)</i>	188
<i>Atlas 32 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2 (5min) et B3 (0)</i>	189
<i>Atlas 33 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2 (Tw) et B3 (100)</i>	190
<i>Atlas 34 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour D2 (0)</i>	193
<i>Atlas 35 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour D2 (A)</i>	194
<i>Atlas 36 – Résultats de la répartition de la population en fonction de la catégorie socio-professionnelle d'appartenance</i>	202
<i>Atlas 37 – Nombre d'élèves par commune et par école dans l'aire d'attraction Alésienne</i>	205
<i>Atlas 38 – Les trois configurations de population utilisée comme données d'entrée de la simulation</i>	212

TABLE DES CARTES

<i>Carte 1 - Communes du Plan Particulier d'Intervention</i>	<i>112</i>
<i>Carte 2 - IRIS de la commune d'Alès.....</i>	<i>113</i>
<i>Carte 3 – Répartition de la population sur la commune d'Alès.....</i>	<i>114</i>
<i>Carte 4 - Population vivant sous le seuil de 5 mètres</i>	<i>115</i>
<i>Carte 5 - Axes routiers et surfaces accessibles par les piétons</i>	<i>116</i>
<i>Carte 6 - Principaux axes de communication et zone inondable sur la commune d'Alès.....</i>	<i>118</i>
<i>Carte 7 - Positions et noms des points refuges de la commune d'Alès.....</i>	<i>119</i>
<i>Carte 8 – Répartition des travailleurs sur la commune d'Alès.....</i>	<i>203</i>
<i>Carte 9 – Nombre d'élèves par établissement</i>	<i>206</i>
<i>Carte 10 – Origine des données sur les ERP.....</i>	<i>209</i>
<i>Carte 11 – Typologie d'ERP et capacité d'accueil estimée.....</i>	<i>211</i>

TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 – Comparaison des valeurs de vitesse de marche identifiées dans la littérature.....</i>	<i>91</i>
<i>Tableau 2 - Valeurs possibles du paramètre B1</i>	<i>94</i>
<i>Tableau 3 – Valeurs possibles du paramètre B3.....</i>	<i>98</i>
<i>Tableau 4 – Valeurs possibles du paramètre V2.....</i>	<i>100</i>
<i>Tableau 5 - Valeurs du paramètre D1.....</i>	<i>101</i>
<i>Tableau 6 – Répartition des choix de destination lors d'évacuations relevés dans la littérature.....</i>	<i>102</i>
<i>Tableau 7 – Typologie des destinations possible dans la simulation.....</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 8 - Valeurs possibles du paramètre D2.....</i>	<i>104</i>
<i>Tableau 9 - Liste des paramètres et de leurs valeurs.....</i>	<i>121</i>
<i>Tableau 10 - Croisement des paramètres.....</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 11 - Valeurs possibles du paramètres B1.....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 12 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de B1.....</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 13 - Valeurs possibles du paramètre B2.....</i>	<i>132</i>
<i>Tableau 14 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de B2.....</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 15 - Paramétrage de B3.....</i>	<i>141</i>
<i>Tableau 16 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de B3.....</i>	<i>142</i>
<i>Tableau 17 - Paramétrage de D1.....</i>	<i>149</i>
<i>Tableau 18 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de D1.....</i>	<i>149</i>
<i>Tableau 19 – Valeurs possibles de D2.....</i>	<i>159</i>
<i>Tableau 20 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de D2.....</i>	<i>161</i>
<i>Tableau 21 - Paramétrage de V2.....</i>	<i>167</i>
<i>Tableau 22 - Moyenne et 1^{er} quartiles (Standard Deviation) pour l'ensemble des simulations de V2.....</i>	<i>167</i>
<i>Tableau 23 - Valeurs négatives et positives pour B2 et B3.....</i>	<i>179</i>
<i>Tableau 24 - Protocole de croisement de B2 et B3.....</i>	<i>179</i>
<i>Tableau 25 - Valeurs négatives et positives pour D1, B2 et B3).....</i>	<i>185</i>
<i>Tableau 26 - Protocole de croisement des paramètres D1, B2 et B3.....</i>	<i>185</i>
<i>Tableau 27 - Valeurs négatives et positives de D1 et D2.....</i>	<i>191</i>
<i>Tableau 28 - Croisements de D1 et D2.....</i>	<i>191</i>
<i>Tableau 29 – Répartition des classes socio-professionnelles selon la nomenclature de l'INSEE (niveau 1) pour la zone d'emploi Alès-Le Vigan.....</i>	<i>201</i>
<i>Tableau 30 – Scénarios présentés dans le manuscrit.....</i>	<i>214</i>
<i>Tableau 31 – Dénomination des scénarios dans le texte.....</i>	<i>215</i>
<i>Tableau 32 - Initialisation des paramètres de la simulation S1B.....</i>	<i>218</i>
<i>Tableau 33 - Initialisation des paramètres de la simulation S1P.....</i>	<i>221</i>
<i>Tableau 34 - Initialisation des simulations S1C.....</i>	<i>224</i>
<i>Tableau 35 - Initialisation des paramètres S2B.....</i>	<i>227</i>
<i>Tableau 36 - Initialisation des paramètres S2C.....</i>	<i>230</i>
<i>Tableau 37 – Initialisation des paramètres S2P.....</i>	<i>233</i>
<i>Tableau 38 - Initialisation des paramètres S3B.....</i>	<i>236</i>
<i>Tableau 39 – Initialisation des paramètres S3C.....</i>	<i>239</i>
<i>Tableau 40 - Initialisation des paramètres S2P.....</i>	<i>242</i>

REMERCIEMENTS

Je remercie Sophie SAUVAGNARGUES de m'avoir proposé ce sujet de thèse et d'avoir participé à son encadrement.

Je remercie également Florian TENA-CHOLLET d'avoir largement contribué à ce projet de thèse. Merci pour tes qualités pédagogiques, ton souci du détail ainsi que pour le respect et la considération que tu as témoigné à mon égard. Tu as su faire rentrer la méthode scientifique dans un cerveau parfois engourdi, à force de patience et de diagrammes « avec des boîtes ». J'ai toujours le PowerPoint que tu m'avais fait en première année et le garderait probablement toute ma carrière ; c'est mon PowerPoint de chevet.

Mes remerciements s'étendent également à tous les membres du jury : Messieurs Chihab HANACHI, Emmanuel GARBOLINO, Thierry VERDEL, Pierre-Alain AYRAL. La soutenance a été une expérience enrichissante, marquée par des échanges scientifiques denses et inspirants. Je vous suis reconnaissant pour l'attention portée à mon manuscrit, notamment dans les rapports, cela a grandement valorisé mon travail.

Également merci à Laurent APRIN, et Aurélia BONY-DANDRIEUX, qui ont accepté de compléter le jury. Merci à Aurélia pour le lourd travail de relecture fourni. Merci à Laurent pour les encouragements informels réguliers dans des moments parfois difficiles en fin de thèse.

Je remercie l'ensemble des membres du Laboratoire des Sciences des Risques (et assimilés). Frédéric, Mathilde, Philippe, Clément, Christian, Farès, Jérôme, Mélanie, Constance, Noémie, Salma, Pierre, Veronica, Roland, Florian D., Jihane, Abdelhak et Domi.

Je remercie également le personnel de la direction de la recherche, avec qui nous avons partagé non seulement un bâtiment, mais également de très bon moments. Je pense particulièrement à Cécilia, Anne-Catherine et Kattialyn (vous êtes les meilleures), j'espère que l'on se reverra bientôt. Je pense également à Edwis, Sylvie et Aurélia G.

Je remercie les doctorants avec qui j'ai pu partager cette épreuve, Alexandre, Antoine, Billy, Hamza, Youssef, Antonin, Çağrı, Olfa et tous les autres.

Je remercie mes plus proches amis, Karl, Julien, Yoann et Jeremy et Mourad d'avoir été présents pour moi quand il le fallait.

Je remercie ma mère, mon frère, mes grands-parents et ma compagne pour l'amour et le soutien témoigné durant cette longue période. Je vous aime de tout mon cœur.

INTRODUCTION GENERALE

Septembre 2002

En septembre 2002, Alès, une des principales communes du département du Gard, a vu s'abattre des précipitations extraordinaires, dépassant par moments les 600 mm en moins de 48 heures. Ces précipitations ont engendré une montée des eaux spectaculaire de plusieurs cours d'eau, notamment du Gardon. Cette quantité de pluie était en fait l'équivalent de près de six mois de précipitations habituelles, concentrée en un laps de temps extrêmement court.

La ville d'Alès s'est rapidement trouvée submergée. Dans certains quartiers, les eaux ont atteint des niveaux vertigineux, engloutissant le rez-de-chaussée de nombreuses habitations. Les dégâts matériels ont été astronomiques. Plus de 15 000 habitations ont été touchées, certaines complètement détruites. Des centaines de kilomètres de routes ont été rendues impraticables, avec plusieurs ponts emportés par la force des eaux, scindant la région en plusieurs zones isolées. Les infrastructures essentielles, comme le réseau électrique, ont également été gravement impactées, laissant des milliers de foyers dans le noir et sans moyen de communication pendant plusieurs jours.

Au-delà du bilan matériel déjà conséquent, c'est également le bilan humain qui a particulièrement marqué les esprits. Au moins 24 personnes ont tragiquement perdu la vie dans le département à cause des inondations, et des centaines ont été blessées. De nombreux résidents ont été pris au piège dans leurs propres maisons, certains cherchant refuge sur les toits en attendant les secours. Les services d'urgence, bien que mobilisés en force, ont été dépassés par la rapidité et l'intensité de la crue, rendant les opérations de sauvetage particulièrement complexes.

Cet événement a catalysé un examen approfondi des mesures de prévention des risques d'inondation dans la région. Il a mis en évidence la nécessité impérieuse d'investir dans des systèmes d'alerte précoce, de renforcer les infrastructures et surtout d'élaborer des plans d'évacuation clairs et efficaces. Cette gestion des risques incluant un déplacement potentiel des populations répond à la limitation évidente des structures de mitigation des aléas, notamment hydrologiques. Face à des événements d'une telle violence, informer la population et évacuer les zones à risque devient un enjeu majeur pour la sauvegarde des vies.

Gestion des risques et contexte urbain

Le risque dans son acceptation transversale est caractérisé par une équation, une abstraction conceptuelle d'une interaction possible entre deux objets, étant eux bien réels, l'aléa et l'enjeu. Cette interaction est caractérisée par une probabilité (Gendreau, 2002), et l'issue de cette interaction est un potentiel dommage pour l'enjeu (Quarantelli, 2005). Les enjeux possèdent des caractéristiques augmentant ou réduisant leur vulnérabilité (Veyret and Reghezza, 2005). L'aléa est considéré comme

un facteur aléatoire (Kermisch, 2012), toutefois caractérisé par une intensité et une période de retour ou fréquence d'occurrence.

Les enjeux sont caractérisés par une vulnérabilité plus ou moins grande aux aléas. La vulnérabilité d'un enjeu à un aléa dépend à la fois des caractéristiques intrinsèques de l'enjeu lui-même, mais également de son exposition à l'aléa (D'ercole, 2003). Plus encore, la relation aléa/enjeu est unique pour chaque aléa et chaque enjeu. En effet, chaque enjeu possède des caractéristiques différentes qui donnent un niveau de vulnérabilité unique (Metzger *et al.*, 2015), chaque aléa est susceptible de frapper les enjeux d'une manière également différente. Le matériau de construction d'un bâtiment peut par exemple contribuer à la diminution de sa vulnérabilité en cas d'inondation, mais l'augmenter en cas d'incendie. La jointure de l'impact potentiel de ces deux aléas (et de l'ensemble des aléas pouvant concerner le bâtiment) permet d'obtenir un indice de risque pouvant être généralisé sur la base de règles. La réduction d'un risque démarre par la compréhension qualitative et la mesure quantitative de celui-ci (Kermisch, 2012). Une fois le risque identifié, des actions peuvent être mises en place.

Il existe deux familles d'outils de réduction des risques. Les premiers correspondent à des actions structurelles (Dauphiné, 2001) qui regroupent l'ensemble des actions entreprises et des méthodes souvent issues du génie civil, orientées majoritairement vers la réduction de l'impact matériel de l'aléa sur les enjeux, par réduction de son intensité, ou de son emprise spatiale (Meschinet de Richemond and Reghezza, 2010). Ces méthodes structurelles, ou « dures » peuvent dans certains cas laisser place à des méthodes dites fonctionnelles (Betamio De Almeida, 2000), ou « souples ». Les méthodes fonctionnelles sont issues du constat des limites des méthodes structurelles.

L'évolution des mesures de gestion des risques vers des approches moins structurelles est nécessaire. Elle est liée à l'évolution du concept de risque, depuis un simple danger d'endommagement matériel vers la prise en compte du fonctionnement territorial dans son ensemble, incluant ses enjeux humains.

Certains risques ne peuvent pas être réduits par une mitigation de l'aléa en lui-même. C'est par exemple le cas de phénomènes intenses ou étendus : peuvent être par exemple cités en guise d'illustrations les éruptions volcaniques, les cyclones ou les tsunamis. Pour d'autres risques, la période de retour servant à calibrer les dispositifs structurels de protection peut être insuffisante : les dispositifs de gestion de crise peuvent alors se trouver inadaptés. Pire encore, à certaines occasions, l'existence de dispositifs structurels de protection insuffisamment protecteurs contribue à vulnérabiliser la population supposément protégée (Colbeau-Justin and Weiss, 2004). C'est par exemple le cas des digues de protection pour lesquelles des travaux menés dans le domaine de la psychologie sociale suggèrent que l'endigement d'un fleuve contribuerait à une diminution de la conscience du risque parmi les populations résidant autour de ce dernier (Weiss, Girandola and Colbeau-Justin, 2011). Les dispositifs structurels de gestion des risques montrent donc un certain nombre de limites.

La démocratisation des pratiques de gestion du risque fonctionnelles est allée de pair avec la volonté des villes et collectivités de s'inscrire dans leur environnement de

façon plus durable. Les politiques de gestion des risques se sont articulées autour de nouveaux concepts, qui renvoient à de la flexibilité et de l'adaptation (Toubin *et al.*, 2012), face à des concepts plus anciens valorisant la solidité et la résistance. La conceptualisation de la résilience dans les sciences mécaniques puis la percolation du concept vers les sciences humaines et sociales a permis d'apporter un regard neuf sur les pratiques de gestion des risques (Dauphiné and Provitolo, 2007).

La résilience possède de nombreuses définitions, originaire de la physique, elle définit à l'origine la capacité d'un matériau à retrouver sa forme initiale après avoir subi une déformation causée par un effort (Razafimanitsony *et al.*, 2021). Pour (Campanella, 2006) elle est considérée comme la capacité d'une ville à rebondir après une catastrophe causant des destructions. Cette définition reste encore partielle, la notion de rebond n'est pas explicitée ; la notion de destruction fait référence à un endommagement matériel. Par ce qu'il appelle « la capacité à assurer des fonctions urbaines » (commerce, industrie, vie sociale et gouvernance) (Hamilton, 2009) explicite le « rebond », il est alors question de retour à la normale dans la capacité d'une ville à assurer les fonctions précédemment détaillées. La ville est donc conçue non plus comme un simple objet physique (agrégation d'objets urbains), mais comme une entité capable d'assurer des fonctions et de fournir des services. Dans (Coaffee, 2013), ce n'est plus la ville ou le territoire qui doit « rebondir », mais le système, après une catastrophe génératrice de disruptions. La ville dispensaire de fonctions et services peut être considérée comme un système. La génération de disruption est une caractéristique d'une crise. La gestion des risques actuelle tend donc à introduire des démarches d'adaptation aux aléas, plutôt que de résistance (Rode, 2012).

Dans ce contexte, l'approche dite fonctionnelle de la gestion des risques est valorisée. Il s'agit d'adapter le fonctionnement du territoire au(x) risque(s). Les territoires sont pensés pour fonctionner avec ce dernier. Le citoyen est au cœur de la réflexion (Garbolino and Voiron-Canicio, 2020).

L'évacuation comme outil de gestion des risques et des crises

Concept central du processus d'évacuation, la notion de crise renvoie à une temporalité spécifique de la gestion du risque, au moment de la matérialisation de celui-ci, de son événement initiateur ou déclencheur. Cette confluence entre le concept de crise, et la systémique, permet aujourd'hui d'évoquer la crise sous sa composante territoriale, le territoire étant considéré comme un système à part entière.

La crise appliquée sur un territoire peut se définir en plusieurs phases, réparties autour d'un événement déclencheur. La phase d'équilibre ou phase de « routine » (Dautun, 2007) est une phase de veille des principaux acteurs de la gestion des risques, de prévention et de planification (Dautun *et al.*, 2006). Cette phase de fonctionnement normal, ou standard, d'un territoire est caractérisée par une trajectoire linéaire prévisible : considérant le territoire comme un système, celui-ci est stable. C'est uniquement lorsque cette trajectoire linéaire subit une perturbation qu'un changement

de paradigme s'opère (Figure 1). La phase de pré-crise est une phase de transition, le territoire fonctionne encore normalement, mais les prémices d'une crise peuvent être perceptibles (Dautun *et al.*, 2006); on parle alors de signaux faibles, événements non-intelligibles qui disruptent la compréhension que l'on a d'un phénomène et souligne un dysfonctionnement probable du système (Escande *et al.*, 2014).

Dans ce contexte, des faiblesses dans la politique de gestion des risques, ou une intensité d'aléa supérieur aux données utilisées en références ou aux capacités de gestion par les organisations décisionnaires, sont les terrains propices au basculement vers une situation de crise. A ce moment, deux issues sont possibles :

- Les dispositifs de gestion du risque initialement prévus sont suffisamment efficaces, et l'événement peut se résumer à une situation d'urgence qu'il convient de gérer avec les moyens prévus à cet effet.
- Les dispositifs de gestion du risque initialement prévus ne sont pas suffisamment nombreux ou efficaces, et l'événement se transforme alors en crise, qu'il faut gérer malgré les conditions dès lors dégradées.

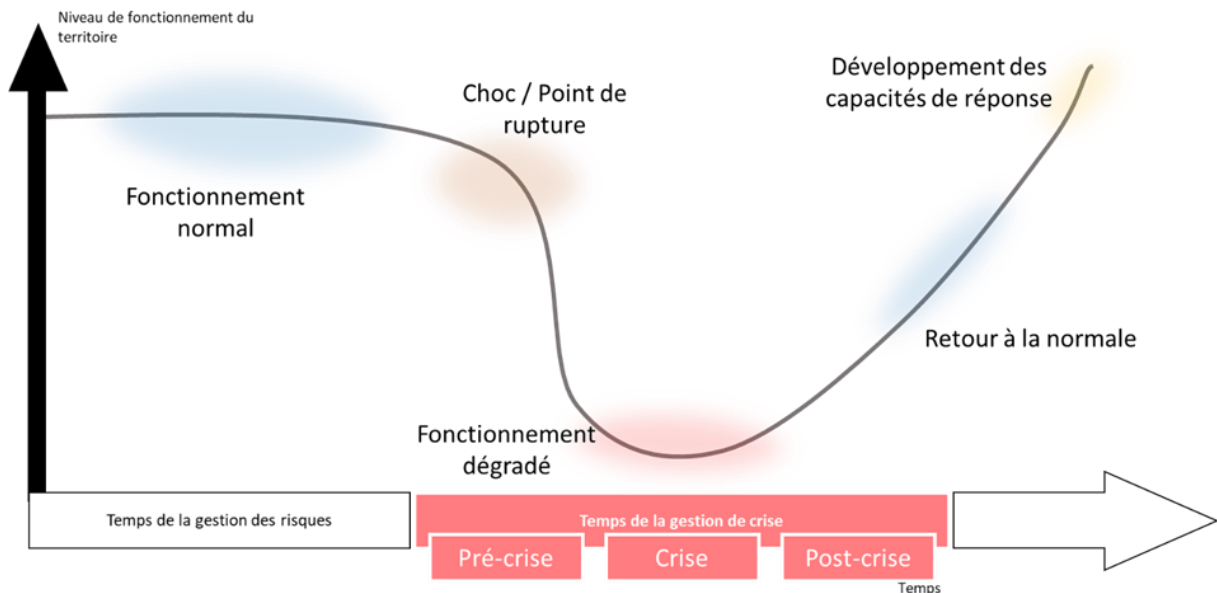


Figure 1 – Temporalité de la crise - Adapté depuis (Beraud, 2013).

L'évacuation appartient à la famille des outils et méthodes de gestion de crise. L'évacuation de population se trouve du côté de l'action sur l'enjeu. Il est question ici d'un travail autour de l'opportunité et de la capacité des personnes à se mettre à l'abri le plus rapidement possible (CEPRI, 2014), mais également autour de la capacité des autorités à accompagner cette mise en sécurité et cette protection (Daudé, Grancher and Lavigne, 2021).

La question des mobilités en situation d'urgence

Les évacuations de population soulèvent des questions quant à leur organisation. L'autonomie des populations dans leur propre mise en sécurité rend hasardeux le résultat de la mise en place de telles opérations. Des exercices peuvent être réalisés, mais ils sont généralement centrés sur la gestion de l'opération par la cellule de crise. Il est considéré qu'une gestion performante d'une évacuation de population améliore significativement son déroulé. Toutefois, une gestion efficace d'une évacuation de population par les autorités ne se substitue jamais à une application des consignes d'évacuation par les personnes.

En particulier, la question des évacuations de population à des échelles territoriales resserrées (par exemple lors d'aléas dangereux localisés) est complexe. Tout d'abord, la rapidité attendue du processus d'évacuation peut orienter sur un type de mobilité (piétonne, véhiculée par des moyens privés ou publics, hélicoptée...). Puis, le réseau utilisé pour des déplacements à courtes distances peut provoquer des problèmes d'(in)adéquation (goulots d'étranglement, saturation, interactions entre différents types de modalités...).

En particulier, un des types d'évacuation de population, l'évacuation piétonne, est particulièrement complexe. Aux difficultés précédentes, s'ajoutent plusieurs facteurs difficiles à caractériser : des effets de foule aux conséquences de l'aléa sur les potentialités de déplacement, en passant par les usages du territoire pouvant dépasser le seul usage des routes. Lorsqu'on est à pied, un vaste ensemble des possibles semble se présenter comme autant d'opportunités pour rejoindre une destination jugée accessible. Mais qu'en est-il de la performance globale d'une évacuation préventive dans ce contexte ?

Ainsi, il existe un verrou important que les exercices à eux seuls ne peuvent permettre de lever, celui de l'incertitude. Ces incertitudes sont du fait de la nature crisogène de certains risques. Elles peuvent avoir trait aux comportements des individus acteurs de l'évacuation, que cela soit les personnes ou la cellule de crise, mais également au contexte même de la crise. L'une des voies investiguées pour étudier un phénomène difficilement observable dans la réalité est la simulation.

La problématique qui émerge de ces constats est alors la suivante :

Comment construire un modèle de simulation des mobilités piétonnes en situation de crise dans le contexte d'une évacuation préventive de population sur un territoire urbain ?

Cette thèse se propose, dans une démarche de complémentarité avec les exercices, de construire un modèle de simulation des mobilités lors d'une évacuation de population. L'objectif est de proposer un modèle de simulation permettant de tester plusieurs

scénarios et d'explorer le champ des possibles, afin de faire émerger des tendances, dans la matérialisation spatiale des mobilités en contexte d'évacuation préventive. Le modèle de simulation doit permettre de fournir de l'information sur la mobilité des personnes lors d'une évacuation de population afin d'émettre des recommandations opérationnelles auprès des autorités.

Le premier chapitre aborde dans un premier temps les enjeux autour des évacuations de population dans l'objectif de caractériser les différents facteurs d'incertitude qu'il est possible de recenser lors de la mise en place de telles opérations. Dans un second temps, un état de l'art est réalisé sur la thématique de la modélisation et de la simulation de mobilités en contexte d'évacuation. L'objectif est de mettre en évidence les différentes approches et méthodes en lien avec notre thématique, de les comparer et de sélectionner celle(s) qui correspond(ent) aux incertitudes identifiées.

Le second chapitre présente d'une part la méthode de modélisation choisie, et décrit d'autre part l'instanciation du modèle en architecture informatique. En particulier, neuf paramètres-clefs sont explicités afin de constituer un socle pour l'outil de simulation.

Le troisième chapitre propose de tester la simulation retenue afin de caractériser son comportement. Chaque paramètre de la simulation est testé indépendamment, puis les paramètres sont croisés afin de mettre en évidence des synergies entre eux. L'objectif est ici d'explicitier le comportement du modèle de simulation et de chacun de ces paramètres avant de l'appliquer sur des scénarios possédant un niveau de complexité supérieur.

Le quatrième chapitre applique enfin la simulation sur plusieurs configurations territoriales. Le choix a été fait d'appliquer la simulation sur un même territoire en faisant varier plusieurs éléments de contexte, et ainsi reconstituer des scénarios complexes, représentatifs d'une diversité de temporalité, d'usage du territoire par les populations. L'objectif est multiple. Il s'agit de tester la réponse du territoire étudié (Alès, Gard) dans le cadre d'une évacuation préventive en cas de rupture de barrage. L'opportunité est aussi saisie de tester des configurations initiales de simulation en cohérence avec le plan de gestion de crise concerné par l'aléa (Plan Particulier d'Intervention) puis en introduisant des variations visant à simuler une mise en œuvre dégradée des procédures, permettant ainsi de s'affranchir du caractère idéal des situations pouvant être simulées sinon.

La démarche vise *in fine* à tester la réponse de notre modèle dans des configurations caractéristiques, à des fins d'évaluation de celui-ci d'une part, et au travers de scénarios complexes et donc plus proches d'une réalité d'autre part.

CHAPITRE 1

ENJEUX DE LA SIMULATION DES EVACUATIONS PREVENTIVES DE LA POPULATION DANS LES RISQUES MAJEURS

I.1 Évacuations de population : difficultés et facteurs d'incertitude 18

I.1.1 Le rôle de l'organisation dans une évacuation de population. ... 18

I.1.1.1	La gestion de crise à grande échelle : le rôle du dispositif ORSEC.....	18
I.1.1.2	L'évacuation une mesure de gestion de crise.....	20
I.1.1.3	Les acteurs d'une évacuation de la population.....	21
I.1.1.4	Synthèse.....	23

I.1.2 Les mobilités, éléments de compréhension et positionnement du concept 24

I.1.2.1	La réalité physique des mobilités, le déplacement.....	25
I.1.2.2	Les déplacements en milieu urbain, mobilités.....	26
I.1.2.3	La mobilité au-delà de sa réalité physique.....	27
I.1.2.4	Synthèse.....	28

I.1.3 L'individu pendant l'évacuation 29

I.1.3.1	L'individu face à l'organisation, l'application des consignes d'évacuation.....	29
I.1.3.2	Des mobilités en situation de crise.....	32
I.1.3.3	La formation de foules.....	33
I.1.3.4	Synthèse : l'incertitude autour des civils pendant les évacuations.....	37

I.1.4 Synthèse : l'évacuation, un processus hautement incertain 38

I.2 Complexité des simulations d'évacuations 39

I.2.1 Les modèles d'évacuation 39

I.2.1.1	Les évacuations de population comme système complexe.....	40
I.2.1.2	Du modèle à la simulation.....	41
I.2.1.3	Les modèles d'évacuation existant.....	42

I.2.2 Échelle de la simulation..... 42

I.2.2.1	Les approches macroscopiques.....	43
I.2.2.2	Les approches microscopiques.....	44
I.2.2.3	Synthèse : vers une approche mixte ?.....	45

I.2.3 Simuler le déplacement 46

I.2.3.1	Utilisation d'une grille (ou grid).....	46
I.2.3.2	Les graphes et algorithmes d'optimisation.....	47
I.2.3.3	La prise en compte des interactions.....	49

I.2.4 Intelligence artificielle distribuée : possibilités et limites. 50

I.2.4.1	Les systèmes multi-agents.....	50
I.2.4.2	Simulation des comportements individuels.....	51
I.2.4.3	Synthèse : intégration des comportements individuels.....	53

I.2.5 Synthèse..... 54

I ENJEUX DE LA SIMULATION DES EVACUATIONS PREVENTIVES DE LA POPULATION DANS LES RISQUES MAJEURS

I.1 Évacuations de population : difficultés et facteurs d'incertitude

Les évacuations de population font partie du spectre de la gestion de crise. En France, certains ouvrages (dont les plus grands ouvrages de retenues d'eau par exemple) bénéficient d'outils d'anticipation, notamment le dispositif d'Organisation de la Réponse de Sécurité Civile dit ORSEC. L'évacuation de population nécessite la mise en place d'une cellule de crise afin de conduire l'événement. Ce chapitre a pour objectif de dépeindre la répartition des compétences entre les différents acteurs d'une opération d'évacuation de population et de comprendre quelles relations ils entretiennent. La question qui se pose à ce stade est celle de la complexité d'une opération d'évacuation de population : il convient de la mettre en évidence et de la caractériser.

I.1.1 Le rôle de l'organisation dans une évacuation de population.

Lorsque le risque se matérialise, et qu'une réponse doit être apportée, les acteurs en charge de la gestion de crise se rassemblent pour former une cellule de gestion de crise, ou Poste de Commandement de crise (PCC). Dans l'application, selon l'échelle de gouvernance, les moyens de l'institution concernée, le type de crise à gérer, des cellules de crise aux prérogatives différentes peuvent se mettre en place. Dans ce travail de thèse, la cellule de crise est définie comme une organisation (en charge de la gestion de la crise, donc). C'est cette organisation qui, au travers de ses prises de décisions, met en place l'évacuation de population. Cet aspect interroge sur la matérialisation des décisions prises par l'organisation sur l'opération d'évacuation. Pour mettre en évidence l'impact du comportement de l'organisation en charge de la gestion de crise sur une opération d'évacuation, il convient dans un premier temps de rappeler le fonctionnement d'une cellule de crise. Cela implique ensuite d'explicitier les spécificités d'une cellule de crise dans le cas de la mise en place d'une évacuation. Enfin, l'objet de ce chapitre est de synthétiser les éléments à retenir en vue de proposer un modèle.

1.1.1 La gestion de crise à grande échelle : le rôle du dispositif ORSEC

En France, aux échelles départementales et régionales, l'architecture de la gestion de crise est construite autour du dispositif ORSEC. Le dispositif ORSEC est, à l'origine, une planification couvrant la gestion de crise dépassant l'échelle départementale.

Aujourd'hui, le dispositif ORSEC a évolué vers un fonctionnement organique et moins figé, notamment au travers de la réalisation de retours d'expériences. Le dispositif ORSEC actuel valorise donc une certaine souplesse par rapport aux approches précédentes. Le dispositif se veut progressif (adapté à l'évolution d'un événement) et adaptable.

Le dispositif ORSEC se décline en deux catégories de dispositions : les dispositions générales et les dispositions spécifiques.

D'après le dispositif ORSEC, les dispositions générales définissent le fonctionnement de base de l'organisation, avec l'objectif de pouvoir s'adapter à un maximum de situations différentes. Les dispositions spécifiques sont donc un complément aux dispositions générales : elles permettent de s'adapter à des situations particulières préalablement identifiées. Les dispositions spécifiques donnent lieu par exemple à la réalisation des Plans Particuliers d'Intervention (PPI) qui ont pour rôle l'anticipation de l'organisation des secours (Nahon and Michaloux, 2016). Ce type d'outils de planification joue un rôle de support lors de la survenue d'une crise dont le déclenchement et la conduite peuvent être menées par le préfet de département.

Le dispositif ORSEC permet d'organiser une réponse de sécurité civile en accord avec l'échelle de l'événement considéré. Pour un événement frappant une commune, les moyens de réponse seront donc ceux de la commune en question. Cependant, dès que l'événement gagne en intensité et menace un territoire plus grand, le dispositif permet d'impliquer l'échelon supérieur. La Figure 2 présente les différentes échelles considérées dans le dispositif ORSEC, de la commune jusqu'à l'Europe. Ainsi, un événement concernant plusieurs communes entraînerait l'implication du département dans la gestion de la crise. Cet aspect de coordination est primordial lors de la survenue d'une crise pour deux raisons : les communes peuvent être de taille réduite et la probabilité qu'une crise concerne plusieurs entités territoriales s'avère plus élevée que dans d'autres pays Européens (Ahuir, 2016).

Selon les précisions apportées par le dispositif ORSEC, une évacuation préventive de population telle qu'étudiée dans ce travail de thèse aurait vraisemblablement une portée départementale. Compte tenu de l'importance du risque considéré, il convient néanmoins de ne pas exclure la potentielle implication de dispositifs à l'échelle de la zone de défense. Cela veut dire que le préfet de département prendrait la tête de la gestion de la crise, en articulation avec les moyens des communes concernées. Le dispositif ORSEC et la planification proposée par exemple par les PPI doivent ensuite être appliqués sur le terrain, en situation réelle. Le dispositif ORSEC oblige les communes concernées par un PPI à mettre en place un PCS, dans un but d'articulation des moyens et des pratiques entre les différentes échelles administratives. La centralisation des moyens de gestion de crise à l'échelle du département permet à ce travail de thèse d'aborder le territoire d'étude comme un ensemble. La Figure 2 présente les différents dispositifs de gestion de crise en fonction des échelles concernées.

<u>Dispositif</u>	Echelle
ERCC	Européenne
COGIC / CIC	Nationale
ORSEC de zone	Zonale
ORSEC département	Départementale
Plan Communal de Sauvegarde	Communale

Figure 2 – « Mille-feuille » de la sécurité civile

1.1.2 L'évacuation une mesure de gestion de crise

Les évacuations de populations sont mises en place en réponse à différents risques, sur des territoires et des temporalités variables. Cela entraîne inévitablement une multiplicité de formes d'évacuations. Il est cependant possible de les classer : le premier dépend du niveau d'anticipation tandis que le second dépend de l'ampleur de l'évacuation.

L'évacuation préventive s'oppose à l'évacuation d'urgence (Zhang, Coates and Ni, 2017), notamment parce qu'elle est planifiée. L'évacuation d'urgence, parfois appelée curative (Ruin and Lutoff, 2004) diffère de l'évacuation préventive par le niveau de risque au moment de son déclenchement. L'évacuation curative est une réponse directe à un risque déjà matérialisé. L'évacuation préventive est quant à elle déclenchée lorsque la matérialisation du risque est considérée comme inévitable.

Considérées comme des mesures de « derniers recours » dans plusieurs PCS (Alès, Rouen...), de nombreux événements passés montrent la réticence des autorités à déclencher de tels 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. Malgré un apport non négligeable en termes d'anticipation de préparation amené par le dispositif ORSEC, on saisit ici le niveau de responsabilisation qui imprègne la direction des opérations de secours (DOS) au moment de la déclencher.

Le processus peut parfois être initié à tort, comme ce fut le cas à Nantes en 1987, lorsque les conséquences de l'incendie d'une usine de produits chimiques furent surévaluées. Généralement pensées dans un contexte de crise, les évacuations revêtent dans les esprits un caractère exceptionnel, c'est-à-dire qu'elles ne constituent pas une réponse éprouvée, et ce, peu importe l'accident ou le danger encouru.

Les évacuations génèrent, en conséquence, de l'incertitude. L'incertitude majeure réside dans le comportement des populations évacuées, car elles forcent à une certaine autonomie dans l'application des consignes par les populations (Fujiki, 2018). Cependant, ce n'est pas la seule source d'incertitude. Afin de pouvoir comprendre la nature et les sources de ces incertitudes, il faut s'intéresser aux acteurs d'une

évacuation de population. Ces acteurs seront considérés, dans cette thèse, au sein du cadre de la gestion de crise française (leurs natures et leurs attributions peuvent différer d'un état à un autre).

1.1.3 Les acteurs d'une évacuation de la population

L'évacuation de population considérée dans le cadre de cette thèse est préventive. Une telle opération d'évacuation implique trois types d'acteurs :

- **Des acteurs institutionnels** : il est question ici des personnes, administrations ou services ayant en charge l'anticipation et la planification de l'opération en amont de son déclenchement ;
- **Des acteurs organisationnels** : il s'agit des personnes qui déclenchent et conduisent l'opération d'évacuation, en prenant des décisions stratégiques ;
- **Des acteurs civils** (que l'on nommera « la population ») : ce sont les individus qui opèrent l'évacuation, les acteurs appliquant les décisions prises en amont.

La partie institutionnelle d'une évacuation inclut donc l'ensemble des plans de prévention et de mesures décidés en amont d'un événement qui appuient les acteurs organisationnels dans le processus de conduite de l'opération. Pour bien comprendre le rôle de l'institution dans l'évacuation, il faut d'abord différencier l'institution de l'organisation, à laquelle elle est apparentée.

Le concept d'institution renvoie à un cadre juridique et politique (Laval, 2016). Dans ce cadre, l'institution est un ensemble de normes et de règles formalisées (de Pina-Cabral, 2011). Dans les sciences humaines, et plus particulièrement les sciences telles que l'anthropologie ou la sociologie, les définitions de l'institution sont construites autour des notions de pouvoir et de stabilité. Ainsi selon (de Pina-Cabral, 2011) les institutions émergent d'un collectif comme une force de rationalisation et purification du pouvoir. Elles ont un caractère stable et durable, à la différence des organisations (Pesqueux, 2020), qui peuvent exister dans un court laps de temps, afin de servir un but particulier. Autrement dit, les institutions statuent. Cet aspect trouve écho dans les opérations d'évacuation de population. Bien souvent, des plans ont été conçus et arrêtés. Ces plans font office de norme.

Il existe donc bien une différence entre l'institution et l'organisation. Différence de nature et de rôle également perceptible lors d'une opération d'évacuation de population (Truptil, 2011). Dans le cadre de ce travail, l'institution est définie comme ayant un pouvoir décisionnel sur l'opération d'évacuation de population. Cependant, à la différence de l'organisation, ce pouvoir décisionnel ne s'exerce pas pendant l'opération, mais avant. Cette différence de temporalité entraîne une différence d'intégration de ces deux acteurs dans le modèle et la simulation. Dans le cadre de ce travail de thèse, l'institution est matérialisée par les dispositifs de planification et elle est pensée afin d'identifier une évacuation préventive.

A l'échelle d'un département, les dispositifs ORSEC et les PPI sont les plus communs. A des échelles plus réduites il est possible de trouver des ébauches de planification

dans des PCS et des PPMS¹ existent aussi à l'échelle de certaines infrastructures. En effet, pour chaque type d'installations, il existe un seuil réglementaire au-delà duquel la constitution d'un PPI est obligatoire². Les PPI ont donc pour rôle d'organiser la réponse de sécurité civile sur le territoire concerné par un potentiel événement. Le territoire concerné par le PPI est défini comme la zone d'impact selon le scénario le plus défavorable. Les acteurs des communes concernées se réunissent ensuite pour préparer l'essentiel des mesures à mettre en place, évacuations préventives comprises, lors d'un événement (en lien avec leurs PCS, donc).

L'évacuation préventive se caractérise ainsi par une possibilité de structuration organisationnelle plus importante que l'évacuation d'urgence (Leone and Freddy, 2015), étant normalement pensée en amont. Le temps à disposition afin de l'organiser est théoriquement plus important, le poids de l'organisation dans sa réussite est alors également plus important. Le dispositif ORSEC est dès lors considéré comme un ensemble d'outils d'anticipation à disposition des organisations : les futurs acteurs de la gestion de l'évacuation, la ou les cellules de crises mobilisées. Ces acteurs vont développer au cours de la gestion de l'évacuation une série de décisions devant s'inscrire dans les préconisations du dispositif ORSEC. Les membres d'une cellule de crise créée pour gérer un événement catastrophique, vont alors échanger de l'information (matériel informationnel) entre eux (Figure 3).

Considérant la décision d'organiser une évacuation préventive, le matériel informationnel va être utilisé comme matière première pour construire la décision stratégique, puis centralisé au plus haut niveau de la cellule de crise, dans l'objectif de produire un ensemble de messages à destination de la population. La Figure 3 est un schéma synthétique d'une cellule de crise adapté depuis (Truptil, 2011), et qui schématise les différentes formes que peut prendre ce matériel informationnel et le fonctionnement d'une cellule de crise (avec ces trois niveaux théoriques).

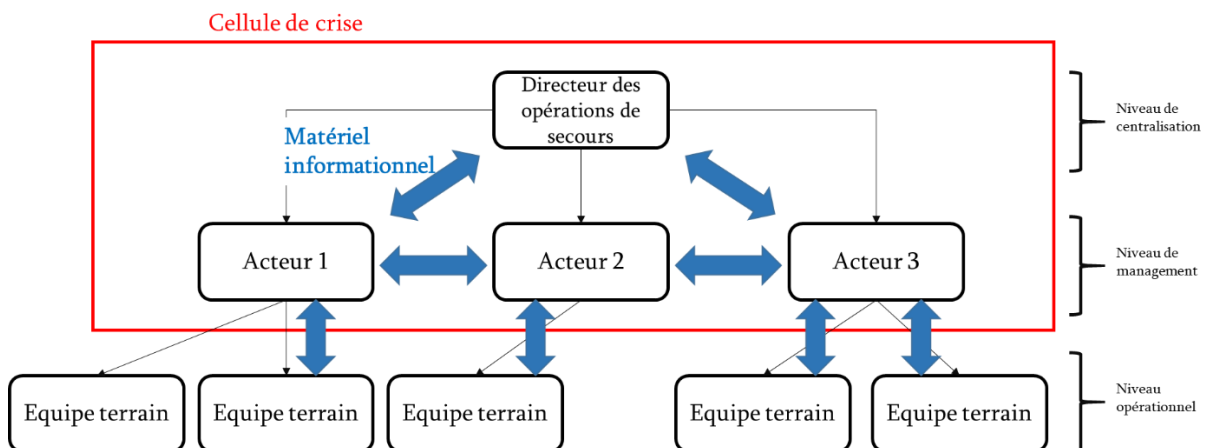


Figure 3 – Schéma synthétique d'une cellule de crise

¹ Plans Particuliers de Mise en Sureté.

² Par exemple, concernant les barrages, sont concernés les barrages de plus de 20 mètres de haut et pouvant stocker plus de 15 millions de mètres cube d'eau. Il faut cependant souligner que les préfets peuvent également prendre l'initiative d'élaboration d'un PPI dans le cas d'un ouvrage n'atteignant pas les seuils.

Un ensemble d'acteurs vont travailler ensemble, de l'information va être synthétisée puis distribuée, d'une part aux équipes terrain concernées, mais également vers la population. C'est pour cela que l'anticipation, la circulation de l'information et la prise de décisions stratégiques sont des enjeux centraux de la bonne conduite d'une évacuation préventive.

Ainsi, dans le cas où l'aléa exige une évacuation, il convient d'accompagner le message d'alerte de consignes d'évacuation. Les consignes d'évacuations doivent permettre d'indiquer clairement ce que doit faire la population concernée. Chaque personne doit ainsi avoir connaissance d'informations-clefs :

- **Suis-je dans la zone concernée par l'évacuation ?** En cas de méprise sur cet aspect, il peut être question de personnes évacuant alors qu'elles n'ont pas à le faire, ceci entraînant une surcharge du réseau viaire, surcharge préjudiciable pour la bonne conduite de l'opération d'évacuation ;
- **Où dois-je me diriger ?** Les personnes doivent avoir connaissance de points vers lesquels se rendre, d'une part parce que ces lieux ont vocation à être sécurisés, et d'autre part parce que cela permet une meilleure prévisibilité sur la gestion des flux de personnes ;
- **Quand dois-je évacuer ?** Une fois la situation et la nature de l'aléa correctement identifiés et caractérisés, il convient alors de rapidement transmettre toute consigne impérieuse d'évacuation aux populations.

1.1.4 Synthèse

Les évacuations de population font partie des outils mobilisés lors de la gestion d'une crise. Selon les prérogatives du dispositif ORSEC, il faut donc s'attendre à une évacuation préventive qui s'organiserait autour d'un outil de planification, le Plan Particulier d'Intervention. Mais il faut également retenir que cet outil de planification est à concevoir comme un support d'aide à la décision uniquement.

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'événement catastrophique sera considéré comme étant d'une ampleur susceptible de concerner l'échelle départementale (impacts potentiellement multi-communaux) mais son évolutivité ne sera pas prise en considération : l'évacuation préventive étant déclenchée en amont de cet événement, l'objectif pour les organisations gestionnaires est qu'elle soit menée à terme avant la survenue de l'aléa dangereux sur les zones menacées.

La nature de la crise présentée ici rend également complexe l'intégration de prises de décisions stratégiques pendant l'évacuation au sein du modèle. En effet, une fois l'évacuation déclenchée, la marge de manœuvre de la cellule de crise pour d'éventuels ajustements est très réduite car :

- La population est un acteur qui a sa propre autonomie concernant sa mise en sécurité ;
- La réalisation d'une évacuation est un processus qui a une inertie importante ;
- Les moyens engagés (dont équipes terrain) sont limités et peuvent être sous-dimensionnés dépendant de l'événement déclencheur.

Plusieurs facteurs apparaissent facilitateurs dans le processus d'évacuation préventive : la caractérisation précise de l'aléa, la transmission rapide d'information vers les autorités et le lancement d'une alerte aux populations menacées. A titre d'exemple, la qualité de la veille des côtes de remplissage d'un barrage et la capacité à rapidement transmettre l'information d'une rupture inévitable aux autorités est décisive, puisqu'une fois l'information reçue par les autorités, l'alerte à l'échelle de l'ensemble du territoire menacé doit être lancée. La mauvaise détection de l'aléa par l'exploitant, d'un trop grand délai dans la transmission de l'information entraînerait un délai supplémentaire dans la mise en sécurité des populations.

Une fois l'aléa détecté, il incombe ensuite aux gestionnaires de la crise de donner l'alerte le plus rapidement possible. Ce matériel informationnel peut comprendre des consignes d'évacuation mais également des informations sur l'évolution de la situation.

I.1.2 Les mobilités, éléments de compréhension et positionnement du concept

La mobilité est définie de trois manières dans le dictionnaire Larousse. La définition la plus pertinente de la mobilité est la suivante : « Propriété, caractère de ce qui est susceptible de mouvement, de ce qui peut se mouvoir ou être mû, changer de place, de fonction ». Les deux autres définitions, respectivement « Caractère de ce qui change rapidement d'aspect, de forme, etc. » et « Caractère de ce qui est instable, variable, fluctuant » viennent compléter la première.

Les mobilités en Géographie concernent majoritairement des questions de mouvement ou de changement de place, si par place il est entendu une position dans l'espace.

Dans d'autres disciplines, la mobilité peut évoquer des transitions n'étant pas spatiales. Ainsi, la mobilité sociale, en Sociologie, fait plutôt référence au changement de position d'un individu au sein d'une hiérarchie, ou d'un découpage étant un construit abstrait (classes sociales).

Ce travail de thèse ne traitera que des mobilités ayant pour support l'espace géographique. En résumé, lorsque l'on évoque la mobilité, celle-ci est forcément liée à un substrat particulier. Les substrats peuvent être divisés comme l'illustre la Figure 4 suivante, à travers la distinction entre substrat concret ou abstrait.

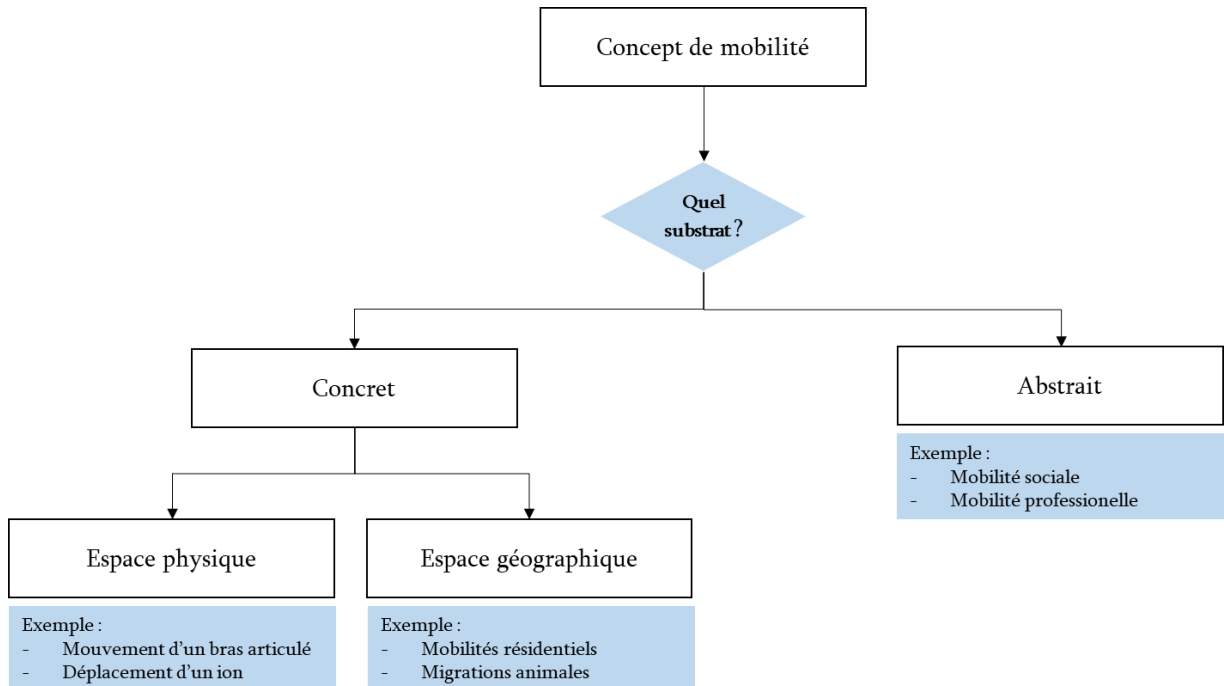


Figure 4 – Le concept de mobilité et le substrat d'application

La Figure 4 permet donc de bien identifier le substrat sur lequel vont s'inscrire les mobilités considérées dans ce travail de thèse. Il est question de mobilités dans l'espace géographique, qui s'inscrivent dans un espace de référence : ces mobilités sont mesurables, régies par un environnement physique limitant et par des choix individuels.

1.2.1 La réalité physique des mobilités, le déplacement.

Un déplacement dans l'espace fait référence à la réalisation physique d'une mobilité potentielle. Dans ce qu'il appelle « L'écologie humaine » Georges-Kinsley Zipf introduit le principe de moindre effort (Zipf, 1949). Ce grand principe décrivant le déplacement dans sa dimension physique. L'humain devient alors pleinement rationnel, il rationalise le mouvement. Dans une réflexion qui se rapproche de celle des économistes du milieu du XX^e siècle (Généreux, 2008), l'agent humain, à l'instar de l'agent économique, minimisera ses dépenses pour maximiser ses gains. La dépense est énergétique, le gain est temporel. Le principe de moindre effort s'exprime donc dans l'espace par une économie de comportement (Simo Kanmeugne, Beynier and Donnart, 2013). Elle rationalise le mouvement, dans une relation coût / bénéfice. En d'autres termes, chacun d'entre nous se trouve résumé à une démarche continue d'optimisation du rapport énergie dépensée / distance parcourue (Bertram and Ruina, 2001). L'individu peut déployer une énergie pour se mouvoir vers son but, énergie qu'il cherche à rentabiliser en minimisant son temps de parcours.

La rentabilisation de l'énergie dépensée dans le cadre du mouvement des individus renvoie alors à un ensemble de stratégies de déplacement. Par exemple, l'adoption de ce que l'on appelle une vitesse de confort (Bertram and Ruina, 2001). Dans un environnement non contraint, elle se matérialise par un consensus entre dépense

d'énergie (physique, carburant, etc.) et un temps de parcours optimal. Au sein d'un espace contraint, tel qu'un couloir ou un réseau urbain, elle se trouve limitée par la densité d'utilisateurs du réseau. Limite physique et respect de l'espace individuel de chacun (Valentin, 2013) obligent, une densité plus élevée génère alors des effets de rugosité (Helbing and Molnár, 1995).

Toute chose égale par ailleurs, dans un environnement hypothétiquement totalement homogène et sans aucune pression extérieure, l'individu tendrait donc à choisir instinctivement le chemin le plus court pour arriver à destination. C'est d'ailleurs ce que confirment les résultats expérimentaux de déplacements piétons (Moussaïd, 2009). Ces résultats ont été produits lors de protocoles expérimentaux se déroulant dans des lieux où l'espace est relativement homogène (présence d'obstacles ou de couloirs, parfois). En contexte urbain, la mise en œuvre d'un déplacement physique s'accompagne dans la grande majorité des cas³ d'une itinérance. L'itinérance consiste en un changement de lieu, un lieu est ciblé dans l'espace, le changement de lieu est opéré par le déplacement, le tout en suivant une topologie complexe.

1.2.2 Les déplacements en milieu urbain, mobilités

L'environnement est une caractéristique fondatrice de la mobilité en milieu urbain (Genre-Grandpierre and Foltête, 2003). Morphologie urbaine et formes des mobilités sont liées (Aguilera, Madre and Mignot, 2004). D'une part parce que la ville est l'espace préférentiel de réalisation des mobilités, mais également parce qu'elles sont influencées par ses caractéristiques (Araldi and Fusco, 2017).

D'un point de vue physique, l'espace des mobilités au sein d'une ville représente une ressource finie (Piombini *et al.*, 2017). La rue est la garante des déplacements, et l'accessibilité à un quelconque point dans une ville ne peut se faire sans recours au réseau viaire (Beaudet and Wolff, 2012). La contrainte environnementale est d'autant plus perceptible dans les évacuations à l'échelle de bâtiments. La compacité des environnements rend primordiale la compréhension de l'impact de cette dernière sur les dynamiques de partage de l'espace (Theos, 1994). Moins présente en milieu urbain, la contrainte de partage de l'espace reste cependant présente.

Le déplacement en milieu urbain est également contraint par la forme du réseau sur lequel il s'opère. Cela est par exemple visible lors d'évacuation impliquant l'utilisation de véhicules individuels, à travers l'effet tunnel et la problématique des « U-turn » (Czura, 2017). L'effet tunnel concerne plutôt les automobilistes, l'engagement sur une voie de circulation impliquant une contrainte de non-retour et obligeant à la parcourir complètement avant de pouvoir rejoindre une zone du réseau compatible avec un changement de sens de circulation.

Cet aspect montre une contrainte importante du déplacement en milieu urbain : la topologie du réseau viaire. D'un point de vue structurel, la rue, et par extension les formes urbaines (la manière dont les objets urbains sont disposés dans l'espace), jouent un rôle sur les déplacements des individus (Adam and Gaudou, 2016; Wang

³ Ici nous excluons les formes de marche de loisirs.

and Taylor, 2017). Le cheminement dans l'espace de la ville d'un individu n'obéit pas exclusivement à une loi coûts-bénéfices.

1.2.3 La mobilité au-delà de sa réalité physique

Le concept de mobilité se positionne comme supérieur à simplement une somme de déplacements (Dureau and Hily, 2010). Étudier une somme de déplacements revient à étudier un objet statistique défini. La mobilité étudiée comme un système renvoie à un ensemble de pratiques sociales et de perception qui, in fine, s'expriment dans l'espace par une somme de déplacements (Urry, 2005). Le concept de mobilité intègre les causes et les conséquences du déplacement physique sur les Hommes et les lieux (Urry, 2005). Cet angle d'approche complète donc la simple étude des déplacements, en y ajoutant le rapport aux lieux qu'entretiennent les populations (Figure 5).

Les mobilités considérées comme géographiques concernent uniquement les humains. Elles s'inscrivent au sein d'un territoire possédant une série de caractéristiques de forme et d'accessibilité. L'individu doit organiser son cheminement, entre son point de départ et son objectif. Pour cela, il dispose d'une connaissance plus ou moins précise du réseau routier. Une pratique régulière de la ville tend à familiariser l'habitant avec son environnement (Sénécal, 2012), et lui permet donc d'optimiser ses temps de parcours. Lorsque la mobilité d'un individu est assujettie à une contrainte de temps (déplacement domicile / travail par exemple), l'individu tend vers une diminution du temps de parcours. Les déplacements plus libérés, permettent en revanche une certaine liberté dans le choix de l'itinéraire. La mobilité de manière générale obéit à un consensus entre ces deux aspects.

Si le réseau se constitue en obstacle physique pour les individus et contient l'ensemble des mobilités, les formes urbaines agissent également sur ces dernières de façon moins évidente mais non pas moins influente. En situation normale, les déplacements sont liés à la position géographique des différents lieux d'intérêts (Beudet and Wolff, 2012). Alors, chaque nouvel aménagement devient un potentiel stimulateur des processus de mobilités (Genre-grandpierre *et al.*, 2018), et parfois un moyen de les rééquilibrer sur le territoire.

En (Figure 5a), est représentée une schématisation d'un déplacement, il s'agit d'un changement de position dans l'espace entre un point A et un point B, uniquement considéré sous l'angle de sa réalité physique. En (b) est schématisée une somme de déplacements : il s'agit uniquement d'un ensemble de plusieurs déplacements, opérés en même temps par plusieurs personnes, entre plusieurs points de départ et plusieurs points d'arrivée. Dans cette représentation, les déplacements ne sont différenciés qu'au travers de la personne qui les opère. En (c), les déplacements sont schématisés au sein d'un système plus complexe : ils s'incarnent dans un environnement qui implique des interactions de natures différentes (physiques, sociales, etc.).

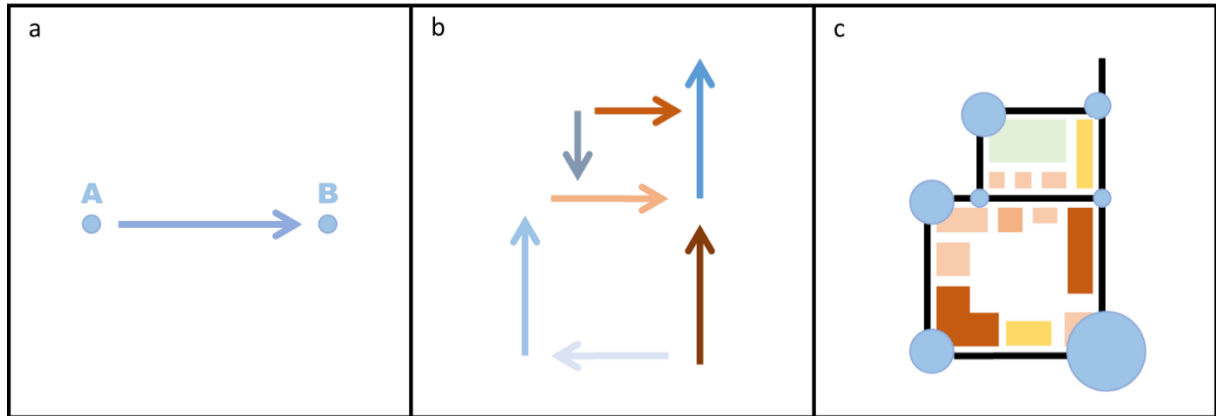


Figure 5 - Représentation schématique a) d'un déplacement b) d'une somme de déplacements c) d'un système de mobilités.

Les mobilités peuvent donc être influencées par les lieux, la représentation que les personnes s'en font, d'une façon qui peut être assimilée à de l'affordance (Fusco, 2016). C'est d'ailleurs un axe de recherche en Géographie, consistant à comprendre ce rapport entre les mobilités et les lieux, dans un rapport d'influences qui n'est pas uniquement physique. (Araldi and Fusco, 2017) ont ainsi étudié la représentation de l'espace par les personnes : parmi les facteurs explicatifs ayant été mis en évidence, il apparaît clairement que pour une même ville, deux personnes vont concevoir l'espace de manières différentes. Cet aspect peut avoir des conséquences lors d'évacuation de population, notamment sur la manière dont les personnes cheminent à travers l'espace.

1.2.4 Synthèse

La compréhension des mobilités a toujours été une question centrale de la Géographie. En situation standard ou nominale, la compréhension et la description d'un système de mobilités sur un territoire n'est rendue obsolète que par une modification profonde de l'organisation du territoire, ou un développement de nouvelles techniques de mobilités. Par la nature des déplacements qui ont lieu pendant les évacuations, le système de mobilité observable sur le territoire lors du déclenchement d'une évacuation diffère largement de ce qui est observé en situation standard. De nouvelles règles s'appliquent aux mobilités en situation de crise, et ces règles ne sont pas reproductibles d'un événement à un autre. Cette différence entre le standard et l'exceptionnel de la mobilité des personnes pendant une évacuation est un enjeu majeur de ce travail de thèse. En effet, les déplacements en milieu urbain sont plus que des simples déplacements dans un espace homogène. Ils sont contraints par la forme du réseau viaire, sa topologie mais également par la représentation que l'individu se fait de son environnement. Là où les évacuations dans des milieux clos sont surtout une somme de déplacements vers des points de sorties, l'évacuation au sein d'une ville implique des déplacements plus complexes, qui, une fois rassemblés forment un système de mobilités qu'il convient de mettre en évidence et expliciter.

Il est mis en évidence qu'un certain nombre d'aspects peuvent avoir un caractère incertain lors d'une évacuation, et doivent donc être intégrés dans une simulation

numérique. Autour de la relative maturité des connaissances sur le déplacement des personnes d'un point de vue mécanique, il reste un inconnu sur les aspects non-mécaniques :

- Les **itinéraires** : il n'est pas possible d'affirmer avec certitude que les individus vont utiliser le chemin le plus court afin d'évacuer. D'autres options peuvent sembler crédibles, comme le passage par des lieux familiers ou la recherche d'axes dégagés (en termes de visibilité). Le contexte lié à une évacuation préventive étant potentiellement anxiogène, de nombreux phénomènes perturbateurs sont susceptibles d'apparaître, tels qu'une recherche accrue de sécurité ;
- Les **lieux de destination** : si les déplacements s'effectuent toujours d'un point A vers un point B, et que les évacuations préventives de population sont planifiées et organisées de telle sorte que les personnes savent vers où se diriger, il n'est pas exclu qu'une partie de la population préfère rejoindre des lieux jugés comme plus familiers / sécurisants ;
- Les **déplacements** : le déplacement en lui-même d'une personne est relativement prévisible, comme expliqué précédemment. La multiplication de personnes sur un réseau peut entraîner des inconnus quant à la forme que vont prendre ces déplacements dans un contexte de gestion de l'urgence ou de gestion de crise.

I.1.3 L'individu pendant l'évacuation

L'évacuation de population a pour but premier la sauvegarde de l'intégrité physique de l'ensemble des individus exposés à un danger, devant donc être déplacés. En plus des incertitudes concernant l'organisation de l'opération et la forme que prendra le système de mobilité résultant, la réaction des personnes concernées par une telle opération est également incertaine. (Goutx, 2012) rappelle qu'en gestion de crise, l'individu est acteur de sa propre mise en sécurité. Il hérite d'un matériel informationnel fourni par l'organisation en charge de la gestion de crise, sous la forme de consignes d'évacuation. Il doit cependant les appliquer pour que l'opération soit un succès. L'objet de cette partie est donc de comprendre la part qui revient à cet individu dans la réussite de l'évacuation.

1.3.1 L'individu face à l'organisation, l'application des consignes d'évacuation.

En plus d'une réponse collective des organismes publics, le basculement d'un territoire vers un état de crise implique aussi une multitude de réponses individuelles (Benitez, Reghezza-Zitt and Meschinet de Richemond, 2020). Tout comme elle se matérialise par un dépassement des capacités de réponse collective du territoire, elle représente également un bouleversement pour l'individu (Lagadec, 1998). A la différence près que le niveau de connaissance et d'expertise d'un événement par un

citoyen moyen est beaucoup plus faible, en comparaison d'une entité territoriale. Cela veut donc dire que lors d'une crise l'individu pris seul, est plus vulnérable que le territoire dans son ensemble. Sa capacité de perception, et donc de réalisation autonome d'une catastrophe est également limitée (Simo Kanmeugne, Beynier and Donnart, 2013). L'individu devient donc largement dépendant de tiers ; il doit être informé et guidé à travers l'événement. Dans le meilleur des cas, lorsque la cellule de crise parvient à s'organiser, à échanger et à communiquer l'information, elle provient d'autorités compétentes, se transmet verticalement, de manière fluide et compréhensible, ce qui la rend plus facilement acceptable par les individus.

La manifestation la plus évidente de cette nécessaire communication entre l'organisation en charge de la gestion de crise et les individus lors d'évacuation s'observe lors de la transmission de l'ordre d'évacuation (Dash and Morrow, 2000). C'est un élément crucial de la réussite du processus. Deux éléments sont centraux dans la diffusion de l'ordre d'évacuation. La première est la capacité de la cellule de crise à construire et diffuser un message clair, sans ambiguïté, pouvant être compris par le plus grand nombre (Gaultier-Gaillard and Michel, 2009). Le second c'est la capacité de la population à recevoir et comprendre le message, pour l'appliquer ensuite (Leone and Vinet, 2021). Ainsi, considérant un contexte de gestion efficace d'une crise, les décisions prises étant adaptées et clairement transmises à la population, il reste encore un inconnu : l'accueil de l'ordre d'évacuation par les populations.

Plusieurs événements catastrophiques ayant occasionné un ordre d'évacuation ont mis en évidence la réticence de certains à quitter leur lieu de vie. La décision de ne pas évacuer est la première forme de sédition, l'individu doit évacuer, il choisit pourtant de ne pas le faire. Cela a par exemple été le cas lors de l'ouragan Gilbert, pourtant classé de catégorie 5 sur l'échelle de Safir-Simpson (Aguirre, 1991), cela a également été le cas lors de l'incendie de Victoria (la seconde région la plus peuplée d'Australie) en 2009 (Adam, Beck and Dugdale, 2015), ou encore l'alerte de rupture du barrage de Whaley Bridge, dans la banlieue de Manchester en 2019. Là encore, dans une synthèse chiffrée, concernant les Etats-Unis (Baker, 1991) montre une grande hétérogénéité dans la décision individuelle d'évacuer ou non. Ainsi, lors d'une évacuation préventive, le premier facteur de mise en danger des individus est représenté par la décision de ne pas évacuer.

Cette décision relève de différents mécanismes cognitifs. La grande majorité des non-évacués reste sur site afin de protéger leurs biens, parfois par logique économique (Adam, Beck and Dugdale, 2015), mais également par peur d'éventuels pillages, observés lors de certaines catastrophes, tel que Katrina en 2005 ou l'ouragan Sandy en 2012. Il peut aussi être question d'un état de sur-confiance en ses capacités, soit par méconnaissance du risque encouru, ou une trop grande confiance dans les dispositifs de défense existants (Anquetin *et al.*, 2018).

L'individu réagit également à une perturbation, avec ses propres moyens de perception, ne permettant en général pas d'avoir une vision exhaustive d'un danger : sa réaction peut ainsi ne pas être aussi adaptée que prévu (dans son délai de mise en œuvre, dans son adéquation avec d'éventuelles consignes, etc.). En d'autres termes, l'individu est, au moment de la survenue d'un événement, seul face à la crise. Il traite

continuellement l'information reçue (Adam *et al.*, 2017), qu'il interprète ensuite selon son propre système de valeurs.

Une fois la consigne d'évacuation reçue et traitée, l'individu doit se préparer à évacuer. La préparation à l'évacuation désigne le temps entre la réception de l'alerte et le début de l'évacuation d'une personne. (Lindell *et al.*, 2012) ont estimé une courbe à partir de données issues d'un questionnaire adressé aux populations frappées par l'ouragan Lili, six mois après l'événement (Figure 6).

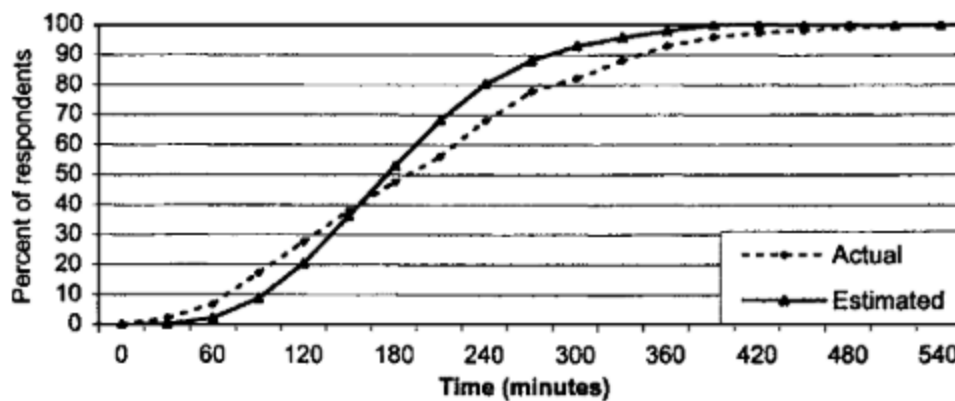


Figure 6 – Distribution cumulative des temps de préparation (Lindell *et al.*, 2012)

La Figure 6 présente deux courbes, une réelle, qui est issue des données récoltées par les questionnaires, une autre estimée, qui est issue d'un travail de modélisation à partir de variables explicatives consultables dans (Lindell *et al.*, 2012). Seule la première courbe est d'intérêt dans le cadre de ce travail de thèse. Cette courbe fait état d'un départ total des évacués après près de 6 heures. Il faut cependant remettre la courbe dans son contexte, celui de l'annonce de l'arrivée d'un ouragan. Les ouragans peuvent être détectés relativement tôt, par rapport à d'autres aléas à la cinétique plus rapide. Le niveau d'urgence d'un tel événement peut donc être considéré comme plus faible en comparaison d'événements hydrologiques, par exemple.

Dans une autre étude, (Lindell *et al.*, 2020) s'intéressent aux évacuations préventives lors de risque d'accidents nucléaires. Les chiffres sont moins élevés, pour deux raisons, il s'agit d'une estimation produite à partir de questionnaires déclaratifs envoyés avant un éventuel accident. La seconde raison réside dans le niveau d'urgence perçu en cas d'accident nucléaire imminent.

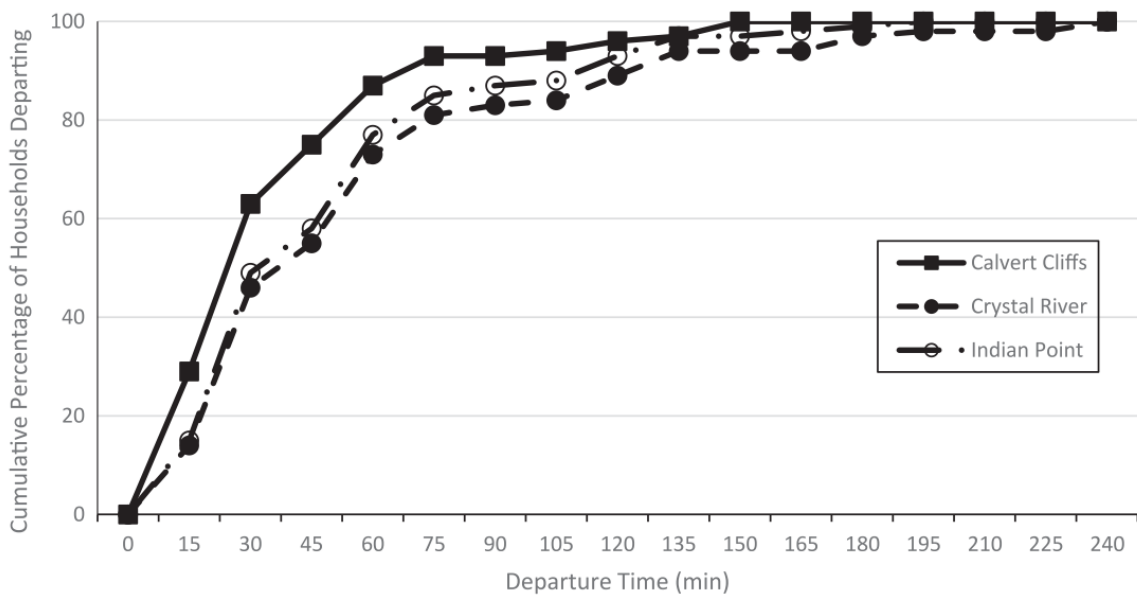


Figure 7 – Estimation des temps de préparation des ménages autour de trois centrales nucléaires.

Les courbes en Figure 7 sont donc plus favorables. S'il est possible d'affirmer que le niveau d'urgence ressenti par les populations en cas de potentiel accident nucléaire se rapproche d'un niveau d'urgence ressenti en cas de rupture de barrage, alors ces courbes peuvent avoir une bonne valeur prédictive. D'autant plus que (Tweedie *et al.*, 1986) obtient des résultats similaires sur ce qu'il appelle le « temps de mobilisation », également en contexte d'accident nucléaire potentiel.

1.3.2 Des mobilités en situation de crise

La difficile application des consignes par les individus lors d'une évacuation peut également avoir un impact sur les mobilités lors de celle-ci. Lors d'une évacuation de population, les individus sont généralement invités à se diriger vers ce que l'on appelle en France des Points de Rassemblement des Évacués (PRE). Ces PRE sont pensés comme des lieux étapes : ils permettent de rassembler les évacués puis de les diriger ensuite vers des refuges, où ils pourront s'installer plus durablement.

Plusieurs travaux de recherche ont souligné la réticence des évacués à se diriger vers des points de rassemblement (ou directement vers points de refuges, dans un contexte Nord-Américain). (Bian *et al.*, 2019a) ont par exemple récolté des données sur trois événements (Gustav en 2008, Irene en 2011 et Sandy en 2012) qui mettent en évidence une part très faible de la population se dirigeant vers les points refuges initialement planifiés (entre 1 et 4%). Cette étude issue d'entretiens post-événements souligne qu'entre 54% (lors de l'ouragan Gustav) et 83% (lors des ouragans Sandy et Irene) des personnes ont préféré se rendre directement chez un proche.

Les chiffres sont similaires dans (Mesa-Arango *et al.*, 2013), avec 3% des personnes s'étant réellement dirigés vers des points refuges, et 59% ayant pris la direction du lieu de résidence d'un proche, lors de l'ouragan Ivan en 2004. Dans un sondage déclaratif

pré-événement, (Golshani *et al.*, 2019) obtiennent des valeurs plus élevées, 54% des personnes déclarant qu'en cas d'évacuation elles se rendraient à un point refuge contre seulement 12% déclarant préférer le lieu de résidence d'un proche.

Ces chiffres démontrent donc une part d'imprévisibilité dans les choix de destinations des évacués, qui se répercute évidemment sur la forme des déplacements et donc les mobilités.

Cependant (Fujiki, 2018) faisait remarquer à juste titre la faible valeur prédictive de résultats obtenus dans un contexte géographique Nord-Américain transposé à un événement en France. D'autres études menées en Asie du Sud-Est mettent en évidence des chiffres relativement différents. Dans (Lim, Lim and Anabo, 2021), étude menée aux Philippines après l'ouragan Haiyan (2013) 61% de la population interrogée s'est rendue à un point refuge officiel, et dans (Lim, Lim and Camposano, 2022) étude menée après l'éruption du Taal, toujours aux Philippines, 57% des personnes interrogées déclarent également avoir opté pour un point de refuge officiel.

Il est également possible que certains évacués choisissent de se diriger vers d'autres lieux leur semblant familier. Ainsi, par exemple, dans l'étude menée par (Mesa-Arango *et al.*, 2013), 2% des personnes ont déclaré s'être dirigé vers leurs lieux de travail, et 1% vers une église.

Le constat est en outre fait que face à la crainte sur les conditions d'accueil mises en place par les autorités en cas d'évacuation, une part non négligeable de la population peut également choisir de s'installer dans un hôtel. Dans ce cas particulier, les chiffres atteignent une valeur significative de 35% dans (Bian *et al.*, 2019b).

1.3.3 La formation de foules

L'individu s'inscrit quotidiennement dans une relation physique et psychologique avec son environnement. L'espace est une ressource pour l'individu (Remy, 2016). Lors d'une évacuation de population, un nombre important d'individus est susceptible de se trouver sur le réseau viaire dans un laps de temps court.

Ces regroupements d'individus au sein d'un espace restreint sont appelés foules (Katz, 1950). La mise en place d'une évacuation préventive piétonne questionne alors la possibilité d'émergence d'une foule. En effet, les processus d'évacuations, lorsqu'ils sont considérés comme massifs, posent la question du partage du réseau. La multiplication de la densité de personnes sur le réseau entraîne également une multiplication des interactions (Katz, 1998). Cela débouche sur des mécanismes spontanés de groupement (Katz, 1998). Si beaucoup de travaux ont tenté de formaliser les procédés d'interactions entre personnes dans les mouvements de masse (Helbing and Molnár, 1995), ceux s'attardant sur la « foule » en tant que système, supérieur aux individus la composant, sont plus rares. Ainsi, la notion de foule psychologique, ne sort que peu du cadre de la psychosociologie théorique (Houdremont, 1999). Bien que quelques travaux ont tenté d'inclure l'aspect social dans la simulation d'évacuation (Bañgate *et al.*, 2017; Bañgate, 2020), il reste encore une étape supplémentaire dans la conceptualisation de tels phénomènes, qui contribuerait à améliorer les simulations de mobilités en situation de crise.

L'individu s'inscrit quotidiennement dans une relation physique et psychologique avec son environnement. L'espace est une ressource pour l'individu (Remy, 2016). Lors d'une évacuation de population, un nombre important d'individus est susceptible de se trouver sur le réseau viaire dans un laps de temps court. Cela pose un problème de partage de l'espace, très visible lors d'évacuation de population à forte proportion de recours à des véhicules individuels (Dixit and Wolshon, 2014). Des bouchons (Feng and Lin, 2021) sont alors observés systématiquement. Dans le cas d'une évacuation de population à forte proportion de piétons, la surface occupée par un piéton étant moins élevée que celle occupée par un véhicule et la topologie du réseau étant, moins restrictive dans le cas de la marche, les ralentissements sont moins systématiques. Cependant, plusieurs travaux issus de la littérature scientifique décrivent le problème que pose une forte densité de piétons au sein d'un espace restreint, notamment de par la présence de goulot d'étranglement (Ma *et al.*, 2014). Ces goulots d'étranglements sont systématiquement obtenus lors de l'implémentation de simulations numériques, que cela soit sur des environnements restreints (Theos, 1994) ou des zones plus larges (Lämmel, Rieser and Nagel, 2008). Ce problème est également observable lors de rassemblements d'individus (concerts, événements sportifs, festivités). Ces regroupements d'individus au sein d'un espace restreint ou confiné sont appelés foules (Katz, 1950). La mise en place d'une évacuation préventive piétonne questionne alors la possibilité d'émergence d'une foule. En effet, les processus d'évacuations, lorsqu'ils sont considérés comme massifs, posent la question du partage du réseau. La multiplication de la densité de personnes sur le réseau entraîne également une multiplication des interactions (Katz, 1998). Cela débouche sur des mécanismes spontanés de groupements (Katz, 1998). Si beaucoup de travaux ont tenté de formaliser les procédés d'interactions entre personnes dans les mouvements de masse (Helbing and Molnár, 1995), ceux s'attardant sur la foule en tant que système supérieur aux individus la composant, sont plus rares. Ainsi, la notion de foule psychologique, ne sort que peu du cadre de la psychosociologie théorique (Houdremont, 1999). Bien que quelques travaux ont tenté d'inclure l'aspect social dans la simulation d'évacuation (Bañgate *et al.*, 2017; Bañgate, 2020), il reste encore un large champs d'étude à explorer de ce côté-là.

Certains travaux menés en sciences « dures », et notamment en mécanique des fluides, donnent aux foules des propriétés globales indépendantes de celles des individus la composant (Low and Cowan, 2000). C'est ce que souligne Arnaud Banos, dans son habilitation à diriger des recherches, en mentionnant la méthodologie utilisée par la R.A.T.P.⁴ afin de simuler des évacuations de stations de métro. Cette dernière considère les flux humains comme des fluides (Banos, 2015). (Simo Kanmeugne, Beynier and Donnart, 2013) montre dans ses travaux de thèse une proximité apparente entre le comportement physique d'une foule et les dynamiques observées en mécanique des particules. La vitesse serait par exemple proportionnelle au coefficient de congestion (Guy *et al.*, 2010), c'est-à-dire qu'une foule pourrait être caractérisée par sa viscosité. Il existerait également des effets de bord, encore proches de ce que l'on retrouve dans les comportements des liquides (Pecol, 2012). Mais ces

⁴ Régie autonome des transports parisiens

approches ne permettent pas encore de saisir l'aspect psychologique des foules tel que mentionné dans la littérature en psychologie sociale.

La foule est, d'un point de vue physique, un agglutinement de personnes au sein d'un espace réduit. Pourtant, la foule est en théorisée comme une entité à part entière dont le comportement dans l'espace est différent de celui d'un individu unique (Katz, 1950). La foule est donc un objet physique, mais pas seulement. C'est l'aspect psychologique d'une foule, mentionné précédemment, qui fait de la foule un élément pertinent à prendre en compte dans le cadre d'un modèle de simulation d'une évacuation préventive.

Les travaux en psychologie tendent à différencier les foules intentionnelles des foules spontanées. Les premières sont moins problématiques car elles s'organisent généralement autour d'un leader (Katz, 1998; Houdremont, 1999), leur conférant un caractère beaucoup plus prévisible. En revanche, la spontanéité des foules émergeant de situations de crise rend complexe la formation d'une structure verticale (hiérarchique). L'absence de leader ou de structure hiérarchique donne à ces foules un comportement moins prévisible, voire chaotique.

Cette formation de foules spontanées devient un enjeu majeur des processus d'évacuation du fait de la densité de population censée évacuer dans un laps de temps court. Les foules spontanées peuvent être formées par effet de panique (Crocq, 1998). Sachant qu'un mouvement de panique est généralement difficile à maîtriser, qu'il peut entraîner la multiplication des comportements irrationnels et dangereux (Provitolo, 2005). Il se diffuse également en s'amplifiant au fur et à mesure du grossissement de la foule (Moussaïd, 2009).

Les foules spontanées peuvent également être formées autour d'un « excitant commun » (Le Bon, 1895) qui désigne un événement liant des personnes n'ayant, à priori, aucune raison d'être liées (Katz, 1998). Cet excitant commun (cf. Figure 8) catalysant un rassemblement de personnes en l'absence de leader peut entraîner des conséquences positives potentielles (par exemple, maximiser les chances que la vigilance des premiers alertés contribue à mettre à l'abri un maximum de personnes proches) tout comme dramatiquement négatives (les rassemblements non-maîtrisés impliquant une forte concentration de personnes, que ce soit dans des rues ou dans des stades pour ne citer qu'eux, en sont des exemples).

Les rassemblements formés par panique ou excitant commun sont caractérisés par une plus grande imprévisibilité, ainsi qu'une sensibilité accrue aux mouvements de foules (Katz, 1998). Dans notre thématique d'étude, la formation d'une foule en contexte d'évacuation de population est plus susceptible de répondre aux caractéristiques des foules spontanées plutôt que de celles des foules intentionnelles.

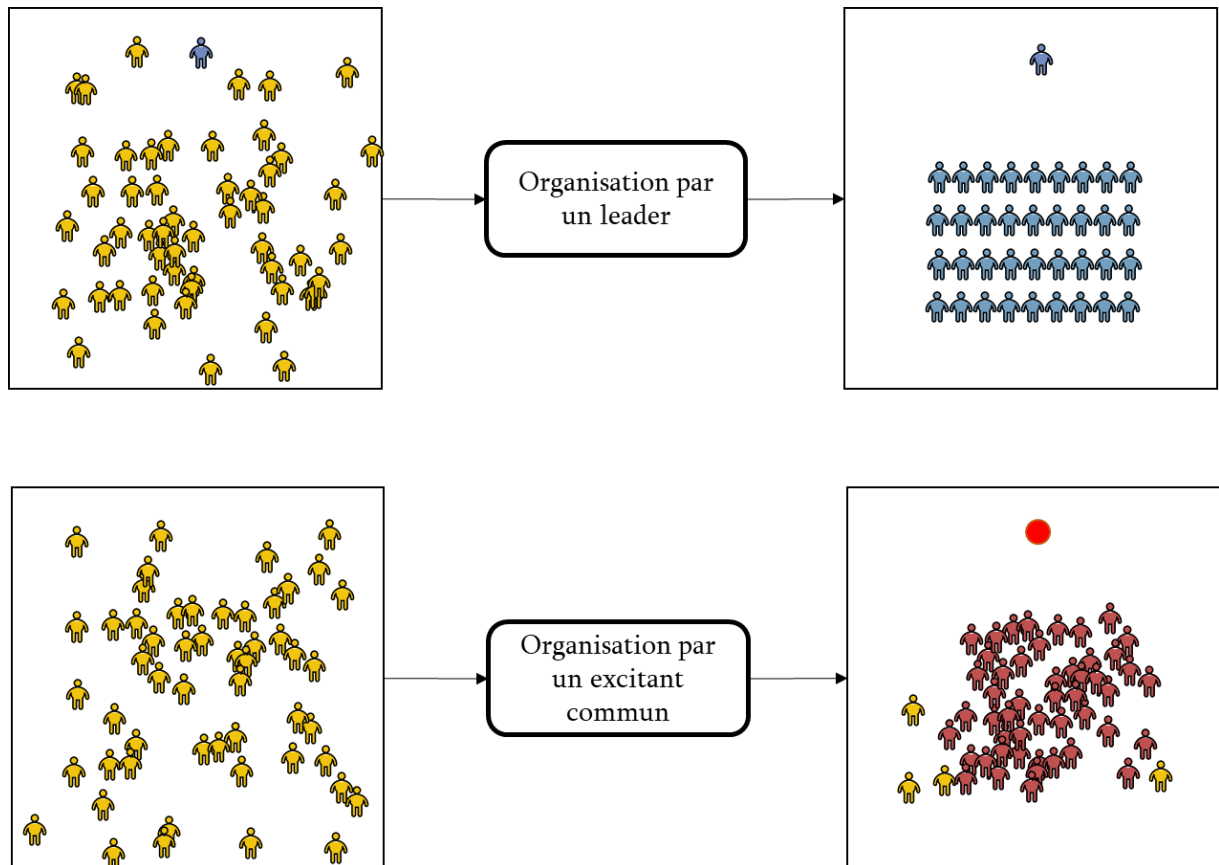


Figure 8 – Les deux organisations possibles pour une foule.

La Figure 8 schématise les deux types de foules considérées par (Le Bon, 1895). L'objet est ici de comprendre que l'excitant commun prend, dans le cas des foules spontanées, la place qu'occupe le leader dans les foules intentionnelles. Dans le cadre d'un événement anxiogène (événement brutal et/ou imprévu et/ou inconnu), l'excitant commun devient donc négatif. Il est donc ici question d'individus pouvant se rassembler pour limiter l'impact d'un stress qui serait généré par la nécessité d'évacuer rapidement. La formation d'une foule constitue un mécanisme de défense (Katz, 1998), au départ objet physique, un glissement progressif s'opère vers ce que l'on appelle dans la psychologie une foule psychologique (Katz, 1998; Moussaïd, 2009; Fu *et al.*, 2019). Le manque d'information potentiellement inhérent à la survenue d'une catastrophe favorise le phénomène de mimétisme (Moussaïd, 2009). Un consensus comportemental finit par émerger comme réponse à une situation de stress et d'incertitude individuelle. Ces éléments relèvent de la théorie et de l'observation en milieu clos. En réalité, plusieurs évacuations d'urgence ont pu occasionner des phénomènes similaires (Le Heysel⁵ par exemple), mais ces éléments peuvent différer d'une évacuation préventive étant donné, là encore, le niveau d'urgence perçu par les populations.

⁵ Le drame du Heysel, survenu le 29 mai 1985 au Stade du Heysel de Bruxelles, est l'une des tragédies les plus marquantes liées à une manifestation sportive.

1.3.4 Synthèse : l'incertitude autour des civils pendant les évacuations

Lorsqu'une décision stratégique d'évacuation de la population est validée par le décideur, le devenir des personnes évacuées devient l'enjeu principal de l'opération. Plusieurs éléments vont déterminer le bon fonctionnement de cette opération d'évacuation. Dans un premier temps, les individus qui évacuent entretiennent des interactions avec l'organisation en charge de mettre en place l'évacuation. Ils vont recevoir des informations, des consignes, puis vont choisir d'appliquer les consignes avec plus ou moins de rigueur. Les principaux effets de cette application des consignes par les populations sont les suivants :

- **Un refus potentiel d'évacuer**, pouvant être provoqué par un manque de confiance envers les autorités émettrices du message, par un message émis mal construit, ou dans certains cas, par une volonté de protéger ses biens en ne les abandonnant pas ;
- **Une évacuation de personnes non-menacées**, par manque d'information préalable (difficulté à se situer sur une éventuelle carte d'aléa voire la non-existence de cette dernière), par manque de communication maîtrisée (c'est-à-dire claire et ciblée, mais incluant aussi la gestion des rumeurs éventuelles) ou encore par mimétisme (en voyant d'autres personnes évacuer) ;
- **Un délai de départ variable** après réception de l'alerte, ce qui peut être provoqué par un délai de préparation à l'évacuation plus ou moins grand ;
- **Des effets de groupements voire de foules**, sous l'effet à la fois de l'augmentation de la densité de personnes à certains points du territoire, mais aussi d'un niveau d'anxiété relatif au contexte.

L'ensemble de ces aspects est susceptible de contribuer à dégrader l'opération d'évacuation dans son ensemble ainsi qu'à menacer directement la vie des personnes concernées.

I.1.4 Synthèse : l'évacuation, un processus hautement incertain

Une évacuation préventive de la population est une opération qui se construit à plusieurs niveaux et sur un temps long. Les institutions ont la charge de fournir un travail d'anticipation en construisant des planifications (Leone *et al.*, 2018), travail qui s'effectue en amont d'un événement. Lors de l'événement, c'est ensuite la cellule de gestion de crise qui prend le relai, elle utilise les planifications proposées par les institutions afin de conduire l'opération (Barkaoui *et al.*, 2017). La cellule de crise organise l'opération en prenant des décisions, ces décisions peuvent suivre les dispositions des planifications faites en amont, cependant elles doivent pouvoir s'en éloigner également si l'évolution de la situation l'exige. Finalement, une évacuation de la population concerne avant toute chose la population (CEPRI, 2014). La cellule de crise doit donc transmettre des consignes à cette dernière (Hamon *et al.*, 2021), à qui incombe la charge de les appliquer afin de concourir à sa propre mise en sécurité.

L'objet de ces consignes est d'utiliser la mobilité des personnes afin de les mettre en sécurité (Lapostolle *et al.*, 1999). Un déplacement massif de personnes doit donc être conduit par la cellule de crise. Ce déplacement inclut dans la majorité des cas la sélection de points refuges, l'éventuelle fermeture d'axes au cours de l'événement et l'interdiction de certains modes de transports tels que les véhicules individuels. Dans certains cas, cela peut par exemple inclure entre autres éléments la prise en charge des personnes à mobilité réduite, la mise à disposition de transports en commun (Lapostolle *et al.*, 1999).

La somme de déplacements résultante des éléments précédemment énumérés est un enjeu. Un nombre de personnes élevé est susceptible de se déplacer dans un laps de temps relativement court. Ainsi il n'est plus uniquement question de simple déplacement mais de tout un système de mobilités. Mobilités qui d'ailleurs peuvent être influencées par divers aspects psychologiques et psychosociologiques.

La compréhension de ce système de mobilités tel qu'il pourrait se matérialiser en cas de déclenchement d'une opération d'évacuation préventive de la population sur un territoire peut permettre d'anticiper certaines problématiques invisibles aujourd'hui (Brulhardt and Bassand, 1981). En gestion de crise, de telles opérations peuvent être testées à l'aide d'exercice grandeur nature. Ces exercices ont un coût d'organisation élevé. Par le développement des outils numériques de modélisation et de simulation, un certain nombre de travaux propose une approche computationnelle de l'opération. Ainsi il existe ici une opportunité d'utiliser la simulation numérique.

I.2 Complexité des simulations d'évacuations

Les simulations sont un outil incontournable de la gestion des risques. Concernant les évacuations de population, il existe un ensemble de pratiques à destination des organisations, mis en évidence et détaillé dans (Verdel *et al.*, 2010). Ces simulations prennent la forme d'exercices et de jeux de rôle à destination des gestionnaires d'une crise. Dans ce travail, l'objectif est de simuler les mobilités dans le cadre d'une évacuation de population. Pour ce faire, la démarche s'oriente vers l'utilisation d'outils numériques. La simulation numérique d'évacuations de population est un champ de recherche s'étant à l'origine articulé autour des sciences physiques et mécaniques. En effet, il existe une problématique mécanique incompressible lors d'une évacuation (Kanmeugne, 2015). Il s'agit toujours d'un ensemble d'individus développant un comportement mécanique dans l'espace (par la marche, par exemple), devant partager un environnement physique et se déplacer en son sein. La finitude de cet environnement entraîne inévitablement des conflits spatiaux et donc des questions de partage physique de l'espace. Cependant, à ces questions physiques essentielles, se sont superposées à partir des années 1990 des questions comportementales (Helbing and Molnár, 1995). La multiplication des travaux de recherche autour des évacuations intégrant le comportement humain et sa complexité s'inscrit dans une pénétration des sciences humaines et de leurs questionnements dans la thématique (Banos, 2015).

Cette section présente donc l'état de l'art des méthodes existantes afin de simuler une évacuation de population. La première partie est un rappel de l'imbrication implicite mais obligatoire entre la simulation et la modélisation. Il s'agit ensuite de comprendre les éléments incontournables que l'on retrouve dans les différents modèles et simulations disponibles dans la littérature. La seconde partie s'intéresse aux échelles de simulation, entre étude des interactions piétons-véhicules à l'échelle locale et simulation à grande échelle ayant pour but l'optimisation d'une évacuation. Dans une troisième partie, plusieurs méthodes d'implémentation des déplacements de personnes sont comparées ainsi que des méthodes de prise en compte des interactions lorsque la densité d'individus est élevée.

Enfin, des simulations utilisant des systèmes multi-agents, outil d'intelligence artificielle distribuée sont investiguées. L'objectif de cette section est de synthétiser l'existant dans une démarche pluridisciplinaire afin d'alimenter la construction d'une démarche holistique de simulation d'une évacuation préventive de population.

I.2.1 Les modèles d'évacuation

Les mobilités en situation normale sont donc un système complexe multifactoriel, dans lequel l'individu occupe une place centrale. Membre d'un groupe, sujet d'une organisation, et enjeu d'un risque, l'individu ne saurait exister sans la somme d'autres individus partageant le même espace. La mobilité en situation de crise est donc un phénomène collectif s'exprimant à une échelle individuelle. La modélisation d'un processus ou d'un phénomène, passe généralement par la hiérarchisation des éléments

qui le compose et l'explicitation des relations entre ces éléments. L'enjeu est ici d'explorer les travaux de modélisation, afin d'extraire et de comparer différentes représentations d'une opération d'évacuation de population.

L'objectif est ici de proposer une synthèse des différents modèles d'évacuations existants. Face à une thématique dont l'appartenance disciplinaire est multiple, un regard neutre sera adopté, les méthodes seront étudiées au regard de leur apport, mais également du fait de la manière dont elles modélisent les différents éléments identifiés dans la section précédente (cf : I.1). Sur le principe d'une revue pluridisciplinaire et non-exhaustive des modèles d'évacuation, il s'agit de mettre en évidence un socle commun. Après l'identification des principales caractéristiques d'une évacuation préventive, il convient d'explorer les différentes méthodes d'implémentation existantes. Deux buts sont donc poursuivis. Celui d'apporter un regard sur les méthodes, affranchi des sectorisations disciplinaires. L'objectif est également de développer une vision d'ensemble des pratiques, de les classer et de les comparer.

2.1.1 Les évacuations de population comme système complexe

Le système est une abstraction, une vue de l'esprit. C'est une méthode de représentation et d'appropriation d'un objet, processus ou phénomène. Il existe un consensus autour des caractéristiques majeures permettant d'approcher un objet, un processus ou un phénomène de façon systémique. Ces caractéristiques sont appelées « concepts », et sont considérées comme identifiables dans l'ensemble des systèmes. Le système est composé d'objets ou d'éléments, au moins deux jusqu'à une infinité (Backlund, 2000). Ces éléments possèdent un « comportement », ce comportement à une influence sur les autres éléments du système, aucun élément du système n'est indépendant (Ackoff, 1981). Les éléments du système sont caractérisés par un état, pouvant évoluer (van Gigch, 1991). Le système dans son ensemble est également caractérisable par un état global, lui aussi susceptible d'évoluer, au regard de l'évolution de l'état de ses éléments. L'interdépendance entre les différents éléments d'un système suggère l'existence d'interactions entre ces mêmes éléments.

Si l'évolution de l'état du système est subordonnée à l'évolution (ou changement d'état d'au moins un de ces éléments), le système est en revanche supérieur à la somme de ses parties. Cela signifie qu'il existe des caractéristiques propres au système indépendantes des caractéristiques de ses éléments.

L'approche systémique s'intéresse aux éléments et à leurs interactions. Il est donc considéré l'existence d'entités élémentaires au(x) comportement(s) caractérisables (cela différencie une classe d'entités d'une autre). L'interaction entre ces entités élémentaires se matérialise sous la forme d'un tout, accompagné de caractéristiques globales, émergeant de l'interaction de ces entités élémentaires. Appliqué à une problématique d'évacuation de population, cela revient à considérer l'évacuation en elle-même comme un système, et les populations ou les infrastructures comme les entités élémentaires. Les interactions des entités élémentaires (les personnes entre-elles, les personnes avec l'environnement) vont produire un système, dont les

caractéristiques globales et leurs évolutions ne sont pas uniquement une somme des caractéristiques de ces entités élémentaires. Cela revient à considérer que, même si sont connus, a priori, l'ensemble des acteurs impliqués et l'ensemble des actions qu'ils peuvent réaliser (ou non), le résultat du processus d'évacuation d'une population cible est imprévisible à partir de ces seules données. Cet aspect systémique de l'objet d'étude, oriente l'analyse des travaux de modélisation et de simulation existants vers l'identification incontournable des acteurs impliqués, mais également (et surtout) des interactions qu'ils entretiennent. En effet, si les caractéristiques du système n'émergent que du comportement de ces unités élémentaires, alors un modèle réellement représentatif du système ne saurait uniquement exister que de par ces mêmes entités élémentaires.

2.1.2 Du modèle à la simulation

Comme dit précédemment, l'évacuation s'accompagne généralement d'un changement de paradigme, depuis une situation de fonctionnement territorial standard, vers une situation de crise (Lagadec, 2003). Cette situation de crise multiplie le nombre et la fréquence des interactions entre les acteurs du processus. Ainsi, chaque individu a un lien plus ou moins direct avec la crise, en sus des organisations qui elles aussi doivent la gérer (Weiss, Girandola and Colbeau-Justin, 2011). Cette complexification du fonctionnement du territoire et de ses mobilités rend pertinent le travail de modélisation préliminaire à la simulation. Notions souvent mélangées voire confondues, modélisation et simulation renvoient à deux démarches différentes, mais pouvant être efficaces et complémentaires sur une même problématique.

Les modèles font donc partie d'une relation abstrait-concret dont l'externalité de la représentation abstraite tente de fournir une explication du concret (Sensevy *et al.*, 2015). Les modèles peuvent être recoupés et sous-classifiés selon la connaissance qu'ils produisent (Bulle, 2007). Une connaissance axée sur les processus et leur observation, une connaissance orientée vers le résultat et l'optimisation (Banos, 2015). La complexité de certains processus tend à forcer le passage par une représentation abstraite afin d'en faire évoluer le niveau de connaissance. La modélisation, c'est également la sélection. Elle consiste en une reconstruction d'un phénomène, d'un processus, au travers de ses caractéristiques principales. Les enjeux de cette reconstruction sont définis initialement par le modélisateur. Il s'agit de définir clairement sur quel aspect d'un phénomène/processus la connaissance doit être développée.

La traduction d'un modèle en une simulation opérante permet de l'appliquer. La majorité des travaux de modélisation se poursuivent ensuite par une application (donc une simulation). À l'inverse, la majorité des travaux de simulation ne décrivent pas systématiquement le modèle sous-jacent.

Les phénomènes possédant un aspect social fort (catégorie à laquelle les évacuations de population appartiennent) peuvent favoriser l'émergence de propriétés qui peuvent être intéressantes à prendre en compte.

2.1.3 Les modèles d'évacuation existant

Ici, il est considéré qu'un travail de simulation d'une évacuation de population à l'aide d'un outil numérique présuppose un travail préalable d'abstraction, de hiérarchisation et de mise en lien des principaux sous-systèmes en interaction. Ainsi, même si les modèles sous-jacents aux simulations ne sont pas systématiquement explicités dans la littérature scientifique, il est presque toujours possible de les reconstituer *a posteriori*, de les déduire en quelque sorte. Ainsi, l'ensemble des travaux de simulation investigués dans le cadre de ce travail de thèse traite, dans la sémantique, d'individus, de civils ou de populations.

En revanche, peu de travaux de simulation d'une évacuation de population incluent dans leur architecture informatique une quelconque matérialisation d'une planification préexistante. (Daudé *et al.*, 2019) ont proposé d'utiliser une simulation d'évacuation sous forme de jeu sérieux afin de développer les compétences des acteurs de la gestion de la crise, ce qui peut être considéré comme une volonté d'intégration des acteurs organisationnels au sein de la simulation. En termes de planification, les simulations sont en revanche beaucoup plus souvent utilisées comme outils de construction que comme outils de test.

Ainsi, les travaux ayant pour but l'aide à la décision dans le cadre de la planification d'une évacuation sont très nombreux. À titre d'exemple, (Swamy *et al.*, 2017) s'intéressent à la planification de transports en commun, (Alaeddine *et al.*, 2015) à l'optimisation de la localisation de points refuges. La littérature sur ces aspects ne manque pas.

Il ressort à ce stade que l'intérêt de mettre en œuvre une démarche intégrée réside dans l'opportunité d'exploiter le potentiel de la modélisation pour construire un système de simulation évolutif. Ceci implique de prendre en considération, en amont, les besoins en termes d'éléments et de processus à simuler, ce qui revient à interroger la question de l'échelle de simulation la plus pertinente et la plus soutenable au regard des attendus.

1.2.2 Échelle de la simulation

Les simulations d'évacuation de population peuvent être classées en deux catégories. D'un côté des simulations appliquées sur des lieux confinés, tels que des bâtiments, des stations de métro, voire des avions. À côté de ceci, tout un pan de la recherche s'oriente vers les évacuations d'entités territoriales complexes : des quartiers, des villes et des agglomérations. Cette division autour de l'échelle d'observation d'une évacuation n'est pas anodine, puisqu'elle implique souvent, mais pas toujours, des modes de récolte de données, d'implémentation du système d'information et d'analyse des résultats, différents.

L'autre grande division d'échelle entre les simulations d'évacuation de population se situe au niveau de l'approche de simulation. Une partie des simulations proposées par la littérature scientifique ont recours à une simulation top-down d'une évacuation. Il s'agit souvent d'approches prenant la forme d'équations différentielles appliquées sur

un réseau de type graphe. Les évacués ne sont ici qu'une valeur reportée entre les nœuds d'un graphe en fonction du temps.

2.2.1 Les approches macroscopiques

L'approche macroscopique s'oppose à l'approche microscopique de deux manières. Par l'échelle d'application : une approche macroscopique a pour but d'analyser le fonctionnement d'une évacuation à l'échelle d'un territoire, par opposition aux simulations appliquées sur des bâtiments (ou d'autres lieux restreints tels que des bateaux, des stations de métro, etc.) dont les enjeux peuvent être différents. Ce type d'approches est par exemple visible dans les travaux de (Czura, 2017), qui cherchent, avant la simulation d'une évacuation, la simulation d'un territoire au travers de son fonctionnement standard. Ces approches ne se retrouvent pas dans les simulations d'évacuations de bâtiments : jamais la question du fonctionnement du bâtiment en situation normale n'est posée. Les réflexions se limitent à la position initiale des opérateurs au moment de l'évacuation du bâtiment.

Il existe une quantité non-négligeable de simulations à l'échelle d'observation macroscopique qui proposent une approche similaire. Ainsi, dans ESCAPE (Daudé *et al.*, 2019), ce souci de prise en compte du territoire au travers de son fonctionnement est aussi présent.

À l'origine, les deux approches ont pu utiliser des méthodes similaires. Ainsi, dans (Chalmet, Francis and Saunders, 1982), l'évacuation de bâtiments est simulée en utilisant un graphe, composé d'arcs et de nœuds. Les usagers sont déplacés d'un nœud vers un autre à chaque pas de temps. Le fonctionnement de cette simulation d'évacuation de bâtiments est donc très proche de celle de NETVACI⁶ (Sheffi, Mahmassani and Powell, 1982), publiée la même année. EVACNET+⁷ (Kisko and Francis, 1985) fonctionne exactement de la même manière. L'ensemble de ces simulations ont pour fonction l'optimisation et pour objectif la planification. EVACNET+ a d'ailleurs été commercialisé à cet effet.

Les simulations microscopiques et macroscopiques peuvent également être opposées par la manière dont elles prennent en compte les interactions locales entre piétons et véhicules. Il n'est plus question ici d'échelle d'application, mais d'échelle d'observation. Par exemple, dans (Goto *et al.*, 2012), les auteurs éludent cette question en faisant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices : les routes sont assez larges pour que les personnes puissent se dépasser les unes les autres. Dans (Wang and Jia, 2021), il n'y a pas d'interactions locales, les auteurs utilisent une grille dont la densité de piétons sur chacune des cellules influe sur la vitesse de déplacement des piétons qui choisissent d'emprunter une cellule donnée. Dans (Ito *et al.*, 2020), une logique

⁶ NETVACI est un modèle de simulation macro du trafic visant à tenir compte de la topologie des réseaux, de la présence d'intersections et des stratégies de gestion des évacuations.

⁷ EVACNET+ est un modèle d'évacuation de bâtiments basé sur des graphes : les nœuds représentent les éléments d'un bâtiment (tels que les pièces, les halls, les paliers, les escaliers et les vestibules...) tandis que les arcs représentent les passages entre ces éléments.

similaire est déployée, les auteurs ont priorisé l'ajout d'obstacles fixes (des bâtiments écroulés dans ce cas).

Dans EVACNET+ et NETVACL, il est précisé que la simulation ne suit pas les évacués individuellement, piétons dans le premier et véhiculés dans le second. Il s'agit juste d'un calcul à l'aide d'un graphe. Des travaux vont pourtant ouvrir de nouvelles perspectives pour la simulation d'évacuations.

2.2.2 Les approches microscopiques

C'est à ce moment que les progrès en termes de techniques de simulation vont engendrer une démultiplication des travaux. Plusieurs approches permettent alors de simuler les évacuations en instanciant les personnes. Il ne s'agit plus uniquement de simuler l'ensemble d'une évacuation à l'aide d'équations différentielles, mais de simuler des entités élémentaires (véhicules, personnes...) et d'ensuite étudier le résultat obtenu.

Les interactions entre individus pendant les évacuations vont alors devenir une problématique majeure des simulations. Cela relève d'un certain intérêt puisqu'il s'agit de faire apparaître des phénomènes d'auto-organisation spatiale d'une densité de population en milieu contraint (Moussaïd et al., 2009; Valentin, 2013). En terme d'application, ce type de modélisation est généralement utilisé pour prévoir et éviter des « bouchons » (Almeida, Rosseti and Coelho, 2013), pouvant se matérialiser de différentes manières, par la formation d'arches⁸ (Theos, 1994), ou de goulots d'étranglement⁹ (Lemercier, 2012) par exemple. Ce type de phénomènes est observable du fait de l'augmentation des flux de piétons (Li, Liu and Han, 2019). L'augmentation des flux de piétons au niveau des goulots d'étranglement génère une oscillation de la trajectoire des personnes (Helbing et al., 2005).

Dans (Sugiman and Misumi, 1988), les auteurs considèrent que réside dans les liens interpersonnels l'intérêt d'étudier la propagation de la panique à travers des groupes de personnes lors d'évacuation. C'est l'une des premières contributions considérant des interactions entre individus. Des travaux plus récents mettent en évidence la propension des personnes à se regrouper afin d'atténuer le stress (Qiu and Hu, 2010).

Plus tard, (Helbing and Molnár, 1995) proposent le Modèle de Force Social (acronyme anglophone SFM) qui formalise les dynamiques d'interactions entre piétons lors d'évacuation en milieu clos. Plusieurs travaux vont utiliser le SFM et le développer. (Parisi and Dorso, 2005) étudient l'impact de l'intégration de la panique (par l'augmentation de la vitesse désirée des personnes), sur l'apparition de « grappes de piétons ». Dans une simulation de l'évacuation d'une salle de cours (Liu *et al.*, 2022) proposent d'ajouter un paramètre d'influence sur la vitesse désirée, sous la forme d'un

⁸ Les arches, observées par plusieurs auteurs, sont des amas d'individus à très haute densité. Dans de telles conditions de compression, les personnes peuvent se bloquer mutuellement en formant une sorte d'arche de courbure opposée à la direction du mouvement.

⁹ Les goulots d'étranglement désignent dans notre thématique de travail la limitation d'un trafic / d'un flux de circulation (de personnes, de véhicules) due à une forme sous-dimensionnée de l'espace dans ce processus.

indicateur de motivation. (Cornes, Frank and Dorso, 2021) l'utilisent afin de démontrer l'impact négatif d'une trop grande vitesse d'évacuation lors d'évacuations de bâtiments, et notamment sur la formation d'engorgements.

Le SFM a été, plus récemment, utilisé dans le cadre de simulations concernant des territoires urbains (Bernardini *et al.*, 2017). Ces modèles de simulations fournissent des résultats intéressants, mais manquent de contextualisation géographique. Également, ils sont encore relativement rares et sont appliqués sur des territoires de taille moyenne (un quartier, par exemple). Les travaux impliquant des interactions microscopiques à larges échelles sont encore peu communs.

Certaines simulations vont pousser la démarche encore plus loin, et vont ajouter la nature des liens sociaux en plus des interactions physiques. C'est l'objet de la thèse de (Bañgate *et al.*, 2017) qui considère que l'attachement social peut avoir un effet sur la mobilité des personnes pendant une évacuation.

2.2.3 Synthèse : vers une approche mixte ?

L'étude des approches microscopiques montrent un fort potentiel d'intégration du caractère multifactoriel des phénomènes de mobilités en situation d'urgence ou de crise. Si les approches macroscopiques ne semblent pas pouvoir intégrer de prime abord toute la complexité des processus d'évacuation préventive décrits précédemment, les approches microscopiques ne peuvent pas s'affranchir quant à elles d'une intégration d'éléments pouvant être complexes à caractériser (d'un point de vue social, principalement), et pouvant potentiellement s'avérer coûteux à simuler. Tout cela pour un gain global qu'il est difficile de préjuger lorsqu'un territoire étendu est étudié (une ou plusieurs communes par exemple).

Ainsi, poser la question de l'opportunité d'adopter une approche mixte est pertinent et légitime.

Le développement d'une approche mixte consiste en une convergence des questionnements que l'on retrouve dans les approches microscopiques et macroscopiques. Des travaux ont déjà essayé d'importer des méthodes microscopiques afin de les appliquer à des évacuations de population à grande échelle. Ainsi (Lämmel, Rieser and Nagel, 2010) simule l'évacuation de la ville de Zurich en cas de rupture de barrage. Les auteurs utilisent MATSim¹⁰ et déclarent utiliser des agents « indépendants » mais peu de détails sont cependant mis à disposition du lecteur à propos du comportement microscopique des agents mentionnés. Dans (Fathianpour *et al.*, 2023) une évacuation multimodale de la ville de Napier (Nouvelle-Zélande) est simulée, les auteurs évoquent une approche microscopique, et présentent un modèle de gestion du trafic proche de ce que l'on retrouve dans (Czura, 2017), cependant, aucune information sur la gestion des dynamiques microscopiques pour les piétons n'est présente.

¹⁰ MATSim (Simulation de Transport Multi-Agents) permet de faire des simulations de transports à grande échelle, basées sur les agents.

Plus récemment, la question des évacuations piétonnes en contexte urbain a fait l'objet de nombreux travaux de recherche. La convergence des questions de recherche se traduit par des travaux qui incluent une prise en compte de comportements sociaux lors d'évacuations (De Iuliis *et al.*, 2023), en plus d'une intégration d'algorithmes de gestion des interactions physiques, notamment le social force model (Astudillo Muñoz, Gil-Costa and Marin, 2022). Présentant des résultats encourageants, ces modèles de simulations se heurtent cependant à deux difficultés majeures : la validation des modèles ainsi que la puissance de calcul nécessaire pour les instancier sous forme de simulation.

1.2.3 Simuler le déplacement

Simuler les déplacements d'une multiplicité d'individus au sein d'un environnement, qu'il soit restreint ou étendu suppose que ces déplacements s'opèrent sur un support. De plus, la simulation des déplacements d'un nombre important de personnes demande également une gestion des interactions physiques potentielles entre ces personnes. L'implémentation des déplacements d'un grand nombre d'individus, dans le cadre de l'observation d'un système de mobilité devient alors un enjeu majeur de la construction d'une simulation robuste.

Dans la réalité, les déplacements au sein d'une ville s'opèrent sur le réseau viaire. Au sein d'une simulation, le réseau viaire peut être simulé de plusieurs façons. Cette section présente les deux principales méthodes de simulation d'un support de déplacement pour les individus, l'utilisation d'un *grid* (une grille composée de cellules) et l'utilisation d'un graphe. Dans une troisième partie sont abordées les méthodes d'implémentation des interactions physiques entre individus.

2.3.1 Utilisation d'une grille (ou grid)

L'apparition des automates cellulaires, et le couplage de ces derniers avec des systèmes multi-agents a favorisé l'utilisation de ces automates cellulaires comme support de l'évacuation. La logique initiale d'un automate cellulaire est d'étudier l'évolution d'un ensemble de cellules, liées par des relations de voisinages, en fonction du temps. L'intégration d'un système multi-agents sur un automate cellulaire permet donc d'organiser le déplacement d'agent de cellules en fonction de règles.

L'espace simulé est donc découpé par une grille, chaque cellule de cette grille est homogène en tout point. Les variables environnementales (occupation du sol, quantité de ressources) sont discrétisées à l'échelle de la cellule. Les agents se déplacent de cellules en cellules suivant des règles de navigation prédéfinies. L'état des cellules peut évoluer en fonction du temps. Le partitionnement de l'environnement en cellules d'égale superficie offre des avantages techniques.

L'utilisation d'un découpage régulier de l'environnement permet une discrétisation de ce dernier. Cette discrétisation simplifie d'éventuels protocoles de communication entre un agent actif (une personne par exemple) et l'environnement dans lequel il se

déplace et agit. Les grids permettent par exemple l'introduction à moindre coût de puissance d'une notion de « perception » de l'agent (Dong, Huang and Wang, 2022). Cette perception, permet l'implémentation d'agents de nature « myopic ». Ces agents myopes sont très utilisés dans des problématiques d'évacuations d'urgence de bâtiments. Dans ce contexte, la construction de l'itinéraire est une question de recherche majeure. Dans (Yuan and Tan, 2007), chaque agent se déplace sur une des huit cellules adjacentes disponibles en fonction de sa distance avec une des sorties du bâtiment à évacuer. Un agent myope possède une limite spatiale au-delà de laquelle les informations environnementales ne peuvent plus être traitées (Ferrand, 2003). L'agent se trouve sur une cellule donnée et il peut avancer en choisissant parmi les cellules connexes en fonction de leurs caractéristiques (Kurdi *et al.*, 2022). Dans (Ibrahim *et al.*, 2022), traitant de l'évacuation d'une université, ce choix dépend de règles de voisinage, pouvant être modifiées en cas de présence d'un obstacle. Dans (Plattard, 2017), qui traite de l'évacuation d'un littoral en contexte de multirisques (séisme et tsunami), cette occurrence d'obstacles est dynamique puisque les bâtiments de la zone d'étude peuvent s'écrouler et donc bloquer le déplacement des agents.

L'utilisation de cellules permet aussi de simuler l'évolution de l'environnement géographique de la simulation de façon dynamique. Il est par exemple possible de bloquer une partie des cellules de l'environnement aux agents, en simulant une chute de débris suite à un tremblement de terre (Plattard, 2017).

L'ajout d'obstacles revêt un intérêt particulier afin d'étudier le déplacement des agents dans un environnement restreint et évolutif (Varas *et al.*, 2007). La principale opportunité réside ici dans l'idée de pouvoir comparer les trajets d'agents en fonction de différentes typologies d'obstacles (Yue *et al.*, 2021). L'utilisation de cellules permet ici de faire se déplacer les agents sans itinéraires calculés au préalable. En indiquant uniquement une direction, chaque agent construit son cheminement au sein de l'environnement (Liu *et al.*, 2018).

2.3.2 Les graphes et algorithmes d'optimisation

Un graphe est un ensemble de couples entre un ensemble de sommets et un ensemble d'arêtes. Chaque arête du graphe relie deux sommets. Chaque sommet peut être lié à un ensemble d'autres sommets. Suivant la topologie du graphe, un sommet peut être relié à un seul, deux (dans les graphes de types *mesh*¹¹) ou une infinité (dans les graphes de type quelconques). Ici, les graphes abordés sont de type quelconque Figure 9 et ils n'ont donc *a priori* pas de topologie structurée.

¹¹ Dans lesquels les sommets et les arêtes reproduisent un schéma régulier.

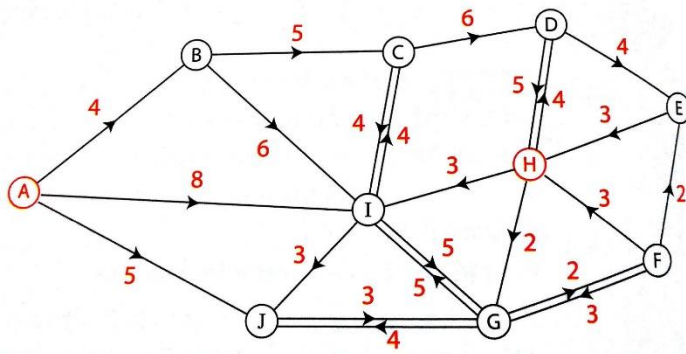


Figure 9 – Exemple de représentation d'un graphe quelconque

La Figure 9 présente un exemple de graphe pondéré quelconque, les valeurs affichées en rouge correspondent aux arêtes auxquelles elles sont associées. L'utilisation d'un graphe pondéré permet par exemple de reproduire la diversité des réseaux viaires, ce qui rend leur utilisation judicieuse lors de la simulation d'évacuations.

L'utilisation de graphes permet l'implémentation d'algorithmes organisant le déplacement des individus. Plusieurs stratégies ont été utilisées pour exploiter les graphes. La première est l'utilisation d'un algorithme des plus courts chemins : l'objectif étant de faire émerger des temps d'évacuation globaux à partir de temps d'évacuation optimisés pour une somme d'individus. La seconde est la recherche de l'équilibre de Nash : le problème est ici inversé puisqu'il s'agit d'obtenir un temps d'évacuation global le plus réduit possible en optimisant les chemins des personnes qui évacuent. Seule la première approche est ici d'intérêt, puisqu'elle s'inscrit dans une démarche d'observation, plutôt que d'optimisation, à l'instar de ce travail.

L'algorithme classique du calcul d'itinéraire est l'algorithme de Dijkstra (Uno and Kashiyama, 2008). Avec une logique de rationalité complète, l'individu choisit ici à chaque fois la direction qui minimise son temps total de parcours. Cette approche est une application directe des travaux de Zipf (Zipf, 1949; Guy *et al.*, 2010) qui a théorisé le déplacement comme une optimisation de la dépense métabolique. Le comportement de l'individu au sein de son environnement est donc, dans un premier temps, rationalisé à l'extrême : il est considéré qu'il fait le meilleur choix peu importe la situation. L'optimisation des trajets lors d'un processus d'évacuation par utilisation d'algorithmes de plus court chemin fait l'objet de nombreuses contributions. (Bayat *et al.*, 2020) proposent d'y ajouter l'aspect sécurité, en prenant en compte l'inflammabilité des matériaux lors de l'évacuation d'un bâtiment en feu.

Des variantes de ces modèles ont été développées par la suite. Le réseau n'est plus seulement considéré en tant que distance d'un point A à un point B, mais en tant que temps de parcours. Dans les faits, cela se traduit par le développement de modèles ajoutant des variables de pondération aux arcs d'un graphe, des plus simples, tels que la rugosité (correspondant à la densité de véhicules) qui influence le temps de parcours potentiel des usagers, jusqu'à des indicateurs composites. C'est par exemple le cas dans (Nguyen *et al.*, 2019) qui simulent l'évacuation d'un bâtiment à l'aide d'un graphe pondéré par quatre variables : la longueur d'un couloir, la largeur d'un couloir, l'intensité de l'aléa et la densité de personnes présentes. Dans (Wong *et al.*, 2017)

L'itinéraire des personnes est généré de manière itérative en utilisant un graphe pondéré par le nombre de personnes présentes sur chaque segment : les auteurs obtiennent des temps d'évacuation de l'ensemble de la population plus courts à l'aide de cette démarche itérative.

2.3.3 La prise en compte des interactions

La foule, telle que considérée dans ce travail de thèse, à savoir un objet unique formé sur la base d'intrants physiques et psychosociologiques composés d'individus et possédant leurs propres comportements dans l'espace, ne fait pas l'objet de travaux de simulations.

En revanche, de nombreuses méthodes de simulation des interactions entre piétons à l'échelle microscopique sont investiguées dans la littérature scientifique. La plus célèbre contribution en matière de simulation de l'interaction entre piétons en situation de haute densité est celle de (Helbing and Molnár, 1995) avec le modèle de force sociale (SFM) à partir des travaux de (Levin, 1951) ayant théorisé le concept de *social-field*.

Le concept de *social-field* peut se définir par une influence exercée par l'environnement social sur le comportement d'un individu. Le modèle de force sociale définit le mouvement des piétons à travers un équilibre entre trois forces : une force d'accélération, une force de répulsion et une force d'attraction.

La direction du piéton est influencée par la force d'attraction, tandis que la force d'accélération lui permet d'atteindre une vitesse de confort tant que le transect entre sa position et le point vers lequel il est attiré reste libre. Enfin, la force de répulsion contribue à modifier sa vitesse et sa direction pour lui faire éviter les obstacles.

Le modèle de force sociale a été utilisé pour répondre à plusieurs problématiques telles que l'évacuation de plateforme de métro (Li *et al.*, 2014), de bateau lors d'un naufrage (Kang, Zhang and Li, 2019) et a même été adapté pour simuler des flux de vélos (Rui, Tang and Zhang, 2021).

Toutefois, si le modèle de force sociale est efficace pour gérer les interactions physiques entre piétons dans des situations de faible densité, il génère lorsque la densité est élevée une oscillation de ces derniers du fait d'un trop grand nombre de forces s'appliquant dans un même temps (Pecol, 2012).

Il est noté que peu de simulations apportent une réelle solution pour la gestion de la foule en tant qu'objet indépendant. Cela veut dire que le problème est pris à partir de sa composante physique, en oubliant le côté psychologique et social d'une foule. Pourtant, cela est à la fois une opportunité conceptuelle, puisqu'il est question de différencier la foule d'un simple regroupement d'individus, mais également technique, puisque l'implémentation d'une foule comme objet unique permet d'économiser de la puissance de calcul.

I.2.4 Intelligence artificielle distribuée : possibilités et limites.

2.4.1 Les systèmes multi-agents

L'intelligence artificielle distribuée peut faire référence à l'utilisation d'un système multi-agents afin de résoudre des problèmes complexes. Un agent possède trois caractéristiques fondatrices de son état (Chaib-draa, 2001) :

- Il est situé dans un environnement géométrique et ou géographique. L'agent évolue dans un espace borné. Il peut également être lié à cet espace et dépendre ou influencer sur ses caractéristiques (Oliveira, Fischer and Stepankova, 1999) ;
- Il est autonome, l'agent est gouverné par un ensemble de règles qui lui sont propres. La notion d'autonomie peut être discutée, selon le niveau de l'observateur. En effet, un agent est toujours issu d'une construction préalable par l'humain. A l'échelle individuelle, même si l'agent peut développer ou modifier les règles auxquelles il obéit, cela est toujours le fruit d'une implémentation préalable ;
- Il est flexible, ses caractéristiques ne sont donc pas immuables (Rouquier, 2009).

L'intérêt de son utilisation réside dans son aspect collectiviste. En effet, le principe est de reproduire un système (Rouquier, 2009), à l'aide d'entités simples. Cette idée reprend le principe fondamental de la systémique : « un système est supérieur à la somme de ses parties ». Tout modèle à base d'agents s'articule donc autour de deux principes (Drogoul, 1993):

- Le réductionnisme : tant qu'un agent de construction plus simple peut résoudre un problème, il doit être préféré à l'agent plus complexe ;
- L'incrémentalité : la collaboration des agents débouche sur la formation de systèmes complexes possédant des caractéristiques non implémentées au départ (Rouquier, 2009).

La notion d'objet est le concept central sur lequel se fonde la modélisation multi-agents en géographie (Daudé and Langlois, 2006). L'agent représente toujours un élément d'une organisation supérieure (Daudé and Langlois, 2006). L'une des caractéristiques fondatrices des modèles en géographie est ce que l'on appelle l'emboîtement d'échelle (Daudé, 2006). La manière dont des unités élémentaires développent des organisations spatiales à un niveau supérieur devient objet d'étude (Sanders, 2001). Rappelle l'importance du vecteur d'information dans le modèle. En effet, cette information est toujours contenue dans une unité de taille minimale. En préambule du choix de l'échelle d'observation d'un phénomène, il faut donc définir avec quelle finesse l'information va être discrétisée. Appliqué aux évacuations de population, il s'agit donc de simuler les unités de taille minimale d'une telle opération, à savoir les personnes, et d'observer ou non l'apparition d'organisations spatiales de niveau supérieur.

À ces unités de taille élémentaire, est attaché (par programmation) un ensemble d'actions qu'il est possible de réaliser. Cet ensemble d'actions programmées peut être soumis à condition ou non. L'ensemble des actions qui s'actualise dans un environnement donné forme le comportement de l'agent (Drogoul, 1993). La notion de comportement ne renvoie pas à une intelligence, mais à une capacité de discrétiser plusieurs choix et de sélectionner une option selon une connaissance plus ou moins étendue de l'environnement (Daudé and Langlois, 2006). Parmi ces actions exécutables par les unités élémentaires de la simulation, certaines peuvent impliquer des interactions avec d'autres unités élémentaires de la simulation.

Si alors, il est question de l'étude d'un système complexe, dont les entités élémentaires ne suffisent pas à expliquer le fonctionnement global, le système multi-agent devient l'outil de simulation privilégié. En géographie, et dans les sciences sociales en général, il est possible d'avancer que le modèle et par extension la simulation sont utilisés à des fins d'observations ou d'exploration. Ainsi, dans la dichotomie qui était identifiée dans (Bulle, 2007) entre compréhension des processus et optimisation des résultats, il s'agit ici principalement de compréhension du processus. Ainsi, et avant toute chose, simuler et analyser une évacuation en tant que géographe, c'est essayer de dégager une ou des organisations spatiales de niveau supérieur (rapporté aux entités élémentaires de la simulation, en l'occurrence les évacués) (Daudé, 2006). L'objet géographique devient alors élément d'une organisation supérieure (Daudé and Langlois, 2006),

Plusieurs simulations ont donc pour but l'explication et la compréhension. (Banos *et al.*, 2005) s'attache à comprendre les mobilités d'une ville et la manière dont elles varient. Le système multi-agent, que l'on retrouve parfois sous l'intitulé anglophone *agent-based model* est depuis le début du millénaire la méthode la plus utilisée pour simuler des évacuations de population.

2.4.2 Simulation des comportements individuels.

L'incertitude autour des comportements humains lors d'évacuation, et plus généralement dans un contexte de crise est actuellement une préoccupation majeure. Plusieurs méthodes coexistent pour intégrer cette incertitude. La principale distinction entre ces méthodes s'opère autour de la dichotomie entre les approches cognitives et réflexives (ou réactives). Les méthodes réflexives conditionnent la prise de décision au stimuli extérieur. L'agent réagit alors de manière automatique à un événement extérieur. Les réactions possibles sont définies en entrée de modèle, et la combinaison événements / réactions est fixée comme une règle.

Les méthodes cognitives ont pour but d'intégrer la complexité de prise de décision à l'échelle d'un individu. Pour ce faire, il faut alors rendre compte des processus de traitement de l'information par l'individu. Certaines simulations intégrant des agents, intègrent cet aspect décisionnel complexe en reliant chaque agent à un module BDI, pour « *belief* » « *desire* » « *intention* ». Ces modules BDI sont une simplification de travaux et observations mises au jour part dans le domaine de la psychologie.

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. L'architecture BDI permet de doter les agents d'un SMA d'un système décisionnel complexe (Adam *et al.*, 2011). Selon (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 stratégies pour sa propre mise en sécurité (Bonnefoy, Bousquet and Rouchier, 2001). Il s'agit d'une méthode probabiliste.

L'implémentation d'une architecture BDI dans les agents renvoie à une volonté de reproduire l'incertitude autour des comportements observés lors d'évacuations (Singh, Padgham and Logan, 2016). L'approche BDI va rechercher l'émergence d'une typologie de comportements. Pour obtenir cette émergence, les agents vont se voir dotés d'intentions, de désirs et de croyances (Adam and Gaudou, 2016).

Un agent « population » peut alors évaluer la situation sous le filtre de l'information qu'il possède. Il peut choisir ensuite un « plan », les plans sont des séquences d'actions simples mises en œuvre par l'agent. Pour faire ce choix, il peut disposer de critères d'évaluations, des « désirs » : il peut donc sélectionner un plan fonction de ces critères.

Les désirs sont pondérés en fonction des croyances. Ils peuvent prendre la forme d'une représentation informatique des comportements cognitifs des individus face à la manifestation d'un risque (Valentin, 2013).

Les plans représentent des enchaînements d'actions simples, à disposition des agents dotés d'un module BDI. Élément de base d'un tel modèle, les plans doivent être évalués par les agents qui les possèdent.

Les croyances représentent la perception que l'agent a de son environnement. Dans la simulation, cela peut se matérialiser par un niveau de risque perçu (Adam, Beck and Dugdale, 2015). Un agent « population » peut alors adopter une croyance sur le niveau de risque auquel il est exposé durant l'ensemble de la simulation. Il peut aussi, par l'observation d'autres agents du même type ou par la réception d'informations ou de consignes, faire évoluer ses croyances.

Les désirs sont des volontés propres à chacun des agents en démarrage de simulation. Un agent peut souhaiter se trouver dans un état particulier (sain et sauf, proche des membres de sa famille, en train de protéger son habitation, en cours d'activité). Il va donc faire en sorte de remplir cet objectif lors de la simulation. Les agents peuvent avoir plusieurs désirs, ce sont alors leurs croyances qui se fera juge et arbitre des priorités.

Les intentions sont les actions que l'agent va mettre en place afin de satisfaire ses objectifs. Il peut s'agir du choix d'un plan, de la conservation du plan actuel ou d'un changement (Taillandier *et al.*, 2017).

2.4.3 Synthèse : intégration des comportements individuels

L'utilisation d'une architecture BDI présente de nombreux avantages éprouvés, mais soulève deux problématiques dans le cadre de notre sujet d'étude. D'une part, un problème qui s'exprime en coût de calcul. En effet, sur une simulation à grande échelle, le gain de réalisme apporté par le BDI n'est a priori pas suffisamment significatif rapporté au coût de mise en œuvre. Malgré les résultats relativement encourageants obtenus après utilisation de l'architecture BDI, cette dernière n'est pas aujourd'hui un recours systématique lors de la construction d'outils de simulation. Le second problème est posé par les aspects théoriques sur lesquels repose la démarche. (Arnaud, Adam and Dugdale, 2017) exposent en effet toute une série de limites théoriques du BDI, lequel serait bâti sur de la psychologie « naïve » et ignorerait les aspects sociaux du comportement humain.

L'architecture BDI reste cependant considérée comme une alternative crédible afin d'intégrer des comportements humains au sein d'une simulation multi-agent.

Dans le cadre de ce travail de thèse, l'hypothèse est faite qu'une alternative adaptée peut être proposée. La Figure 10 présente deux types de démarches d'intégration des comportements humains dans une simulation. Les deux démarches aboutissent aux mêmes résultats : il s'agit de considérer l'impact d'une typologie de comportements sur une population dans un contexte donné. Pour arriver à ces résultats, deux démarches sont possibles. La première consiste à essayer d'obtenir l'émergence de comportements préalablement observés au sein de la population, en implémentant des agents cognitifs (à l'aide d'un modèle de type BDI par exemple). La seconde consiste à récolter de l'information en amont sur la typologie de comportements associés à un contexte, puis de les intégrer de façon simplifiée dans un modèle. Les deux méthodes permettent finalement d'étudier l'impact de la typologie de comportements.

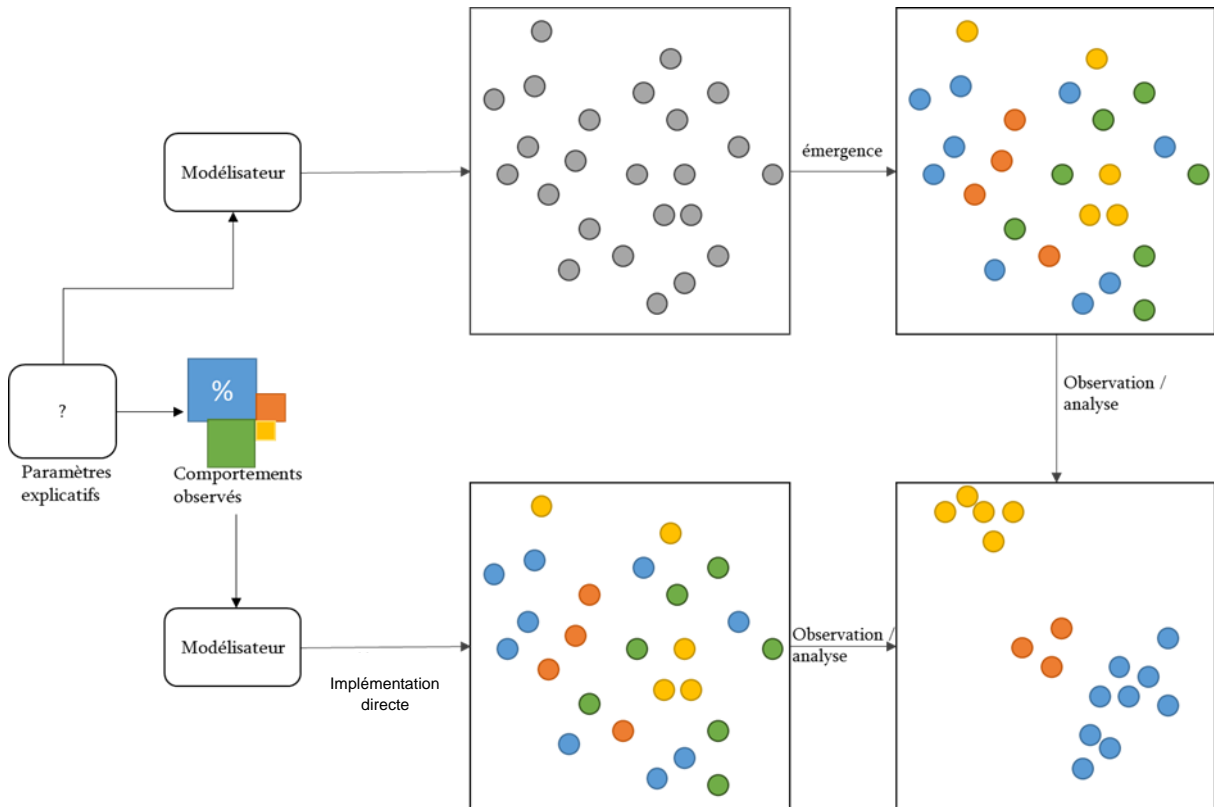


Figure 10 – Différence entre recherche d'émergence et implémentation directe des comportements humains dans une simulation.

L'idée est de montrer dans ce travail de thèse que la recherche d'émergence de comportements spécifiques n'est pas un objectif en soi. Le principal objectif visé est l'intégration de ces comportements et l'étude de leurs impacts sur l'opération d'évacuation de population simulée.

I.2.5 Synthèse

L'état de l'art permet de mettre en évidence plusieurs éléments concernant les pratiques de simulation d'évacuations. Les abstractions inhérentes à une grande majorité de simulations font apparaître une centralisation de ces dernières autour de la population. Pourtant, l'analyse de l'état de l'art permet de constater qu'une évacuation de population est en réalité plus complexe qu'un simple déplacement de population.

En réalité, la multiplicité d'acteurs qui œuvrent de concert au déroulement des évacuations apparaît assez peu. Dans un contexte français, cela se traduit par une quasi-absence d'éventuelles planifications au sein des modèles et simulations (et il a été mis en évidence que dans le cadre d'évacuations massives en France, des planifications sont généralement réalisées).

Cela se traduit également par une absence de la composante gestion de crise de ces mêmes simulations. Il est possible cependant de citer le projet ESCAPE (Daudé *et al.*, 2019) qui ambitionne de transformer une simulation d'évacuation en jeux sérieux à destination des acteurs de la gestion de crise. Cette absence des gestionnaires de la

crise dans les simulations s'exprime par le nombre très réduit de simulations qui prennent en compte la cellule de crise en tant qu'objet instancié (une classe d'agents par exemple) et d'également relativement peu de simulations qui proposent des scénarios d'événements incluant des décisions stratégiques structurantes (fermeture d'axes, séquençages de l'évacuation, etc.).

L'opportunité est alors ici d'au moins intégrer cet aspect sous forme de paramètres pouvant déboucher sur la possibilité de tester plusieurs scénarios d'évacuation, et en perspective d'intégrer la cellule de crise comme un objet d'une simulation.

D'un point de vue technique, la comparaison de plusieurs méthodes de simulation a aussi permis de mettre en évidence une volonté des modélisateurs de prendre en compte les micro-interactions entre piétons et véhicules lors d'une évacuation sur le modèle de travaux réalisés à l'échelle de bâtiments. Depuis les années 2020, de nombreux travaux adaptant des méthodes de gestion des interactions locales (surtout entre piétons) adaptés à des territoires plus larges ont émergé. La volonté est ici de s'écarter des environnements discrétisés comme supports de simulation des déplacements (*grids* par exemple).

L'état de l'art met également en évidence les questionnements que soulève la simulation de mobilités piétonnes à l'échelle d'une ville. Du fait de la quantité de personnes pouvant potentiellement être concernées, les questionnements ont trait aux domaines de la simulation de foules, avec la nécessité d'intégrer les interactions physiques entre piétons. En supplément, la réalisation d'une évacuation dans un environnement urbain amène également des questions relatives à la simulation de mobilités à l'échelle macroscopique. La gestion des itinéraires, le choix de la destination, ou encore la multimodalité éventuelle des déplacements doivent donc être étudiée.

Il est donc pertinent d'investiguer les possibilités d'élaborer une méthode qui réponde au cahier des charges suivant :

- Considérer les mobilités comme s'inscrivant dans le cadre d'une évacuation de population, menée par une cellule de crise, qui s'appuie elle-même sur des supports institutionnels.
- Inclure une série de paramètres relatifs aux incertitudes identifiées précédemment. L'idée est de permettre de simuler et comparer un ensemble de scénarios, incluant des variations de contexte, de gestion de la crise, et de comportements des individus.
- Intégrer une gestion des interactions physiques. L'utilisation du SFM n'étant pas obligatoire, l'implémentation d'une « existence physique » des personnes est en revanche primordiale. Une simulation sans cela ne serait alors qu'une simple matrice origine-destination, réalisable à l'aide d'outils géomatiques.
- Être adapté à un contexte urbain. Cela inclut la prise en considération de stratégies d'itinéraires, de choix de destinations, mais également la prise en compte de la forme de l'espace urbain et de son impact sur les déplacements.

CHAPITRE 2

METHODOLOGIE PROPOSEE POUR LA SIMULATION DES EVACUATIONS

II.1	Démarche de modélisation	58
II.1.1	Objectifs et exigences du modèle	58
1.1.1	Du réel vers l'abstraction.....	59
1.1.2	Faire le lien entre l'évacuation et la simulation d'une évacuation.....	65
1.1.3	La base du modèle	69
II.1.2	Choix des paramètres et de leurs valeurs.....	75
1.2.1	Les paramètres de sortie des bâtiments (B).....	77
1.2.2	Les paramètres d'impact sur la vitesse (V).....	81
1.2.3	Les paramètres d'itinéraire (D).....	84
II.1.3	Synthèse, le diagramme de classe	87
II.2	Architecture de la simulation	89
II.2.1	Principales classes d'agents de la simulation	90
2.1.1	La classe « People ».....	90
2.1.2	La classe « Buildings »	92
2.1.3	La classe « Road »	92
II.2.2	Paramètres ayant pu être implémentés	93
2.2.1	Implémentation du paramètre B1	93
2.2.2	Implémentation du paramètre B2	94
2.2.3	Implémentation du paramètre B3	97
2.2.4	Implémentation du paramètre V2	99
2.2.5	Implémentation du paramètre D1	100
2.2.6	Implémentation du paramètre D2.....	101
II.2.3	Paramètres n'ayant pas pu être intégrés	104
2.3.1	Le paramètre V1	105
2.3.2	Le paramètre V3.....	105
2.3.3	Le paramètre D3.....	106
II.2.4	Simulation d'une évacuation préventive, synthèse.....	107

II METHODOLOGIE PROPOSEE POUR LA SIMULATION DES EVACUATIONS

L'état de l'art réalisé dans le chapitre précédent a permis de comparer différents modèles de simulation d'évacuation de population. Plusieurs éléments de réflexion ont été mis en évidence.

Les évacuations piétonnes sont majoritairement simulées à l'échelle du bâtiment. À une échelle plus grande, les travaux prenant en compte les piétons sont plus rares. Les évacuations de bâtiments et les évacuations à l'échelle d'une ville soulèvent des questions différentes. Toutefois, une évacuation piétonne à l'échelle d'une ville est susceptible de soulever des questions inhérentes aux deux échelles.

Du fait de leurs structures, les systèmes multi-agents peuvent être mobilisés pour construire un modèle de simulation intégrant l'ensemble de ces questions. Ainsi, avant de construire un système multi-agent, il est impératif de formaliser le modèle, puis de définir son architecture informatique. Dans cette section, nous commencerons par exposer la méthodologie de conception du modèle, suivie de la présentation de l'architecture informatique nécessaire pour sa mise en œuvre en simulation.

II.1 Démarche de modélisation

La démarche de modélisation s'ancre sur une étude d'événements précédents. Tout en reconnaissant les variations observées entre ces événements, la méthodologie vise une convergence. À travers les caractéristiques invariables que l'on retrouve dans ces différents événements, l'objectif est d'en extraire un socle. Autrement dit, obtenir un modèle simple, capable de saisir, représenter, et instancier les éléments principaux d'une évacuation de population, mais également ouvert à l'amélioration et l'ajout de nouvelles caractéristiques.

II.1.1 Objectifs et exigences du modèle

La réalisation d'exercices d'évacuation sur de grandes échelles est difficile d'un point de vue logistique. De plus, ces exercices demeurent majoritairement centrés sur les organisations en charge de la gestion de crise. La population est donc rarement impliquée. Ce constat contribue à générer une incertitude importante autour de la mise en place de telles opérations. Le développement d'un outil de simulation numérique représente donc une opportunité de tester le processus, et d'y impliquer la population. Les deux démarches sont complémentaires.

La modélisation d'une évacuation à l'échelle urbaine implique une compréhension détaillée du processus : quels sont ses acteurs ; qui joue quel rôle ; quels sont les enjeux concernés (ici la population) ; comment les civils vont réaliser cette évacuation ? Une évacuation de population concerne plusieurs catégories d'acteurs. Ces acteurs interagissent entre eux afin de conduire l'évacuation. Elle implique également une série de paramètres contextuels. Ces derniers exercent également une influence sur les acteurs de l'évacuation. Lors d'une évacuation, la population concernée s'organise dans l'espace afin de respecter une exigence de mise en sécurité. En plus d'une

interaction entre différents types d'acteurs, l'évacuation engendre également des interactions entre acteurs d'un même type.

L'objectif de cette section est de caractériser l'évacuation de population au travers de ses principales propriétés. L'approche adoptée s'inspire de l'analyse de systèmes. Au lieu d'opter pour une perspective descendante (top-down) pour appréhender les évacuations, notre démarche cherche à identifier les principaux acteurs, paramètres et leurs interactions, en cherchant une reproductibilité optimale. La première partie de cette section rappelle les objectifs et les questions sous-jacentes à la démarche de modélisation proposée dans ce travail. La seconde partie détaille et catégorise les principales incertitudes rencontrées lors des évacuations de population et initie la réflexion portant sur leur intégration au sein du modèle.

1.1.1 Du réel vers l'abstraction.

Pour qu'un modèle soit pertinent, il doit se rapprocher d'une réalité envisageable. En effet, si le modèle peut être, et se trouve souvent être, l'abstraction d'un phénomène (un processus...), les éléments dont il est composé (concepts ou objets) doivent être intrinsèques à ce qu'il prétend représenter. Sinon, le risque est d'obtenir un modèle non-fonctionnel, apportant de l'information inutile. Si le principe d'abstraction est acceptable en modélisation, l'ajout de propriétés ou de concepts qui n'appartiennent pas, et ne peuvent pas appartenir, à l'objet que l'on modélise constitue une erreur. Il est une exigence relative au modèle, la définition claire de son utilisation, ou de son but. S'il est considéré qu'un modèle doit servir un but, ce but doit être spécifié de manière claire avant le démarrage de la conception du modèle. L'utilisation du modèle dirige ensuite la construction de ce dernier.

II.1.1.1.1 Rappel : objectifs de la démarche

La démarche adoptée dans ce travail relève d'un constat simple : les simulations numériques d'évacuation de population peuvent être utilisées afin d'apporter de l'information en amont du déclenchement d'une telle opération. Le cadre se construit autour des évacuations préventives incluant une quantité significative de déplacements piétons. Les évacuations de population soulèvent des questions portant sur leurs processus (étapes, acteurs décisionnaires, contextes spatio-temporels), mais également sur les déplacements piétons et leur coexistence spatiale.

Parmi l'ensemble des évacuations de populations ayant pu être observées, il existe des caractéristiques systématiquement relevées. L'ensemble d'entre elles inclut un espace, il peut s'agir d'un espace clos tel qu'un bâtiment, ou de territoires plus vastes. Il est toujours question de mobilités de personnes. Cependant, là encore, il peut s'agir de mobilité de ménages ou d'individus. Elles incluent toujours un déplacement physique, mesurable.

Ces éléments ne suffisent pourtant pas, dans la majorité des cas, à décrire une évacuation de population. En réalité, ce sont des éléments que l'on pourrait également mettre en évidence dans la modélisation des mobilités sans urgence particulière. Les évacuations de populations incluent une série d'éléments supplémentaires. Ces éléments ne sont pas systématiques, mais peuvent être observables dans une grande proportion de cas. Il peut s'agir par exemple de l'existence de règles ou consignes

relatives à l'évacuation. Il peut également s'agir d'éléments plus rares, tels que la destruction d'une partie des voies de communications. Une évacuation de population prise à part est toujours composée d'une partie de ces éléments, en plus de ceux systématiques, constituant leur essence intrinsèque.

Dans l'articulation de la démarche scientifique suivie dans ce travail, il est important de mettre en évidence la différence entre l'abstraction et la généralisation. L'abstraction consiste en une sélection et une isolation des éléments d'un processus. La généralisation, c'est l'utilisation du travail d'abstraction afin de proposer une représentation des principaux éléments et de la nature de leurs relations pouvant être applicable dans une majorité de cas.

Face à des événements dont la structure et le résultat peuvent largement différer d'une instance à une autre, il faut en extraire un modèle synthétique, reproductible et adaptable. L'objectif est de construire ce modèle à partir de ces éléments et de leurs relations. Il est ensuite question de traduire les éléments de ce modèle en une architecture informatique adaptée aux spécifications d'un système multi-agent.

II.1.1.1.2 La reproductibilité du modèle

La recherche scientifique conditionne toujours la valeur d'une avancée à la reproductibilité de son protocole expérimental. Cet aspect de la recherche permet d'ouvrir la réflexion sur la reproductibilité de la démarche présentée dans ce travail de thèse.

Le modèle est issu d'une réflexion en amont sur un corpus d'articles et de reconstitutions d'événements, ayant abouti à une généralisation des opérations d'évacuation de population. La partie expérimentale se veut ici être l'instanciation de ce modèle et l'exploration des résultats obtenus.

L'intérêt est ici d'imaginer une généralisation d'une évacuation de population qui puisse être reproductible sur différents territoires. Sous un autre aspect, le modèle proposé doit être également suffisamment proche d'une réalité possible pour en devenir crédible.

D'un côté, les modèles généraux. D'un haut niveau d'abstraction, ils sont construits autour d'éléments fondamentaux d'un processus ou d'un système. Un tel modèle, peu spécialisé, pourrait être approprié dans des contextes très variables. Appliqué à la modélisation d'une évacuation, cela reviendrait à obtenir un modèle générique, mobilisable dans différents contextes géographiques et sur différentes typologies d'événements. Un modèle trop général ne peut décrire un phénomène particulier. L'ensemble des éléments le composant font partie du cas particulier. Cependant, ils ne suffisent pas à le représenter. L'information fournie par un tel modèle n'est pas fautive en soi, les éléments du modèle ne sont pas exotiques au cas d'application, mais fautive par fonction. Elle est inutile d'un point de vue opérationnel, mais peut l'être d'un point de vue scientifique.

À l'opposé du modèle général, le modèle opérationnel. Ici, il est question de s'adapter au maximum à une réalité possible. Forcément, la proximité du modèle avec une réalité, le rend difficilement mobilisable sur d'autres. Rapporté à la problématique de la modélisation d'une évacuation, il est question ici de modèle permettant de répondre

à une question spécifique, dans un contexte donné. Un tel type de modèle est utile d'un point de vue opérationnel (il fournit de l'information sur un cas particulier). D'un point de vue scientifique, il peut l'être s'il permet de soulever des questions générales. Une démarche de modélisation appliquée à un cas particulier peut en effet poser de nouvelles questions indépendantes du cas d'application. Il s'agit donc de trouver un équilibre entre deux extrêmes.

La Figure 11 schématise la recherche d'équilibre entre deux extremums qui empreigne systématiquement les démarches de modélisation :

La partie droite représente le modèle dans son abstraction la plus totale. Les principaux éléments d'un phénomène sont identifiés, hiérarchisés, et les plus importants sont sélectionnés. Le processus de sélection des éléments importants est plus fort dans un modèle plus abstrait. Un niveau d'abstraction plus élevé signifie d'une part un éloignement d'une seule réalité concrète et complexe, mais également la plus grande adaptabilité d'un modèle à des réalités diverses, avec un degré d'éloignement de ces réalités plus important.

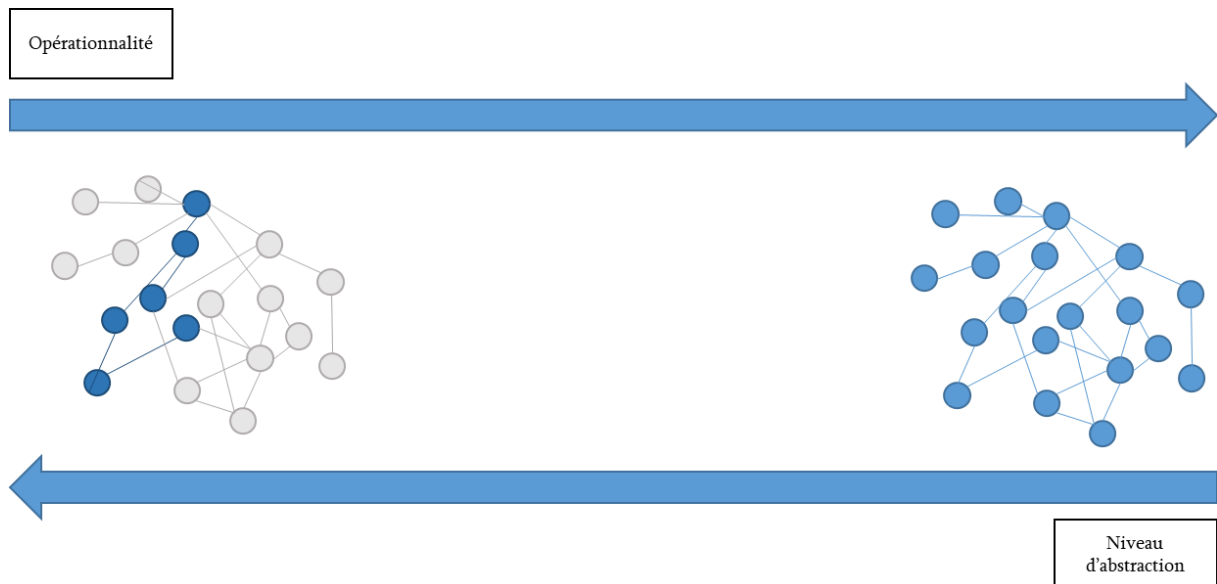


Figure 11 – Opérationnalité et abstraction.

Appliqué à une problématique territorialisée, par exemple, cela reviendrait à abandonner les spécificités du territoire dans un modèle, afin de pouvoir l'utiliser de manière générique, sur plusieurs zones d'études. Cette adaptabilité d'un modèle à un ensemble de réalités plus variées présente cependant le désavantage de l'éloigner finalement de toutes ces réalités, parfois fatalement, si bien qu'en dépit d'une grande généralité, certains modèles ne sont tout simplement pas suffisamment voire pas du tout utiles.

La partie gauche de la Figure 11 représente l'autre extrémité de l'opposition ici présentée. Un modèle pourrait hypothétiquement se rapprocher du concret. Un modèle proche du concret possède l'avantage de pouvoir décrire avec grande précision une réalité. Cependant, la reproductibilité s'en trouve diminuée. Le modèle n'est plus générique, mais opérationnel. Appliqué à une problématique territorialisée,

cela revient à pouvoir mobiliser un tel modèle afin d'appuyer les politiques publiques. L'information en sortie d'un tel modèle, adapté à un contexte et à un territoire, peut être utilisée comme support afin de prendre des décisions.

Dans le cadre de ce travail, la question du positionnement du modèle entre opérationnalité et reproductibilité est posée. Ainsi, il s'agit de comprendre à quel niveau de complexité les évacuations préventives doivent être modélisées pour répondre à notre problématique. Entre les éléments que l'on observe systématiquement, ceux que l'on pourrait observer dans une majorité de situations, et ceux que l'on pourrait observer dans une minorité de situations, il faut se positionner.

L'objectif est de proposer un modèle suffisamment général pour être reproductible à différents contextes en y intégrant les éléments spécifiques du cas d'application. Le positionnement est donc plus orienté vers la généralité, les éléments adaptés à dessein de l'application seront donc mis en évidence dans ce manuscrit. Cela permet une suppression ou modification de ces éléments pour revenir à un modèle général.

II.1.1.1.3 La démarche d'analyse

La construction du modèle a nécessité l'adoption d'une démarche analytique. Les sources de données sont diverses. Il s'agit parfois d'une simple reconstitution d'un événement à partir de coupures de journaux ou de témoignages. L'objectif de l'analyse est de faire émerger les principales caractéristiques d'une évacuation de population. Les événements sont alors abordés au travers de trois questionnements :

- **Quels en sont les acteurs et les composantes ?** L'objectif étant de comprendre quelles sont les personnes ou les groupes de personnes qui ont le pouvoir de modifier le cours d'une évacuation de population. Ces personnes peuvent-elles être rassemblées au sein de classes ou de groupes plus larges, partageant des caractéristiques communes ?
- **Quelles capacités d'actions possèdent les acteurs ?** Une fois le ou les principaux groupes d'acteurs identifiés, il faut alors délimiter leur capacité d'action. Comment peuvent-ils influencer l'évacuation de population ?
- **Quels peuvent être les comportements de ces acteurs ?** Les différents groupes d'acteurs peuvent posséder une capacité d'action au cours de l'évacuation. Cependant, la possibilité de réalisation d'une action ne signifie pas sa mise en place systématique.

Cette grille de lecture a permis la mise en évidence de deux catégories d'acteurs. Ces acteurs peuvent agir sur l'évacuation de différentes manières. Une incertitude importante autour de l'effectivité de ces actions existe cependant.

La population en constitue le premier groupe, et dans ce travail, le plus important. La population, lors d'une évacuation, a pour mission sa propre mise en sécurité. La population est systématiquement incluse dans une opération d'évacuation. Elle peut mettre en place des actions, prendre des décisions. Elle constitue une classe d'acteurs homogène en vertu de ces éléments. En revanche, son comportement n'est pas monolithique.

Les individus disposent d'une gamme d'actions possibles qu'ils peuvent choisir d'entreprendre ou d'ignorer à un moment donné. Le choix d'exécuter ou de ne pas exécuter certaines de ces actions forme leur comportement. Ainsi, le comportement est la manifestation concrète des décisions individuelles face aux options disponibles (Figure 12). Considéré comme une classe d'acteurs de l'évacuation, le comportement de la population est donc incertain.

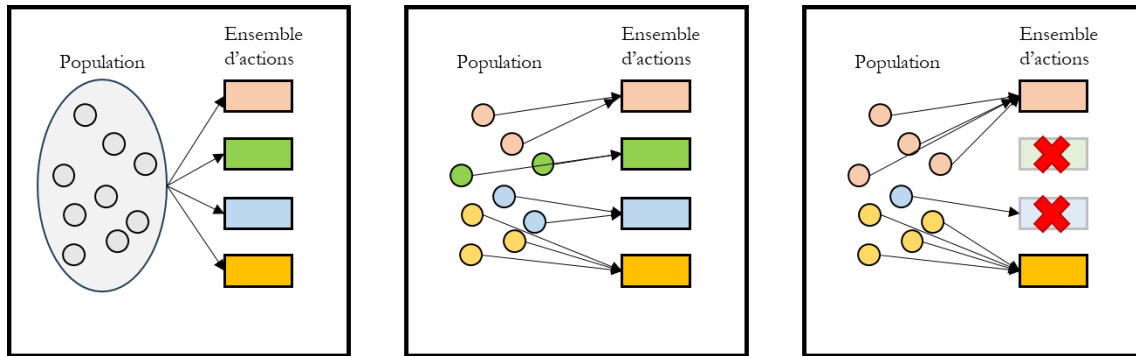


Figure 12 - Incertitude autour du comportement de la population

La Figure 12 illustre la manière dont la population est conceptualisée dans ce travail. La population est constituée d'individus. Ils ont en commun un ensemble d'actions qu'ils peuvent entreprendre. Cet ensemble d'actions est conçu comme un champ des possibles. Une action n'ayant jamais été entreprise par un individu lors d'une évacuation ne fait donc pas partie de cet ensemble.

Lors d'un événement concret, les individus vont entreprendre certaines de ces actions. Tous les individus ne vont cependant pas mettre en place toutes les actions. Par exemple, si l'on considère une population en pleine possession de ses moyens physiques, l'ensemble des individus peut se déplacer. Pourtant, il est régulièrement observé, lors d'évacuations de population, un refus d'effectuer ce déplacement, par des personnes pourtant en mesure de le faire.

Parmi les actions pouvant être mises en place, certaines sont systématiquement observées, d'autres le sont plus rarement. Dans une logique de modélisation, les actions faisant l'objet d'observations régulières et ayant un impact significatif sur le processus d'évacuation d'une personne sont conservées. Également, il est possible d'imaginer une infinité d'actions pouvant être systématiquement observées lors d'une évacuation. Toutefois, certaines d'entre elles peuvent ne pas avoir d'impact sur la performance globale de l'opération. Dans notre démarche, elles ne sont alors pas conservées.

L'organisation en charge de la gestion de crise est la deuxième catégorie d'acteurs identifiée. La cellule de crise peut être considérée comme un ensemble de personnes, ayant un pouvoir décisionnel sur le processus d'évacuation. Ces personnes travaillent de concert, échangent des informations et prennent des mesures en collégialité afin d'organiser l'évacuation des personnes. Ici, la cellule de crise n'est considérée qu'au travers des décisions qu'elle prend lors d'une évacuation. Elle est en réalité bien plus que cela, et la pertinence de ces décisions relève d'un ensemble de facteurs humains dont le détail pourrait faire l'objet d'un travail de recherche à part entière. La cellule

de crise intervient régulièrement lors d'évacuation de population. Elle possède un panel d'actions possibles, au même titre que les évacués.

Ces deux catégories d'acteurs sont complétées par une composante, le contexte. Le contexte inclut l'ensemble des éléments ayant un impact sur les évacuations de population n'étant pas du ressort de l'humain. Cet aspect permet de les regrouper en une catégorie homogène. Il s'agit d'éléments échappant au contrôle des acteurs humains.

II.1.1.1.4 Trois incertitudes

Autour d'un déplacement systématique des populations depuis une zone menacée vers une zone sûre, les évacuations de population se caractérisent suivant des aspects plus ou moins génériques. Comme mentionné dans la section précédente, deux classes d'acteurs et une composante (la population, l'organisation en charge de la gestion de crise et le contexte spatio-temporel de l'évacuation) sont ici considérées. Ces classes d'acteurs sont communes à l'ensemble des évacuations de population investiguées. Ces classes d'acteurs possèdent un panel d'actions pouvant impacter une opération d'évacuation de population. En revanche, la mise en place ou l'observation de ces actions lors d'un événement n'est pas systématique. Leur comportement est donc empreint d'incertitude.

La composante contextuelle peut également impacter l'évacuation. Le comportement et l'existence des différents facteurs de cette composante est tout aussi incertain. Ces deux groupes d'acteurs et la composante de contexte forment donc un ensemble de trois catégories. Pour alléger le propos, elles seront par la suite nommées catégories d'éléments, le terme étant plus général et donc plus adapté.

La Figure 13 présente les principales catégories d'éléments impactant les opérations d'évacuations de population. Chacune de ces catégories d'éléments peut contribuer à modifier la trajectoire d'une opération d'évacuation préventive de population, depuis un déroulement idéal, jusqu'à un déroulement non souhaité. Non seulement ces catégories d'éléments génèrent une modification de la trajectoire de l'opération, mais en plus de cela, ils sont cumulatifs. L'incertitude générée par ces catégories d'éléments existe donc d'une part en tant que telle, mais également par l'incertitude globale cumulée qu'elle peut générer.

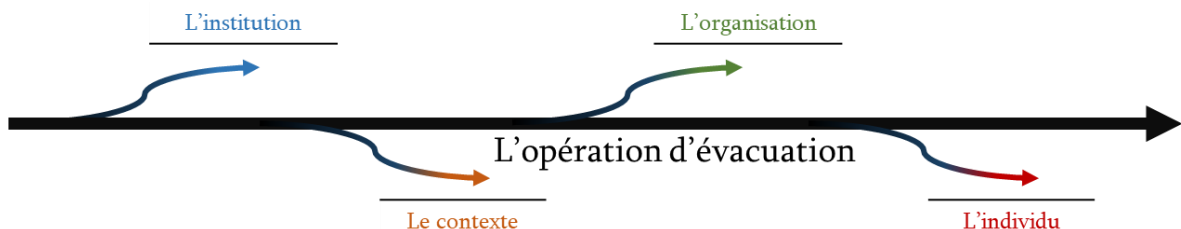


Figure 13 – Vue globale schématisée des facteurs impactant une opération d'évacuation de population

La Figure 14 schématise le cumul des incertitudes. L'important est ici de comprendre que l'évacuation préventive de population est menée grâce à une collaboration de groupes d'acteurs, dans un contexte particulier. Ces acteurs peuvent réagir de plusieurs manières, générant une incertitude propre à chacun. Le cumul de ces incertitudes peut mener à une infinité de trajectoires possibles pour une seule opération d'évacuation (Figure 14).

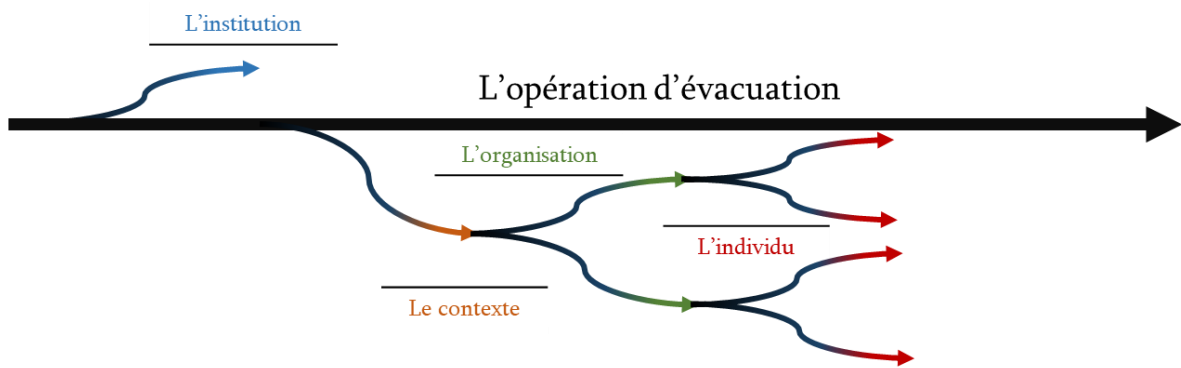


Figure 14 - Vue globale schématisée de l'impact cumulé des principaux groupes de facteurs impactant

Le travail de modélisation proposé a vocation à être instancié sous la forme d'une simulation à base d'agents. Cela nécessite une adaptation des éléments mis en évidence dans le premier chapitre, afin de les rendre intégrables dans une simulation informatique. Plus simplement, il est maintenant question de transformer des observations et des hypothèses en paramètres informatiques.

1.1.2 Faire le lien entre l'évacuation et la simulation d'une évacuation

Les éléments pouvant impacter une opération d'évacuation de population ont été listés et regroupés en trois grandes catégories. Ce travail de thèse propose d'intégrer ces éléments dans un modèle puis de les instancier dans une simulation dynamique. Cela ouvre la question de la transformation de ces éléments identifiés en éléments d'un modèle, puis en paramètres d'une simulation. Cela soulève la question de l'instanciation de chaque élément dans une simulation.

II.1.1.1.1 Intégrer les incertitudes liées au contexte dans le modèle d'évacuation

L'ensemble des éléments de l'évacuation n'étant ni de l'initiative des personnes en charge de l'organisation, ni de l'initiative des personnes qui évacuent sont considérés comme appartenant au contexte.

Parmi ces éléments de contexte, se trouve l'ensemble des caractéristiques relatives à l'aléa (intensité, extension spatiale, durée...). Dans ce travail de thèse, il est question d'une évacuation préventive déclenchée avant l'aléa et un large spectre d'aléas peut entraîner le déclenchement d'une évacuation préventive. Ces aléas possèdent en commun la caractéristique de pouvoir être détectés en amont de leurs impacts sur une zone menacée. Certains aléas peuvent être détectés plusieurs jours avant impact, c'est

le cas de certains ouragans, par exemple. Dans d'autres cas le délai entre la détection et l'impact de l'aléa sur un territoire est beaucoup plus court, quelques heures par exemple dans le cas d'une rupture de barrage.

Certaines catégories d'aléas auxquelles appartiennent les ruptures de barrages et les tsunamis, par exemple, peuvent également survenir de façon découpée. Dans le cas d'un tsunami, un tremblement de terre peut précéder l'arrivée de la vague, ce qui peut entraîner le déclenchement d'une évacuation préventive en situation initiale déjà dégradée (Plattard, 2017). Dans le cas d'une rupture de barrage, la pluviosité sur la zone d'impact peut générer une crue préalablement ou pendant l'évacuation (Orengo, Tena-chollet and Sauvagnargues, 2022). Ce sont des éléments qui font donc partie du contexte de l'évacuation, et qu'il convient de prendre en compte dans un modèle.

L'évacuation de population s'inscrit toujours dans un contexte spatio-temporel. Le contexte spatial fait référence au territoire menacé, sur lequel l'évacuation s'inscrit. Les caractéristiques du territoire ont un impact direct sur des éléments fondamentaux de l'évacuation (comme le déplacement des personnes). Avec le contexte temporel variant, c'est l'état initial du territoire qui en devient incertain. Un même événement sur différentes temporalités peut donc entraîner différentes conséquences principalement parce que le territoire touché ne sera pas exactement le même. La cinétique rapide du potentiel aléa pose donc la question de l'état du territoire au moment même de l'alerte. En effet, le territoire ne peut pas suffisamment se prémunir de telle sorte que les différences liées à la variation du contexte temporel soient gommées.

Le modèle présenté doit donc prendre en compte l'impact de ces deux éléments de contexte sur l'évacuation. L'intégration du contexte spatial passe par l'implémentation de caractéristiques territoriales pertinentes. Il s'agit de caractéristiques de formes urbaines nécessairement. Il peut également s'agir de caractéristiques sociales, relatives aux comportements collectifs voire individuels, si on les considère liées au territoire. Trop peu d'éléments permettent de caractériser la nature de ces différences ici sans multiplier les hypothèses. Ce travail se limite donc au territoire sous son aspect physique.

Les éléments intégrés dans le modèle de simulation considérés comme appartenant au contexte sont les suivants.

La cinétique de l'aléa : même si les évacuations préventives sont initiées avant la survenue d'un aléa, certains aléas sont multiphasiques. Avant que l'événement majeur ne se produise et ne déclenche l'évacuation, des manifestations préliminaires ou des phases moins intenses de l'aléa ont déjà pu impacter le territoire. Cette nature séquentielle et multiphasique de certains phénomènes naturels peut donc présenter des défis supplémentaires en matière de gestion et de déroulement des évacuations.

La situation météorologique : les conditions météorologiques jouent un rôle essentiel dans la mobilité des populations lors d'évacuations. Des conditions climatiques défavorables, telles que des pluies torrentielles, des vents violents ou des températures extrêmes, peuvent entraver la circulation, réduire la visibilité et augmenter le temps de déplacement. Ainsi, la météo ne constitue pas seulement un

fond sur lequel se déroule l'évacuation, mais un acteur central qui peut grandement influencer les décisions, la logistique et l'efficacité des mouvements de population.

Temporalité de l'évacuation : la temporalité de l'évacuation est un élément crucial qui détermine l'état d'un territoire et influence grandement la position des individus lors de la mise en œuvre des mesures d'urgence. En fonction de l'heure à laquelle une évacuation est déclenchée, que ce soit en pleine nuit, durant les heures de travail ou lors de moments de loisirs, la répartition des personnes au sein du territoire varie considérablement. Par exemple, une évacuation ordonnée en milieu de journée pourrait voir de nombreux habitants loin de chez eux, soit au travail, à l'école ou dans d'autres établissements. À l'inverse, une alerte donnée en pleine nuit pourrait surprendre les individus dans l'intimité de leurs foyers. Ainsi, la temporalité de l'évacuation, en influençant la dynamique du territoire, joue un rôle déterminant dans la gestion et la réussite de l'opération.

II.1.1.1.2 Intégrer les incertitudes liées à la prise de décision dans le modèle d'évacuation

L'organisation telle qu'entendue dans le modèle désigne la cellule en charge de gérer la crise. L'organisation se définit principalement par les décisions qu'elle prend lors d'une opération d'évacuation de population. Ces décisions sont coordonnées dans un but précis, la gestion de la crise. La thèse de (Hamon 2023) démontre un fort impact de ces décisions sur la gestion d'une crise. Les décisions prises peuvent être évaluées. Bonnes ou mauvaises, elles impactent donc le processus d'évacuation dans son ensemble. Le travail cité propose alors d'étudier la possibilité, lors d'exercices de gestion de crise, de rejouer certaines parties ayant été structurantes dans le déroulé de la crise. Cela démontre donc qu'il est possible de modifier le cours d'une évacuation lorsque l'on modifie les décisions prises par l'organisation en charge de la gestion de crise. La cellule de crise possède un certain nombre d'attributions lorsqu'il s'agit d'organiser une évacuation. Les deux suivantes sont prises en compte dans le modèle.

Le déclenchement de l'alerte : la temporalité du déclenchement de l'alerte revêt une importance capitale lors d'une évacuation. En effet, un préavis suffisamment long permet non seulement de maximiser la préparation et la mobilisation des ressources, mais aussi de garantir une meilleure coordination des actions et une évacuation plus ordonnée des populations. Un délai adéquat donne la possibilité aux habitants de se préparer mentalement, de rassembler des biens essentiels et de prendre des dispositions pour les personnes vulnérables. En revanche, une alerte tardive ou précipitée peut engendrer quiproquos, panique, confusion et congestion, exacerbant ainsi les risques.

L'émission de consignes : la cellule de crise doit, tout au long de l'évacuation, informer la population. Cette information comprend des consignes à appliquer afin de se déplacer en sécurité et dans les meilleurs délais. En théorie, les évacuations de population de grande envergure ont fait l'objet d'études en amont, contribuant à formaliser ces consignes dans des documents à destination de la population. Toutefois, le caractère crisogène de certains événements tend à générer de l'incertitude autour de l'évolution d'une situation. Les consignes doivent donc parfois être adaptées aux spécificités d'un événement. Le modèle se voulant général, cet

aspect se matérialise assez peu dans le modèle en l'état. Cependant, il s'agit d'un aspect largement intégré à la réflexion tout du long de ce travail.

II.1.1.1.3 Intégrer les incertitudes liées aux individus

Il existe une dernière incertitude lors de l'opération d'une évacuation de population, c'est la population elle-même. L'incertitude autour de la population se situe principalement autour du comportement adopté par cette dernière. Cette incertitude se traduit par deux axes majeurs de consolidation des connaissances par la recherche. Le premier axe consiste en la compréhension des comportements pouvant être adoptés lors d'une évacuation de population. Cela débouche sur des typologies. Le second axe concerne la caractérisation de ces comportements, au travers de facteurs explicatifs. Les principaux questionnements se situent au niveau de la caractérisation des comportements des populations en situation de crise.

Ici, la démarche adoptée n'a pas pour objet la recherche de facteurs explicatifs des comportements individuels lors d'une évacuation. En revanche, un certain nombre de ces comportements ont été observés lors de nombreux événements passés, et peuvent avoir un impact significatif sur la performance globale de l'évacuation et peuvent également mettre en danger les individus concernés. Alors, dans une logique de simulation, ces comportements individuels doivent être inclus. Ici, il s'agit d'un positionnement scientifique en aval du « pour quelles raisons » des personnes adoptent un quelconque comportement. La question devient alors : comment intégrer ces comportements au sein d'une simulation et mesurer leurs impacts sur une opération d'évacuation ?

Les comportements intégrés dans le cadre de ce travail sont les suivants.

La non-évacuation des personnes : une partie des personnes peut refuser l'évacuation pour diverses raisons. En réalité, cela est systématiquement observé lors d'évacuations de population. Bien évidemment, il s'agit ici d'un comportement dont les conséquences néfastes ne portent que sur l'individu ou le groupe qui l'adoptent ;

La mauvaise compréhension des consignes d'évacuation : les personnes, une fois qu'elles ont décidé d'évacuer, doivent le faire en respectant les consignes d'évacuation, lorsque ces dernières sont spécifiées. Par méconnaissance ou non-compréhension de ces dernières, des comportements s'éloignant des consignes données peuvent être observés.

Les délais de préparation : une fois les consignes d'évacuations reçues, comprises et acceptées par les populations, un délai est observé entre la réception et le départ effectif vers l'abri. Ce départ a pour conséquence une répartition temporelle variable des évacués sur le réseau.

En synthèse, plusieurs facteurs sont retenus pour constituer un modèle de simulation à la fois générique et transposable et intégrant les constituants déterminants lors d'un processus d'évacuation préventive (cf. Figure 15).

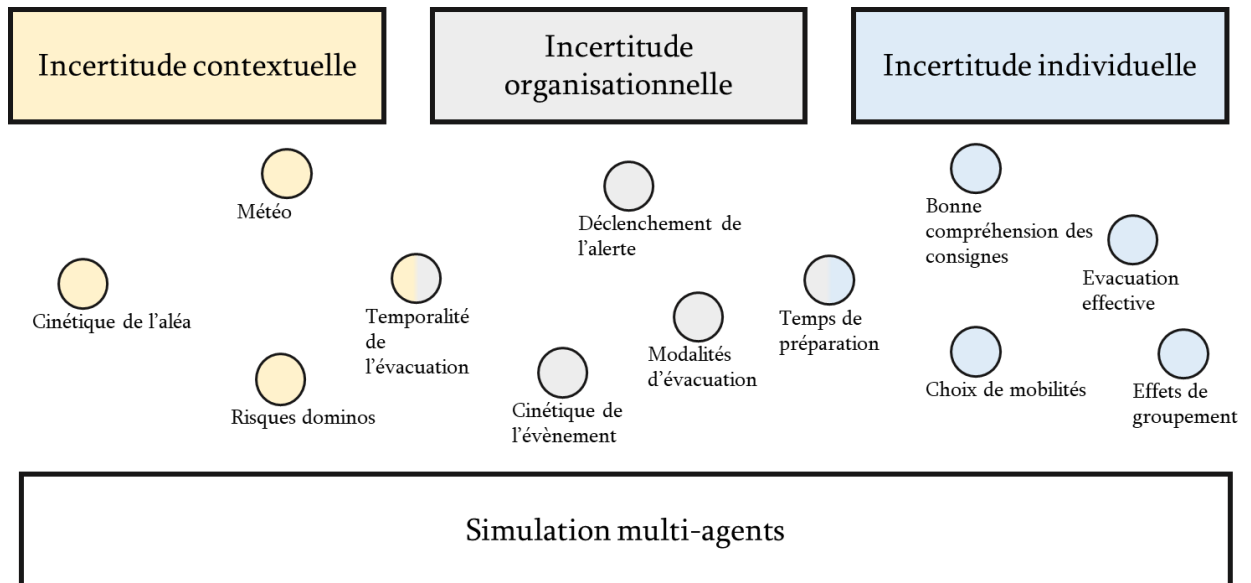


Figure 15 – Principaux points d'incertitudes observés lors d'évacuations de populations

Trois familles d'incertitudes sont définies. Chaque famille d'incertitudes regroupe des éléments pouvant dégrader une opération d'évacuation de population. Dans le cadre de la construction d'un modèle d'évacuation de population ayant pour finalité d'être implémenté dans une simulation, il s'avère nécessaire d'étudier l'impact de ces éléments et de leur variation sur une opération d'évacuation. Il faut donc d'une part les caractériser, et d'autre part les adapter au sein d'une architecture informatique, qui suppose une définition claire d'objets et d'interactions.

1.1.3 La base du modèle

Parmi les nombreux outils utilisés afin de simuler la mobilité des personnes et par extension les évacuations de populations, ce travail propose une approche basée sur un système multi-agents. Les systèmes multi-agents appartiennent à la catégorie d'outils de l'intelligence artificielle distribuée. Intelligence artificielle puisqu'ils permettent le rendu de comportements à différents niveaux de complexité. Distribuée, puisqu'ils permettent également la construction de simulations décentralisées. Ces deux aspects en font un outil pertinent lorsqu'il s'agit de simuler des mobilités et plus encore, des mobilités en contexte d'évacuation.

Plusieurs logiciels et plateformes de développement permettent d'implémenter un système multi-agents. Ces logiciels et plateformes proposent, pour la plupart, des langages de développement originaux, basés sur des algorithmes et méthodes compilés depuis des langages de programmation plus traditionnels (majoritairement le Java).

Cette section présente, en première partie, la plateforme retenue, GAMA. La deuxième partie détaille la base physique de la simulation. Cet aspect concerne le déplacement des personnes et surtout leur coexistence spatiale. La troisième partie présente la structure informatique de la plateforme, qui conditionne la construction du modèle et l'implémentation de la simulation.

II.1.1.1.1 Plateforme utilisée

GAMA ou GAMA-plateforme est un environnement de développement spécialisé dans la construction et l'utilisation de système multi-agent (SMA) orienté vers l'étude des systèmes complexes. GAMA est open-source, librement téléchargeable. Il se présente sous la forme d'un environnement de développement, auquel est jointe une interface graphique, permettant une représentation visuelle des modèles programmés. GAMA fonctionne à l'aide d'un langage spécialement dédié et construit par l'équipe de l'UMMISCO (Taillandier *et al.*, 2019). Ce langage repose sur le paradigme du Java.

GAMA permet, au travers de son langage GAML (GAMA Modeling Language), le développement de simulations à base d'agents. Différentes classes d'agents peuvent coexister au sein d'un seul modèle. Chaque classe d'agents peut être programmée séparément. Au sein d'un modèle, chaque classe d'agents est nommée « *species* » signifiant espèce en anglais (Figure 16). L'ensemble des agents d'une espèce donnée partagent les mêmes caractéristiques, les mêmes variables, les mêmes protocoles. Une espèce d'agents peut interagir avec d'autres espèces selon un ensemble de règles devant être définies.

GAMA possède plusieurs avantages par rapport à d'autres plateformes de simulation à base d'agents. Il permet d'importer des données spatialisées depuis leur format d'origine (*shapeFile*) et de les retranscrire en vectoriel.

Le GAML permet également d'implémenter des notions informatiques complexes, telles que des relations d'héritage. C'est un aspect facilitant, notamment dans le cadre de la simulation d'une population, qui peut alors être compartimentée en sous-classes d'agents. Cela permet de réduire la charge de développement et la complexité du modèle en hiérarchisant les agents autour des caractéristiques qu'ils partagent en commun et de les spécialiser en fonction des besoins.

La Figure 16 présente le métamodèle relatif à la plateforme GAMA. Chaque modèle GAMA contient un ensemble d'agents. Ces agents peuvent se décomposer en plusieurs espèces (« *species* ») aux caractéristiques différentes. Ces espèces peuvent être liées entre elles par des relations. Un modèle peut être instancié en simulation au travers d'une expérience (« *experiment* »). Chaque expérimenté instancie les éléments d'un modèle. Un même modèle peut contenir plusieurs expériences.

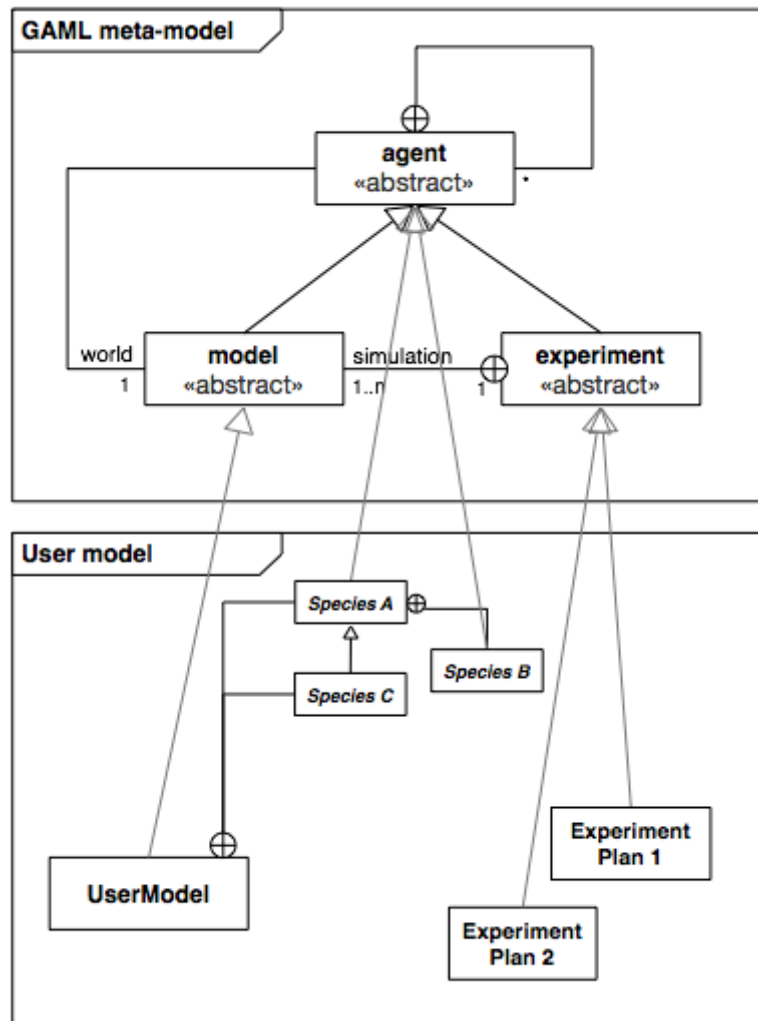


Figure 16 – Métamodèle du langage de GAMA (GAML) et modèle de l'interface utilisateur

GAMA permet donc de construire un modèle composé de classes d'agents qui entretiennent des interactions. Théoriquement, une classe d'agents peut représenter n'importe quel type d'éléments. Ainsi, les personnes peuvent être une classe d'agents. Les classes d'agents ne se limitent pas aux éléments mobiles. Les bâtiments, les routes, ou les zones géographiques peuvent également être instanciés en classes d'agents. La seule règle pour qu'un objet devienne une classe d'agents réside dans la pertinence de l'intégration même de l'objet dans le modèle.

Les modèles en géographie, et plus spécifiquement ceux concernant la mobilité des personnes, impliquent des relations entre les personnes et le territoire, au travers de ses objets urbains notamment. Il est donc nécessaire, dans ce cas, d'importer un environnement géographique, donc de transformer les éléments du territoire en classes d'agents, si cela est pertinent au regard de la problématique.

L'importation d'un environnement géographique est facilitée par l'intégration de fonctions permettant la lecture de fichiers au format shapefile. L'implémentation d'un

environnement composé d'objets vectoriels y est donc aisée, au contraire d'autres plateformes telles que NetLogo nécessitant l'utilisation de bibliothèques extérieures. Cette facilité d'intégration d'objets vectoriels entraîne en outre une utilisation de graphes plus intuitive, ce qui constitue un gain de temps non-négligeable.

La Figure 17 souligne les possibilités qu'offre la plateforme GAMA en matière d'importation d'environnement géographique. La carte située plus à gauche sur la figure représente un territoire, composés de différents objets géographiques. On y distingue des entités surfaciques (bâtiments et zonage d'une Zone de Proximité Immédiate – ZPI), des entités linéaires (réseau routier), et des entités ponctuelles (Point de Rassemblement des Evacués – PRE). Les bâtiments y sont discrétisés selon leurs fonctions. L'ensemble de ces éléments peuvent être importés avec succès dans GAMA (carte de droite). GAMA permet ainsi l'intégration d'environnements géographiques complexes et de tailles importantes.

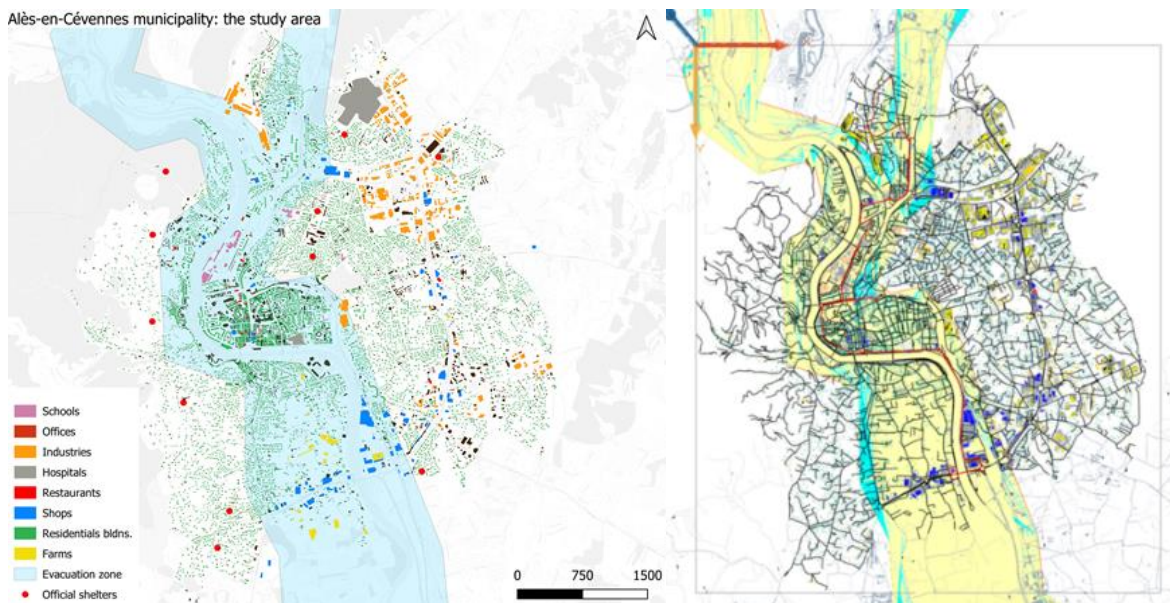


Figure 17 – Exemple d'importation d'un environnement géographique dans GAMA (Orengo *et al.*, 2022)

II.1.1.1.2 La base physique de la simulation

Ce travail de thèse propose d'aborder les évacuations de population en plaçant le déplacement des évacués au cœur de la réflexion. Pour bien comprendre la méthode de programmation de ces déplacements, il faut mettre en évidence la dichotomie entre l'itinéraire et le déplacement.

L'itinéraire, est le trajet prévu par un individu. Il est calculé en début de simulation. La constitution de ces itinéraires sera discutée plus loin dans le manuscrit. Il faut cependant à ce stade garder à l'esprit que l'itinéraire est un plan : l'individu, s'il n'est aucunement gêné dans l'espace, suivra donc l'itinéraire qu'il a programmé. Cet itinéraire prend la forme d'un enchaînement d'arcs (suivant la topologie) continu, entre le point de départ et le point d'arrivée (en bleu sur la Figure 18).

Le déplacement désigne en revanche une action. Cela fait référence au changement effectif de position d'un objet dans l'espace (en rouge sur la Figure 18).

Si l'itinéraire est planifié en début de simulation, le déplacement quant à lui est en revanche programmé d'un pas de temps pour un autre. La Figure 18 permet de saisir la différence entre un itinéraire et un déplacement. Sur la figure suivante, sont représentés de gauche à droite :

- Un réseau viaire : il s'agit d'un réseau permettant le déplacement. Sa topologie permet également de planifier un itinéraire.
- La planification d'un itinéraire : une personne, en bleu, souhaite se déplacer vers un point dans l'espace. Ses possibilités de déplacement sont limitées par la topologie du réseau viaire. Afin d'atteindre le point représenté en jaune, la personne sélectionne donc un itinéraire sur le réseau viaire.
- L'opération du déplacement : la personne modifie sa position dans l'espace afin de se rapprocher de sa destination (le point jaune). Cette modification s'effectue dans le cadre de la topologie du réseau viaire, mais également selon l'itinéraire planifié. Le déplacement représente l'action d'opération d'un itinéraire. Toutefois, la planification d'un itinéraire n'est pas un prérequis du déplacement. Ces formes de mobilités ne sont cependant pas incluses dans le champ épistémologique de ce travail.



Figure 18 – Différence entre l'itinéraire et l'action de déplacement

L'itinéraire est hiérarchiquement supérieur au déplacement, puisqu'aucun déplacement n'est possible en dehors de l'itinéraire planifié. Cela pose donc un verrou technique. En effet, la multiplicité des agents simulés entraîne régulièrement des conflits de position dans l'espace. Deux agents peuvent donc se trouver au même endroit au même moment.

Cette question est centrale dans les travaux traitant des évacuations à des échelles locales, comme des bâtiments, puisque la ressource en espace est limitée en rapport au nombre des personnes à évacuer. Lors d'une évacuation à plus grande échelle, c'est une question pouvant sembler marginale. Elle est parfois éludée, principalement parce que l'intégration de considérations microscopiques dans une simulation macroscopique peut être coûteuse en ressource pour un gain de réalisme limité.

Il peut être en effet considéré qu'à l'échelle d'une ville, le comportement microscopique des piétons perd en importance, et qu'une simplification des

comportements microscopiques n'impacte finalement que peu la qualité de la mesure. La simulation peut prendre en compte les interactions microscopiques entre piétons en utilisant des algorithmes existants, sans remettre en question leurs fondements, sur le modèle des travaux de (Bañgate, 2020; Daudé and Tranouez, 2020) en la matière.

Mais, l'intégration de cet aspect pose un problème simple. Si l'individu rencontre un obstacle, il devra inévitablement dévier de l'itinéraire programmé. C'est à ce moment-là que le déplacement, diffère de l'itinéraire, fait l'objet d'une programmation particulière. Il est proposé que la partie physique de la simulation repose sur une variante simplifiée du « modèle de force sociale » (*social force model*, en anglais) proposé par (Helbing et Molnár, 1995). Ce modèle définit le mouvement humain comme un mélange d'aspects psychologiques et physiques. Trois paramètres sont utilisés pour simuler les interactions locales des piétons avec l'environnement physique et entre eux : l'**effet répulsif** envers l'obstacle physique et les autres piétons, l'**effet attractif** correspondant à l'influence des points d'intérêt sur le déplacement du piéton, et la **vitesse désirée** qui correspond à une vitesse idéale atteinte par un piéton en l'absence de contrainte. Le piéton se caractérise ensuite par une vitesse, qui dépend de sa vitesse, et de la position dans l'espace vers laquelle il se dirige.

Appliqué à notre cas d'utilisation, le piéton va construire son itinéraire sur un graphe. Cet itinéraire est composé d'arcs du graphe. Le piéton est ensuite attiré vers le prochain arc. Il se déplace ainsi d'arcs en arcs, jusqu'à sa destination représentée par l'abri choisi par l'évacué. L'évacué atteint l'objectif à une certaine vitesse (qui tend à atteindre la vitesse désirée en l'absence de contrainte) et en se dirigeant vers une direction choisie, si cela est possible. Au cours de son trajet, le piéton va rencontrer des obstacles, tels que des objets (objets urbains principalement) ou d'autres piétons. Ces éléments appliquent une force sur le piéton, et l'incitent à ajuster sa vitesse et sa trajectoire, donc sa vitesse.

II.1.1.1.3 L'agent dans la simulation

Les systèmes multi-agents s'articulent autour d'une typologie d'agents. Ces agents peuvent représenter des objets réels ou concrets, ils peuvent également représenter des concepts abstraits (le temps ou l'espace par exemple). L'intérêt de l'utilisation d'un SMA réside dans la possibilité d'implémenter des relations entre les différents types d'agents, ou entre les agents d'un même type. Chaque type d'agent est nommé une espèce, au regard de langages informatiques orientés objets plus traditionnels, une espèce s'apparente à une classe d'objets. Chaque classe rassemble des agents qui possèdent des capacités, des propriétés ainsi que des comportements communs. Chaque agent d'une classe donnée possède des méthodes et des attributs similaires, bien que ses états ou valeurs spécifiques puissent différer d'un agent à l'autre.

Chaque classe d'agent est composée de trois éléments (Figure 19) :

- Le nom de classe : le nom de classe permet d'identifier l'ensemble des objets d'une classe. Le nom de classe n'empêche en aucun cas l'identification d'objets individuels par l'utilisation d'une variable de classe.
- Les variables de classes : il s'agit de l'ensemble des variables communes à tous les objets de la classe. Un objet d'une classe donnée ne peut pas posséder une

variable n'appartenant pas à cette classe. Les variables regroupent l'ensemble des propriétés des agents d'une classe.

- Les opérations ou processus : la terminologie est issue de la modélisation UML. Appliquée à une architecture multi-agent, il s'agit des méthodes, des comportements ou des actions que les objets d'une classe réalisent, ou peuvent réaliser.

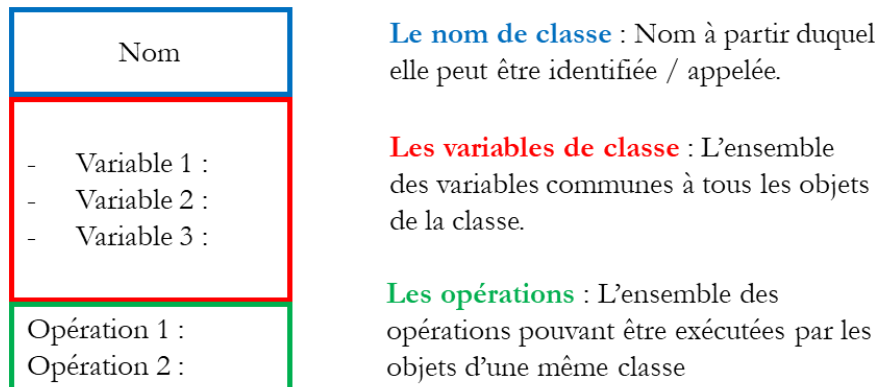


Figure 19 - Composition d'une classe d'agent

Les variables peuvent stocker des valeurs de plusieurs types. Ces types correspondent aux formats de données les plus couramment utilisés : à savoir les entiers (notés *int*) les réels (notés *float*), les chaînes de caractères (notés *string* ou *str*). Des formats de données plus complexes peuvent également être stockés (listes, tableaux, dictionnaires...). Enfin, la plateforme GAMA, ainsi que son langage le GAML, étendent les formats de données utilisables aux géométries, les objets peuvent alors stocker une forme géométrique et l'utiliser. Cela représente un avantage non-négligeable dans le cadre du développement d'une simulation spatialisée, ou la forme des objets est d'importance capitale. Le GAML permet également de stocker d'autres agents sous forme de variables. Un agent peut être lié à un autre agent par une variable.

Les agents entretiennent des relations. Ces relations sont formalisées à l'échelle de la classe. Une classe d'agent peut ainsi entretenir des relations avec d'autres classes d'agents ou elle-même.

II.1.2 Choix des paramètres et de leurs valeurs

Le modèle proposé dans ce travail concerne le déplacement des personnes depuis l'émission de l'ordre d'évacuation, jusqu'à l'arrivée des personnes aux points refuges. Les autres aspects de l'évacuation, concernant la période pré-décisionnelle (constitution de la cellule de crise, identification de l'aléa, prise de décision de déclenchement de l'évacuation...), et post-opération (comptage des évacués, conditions d'accueil et acheminements hors-zone le cas échéant) ne sont pas discutés.

Le positionnement scientifique adopté dans ce travail est en accord avec l'affirmation évoquant l'individu comme pièce maîtresse de sa propre mise en sécurité. En d'autres

termes, la responsabilité finale de la réussite de l'évacuation engage la responsabilité des individus. À l'échelle d'une ville entière, aucune amélioration des processus pré et post opération ne saurait compenser une incapacité des personnes à se déplacer vers les points refuges. La capacité des individus à mettre en œuvre l'évacuation, et donc, à se déplacer vers une zone sécurisée est donc considérée comme la centralité du modèle présenté. Tout autre élément est inclus en considérant son impact sur cette question centrale.

Un ensemble d'incertitudes autour des opérations d'évacuation de population a été identifié. Ces incertitudes impactent les évacuations, et plus spécifiquement l'étape de déplacement des personnes vers un point refuge. Un modèle de simulation d'évacuations de population utile doit donc pouvoir mesurer l'impact de différentes valeurs pour chaque paramètre incertain sur l'opération d'évacuation. Cette exigence soulève deux questions. La première question concerne la méthode d'intégration de ces incertitudes sous la forme de paramètres. Chaque incertitude est considérée comme pouvant impacter le déplacement des personnes. La façon dont les déplacements sont impactés par ces incertitudes doit être mise en évidence. Le paramétrage du modèle de simulation découle ensuite de ces constats.

La (Figure 20) présente une typologie. Cette typologie concerne l'impact des incertitudes précédemment identifiées sur le déplacement des personnes.

La typologie se compose de la manière suivante :

- Rythme de sortie des bâtiments : certaines incertitudes concernent le démarrage effectif de l'évacuation par les personnes.
- Vitesse de déplacement : l'ensemble des incertitudes susceptibles de modifier le trajet des personnes, en modifiant, par exemple, le point de destination, ou encore la nature de l'itinéraire emprunté.
- Forme des itinéraires : l'ensemble des incertitudes qui ont trait au déplacement physique d'une personne.

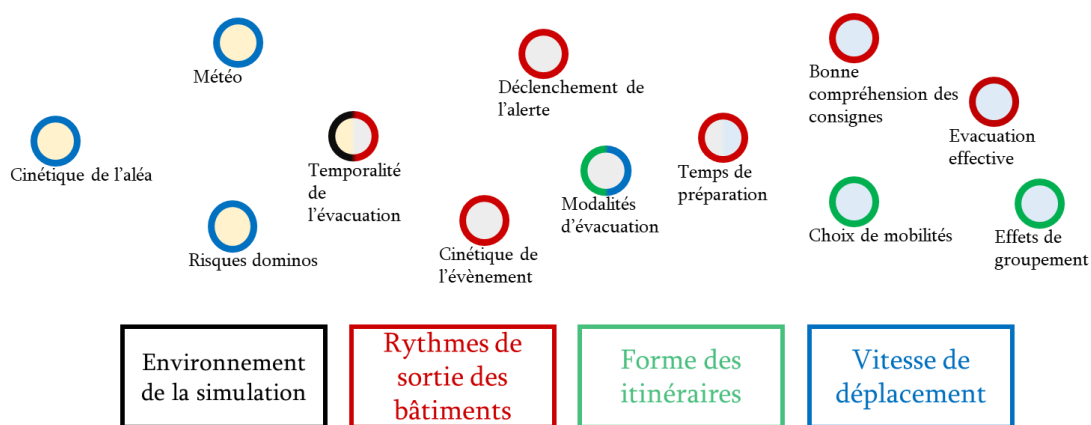


Figure 20 – L'environnement de la simulation et les trois groupes de paramètres du modèle.

Dans la suite des travaux, nous considérons la performance globale de l'évacuation comme l'évacuation totale de l'ensemble des individus concernés avant impact de l'aléa sur la zone menacée. Nous proposons de considérer les trois familles de paramètres suivantes :

Les paramètres relatifs à la sortie des bâtiments (B) : ils définissent le moment où les personnes à évacuer apparaissent sur le réseau. La proportion, le rythme, la quantité, mais également la concordance entre personnes concernées et personnes effectivement en train d'évacuer en sont les principales variables.

Les paramètres d'impact sur la vitesse de déplacement (V) : cette famille de paramètres évalue la rapidité avec laquelle les personnes en cours d'évacuation progressent dans le réseau pour rejoindre leurs lieux de refuge. Cela implique les capacités intrinsèques des individus (diversités de conditions physiques, d'âges ou d'éventuelles situations d'handicap...). Des éléments extérieurs peuvent également impacter cette capacité de déplacement. Cela inclut la structuration du réseau, l'état des voies de communication au moment de l'évacuation ou des paramètres extérieurs (conditions météorologiques, caractéristiques de l'aléa motivant l'évacuation, suraccident ou effets dominos).

Les paramètres d'impact sur la forme des déplacements (D) : ce paramètre aborde la mobilité et le déplacement des personnes pendant l'évacuation. Il prend en compte la trajectoire qu'ils empruntent, le lieu vers lequel ils se dirigent et le mode de transport qu'ils choisissent.

Les données d'entrée nécessaires pour ajuster l'ensemble des paramètres du modèle de simulation proviennent principalement de trois sources distinctes :

- **Des retours d'expériences :** documents officiels édictés par les organisations publiques ou privées, ils comportent parfois (mais rarement), des informations sur le comportement des personnes lors d'une évacuation.
- **Des travaux de recherche pré-événement :** des entretiens sont menés sur des populations exposées à un risque. L'objectif étant de dresser des statistiques sur le comportement des personnes lors d'évacuations. Les réponses obtenues sont déclaratives.
- **Des travaux de recherche post-événement :** des entretiens sont menés de la même manière que dans les travaux de recherche pré-événement. En revanche, les réponses données font référence à des comportements adoptés lors d'une opération d'évacuation ayant précédé la tenue des entretiens.

1.2.1 Les paramètres de sortie des bâtiments (B)

Nous proposons que trois paramètres régissent la sortie des bâtiments : les refus d'évacuer, le temps de préparation et la zone d'évacuation. Ces paramètres sont susceptibles d'influencer le tempo de l'évacuation ainsi que la densité de personnes sur le réseau à un instant donné. Il convient de définir et caractériser chacun de ces éléments.

II.1.1.1.1 Les refus d'évacuer (B1)

Pour différents types d'aléas, et une variété de types d'évacuations, la décision d'évacuer constitue un facteur déterminant de survie (Yun and Hamada, 2015). Pourtant, jamais aucun retour d'expérience n'a fait mention d'une évacuation totale de la population concernée par un ordre d'évacuation. L'évacuation de Nimègue en 1995 est généralement considérée comme un exemple de collaboration des personnes avec l'ordre d'évacuation, avec un taux d'évacuation de 95%. En moyenne, la proportion de personnes refusant d'évacuer atteint 14% en France, selon les chiffres du CEPRI (CEPRI, 2014). Les décisions prises étant adaptées et clairement transmises à la population, il reste encore un inconnu : l'accueil de l'ordre d'évacuation par les populations. Plusieurs aspects peuvent retarder voire empêcher le processus d'évacuation des populations concernées. Les conséquences de ces refus d'évacuer sont multiples. Les deux principales étant la mise en danger direct des personnes se soustrayant à l'évacuation, et la nécessité d'organiser des opérations de secours périlleuses.

Plusieurs événements catastrophiques accompagnés d'un ordre d'évacuation ont mis en évidence la réticence de certains à quitter leur lieu de vie. Ce fut le cas lors de l'ouragan Gilbert, pourtant classé de catégorie 5 sur l'échelle de Safir-Simpson (Aguirre, 1991), cela a également été le cas lors de l'incendie de Victoria en 2009 (Adam, Beck and Dugdale, 2015) ou encore l'alerte de rupture du barrage de Whaley Bridge, dans la banlieue de Manchester en 2019. Le refus d'évacuer est un comportement récurrent lors d'évacuation. Les chiffres en Europe oscillent entre 5% et 35%. Dans une synthèse chiffrée, concernant les Etats-Unis, (Baker, 1991) montre une grande hétérogénéité dans la décision individuelle d'évacuer ou non. Ainsi, lors d'une évacuation préventive, le premier facteur de mise en danger des individus est représenté par la décision de rester sur place. (Ercole, 1996) en fait un facteur d'accroissement de la vulnérabilité de premier ordre face au risque volcanique.

La participation active des individus à l'évacuation dépend principalement de leur réception et mise en œuvre de l'ordre d'évacuation. Cependant, certains obstacles peuvent dissuader les populations de partir, indépendamment de leur choix personnel. Par exemple, il est possible que l'ordre d'évacuation n'atteigne pas toutes les personnes concernées. Des travaux récents sur l'altérabilité des populations en France (Douvinet *et al.*, 2023) montrent encore des faiblesses à ce niveau.

Une fois que les populations ont reçu l'ordre d'évacuation, la question de l'application de cet ordre reste posée. En effet, il arrive qu'une partie de la population choisisse de ne pas quitter son domicile pour plusieurs raisons : volonté de protéger ses biens (Adam, Beck and Dugdale, 2015), manque de confiance envers les autorités ou manque de conscience du risque encouru sont les principaux facteurs explicatifs.

Le modèle de simulation développé dans ce travail propose d'inclure les refus d'évacuer. Les refus d'évacuer seront intégrés via une variable globale fixée en démarrage de simulation, avec plusieurs valeurs possibles, caractérisées ultérieurement. Le paramètre est noté **B1**.

II.1.1.1.2 Le temps de préparation (B2)

Il existe une élasticité entre la réception de l'ordre d'évacuation par les populations et leur présence effective sur le réseau. L'observation des temps de préparation à l'échelle d'un processus global d'évacuation conduit généralement à des courbes cumulatives. Il est possible de trouver plusieurs courbes cumulatives, qui tendent à varier en fonction de la perception de l'urgence d'évacuer ressentie par la population. Elles varient également en fonction du contexte temporel dans lequel l'évacuation est lancée. Les populations peuvent être plus promptes à réagir pendant la journée.

À ce stade, la réception de l'alerte est considérée comme homogène sur tout le territoire. Dans le cas où un individu ne se trouve pas à son domicile (lieu de travail, réseau routier...) plusieurs stratégies de modélisation peuvent coexister : soit l'individu exécute immédiatement les actions relatives à son évacuation, soit il opère une action intermédiaire (revenir chez lui, aller chercher un proche ou un membre de sa famille par exemple). La pertinence de la décomposition éventuelle des déplacements des personnes n'est pas mise en doute. Cet aspect n'est toutefois pas intégré au modèle de simulation.

Pour intégrer ce paramètre, il est crucial de collecter des données sur les courbes cumulatives tirées d'événements passés. Cependant, deux défis majeurs se posent :

La disponibilité des données : les comptages réalisés lors d'évacuations antérieures sont rares et souvent segmentés par tranches de cinq ou dix minutes ce qui oblige à reconstituer une courbe naturelle à partir de points

Pertinence des données : les durées de préparation peuvent indiquer une mobilisation complète en 120 minutes ou s'étendre sur plusieurs jours, ce qui soulève des questionnements sur la valeur prédictive de ces données appliquées dans un contexte d'évacuation préventive.

On peut classer ces courbes en deux catégories selon l'urgence d'évacuation. D'une part, certaines situations nécessitent une évacuation rapide, comme certains événements l'illustrent. D'autre part, d'autres événements, tels que les ouragans, permettent une anticipation de plusieurs jours avant le danger imminent. Une évacuation pour ces menaces différées n'est pas la même que celle face à une menace imminente. À titre illustratif, la Figure 21 présente une courbe de mobilisation face à un risque d'accident nucléaire imminent, où le temps est compté en minutes.

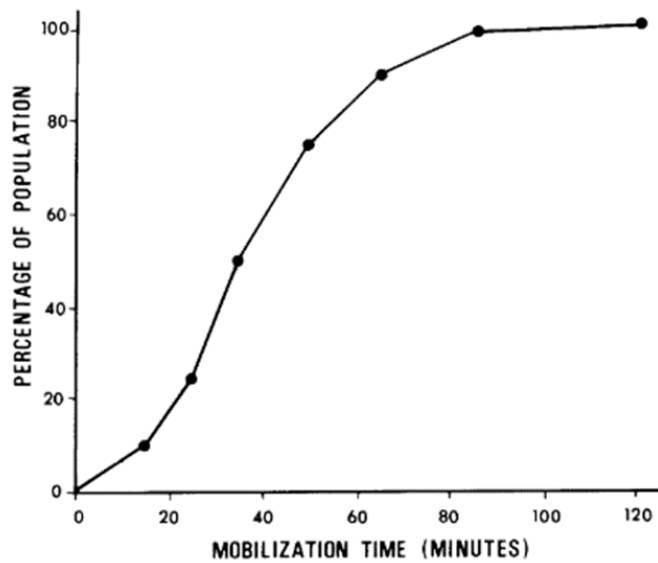


Figure 21 – Exemple de courbe cumulative des départs (Tweedie et al., 1986)

La courbe cumulative en Figure 21 est un exemple de courbe cumulative des départs (ou de mobilisation) des évacués en fonction du temps. Comme l'ensemble des courbes cumulatives de mobilisation qu'il est possible d'observer dans la littérature, elle prend une forme S, ce qui correspond à l'application d'une loi normale. Autrement dit, la majorité des personnes se met en route entre 20 minutes et une heure après réception de l'alerte. La présente courbe est une observation faite dans le cas d'un accident nucléaire imminent. Il convient également d'ajouter qu'il est possible qu'une partie des personnes évacuent avant réception de l'alerte (en anticipation). Malheureusement, mise à part une étude post-événement (Lutoff *et al.*, 2018) menée sur un échantillon de 33 personnes, nous n'avons aucun chiffre à présenter.

Le temps de préparation des personnes peut être intégré au modèle de simulation sous la forme d'une variable globale prenant la forme d'un polynôme. La valeur de la variable évolue alors à chaque pas de temps, suivant la courbe définie par le polynôme. A chaque pas de temps, la variable peut renvoyer une probabilité d'évacuer, transmise aux personnes à chaque pas de temps. L'objectif est d'échelonner les départs dans le temps. Le paramètre est noté **B2**.

II.1.1.1.3 La portée de l'évacuation (B3)

La zone faisant l'objet d'un ordre d'évacuation varie suivant le danger considéré. Généralement, la zone à évacuer suit les limites de l'extension spatiale d'un aléa. Cette extension spatiale, peut être connue avec plus ou moins de précision. Cela dépend de la nature de l'aléa, mais également la consistance et la robustesse des connaissances autour d'un aléa donné par les gestionnaires d'un territoire. En fonction de l'aléa considéré, la zone à évacuer peut donc être sujet à discussion. Plus encore, au sein d'une même zone, des parties spécifiques de la population pourraient également ne pas avoir à être évacuées. Le paramètre **B3** propose d'intégrer de telles considérations au sein du modèle.

1.2.2 Les paramètres d'impact sur la vitesse (V)

Les variables recoupées sous l'appellation V ont vocation à intégrer les éléments déterminants dans le déplacement des individus depuis leurs points de départ jusqu'à leurs destinations. Une fois que l'individu a construit son itinéraire entre son point de départ et son point d'arrivée, la question qui se pose concerne donc le déplacement jusqu'à ce dernier. La littérature scientifique fait état d'un consensus concernant la vitesse moyenne de marche en situation « standard », comprise entre 1,33 m/s et 1,34 m/s. Il s'agit là d'une valeur moyenne. Là encore, une série de paramètres internes et externes aux individus sont susceptibles de faire varier cette vitesse. Les paramètres recoupés dans la catégorie V exercent donc une influence sur cette valeur de vitesse moyenne au cours de la simulation.

II.1.1.1.1 Pratique de l'espace (V1)

Le paramètre **V1** découle d'une question rarement adressée dans d'autres travaux, mais qui, dans le cadre de la simulation d'une évacuation piétonne au sein d'une ville peut pourtant être considérée comme pertinente. Dans des zones urbaines, qu'elles soient denses ou non, les véhicules motorisés occupant les voies de circulation contraignent généralement les piétons à se déplacer uniquement sur les trottoirs réservés à cet effet.

Lors de simulations d'évacuation impliquant des piétons, l'espace de déplacement est souvent intégré via différentes méthodes. La plus fréquemment utilisée matérialise cet espace sous forme de graphes. Cette approche divise l'espace en segments, représentant des corridors ou des routes, et les assemble en une structure mathématique pour faciliter le calcul des itinéraires. Bien que ces graphes tiennent rarement compte des obstacles, lorsqu'ils le font, il s'agit principalement d'entraves ponctuelles.

Les trottoirs ont un effet restrictif sur le déplacement des piétons, par rapport à l'utilisation des routes dans leur entièreté. Cet effet restrictif est important. Cela peut occasionner des difficultés de déplacement. Il est possible que le déplacement des personnes pendant l'évacuation s'effectue uniquement sur les trottoirs. S'il est difficile de spécifier une cause systématique à ce type de déplacement, il se peut que ce choix soit à l'initiative des personnes, ou soit une consigne distribuée. Le déplacement des personnes sur les trottoirs permettrait donc une libération des espaces routiers pour le déplacement de véhicules de secours. S'il n'est pas possible de proposer une caractérisation d'un tel type de comportement, l'intérêt de son étude n'en demeure pas moins élevé.

La possibilité d'implémenter un graphe restreignant le déplacement des personnes sur des zones piétonnisées peut donc être étudiée avec ce paramètre **V1**.

II.1.1.1.2 Praticabilité du réseau (V2)

Ici, seuls les éléments qui ont un impact négatif au moment de l'évacuation sont pris en compte. La qualité des infrastructures évoque principalement la praticabilité du réseau. Cette praticabilité peut être réduite en conséquence d'un aléa. Les

tremblements de terre peuvent occasionner des destructions de routes (Bañgate, 2020) ou de bâtiments (Plattard, 2017) pouvant modifier le déplacement des individus. Les inondations peuvent également impacter les déplacements. En effet, la montée du niveau d'un cours d'eau s'accompagne souvent de l'inondation partielle ou totale des axes de communications à proximité par ruissellement. La hauteur d'eau et la vitesse locale du courant obligent ainsi parfois le déploiement de bateaux motorisés, précisément car la marche y devient difficile ou impossible (cf. Figure 22). D'autres aléas pourraient porter atteinte au déplacement des personnes (incendies ou ouragans par exemple) cependant, ils ne peuvent être inclus dans une réflexion à propos d'une rupture de barrage.

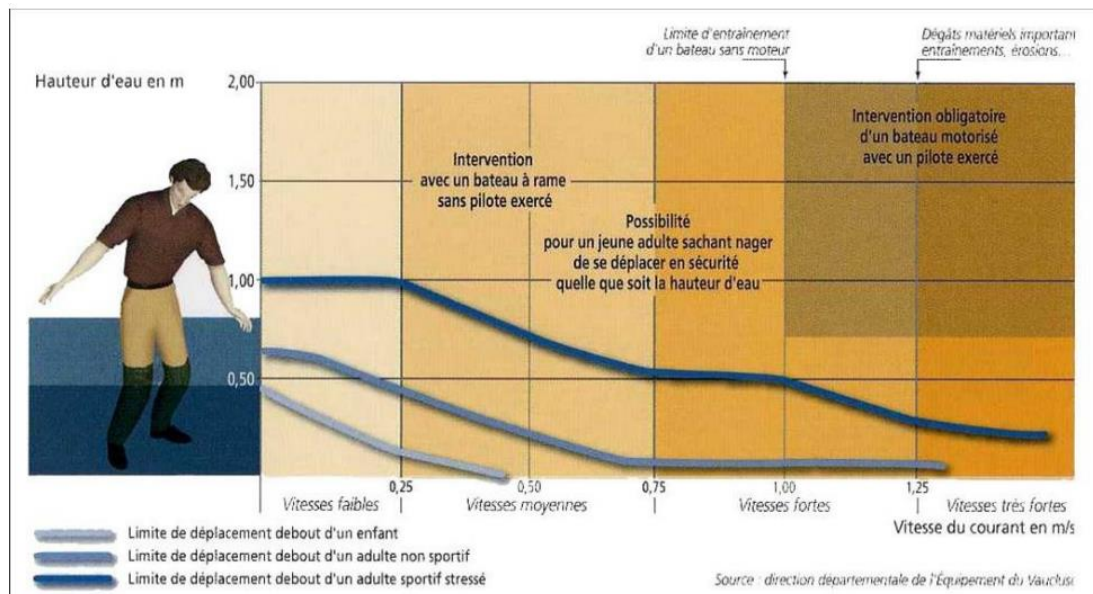


Figure 22 – Impact de la hauteur d'eau et de la vitesse du courant sur la motricité des individus.

La variable peut être portée par le réseau lui-même. La vitesse des personnes peut alors être impactée, le cas échéant, en fonction des portions de réseaux visées. La variable est notée **V2**. Suivant l'aléa considéré, plusieurs modalités de recalcul seront proposées par la suite.

II.1.1.1.3 Formation de groupes (V3)

Si l'individu constitue la pièce centrale du travail de modélisation, il doit être gardé à l'esprit qu'il fait souvent partie d'une organisation sociale. La première organisation sociale qui possède une importance capitale dans une opération d'évacuation est le ménage. Le ménage est souvent confondu dans sa substance avec la famille, qui est également une organisation sociale de premier plan. Cependant, à la différence de la famille, le ménage implique en plus d'une relation sociale forte, une proximité géographique certaine. En effet, dans les deux cas, il n'est pas question de caractériser la force du lien social qui unit des personnes, même si cela a, par le passé, été inclus dans des modèles d'évacuation (Bañgate *et al.*, 2017). Nous considérons qu'un ménage, peu importe le lien social considéré, rassemble des individus au même

endroit, et peut former un seul et même groupe situé lors du déclenchement d'une évacuation. Le ménage est d'ailleurs l'entrée préférentielle dans la littérature portant sur les décisions prises en contexte d'évacuation, et certains travaux les utilisent comme unité porteuse d'information dans les simulations (Mesa-Arango *et al.*, 2013; Bian *et al.*, 2019a; Lim, Lim and Camposano, 2022).

Le deuxième élément est la possibilité qu'à certaines périodes de la journée des individus soient sous la responsabilité d'autres pour évacuer. Cela fait référence aux établissements scolaires, aux EHPAD, et aux entreprises. Le paramètre **V2** intègre ainsi les possibles regroupements d'individus de diverses natures lors d'une évacuation.

Dans le détail, nous considérons dans notre modèle une typologie composée de trois types de regroupement d'individus pouvant entraîner des conséquences significatives sur le déroulement d'une opération d'évacuation préventive de population.

Le ménage : les individus appartenant à un même ménage sont considérés comme une seule unité décisionnaire. Cela signifie que le chef de ménage (la personne la plus âgée), décide pour l'ensemble des individus du ménage. C'est par exemple le cas dans plusieurs études sur les comportements observés en situation d'évacuation (Aguirre, 1991; Naser and Birst, 2010; Lindell *et al.*, 2020). Comme tout groupement de personnes, le ménage peut possiblement modifier le comportement des individus qui le composent.

Les groupes situationnels : à l'instar du ménage, d'autres types de groupes de personnes peuvent être considérés comme unitaires. Par exemple, lors d'une évacuation de population, certaines institutions publiques, notamment celles relatives à l'enseignement, peuvent disposer d'un Plan Particulier de Mise en Sureté (PPMS).

Les groupements spontanés : il s'agit principalement de personnes qui, bien que n'ayant aucun ou peu de lien entre elles avant le début de l'évacuation, se regroupent de par leur proximité géographique et/ou le stress généré par la situation. Ces groupes sont importants en tant que tels, mais également parce qu'ils peuvent constituer un agglomérat de personnes allant même jusqu'à former une foule (Moussaïd *et al.*, 2009). Contrairement aux deux précédents types de groupements qu'il est possible d'estimer lors d'une évacuation de population (en fonction par exemple du moment de la journée/de l'année, de la répartition géographique de la population...), les groupements spontanés sont imprévisibles. Il est cependant possible de considérer deux variables qui agissent comme des catalyseurs. D'une part, une certaine promiscuité induite par une augmentation de la densité de personnes sur le réseau. Cet aspect est notamment décrit dans les travaux de (Moussaïd *et al.*, 2009), qui évoquent des comportements mimétiques lorsque les personnes sont proches physiquement les unes des autres. D'autre part, un éventuel manque d'information peut pousser les personnes à en chercher d'autres autour d'elles (compagnons d'infortune).

Le paramètre prend la forme d'une variable à l'échelle des personnes afin de permettre de se regrouper, ou non. S'ils font partie d'un même groupe, les individus partagent, tant qu'ils font partie du groupe, l'ensemble de leurs caractéristiques. Le paramètre est noté **V3**.

1.2.3 Les paramètres d'itinéraire (D)

Les paramètres d'itinéraire des personnes font référence aux éléments qui impactent l'itinéraire des évacués. Ils ne concernent pas le déplacement physique en lui-même, mais plutôt les paramètres impactant la forme des itinéraires.

Après avoir décidé d'évacuer, la prochaine étape pour l'individu est de choisir sa destination. Il faut ici considérer deux aspects cruciaux : la familiarité des points de rassemblement conçus pour mener aux refuges et la perception de ces refuges comme une option viable. En effet, des travaux menés sur différentes catastrophes montrent que les personnes ont tendance à préférer aller vers un lieu qu'elles connaissent déjà si cela est possible (Lim, Lim and Camposano, 2022). Cela est d'autant plus vrai lorsque la distance entre le refuge et l'habitation des personnes est grande (Genre-Grandpierre and Foltête, 2003). Il est également systématiquement observé qu'une petite partie des évacués préfère se rendre vers un établissement pouvant recevoir du public.

Une fois que le choix de la destination est effectué la personne évacuante doit choisir un itinéraire entre son point de départ et son point d'arrivée. Malgré l'injonction formelle vers la préférence du plus court chemin, la forme de cet itinéraire peut varier. Une fois la destination et l'itinéraire pour s'y rendre choisis, la question du mode de transport se pose également. Considérant l'évacuation comme piétonne, c'est une question pouvant s'avérer marginale. Toutefois, d'éventuels recours aux véhicules individuels, la possibilité de maintien des transports en commun ou encore le déploiement de véhicules spécifiques peuvent être pris en compte.

II.1.1.1.1 Méthode de cheminement (D1)

Un itinéraire peut être construit en cherchant à minimiser le temps nécessaire pour le parcourir, d'autant plus dans un contexte d'urgence. Cependant, plusieurs facteurs, externes ou internes à chaque individu, font en réalité varier ce choix d'itinéraire.

Dans ce travail, deux stratégies de cheminement sont considérées en plus de celle minimisant la distance à parcourir. La première consiste à remplacer la volonté de l'agent de minimiser la distance à parcourir par celle de minimiser le nombre de tronçons empruntés, et donc le nombre de ruptures dans son itinéraire (Bonnin and Douady, 2013). Une rupture est un changement de direction dans l'espace. Appliqué au déplacement d'un agent sur un graphe, cela équivaut à un déplacement qui minimiserait le nombre de nœuds traversés. Dans cette approche, l'agent n'utilise donc plus la distance géodésique pour calculer l'itinéraire le plus court, mais seulement le nombre d'arcs. Il existe également des considérations de confort intrinsèque aux axes. Une simplification de l'itinéraire peut donc consister en une utilisation d'axes plus dégagés. A l'échelle d'une population entière, sans prendre en compte d'éventuelles affinités individuelles, les premiers sont également les seconds.

La deuxième stratégie que l'on nommera « chemin les plus dégagés » reprend des éléments de réflexion soulevés par certains travaux en géographie (Lagesse *et al.*,

2016). Ces travaux, centrés autour de l'expérience du piéton face aux formes urbaines lorsqu'il se déplace au sein de la ville, intègre les formes urbaines comme facteurs déterminant du choix d'itinéraires d'un piéton pour rallier un point dans l'espace. Il est ici question de visibilité, plus que de nombre d'arcs. Dans une expérience de déplacement uniquement piétonne, les flux d'individus seraient alors polarisés vers des axes considérés comme plus dégagés, et où le piéton peut se projeter avec une plus grande aisance (Araldi and Fusco, 2017).

Le paramètre peut être implémenté sous la forme d'une variable possédée par les personnes. Cette variable prend alors la forme d'une liste de tronçons de route à traverser. Elle est notée **D1**.

II.1.1.1.2 Choix d'une destination (D2)

La destination d'une personne évacuée définit le point de l'espace vers lequel elle va se déplacer. Les destinations possibles que nous retenons sont issues des collectes de données sur le comportement post-catastrophe, en particulier dans le contexte des ouragans aux États-Unis, événements qui ont été largement documentés. Les destinations typiques sont les suivantes :

- Le logement d'un proche ;
- Un ERP ;
- Dans un PRE ;
- Autre (peut parfois inclure le lieu de travail de l'évacué ou d'autres lieux plus inhabituels tels que des églises).

Les destinations considérées dans cette thèse prennent en compte la cinétique du phénomène. Les lieux choisis comme possibles destinations sont susceptibles d'offrir un abri, mais aussi de permettre à la personne évacuée d'y subsister jusqu'à ce que la situation revienne à la normale, ou qu'elle soit acheminée vers un autre point de refuge durable dans le cas des PRE. Ainsi, notre modèle ne présume pas que les personnes évacuées quittent simplement la zone à risque sans avoir une destination clairement définie où elles peuvent s'installer.

Suite à l'observation des comportements lors d'événements d'évacuation antérieurs, les autorités recommandent désormais aux personnes de se diriger directement vers le PRE le plus proche, sans halte intermédiaire. En effet, certains individus effectuent des arrêts pour récupérer leurs enfants. Malgré les mises en garde fréquentes dans les communications officielles, signalant que les enfants scolarisés sont pris en charge par leurs établissements en cas d'évacuation, cette tendance persiste.

Le paramètre est implémenté sous la forme d'une variable contenue par les personnes, individuellement. La variable renvoie une position dans l'espace. Le paramètre est noté **D2**.

II.1.1.1.3 Choix d'une modalité (D3)

Lors de l'activation d'une évacuation préventive, il est inévitable qu'une portion de la population soit déjà en déplacement sur le réseau routier. Par ailleurs, certaines de ces personnes pourraient être à l'intérieur de leurs véhicules. Cela pose une série de questions auxquelles il convient de répondre.

La première interrogation concerne le nombre d'individus potentiellement présents sur le réseau routier au moment où l'évacuation est initiée. Cette donnée varie considérablement selon le territoire concerné, le moment de la journée, le jour de la semaine, et même la période de l'année.

Cette question ne peut, en vertu des données dont nous disposons, se résoudre par l'apport de chiffres ayant une forte valeur prédictive. Si des données sur le trafic automobile existent et sont mises à jour sur une base régulière, elles n'intègrent pas les piétons. Cet aspect nécessite donc la construction d'hypothèses.

La seconde question concerne le comportement des automobilistes, qui, au moment du déclenchement de l'évacuation se trouveraient alors dans leurs véhicules. Le véhicule représentant un moyen plus rapide que le déplacement piéton, il est possible de penser que le propriétaire d'un véhicule l'utiliserait pour se mettre à l'abri. Deux éléments viennent cependant contrebalancer cette hypothèse. Premièrement, l'utilisation de véhicules peut être proscrite lors d'une évacuation, et les axes routiers peuvent être coupés à la circulation, soit par décision de l'autorité gestionnaire ou décisionnaire, soit par l'aléa dangereux et ses conséquences (immédiates ou par effet domino). Bien que cela soit très peu documenté, il est également envisageable que des personnes abandonnent leurs véhicules, ce qui pourrait provoquer une congestion du trafic voire possiblement une multiplication des abandons de véhicules.

Sur ce point, en plus des véhicules présents sur le réseau, il est retenu qu'une partie de la population va inexorablement tenter de se déplacer à l'aide d'un véhicule, et ce, pour plusieurs raisons :

- La majorité des retours d'expérience en matière d'événements hydrologiques de grande ampleur montre une volonté de protection du matériel par la population (Mishra and Suar, 2012). Cet aspect est également corroboré par des études menées dans divers contextes et pour plusieurs types d'aléas : ouragans (Reininger et al., 2013; Benitez, Reghezza-Zitt and Meschinet de Richemond, 2020) ; incendies (Adam, Beck and Dugdale, 2015) ; inondations (Grothmann and Reusswig, 2006). Ainsi, l'un des aspects majeurs de la pédagogie autour du risque inondation dans les Alpes-Maritimes est par exemple le danger généré par l'utilisation d'un véhicule en situation de crue.
- Suivant le contexte temporel du déclenchement de l'évacuation, il est pertinent de considérer qu'une partie de la population se trouve sur le réseau routier. Cette proportion d'automobilistes est évidemment à pondérer si le contexte météorologique est peu propice au déplacement motorisé. Certains aléas à la cinétique rapide peuvent surprendre les usagers du réseau routier. Les automobilistes sont par exemple vulnérables lors d'une inondation, notamment ceux qui effectuent de longs trajets (Ruin, 2007).

II.1.3 Synthèse, le diagramme de classe

L'ensemble des caractéristiques ci-avant caractérisées constitue les fondamentaux de notre méthode visant à structurer les contributeurs d'une évacuation préventive sur des événements dont l'ampleur nécessite le déplacement massif d'individus vers des points refuges.

Ces contributeurs doivent être organisés sous la forme d'un modèle compatible avec une étape d'élaboration d'un système de simulation.

Le langage UML est initialement apparu afin de répondre à un besoin croissant d'explicitation de modèles informatiques souvent complexes, vers des publics parfois experts n'ayant pas obligatoirement d'affinités étendues avec l'informatique. Il existe six types de diagrammes UML. Le type de diagramme choisi dans ce travail de thèse est le diagramme de classes. Le diagramme de classes est souvent le premier, ou le plus important, dans la démonstration de l'architecture d'un modèle. Suivant le niveau de complexité du modèle à expliciter, d'autres diagrammes peuvent être utilisés en sus du diagramme de classes. Ce n'est pas le cas du modèle présenté ici, qui malgré un nombre important d'objets (personnes ou bâtiments par exemple) à modéliser, ne possède qu'un petit nombre de classes, à la façon d'une typologie d'éléments essentiels, simplifiant en particulier sa lecture.

Le diagramme de classes est un outil adapté à la programmation orientée objet (et donc par héritage la programmation orientée agent), type de programmation incluant les systèmes multi-agents. En effet, ils rassemblent et synthétisent l'ensemble des objets d'un modèle sous forme de classes, et indiquent la nature des interactions entre ces classes. Le diagramme de classes présenté en Figure 23 intègre l'ensemble des objets identifiés comme nécessaires pour intégrer nos contributeurs lors d'une évacuation, ainsi que les interactions entre les différents objets.

Dans le cadre d'une simulation à l'aide d'un langage orienté objet, ce sont donc ces objets qui seront programmés. L'UML est une première étape de conception de la simulation, chaque objet se trouvant doté de variables et de protocoles d'actions ou de réactions.

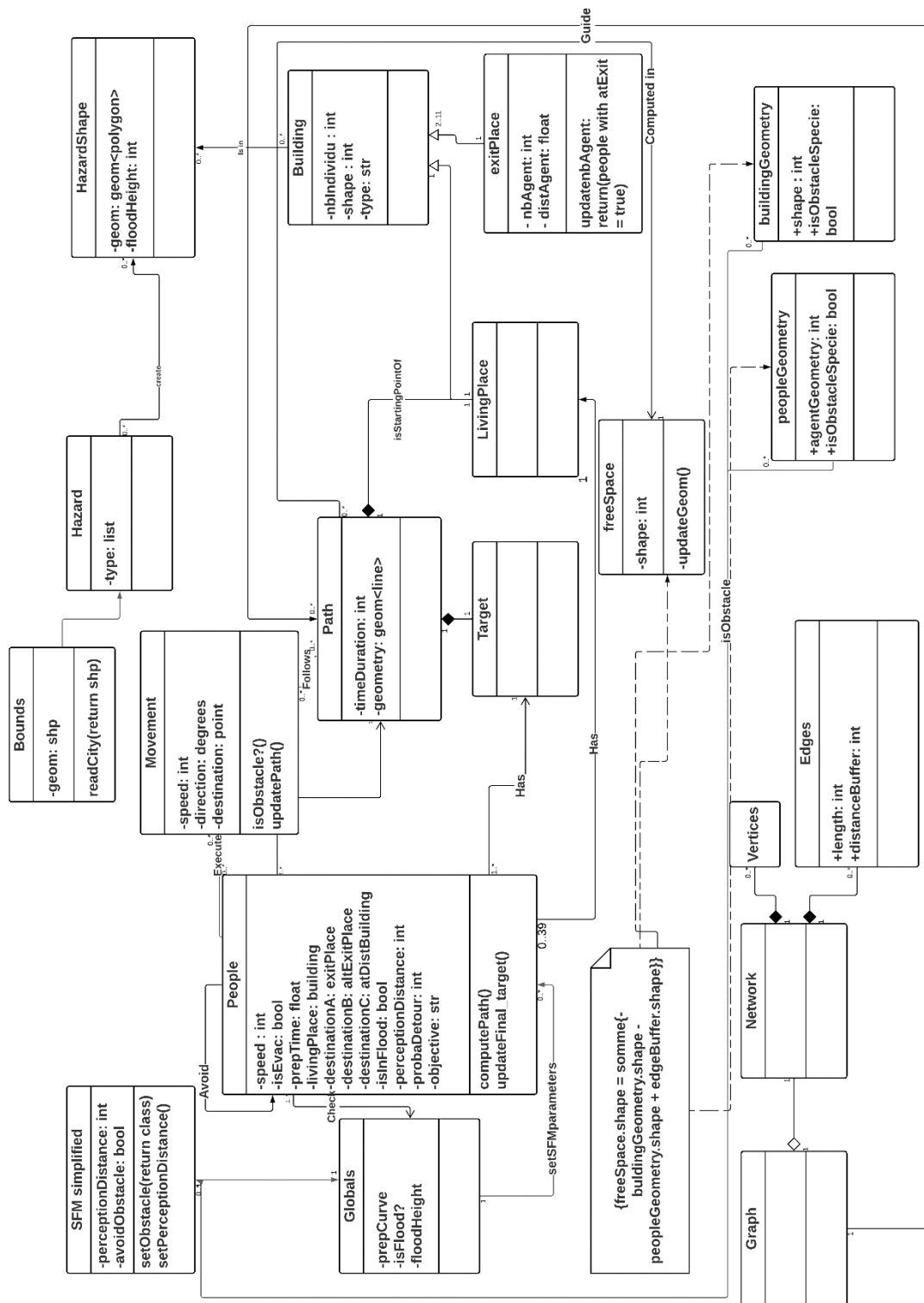


Figure 23 – Diagramme UML du modèle

Le modèle de simulation repose sur des classes d'agents (Figure 23). Chaque agent possède un ensemble de caractéristiques fondatrices de son état (des variables), qu'il partage avec les ensembles des agents d'une même classe. Les agents peuvent interagir avec d'autres agents, d'une même classe ou d'une classe différente. Les variables des agents doivent être initialisées. Toutefois, elles ne sont pas fixes. Leurs valeurs peuvent être modifiées, tout au long de la simulation le cas échéant.

Chaque simulation démarre avec la génération de l'ensemble des agents ainsi que de leurs géométries et caractéristiques à partir des shapefiles en entrée. Chaque agent possède un comportement. Ce comportement est composé d'un ensemble d'actions qu'il peut mettre en place. Chaque agent d'une même classe partage un ensemble d'actions possibles, cela ne signifie pas que tous les agents d'une même classe vont mettre en place les mêmes actions : en fonction de leur fonctionnement propre, leurs comportements peuvent différer. Cependant, les paramètres régulent la proportion de mise en place effective de ces actions parmi une population d'agents. Les actions mises en place par un agent font évoluer son état, entre deux pas de temps (par exemple, pas de temps d'une seconde). Cela peut être sa position, mais il peut également s'agir de toute autre variable qu'il contient.

Lors du démarrage de la simulation, la population va être générée, à partir des agents buildings. Les conditions de cette génération de population peuvent varier en fonction du paramétrage initial. Les agents buildings autorisés à générer et le nombre de personnes générées sont paramétrables. Une fois la population générée sous la forme d'agents « people », une variable globale va sélectionner un certain nombre d'entre eux, pour correspondre à la proportion de personnes qui n'évacueront pas. Cette proportion est paramétrable. Pour les agents restants, ceux qui évacuent, une variable globale en sélectionne une certaine proportion, à chaque seconde : ils peuvent alors démarrer l'évacuation effective, sortent de leurs bâtiments de référence pour atteindre la portion de route la plus proche. La proportion d'agents sélectionnés est paramétrée de telle sorte à pouvoir reproduire les courbes de départs observées dans la littérature. Une fois l'agent People sur le départ, il sélectionne une cible dans l'espace. Les critères de sélection d'une cible sont paramétrables. Une fois la cible sélectionnée, à l'aide du graphe constitué à partir du réseau routier, l'agent People sélectionne un itinéraire. La méthode de sélection de l'itinéraire est paramétrable.

II.2 Architecture de la simulation

L'utilisation d'un système multi-agents permet l'implémentation d'agents dits situés. Un agent situé se caractérise par une position, une localisation, au sein d'un environnement géographique. Au fil d'une simulation, cette position peut se modifier, tout comme les caractéristiques propres à l'environnement. Puisque cet environnement géographique représente une version du monde réel, les systèmes multi-agents offrent la capacité de simuler divers phénomènes, processus et systèmes en relation avec un contexte géographique.

Cette section vise à décrire l'outil de simulation élaboré au cours de cette thèse. Cet outil est une mise en application du modèle que nous avons introduit précédemment. Pour remettre en contexte, la simulation était initialement axée sur la phase de déplacement des individus évacués lors d'une évacuation de masse. À partir de cette fondation, nous avons intégré divers éléments susceptibles de modifier la spatialité et la temporalité de ces mouvements. Ces éléments prennent la forme de paramètres influençant différents aspects des déplacements. Dans la suite de cette section, nous aborderons d'abord le fonctionnement global de la simulation, puis nous explorerons en détail la conception et l'impact des différents paramètres intégrés.

La simulation proposée dans ce travail de thèse repose sur une architecture multi-agent. Cette approche requiert une programmation décentralisée de toutes les classes d'objets définies dans le modèle. Il est ensuite essentiel de mettre en place des protocoles d'interaction pour chacune de ces classes.

II.2.1 Principales classes d'agents de la simulation

La simulation s'appuie sur une structure architecturale épurée. Ce noyau se compose de trois classes d'agents concrets : la classe "people" pour les individus concernés par l'évacuation, la classe "building" pour les bâtiments, et la classe "road" pour les routes. Autour de ces entités centrales, d'autres classes ont été développées. Par exemple, une classe d'agents traduit le zonage de l'évacuation, une autre gère d'éventuels aléas, et une dernière définit les zones praticables pour les piétons. De plus, des classes d'agents abstraites ont été ajoutées pour réguler des aspects propres à la simulation, tels que la durée, le taux d'évacuation, ou le tempo auquel les individus quittent la zone.

2.1.1 La classe « People »

Dans la simulation, la classe "People" symbolise tous les individus. Toutefois, une instance spécifique de la classe "People" ne désigne qu'un individu unique. Ces individus disposent de propriétés, matérialisées sous forme de variables. Bien que certaines variables aient une valeur initiale, elles peuvent subir des modifications au cours de la simulation.

Chaque agent est doté d'une variable nommée "Speed" qui régule la vitesse de déplacement de l'individu. Bien que cette variable puisse fluctuer au cours de la simulation, elle ne peut jamais excéder sa valeur initiale.

Dans une simulation adaptée à une évacuation piétonne, la question de la vitesse de déplacement des individus est centrale. Selon la littérature scientifique spécialisée, un consensus se dégage autour d'une vitesse moyenne de 1.34 mètres par seconde, soit approximativement 4.8 kilomètres par heure. Toutefois, autour de cette valeur moyenne, de nombreuses autres valeurs sont répertoriées dans la littérature.

Valeur en m/s	Référence	Précision	Protocole
1.3	(Moussaïd, 2009)	Plage de 0.9 à 1.5	Expérimental
1.4	(Bañgate, 2020)	3.0 (course)	Implémenté
0.9 (lent) 1.5(rapide)	(Knoblauch <i>et al.</i> , 1996)		Experimental
1.33	(Guy <i>et al.</i> , 2010)		Implémenté
0.8 / 1.6 (plage)	(Peacock, Averill and Kuligowski, 2010)		Observé
1.2	(Fruin, 1971)		Implémenté
1.2 / 1.8	(Fangqin and Aizhu, 2008)	3 à 7 (course)	Implémenté
1.34	(Pecol, 2012)		Implémenté
1 à 2.25 (plage)	(Wang <i>et al.</i> , 2016)		Implémenté
1.7 à 1.8	(Kady and Davis, 2009)		Expérimental
1.33	(Mas, Adriano and Koshimura, 2013)		Implémenté
1.33	(Orengo, Tena-chollet and Sauvagnargues, 2022)		Implémenté

Tableau 1 – Comparaison des valeurs de vitesse de marche identifiées dans la littérature.

Bien que le consensus se situe entre 1.33 et 1.34 m/s, il traite principalement de la vitesse de confort, c'est-à-dire la vitesse que les individus adoptent sans contraintes externes. Cette vitesse pourrait être nettement supérieure en situation d'évacuation. Cependant, il est important de rappeler le caractère préventif des évacuations envisagées par le modèle de simulation : cette nature préventive pourrait limiter le recours à des vitesses élevées par les évacués.

Les agents de la classe "People" disposent d'une série de variables associées à des lieux ou localisations spécifiques. L'une de ces variables, dénommée "livingPlace", indique le point de départ de leur évacuation. Cette information, essentielle pour des opérations telles que la création d'isochrones, permet d'ancrer géographiquement le début de l'évacuation de chaque agent. Par ailleurs, ces agents ont une destination enregistrée sous la variable "exitPlace", qui représente un point précis dans l'espace vers lequel ils doivent se diriger si les conditions le permettent. Les critères définissant ce point dépendent des paramètres de la simulation.

2.1.2 La classe « Buildings »

Au sein de la simulation, les bâtiments ne sont pas simplement des éléments de décor ; ils agissent en tant qu'agents à part entière. Leur principal rôle est de stocker des données sur le nombre d'occupants et de traduire ces données en agents de type "People". Lors de la phase d'initialisation de la simulation, ce sont ces agents "Building" qui génèrent les agents "People", chacun avec sa propre série de variables.

La principale fonction de la classe d'agents "Building" est de refléter la démographie du territoire étudié. Chaque agent "Building" dispose d'une variable indiquant le nombre maximal d'agents "People" à créer lors de l'initialisation de la simulation. En outre, chaque bâtiment est doté de variables décrivant le nombre d'étages qu'il comprend et la hauteur minimale de ces étages. Ainsi, il est faisable d'extraire une portion spécifique d'agents "People" basée sur une certaine hauteur au sein des agents "Building".

Les agents "Building" disposent d'informations relatives à leur localisation géographique, et on peut déterminer s'ils se superposent à une zone spécifique. Chaque bâtiment a une variable qui précise sa fonction, son utilisation, et si un commerce occupe son rez-de-chaussée. On peut classer les bâtiments en deux catégories principales : les résidentiels et ceux destinés à accueillir du public. Dans cette simulation, le rôle principal des agents "Building" est de créer les agents "People". Initialement, une donnée démographique est assignée à chaque bâtiment résidentiel, basée sur une méthode spécifique d'analyse des données de l'INSEE qui sera présentée plus loin dans ce manuscrit.

2.1.3 La classe « Road »

Pour faciliter les mouvements des agents, le mécanisme adopté repose sur un graphe, qui sert de repère pour les diverses géométries où un agent peut ajuster sa position. Bien qu'un agent puisse se baser sur un ou plusieurs graphes pour déplacer sa position dans le temps, il reste cependant lié à ce(s) graphe(s). Ce choix de structure sous-entend une topologie, limitant théoriquement un agent à l'intérieur du graphe. Néanmoins, un plug-in de GAMA, nommé "pedestrian", permet d'ajouter un espace virtuel autour du graphe pour les mouvements du piéton. Ainsi, il peut temporairement s'éloigner du graphe, par exemple pour optimiser son trajet lors d'un changement d'arc ou pour esquiver un obstacle.

Les arcs ou segments du graphe sont instanciés sous la forme d'une classe d'agents, la classe « Road ». Cette classe d'agents contient l'ensemble des informations de dimensionnement des arcs du graphe, accompagné de leurs géométries sous la forme d'objets géographiques. Les agents « Road » possèdent également une pondération, calculée à partir de leurs largeurs et de leurs poids dans l'organisation des mobilités sur le territoire. Cette pondération peut s'appliquer à la distance dans certaines configurations de la simulation afin de faire émerger les axes les plus dégagés à la population. Les agents de type « Road » supportent le déplacement des agents « People ».

II.2.2 Paramètres ayant pu être implémentés

La simulation proposée repose sur deux éléments :

- La base de la simulation : la simulation repose sur une structure simple, axée sur des agents réactifs. Les individus y sont représentés par une classe d'agents ayant un comportement mécanique et épuré. Malgré sa simplicité, ce comportement permet de gérer efficacement les interactions physiques entre les piétons, telles que l'évitement mutuel. Cette structure prend également en compte la vitesse de déplacement d'une manière réaliste. Chaque piéton détient une vitesse souhaitée et une vitesse effective. Son objectif est d'ajuster sa vitesse effective pour qu'elle se rapproche de la vitesse souhaitée, en fonction des conditions environnantes, surtout en l'absence d'obstacles.
- Un ensemble de paramètres :
 - Paramètres de sortie des bâtiments (**B**) : ils concernent le démarrage de l'évacuation, définissant la probabilité d'évacuation des individus, le temps nécessaire pour se préparer et les personnes spécifiquement impliquées.
 - Paramètres d'itinéraires (**D**) : ils encadrent les aspects du mouvement pendant l'évacuation, notamment la destination, l'itinéraire, et le mode de déplacement.
 - Paramètres de vitesse de déplacement (**V**) : ces paramètres contrôlent l'interaction des personnes avec leur cadre environnant, que ce soit avec les routes, les obstacles potentiels, d'autres individus, ou la topologie utilisée.

2.2.1 Implémentation du paramètre B1

Le paramètre B1 correspond à la proportion de personnes faisant partie de la zone à évacuer qui ne vont pas évacuer. Il s'agit d'un paramètre d'entrée de simulation, cela signifie que sa valeur est décidée avant le démarrage de la simulation. Pour calibrer ce paramètre, il convient d'abord de faire émerger un intervalle de confiance. Pour ce faire, des études sont disponibles et des chiffres peuvent être avancés sans grande difficulté. Cependant, il faut porter une attention particulière aux chiffres qu'il est possible de retrouver dans la littérature. Ces derniers peuvent en effet posséder une valeur prédictive faible voire nulle. Deux éléments font varier cette valeur prédictive. Le premier est le plus important : c'est la localisation de l'étude. La localisation exerce une grande influence à la fois sur la manière dont la crise est gérée mais également sur la culture du risque des populations. Il a été avancé plus tôt dans ce manuscrit une série de chiffres issus d'études menées aux Etats-Unis en contexte d'ouragan.

Les données statistiques disponibles ne permettent pas la mise en évidence d'une moyenne à l'échelle globale. Certains travaux font même état d'une différence importante dans les taux d'évacuation entre différentes régions limitrophes, pour un même événement (Paul and Dutt, 2010). Ce taux peut varier fortement d'un

événement à l'autre. Il varie de 13% à 75% lors des grands ouragans nord-américains (Baker, 1991). Dans un contexte d'inondations en Europe occidentale, des valeurs de 5% ont été observées à Nimègue (1995) et de 30% à Arles (2003).

La grande majorité des non-évacués reste sur site afin de protéger ses biens, parfois par logique économique (Adam et al., 2015), mais également par peur d'éventuels pillages, observés lors de certaines catastrophes, tel que Katrina ou l'ouragan Sandy (Baker, 1991; Kim and Oh, 2015). Il peut aussi être question d'un état de sur-confiance en ses capacités, soit par méconnaissance du risque encouru, ou une trop grande confiance dans les dispositifs de défense existants. C'est d'ailleurs une problématique récurrente de l'endiguement, qui contribue à réduire la conscience du risque des populations exposées (Anquetin et al., 2018).

Le taux de refus d'évacuation est un paramètre initial de la simulation et est homogène, ce qui signifie qu'il ne varie pas d'un individu à l'autre. Pour le calibrer, on utilise des probabilités. Lorsque la simulation débute, chaque agent de type "People" tire aléatoirement une valeur selon cette probabilité pour déterminer s'il est autorisé à évacuer ou non. Cependant, ce tirage ne signifie pas que l'évacuation de l'agent commence immédiatement ; c'est plutôt une étape préliminaire de sélection.

Quatre valeurs de B1 peuvent être intégrées dans la simulation (Tableau 2).

Nom de la valeur	Source	Classement qualitatif
B1(0)		Idéale
Observations : correspond à une évacuation complète de la zone concernée.		
B1(5)	Nimègue 1995	Faible
Observations : correspond au pourcentage de refus d'évacuer, observé à Nimègue en 1995. Il s'agit de la valeur la plus faible rapportée parmi l'ensemble des cas étudiés. 5% des agents people n'effectueront pas l'évacuation. Ces agents sont déterminés aléatoirement lors du démarrage de chaque run de la simulation.		
B1(14)	CEPRI 2014	Moyen
Observations : 14% des agents people n'effectueront pas l'évacuation. Ces agents sont déterminés aléatoirement lors du démarrage de chaque run de simulation.		
B1(30)	Avignon 2003	Important
Observations : correspond au pourcentage de refus d'évacuer observés à Avignon en 2003. Il s'agit de la valeur la plus élevée parmi l'ensemble des événements étudiés pour la France. 30% des agents people n'effectueront pas l'évacuation. Ces agents sont déterminés aléatoirement lors du démarrage de chaque run de simulation.		

Tableau 2 - Valeurs possibles du paramètre B1

2.2.2 Implémentation du paramètre B2

On définit le temps de préparation comme étant le laps de temps écoulé entre le moment où l'individu perçoit l'alerte et son départ effectif pour le point d'évacuation. Cette durée est considérée comme une caractéristique propre à chaque individu. Lors

de la simulation, il est crucial de pouvoir simuler les tendances observées lors d'événements précédents tout en individualisant la probabilité d'évacuer. Cela revient donc à utiliser une variable globale, pouvant modifier une variable conditionnelle chez une quantité plus ou moins grande d'agents people.

À la suite de la détection d'une menace imminente et à la détermination de la nécessité incontournable d'une évacuation, l'ordre d'évacuer est communiqué aux populations. Il existe une panoplie de dispositifs d'alerte : des sirènes aux automates d'appels, en passant par les médias traditionnels. Lorsque l'alerte est diffusée, se pose inévitablement la question de son interprétation et de son acceptation par la population-cible. La performance de la transmission et la performance de la réception sont hétérogènes entre différents événements, mais également hétérogènes sur le territoire pour un même événement. Enfin, lorsque les personnes reçoivent l'alerte, il existe une élasticité plus ou moins importante jusqu'à leur évacuation effective. C'est cette élasticité, traduit en temporalité, que le paramètre intègre.

Les trois courbes utilisées dans la simulation présentée dans ce travail de thèse sont issues de deux travaux de recherche. La première courbe, a été utilisée dans (Mas, Adriano and Koshimura, 2013). Il s'agit d'une courbe cumulative "rapide", ce qui signifie que les populations concernées par l'évacuation se retrouvent sur le réseau dans un laps de temps court. Cette courbe a été dérivée d'une courbe observée dans le cas d'un tsunami. Cette courbe montre un taux d'évacuation de 47% de la population concernée en près de cinq minutes.

La deuxième courbe est définie comme "moyenne", c'est une courbe cumulative que nous proposons avec un nombre régulier de départs entre 0 et 60 minutes après le début de l'évacuation. La courbe atteint 100% une heure après le début de l'évacuation.

La troisième courbe est issue de (Tweedie *et al.*, 1986). Il s'agit d'une observation effectuée lors d'une évacuation préventive à un accident nucléaire. Elle est plus longue que les deux précédentes. Mais elle reste dans le cadre défini ci-dessus, c'est-à-dire le départ de tous les évacués en moins de deux heures. Il existe d'autres courbes plus "longues", certaines couvrant plusieurs jours (notamment dans le cas d'un ouragan nord-américain), mais elles n'ont pas été jugées pertinentes pour cette étude.

Pour obtenir une retranscription du temps de préparation dans la simulation, il faut pouvoir reproduire des départs échelonnés dans le temps. Pour ce faire, dans un contexte d'utilisation d'agents réactifs, il faut donc émettre un signal de départ individualisé. La Figure 24 présente la technique utilisée pour reproduire des départs différés au sein d'une population d'agents. Une fonction est exécutée à chaque pas de temps (en l'occurrence d'une seconde) durant lequel une proportion d'agents évacue. C'est le rôle de la variable probEvac.

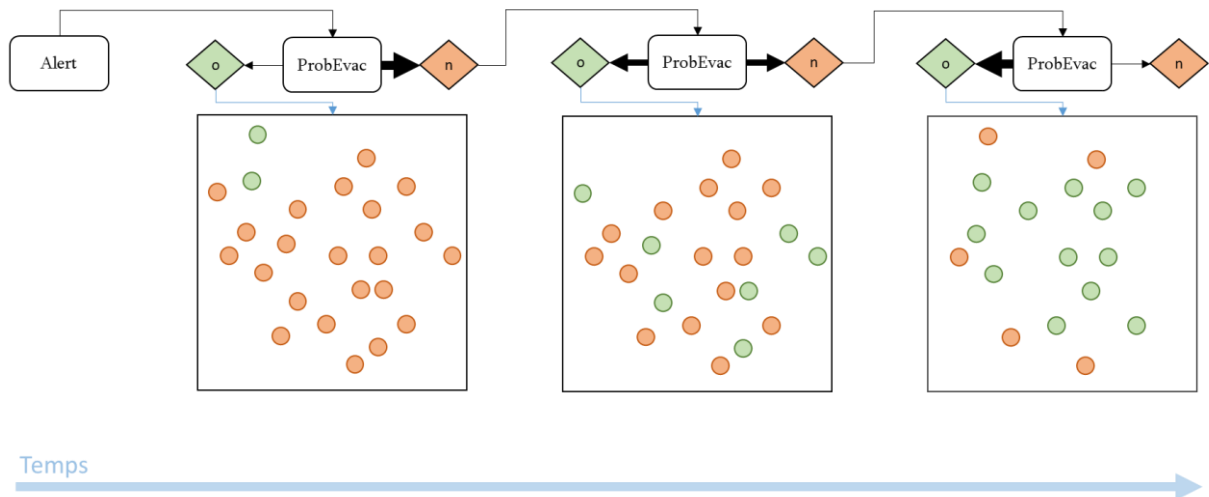


Figure 24 – Implémentation du temps de préparation dans la simulation.

Outre cette question de départs différés, il faut également être en mesure de reproduire des courbes cumulatives de départ des évacués mises au jour dans d'autres travaux, par exemple dans (Tweedie *et al.*, 1986) ou (Mas, Adriano and Koshimura, 2013). Ces courbes donnent uniquement un pourcentage de départs cumulés par tranche de cinq ou parfois dix minutes. Il faut donc transformer cette donnée afin de pouvoir la mobiliser dans la simulation. Pour obtenir des départs différés d'agents qui suivent une courbe cumulative définie à l'avance, il faut donc être capable d'estimer quelle proportion d'agents va évacuer à chaque seconde. La variable probEvac doit également évoluer au cours de la simulation afin de faire varier la proportion d'agents qui évacuent à chaque pas de temps. Les courbes de départs implémentées dans la simulation sont présentées en Figure 25.

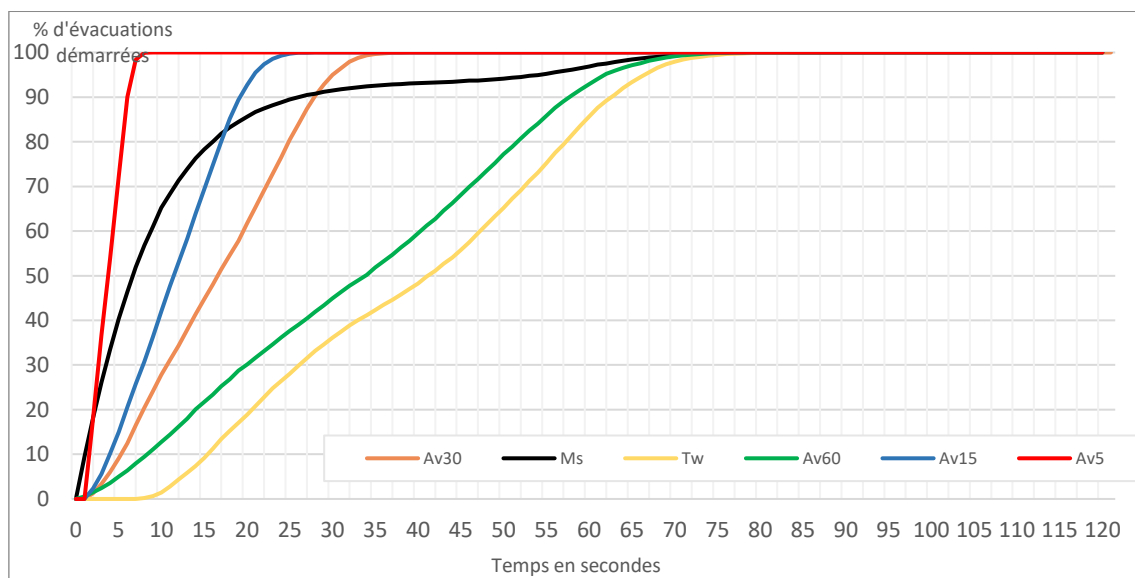


Figure 25 - Les courbes des départs mobilisées (Av5 pour départs échelonnés sur 5 minutes, Av15 pour départs échelonnés sur 15 minutes et ainsi de suite).

Il est à noter à ce stade que, dans notre démarche, les valeurs du paramètre B2 devaient, à l'origine, être au nombre de trois. Deux valeurs devaient retranscrire les deux courbes issues de la littérature, une troisième proposait une courbe des départs régulière entre 0 et 60 minutes après le démarrage de l'évacuation. Une quatrième instanciation du paramètre B2 consistait en une suppression complète du paramètre, ainsi les agents people démarre l'évacuation en même temps. Cette valeur du paramètre avait pour rôle la mise en évidence d'effets de densité locaux sur la capacité des personnes à se déplacer rapidement vers les points refuges. La démarche s'est vue étoffée du fait de certaines constatations mises en évidence lors de la première phase d'expérimentation (phase détaillée dans le chapitre suivant) :

- Les trois valeurs du paramètre B2 mobilisées à l'origine entraînent une dilution des évacués dans le temps tel qu'aucune réelle différence n'est observable entre-elles, si ce n'est un délai global de l'évacuation. Il s'agit d'une observation pertinente, mais uniquement due au décalage induit par la modification de B2. En outre, cette dilution temporelle des évacuations invisibilise nombre de phénomènes tout aussi pertinents à mettre en évidence. En conséquence, deux nouvelles courbes ont été proposées. Elles ne sont pas étayées par l'état de l'art mais résultent d'hypothèses que nous avons faites.
- La valeur de B2 correspondant au départ simultané de l'ensemble des personnes concernées par l'évacuation avait pour but de mettre en évidence des irrégularités spatiales dues à la densité de population. Elle s'est avérée fonctionnelle lors de la première phase d'expérience. Toutefois, la deuxième phase d'expérience impliquant une analyse croisée des paramètres, la population à évacuer était beaucoup plus importante dans certaines configurations. La puissance de calcul à notre disposition n'était dès lors plus suffisante pour gérer un nombre important d'agents dans un seul cycle de simulation. Une courbe a donc été ajoutée. Elle correspond à un départ total de la population en cinq minutes.

2.2.3 Implémentation du paramètre B3

Le paramètre B3 se rapporte au nombre de personnes évacuées, mais diffère dans son approche par rapport à B1. Alors que B1 s'attache à représenter les refus d'évacuation dans la simulation, fondés sur les décisions personnelles, B3 apporte une structure géographique à ces décisions. En effet, avec B1, les simulations pourraient présenter une distribution géographique différente des personnes évacuées à chaque fois. Tout comme B1, B3 s'intéresse aux variations du nombre d'évacués. Néanmoins, contrairement à B1, B3 établit des règles géographiques rigides pour déterminer qui évacue et qui ne le fait pas. Tandis que B1 s'inscrit dans une dynamique individuelle, reflétant les choix personnels, B3 se positionne dans une perspective organisationnelle, en mettant en place des directives géographiques qui conditionnent l'évacuation.

Dans un contexte d'évacuation s'effectuant à pied, les distances à parcourir sont faibles. Il ne s'agit pas d'aléas extensifs, nécessitant un éloignement conséquent des

populations. Il est donc hautement probable que les points de rassemblements se situent, dans un tel contexte, à proximité de la zone à évacuer. Dans ces conditions, l'enjeu d'une initiative de zonage de l'évacuation par la cellule de crise se situerait sur la verticalité. En fonction de l'aléa et de son intensité, une partie de la population pourrait être confinée, plutôt qu'évacuée, sur des considérations altitudinales.

Au lieu de prioriser une évacuation basée sur des zones distinctes, nous nous sommes orientés vers une approche verticale. Comme illustrée dans la Figure 26, une hauteur définie est fixée au lancement de la simulation. Grâce au paramètre B3, il est possible d'évacuer les occupants des étages au-dessus de cette hauteur, en plus de ceux situés en dessous.

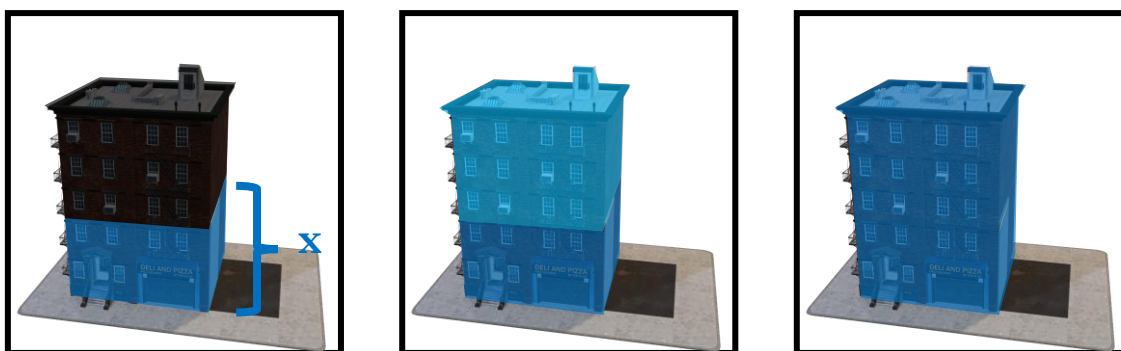


Figure 26 - Illustration du fonctionnement de B3

Le paramètre B3 possède trois valeurs. La première (illustration de gauche) évacue obligatoirement la population occupant les étages n'étant pas strictement situés au-dessus de la hauteur 'x'. Dans la seconde (illustration du milieu) l'évacuation des premiers étages est toujours obligatoire, l'évacuation des étages supérieurs est conseillée. Dans la dernière (illustration de droite) l'évacuation de l'ensemble de la population de la zone menacée est obligatoire. Le Tableau 3 recense les trois valeurs du paramètre considérées.

Nom de la valeur	Observation
B3(0)	L'évacuation concerne uniquement les personnes situées en dessous de la hauteur spécifiée.
B3(50)	L'évacuation concerne uniquement les personnes situées en dessous de la hauteur spécifiée et 50% de la population située au-dessus.
B3(100)	L'évacuation concerne l'ensemble de la zone menacée.

Tableau 3 – Valeurs possibles du paramètre B3

2.2.4 Implémentation du paramètre V2

Le paramètre V2 envisage d'intégrer les répercussions potentielles d'un aléa sur la mobilité des citoyens au travers du réseau routier. Idéalement, lors d'une évacuation préventive, le mouvement des personnes intervient avant l'impact direct de l'aléa sur les zones sensibles. Les risques dits NaTech, qui sont des accidents technologiques induits par des phénomènes naturels, peuvent ne pas requérir une évacuation par eux-mêmes. Toutefois, la perturbation causée par ces événements naturels sur les infrastructures peut générer des dommages bien plus vastes que prévu. Par exemple, un séisme peut déclencher une série de défaillances sur des installations sensibles comme des centrales nucléaires ou des barrages. L'incident initiateur du risque NaTech peut compromettre les infrastructures, surtout les voies de communication, avant même l'initiation d'une évacuation. De ce fait, l'évacuation pourrait s'exécuter dans un contexte moins optimal. Ainsi, V2 se propose d'ajouter cette détérioration potentielle du réseau routier au modèle simulé.

Le paramètre V2 ajoute une possible dégradation du réseau viaire avant et pendant l'évacuation. Il est ensuite question de caractériser l'événement en lui-même, ou du moins en obtenir une maquette crédible qui puisse être utilisée dans la simulation. Le premier aspect a fait l'objet d'études expérimentales. Elles permettent finalement de caractériser l'impact d'un aléa sur la capacité de déplacement des piétons à partir de variables. Il peut par exemple s'agir d'un impact sur la visibilité (brouillard, fumées...), d'une force contrariant le déplacement (profondeur d'eau, vitesse du vent, présence d'obstacles tels que des branchages...), d'une dégradation de l'adhérence (verglas, boue...), voire d'une impraticabilité totale du réseau (crue, éboulement, effondrement, avalanche...).

L'objectif est d'intégrer l'impact d'un aléa naturel sur la praticabilité du réseau dans la simulation. Ce modèle contient une classe d'agent dédiée aux aléas naturels, dotée d'une structure géométrique. Pour un aléa comme une inondation ou un ruissellement, cette structure illustre l'étendue spatiale de la zone submergée. Cette classe interagit avec d'autres classes d'agents, en particulier la classe « People », et ajuste les paramètres liés au mouvement, tels que la vitesse de déplacement lors d'inondations.

Dans le cadre du contexte d'application du modèle de simulation, la classe d'agent dédiée est implémentée sous la forme d'un ruissellement résiduel dû à de fortes précipitations. Une série d'études expérimentales menées sur de grands échantillons de population ont établi une relation robuste entre la quantité d'eau sur un transect et la vitesse de marche des individus (Dias, Abd and Zaiter, 2021), et ont contribué à valider ces résultats à l'aide de simulations numériques (Bernardini *et al.*, 2017).

Ces expériences de déplacement piéton en situation d'inondation sont réalisées en milieu fermé sur une population valide, elles n'ont pas uniquement testé l'impact d'un écoulement sur la vitesse, mais également sur la direction des déplacements. De cette mesure sur la vélocité uniquement, l'aspect vitesse de locomotion sera conservé. Dans le cadre de ce travail l'utilisation d'un graphe limite les déplacements latéraux des piétons. L'équation Eq. (1) caractérise l'impact de la profondeur de l'eau et de la vitesse d'un écoulement sur la locomotion des piétons.

$$V_i = a.Mb \quad (1)$$

Ici, M représente la force spécifique de l'écoulement. Les travaux de (Bernardini *et al.*, 2017) ont mis en évidence deux constantes (a et b dans l'équation (1)). Ces deux constantes sont applicables dans le cas d'une influence isotopique de l'écoulement sur les piétons, a vaut 0,5 tandis que b vaut 0,1. La force spécifique de la crue est donnée par l'équation (2) (Dias, Abd and Zaiter, 2021).

$$M = Dvf/g + D^2/2 \quad (2)$$

La vitesse de marche a été mesurée sur un échantillon pour plusieurs profondeurs d'eau (0.08, 0.43 et 0.90 mètres) (Dias, Abd and Zaiter, 2021). Les résultats obtenus montrent un impact significatif de la profondeur de l'eau sur la vitesse de marche à partir de 0,43 cm. La vitesse de marche dans des conditions normales de praticabilité est considérée comme 1,34m/s (consensus).

Une fois que la relation entre hauteur d'eau et vitesse de marche est caractérisée il faut ensuite être en mesure de cartographier la présence probable d'eau sur le réseau lors d'un événement pluvieux sur la zone d'étude. Pour cela, une couche de données shapefile provenant du PPRI est utilisée. Il s'agit des zones concernées par un éventuel ruissellement. Les valeurs de hauteur d'eau testées dans la simulation sont répertoriées sur le Tableau 4.

Nom de la valeur	Observation
V2(0)	Correspond à l'absence de ruissellement.
V2(8)	Correspond à un ruissellement de 8 centimètres.
V2(43)	Correspond à un ruissellement de 43 centimètres.
V2(90)	Correspond à un ruissellement de 90 centimètres (ou plus).

Tableau 4 – Valeurs possibles du paramètre V2

2.2.5 Implémentation du paramètre D1

Le cheminement d'un agent est entendu ici comme le déplacement de ce dernier de son point de départ jusqu'à son point d'arrivée. Ce déplacement nécessite la sélection d'un itinéraire sur un graphe, concept connu sous le nom de "pathfinding" en anglais. Pour établir cet itinéraire, l'agent opte pour une séquence d'arcs du graphe et génère une liste correspondante. L'objectif de cette liste est de réduire au minimum la distance entre les deux points. Les agents "Road" détiennent la donnée de distance, qui peut être adaptée ou ajustée en fonction de divers paramètres. Ce mécanisme offre la flexibilité de proposer différentes approches pour le calcul d'itinéraires.

Opter pour l'itinéraire le plus court est généralement vu comme une stratégie d'évacuation idéale, basée sur une logique rationnelle. La rationalité totale des agents dans une simulation est un postulat fort si l'on souhaite s'approcher d'une réalité

opérationnelle et non pas uniquement théorique. En situation réelle, ce comportement peut dévier de façon variable de ce postulat. Dans le cas du choix d'un itinéraire pour évacuer, il est par exemple possible de penser que certains agents ignoreraient tout simplement le chemin le plus court, ou, qu'ils choisiraient d'autres itinéraires, jugés plus sûrs, ou moins complexes à arpenter.

Il est proposé dans le cadre de ce travail que le paramètre implémenté dans la simulation admette trois méthodes de calcul : le chemin le plus court, le chemin le plus simple, le chemin le plus dégagé. Le fonctionnement de chacune de ces valeurs est développé dans le Tableau 5.

Nom de la valeur	Observation
D1(PC)	Correspond à l'utilisation du chemin le plus court par les agents people. Le chemin le plus court est calculé à partir de la longueur de chaque arc. La somme est égale à la valeur minimale possible de la somme des arcs entre le point de départ et le point d'arrivée sélectionné par l'agent.
D1(PS)	Correspond à l'utilisation du chemin le plus simple par les agents people. Le chemin le plus simple est calculé en remplaçant la longueur des arcs par 1. La somme est égale à la valeur minimale possible du nombre d'arcs entre le point de départ et le point d'arrivée sélectionné par l'agent.
D1(PG)	Correspond à l'utilisation du chemin le plus dégagé par les agents people. Le chemin le plus dégagé est calculé à partir de la longueur des arcs pondérée par un indice spécifique. Cet indice est calculé en utilisant la largeur des arcs et leur importance considérée selon les données de la base de données topographiques de l'IGN.

Tableau 5 - Valeurs du paramètre D1

2.2.6 Implémentation du paramètre D2

Les points d'arrivée couramment mentionnés dans les études doivent être adaptés en fonction de l'architecture numérique de notre simulation. Sans données concrètes, dire qu'on se rend "chez un proche", que ce soit un ami ou un parent, reste vague et difficile à lier à une situation concrète sur le terrain. Cependant, il est plausible de penser que ce proche habite dans un lieu résidentiel en dehors de la zone à risque, orientant ainsi la décision d'évacuation. Vu l'absence de critères universels liant proximité géographique et relations interpersonnelles, notre simulation admet que ce "proche" peut vivre dans n'importe quel lieu résidentiel en dehors de la zone en question.

Auteur	Correspondance dans la simulation			SIBL	HOTL	PREP	HOTL	HOTL	PREA
	Evènement	Pays	Interrogés	Chez un proche	Hôtel	Points de refuge	Lieu de travail	Eglise	Autre
Mesa-Arango 2013	Ouragan (Ivan 2004)	Etats-Unis	No data	59	26	3	2	1	9
Golshani 2019	Sondage déclaratif	Etats-Unis	No data	11.8	4.17	53.54			
Bias 2019	Ouragan (Gustav 2008)	Etats-Unis	310	54	35	2			8
Bias 2019	Ouragan (Irene 2011)	Etats-Unis	418	83	10	1			6
Bias 2019	Ouragan (Sandy 2012)	Etats-Unis	637	83	7	4			6
Lim 2022	Eruption (Taal)	Philippines	No data	42		57			
Lim 2021	Typhon (Haiyan 2013)	Philippines	No data	38.76		61.24			

Tableau 6 – Répartition des choix de destination lors d'évacuations relevés dans la littérature.

Le Tableau 6 permet de relever certaines constantes, qui serviront à calibrer le paramètre. Dans la majorité des événements recensés hors Etats-Unis, le taux d'évacuation vers un point de refuge officiel est supérieur au tiers de la population. En moyenne, la moitié d'une population évacuée se dirige vers un point de refuge officiel. Ces événements se caractérisent par des évacuations piétonnes, un faible recours aux véhicules individuels et un type d'aléa relativement localisé. En revanche sur des événements se déroulant aux Etats-Unis, les données sont fondamentalement différentes. Les personnes préfèrent, dans ce cas, se rendre vers des lieux qu'elles connaissent au préalable. Cela s'explique probablement par la distance à parcourir et le temps de reconstruction envisagé lors d'un ouragan. Les personnes seraient alors plus enclines à se diriger vers un lieu permettant une installation de longue durée et confortable. Le paramètre D2 est implémenté en se référant principalement aux valeurs observées lors d'événements localisés.

Les choix de destination des agents People sont appliqués en début de simulation. Par la forme que prennent les données récoltées (répartitions), l'implémentation du paramètre se fait par répartition du total des agents vers trois grands types de destinations. La typologie des destinations a été simplifiée par rapport aux données récoltées. Ainsi, trois grands types de destinations sont pris en compte dans la simulation (Figure 27) en cohérence avec la littérature spécialisée.

Tenant compte des données récoltées dans la littérature, deux types de destinations prédominent dans les choix des personnes, les points refuges officiels et le domicile d'un proche. Trois types de destinations seront implémentés dans la simulation, tenant compte de ces éléments.

La première catégorie de destination se réfère à la sélection du point de refuge le plus proche de l'individu, traduisant une réaction optimale et attendue. La seconde, en revanche, suggère une sélection basée sur une distance jugée acceptable au moment où l'évacuation débute. Cette distance, délibérément fixée, limite le choix à trois options distinctes, éliminant ainsi des sélections potentiellement irréalistes. Cette dernière stratégie est représentative d'un individu qui possède une connaissance

fragmentée ou insuffisante des refuges officiels disponibles. La troisième catégorie représente les lieux d'hébergement temporaires tels que les hôtels ou les auberges.

Le dernier type de destination implique des évacués qui vont choisir de se rendre chez des connaissances, des proches ou de la famille. Informatiquement, ce type de destination est implémenté de la manière suivante : en démarrage de simulation l'agent va choisir un bâtiment de type résidentiel aléatoire qui ne se situe pas dans la zone menacée. Cette stratégie est particulièrement pertinente lorsque les données sur les liens sociaux sont absentes ou indéfinies pour une zone spécifique. Elle se révèle également utile quand il n'y a pas d'informations claires sur la distance que les évacués sont prêts à couvrir. Ce type d'implémentation informatique influence les valeurs que prendra le paramètre. La proportion de personnes se dirigeant vers le domicile d'un proche sera significativement réduite par rapport aux chiffres disponibles, simplement parce que le déplacement de personnes vers des lieux aléatoires n'a que peu d'intérêt du point de vue de l'analyse des résultats.

Ces quatre valeurs de destination sont ensuite réparties au sein de la population selon plusieurs proportions (Figure 27). Ainsi, chacune des trois valeurs du paramètre D2 est en réalité un équilibre dans la répartition proportionnelle des trois destinations possibles sur la population qui évacue.

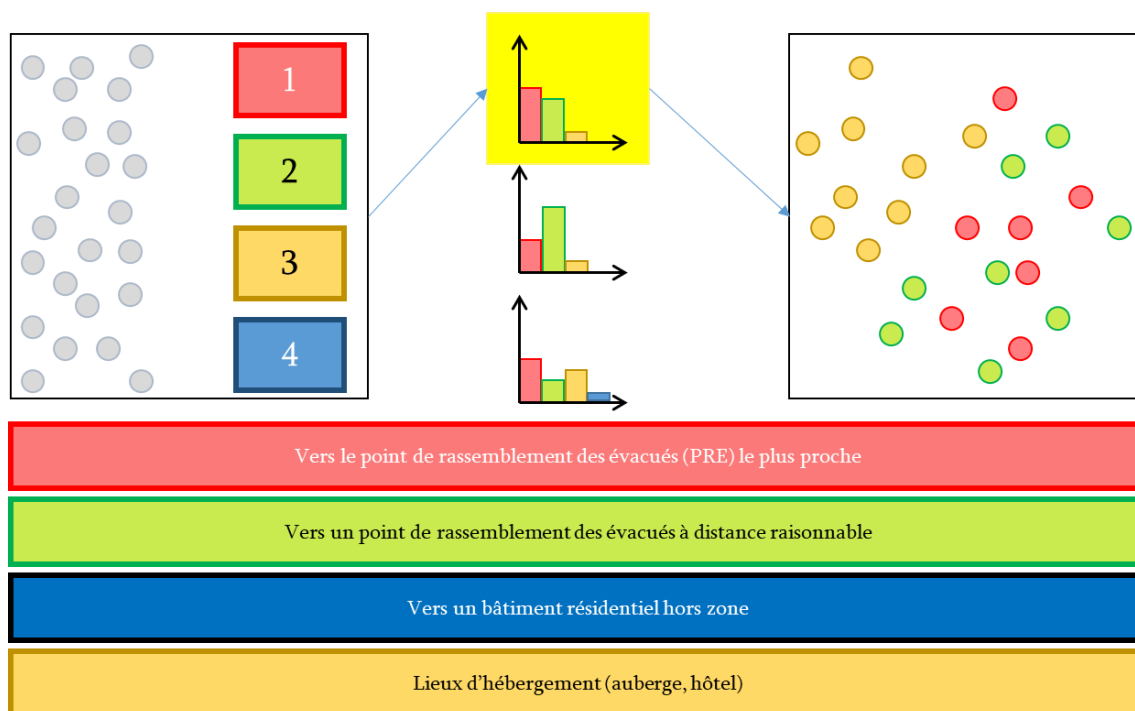


Figure 27 – Illustration du fonctionnement du paramètre D2

La Figure 27 illustre le fonctionnement du paramètre D2. La première étape nécessite une implémentation des différents types de destinations retenus comme une variable des agents « People ». Plutôt que d'appliquer une valeur de D2 sur l'ensemble de la population en début de simulation, le choix effectué consiste en définir trois valeurs de répartition des destinations possibles sur la population. Cela aboutit donc à chaque fois à une répartition de la population entre les différents types de destinations. Trois possibilités de répartition sont considérées.

Le Tableau 7 présente les valeurs de destinations possibles dans la simulation :

Nom de la valeur	Observation
PREP	L'agent « People » se dirige vers le PRE le plus proche.
PREA	L'agent « People » se dirige vers un PRE aléatoire situé dans un rayon de 2 kilomètres autour de leurs position initiale.
HOTL	L'agent « People » se dirige vers un hôtel, un établissement d'hébergement temporaire, situé à 2 kilomètres de leurs position.
SIBL	L'agent « People » se dirige vers un bâtiment résidentiel aléatoire situé à 2 kilomètres autour de leurs position initiale.

Tableau 7 – Typologie des destinations possible dans la simulation

Le Tableau 8 présente les différentes valeurs de répartitions des destinations parmi les agents « People ».

Nom de la valeur	Observation
D2(O)	100% vers PREP.
D2(A)	50% vers PREP ; 50% vers PREA.
D2(H)	50% vers PREP ; 25% vers PREA ; 25% vers HOTL.
SIBL	50% vers PREP ; 20% vers PREA ; 20% vers HOTL ; 10% vers SIBL.

Tableau 8 - Valeurs possibles du paramètre D2

II.2.3 Paramètres n'ayant pas pu être intégrés

Le modèle, centré autour d'une architecture fondamentale, comprend un ensemble de paramètres (neuf au total). Ces derniers visent à évaluer différents éléments d'incertitude liés aux évacuations de population. Bien que ces paramètres aient été conceptuellement élaborés, certains se sont avérés difficiles à intégrer pleinement dans la simulation. Certains n'ont pas pu être implémentés dans la simulation de façon pleinement fonctionnelle. L'impossibilité d'implémentation de ces paramètres relève de deux problèmes. Le premier est conceptuel. Certains paramètres n'ont pas pu faire l'objet d'une caractérisation suffisamment satisfaisante afin d'être implémentés. C'est le cas par exemple du paramètre V3. Par exemple, bien que GAMA autorise la simulation de phénomènes hypothétiques de comportements de foule, il n'a pas été possible de déterminer un seuil d'émergence clair, ni de formuler une hypothèse

convaincante. D'autres paramètres n'ont pas pu être implémentés étant donné la complexité technique nécessaire. C'est le cas du paramètre D3.

2.3.1 Le paramètre V1

Le paramètre V1 a pour objectif de modéliser le déplacement des piétons en intégrant un graphe qui limite, voire restreint, leur accès aux voies bitumées. Ce graphe, élaborable à partir d'un SIG ou grâce au pedestrian-plugin de GAMA, a néanmoins présenté des défis lors de sa mise en application. Deux obstacles majeurs ont été identifiés. Premièrement, un conflit est survenu entre le graphe créé pour le paramètre V1 et le paramètre D1, ce dernier régulant la manière de concevoir les itinéraires. Les règles appliquées à la construction des itinéraires, basées sur une topologie graphique simple où chaque arc symbolise une rue réelle, se trouvent perturbées par la segmentation de cette rue en multiples arcs dans le graphe V1. Cette incompatibilité engendre des incohérences dans la modélisation des trajets.

L'intégration d'un espace spécifique de déplacement pour des piétons lors d'une évacuation est largement investiguée dans le cadre des simulations d'évacuations bâtementaires. Cependant, il n'existe que peu de recherche significative proposant une telle démarche à grande échelle. Il est tout de même possible de citer (Bañgate, 2020) proposant une modélisation de l'espace urbain fine, mais la simulation appliquée sur cet espace virtuel ne reposant pas sur un graphe, cette approche nous reste inaccessible.

À ce verrou, s'ajoute celui de la puissance de calcul. La démultiplication des arcs du graphe nécessaire dans la construction du graphe V1 entraîne un ralentissement significatif des simulations.

2.3.2 Le paramètre V3

La question de la formation de groupes a été abordée plus tôt dans ce manuscrit. Il a été mis en évidence la possibilité pour un groupe de personnes d'adopter un comportement n'étant pas strictement la somme des comportements des individus qui le composent.

Le problème précédemment adressé à propos des groupes de personnes, et par extension, des foules rassemblant un nombre important d'individus, réside dans l'apparition d'un comportement unitaire pouvant être qualifié d'original. Ainsi, un groupe de personnes ou une foule pourrait devenir un objet unique, pourvu de caractéristiques comportementales propres. Les systèmes multi-agents sont généralement bien indiqués dans le rendu de tels comportements de groupes.

La solution proposée pour rendre compte de ces objets uniques que deviendraient des groupes de personnes ou des foules lors d'une évacuation passe dans l'implémentation d'une classe d'agents de rang supérieur aux individus. Cette fonction est présente dans GAMA, sous l'appellation de « macro-species ». Ainsi, comme schématisé en Figure 28, sous certaines conditions de densité et de proximité, un groupe d'agents « People » peut abandonner ses caractéristiques individuelles pour former un nouvel agent de rang supérieur.

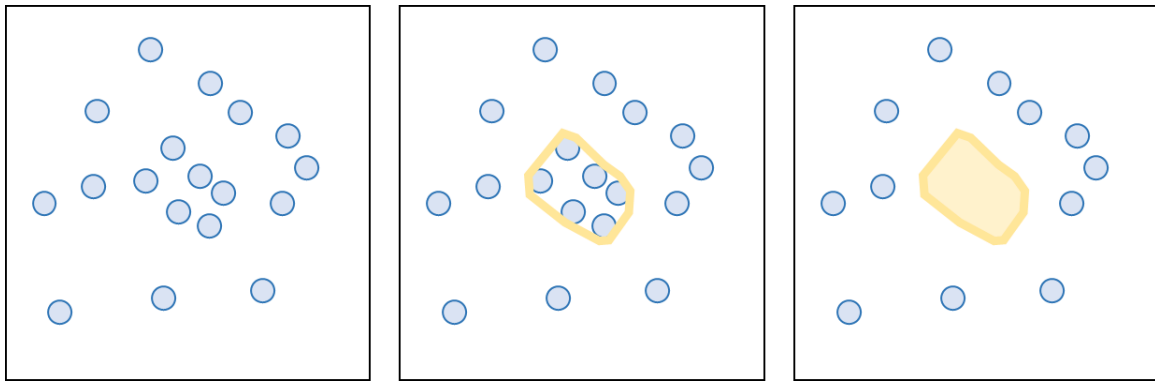


Figure 28 – Schéma de construction d'un agent « groupe » à l'aide de GAMA

La plateforme GAMA permet le groupement spontané d'agents par l'utilisation de « macro-species » et « micro-species ». Plusieurs agents d'une classe peuvent, sous certaines conditions, se rassembler pour former individu d'une nouvelle classe. Cela correspond à une relation de composition. La Figure 28 illustre le fonctionnement d'un tel algorithme.

Malgré le solutionnement technique d'une telle fonctionnalité, elle n'a pas été intégrée dans la simulation finalisée. Il n'a pas été possible de caractériser l'émergence de groupes et de foules autrement que par des valeurs hypothétiques. Les premiers tests expérimentaux ont démontré un impact important du paramètre sur les résultats en sortie de simulation. Les seuils d'implémentation de l'émergence de groupes et de foules n'étant pas suffisamment supportés par du matériel bibliographique, nous avons préféré proposer cet aspect de la simulation sous la forme d'une perspective.

2.3.3 Le paramètre D3

Le paramètre D3 a pour objet l'ajout d'un possible recours des personnes à un véhicule individuel lors de l'évacuation. L'ajout de véhicules individuels dans le modèle de simulation nécessite également l'ajout d'une topologie spécifique à ces derniers. Cela nécessite également la prise en compte de comportements spécifiques aux automobilistes, (Czura, 2017) explorait par exemple l'impatience des conducteurs pouvant entraîner des changements de file soudain.

Ce paramètre soulève également des questionnements concernant le partage de l'espace, et ne saurait exister sans un affinement de la topologie des déplacements piétons. Néanmoins le projet ESCAPE (Daudé *et al.*, 2019) entend proposer une approche de simulation d'évacuation multimodale permettant une coexistence physique des piétons et véhicules individuels lors de l'évacuation.

En définitive, l'ajout des véhicules individuels dans le modèle de simulation présent «é reviendrait donc à formaliser une nouvelle classe d'objet au sein du modèle ; pouvoir caractériser un ensemble de comportements physiques et psychologiques propres à cette classe d'agent ; il faudrait également proposer un protocole d'interfaçage entre la nouvelle classe et la classe représentant les piétons. L'utilisation d'un véhicule

individuel peut nécessiter un déplacement pédestre. Pour des raisons de ressource temps, son investigation n'a pas été poursuivie.

II.2.4 Simulation d'une évacuation préventive, synthèse

Parmi l'ensemble des événements analysés et la littérature consacrée à la thématique des évacuations de population, il est difficile de mettre en évidence une opération d'évacuation typique. Cependant, l'identification d'éléments systématiques peut permettre de construire un modèle puis de l'instancier dans une simulation numérique. Face à des opérations s'inscrivant dans des contextes incertains et changeant, la modélisation et la simulation numérique peuvent constituer un complément pertinent aux exercices de gestion de crise. Le modèle nécessite cependant de pouvoir transformer le concret en abstrait, et d'identifier, parmi la variété d'éléments qui entre en jeu dans une évacuation, ceux qui en sont les principaux.

Ce chapitre présente donc une démarche qui articule une modélisation des opérations d'évacuation de population avec une implémentation dans une simulation. L'objectif est d'identifier puis de hiérarchiser les éléments des opérations d'évacuation de population, afin de faire émerger une architecture abstraite. La construction d'une architecture abstraite présente l'intérêt premier d'être aisément adaptable à diverses situations et contextes. En revanche, la spéciation d'une telle démarche vers une problématique particulière peut s'avérer plus compliquée.

Dans la méthode présentée, trois catégories d'éléments génériques ont été identifiés. Une évacuation de population est toujours soumise à l'impact d'un contexte. Cela peut regrouper des éléments à la nature variable. Il peut ainsi s'agir de la temporalité de l'événement, ou de la nature de l'aléa considéré. Les évacuations de population sont également gérées, encadrées, avec plus ou moins de rigueur et de moyens techniques et humains. Cela est vrai pour la grande majorité des évacuations investiguées. Toutefois, certaines évacuations peuvent échapper à cette catégorie, mais elles ne sont pas considérées dans le cadre de ce travail. Enfin, les évacuations de population impliquent des enjeux, qui, dans ce cas, sont des personnes.

La modélisation doit permettre de faire le lien entre le phénomène concret, et une implémentation du dit phénomène dans une simulation dynamique. Les éléments du modèle deviennent par conséquent des objets. Leurs comportements et caractéristiques deviennent des paramètres.

CHAPITRE 3

ANALYSE DES PARAMETRES DE LA SIMULATION

III.1	Démarche expérimentale.....	110
III.1.1	Territoire d'étude	110
1.1.1	Structure de l'habitat	114
1.1.2	Nature du réseau	115
1.1.3	Zone inondable	116
1.1.4	Les points refuges.....	118
III.1.2	Analyse univariée.....	119
1.2.1	Les paramètres.....	119
1.2.2	Interaction entre les paramètres.....	122
III.1.3	Indicateurs de mesure	124
1.3.1	Les courbes de cumul des évacués	124
1.3.2	La cartographie des temps d'évacuation	124
1.3.3	Le nombre de personnes par tronçons de route.....	125
1.3.4	La demande sur les points refuges	125
III.2	Comportement de la simulation.....	126
III.2.1	Comportement du paramètre B1, le refus d'évacuer	126
2.1.1	Le cumul des évacués	128
2.1.2	Les temps de parcours.....	128
2.1.3	La fréquentation des tronçons de routes	129
2.1.4	Analyse des résultats	131
III.2.2	Comportement du paramètre B2, le temps de préparation	131
2.2.1	Courbe de cumul.....	133
2.2.2	Temps de parcours	135
2.2.3	Fréquentation des axes.....	137
2.2.4	Répartition sur les points d'arrivée	139
2.2.5	Analyse des résultats	140
III.2.3	Comportement du paramètre B3, la sur-évacuation	140
2.3.1	Courbe de cumul.....	142
2.3.2	Les temps de parcours.....	143
2.3.3	Fréquentation des axes.....	145
2.3.4	Répartition des arrivées par PRE	146
2.3.5	Analyse des résultats	148
III.2.4	Comportement du paramètre D1, le choix d'un itinéraire.....	148
2.4.1	Courbes de cumul	150
2.4.2	Temps de parcours	151
2.4.3	La fréquentation des axes	155
2.4.4	Arrivées aux PRE.....	157
2.4.5	Analyse des résultats	158
III.2.5	Comportement du paramètre D2, le choix de la destination	159
2.5.1	Courbes de cumul.....	161
2.5.2	Temps de parcours	162
2.5.3	Fréquentation des axes.....	163
2.5.4	Répartition des arrivées par PRE	165
2.5.5	Analyse des résultats	166
III.2.6	Comportement du paramètre V2, praticabilité du réseau	166
2.6.1	Courbes de cumul.....	168
2.6.2	Temps de parcours	169
2.6.3	Fréquentation des axes.....	170
2.6.4	Répartition des arrivées par PRE	172
2.6.5	Analyse des résultats	174
III.2.7	Synthèse des résultats obtenus	174

2.7.1	Paramètre B1, le refus d'évacuer	174
2.7.2	Paramètre B2, le temps de préparation.....	174
2.7.3	Paramètre B3, les sur-évacuations	175
2.7.4	Paramètre D1, le choix d'itinéraire	175
2.7.5	Paramètre D2, le choix de destination.....	175
2.7.6	Paramètre V2, praticabilité du réseau	176

III.3 Analyse croisée des paramètres 176

III.3.1 Protocole mis en place 176

3.1.1	Justification du croisement des paramètres.....	177
3.1.2	Méthode.....	178

III.3.2 Courbe de départs et nombre d'évacués..... 178

3.2.1	Courbes de cumul.....	180
3.2.2	Temps de parcours	181
3.2.3	Fréquentation des axes.....	182
3.2.4	Analyse des résultats.....	184

III.3.3 Itinéraire et densité de population 184

3.3.1	Courbes de cumul.....	186
3.3.2	Temps de parcours	187
3.3.3	Analyse des résultats.....	190

III.3.4 Distance à parcourir et type d'itinéraire 191

3.4.1	Courbes de cumul.....	192
3.4.2	Temps de parcours	193
3.4.3	Analyse des résultats.....	194

III.4 Conclusion intermédiaire 194

III ANALYSE DES PARAMETRES DE LA SIMULATION

Une fois le modèle de l'évacuation formalisé et une fois ses éléments instanciés au sein d'une simulation, la démarche de recherche peut s'appuyer sur cet outil. Cet outil est composé d'une base physique autour de laquelle s'articulent plusieurs paramètres variables. Cependant, le recours à un outil automatisé n'est pertinent que si son fonctionnement est validé. Par conséquent, le chapitre suivant propose de tester tous les paramètres développés dans la simulation afin de caractériser le comportement de celle-ci. Ce chapitre est un préalable au chapitre suivant, qui se concentre sur l'application de l'outil à des scénarios d'événements dans le but d'une mise en œuvre en conditions opérationnelles.

Le présent chapitre introduit un protocole expérimental pour comprendre le comportement du modèle. Les protocoles expérimentaux de modèles multiparamétriques peuvent être chronophages lorsqu'il s'agit de tester toutes les configurations paramétriques possibles. Ces expériences sont d'un intérêt certain pour l'étude de phénomènes précis et sont largement utilisées, par exemple, en hydrologie. Leur objectif est souvent de dévoiler une relation différentielle entre un ensemble de paramètres. Cependant, l'approche adoptée dans le cadre de ce travail est différente. Le modèle est conçu comme une proposition méthodologique, matérialisée sous forme d'outil. Ce travail doit être envisagé comme la première étape d'un projet scientifique visant à développer un outil opérationnel et reproductible pour la gestion de crises. Il ne s'agit pas d'expliquer les opérations d'évacuation à l'aide d'équations différentielles, mais plutôt de proposer un outil adaptable et reproductible. Ainsi, il n'est pas nécessaire de tester toutes les configurations paramétriques possibles du modèle, mais simplement de fournir une explication claire du fonctionnement de chacun de ces paramètres et de leur impact sur le comportement global du modèle.

III.1 Démarche expérimentale

Le protocole expérimental propose, en premier lieu, un test univarié de la simulation. Devant la complexité de la simulation, ainsi que le nombre de paramètres, la décision a été prise d'inclure, en supplément, un protocole de test expérimental multivarié. Dans un premier temps, chaque paramètre est testé indépendamment des autres. Cela signifie que seul un paramètre varie, les autres sont fixés sur des valeurs considérées comme standards. Cela diminue considérablement le nombre de simulations à mettre en œuvre et constitue une première étape pertinente dans la caractérisation du comportement du modèle de simulation. Cela permet également de sélectionner les paramètres les plus pertinents à intégrer dans une analyse multivariée.

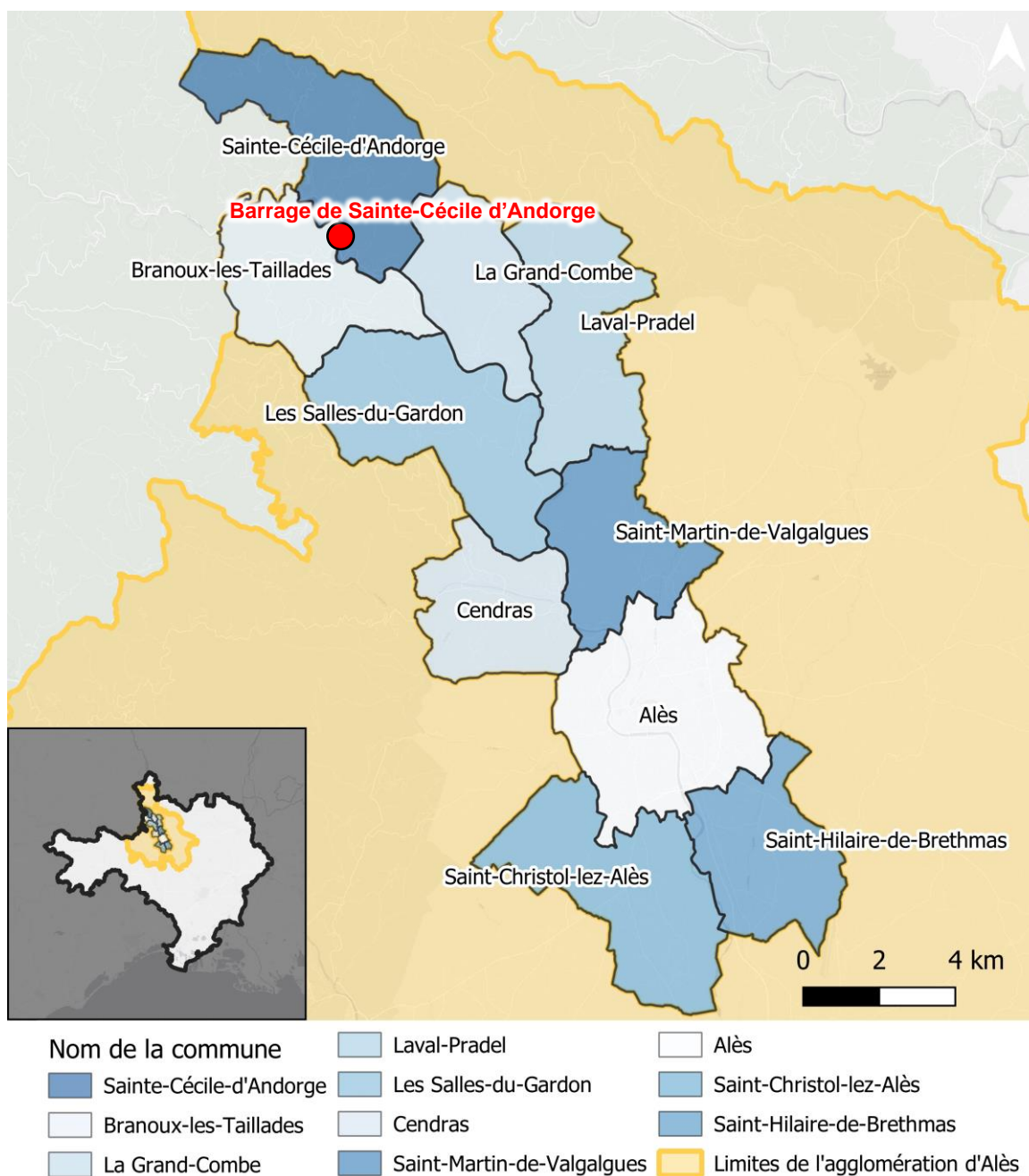
III.1.1 Territoire d'étude

Le territoire d'étude retenu dans notre démarche englobe dix communes du PPI relatif au barrage de Sainte-Cécile d'Andorge (Carte 1), situé dans le département du Gard (France). Parmi ces dix communes, seule Alès est un centre urbain. Les neuf autres

communes sont soit périurbaines soit rurales. Dans un souci d'optimisation (essentiellement de temps de calcul), le modèle de simulation est testé sur une seule commune, la commune d'Alès.

Le choix d'une commune test doit répondre à deux critères. La commune doit se situer sur le territoire d'étude, afin de pouvoir tester le modèle de simulation dans des conditions proches de celle du cas d'application, notamment au regard de l'aléa considéré. Il devait également s'agir d'une commune dont l'urbanisme et l'habitat sont suffisamment diversifiés afin de permettre d'éprouver au maximum le modèle de simulation. La commune rassemble plus de la moitié de la population concernée par l'évacuation sur l'ensemble de la zone d'étude.

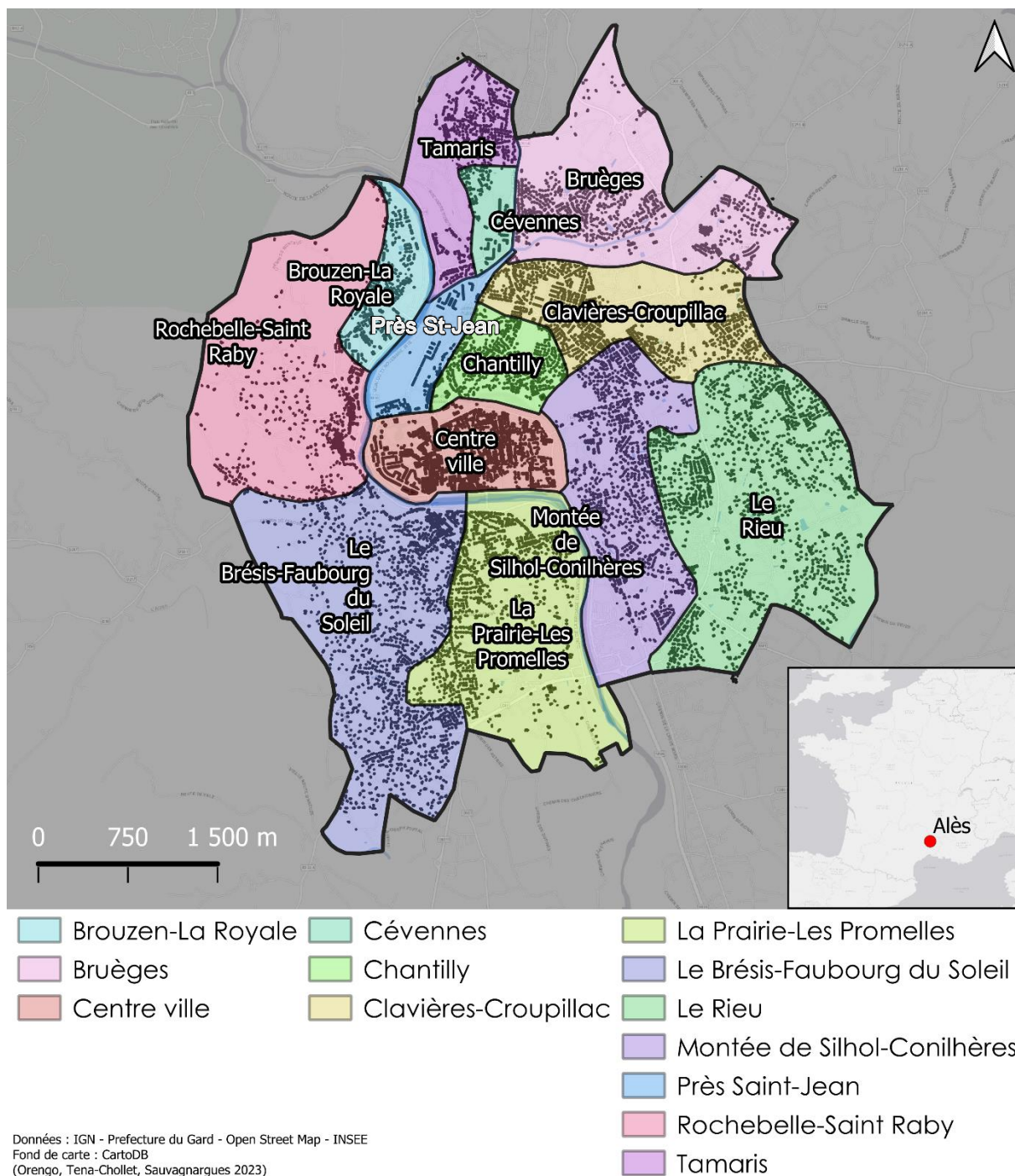
Ainsi, compte tenu des caractéristiques du territoire d'étude, la possibilité de tester le modèle de simulation sur la commune d'Alès a été considérée comme une opportunité d'optimiser le temps de calcul, sans perte d'information majeure concernant l'impact des paramètres sur le fonctionnement de notre modèle. Les tests permettant dans ces conditions d'obtenir et de comparer des résultats sur des zones densément peuplées et des zones au tissu urbain plus relâché.



Carte 1 - Communes du Plan Particulier d'Intervention

La commune d'Alès se divise en treize IRIS. Sur ce nombre, neuf se situent dans la ZPI définie par le PPI du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge. Chaque IRIS englobe généralement un ou deux quartiers, offrant une diversité en termes de tissu urbain. Ce facteur renforce la pertinence d'Alès en tant que commune test pour notre modèle de simulation. À titre illustratif, les IRIS centre-ville, Tamaris, Clavières-Croupillac et Chantilly présentent un tissu urbain dense. À l'opposé, La Prairie-Les Promelles et Montée du Silhol-Cornilhères affichent un tissu plus diffus. Quant aux Près Saint-

Jean et aux Cévennes, ils sont caractérisés par de grands ensembles HLM. La Carte 2 présente les différents IRIS de la commune Alésienne.

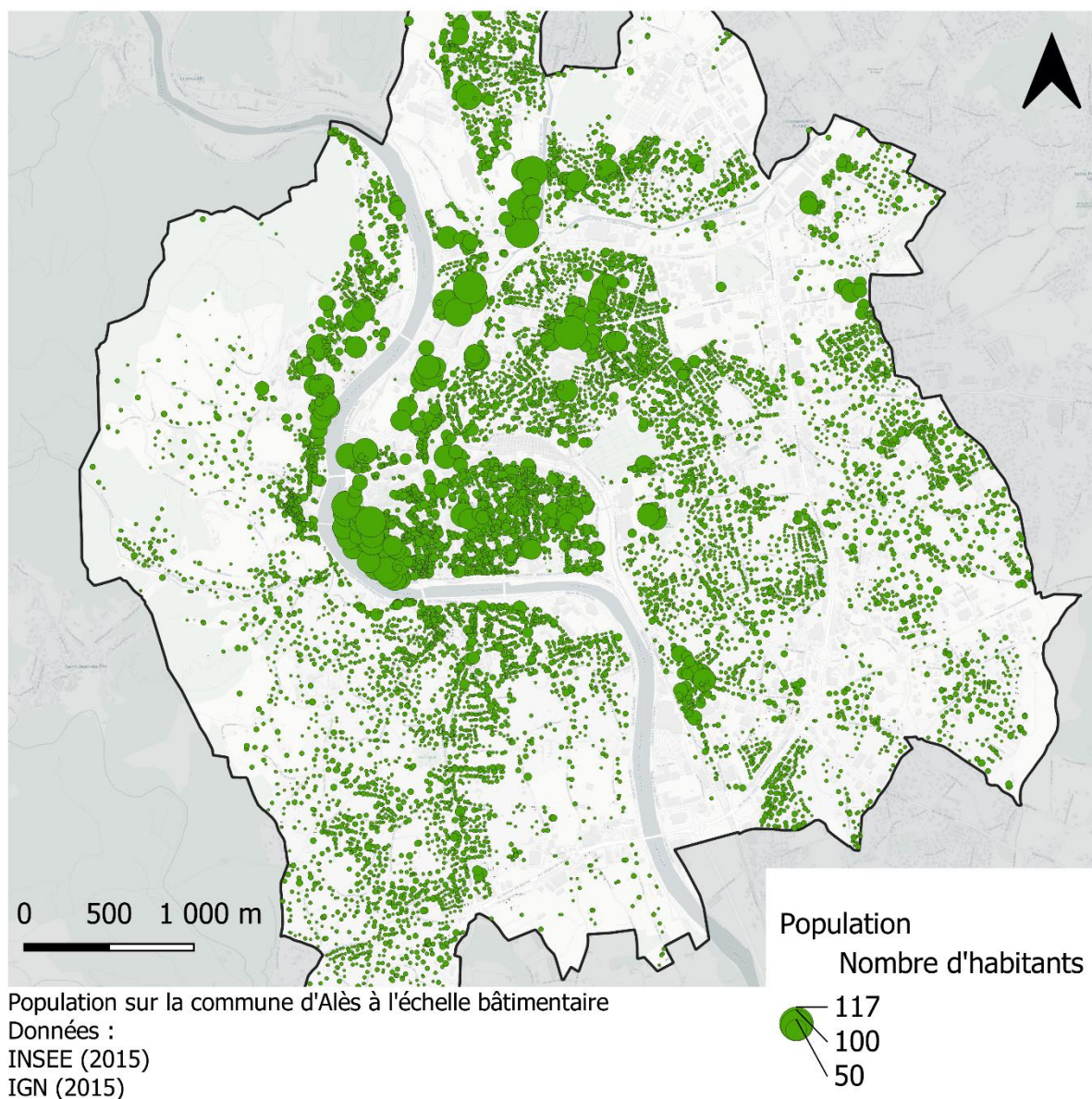


Carte 2 - IRIS de la commune d'Alès

Pour faciliter la lecture des cartographies présentées dans ce chapitre, des annotations seront ajoutées lorsque ces dernières sont référencées dans le texte. Cette approche permet d'éviter une surcharge des cartes en n'ajoutant pas systématiquement les IRIS.

1.1.1 Structure de l'habitat

La commune d'Alès présente une diversité typologique en matière d'habitat. Dans le centre-ville, l'habitat est majoritairement composé de tissu urbain dense. La partie ouest de l'IRIS centre-ville abrite un nombre important d'immeubles de plusieurs étages, concentrés de telle manière que, structurellement, l'urbanisme y est proche de ce que l'on retrouve au sein des grands ensembles HLM. Cette zone (ouest) est la plus densément peuplée de la commune (Carte 3). Plus à l'est, toujours au sein de l'IRIS centre-ville, l'habitat y est moins dense, et plus caractéristique des centres-villes historiques.

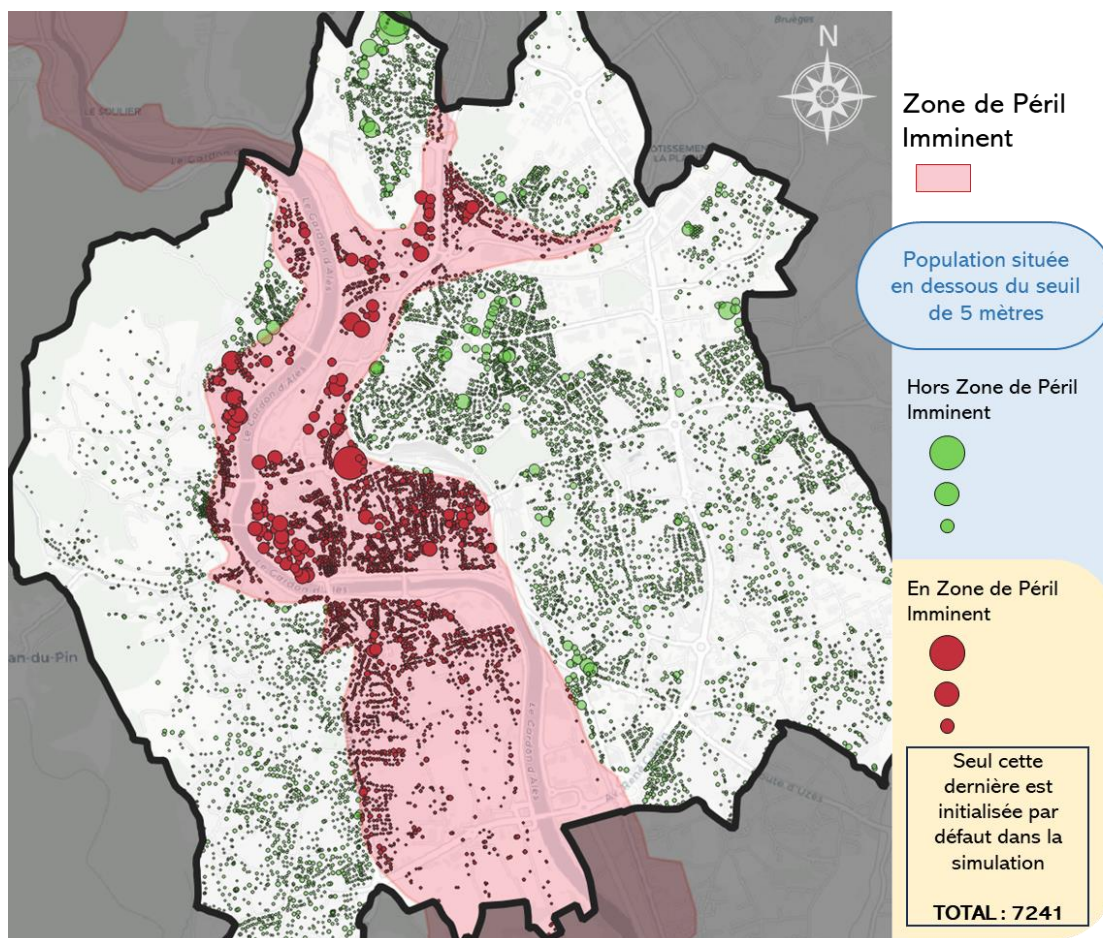


Carte 3 – Répartition de la population sur la commune d'Alès

Outre le centre-ville, la commune compte plusieurs autres zones à forte densité de population. Le long du Gardon, sur sa rive est, s'étend du centre-ville au quartier Tamaris une succession d'habitats principalement sous forme de grands ensembles

HLM. Les quartiers Près Saint-Jean, Cévennes et Tamaris illustrent particulièrement cette typologie.

La Carte 4 représente la zone à évacuer telle que définie dans le PPI. La valeur initiale de population à évacuer prend en compte uniquement les personnes qui résident à une hauteur inférieure ou égale à cinq mètres. Cela correspond à la hauteur maximale moyenne attendue en cas de rupture de barrage, sur la commune alésienne. Cette valeur de population est considérée comme initiale, cependant, il est également probable que l'ensemble de la population de la zone menacée doive évacuer. Cela a donc été inclus sous la forme d'un paramètre spécifique.

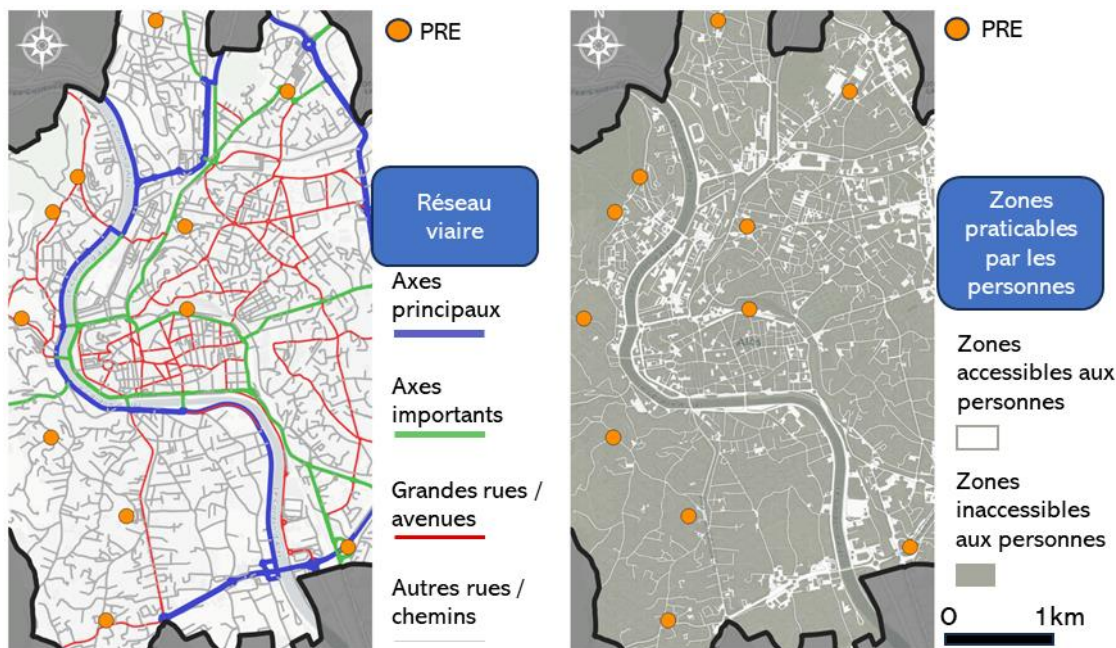


Carte 4 - Population vivant sous le seuil de 5 mètres

1.1.2 Nature du réseau

L'un des enjeux majeurs d'une évacuation de population est le réseau viaire. La forme du réseau routier d'une ville influence la capacité des personnes à se déplacer rapidement dans celle-ci. Il peut également exercer une influence, cela a été discuté précédemment, sur les formes de la mobilité par les représentations que les personnes se font de ce dernier. La ville d'Alès ayant été construite autour d'une rivière, le Gardon, comme pour beaucoup de villes en bord de rivière ou de fleuve, il est un élément structurant de cette dernière. Par conséquent, le réseau de la ville d'Alès se structure autour du Gardon. La N106 par exemple, en est un des axes structurants du point de vue du trafic automobile et piéton.

La ville d'Alès est propice à l'utilisation de véhicules individuels, en grande partie grâce à sa Rocade et à la N106 qui fluidifient le trafic (Carte 5). En ce qui concerne la mobilité piétonne, le centre-ville d'Alès est piétonnier et se compose de tronçons étroits (Carte 5). Les autres voies ont des largeurs variées et sont généralement partagées avec les véhicules.



Carte 5 - Axes routiers et surfaces accessibles par les piétons

1.1.3 Zone inondable

La commune d'Alès se situe sur les rives du Gardon. Bien que la rupture du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge soit un risque envisagé pour le modèle de simulation, le Gardon présente en lui-même un risque d'inondation. La commune d'Alès est régulièrement frappée par des épisodes pluvieux intenses, connus sous le nom d'épisodes cévenols. Ces épisodes pluvieux sont caractérisés par leur intensité, souvent violente malgré leur possible brièveté¹². Ils contribuent à générer un risque constant dans la région, et sont au cœur de la réflexion que les autorités mènent dans le cadre de l'amélioration de la protection de la commune d'Alès face au risque inondation.

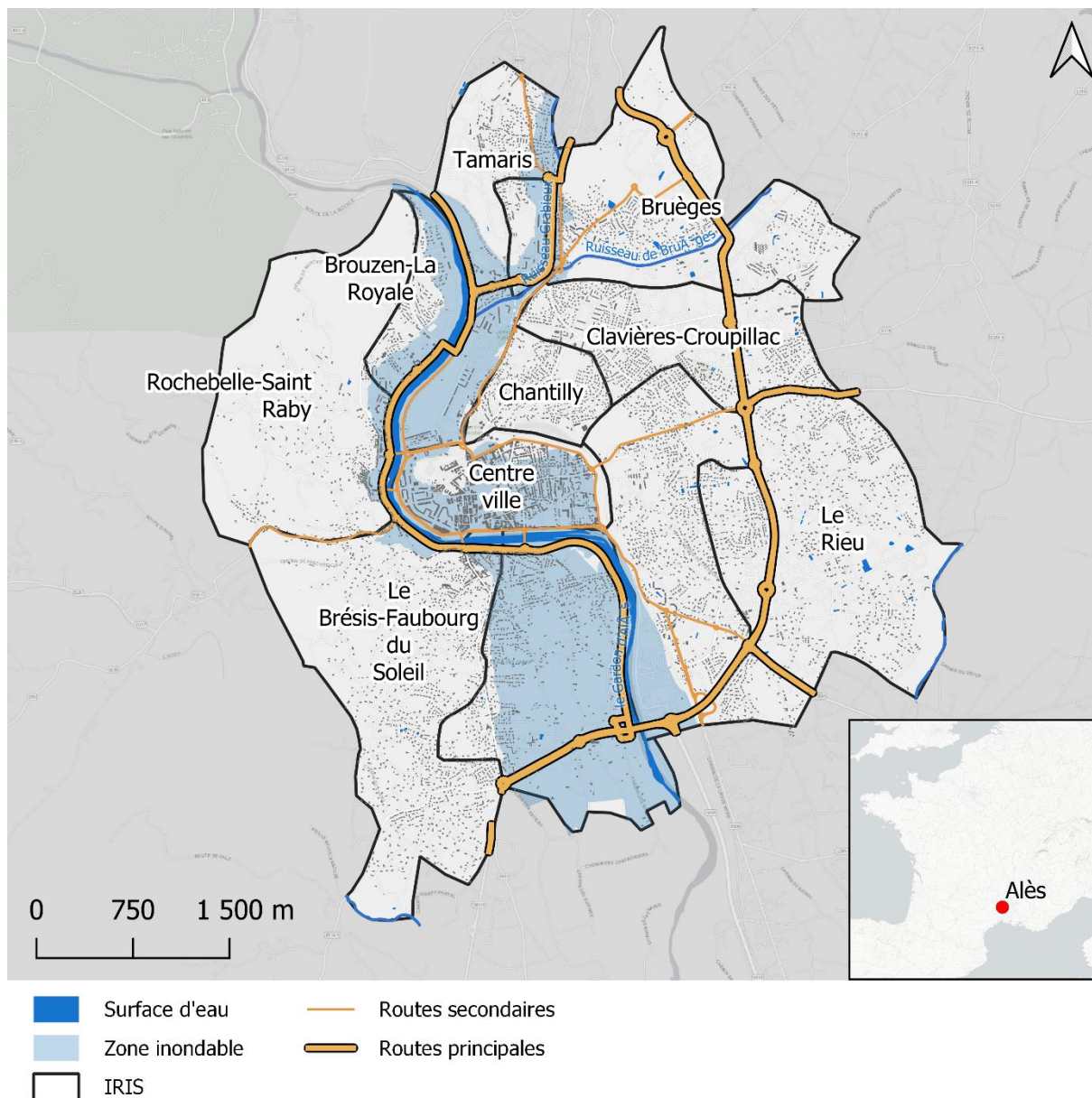
Dans le cadre de ce travail, le contexte de survenue d'un épisode cévenol n'est pas retenu. Bien que pertinent lorsqu'on discute de la rupture d'un barrage, le focus de ce travail se porte sur les effets d'une inondation sur la mobilité des individus. La combinaison d'un épisode cévenol avec une rupture imminente du barrage produirait des conséquences bien au-delà de ce que cette étude souhaite examiner. Dans un tel

¹² Dans la nuit du dimanche 8 au lundi 9 septembre 2002, un événement historique se produit à Alès. Une pluie diluvienne s'abat sur les Cévennes (jusqu'à 600 mm d'eau en peu de temps). La situation devient rapidement hors de contrôle : des automobilistes sont coincés par la montée des eaux, des habitants sont évacués par bateaux ou hélitreuillés par l'armée, les réseaux d'énergie et de communication sont coupés. La ville d'Alès reste complètement isolée jusqu'au 10 septembre, telle une île entourée d'eau. Le bilan définitif fera état de sept victimes ainsi que plusieurs milliers de sinistrés.

contexte, les déplacements deviendraient extrêmement risqués, voire mortels, nécessitant une évacuation adaptée avec des mesures spécifiques.

En revanche, tout épisode pluvieux sur la région n'étant pas systématiquement de type cévenol, ce travail conserve tout son intérêt. Le territoire d'étude est sujet à un fort ruissellement, notamment au sein de l'IRIS centre-ville. Pour ces raisons, le choix s'est porté sur l'intégration d'événements hydrologiques de petite et moyenne incidence. L'idée est également que ces événements puissent être reliés à des données expérimentales sur le déplacement piéton en situation d'inondation.

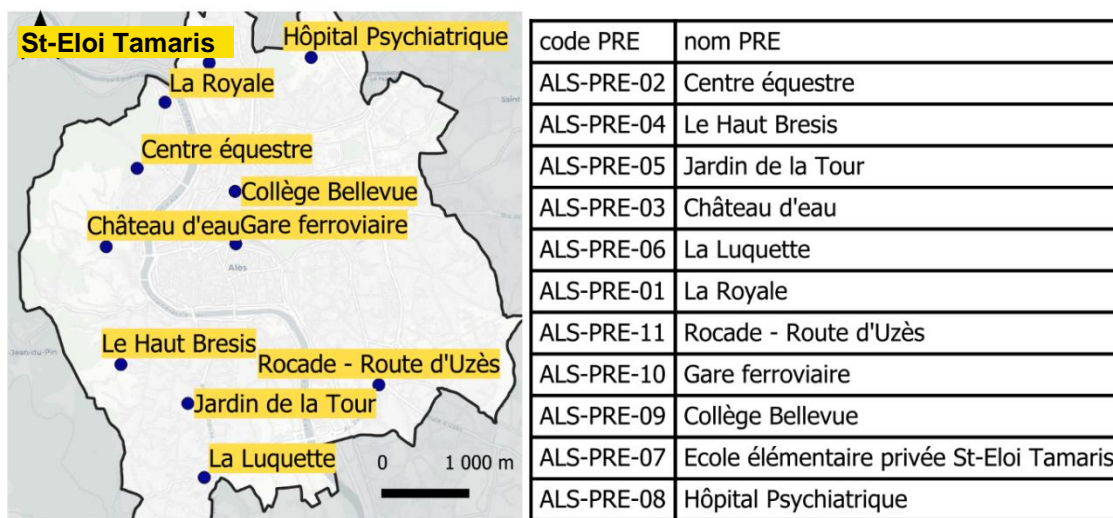
Nous sommes conscients des limites de la démarche, inhérente à une prise en compte limitée des caractéristiques physiques et comportementales d'un affluent en surverse. Il a cependant été pensé que l'intégration d'une telle possibilité ouvrirait ensuite la voie à des travaux d'un niveau de spécialisation supérieur. La zone inondable retenue est issue des travaux menés dans le cadre de l'édiction des TRI. Elle représente la zone d'extension de crue maximale considérée (Carte 6). Elle correspond également à l'ensemble de la zone réglementée par le PPRI d'Alès. Cette extension a été choisie parce qu'elle inclut les zones touchées par des effets de ruissellement.



Carte 6 - Principaux axes de communication et zone inondable sur la commune d'Alès

1.1.4 Les points refuges

La commune d'Alès comporte onze points refuges (Carte 7). Des résultats préliminaires publiés dans (Orengo, Tena-chollet and Sauvagnargues, 2022) ont montré que parmi les communes incluses dans le PPI de Sainte-Cécile d'Andorge, Alès est celle qui possède le moins de PRE par habitant, et cela impacte négativement le déroulement de l'évacuation sur la commune en question.



Éléments de la carte

- PRE

Carte 7 - Positions et noms des points refuges de la commune d'Alès

A ce stade, il est important de préciser que dans le document d'information relatif à la rupture du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge, quelques erreurs et imprécisions ont été relevées. Notamment, l'emplacement de certains points refuges (PRE) est imprécis, comme pour l'école de Saint-Eloi ou le croisement entre la route d'Uzès et la Rocade. De plus, certains renvois, comme celui du ALS-PRE-04, indiquent des zones générales plutôt que des emplacements spécifiques. Par exemple, ALS-PRE-04 fait référence au Haut-Brésis, qui est en réalité un quartier de la ville d'Alès et donc couvre une zone plus large. Les positions ont donc été ajustées à partir de la carte fournies dans le PPI.

III.1.2 Analyse univariée

Les paramètres de la simulation, qui ont été instanciés avec succès, sont au nombre de six (Tableau 9). L'analyse univariée du modèle de simulation vise à étudier l'outil développé dans ce travail de thèse en analysant la plage comportementale de chacun des paramètres, à travers l'ensemble de leurs valeurs d'entrée.

1.2.1 Les paramètres

Le choix des valeurs considérées comme standards a fait l'objet d'un arbitrage. Pour certains paramètres, une valeur privilégiant l'obtention d'un maximum d'informations a été sélectionnée : même si cette stratégie peut sembler moins crédible au regard d'une réalité observable, nous la jugeons plus pertinente en termes de capacité explicative des résultats obtenus. Par exemple, pour le paramètre B1, qui représente le taux de refus d'évacuation, la valeur moyenne en France est de 14%, tandis que la

littérature rapporte des valeurs variant de 5% à 35%. Cependant, la valeur standard choisie est de 0. L'un des objectifs de l'analyse développée dans ce chapitre est de caractériser le comportement du modèle de simulation. De plus, l'impact d'une forte densité d'évacués sur le processus d'évacuation lui-même fait l'objet d'une attention particulière. Par conséquent, il est souhaitable de ne pas réduire artificiellement cette densité lors de l'analyse paramétrique en choisissant une valeur autre que nulle pour B1.

Un problème similaire a orienté le choix de la valeur standard pour le paramètre B2 (temps de préparation). Les courbes de départs issues de la littérature, bien qu'incluses comme valeurs possibles du paramètre B2, tendent à générer des résultats ne permettant pas d'étudier correctement la réponse du modèle de simulation. Elles provoquent en réalité des départs échelonnés sur plus d'une heure. Ce rythme de départ des personnes contribue également à invisibiliser des phénomènes relatifs à la densité d'évacués. Dans un autre sens, la valeur du paramètre B2 = null, permet la mise en évidence de ces phénomènes. Le choix d'une valeur pour le paramètre B2 doit donc être issu d'un compromis.

Le Tableau 9 résume l'ensemble des valeurs possibles pour chacun des paramètres ayant pu être implémentés dans la simulation.

Pour rappel, les paramètres implémentés sont les suivants :

- B1 : proportions de refus d'évacuer ;
- B2 : le temps de préparation des personnes ;
- B3 : la portée de l'évacuation ;
- D1 : la méthode de cheminement ;
- D2 : les choix de destination ;
- V2 : la praticabilité du réseau.

Paramètres		Valeur 1	Valeur 2	Valeur 3	Valeur 4
B1	Noms des valeurs	B1(0)	B1(05)	B1(14)	B1(35)
	Observations	Evacuation totale	5% de refus d'évacuer	14% de refus d'évacuer	35% de refus d'évacuer
B2	Noms des valeurs	B2(null)	B2(30)	B2(ms)	B2(tw)
	Observations	Départs simultanés	Départs réguliers entre 0 et 30 minutes	Deux courbes des départs issues de la littérature	
B3	Noms des valeurs	B3(0)	B2(50)	B3(100)	/
	Observations	Population initiale	Population initiale + 50% habitant un logement situé strictement au-dessus de 5 mètres en ZPI	Population initiale + 100% habitant un logement situé strictement au-dessus de 5 mètres en ZPI	/
D1	Noms des valeurs	D1(PC)	D1(PS)	D1(PG)	/
	Observations	Chemins les plus courts	Chemins les plus simples	Chemins les plus dégagés	/
D2	Noms des valeurs	D2(O)	D2(A)	D2(H)	D2(P)
	Observations	PRE les plus proches	PRE aléatoires dans un rayon de deux kilomètres	Lieux d'hébergement	Chez un proche
V2	Noms des valeurs	V2(0)	V2(8)	V2(43)	V2(90)
	Observations	Aucun ruissellement	Ruissellement de 8 centimètres	Ruissellement de 43 centimètres	Ruissellement de 90 centimètres

Tableau 9 - Liste des paramètres et de leurs valeurs

Les valeurs affichées en vert sur le Tableau 9 sont ce que l'on appellera dans la suite de ce chapitre des valeurs « standards ». De cette manière, chaque paramètre peut être testé sur toute la plage de valeurs contenues dans le tableau en situation de toute chose égale par ailleurs. Ainsi, pour exemple, le test du paramètre B1 se fera à l'aide des configurations paramétriques suivantes :

- [B1(0)/B2(30)/B3(0)/D1(PC)/D2(O)/V2(0)] ;
- [B1(05)/B2(30)/B3(0)/D1(PC)/D2(O)/V2(0)] ;
- [B1(14)/B2(30)/B3(0)/D1(PC)/D2(O)/V2(0)] ;
- [B1(35)/B2(30)/B3(0)/D1(PC)/D2(O)/V2(0)].

1.2.2 Interaction entre les paramètres

Le modèle de simulation tel qu'instancié et mobilisé dans ce chapitre comporte six paramètres. Le test univarié de chacun des paramètres permet de vérifier le fonctionnement de ces derniers ainsi que la réponse comportementale du modèle de simulation à la variation de chacun d'entre eux. Cependant, une analyse univariée de l'ensemble des paramètres du modèle de simulation ne permet pas à elle-seule une caractérisation suffisante de son comportement.

Le modèle de simulation tel que construit n'admet pas d'indépendance relationnelle entre les différents paramètres. Cela signifie que chacun des paramètres est susceptible d'exercer une influence différente sur les sorties du modèle en fonction de la calibration des autres paramètres. L'analyse de la littérature effectuée précédemment doit donc permettre de faire émerger une série d'hypothèses. Ces hypothèses concernent d'éventuelles relations fortes entre les paramètres du modèle de simulation, elles sont résumées dans le (Tableau 10).

Croisement	Paramètre cible	Paramètre explicatif
1	B2	B3
<p>Observations :</p> <p>Le paramètre B2 contrôle le rythme de départ des personnes. Le paramètre B3 contrôle les règles géographiques de l'évacuation. Le paramètre B2 est susceptible de générer des flux de piétons importants lorsque les départs sont comprimés dans le temps. Le paramètre B3 peut également augmenter le nombre de personnes à évacuer lorsque les règles géographiques fixées de l'évacuation incluent un nombre important de personnes. L'effet de l'augmentation du nombre de personnes à évacuer sur le déroulement de l'évacuation pourrait être réduit ou augmenté par la compacité temporelle des départs.</p>		
2	D1	B2 + B3
<p>Observations :</p> <p>Le paramètre B2 contrôle le rythme de départ des personnes. Le paramètre B3 contrôle les règles géographiques de l'évacuation. Le paramètre D1 contrôle la nature des itinéraires. La nature des itinéraires inclus, les chemins les plus courts notés D1(PC), les chemins les plus simples notés D1(PS) et les chemins les plus dégagés notés D1(PG). Ces derniers – D1(PG) - entraînent un regroupement des personnes sur des grands axes. Les paramètres B2 et B3 peuvent contribuer à augmenter la taille des flux piétons. Notamment lorsque le paramètre B2 génère un départ rapide des personnes, et lorsque le paramètre B3 entraîne l'évacuation d'un nombre élevé de personnes. Il est possible qu'une augmentation des flux piétons induite par les paramètres B2 et B3 entraîne une différence plus importante dans la variation des résultats entre D1(PC) et D1(PG).</p>		
3	D1	D2
<p>Observations :</p> <p>Le paramètre D1 contrôle la nature des itinéraires. Le paramètre D2 contrôle le choix de destination. Lorsque D2 est fixé sur la valeur « PRE le plus proche », la distance à parcourir par les personnes est minimisée. En conséquence, il est possible que les résultats issus de la variation du paramètre D1 soient également minimisés. Si la valeur de D2 est modifiée, le trajet des personnes s'allonge. La différence entre les valeurs de D1, donc les types d'itinéraires, est également susceptible de s'allonger.</p>		
4	D1	V2
<p>Observations :</p> <p>Le paramètre D1 contrôle la nature des itinéraires. Le paramètre V2 ajoute un effet de ruissellement sur le territoire test. La valeur de D1 est initialement fixée sur PC, il s'agit des chemins les plus courts. Elle peut varier, et donc allonger les itinéraires. Des itinéraires plus longs génèrent des temps de parcours plus longs. Le paramètre V2 ralentit le déplacement des personnes lorsqu'elles se trouvent dans une zone touchée par un phénomène de ruissellement. L'allongement des itinéraires provoqué par la modification de D1 pourrait se conjuguer avec la présence d'un ruissellement. Les personnes pourraient avoir à traverser une plus grande distance en condition de ruissellement.</p>		

Tableau 10 - Croisement des paramètres

Le croisement de certains paramètres a été jugé essentiel après consultation des résultats de l'analyse univariée. Il a semblé que l'influence de certains paramètres sur le comportement du modèle de simulation pouvait dépendre de la valeur prise par un deuxième voire un troisième paramètre. En fin de première section, plusieurs hypothèses sur ces combinaisons ont pu être formulées, et donc un protocole d'analyse croisée a pu être mis en place.

III.1.3 Indicateurs de mesure

L'atout principal d'un modèle d'évacuation préventive réside dans la possibilité de comparer divers scénarios et de mettre en évidence des faiblesses et des axes d'amélioration dans l'organisation d'une opération d'évacuation de population. Afin de pouvoir comparer divers scénarios, il faut disposer d'une métrique capable de les comparer. Dans ce travail, la volonté est de fournir un maximum d'information en sortie du modèle de simulation. Cela oblige donc à multiplier les indicateurs de mesure. Le modèle proposé dans le cadre de ce travail permet de mesurer une série d'éléments centraux d'un processus d'évacuation et de spatialiser les phénomènes saillants, c'est-à-dire les plus impactants au regard de l'efficacité/de la performance globale de ce processus. L'objectif étant également d'apporter de l'information sur d'éventuelles inégalités territoriales.

1.3.1 Les courbes de cumul des évacués

Le territoire à évacuer est toujours caractérisé par une population menacée par un aléa. L'objectif d'une évacuation est ainsi d'évacuer la totalité de cette population menacée dans le temps imparti, temps qui est souhaité le plus court possible la plupart du temps. C'est en effet un indicateur récurrent dans l'ensemble des travaux de simulation numérique d'évacuation de population.

Naturellement, le modèle issu de ce travail de thèse vise, en sortie de simulation, un comptage des personnes mises en sécurité en fonction du temps. Chaque minute écoulée, le modèle de simulation doit reporter un nombre de personnes ayant atteint leurs destinations. Les courbes sont ensuite exprimées en part relative de la population totale considérée comme concernée par l'évacuation. Les effectifs de personnes évacuées sont cumulés sur une période de trois heures. Le seuil des trois heures certifie une évacuation totale de l'ensemble des personnes concernées dans tous les cas de figures possibles. Un seuil plus bas pourrait tronquer une partie des courbes.

1.3.2 La cartographie des temps d'évacuation

Le temps nécessaire afin d'évacuer la totalité des personnes menacées par un aléa permet d'évaluer la performance de l'opération d'évacuation. Dans le cas d'une évacuation piétonne, l'étape de déplacement des personnes depuis leurs lieux de départ jusqu'à leurs lieux d'arrivée est considérée comme capitale. Afin de monitorer cet aspect de l'évacuation, la courbe de cumul des évacués ne suffit pas. Le temps de déplacement ne représente en effet qu'une partie de l'évacuation d'une personne. En plus de cela, un temps de déplacement à l'échelle de la population n'est que peu intéressant, les disparités spatiales d'accessibilité et de formes urbaines pouvant entraîner d'importants écarts à la moyenne.

Pour cela, le modèle permet de calculer les temps de déplacement des personnes entre leurs points de départs et leurs points d'arrivée. Cet indicateur est moyenné à l'échelle du bâtiment. Cela signifie que pour n personnes situées dans un bâtiment, seule la valeur moyenne de déplacement est conservée. Ce choix peut être argumenté par la relative linéarité du modèle. Si des éléments sont susceptibles de modifier, en particulier ralentir le déplacement des personnes, le modèle à son niveau de conception actuel les prend en considération de façon linéaire. Ainsi, deux personnes dont le point de départ est le même, mais dont la temporalité de départ diverge, se déplaceraient dans des conditions très proches.

Dans un objectif de lisibilité, il peut être envisagé que les données de cet indicateur soient ensuite intégrées dans un maillage (l'utilisation de mailles de carreaux de 20 mètres de côté semble pertinente en première approche). L'idée est ici d'obtenir des zones géométriquement homogènes, plutôt que simplement des valeurs à l'échelle des bâtiments.

1.3.3 Le nombre de personnes par tronçons de route

Comme indiqué précédemment, le partage du réseau par les usagers piétons lors d'une évacuation est un enjeu important dans la conduite de cette dernière. Si le calcul des temps de parcours individuels peut alors indiquer d'éventuels ralentissements dus à ce problème de partage, ils ne permettent pas de situer précisément les parties du réseau ou le partage devient complexe. Il apparaît donc pertinent de mettre en place une métrique capable de fournir une information spatio-temporelle sur la densité d'évacués sur le réseau. Pour ce faire, il est proposé d'historiser à l'échelle de chaque tronçon du réseau le nombre d'évacués s'y trouvant (il est proposé une fréquence de dix minutes pour chaque historisation).

Un autre positionnement scientifique aurait pu cependant être adopté. La demande sur le réseau aurait pu être considérée par effectifs cumulés. Ainsi, pour chaque tronçon du réseau, une métrique globale aurait pu être proposée en sortie de simulation. Il n'est pas question ici de dévaluer l'utilisation d'une telle métrique. Cependant, deux constats font qu'un indicateur de telle nature n'a pas été retenu. L'indicateur choisi, fournissant une information fixe chaque dix minutes, a démontré pouvoir sans problème permettre de constater d'éventuels déséquilibres significatifs dans la matérialisation spatiale des mobilités. Pouvant être métaphoriquement comparé à une « photographie du territoire » à intervalles de temps réguliers, l'information obtenue est jugée à la fois pertinente et suffisante. De plus, l'utilité d'un effectif cumulé peut être discutée. En réalité, le nombre de personnes empruntant une portion du réseau n'est pas une information majeure lorsqu'elle est dissociée de la temporalité avec laquelle ils empruntent effectivement ladite portion du réseau. Cela ne permet pas de mettre en évidence des constats sur le comportement du modèle en plus de ceux déjà fournis par l'indicateur retenu.

1.3.4 La demande sur les points refuges

L'une des problématiques se posant à un territoire devant évacuer cette dernière se situe dans l'acheminement des personnes vers des lieux d'accueil. Les PRE sont uniquement des points étapes. Ensuite, le PC Crise doit organiser le transport des

personnes vers d'autres lieux plus pérennes. Ainsi, afin de favoriser le succès de l'opération d'évacuation et de minimiser les risques relatifs à l'accumulation de personnes dans des espaces n'étant pas nécessairement adaptés, il faut organiser ce transport de manière efficiente.

La simulation propose donc, en sortie, des courbes d'arrivées à l'échelle de chaque PRE.

III.2 Comportement de la simulation

Dans cette section, chaque paramètre va faire l'objet d'un test. Ce test a pour objectif d'alimenter entre quatre et six indicateurs de sortie à chaque fois. A l'issue de cette analyse des paramètres, il doit être possible, d'une part de pouvoir caractériser le comportement du modèle de simulation dans ses grandes lignes, d'autre part de constater si d'éventuelles combinaisons de paramètres pourraient exercer une influence sur l'impact de ces derniers.

Les tests effectués sont détaillés dans les paragraphes qui suivent, et une synthèse de ces tests est proposée en III.2.7.

III.2.1 Comportement du paramètre B1, le refus d'évacuer

Le terme "refus d'évacuer" est ici accepté comme la non-évacuation d'une personne lorsqu'elle est pourtant concernée par une telle injonction.

À l'échelle du modèle, la non-évacuation d'une partie de la population contribue à réduire la densité de personnes sur le réseau routier. Si les départs sont échelonnés dans le temps, il est possible de s'attendre à ce que, la densité n'étant pas critique dans de telles conditions, l'impact de la variation du paramètre sur les indicateurs puisse être faible voire nulle. En revanche, si les départs sont simultanés, une densité de personnes sur le réseau plus faible signifie un déplacement plus aisé pour les personnes qui choisissent d'évacuer. En effet, des départs non échelonnés dans le temps entraîneraient de fortes densités locales, et donc, une plus grande proportion de refus d'évacuer pourrait fluidifier les flux de piétons. En dépit des lourdes conséquences des refus d'évacuer sur la sécurité des personnes, le paramètre B1 permet alors de soulever la question de l'effet de la population sur la performance de l'opération d'évacuation.

La détermination d'une proportion de personnes refusant l'évacuation et restant à leurs domiciles a fait l'objet d'une récolte de donnée préalable. En Europe, les chiffres font état d'une proportion pouvant aller de 5% (décomptés lors d'un exercice à Nimègue), jusqu'à 35% à Avignon. Il est donc pertinent de proposer des valeurs qui s'étendent sur cette plage. Le choix a été fait de retenir trois valeurs. 5%, la valeur ayant été observée à Nimègue, chiffre étant considéré comme faible. 14% qui est une moyenne (à l'échelle de la France). 35%, considéré comme une valeur élevée, chiffre observé à Avignon. Les trois valeurs utilisées sont affichées en (Tableau 11).

Valeur du paramètre	Dénomination
5% des personnes générées en début de simulation ne se déplacent pas vers leurs destinations.	B1(05)
14% des personnes générées en début de simulation ne se déplacent pas vers leurs destinations.	B1(14)
35% des personnes générées en début de simulation ne se déplacent pas vers leurs destinations.	B1(35)

Tableau 11 - Valeurs possibles du paramètres B1

Dix simulations dont les résultats sont résumés en (Tableau 12) ont été réalisées. Le Tableau 12 présente, pour chaque valeur de B1 le temps moyen en minutes qu'il a fallu pour évacuer 50, 75, 90, 95 et 100% de la population de la commune d'Alès. Pour une valeur de B1 similaire les simulations montrent un écart-type faible jusqu'à 90% de la population évacuée. Au-delà de 90% l'écart-type entre les différents runs de la simulation tend à augmenter pour atteindre finalement des valeurs significativement élevées en fin d'évacuation (100%).

	Taux d'évacuation	50%	75%	90%	95%	100%
B1(05)	1 SD -	25	31	41	47	75
	Moyenne	24	29	37	42	59
	1 SD+	24	28	34	37	43
B1(14)	1 SD -	24	31	38	45	63
	Moyenne	24	30	36	41	56
	1 SD+	23	29	34	38	44
B1(35)	1 SD -	24	29	35	40	54
	Moyenne	23	29	35	39	48
	1 SD+	23	29	34	37	44

Tableau 12 - Moyenne et 1^{er} écarts-types (SD) pour l'ensemble des simulations de B1

Outre le risque individuel et collectif que génèrent les refus d'évacuer, ils sont ici abordés du point de vue du modèle. Les refus d'évacuer représentent alors une diminution de la population évacuée homogène sur le territoire. En conséquence, une réduction du temps global afin d'évacuer 100% de la population (qui souhaite évacuer) est attendue. Le temps de parcours des individus depuis leur point de départ jusqu'à leur point d'arrivée ne devrait pas varier spatialement, mais une baisse généralisée sur l'ensemble de la commune test devrait pouvoir être observée. De la même façon, la fréquentation des axes du réseau devrait également diminuer homogènement sur l'ensemble de la commune. L'hypothèse ici formulée est donc qu'une diminution

homogène du nombre de personnes évacuées sur le territoire en entrée du modèle entraîne une réduction homogène des indicateurs en sortie.

2.1.1 Le cumul des évacués

Le paramètre B1 définit la proportion de personnes qui, en début de simulation, choisissent de ne pas évacuer. Le comportement attendu du modèle de simulation en fonction du paramètre relève donc d'une relation positive entre la valeur de B1 et la courbe de cumul des évacués obtenue en sortie. La (Figure 29) démontre une relation de la sorte, cependant, elle semble faible.

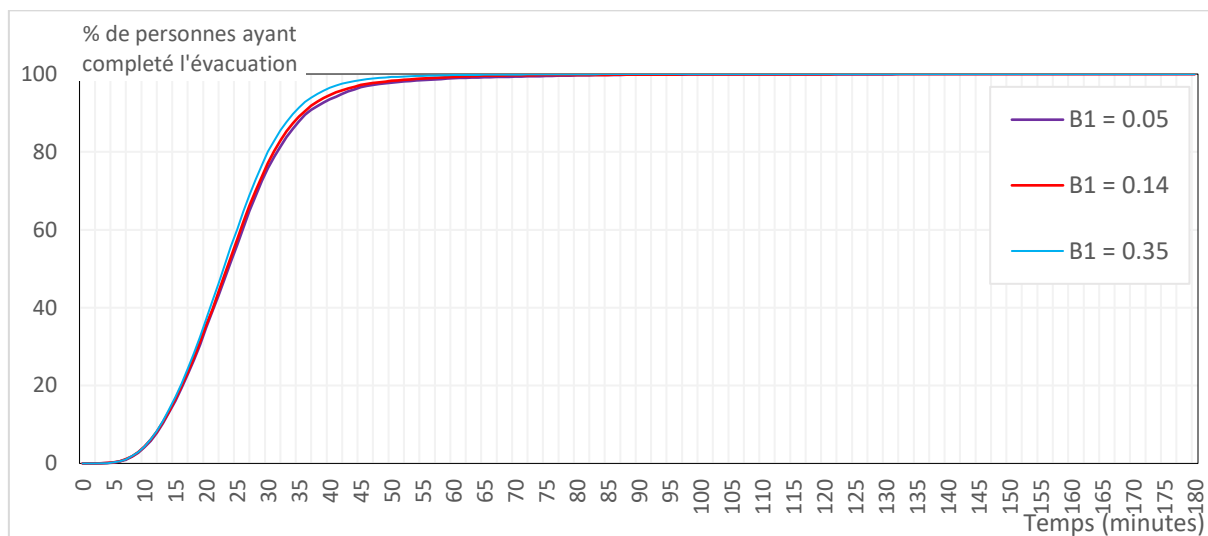


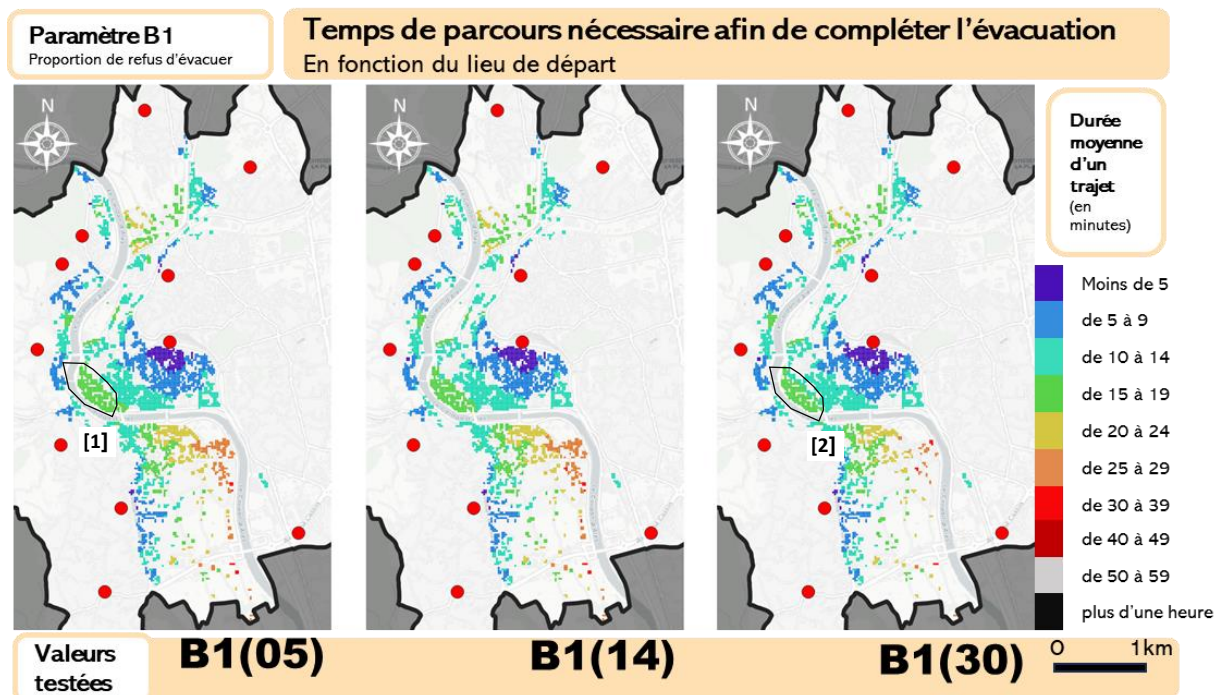
Figure 29 - Courbe de cumul des arrivées pour B1

La faiblesse de cette relation s'explique en partie par l'utilisation de la courbe de départs B2(30). Les départs sont suffisamment échelonnés dans le temps pour limiter la densité d'évacués présents sur le réseau simultanément. Le nombre de personnes n'influe alors que peu sur la nature de la courbe de cumul des évacués. Il est cependant constatable un écart relatif entre les trois courbes, plus important entre la 20ème minute de l'évacuation et la 60ème. C'est durant cette période qu'en vertu de la courbe de départs utilisée, le nombre de personnes sur le réseau est le plus important.

La courbe de cumul permet d'apprécier les différences dans le temps d'évacuation global des personnes lorsque B1 varie. Afin de mettre en évidence d'éventuelles hétérogénéités dans l'espace, la cartographie des temps de parcours est nécessaire.

2.1.2 Les temps de parcours

Outre le cumul des évacués en fonction du temps, la réduction du nombre d'évacués pourrait théoriquement augmenter l'accessibilité des PRE aux personnes. Le paramètre fonctionne de telle sorte que l'ensemble des personnes concernées par l'évacuation est généré en début de simulation, puis, les personnes ne souhaitant pas effectuer l'évacuation sont ensuite comptabilisées et ne se dirigent pas vers leurs destinations. Ces personnes sont sélectionnées aléatoirement. Il n'est pas attendu d'hétérogénéité spatiale dans l'augmentation de l'accessibilité des PRE pour la population. L'Atlas 1 confirme cette hypothèse.



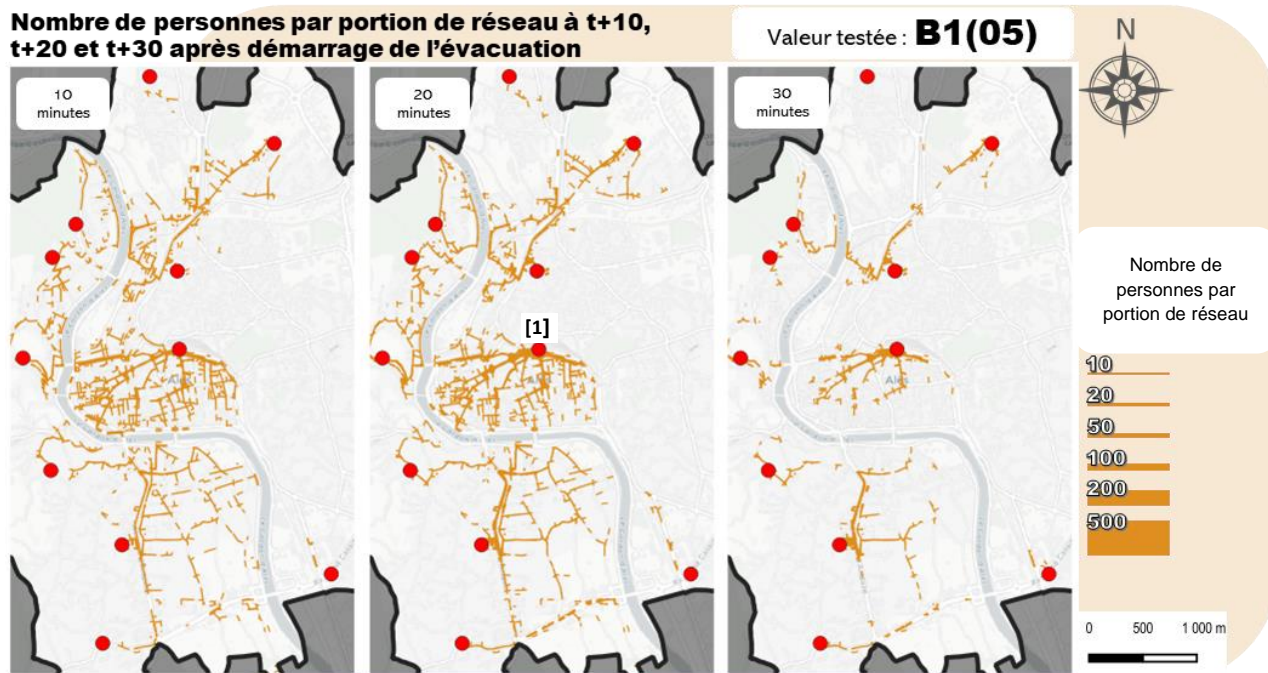
Atlas 1 - Temps de parcours individuels moyennés pour B1

Le gain en termes de temps de parcours est d'une part relativement faible pour l'ensemble du territoire testé, et d'autre part, spatialement homogène. La faiblesse du gain en termes de temps de parcours peut être expliquée par l'absence de valeurs de densité de personnes élevées sur le territoire, pour l'ensemble des valeurs de B1. Cela signifie que la courbe utilisée comme valeur standard pour le paramètre B2 (le temps de préparation) est suffisamment étalée pour empêcher l'observation de valeurs de densité critiques en tout point du territoire. De ce fait, peu importe le taux de personnes qui n'évacuent pas, les temps de parcours en demeurent relativement similaires.

En dépit de ces valeurs majoritairement similaires entre les trois valeurs de B1, il est possible de noter des différences marginales, notamment entre B1(05) et B1(30). Ces différences sont locales. Le temps de parcours semble ainsi réduit pour une partie de l'IRIS centre-ville, au niveau de sa partie ouest (Atlas 1[1], [2]). Il est possible qu'une partie de l'information contenue dans cet IRIS soit perdue à cause de la méthode de classification utilisée. En effet, lorsque B1(35) la limite entre les carreaux appartenant à la classe « 10 à 14 minutes » et ceux appartenant à la classe « 15 à 19 minutes » semble se décaler vers l'ouest. Pour rappel, la zone ouest de l'IRIS centre-ville fait partie des zones les plus densément peuplées de la commune d'Alès. Il est possible que la réduction du nombre d'évacués ait un effet mélioratif supérieur sur les temps de parcours sur cette partie du territoire.

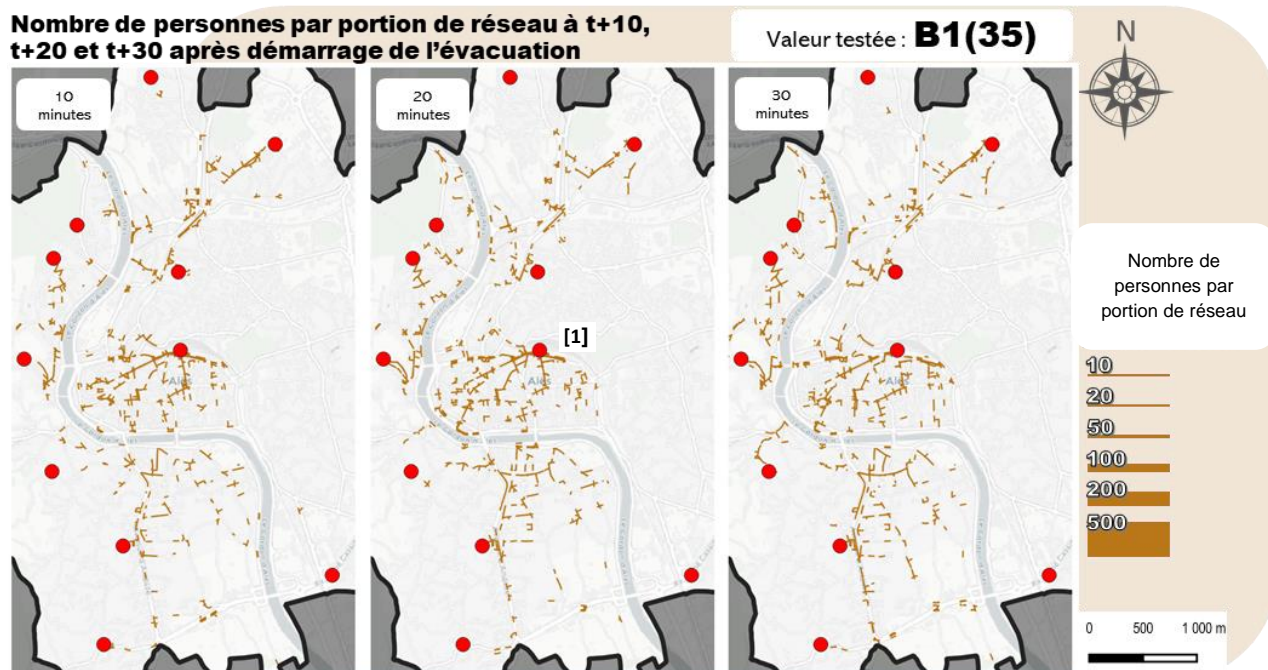
2.1.3 La fréquentation des tronçons de routes

Les (Atlas 2) et (Atlas 3) permettent de mettre en évidence la fréquentation des différents axes à plusieurs moments de l'évacuation simulée.



Atlas 2 - Fréquentations des axes pour B1(05)

Si l'information représentée par les (Atlas 2) et (Atlas 3) rend difficile la mise en évidence de constats définitifs, des différences sont observables. La valeur de B1(35) semble réduire drastiquement la densité d'évacués sur des parties du réseau habituellement très fréquentées (Atlas 2[1], Atlas 3[1]).



Atlas 3 - Fréquentation des axes pour B1(35)

Ainsi, certains tronçons du réseau comportent près de 150 évacués lorsque B1(05), mais on note une absence de valeurs supérieures à 50 évacués lorsque B1(35).

2.1.4 Analyse des résultats

Le comportement du modèle de simulation en fonction du paramètre B1 met en évidence une accélération de l'évacuation lorsque la densité d'évacués sur le réseau est maximale (généralement entre 20 et 60 minutes si l'on considère la valeur de B2 utilisée). Cela est le signe d'un effet délétère de la densité d'évacués sur la performance globale de cette dernière. La diminution du temps de parcours des personnes semble largement homogène sur le territoire, cependant, quelques particularités locales ont pu être observées, notamment dans des zones densément peuplées. Cela signifie donc que malgré la diminution spatialement homogène du nombre d'évacués, certaines zones y sont plus sensibles que d'autres. Il est donc possible d'entrevoir une densité d'évacués critique en ces lieux.

De plus, l'indicateur de fréquentation du réseau montre une forte réduction du nombre de personnes sur les parties terminales du réseau (les derniers axes avant de rejoindre les PRE). En effet, logiquement, les évacués ont tendance à se rassembler sur ces axes et il est possible d'affirmer que c'est sur ces derniers que la densité de personnes devient critique et que ces dernières sont significativement ralenties. En outre, le choix des PRE par les populations étant déséquilibré (beaucoup d'évacués pour un nombre réduit de PRE et plusieurs PRE peu sollicités), le gain de temps de parcours pourrait concerner les personnes choisissant un PRE « populaire ». Puisque ce sont ceux vers lesquels une majorité d'évacués se dirigent, une chute du nombre de personnes évacuant entraîne une diminution des effets de densité locaux, et donc un gain de temps de parcours. Autrement dit, la chute du nombre d'évacués étant spatialement homogène, la diminution des temps de parcours ne concerne que les personnes se dirigeant vers des PRE initialement proches de la saturation.

III.2.2 Comportement du paramètre B2, le temps de préparation

Dans la simulation ici présentée, le temps de préparation fait référence à la différence temporelle entre la réception de l'alerte par une personne et le démarrage de son évacuation. Le temps de préparation diffère en fonction des individus. Un ensemble de travaux précédents ont permis de choisir deux courbes pouvant s'appliquer dans le cadre d'une évacuation préventive en cas de danger imminent (Tweedie *et al.*, 1986; Mas, Adriano and Koshimura, 2013). A ces deux courbes, deux autres ont été ajoutées. Une courbe appelée « moyenne » (30 minutes) qui est un cumul linéaire des départs entre le 0 et 30 minutes après l'alerte, et une « non-courbe », D2 (null), qui simule une évacuation totale et simultanée des personnes (Tableau 13).

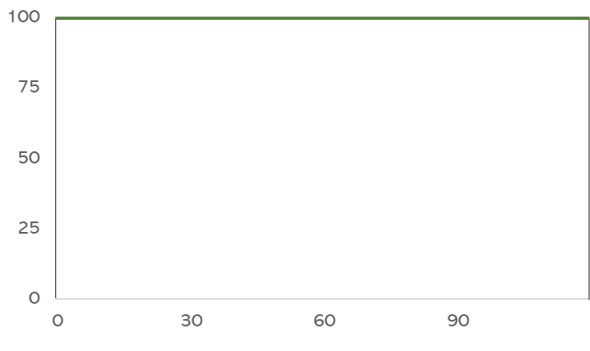
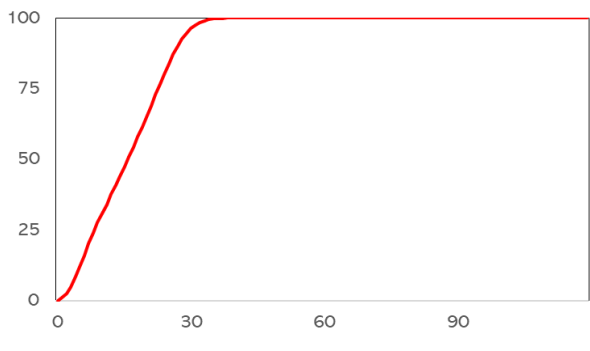
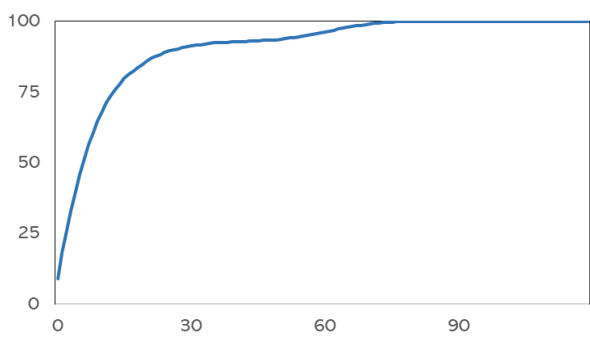
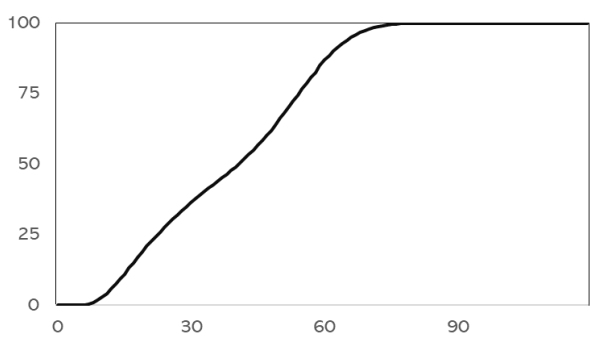
Valeur du paramètre	Courbe	Dénomination
Départs simultanés	 <p>The graph shows a horizontal line at the value 100 on the y-axis, extending from 0 to 90 on the x-axis. The y-axis is labeled from 0 to 100 in increments of 25. The x-axis is labeled from 0 to 90 in increments of 30.</p>	B2 (null)
Evacuation totale en 30 minutes	 <p>The graph shows a red curve starting at (0,0) and rising steeply to reach a value of 100 at the 30-minute mark. From 30 to 90 minutes, the curve remains constant at 100. The axes are the same as in the first graph.</p>	B2(30)
Courbe utilisée dans (Mas, Adriano and Koshimura, 2013)	 <p>The graph shows a blue curve starting at (0,0) and rising to reach a value of 100 at approximately 70 minutes. The curve has a slight plateau around 90 minutes. The axes are the same as in the first graph.</p>	B2(ms)
Courbe issue de (Tweedie <i>et al.</i> , 1986)	 <p>The graph shows a black curve starting at (0,0) and rising to reach a value of 100 at approximately 70 minutes. The curve has a different slope compared to the others, reaching 50% at around 45 minutes. The axes are the same as in the first graph.</p>	B2(tw)

Tableau 13 - Valeurs possibles du paramètre B2

L'objectif de l'exploration d'un tel paramètre réside dans la compréhension de l'impact du rapport entre une évacuation rapide de l'ensemble de la population et de l'évitement d'une trop grande densité de personnes sur le réseau en même temps sur la performance globale de l'évacuation.

L'hypothèse formulée ici est une augmentation des temps d'évacuation avec l'utilisation de courbes de départs moins échelonnées dans le temps. Cependant, l'augmentation du temps dont ont besoin les individus pour se déplacer jusqu'à leurs destinations ne devrait pas être suffisant pour compenser la différence générée par des départs plus étalés dans le temps.

Dix simulations ont été réalisées pour chaque valeur du paramètre B2. Le (Tableau 14) résume les statistiques descriptives de ces dix simulations pour l'indicateur courbe cumulative. Pour l'ensemble des valeurs du paramètre B2, les résultats tendent à être stables entre les différents runs de la simulation. Cependant, une légère variation apparaît au-delà de 90% de personnes évacuées.

	Taux d'évacuation	50%	75%	90%	95%	100%
B2(null)	1 SD -	14	18	24	29	37
	Moyenne	14	18	24	28	33
	1 SD+	13	18	23	27	31
B2(ms)	1 SD -	20	29	40	69	94
	Moyenne	20	28	40	67	88
	1 SD+	20	28	39	65	81
B2(tw)	1 SD -	53	67	77	82	96
	Moyenne	52	67	76	81	92
	1 SD+	52	67	75	80	88
B2(30)	1 SD -	29	36	43	47	57
	Moyenne	29	36	42	46	55
	1 SD+	28	36	42	45	53

Tableau 14 - Moyenne et écarts-types pour l'ensemble des simulations de B2

2.2.1 Courbe de cumul

Si d'éventuels aspects comportementaux qui favoriseraient un déplacement plus rapide des personnes lorsqu'elles prennent plus de temps pour se préparer sont mis de côté, la relation entre le temps de préparation des personnes et le cumul des évacuations complétées doit être négative. Des temps de préparation plus longs favorisent donc un temps d'évacuation global plus élevé. Une relation linéaire entre la valeur du paramètre B2 et la courbe de cumul des évacués est cependant à exclure. En effet, le temps de préparation des personnes a également un impact sur la simultanéité des départs. Hypothétiquement, des départs moins échelonnés dans le temps doivent donc conduire à des valeurs de densité de personnes plus élevées sur le territoire.

Les quatre valeurs de B2 testées montrent une relation non-linéaire entre les courbes de départs et les courbes d'arrivées des personnes, ce qui indique un effet réel de la

densité de personnes sur le réseau et la courbe des arrivées. Cela confirme également l'infime différence déjà mise en évidence lors du test du comportement du paramètre B1.

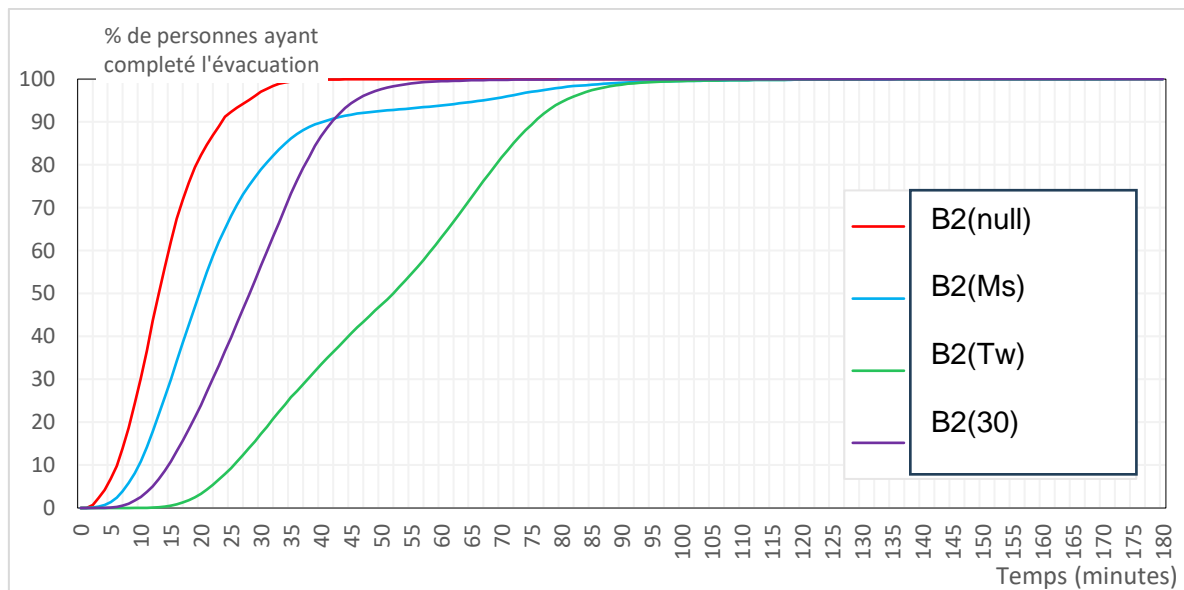


Figure 30 - Courbe de cumul des arrivées pour B2

Des courbes issues de la littérature, la courbe utilisée par (Mas, Adriano and Koshimura, 2013) est de loin la plus optimiste : elle a été utilisée dans un contexte particulier puisqu'il s'agissait de la simulation d'une évacuation de population piétonne face à un risque tsunami sur l'île de La Punta (Pérou). C'est donc une courbe qui considère un niveau élevé d'urgence ressenti par les populations. Au contraire, la courbe issue des travaux de (Tweedie *et al.*, 1986) indique des départs plus échelonnés dans le temps. C'est une courbe construite à partir de données obtenues lors d'une évacuation préventive face à un risque nucléaire. Cette dernière est mieux adaptée à un contexte d'évacuation préventive puisqu'elle est issue d'une évacuation en situation de péril imminent.

Le graphique en (Figure 30) démontre un impact non linéaire du paramètre B2 sur le cumul d'évacués. En effet, pour la courbe issue du paramètre « no », qui est une calibration supprimant la courbe de départ, les résultats obtenus peuvent être considérés comme proches de ceux avec une courbe des départs plus échelonnée dans le temps, celle de (Mas, Adriano and Koshimura, 2013) par exemple. Il apparaît que lorsque le départ des évacués est plus progressif, le cumul d'arrivées a moins tendance à suivre cette dernière. Cela signifie qu'une autre variable pourrait avoir un impact, et qu'elle pourrait s'exprimer avec plus d'intensité lorsque les évacués partent dans une fenêtre de temps plus courte. Il est possible de penser à des effets de ralentissement dus à la densité de population sur le réseau en même temps : les caractéristiques du territoire étudié peuvent donc aussi avoir un impact sur les résultats obtenus.

Le (Figure 31) présente deux courbes de départs (pour les valeurs de B2 égales à « null » et « Tw », ainsi que les deux courbes d'arrivées cumulées correspondantes). L'hypothèse formulée consiste en une incidence non-linéaire du paramètre B2 sur la

relation entre les deux courbes semble correcte. En effet, le delta entre les arrivées et les départs lorsque B2 (null) est beaucoup plus important que celui lorsque B2 (tw).

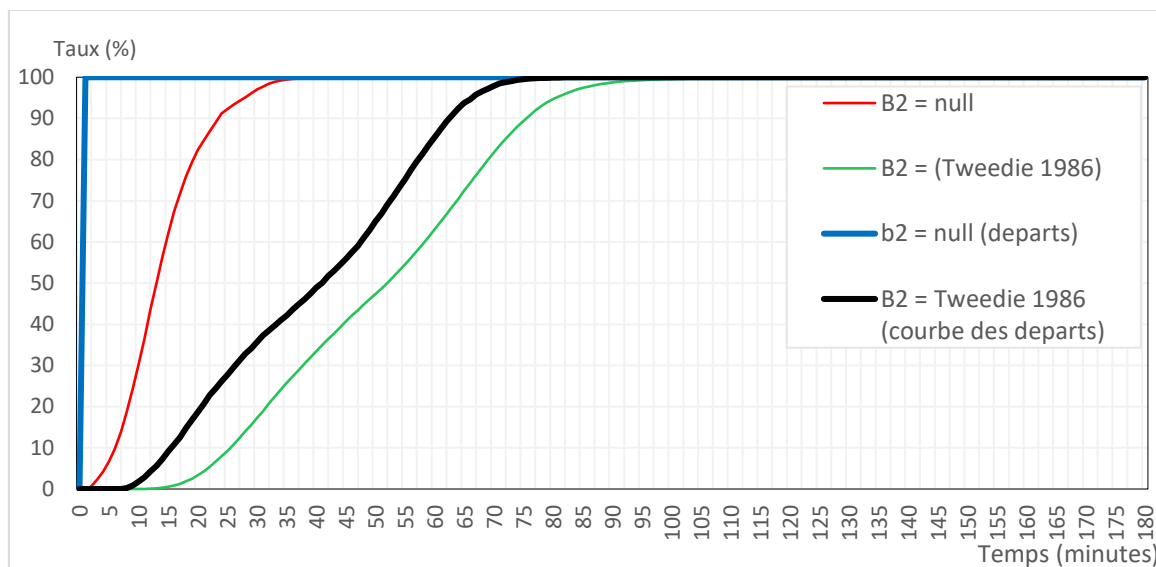
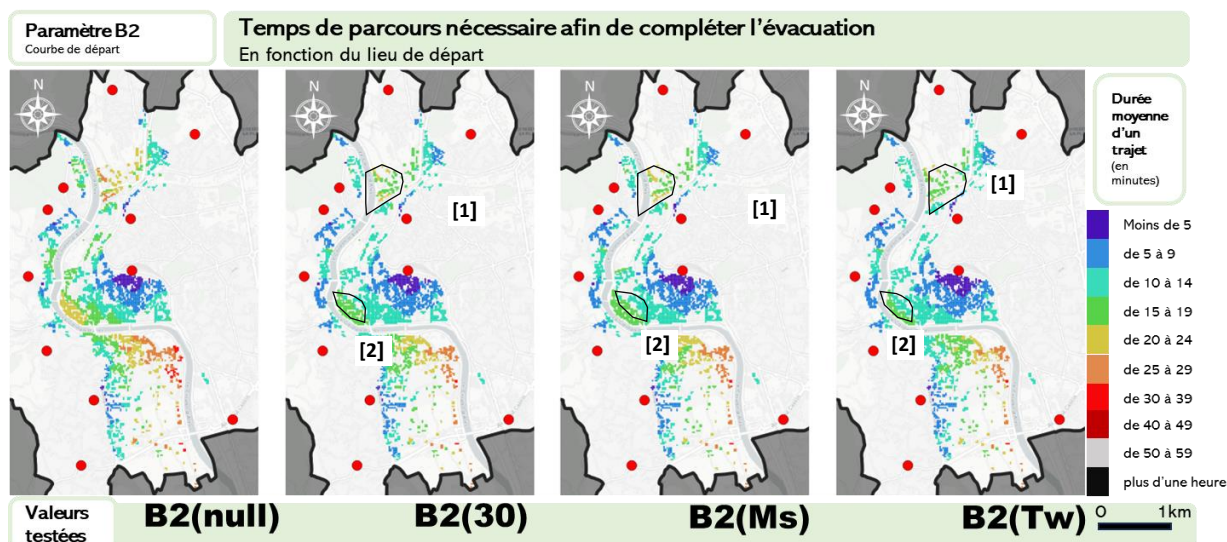


Figure 31 - Courbes de cumul et courbes de départs pour B2 (Tw) et B2 (null)

Dans le second cas, la courbe des arrivées semble entretenir une relation parfaitement linéaire avec la courbe de départs. Cela peut s'expliquer par une faible distance à parcourir lors de l'évacuation, les PRE étant suffisamment proches des zones à évacuer.

2.2.2 Temps de parcours

Lorsque les départs sont simultanés, la densité de personnes présentes sur le réseau en même temps est maximale, entraînant des temps de parcours plus élevés. Suivant ce raisonnement, l'impact d'un départ simultané des personnes doit alors avoir un plus grand impact sur le temps de parcours lorsque les personnes se situent dans une zone densément peuplée.



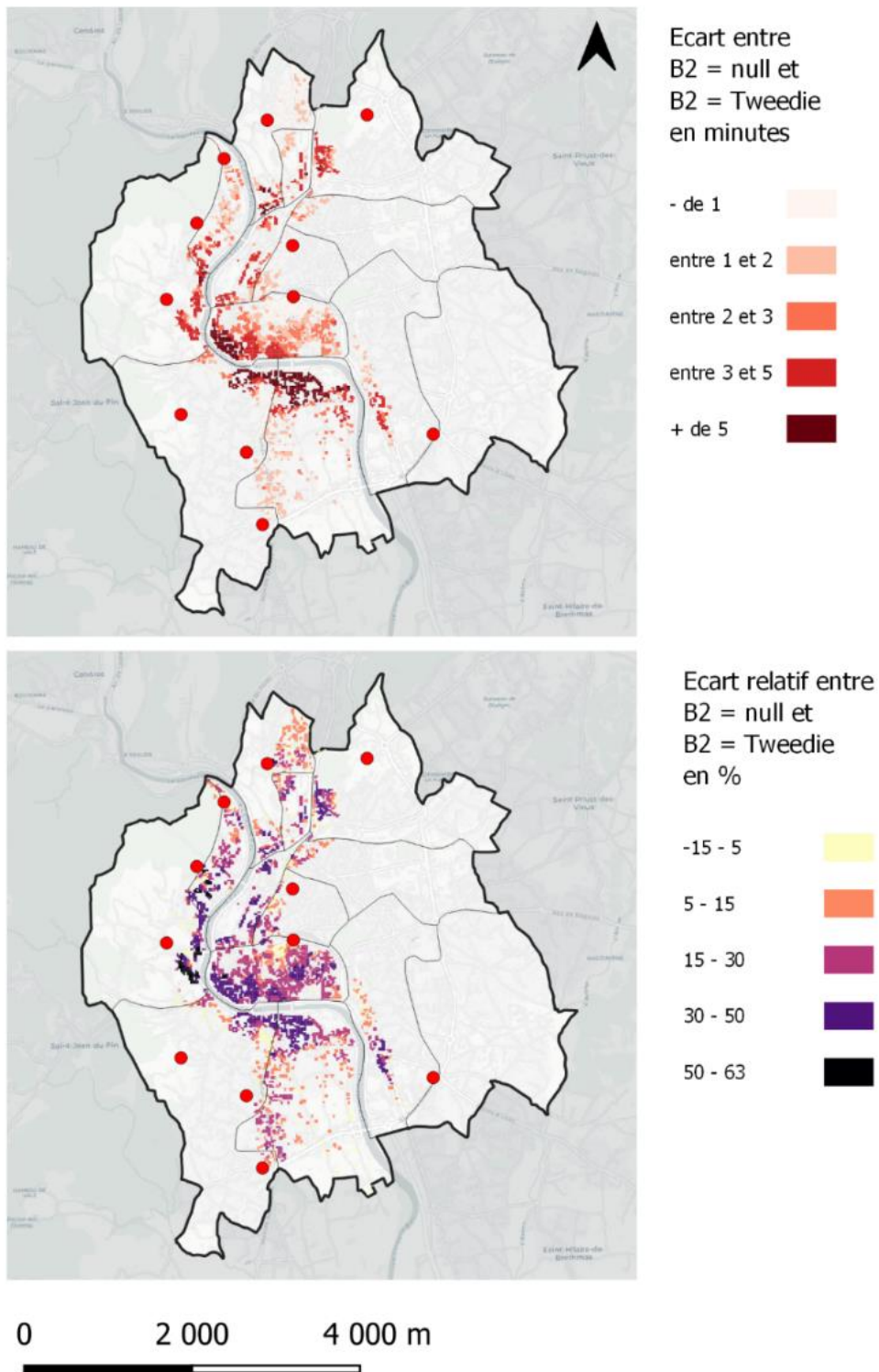
Atlas 4 - Temps de parcours individuels moyennés pour B2

L'Atlas 4 compare les temps de parcours en fonction du point de départ pour chaque valeur de B2. Les deux courbes B2(Ms) et B2(30), bien que significativement différentes sur la (Figure 30), n'entraînent en réalité aucun écart de temps de parcours. Aucun écart significatif n'est également observable lorsque le paramètre B2 utilise la courbe (Tw) ; la courbe favorisant la densité de personnes la plus faible lors de l'évacuation. En résumé, les tests B2(30), B2(Ms) et B2(tw) débouchent sur des temps de parcours quasiment similaires, en dépit des différences mises en évidence sur la Figure 30.

Les cartes en (Atlas 4) démontrent alors une relation non linéaire entre la courbe de départ et les temps de parcours. Ainsi, les trois valeurs de B2 (Tw, Ms et 30) limitent la densité de personnes évacuant en même temps de telle sorte que l'effet de cette densité en devient marginal. En dépit de cela, la valeur de B2(Tw) semble tout de même minimiser les temps de parcours. Quelques différences avec B2(Ms) et B2(30) sont notables, notamment au nord de l'IRIS « Tamaris » (Atlas 4[1]) ainsi qu'au sud-ouest de l'IRIS centre-ville (Atlas 4[2]). C'est donc lorsque B2(Tw) que les temps de parcours sont les plus faibles.

L'Atlas 5 propose une comparaison absolue et relative des valeurs de B2 (Tw et null). La première carte de (Atlas 5) représente le temps de parcours moyen supplémentaire lorsque B2(null), en comparaison de B2(Tw). La seconde carte représente l'allongement relatif du temps de parcours lorsque B2(null) en comparaison de B2(Tw).

La première carte de (Atlas 5) semble indiquer un rallongement des temps de parcours relativement proportionnel à la distance que les personnes doivent parcourir. Le rallongement est ainsi supérieur à cinq minutes au niveau des habitations les plus éloignées des PRE, donc celle située à proximité du Gardon. La seconde carte apporte des éléments d'analyse supplémentaires. L'écart relatif semble plus élevé dans les zones densément peuplées ainsi, dans toute la zone sud-ouest de l'IRIS centre-ville, les valeurs se situent entre 30 et 50% de temps supplémentaire nécessaire afin d'atteindre un PRE. Le reste de l'IRIS centre-ville n'atteint pas de telles valeurs. Dans les IRIS Près Saint-Jean et Cévennes, les valeurs dépassent également les 30%. Pourtant, l'éloignement des PRE n'est pas significativement plus élevé que dans d'autres zones affichant des scores bien plus faibles, notamment la partie ouest de l'IRIS Clavières-Croupillac.

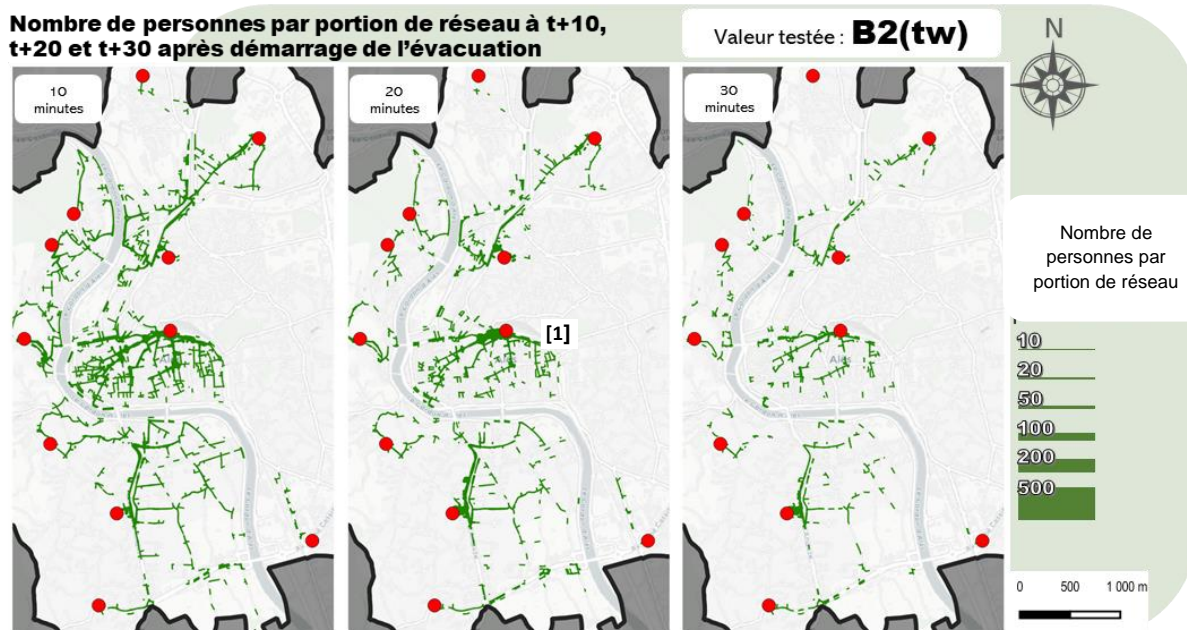


Atlas 5 - Comparaison absolue et relative des temps de parcours (B2 : Tw, null)

2.2.3 Fréquentation des axes

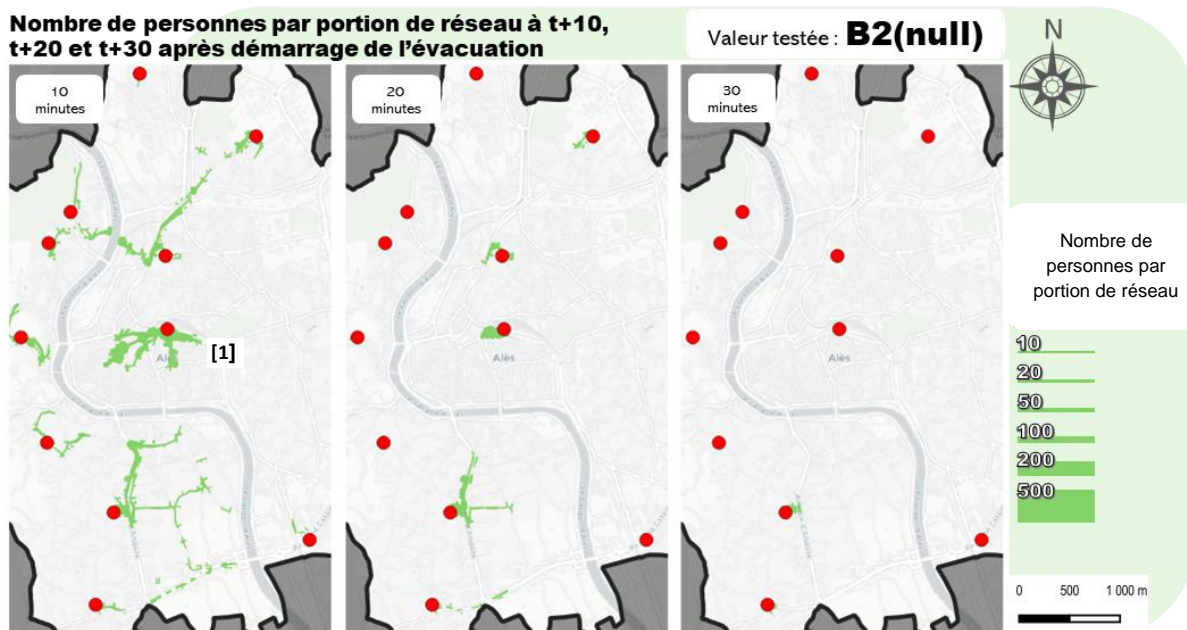
L'Atlas 6 et l'Atlas 7 permettent de saisir la différence de taille des flux de piétons entre B2(null) et B2(tw). Ces deux valeurs représentent les deux extrêmes du

paramètre B2. B2(null) implémente des départs simultanés en démarrage d'évacuation, B2(tw) répartie les départs sur 70 minutes.



Atlas 6 - Fréquentation des axes pour B2(tw)

Tandis que le nombre d'évacués sur les axes du réseau ne dépasse jamais 50 lorsque B2(Tw), les valeurs se rapprochent de 200 lorsque B2(null). Si, dans le second cas, les évacués arrivent rapidement à proximité des PRE, ils semblent bloqués lorsqu'ils arrivent au niveau des derniers embranchements afin de les atteindre. Ainsi, il est possible de supposer que l'écart de temps mis en évidence plus haut, qui pouvait, pour certaines personnes, dépasser les cinq minutes, soit en réalité provoqué par une saturation des derniers tronçons avant d'atteindre le PRE (Atlas 6[1], Atlas 7[1]).



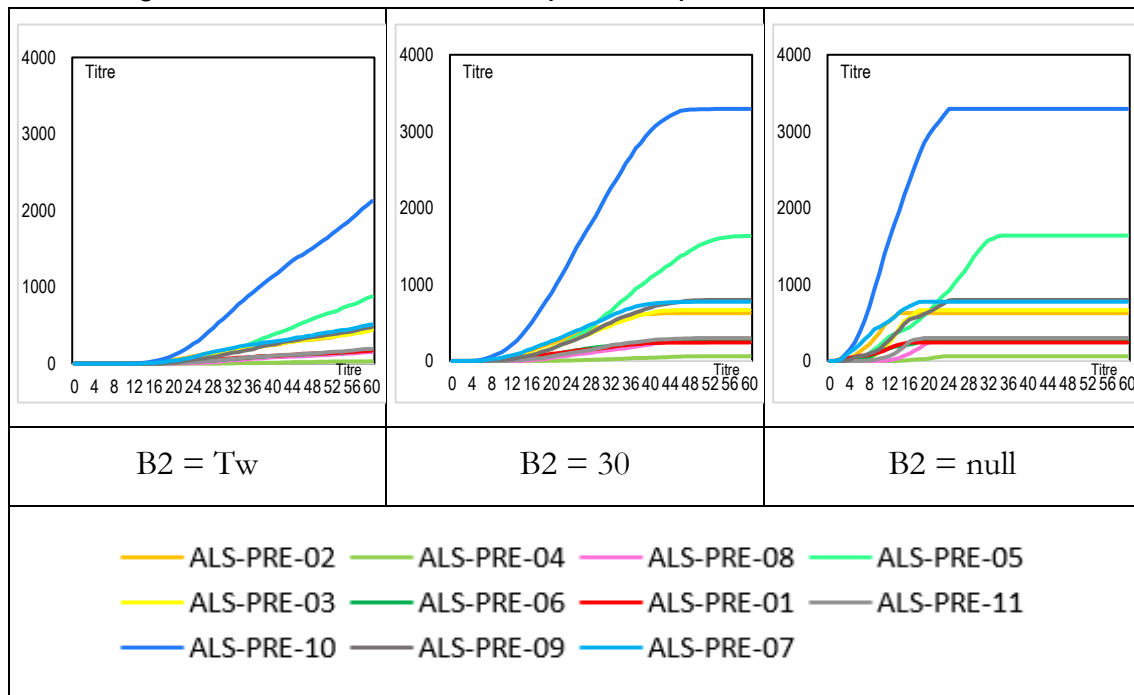
Atlas 7 - Fréquentation des axes pour B2(null)

2.2.4 Répartition sur les points d'arrivée

L'autre enjeu du paramètre B2 se situe dans le rythme d'arrivée des personnes aux PRE. Pour rappel, les PRE sont des points de rassemblement permettant ensuite l'acheminement des personnes vers des lieux susceptibles de les accueillir. Ainsi, l'information sur le rythme d'arrivée des personnes au niveau des PRE possède un fort intérêt d'un point de vue opérationnel. Dans cette section, ce sont les informations sur le comportement du modèle de simulation qu'apporte l'indicateur qui seront prioritairement discutées.

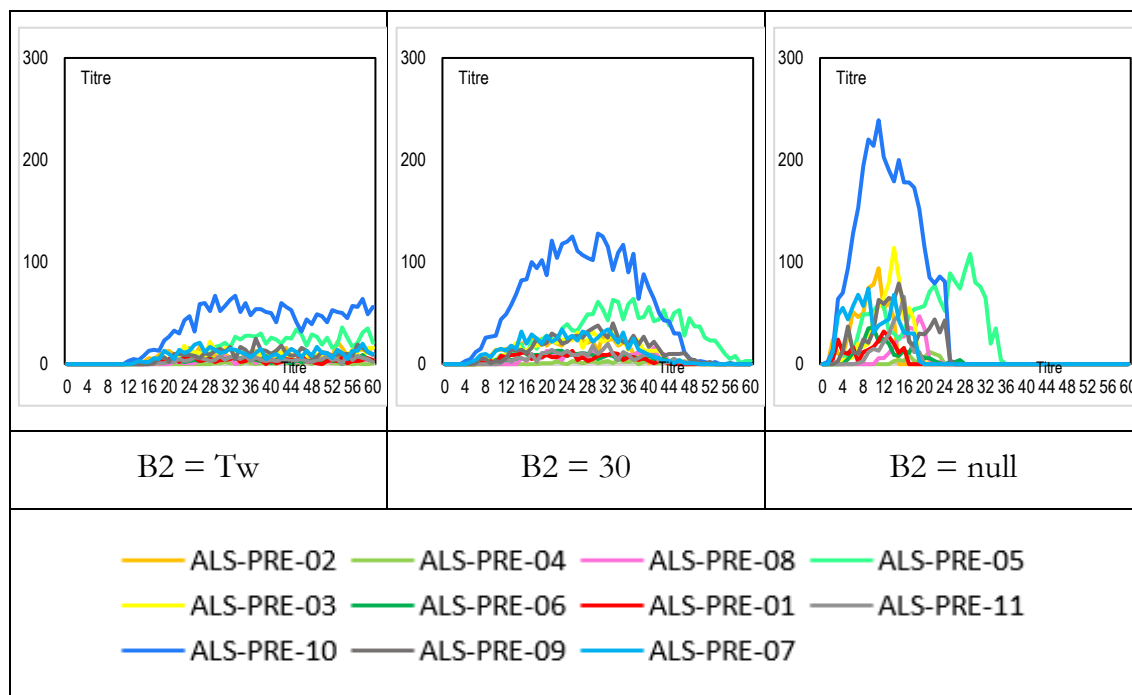
La Figure 32 présente les courbes cumulées pour chaque paramètre. Outre l'apparent déséquilibre dans la répartition des personnes sur les PRE, la première information qu'apporte les courbes concerne un décalage important dans l'arrivée des personnes. Lorsque B2(Tw), les personnes ne sont pas toutes arrivées après une heure. Au contraire, d'importants volumes d'évacués arrivent dans un laps de temps très court lorsque B2(null). Cependant, ce laps de temps d'apparence court, si l'on considère que les personnes partent simultanément, est en réalité relativement long. En réalité, il atteint presque 28 minutes sur « ALS-PRE-05 », le PRE Jardin de la Tour. Nous postulons que cela provient d'importants ralentissements dus à la densité d'évacués.

Figure 32 - Cumul des arrivées pour chaque PRE en fonction de B2



La Figure 33 présente la même information que la figure précédente, mais les effectifs ne sont pas cumulés. On y distingue facilement le décalage des arrivées provoqué par le décalage des départs. Cependant, les arrivés restent encore relativement étalés dans le temps pour B2(null), compte tenu de la simultanéité des départs. Des personnes sont ainsi encore en train d'évacuer, notamment vers le PRE Jardin de la Tour, après 30 minutes.

Figure 33 - Nombre de personnes arrivant aux PRE par minute



Il est peu probable que les résultats présentés sur les deux précédentes figures soient uniquement du fait de la distance géographique. Il est donc possible de supposer qu'un départ simultané des personnes entraîne des effets de densité locaux, cela retardant l'arrivée des personnes sur certains PRE.

2.2.5 Analyse des résultats

L'analyse du comportement du modèle de simulation au regard de la variation du paramètre B2 a permis de mettre en évidence deux principaux effets de ce paramètre. Lorsque la courbe utilisée étale les départs dans le temps, le temps nécessaire afin d'évacuer 100% de la population s'allonge. Cependant, il ne s'agit pas là d'une relation linéaire. Des départs simultanés entraînent avec eux, en dépit d'une évacuation globale plus rapide, des temps de parcours individuels sensiblement plus longs. L'allongement de ces temps de parcours semble explicable par une forte concentration de personnes sur les derniers axes empruntés pour rejoindre les PRE. Les zones plus densément peuplées semblent également réagir plus sensiblement à la variation du paramètre B2.


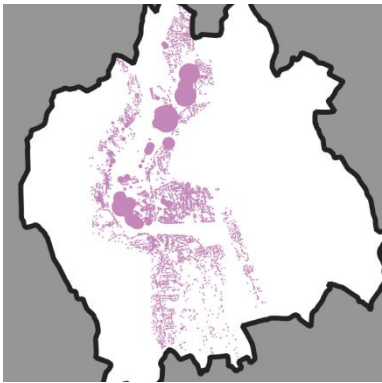
III.2.3 Comportement du paramètre B3, la sur-évacuation

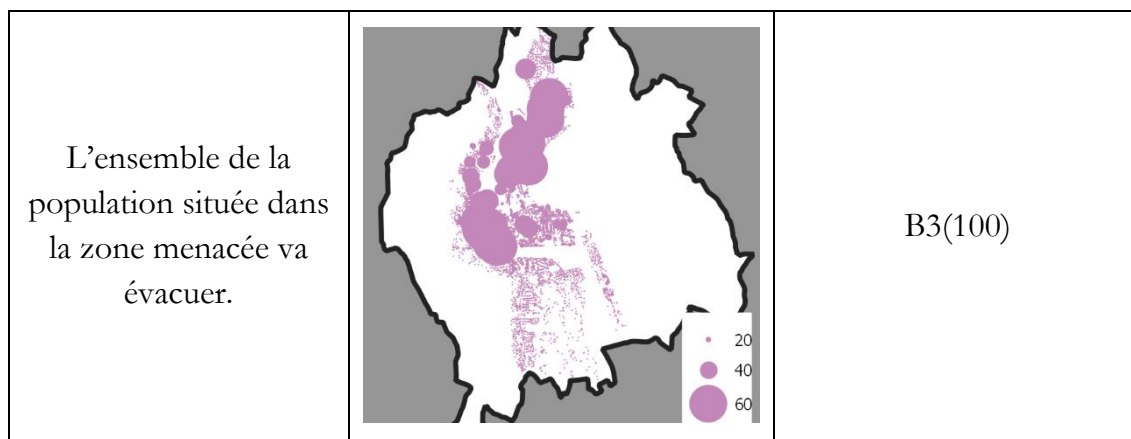
Dans le cadre du territoire d'étude retenu, l'évacuation préventive est décrite par un PPI (voir chapitre 1). L'une des informations contenues dans le PPI de Sainte-Cécile indique la zone à évacuer en cas de déclenchement d'une évacuation préventive. Cette zone a pu être mise en évidence par une étude hydrologique préalable sur la forme que prendrait une onde de submersion causée par l'effacement du barrage de Sainte-Cécile d'Andorge. Ainsi, une évacuation préventive concernerait uniquement les personnes se trouvant dans la zone au moment de son déclenchement. Les points de

rassemblement officiels des évacués sont d'ailleurs positionnés en contiguïté de cette zone. L'un des éléments non mentionnés dans le PPI concerne l'éventuelle possibilité de maintien sur place d'une partie de la population dans la zone menacée se trouvant aux étages. La hauteur au-delà de laquelle le processus d'évacuation pourrait représenter une plus grande mise en danger qu'un maintien sur-place est considérée à 5 mètres. De fait, l'ensemble des personnes se trouvant à un étage ne se situant pas strictement à une hauteur supérieure à 5 mètres est considéré comme devant être obligatoirement évacué.

Il n'est cependant pas impertinent de considérer qu'une partie de la population située à une hauteur supérieure à 5 mètres pourrait grossir les rangs des évacués. De ce fait, le paramètre B3 consiste en l'injection d'un nombre d'évacués supplémentaire parmi ceux situés en hauteur. Les seuils ont été fixés à 50% et 100% de cette dernière (Tableau 15).

Tableau 15 - Paramétrage de B3

Valeur du paramètre	Population supplémentaire implémentée	Dénomination
Ne va évacuer que la population située à un étage situé à moins de 5 mètres de hauteur.		B3(0)
Ne va évacuer que la population située à un étage situé à moins de 5 mètres de hauteur + 50% de la population située aux étages supérieurs.		B3(50)



Pour chaque valeur du paramètre B3, dix simulations ont été lancées. Le (Tableau 16) résume les statistiques descriptives relatives à l'ensemble de ces dix simulations. Contrairement aux valeurs observées pour le paramètre B1, le modèle de simulation produit ici des résultats proches de la moyenne jusqu'au dernier pourcent d'évacués. Cela est explicable par la localisation des évacués ajoutés. En effet, si les personnes n'évacuant pas ne sont pas localisées dans le paramètre B1, les personnes ajoutées à l'évacuation le sont dans le paramètre B3. Les résultats obtenus ne sont donc pas soumis à un paramètre aléatoire.

		50	75	90	95	100
0	1 SD -	24	29	35	38	43
	Moyenne	24	29	35	38	43
	1 SD+	24	29	34	38	43
50	1 SD -	24	30	36	39	44
	Moyenne	24	30	36	39	44
	1 SD+	24	30	36	39	44
100	1 SD -	25	31	37	41	47
	Moyenne	25	31	37	40	44
	1 SD+	25	31	36	39	43

Tableau 16 - Moyenne et écarts-types pour l'ensemble des simulations de B3

2.3.1 Courbe de cumul

Le Figure 34 compare les trois valeurs définies pour le paramètre B3. À l'instar des résultats obtenus lors de la comparaison des valeurs de B1, les valeurs du paramètre B3 constituent en fait une augmentation artificielle du nombre de personnes à évacuer. L'augmentation du nombre de personnes à évacuer peut entraîner une augmentation de la densité de personnes sur le réseau et donc une augmentation du temps d'évacuation global. Cependant, comme observé précédemment, cela est largement atténué par l'échelonnage des départs de la population. En conséquence, l'effet de l'augmentation du nombre de personnes à évacuer sur le temps global d'évacuation est, dans les résultats que nous avons obtenus, relativement faible.

La Figure 34 confirme cette tendance. Une forte influence du paramètre B2 semble se dessiner, bien entendu cela est considéré comme logique et pertinent considérant le fonctionnement du modèle de simulation. Le paramètre B2 semble également entretenir une forte relation avec les autres paramètres, et notamment B3.

A la différence de B1, le paramètre B3 n'augmente pas le nombre d'évacués de façon aléatoire. Les personnes qui s'ajoutent au compte des évacués sont localisées. Il doit donc être possible d'observer une hétérogénéité spatiale dans l'augmentation du temps d'évacuation des personnes.

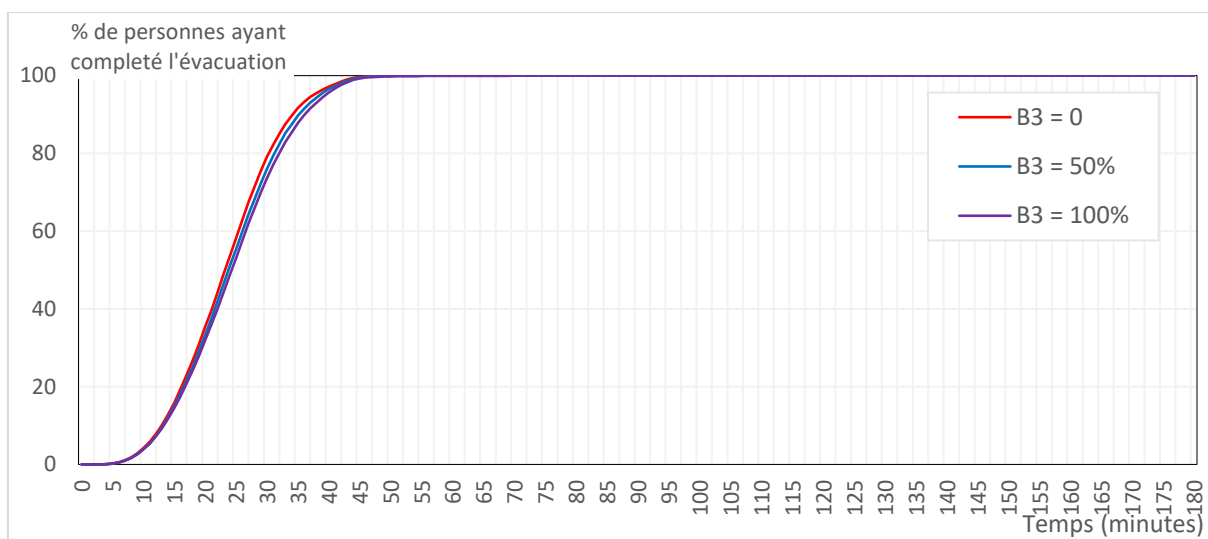
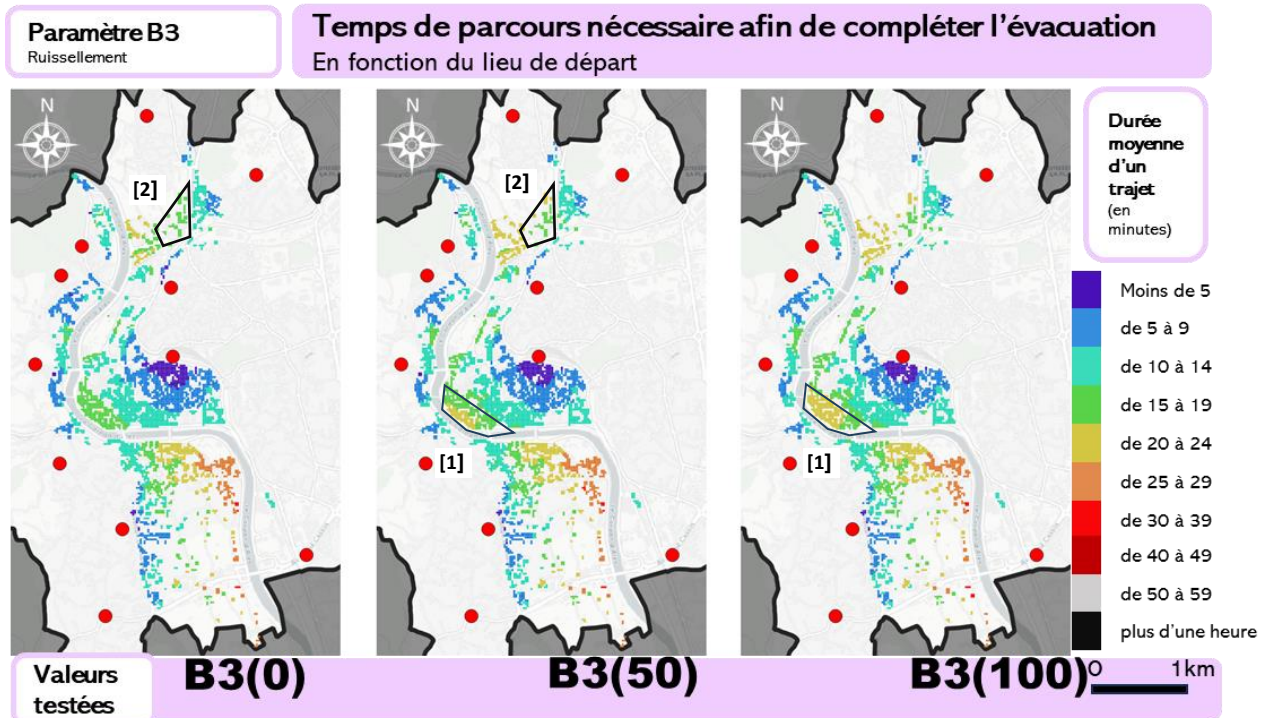


Figure 34 - Courbes cumulatives des arrivées pour B3

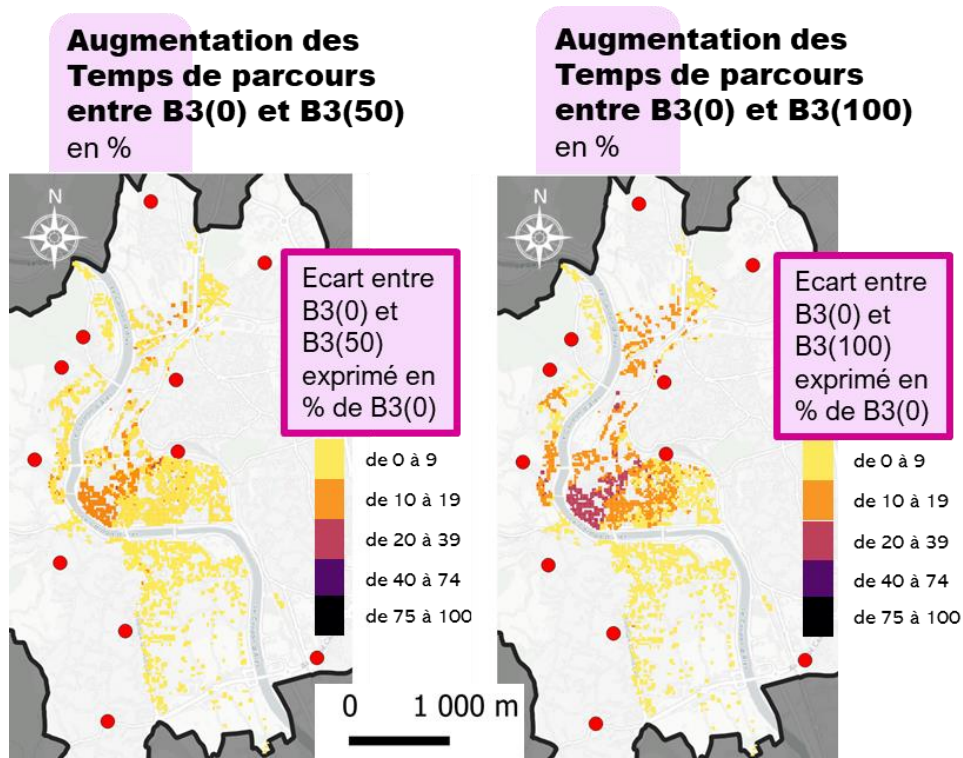
2.3.2 Les temps de parcours

L'Atlas 8 semble confirmer l'hétérogénéité spatiale de l'augmentation des temps d'évacuation lorsque B3 prend une valeur supérieure. Ainsi, la partie sud-ouest de l'IRIS centre-ville Atlas 8[1] ainsi que la zone nord Atlas 8[2] réagissent significativement plus à l'augmentation du nombre d'évacués. Il s'agit, pour rappel, des zones qui comptent les densités de population les plus élevées.



Atlas 8 - Temps de parcours individuels moyennés pour B3

Afin de vérifier l'hétérogénéité de l'augmentation des temps de parcours, et notamment entre les deux valeurs extrêmes de B3, (Atlas 9) compare le temps supplémentaire nécessaire afin d'atteindre un PRE lorsque B3(50) et B3(100) en comparaison de B3(0).

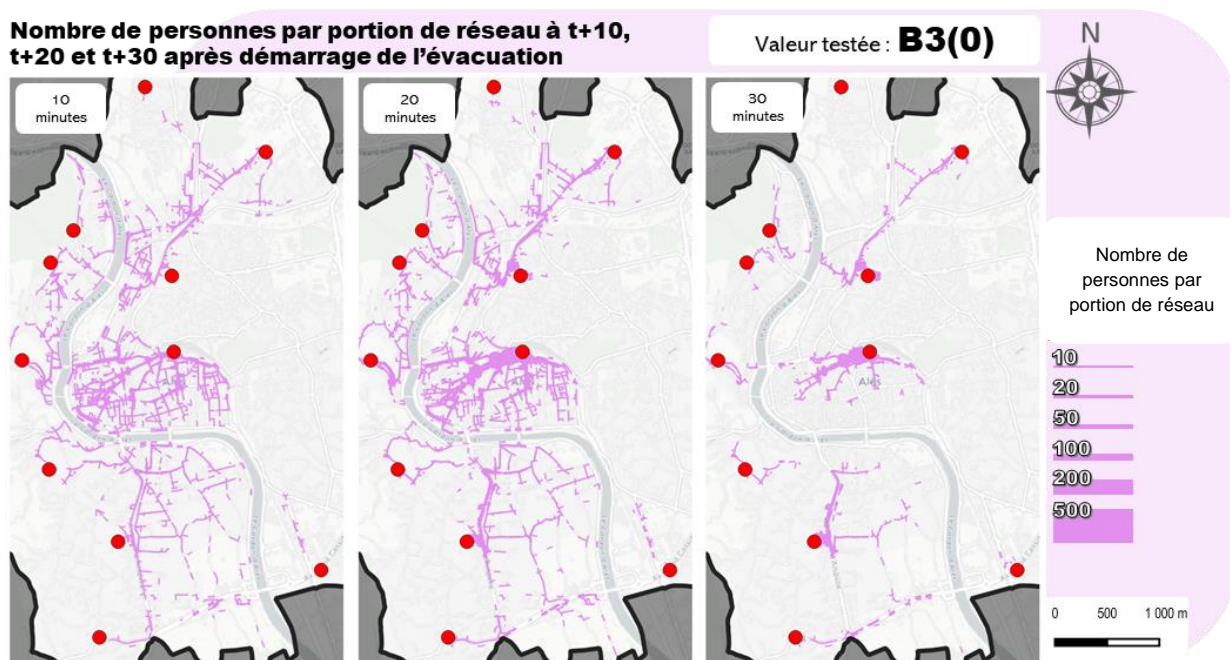


Atlas 9 - Ecart absolu et relatif pour B3(0, 100)

Les deux cartes en Atlas 9 mettent en évidence une augmentation significative des temps de parcours spatialement hétérogène. Les zones soumises à cette augmentation sont celles majoritairement composées d'habitats collectifs. La suppression de la limite altitudinale d'évacuation entraîne alors une augmentation du nombre de personnes à évacuer. Cette augmentation entraîne avec elle une augmentation des temps de parcours moyens dans ces zones. Cette augmentation est graduelle, les deux cartes le démontrent.

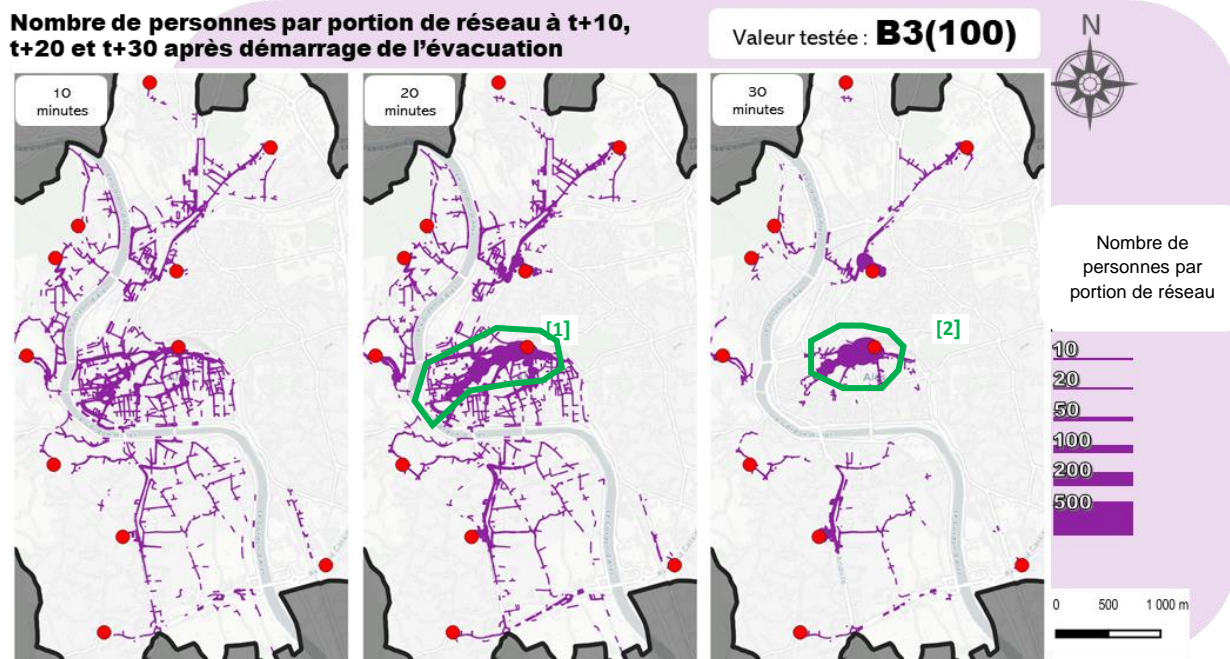
2.3.3 Fréquentation des axes

La comparaison des Atlas 10 et Atlas 11 permet en effet d'observer, sur le second, une présence significativement plus longue, par rapport au premier, des personnes sur le réseau durant l'évacuation.



Atlas 10 - Fréquentation des axes pour B3(0)

L'Atlas 11 met en évidence un nombre d'évacués bien supérieur à 30 minutes de l'évacuation, lorsque B3(100). Il semble également que dans l'IRIS centre-ville cette augmentation soit beaucoup plus élevée que sur le reste de la commune de test (Atlas 11[1]). Près de 500 personnes se trouvent sur les derniers axes menant au PRE numéro 10 (Atlas 11[2]) à 30 minutes de l'évacuation, en comparaison, moins de 100 personnes se trouvent au même endroit lorsque B3(0).



Atlas 11 - Fréquentation des axes pour B3(100)

2.3.4 Répartition des arrivées par PRE

Les graphiques affichés au sein des Figure 35 et Figure 36 sont adaptés de façon à pouvoir être comparés entre eux. Le paramètre B3 faisant varier le nombre d'évacués, les valeurs maximales varient significativement entre les différentes valeurs de ce paramètre.

La Figure 35 met en évidence une hétérogénéité spatiale importante des nouveaux évacués ajoutés par la modification de B3. En effet, le paramètre B3 est ici instancié sous la forme d'une limite altitudinale, fixée à 5 mètres. Suivant la valeur du paramètre B3, les personnes situées au-dessus de cette limite peuvent être incluses dans le périmètre d'évacuation en proportion plus ou moins grande.

Ces éléments connus, il apparaît donc que ces évacués supplémentaires se dirigent majoritairement vers le PRE numéro 10, celui de la gare ferroviaire. Une partie semble également se diriger vers le PRE numéro 9 (collège Bellevue).

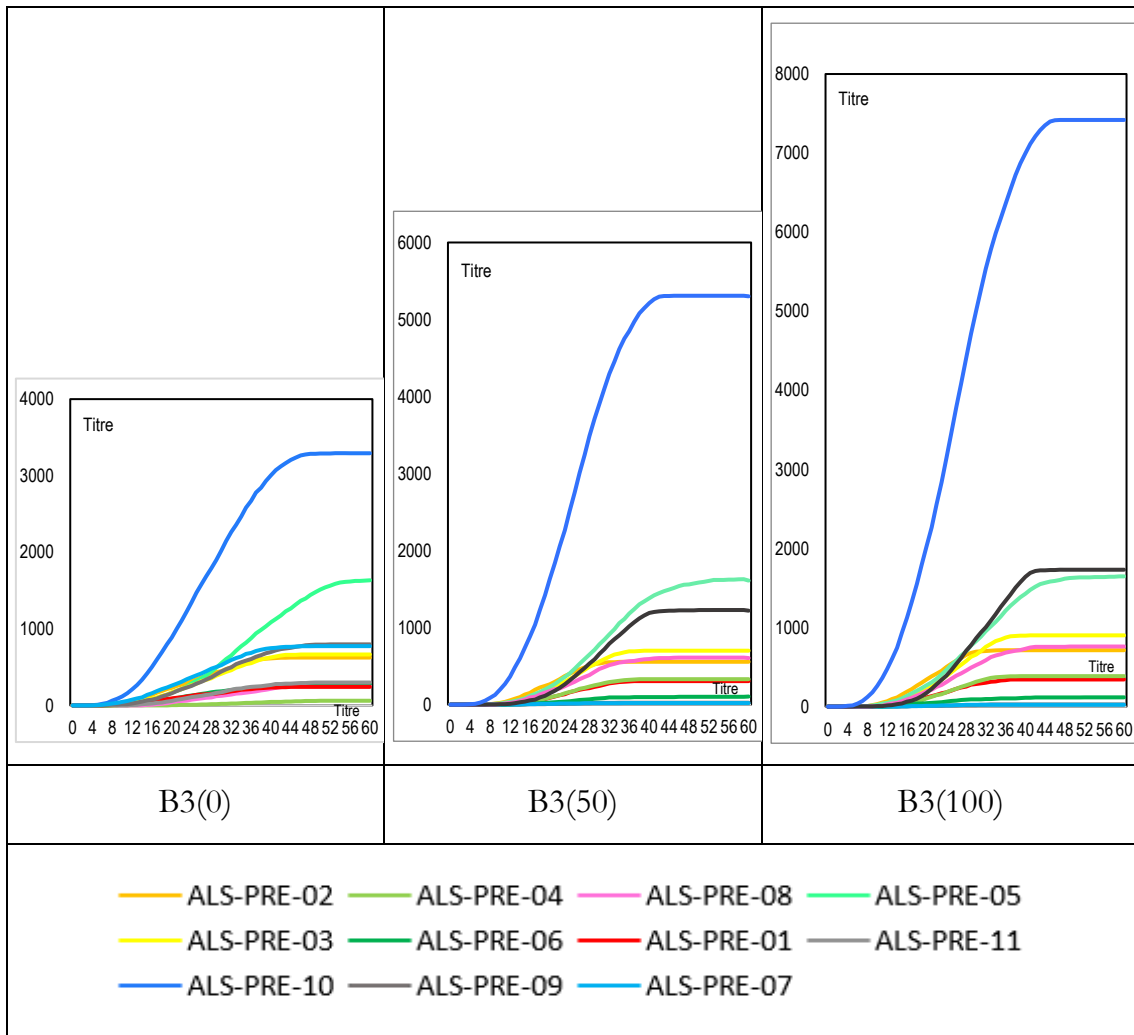


Figure 35 - Cumul des arrivées par PRE

Cela indique que les PRE 9 et 10 drainent une population provenant majoritairement de zones d'habitats collectifs.

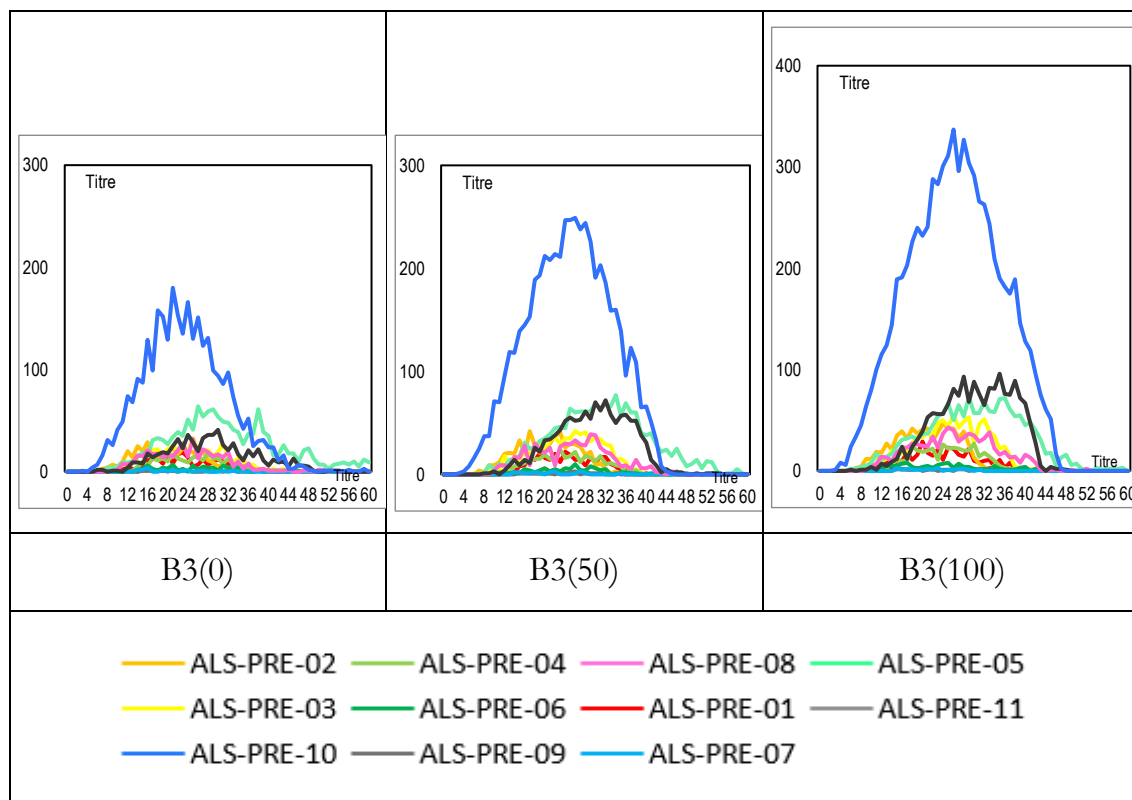


Figure 36 - Arrivées en fonction du temps par PRE

2.3.5 Analyse des résultats

L'analyse du paramètre B3 a montré un impact fort de la valeur de ce paramètre sur les résultats de la simulation. La courbe de cumul a d'abord mis en évidence un décalage temporel relativement faible de la durée globale de l'évacuation. Cependant, les cartographies des temps de cumul et de fréquentations des axes ont démontré une forte hétérogénéité spatiale des résultats. Une minorité de zones semble alors réagir significativement à l'augmentation du nombre d'évacués. Il s'agit majoritairement de zones d'où proviennent ces évacués supplémentaires.

III.2.4 Comportement du paramètre D1, le choix d'un itinéraire

L'objectif du paramètre D1 est de comprendre dans quelle mesure l'utilisation d'itinéraires alternatifs par les évacués peut avoir un impact sur les différents indicateurs en sortie de modèle. Afin de rendre compte des différences pouvant être observées dans les choix d'itinéraires des populations concernées par l'évacuation, trois valeurs sont ici proposées (Tableau 17). La première valeur correspond à l'itinéraire optimal en termes de temps nécessaire pour le parcourir. Ce type d'itinéraire est dénommé « chemin le plus court » dans la suite de ce travail. Au-delà du chemin le plus court, un autre type d'itinéraire est considéré, celui qui minimise le nombre d'arcs du graphe à emprunter, plutôt que la longueur totale de ces derniers. Autrement

dit, un chemin qui tend à minimiser le nombre de changements de direction (i.e. le nombre de ruptures ?). Dans ce travail, ce type d'itinéraire est qualifié de « chemin le plus simple ». Enfin, un troisième type d'itinéraire est testé, prenant en compte des considérations urbanistiques dans le déplacement des piétons. Ces itinéraires tendent à se composer d'arcs de largeur et d'importance supérieures. Cette approche repose sur l'hypothèse que les piétons peuvent être attirés par des tronçons de routes où la visibilité et la capacité de projection sont supérieures. Par exemple, l'idée est ici d'éviter les petites ruelles autant que faire se peut. Ce type d'itinéraire est qualifié par la terminologie « itinéraires dégagés ».

Tableau 17 - Paramétrage de D1

Nom des itinéraires	Valeur du paramètre	Dénomination
Les chemins les plus courts	Les personnes construisent leurs itinéraires en cherchant à réduire la longueur totale à parcourir.	D1 = PC
Les chemins les plus simples	Les personnes construisent leurs itinéraires en cherchant à réduire le nombre d'arcs du graphe à emprunter.	D1 = PS
Les chemins les plus dégagés	Les personnes construisent leurs itinéraires en cherchant à emprunter des segments de routes d'importance supérieure.	D1 = PG

Pour chaque valeur du paramètre D1, dix runs de simulation ont été réalisées. Les résultats sont résumés en Tableau 18. Les simulations restent, en règle générale, proches de la moyenne. En revanche, lorsque la valeur de D1 est égale à PG l'écart type des valeurs de temps nécessaires afin d'évacuer 100% des personnes est plus important.

	Taux d'évacuations	50%	75%	90%	95%	100%
D1(PC)	1 SD -	25	31	38	42	51
	Moyenne	25	31	37	41	49
	1 SD+	25	31	37	40	48
D1(PS)	1 SD -	24	30	35	39	48
	Moyenne	24	29	35	39	46
	1 SD+	24	29	35	38	44
D1(PG)	1 SD -	25	31	37	42	62
	Moyenne	24	31	36	41	54
	1 SD+	24	30	36	40	49

Tableau 18 - Moyenne et écarts-types pour l'ensemble des simulations de D1

L'objectif du paramètre D1 est d'estimer l'impact de différentes méthodes de construction d'itinéraires sur la performance de l'évacuation. L'idée est de remplacer la simple réduction de distance par deux autres logiques : une réduisant le nombre d'arcs du graphe empruntés, et une autre qui priorise les axes plus importants, lorsque cela est possible. Il est possible qu'en essayant de minimiser le nombre d'arcs du graphe, la distance totale que les personnes ont à parcourir soit rallongée. Cependant, en tenant compte de la géographie de la commune testée et de la petite taille de la zone menacée, il est possible que la différence entre les itinéraires résultant des valeurs PC et PS de D1 soit minime. En revanche, la valeur PG, qui favorise les itinéraires plus dégagés, pourrait entraîner une densification des flux piétons sur certains axes, ce qui pourrait entraîner un rassemblement anticipé des évacués sur les axes terminaux près des PRE.

2.4.1 Courbes de cumul

Utiliser des itinéraires différents lors de l'évacuation peut causer un retard dans le temps nécessaire pour atteindre un PRE. Ce retard peut avoir deux causes : d'abord, la distance à parcourir. Si une personne n'emprunte pas l'itinéraire le plus court, elle augmente nécessairement la distance à parcourir pour atteindre un PRE. Deuxièmement, le changement des itinéraires peut augmenter la densité de personnes sur certaines parties du réseau, ce qui peut prolonger le temps de parcours et donc le temps total d'évacuation. C'est particulièrement le cas lorsque D1 est égal à « PG », ce qui suppose que les personnes privilégient les grands axes. La conséquence directe de cette augmentation de densité réside dans l'augmentation des temps de parcours, et donc, toute chose égale par ailleurs, l'augmentation du temps global d'évacuation. C'est notamment la valeur de D1 égale à « PG » qui laisse supposer un tel phénomène. Le (Figure 37) présente les trois courbes de cumul obtenues pour les trois variations du paramètre D1.

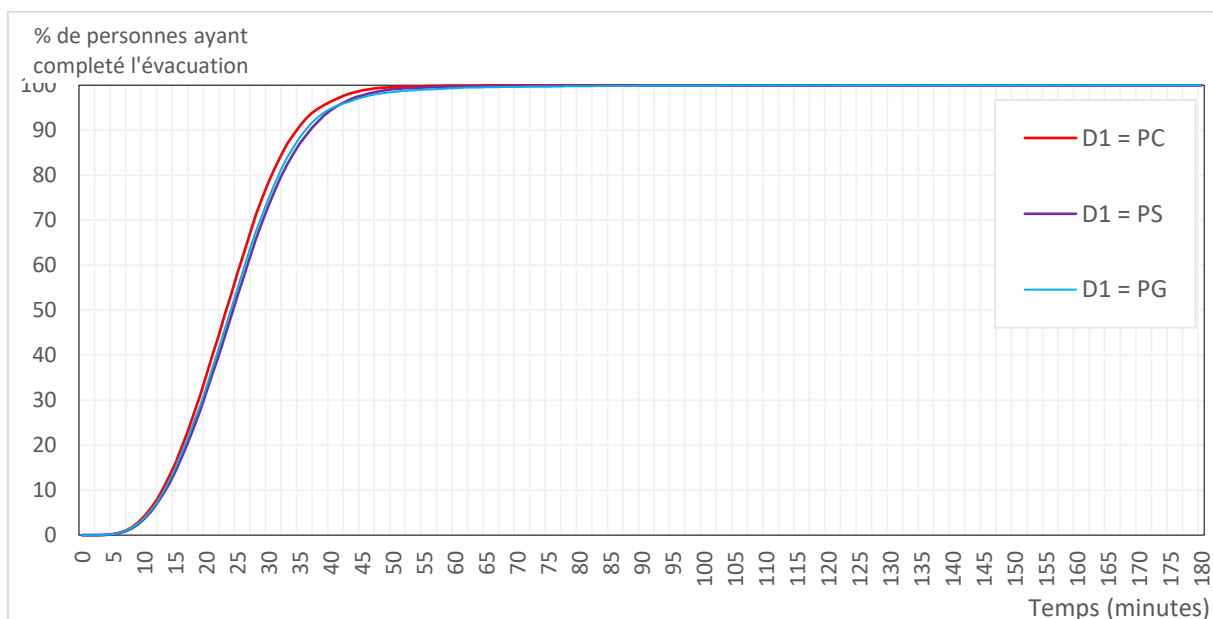


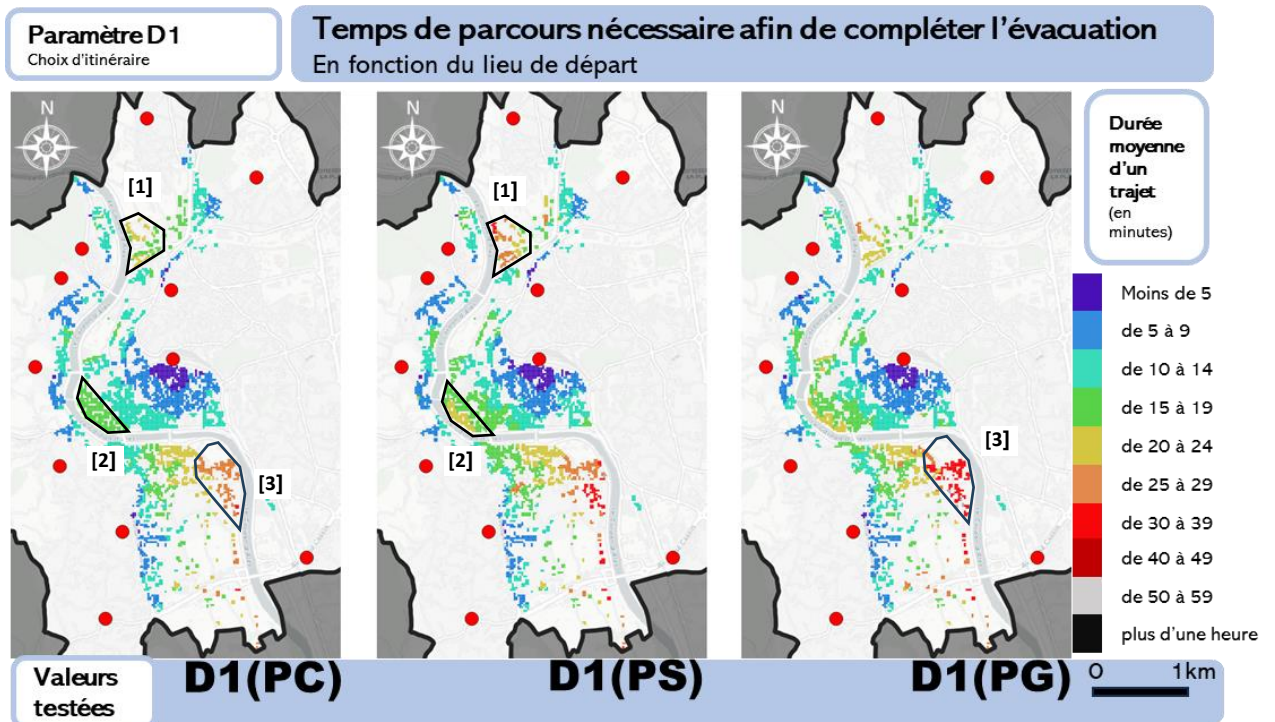
Figure 37 - Courbe cumulatives des arrivées pour D1

La Figure 37 confirme l'hypothèse de différence marginale entre les différents types d'itinéraires. La faible différence observée peut être attribuée à la forme du réseau dans la commune test et à la proximité des PRE par rapport à la zone à évacuer. Contrairement à d'autres paramètres testés précédemment, la faible différence semble se maintenir tout au long de la simulation. L'écart augmente légèrement entre la 20ème et la 60ème minute (pour rappel, lorsque B2 - temps de préparation - est réglé sur la valeur standard, c'est la période où la densité de personnes sur le réseau est la plus élevée). Par conséquent, la densité de personnes ne semble pas varier significativement en fonction des itinéraires choisis.

Bien que les courbes cumulatives ne montrent pas de différence significative entre les trois valeurs de D1, il est toujours possible qu'il y ait des différences localisées. L'écart entre les courbes cumulatives, aussi minime soit-il, peut s'expliquer de deux façons. Premièrement, il peut s'agir d'une légère augmentation homogène du temps de parcours pour la population. Dans ce cas, la différence se situe uniquement dans la distance à parcourir en fonction de la nature des itinéraires empruntés. Deuxièmement, il peut s'agir d'une augmentation significative du temps de parcours à l'échelle locale. Dans ce cas, la constatation se porte vers la structure du réseau, et la densité de population sur la commune test.

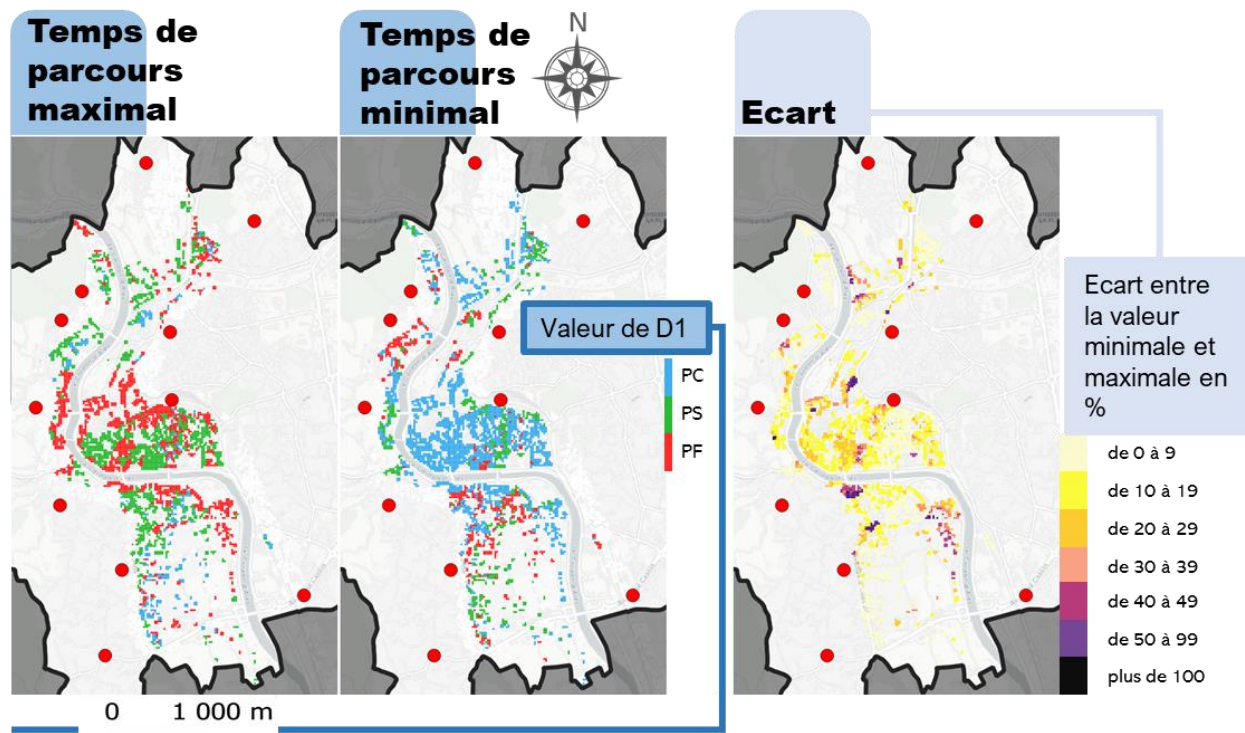
2.4.2 Temps de parcours

L'Atlas 12 permet de constater une différence significative, mais localisée, entre D1(PC), D1(PG) et D1(PS). Cette différence s'observe dans une zone proche du centre-ville, densément peuplée (Atlas 12[1], [2]), et relativement éloignée d'un PRE ainsi que dans une zone faiblement peuplée mais éloignée (la plus éloignée en réalité) d'un PRE (Atlas 12[3]).



Atlas 12 - Temps de parcours individuels moyennés pour D1

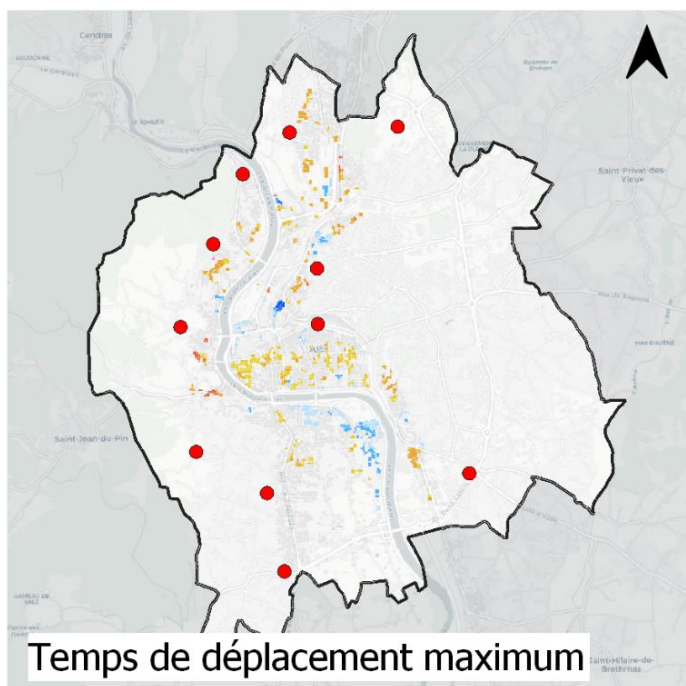
L'effet de la valeur de D1 en entrée de simulation sur les temps de parcours semble bien atténué par la distance aux PRE. En revanche, à ce stade les résultats ne permettent pas de confirmer un éventuel lien avec une densification de la population sur certains axes de communication.



Atlas 13 - Alternatives de D1

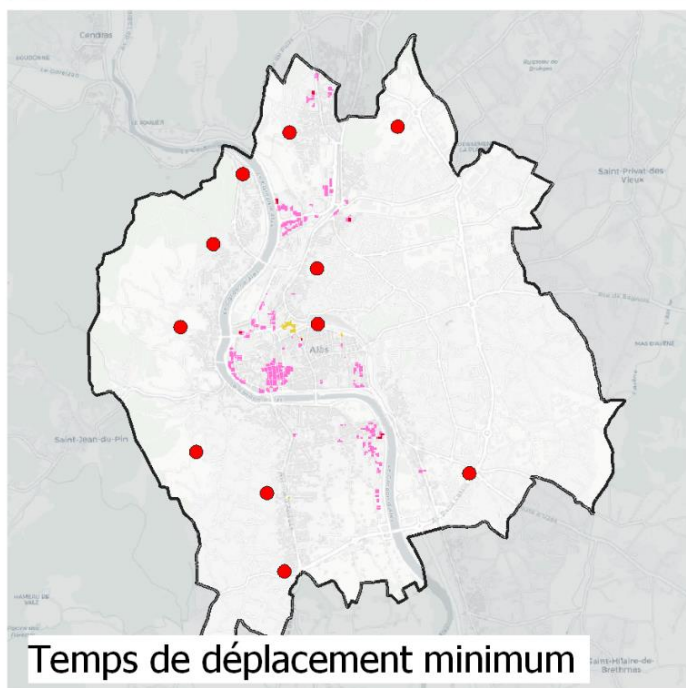
L'Atlas 13 présente l'alternative de D1 donnant les temps de parcours les plus élevés ainsi que les plus faibles. Compte tenu des résultats précédents l'Atlas 13 doit permettre de statuer sur la saturation possible de certains axes en fonction du choix de l'itinéraire. Les résultats présentés sur (Atlas 13) sont intéressants à plusieurs égards. Une valeur de D1 à PC, bien que représentant les itinéraires les plus courts au sens de la distance à parcourir, ne semble pas être systématiquement la meilleure alternative. En fonction du point de départ des personnes, d'autres alternatives semblent être plus rapides.

Pour s'assurer que les résultats en (Atlas 13) ne soit pas la conséquence de la variabilité intrinsèque au modèle de simulation (aussi faible soit-elle compte tenu du nombre de simulations effectuées), (Atlas 14) présente les mêmes résultats que (Atlas 13) mais en y ajoutant la valeur relative. Ainsi, ne sont conservés que les choix donnant un temps de parcours à minima 10% supérieur ou inférieur aux autres alternatives.



Comparaison des temps de parcours pour les trois valeurs de D1

- PC supérieur de 10% à PF et PS ■
- PC supérieur de 20% à PF et PS ■
- PF supérieur de 10% à PC et PS ■
- PF supérieur de 20% à PC et PS ■
- PF supérieur de 50% à PC et PS ■
- PS supérieur de 10% à PC et PF ■
- PS supérieur de 20% à PC et PF ■
- PS supérieur de 50% à PC et PF ■
-



- PC inférieur de 10% à PF et PS ■
- PC inférieur de 20% à PF et PS ■
- PF inférieur de 10% à PC et PS ■
- PF inférieur de 20% à PC et PS ■
- PF inférieur de 50% à PC et PS ■
- PS inférieur de 10% à PC et PF ■
- PS inférieur de 20% à PC et PF ■
- PS inférieur de 50% à PC et PF ■
-

0 2 000 4 000 m

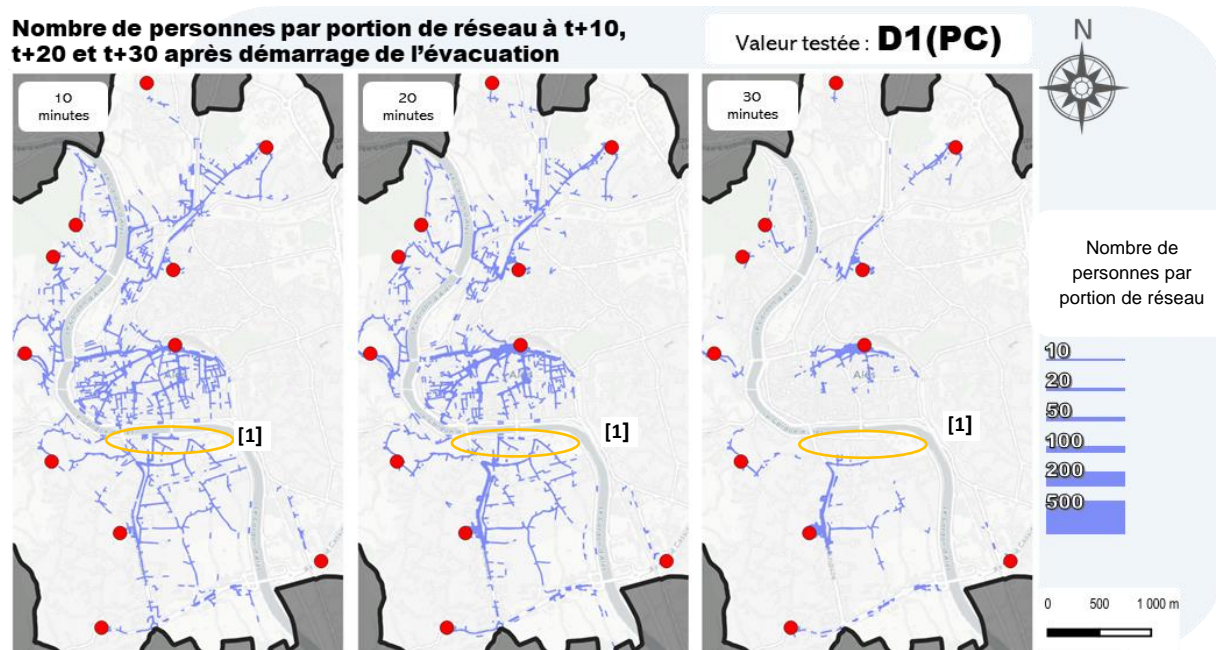
Atlas 14 - Alternatives de D1 et taux d'écart

La prise en compte des valeurs supérieures et inférieures à 10% met en évidence un résultat différent de celui observable sur (Atlas 13). En réalité, si l'on considère que seules les alternatives représentées sur (Atlas 14) sont significatives (la valeur de 10% pourrait être discutée), alors PC est la seule alternative permettant de réduire le temps de parcours. A l'inverse, les valeurs de PG et PS sont les seules à augmenter les temps

de parcours. PG semble être l'alternative la moins efficace sur l'ensemble de la partie nord de l'IRIS « Les Prairies-Les Promelles », le tissu urbain dans cette zone est plus relâché, il est possible de supposer que les personnes sont alors attirées par la N106 lorsque D1(PG). Cela augmente la densité sur cet axe et contribue à réduire le temps d'évacuation.

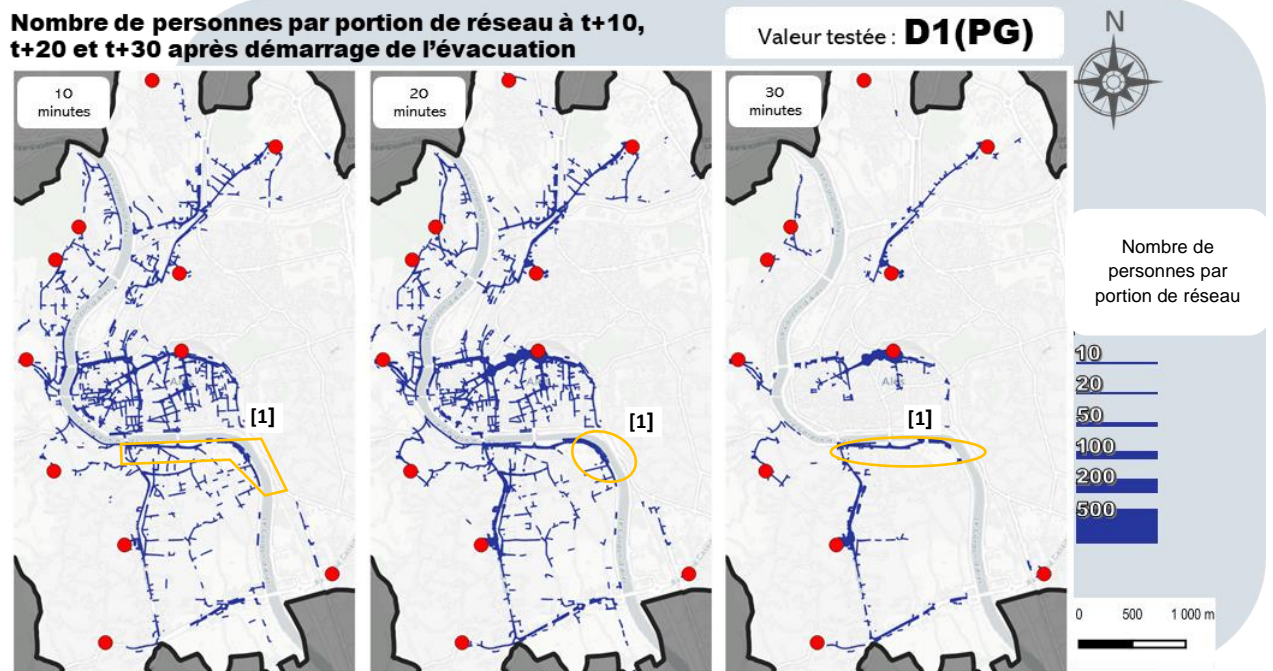
2.4.3 La fréquentation des axes

(Atlas 15), (Atlas 16) et (Atlas 17) comparent la fréquentation des différents axes par pas de temps de dix minutes entre t0 et t+30 minutes.



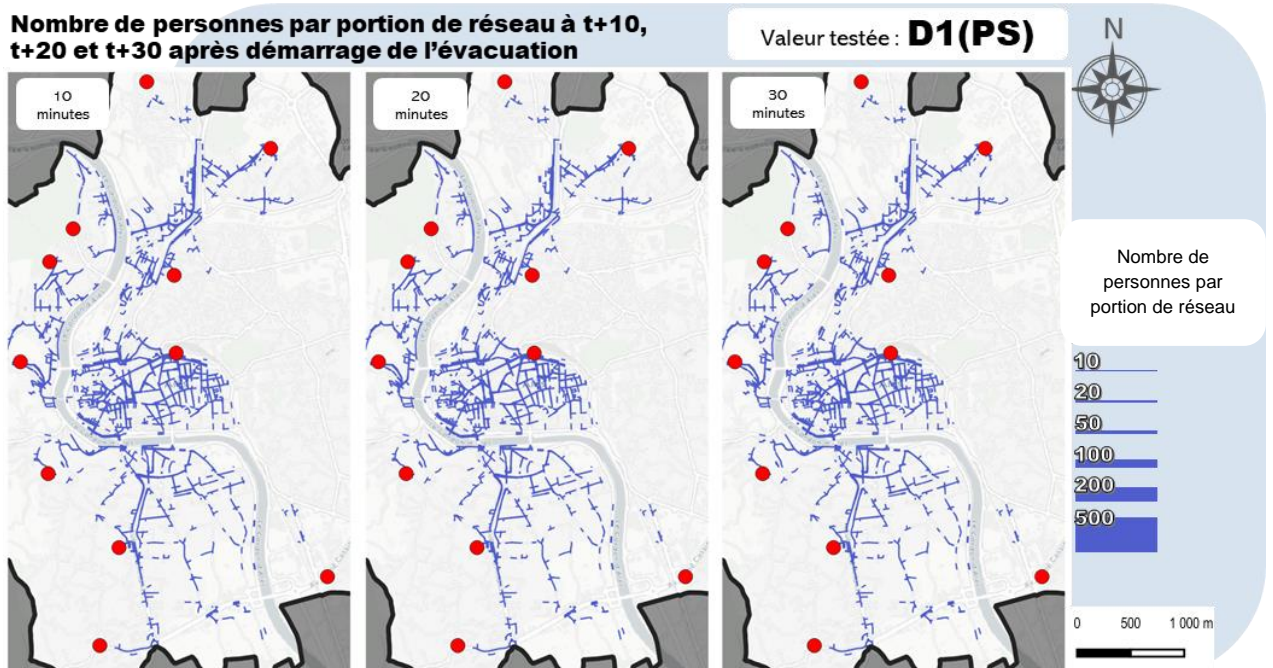
Atlas 15 - Fréquentation des axes pour D1(PC)

La comparaison des (Atlas 15) et (Atlas 16) démontre que lorsque D1(PG), les évacués partant de la partie nord de l'IRIS Prairie-Promelles sont bien rassemblés sur la N106 (Atlas 16[1]). En réalité, lorsque D1(PC), les habitants de cette zone de la commune n'utilisent pas la N106 afin de se rendre aux PRE (Atlas 15[1]). (Atlas 16) indique que lorsque D1(PG), près de trente personnes se trouvent sur la N106 à t+20 minutes du départ de l'évacuation. Cela indique bien une densification accrue du nombre de personnes sur certains axes lorsque D1(PG). De plus, cette densification semble intervenir 10 minutes plus tôt que pour les deux autres valeurs de D1.



Atlas 16 - Fréquentation des axes pour D1(PG)

Peu investigué jusqu'à présent, la valeur PS du paramètre D1 semble, à la vue de (Atlas 17), avoir plusieurs effets sur la spatialisation des évacués en fonction du temps. Les évacués empruntent une plus grande variété d'axes que pour les deux autres valeurs du paramètre. La conséquence directe de cela est une concentration d'évacués généralement plus faible en tout point et à tout moment de l'évacuation.



Atlas 17 - Fréquentation des axes pour D1(PS)

Les trois atlas précédents ont donc permis d’approfondir la compréhension de l’impact de D1 sur le comportement du modèle de simulation. La valeur PC contribue à réduire les temps de parcours, en proposant des itinéraires optimisés. Cette valeur remplit donc parfaitement sa fonction. La valeur PG génère des itinéraires plus longs que PC, de plus, elle contribue à l’augmentation de la densité d’évacués sur les axes principaux du réseau relativement tôt lors de l’évacuation. La valeur PS génère des itinéraires pouvant être considérés comme les plus longs, en moyenne. En revanche, cette valeur permet une meilleure répartition spatiale de la population pendant l’évacuation. Ce facteur contribue à compenser la longueur des itinéraires dans une proportion qu’il n’est pour l’instant pas possible de caractériser avec précision.

Après ce constat, il est intéressant de comprendre dans quelle mesure la variation de D1 peut modifier le flux de personnes au niveau des PRE. En effet, les trois valeurs possèdent chacune un impact différent sur les processus de mobilités, mais les temps d’évacuation globaux restent relativement proches. Il est donc pertinent d’analyser les flux de personnes au niveau des PRE, afin de pouvoir mettre en évidence d’éventuels déséquilibres pouvant survenir pendant l’évacuation. Ces déséquilibres pourraient alors concerner un ou plusieurs PRE, provoquant une variation dans le flux d’évacués à certaines périodes. Cette information serait alors non interprétable à partir de la seule courbe de cumul, possiblement par une perte due à l’agrégation de l’ensemble des arrivées (peu importe le PRE) sur cette même courbe.

2.4.4 Arrivées aux PRE

Ainsi pour clarifier l’existence ou la non-existence de déséquilibres ponctuels dans les flux d’arrivée au niveau des PRE, dus aux choix d’itinéraires, la Figure 38 présente, pour chaque PRE, le cumul d’arrivées en valeur absolue (ordonnées) en fonction du temps, exprimé en minutes (abscisses).

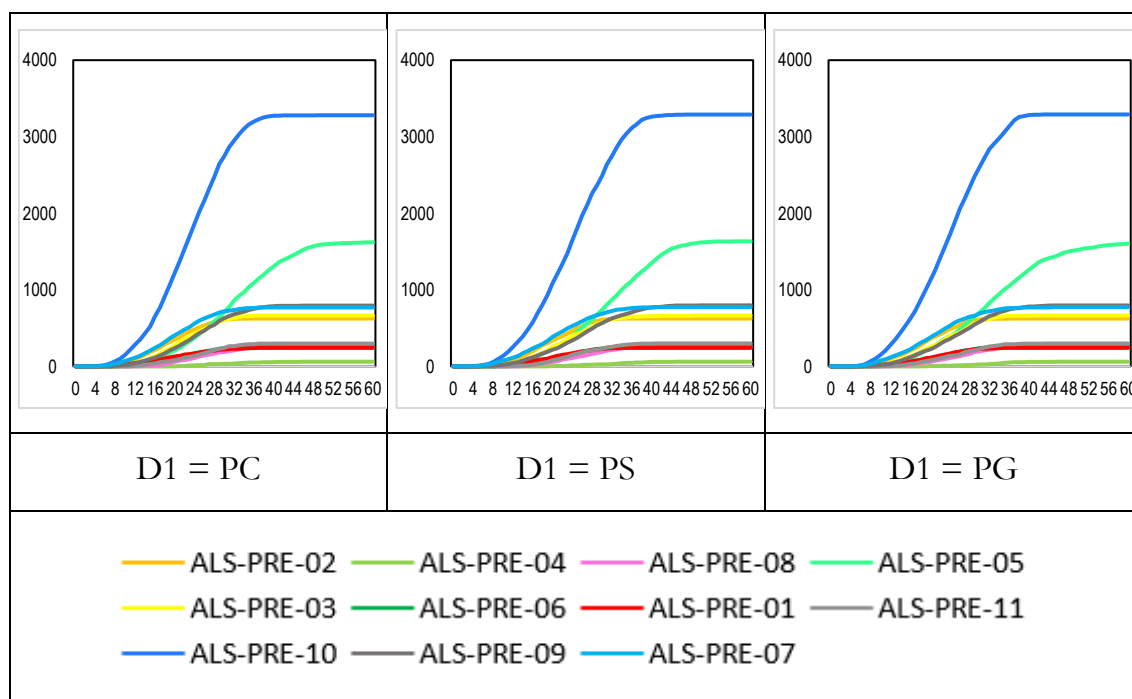


Figure 38 - Courbes cumulatives des arrivées pour chaque PRE (D1)

La Figure 38 démontre une relative régularité dans le flux de personnes arrivant aux PRE en fonction du temps pour l'ensemble des trois valeurs de D1. Il est possible de noter une légère inflexion de la courbe du PRE « ALS-PRE-05 » lorsque D1 = PG. Ce PRE correspond aux Jardins de la Tour, il s'agit d'un PRE relativement éloigné de la zone menacée en comparaison des autres.

Outre ce léger écart local, il est possible d'affirmer que D1 n'a pas d'impact sur le cumul des arrivées aux PRE. Pour confirmer cette tendance, le Figure 39 donne le nombre d'arrivées par minutes pour chaque PRE. Les résultats sont là-aussi, relativement similaires pour les trois alternatives de D1.

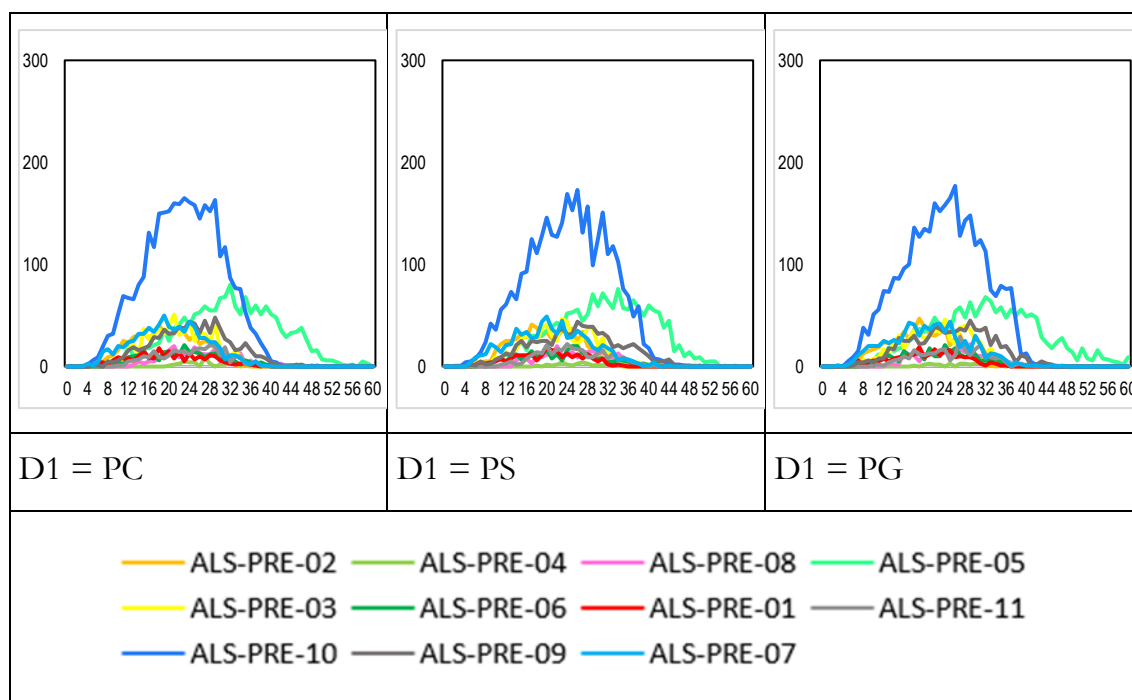


Figure 39 - Arrivées par minute pour chaque PRE (D1)

2.4.5 Analyse des résultats

Le test du paramètre D1 a permis d'estimer l'impact de l'utilisation, par les personnes, de différentes méthodes de construction d'itinéraires. En plus de la valeur PC (chemin les plus courts), deux valeurs ont été testées : PS (chemin limitant les ruptures dans l'espace) et PG (itinéraires dégagés). Pour chaque test, l'ensemble de la population a utilisé une seule logique de construction.

Sur notre commune test, les résultats obtenus montrent que la valeur la plus efficace pour limiter le temps global d'évacuation est PC. Cependant, le gain de temps peut être considéré comme léger. La valeur PS a mis en évidence un meilleur partage de l'espace par les personnes, les évacués étant mieux répartis sur le réseau. Ainsi, il est possible que le rallongement géodésique des itinéraires provoqué par l'utilisation de PS soit en partie compensé par une plus faible densité générale d'évacués sur le réseau. Cet aspect n'est à ce stade pas confirmé. PG a démontré une tendance à centraliser

les évacués sur des axes principaux, notamment la N106. Outre un rallongement géodésique pouvant être important, PG a également mis en évidence un effet délétère de la densification d'évacués sur certaines portions du réseau. Ce constat peut être en partie dû à la structuration du réseau sur la commune test. Le nombre réduit d'axes principaux entraîne une densification accrue des flux de piétons sur ces derniers lorsque D1(PG). Si le nombre de ces axes était plus important, la densité des flux sur de tels axes serait probablement moins élevée.

III.2.5 Comportement du paramètre D2, le choix de la destination

L'objectif du paramètre B2 est de tester les conséquences de choix alternatifs de destinations par les populations. La valeur standard du paramètre oriente 100% de la population vers le PRE le plus proche du point de vue de la distance géographique. D'autres destinations alternatives sont testées, afin de comprendre dans quelle mesure le choix de destination par les personnes influence le déroulement d'une opération d'évacuation. Une typologie de quatre destinations est proposée dans ce travail (Tableau 19). Ainsi, chaque personne peut choisir parmi quatre destinations en démarrage de simulation.

Type de destination	Explications	Valeur
Le PRE le plus proche (distance géographique)	Cela correspond à la consigne d'évacuation officielle telle qu'inscrite dans le PPI.	D2(O)
Un PRE quelconque à distance raisonnable	Les personnes se dirigent vers un PRE quelconque situé à une distance inférieure à 2 kilomètres.	D2(A)
Un lieu d'hébergement public	Les lieux d'hébergements publics correspondent aux établissements pouvant accueillir des séjournant, tels que les hôtels ou les auberges. Ces établissements sont considérés dans la littérature (?) comme pouvant être choisis par une frange marginale de la population.	D2(H)
Un lieu d'hébergement privé	Les lieux d'hébergement privés font en réalité référence aux lieux qui ne correspondent à aucune des catégories précédentes. Il s'agit majoritairement d'hébergements chez des proches ou de la famille. Le recours à ce type d'hébergement ne peut être connu précisément à ce stade du travail : c'est pourquoi il est matérialisé sous la forme d'un bâtiment aléatoire sélectionné hors zone menacée.	D2(P)

Tableau 19 – Valeurs possibles de D2

A l'instar du paramètre D1 (choix des itinéraires), le paramètre D2 se propose d'étudier différentes possibilités de choix à l'échelle des individus. Cependant, au contraire de D1, D2 est implémenté dans la simulation selon un principe de répartition. Cela signifie que pour l'ensemble des valeurs du paramètre, la population est toujours répartie entre les différentes destinations de la topologie proposée. L'utilisation d'itinéraires alternatifs par les populations peut être intéressante dans la mesure où certains types d'itinéraires peuvent contribuer à largement modifier la structure des mobilités sur le territoire. Ainsi, il est dans ces conditions pertinent de soulever une question de forme : la forme que prendraient les mobilités si l'ensemble de la population adoptait un type d'itinéraires en particulier. En plus de cela, les méthodes de construction d'itinéraires donnent des résultats suffisamment proches les uns des autres pour ne pas avoir à fonctionner par répartition. Peu importe le type d'itinéraires utilisés, le résultat obtenu produit peu de bruit est demeure cohérent. Concernant le paramètre D2, le fonctionnement par répartition est plus intéressant. Par exemple, l'une des stratégies de choix d'une destination considère la possibilité que des personnes se déplacent chez de la famille ou des proches. Cela se matérialise dans la simulation sous la forme du choix d'un bâtiment aléatoire hors zone menacée. L'étude d'une valeur de D2 pour laquelle 100% de la population se dirigerait vers un bâtiment aléatoire n'a que peu d'intérêt, et ne permet pas de faire émerger de la connaissance sur les mobilités du territoire puisqu'elle serait largement déterminée par un facteur aléatoire. En revanche, il est pertinent de considérer que dans une des valeurs de D2, un certain pourcentage de la population pourrait se diriger vers un bâtiment difficilement prévisible par avance. Les valeurs de répartition utilisées sont détaillées dans le chapitre 2.

Pour chaque valeur de répartition du paramètre D2, dix simulations ont été réalisées, le résumé statistique est présenté en Tableau 20. L'écart-type autour de la moyenne est généralement inférieur à 1%, cela s'explique de deux manières. Comme écrit précédemment, il s'agit d'un paramètre implémenté par répartition au sein de la population générée en début de simulation. En conséquence, lorsque D2 prend la valeur P, une frange de la population est toujours censée se diriger vers le PRE le plus proche. Dans ces conditions, il est alors possible de supposer que, lorsque $B2 = P$, le choix par 10% de la population d'un bâtiment aléatoire hors zone soit générateur d'une forte variabilité, et contribue à augmenter l'écart type entre les runs de la simulation. Pour éviter ce phénomène, la distance de recherche des personnes a été réduite à deux kilomètres. De cette manière, les personnes choisissent en réalité une destination située hors zone de danger mais à proximité de leur point de départ afin de pouvoir envisager de parcourir ce trajet à pied.

		50	75	90	95	100
D2(O)	1 SD -	24	30	35	38	45
	Moyenne	24	29	35	38	44
	1 SD+	24	29	34	38	43
D2(A)	1 SD -	27	35	42	47	47
	Moyenne	27	35	42	46	46
	1 SD+	27	34	41	45	45
D2(H)	1 SD -	27	34	41	44	44
	Moyenne	27	34	40	44	44
	1 SD+	27	34	40	43	43
D2(P)	1 SD -	31	39	45	48	48
	Moyenne	31	38	45	48	48
	1 SD+	30	38	45	48	48

Tableau 20 - Moyenne et écarts-type pour l'ensemble des simulations de D2

Les PRE officiels prévus dans le PPI relatif au barrage de Sainte-Cécile d'Andorge sont suffisamment proches de la zone menacée pour limiter la distance à parcourir par les personnes. Cependant, ils sont au nombre de 11 sur la commune test, pour un nombre d'évacués initial approchant les 9000 personnes. Le test des paramètres précédents a contribué à mettre en évidence une augmentation rapide de la densité de personnes sur le réseau en fin de parcours. Il est évident que les itinéraires des personnes tendent à se ressembler au fur et à mesure de leur progression vers les PRE.

Au-delà de ce fait, le choix de destinations alternatives par les personnes devrait rallonger le temps global d'évacuation. L'ensemble des cas de figures considérés avec le paramètre D2 sont du ressort de l'initiative individuelle, et ne relèvent pas, conceptuellement, d'une volonté de prendre en compte des stratégies d'optimisation. Autrement dit, il est ici considéré que les personnes pourraient prioriser le confort lorsqu'elles choisissent un point de refuge.

2.5.1 Courbes de cumul

La (Figure 40) met en évidence un allongement de la durée globale de l'évacuation lorsque les choix de destinations ne s'orientent pas vers les PRE les plus proches. Si l'on considère le fonctionnement de la simulation, les résultats présentés sur le (Figure 40) sont significatifs. En effet, au contraire du paramètre D1 par exemple, les valeurs sont ici réparties dans la population. Cela veut dire que la valeur A correspond par exemple à un équilibre entre des personnes choisissant le PRE le plus proche et des personnes choisissant un autre PRE (dans un rayon de 2km). Si l'on considère cet équilibre, l'écart dans la courbe de cumul entre $D2 = O$ et $D2 = A$ en devient significatif.

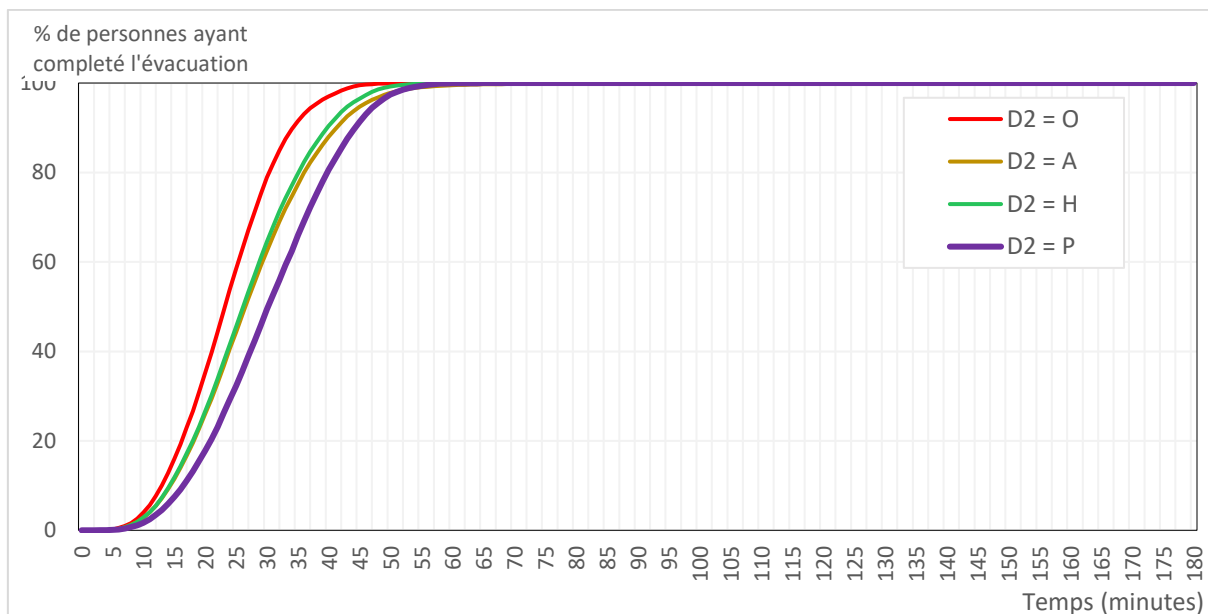
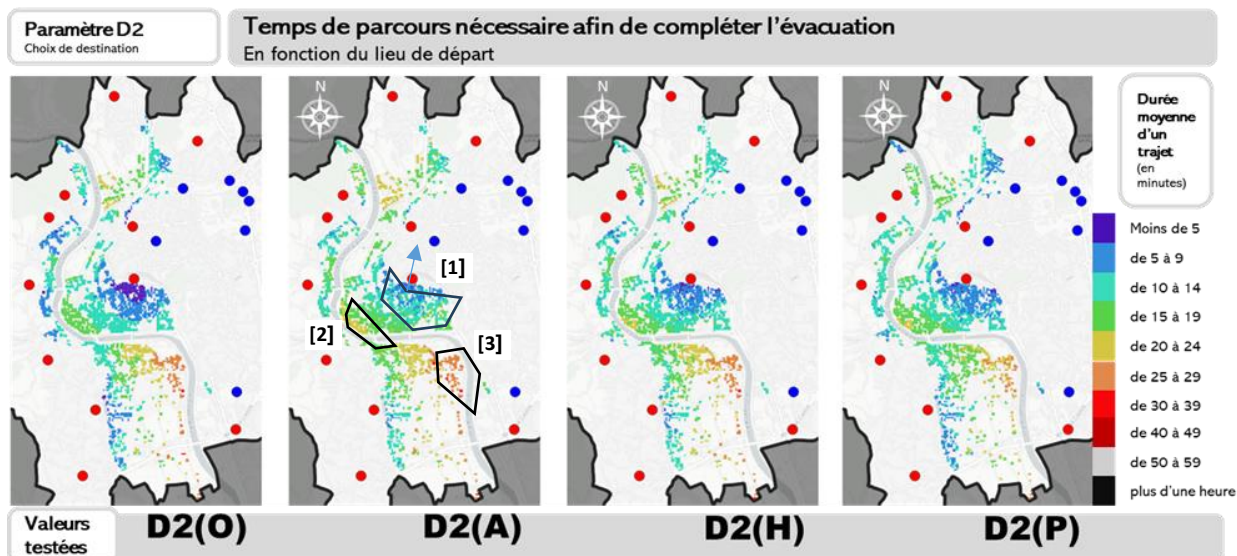


Figure 40 - Courbe cumulative des arrivées pour D2

La question résultant de la (Figure 40) concerne la sortie réelle de la zone menacée. En effet, lorsque les personnes se dirigent vers des destinations autres que les points de refuges, les temps peuvent être allongés, mais cela ne signifie pas que les personnes se trouvent toujours dans la zone menacée. La comparaison des différentes valeurs de D2 au regard du temps que prennent les personnes afin de s'exfiltrer de la zone menacée peut s'avérer pertinente dans ce cas.

2.5.2 Temps de parcours

L'Atlas 18 représente les temps de parcours individuels moyennés pour chacune des valeurs de D2. Ici, le parcours considéré est celui entre le point de départ de l'évacué et sa destination. Ainsi, certains parcours peuvent inclure un temps de déplacement hors zone menacée.



Atlas 18 - Comparaison des temps de parcours individuels moyennés pour D2

Pour l'ensemble des valeurs de D2 testée, aucune personne ne parcourt jamais plus de deux kilomètres. Dans le cas de D2(A), cela réduit le champ des possibilités à trois PRE au maximum. La comparaison D2(O) D2(A) permet de mettre en évidence les conséquences d'une modification de la destination initiale pour 50% des personnes évacuées. Une partie des évacués se dirigeant vers le PRE numéro 10 (gare ferroviaire) lorsque D2(O) se trouve redirigée vers le PRE numéro 9 (collège Bellevue) lorsque D2(A) (Atlas 18[1]). Cela contribue à allonger le trajet d'une partie de l'IRIS centre-ville (Atlas 18[1]). Un rallongement des temps de parcours est également observable à l'ouest de l'IRIS centre-ville (Atlas 18[2]). Cet allongement peut être due au choix, par une partie des évacués, d'un PRE plus lointain comme destination. Les personnes situées au niveau du quartier de la prairie (Atlas 18[3]) n'ont qu'une seule alternative de destination dans le cas D2(A), les autres PRE étant situés au-delà du seuil de 2 kilomètres.

2.5.3 Fréquentation des axes

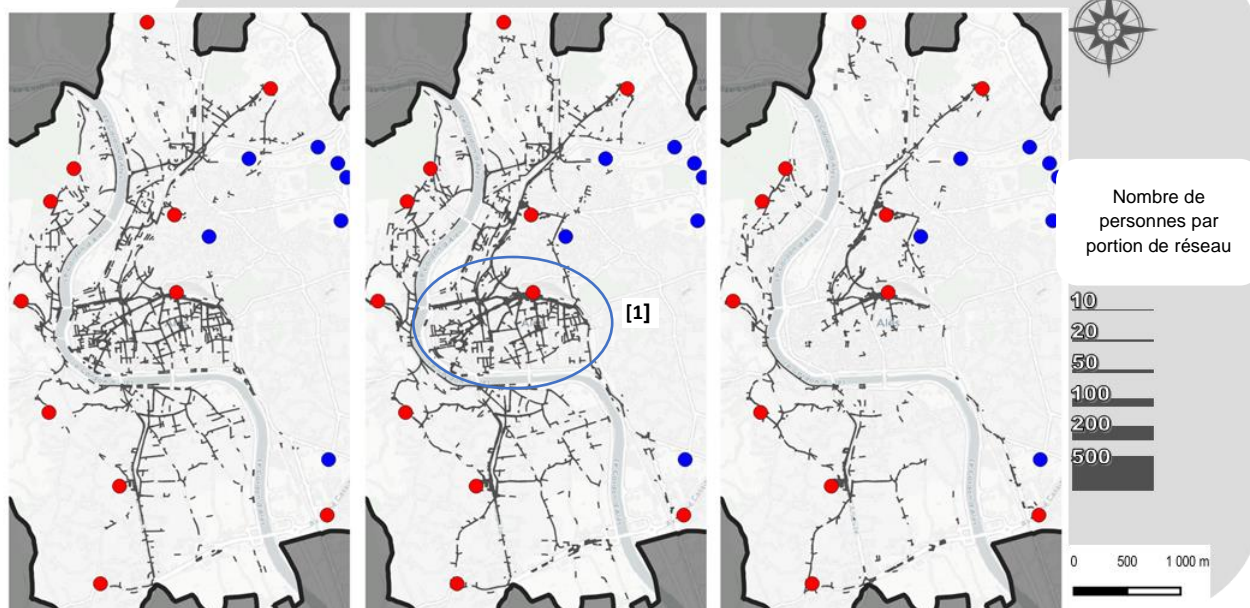
L'Atlas 19 recense le nombre de personnes par portion de réseau dans le cadre du test de la valeur D2(A). Il est possible de distinguer une réduction des flux piétons en centre-ville (Atlas 19[1]) en comparaison d'autres tests où D2 est implémenté sur O (valeur par défaut). Également, mis en évidence dans la section précédente, un report des personnes vers le PRE 9 depuis le PRE 10 entraîne l'utilisation de voie habituellement non empruntée (Atlas 19[2]).



Atlas 19 - Fréquentation des axes pour D2(A)

L'Atlas 20 recense le nombre de personnes par portion de réseau dans le cadre du test de la valeur D2(H). La redirection d'une partie des évacués vers un hôtel à proximité entraîne une diminution des flux de piétons en centre-ville (Atlas 20[1]). Au-delà de ce fait, les modifications de flux sont assez peu significatives. Il est à noter que seuls les évacués situés à l'est du Gardon peuvent atteindre un lieu d'hébergement privé.

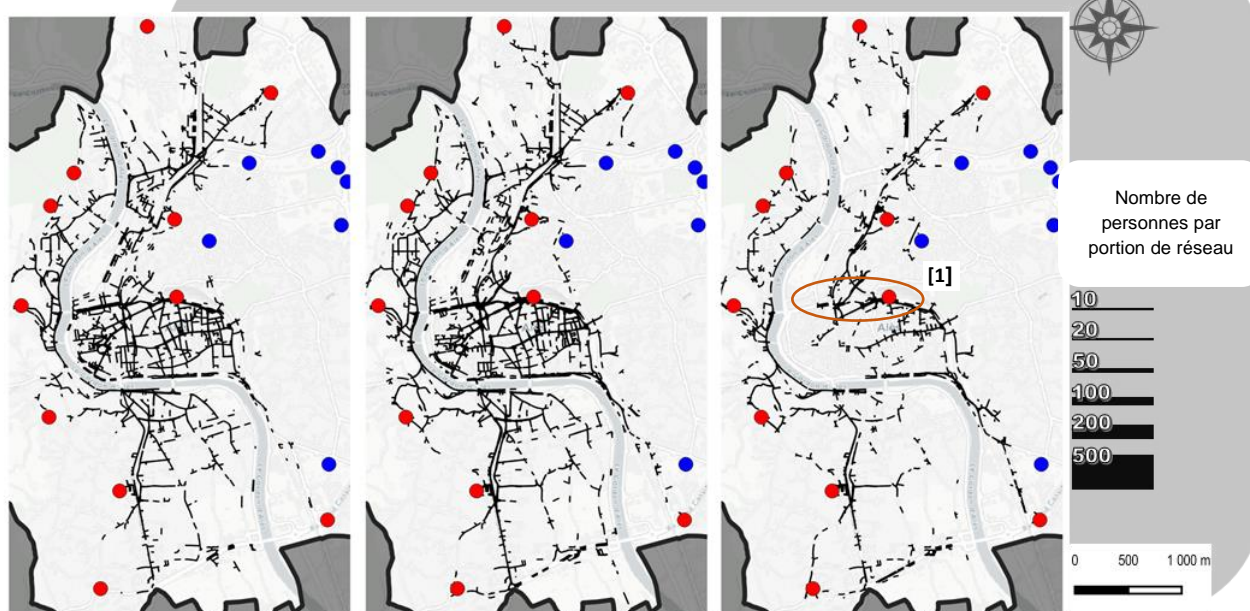
D2 - H



Atlas 20 - Fréquentation des axes pour D2(H)

L'Atlas 21 recense le nombre de personnes par portions de réseau lorsque D2(P). D2(P) inclus une proportion de personnes se dirigeant vers un bâtiment aléatoire situé hors zone. Compte tenu du caractère partiellement aléatoire de D2(A) il est difficile de généraliser les résultats obtenus. Cependant, il est possible d'observer un évidence des axes autour du PRE numéro 10, habituellement très fréquentés.

D2 - P



Atlas 21 - Fréquentation des axes pour D2(P)

Une diminution généralisée de la demande vers l'ensemble des PRE peut alors permettre une meilleure circulation des personnes sur l'axe stratégique du Boulevard Talabot (Atlas 21[1]).

2.5.4 Répartition des arrivées par PRE

Les résultats analysés dans les figures ci-après (Figure 41 et Figure 42) incluent uniquement deux valeurs de D2 sur les quatre testées. Les valeurs D2(H) et D2(P) ne sont pas pertinentes à présenter ici. En effet, si la proportion des évacués, dans chacune de ces valeurs, est fixe, leur localisation dans l'espace est aléatoire. Autrement dit, ces valeurs n'apportent pas d'information spécifique sur la demande vers les différents PRE.

En revanche la comparaison des valeurs D2(O) et D2(A) permet d'apporter de l'information. Dans D2(O), l'ensemble des personnes se dirigent vers le PRE le plus proche. Dans D2(A), la moitié des personnes se dirigent vers le PRE le plus proche tandis que l'autre moitié se dirige vers un autre PRE situé à moins de deux kilomètres. Cette comparaison se justifie par l'analyse de l'effet du report d'une partie de la demande pour un PRE vers un PRE voisin sur la demande globale de chacun d'entre eux. Des considérations géographiques entrent en jeu, notamment dans la sélection du PRE alternatif, il est donc intéressant de comparer les deux valeurs.

La Figure 41 met en évidence une diminution de la demande vers le PRE-10 d'environ 25%. Cette diminution coïncide avec l'augmentation de près de 50% de la demande vers le PRE-09, situé à proximité du PRE-10. Ces deux PRE sont situés en centre-ville, néanmoins le PRE-10 est celui qui, en temps normal, draine l'ensemble de la population du centre-ville, de par sa position. Le choix par les personnes d'un PRE alternatif est donc un enjeu important dans cette zone ci.

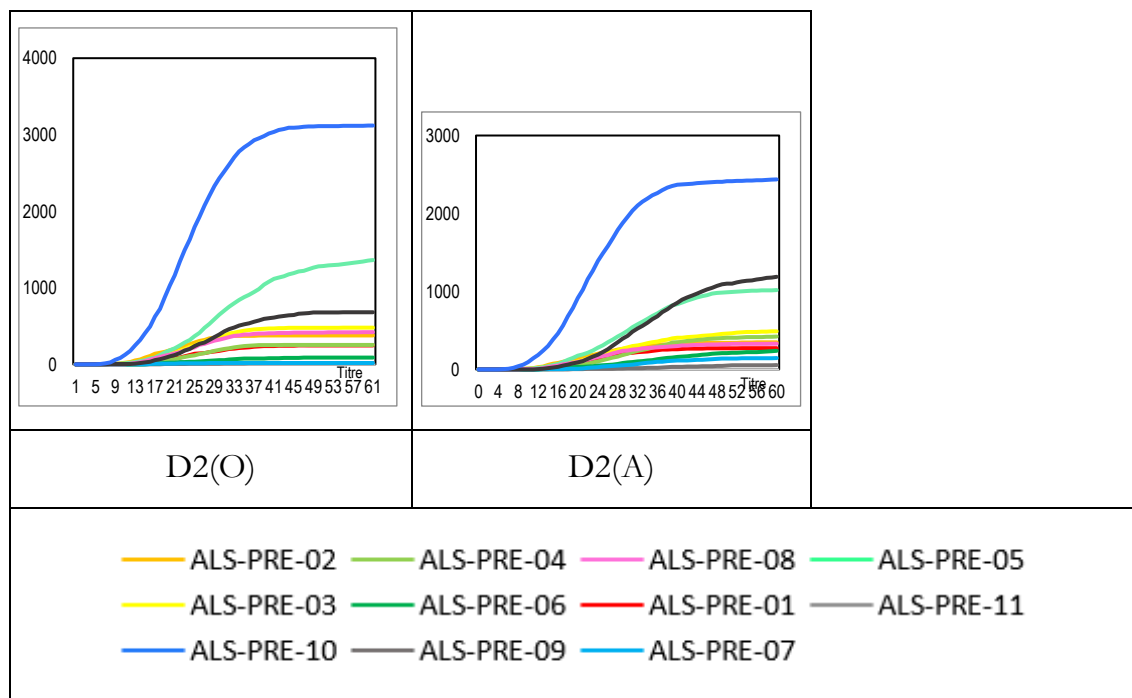


Figure 41 – Courbes cumulatives des arrivées pour chaque PRE

La Figure 42 apporte un élément supplémentaire d'analyse. Les personnes qui, avec D2(A), se dirigent vers le PRE-09, semblent avoir besoin de plus de temps afin d'arriver à destination. La part de la demande vers PRE-10 dans D2(O) répercutée vers le PRE-09 dans D2(A) s'étire dans le temps, indiquant des temps de trajet allongés dans ce cas de figure.

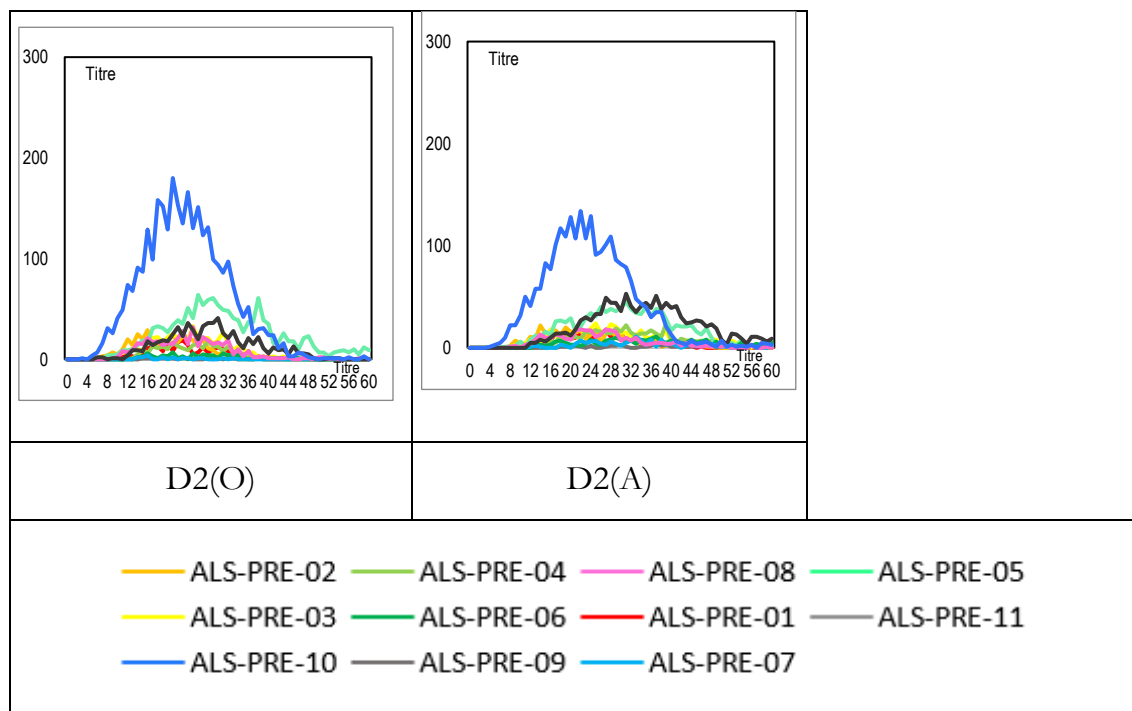


Figure 42 - Arrivées par minute pour chaque PRE (D2)

2.5.5 Analyse des résultats

Le paramètre D2 a permis d'estimer l'impact du choix de destination sur la mobilité des personnes. Globalement, deux effets territoriaux localisés sont mis en évidence. Premièrement, cela concerne les personnes situées à proximité d'un PRE, le choix d'une destination alternative peut sensiblement rallonger le temps nécessaire afin de compléter l'évacuation. Deuxièmement, pour les personnes éloignées d'un PRE, le choix d'une destination non-officielle D2(H) ou D2(P) peut permettre un délai d'évacuation réduit. Cependant, compte tenu du seuil de distance implémenté, les résultats obtenus ne sont pas significatifs, et n'apportent finalement que peu d'informations.

III.2.6 Comportement du paramètre V2, praticabilité du réseau

Dans le cadre de notre cas d'étude, le paramètre V2 considère la possibilité d'un événement pluvieux intense pendant l'évacuation, provoquant un effet de ruissellement. Un ensemble d'arguments issus de la littérature, ainsi que la nature même du cas d'application, ont rendu pertinent l'intégration d'un tel paramètre dans le modèle de simulation. L'objectif du paramètre V2 est en effet d'évaluer l'impact de

phénomènes hydrologiques (inondation, ruissellement) sur le processus d'évacuation préventive. Ici, l'inondation considérée est distincte de l'aléa relatif au cas d'étude, qui concerne une vague de submersion liée à une rupture de barrage. Parmi le vaste ensemble des situations contributives du contexte de l'évacuation, l'occurrence d'un événement pluvieux de forte importance est ainsi retenue.

Trois valeurs de hauteurs d'eau sont ainsi retenues comme valeurs seuils du paramètre V2 : 8 centimètres, 43 centimètres et 90 centimètres (Tableau 21).

Tableau 21 - Paramétrage de V2

Valeur du paramètre	Dénomination
8 centimètres	V2(8)
43 centimètres	V2(43)
90 centimètres	V2(90)

Nous faisons le choix de ne pas mettre en œuvre de calculs hydrologiques en temps réel, afin de dédier la puissance de calcul disponible sur la simulation de l'évacuation. L'avantage de s'orienter sur une approche simplificatrice est d'éviter un calcul permanent de l'angle d'incidence entre la direction d'un piéton et la direction de l'écoulement. Afin de proposer une relation pertinente, il est considéré qu'une vitesse d'écoulement de 0.25 m/s s'applique sur les piétons, en tout point de la zone inondée, avec un angle d'incidence maximal. De cette façon, l'influence de la vitesse d'écoulement n'est pas oblitérée, et permet tout de même le déplacement piéton.

Ayant bien conscience de l'existence de relations hydrologiques entre le débit et la vitesse d'écoulement de l'eau, notamment en situation de forte pluviométrie, nous considérons qu'il s'agit d'une perspective de spécification du modèle sur laquelle des détails seront amenés, plus tard dans ce manuscrit.

Chaque valeur du paramètre V2 a fait l'objet de dix runs de simulation. Les statistiques descriptives de ces runs sont présentées en (Tableau 22). L'importance de l'écart type lorsque la valeur de V2 est de 90 est à souligner. Il tend à augmenter au fil de la simulation. Ainsi l'écart moyen atteint près de 10 minutes pour l'évacuation des cinq derniers pourcents de la population.

	Taux d'évacuation	50%	75%	90%	95%	100%
V2(8)	1 SD -	25	31	37	41	48
	Moyenne	24	30	36	39	46
	1 SD+	24	29	34	38	43
V2(43)	1 SD -	26	32	39	43	52
	Moyenne	25	32	38	42	50
	1 SD+	25	31	37	41	48
V2(90)	1 SD -	29	38	46	52	67
	Moyenne	27	35	43	48	59
	1 SD+	25	33	40	44	49

Tableau 22 - Moyenne et écarts-types pour l'ensemble des simulations de V2

Le paramètre V2 doit permettre, dans un premier temps, de saisir l'impact d'une inondation potentielle sur la performance de l'évacuation. L'objectif est de caractériser, d'une part, le ralentissement global que cela génère, mais également de pouvoir mettre en évidence des sous espaces de la commune test plus sensibles à l'augmentation de ce paramètre. Il est possible de supposer que les zones à proximité du Gardon sont les plus en danger en cas de montée des eaux. Le regard se portera tout particulièrement sur l'IRIS de Prairie-Promelles, en contiguïté du Gardon, c'est dans cet IRIS que les évacués doivent parcourir la distance la plus élevée afin de se mettre en sécurité.

2.6.1 Courbes de cumul

Le (Figure 43) présente la comparaison du temps global d'évacuation pour chacune des valeurs de V2. Sans surprise, les différences sont significatives. Il est à noter un delta, principalement celui entre 8 et 90, plus important lorsque l'évacuation dépasse les 20 minutes. La cause peut en être un ralentissement plus important pour les évacués ayant une plus grande distance à parcourir.

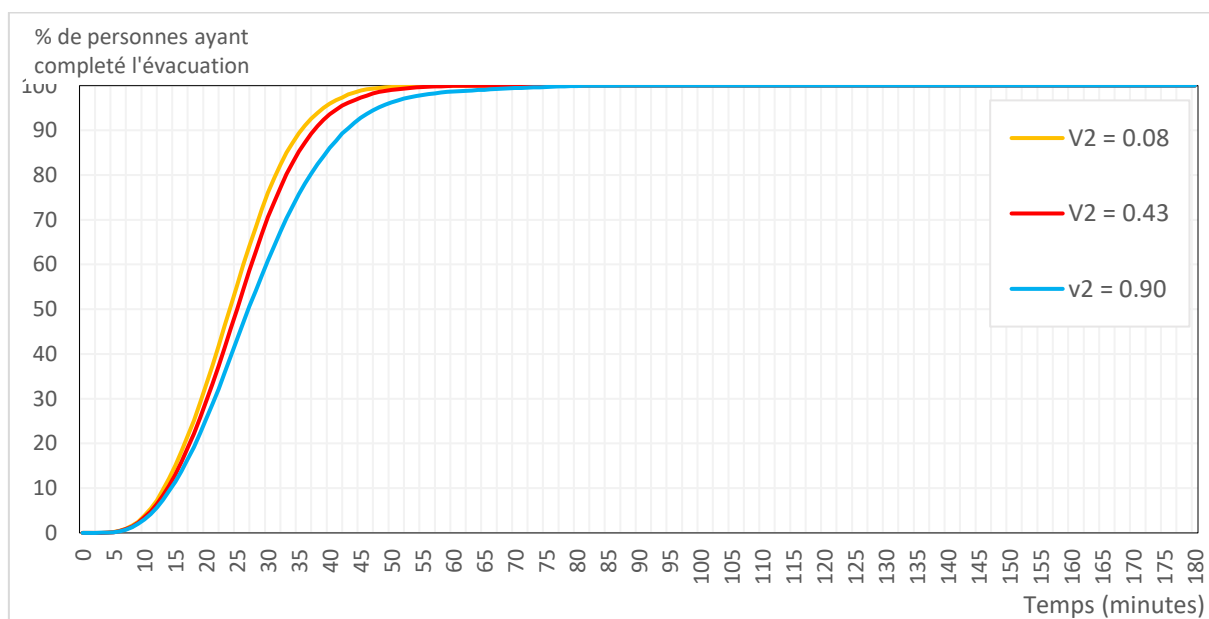
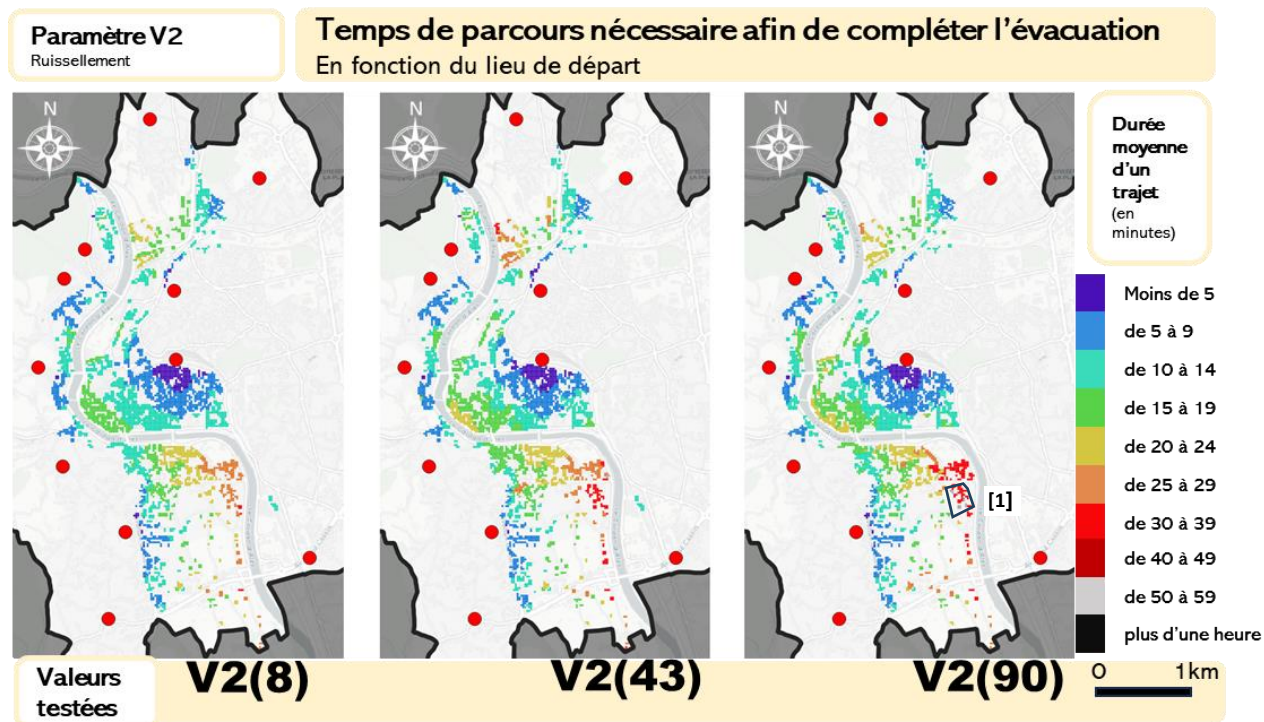


Figure 43 - Courbes cumulatives des arrivées pour V2

Considérant l'emprise de la zone inondée (Carte 6), il est évident que les personnes étant situées à proximité du Gardon doivent parcourir une distance plus longue sur un réseau inondé. Ainsi, outre le ralentissement généralisé de l'opération d'évacuation, l'augmentation de la valeur de V2 devrait également s'accompagner d'augmentation des temps de parcours individuels. Logiquement, l'augmentation des temps de parcours devrait être plus élevée dans les zones les plus éloignées d'un PRE.

2.6.2 Temps de parcours

L'Atlas 22 cartographie les temps de parcours individuels pour chacune des valeurs de V2. La comparaison des différentes cartes de (Atlas 22) permet la mise en évidence d'un gradient d'augmentation des temps de parcours. Ce gradient s'étend du Gardon jusqu'aux PRE.

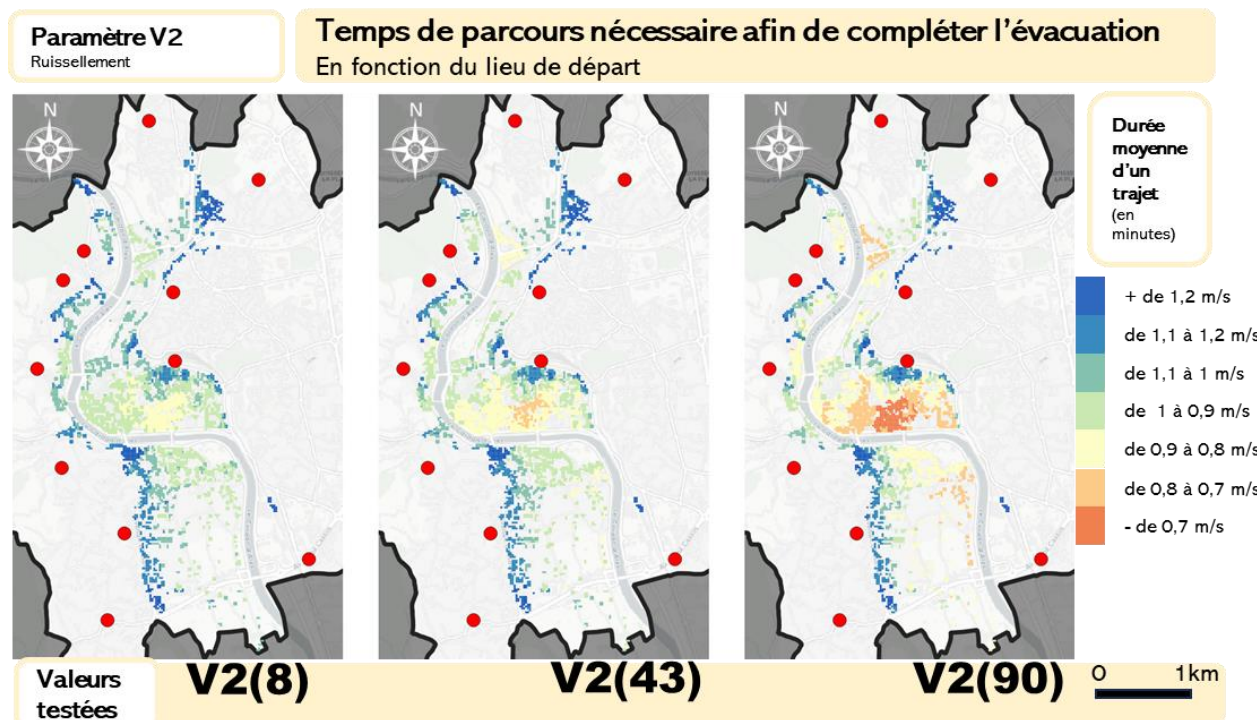


Atlas 22 - Comparaison des temps de parcours individuels moyennés pour V2

L'inégalité spatiale observée peut être considérée comme logique et attendue puisque l'éloignement des personnes au PRE le plus proche augmente proportionnellement la distance à parcourir. Il apparaît également que le paramètre V2 semble être celui ayant le plus d'impact sur les temps de parcours. Si le ralentissement de l'opération d'évacuation dans sa globalité semble relativement peu élevé, (Atlas 23) démontre que lorsque $V2 = 90$ les temps de parcours sont les plus longs observés jusqu'à présent. Pour rappel, à ce stade, dans la meilleure configuration paramétrique du modèle de simulation (celle permettant d'obtenir les meilleurs résultats dans l'ensemble des indicateurs), les temps de parcours maximaux observés ne dépassent pas les 25 minutes. Cela est plausible car il s'agit du temps qu'il serait possible d'obtenir par un calcul d'aires de services à l'aide d'un Système d'Information Géographique. En revanche, lorsque $V2 = 90$ les temps de parcours peuvent dépasser les 50 minutes (Atlas 22[1]). Cette information, mise en relation avec la (Figure 43) contribue à appuyer le constat de forte hétérogénéité spatiale des résultats obtenus.

L'Atlas 23 représente les vitesses moyennes de déplacement observées en fonction du point de départ. Il est possible d'observer un gradient s'étirant entre le lit du Gardon et l'extérieur de la zone menacée. Cela est normal compte tenu du fonctionnement du paramètre. Cependant, le gradient n'est pas spatialement équivalent sur les trois cartes

de l'atlas. En effet, il semble se traduire, dans l'espace, de plusieurs façons différentes en fonction de la valeur de V2.



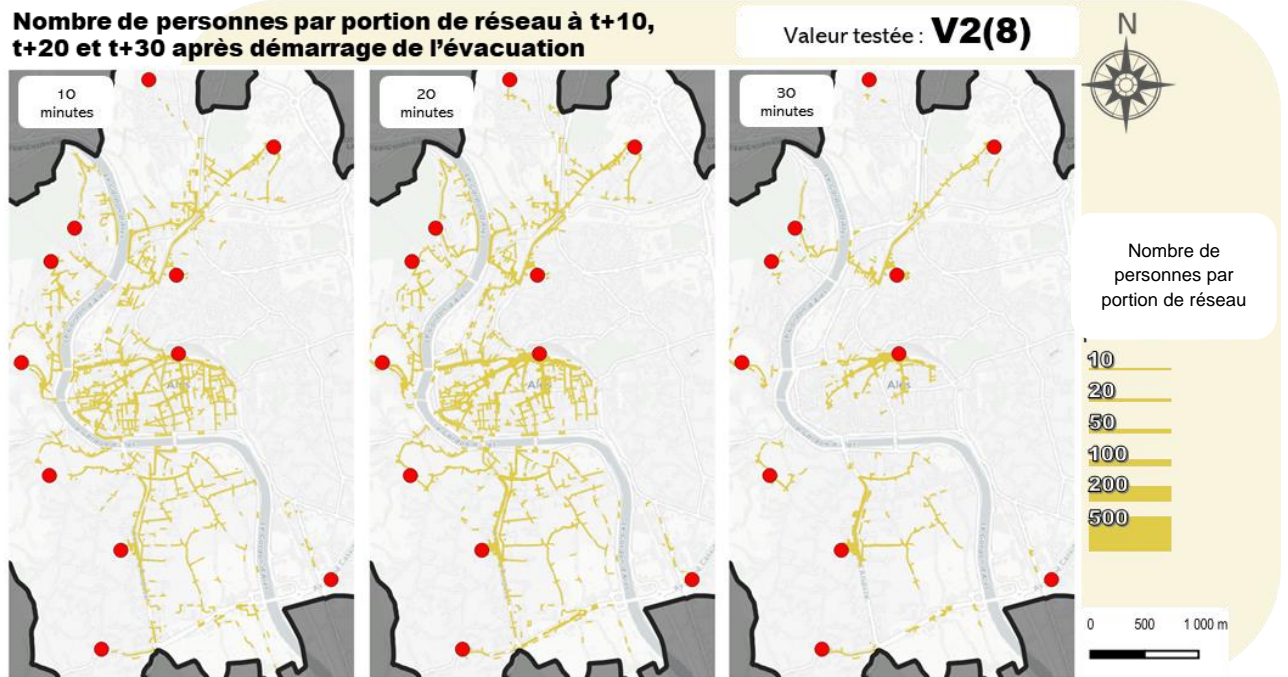
Atlas 23 - Vitesse moyenne des évacués en fonction de leur point de départ pour V2

Ainsi, les personnes situées au sud de l'IRIS centre-ville, et celles au sud de l'IRIS Tamaris, semblent creuser l'écart avec le reste du territoire en termes de vitesse moyenne de déplacement, lorsque V2 augmente. Ce constat pourrait être expliqué en partie par des effets d'agglutinement. Pour vérifier cela, il faut donc analyser la fréquentation des axes.

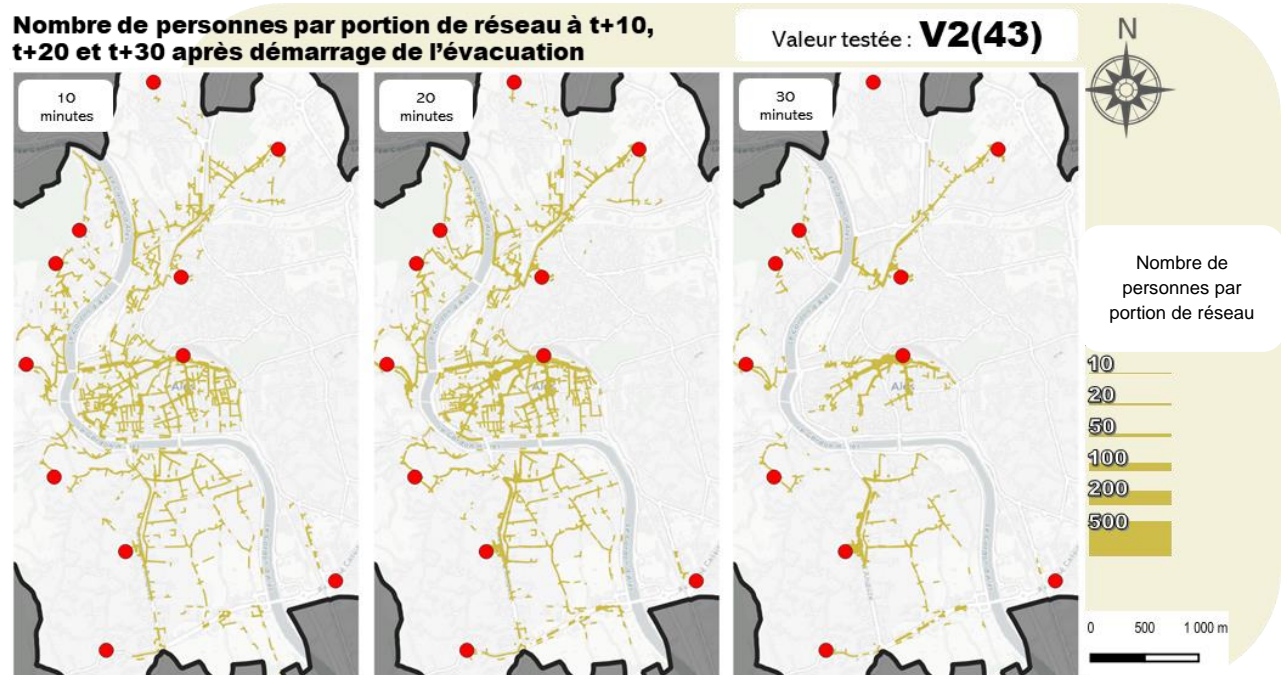
2.6.3 Fréquentation des axes

L'élévation de la valeur de V2 entraîne donc une augmentation conséquente des temps de parcours. Cette augmentation est corrélée à la distance que les personnes doivent parcourir en zone inondée. Une augmentation de la distance signifie une proportion de territoire inondé plus importante à traverser. Puisque seules les personnes se trouvant dans la zone inondée sont ralenties, des effets d'agglutinement pourraient être observables. Le problème est le suivant : si les personnes se situant dans la zone inondée se trouvent ralenties lorsqu'elles évacuent, elles peuvent s'y accumuler.

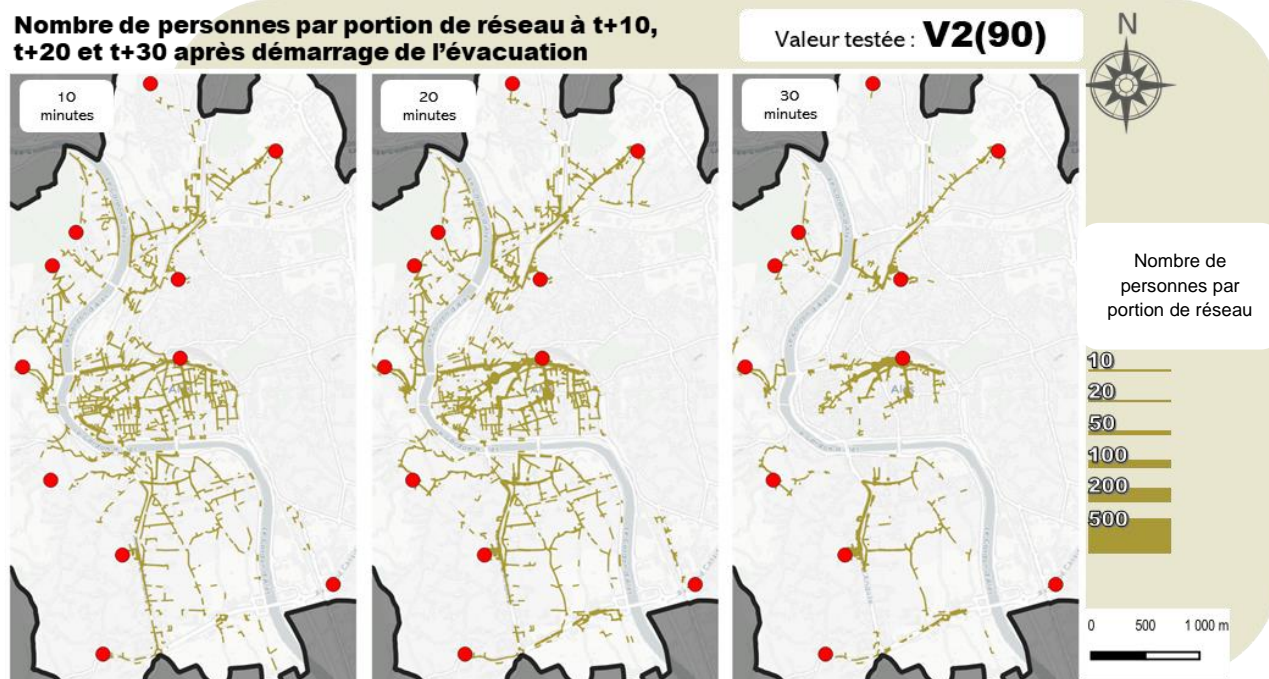
Les Atlas 24, Atlas 25 et Atlas 26 présentent le nombre de personnes recensées par portion de réseau pour V2(8), V2(43) et V2(90).



Atlas 24 - Fréquentation des axes pour V2(8)



Atlas 25 - Fréquentation des axes pour V2(43)



Atlas 26 - Fréquentation des axes pour V2(90)

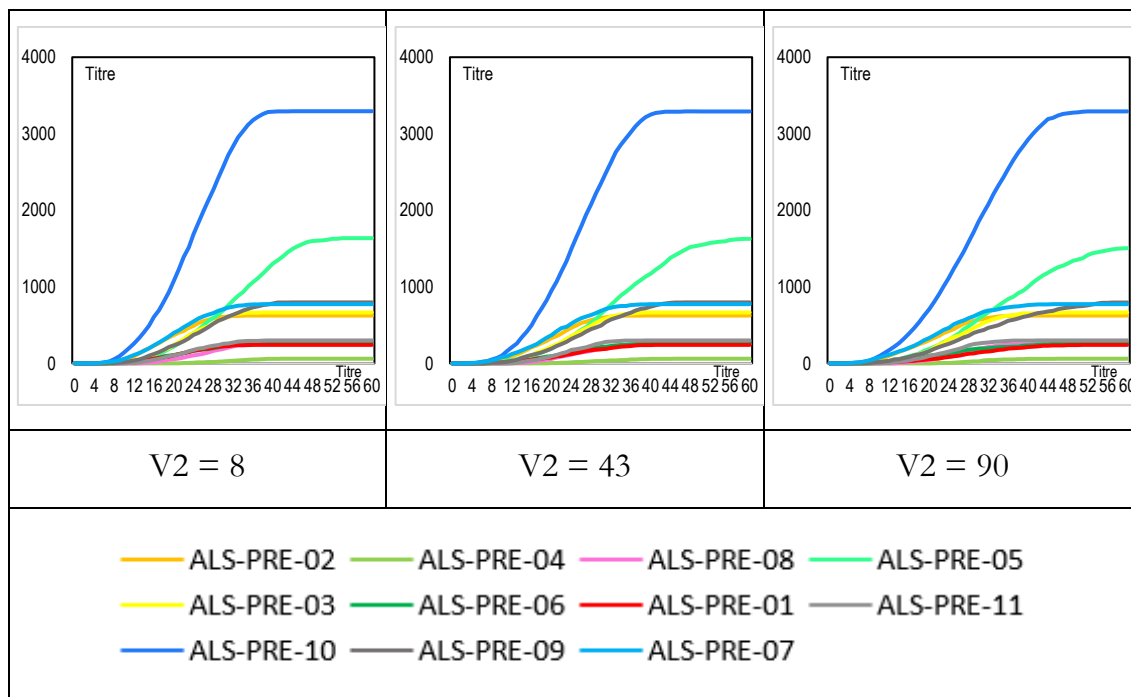
A la lecture de Atlas 24, Atlas 25 et Atlas 26, la comparaison entre les valeurs de fréquentation des axes lorsque V2(8) et V2(90) laissent apparaître un nombre plus élevé de personnes se trouvant sur des axes situés au sein de la zone inondée. La situation à t+20 minutes lorsque V2(8) correspond, à peu de choses près, à la situation à t+30 minutes lorsque V2(90). Cet écart de dix minutes n'est pas visible sur le graphique en (Figure 43). Cela est donc le signe de fortes hétérogénéités spatiales, provoquées par une inégalité dans la distance que les personnes doivent parcourir en zone inondée.

Concernant l'éventuelle accumulation de personnes en zone inondable à cause de la diminution généralisée de la vitesse de déplacement, elle est effectivement observable. Cependant, les valeurs ne semblent pas, à l'échelle d'une rue, suffisamment élevées pour qu'il soit possible d'évoquer un impact sur l'évacuation. Lorsque V2(90), les personnes s'accumulent au sein de l'IRIS centre-ville, mais pas suffisamment pour entraîner des ralentissements.

2.6.4 Répartition des arrivées par PRE

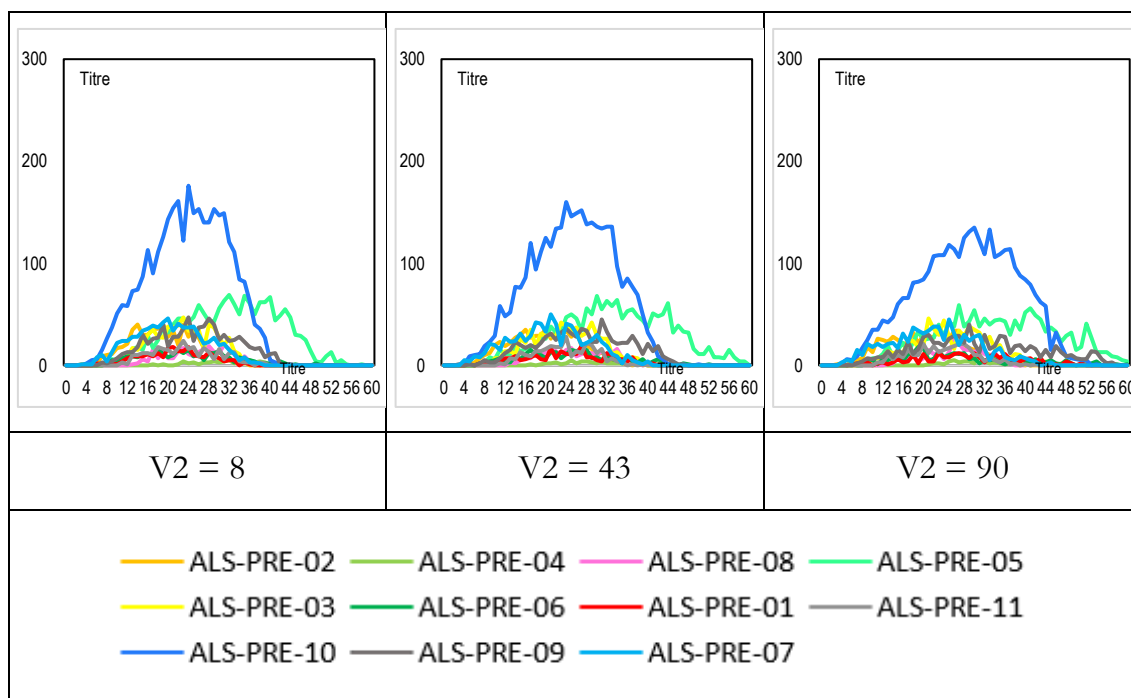
Le (Figure 44) correspond à la courbe des arrivées cumulées pour chacun des PRE. Il permet d'envisager une structuration spatiale des mobilités relativement équivalente pour les trois valeurs de V2. Il semblerait que l'accumulation de personnes constatée en centre-ville n'a finalement que peu d'effet sur le déplacement des personnes.

Figure 44 – Courbes cumulatives des arrivées pour chaque PRE (V2)



Le (Figure 45) ne permet pas de nuancer le constat précédent. Si les pics d'arrivées se décalent dans le temps en fonction de V2, ce qui démontre un ralentissement général des personnes, la structure spatiale des mobilités ne semble pas changer. Il n'y a aucun déséquilibre, par exemple entre des PRE demandés et moins demandés.

Figure 45 – Arrivées pour chaque PRE (V2)



2.6.5 Analyse des résultats

Le paramètre V2 démontre avoir un impact négatif sur l'opération d'évacuation de population lorsqu'il est plus élevé. Cet impact négatif est direct, cela signifie que ce paramètre ralentit directement la progression physique des personnes, lorsqu'elles se situent dans une zone de ruissellement. Il ne provoque pas, au contraire d'autres paramètres, d'effets indirects sur l'évacuation.

III.2.7 Synthèse des résultats obtenus

Cette section synthétise les constats mis au jour sur l'impact de chaque paramètre sur le modèle de simulation. Les effets combinés possibles sont également discutés dans l'objectif d'alimenter l'analyse croisée qui sera abordée dans la partie III.3 suivante.

2.7.1 Paramètre B1, le refus d'évacuer

Le test du paramètre B1 ne permet pas de formuler d'hypothèses pertinentes sur un éventuel effet combiné de ce paramètre avec un quelconque autre. Il apparaît qu'une diminution du nombre d'évacués en démarrage de simulation a pour effet une amélioration de l'opération d'évacuation dans sa globalité. En revanche, la diminution du nombre d'évacués n'a pas montré d'effets significatifs sur les temps de parcours, qui sont finalement similaires. Il est possible que la quantité initiale de personnes du modèle de simulation ne génère pas intrinsèquement d'effets de densité. Dans ce cas une diminution de ce nombre n'aurait aucun effet sur le temps de parcours des personnes, puisque de toutes les façons possibles elles ne sont pas gênées par les autres personnes. Une compression de la courbe de départs (donc une modification du paramètre B2) aurait possiblement permis d'observer une diminution des temps de parcours en fonction de B1. Cependant, les auteurs estiment dans ce cas qu'un test des effets d'une augmentation, plutôt que d'une diminution du nombre d'évacués, permettrait une meilleure caractérisation du comportement du modèle de simulation.

2.7.2 Paramètre B2, le temps de préparation

Le test du paramètre B2 permet de formuler un constat important issu des résultats produits. En deçà d'un seuil restant à définir avec plus de précision, la vitesse de départ des individus ne correspond plus de manière proportionnelle à leur taux d'arrivée. Ainsi, si le départ des personnes est rapide, des effets de densité sont observables, et ralentissent la progression des personnes.

D'autres paramètres ont démontré une tendance à générer des effets de densité. B3, qui augmente le nombre de personnes à évacuer, tend à le faire dans des zones initialement densément peuplées. D1, contrôlant la construction des itinéraires, tend à rassembler les personnes sur les axes principaux de la commune test assez tôt dans l'opération d'évacuation. V2, qui génère une inondation, tend à ralentir les personnes, et donc à les agglutiner dans la zone menacée. La relation entre B2 et ces paramètres doit être étudiée.

2.7.3 Paramètre B3, les sur-évacuations

Le test du paramètre B3 a démontré un ralentissement variable de l'opération d'évacuation dans sa globalité selon la valeur utilisée. En revanche, de forts écarts locaux ont pu être mis en évidence. Par son fonctionnement, le paramètre B3 tend à augmenter la densité de population à évacuer dans des zones où les valeurs sont initialement élevées. Cela entraîne inévitablement un fort déséquilibre territorial dans la réaction du territoire à une valeur plus élevée de ce paramètre. Compte tenu des résultats obtenus lors du test de l'ensemble des paramètres, certains d'entre eux, couplés avec une valeur de B3 élevée, pourraient contribuer à l'atteinte de valeurs de densité de personnes élevées en certains points du territoire. Ces valeurs élevées pourraient contribuer aux ralentissements de l'ensemble de l'opération d'évacuation mais également générer localement des valeurs extrêmes. Ainsi, B3 peut être sensible à certains paramètres qui peuvent également générer des fortes densités. B2, qui contrôle le rythme d'évacuation des personnes, et D1 (titre), qui, dans sa valeur PG, tend à rassembler les personnes sur des grands axes.

2.7.4 Paramètre D1, le choix d'itinéraire

Le test du paramètre D1 a démontré que l'alternative PC (chemins les plus courts) permet, toute chose égale par ailleurs, une évacuation plus rapide et des temps de parcours plus faibles. Les plus mauvais résultats étant généralement obtenus lorsque la valeur de D1 est égale à PS (chemin les plus simples) et PG (itinéraires dégagés). Ces deux méthodes de construction d'itinéraires contribuent chacune à rallonger les temps de parcours. PS rallonge les temps de parcours par la forme géodésique des itinéraires qu'il calcule. Il s'agit, pour la majorité des personnes, d'un allongement faible, mais systématique. PG a en revanche démontré la génération d'itinéraires en moyenne plus courts que PG, mais, les personnes ont tendance à se rassembler sur des grands axes.

Il est alors possible de supposer que D1 soit sensible à la quantité initiale de population générée (paramètre B3) et au rythme des départs (paramètre B2). La valeur de D1 cible est PG. PS contribue à l'allongement des temps de parcours, mais n'a pas montré la génération de fortes densités d'évacués sur le réseau, au contraire de PG.

2.7.5 Paramètre D2, le choix de destination

Le test du paramètre D2 a mis en évidence deux effets antinomiques de ce paramètre sur l'opération d'évacuation. L'utilisation de destinations alternatives augmente la durée du processus d'évacuation dans sa globalité. Cependant, les personnes semblent mieux se répartir sur le réseau. Le premier constat est uniquement du fait de l'éloignement relatif des destinations alternatives en rapport à celle standard (PRE le plus proche). Il convient également de noter que la simulation décompte les arrivées à destination, la sortie de la zone menacée peut donc se faire avant l'arrivée à destination. Le second constat découle de la variété des destinations. La commune test compte onze PRE. Lorsque le paramètre D2 est implémenté sur sa valeur

standard, chaque PRE draine une population proche, qui tend donc à densifier les axes à proximité de ce dernier. Lorsque d'autres valeurs sont utilisées, les PRE ainsi que les autres types de destinations tendent à drainer les personnes sur l'ensemble du territoire. En conséquence, les effets de densification sont réduits.

2.7.6 Paramètre V2, praticabilité du réseau

Les résultats obtenus dans le cadre du test du paramètre V2 ont démontré un impact limité de l'augmentation de la hauteur d'eau en zone inondable sur la performance globale de l'évacuation. En revanche, ils sont spatialement hétérogènes. Des écarts de valeurs importants ont été constatés sur des parties de territoire se situant en zone inondée, notamment lorsque la hauteur d'eau atteint 90 centimètres. Cela signifie alors que la présence d'eau retarde de manière significative la progression des évacués vers leur destination. Lors du test de V2, la valeur de D1 utilisé était PC (valeur standard). Les itinéraires des évacués étant géodésiquement optimisés, il est possible de supposer que l'impact d'une inondation sur les temps de parcours soit encore plus important lorsque les itinéraires sont plus longs. Cela amène la question de l'utilisation d'itinéraires alternatifs, et non optimisés par les personnes lorsque le paramètre V2 est non-nul. Il est possible que les deux paramètres aient un effet combinatoire. Des itinéraires plus longs favoriseraient alors un maintien des populations au sein de la zone inondable, et augmenterait encore les temps de parcours.

III.3 Analyse croisée des paramètres

A ce stade, l'influence des paramètres sur le comportement du modèle de simulation a été étudiée en variant les paramètres un par un, toute chose égale par ailleurs. Seul le paramètre ciblé varie. C'est une méthode dont l'objectif est principalement d'analyser les réponses du modèle de simulation aux différentes variations de chaque paramètre. Les résultats obtenus ont permis de faire un premier pas vers la caractérisation du comportement du modèle de simulation.

III.3.1 Protocole mis en place

L'objectif est dans un premier temps de présenter la démarche d'analyse croisée mise en place. La méthode a été conçue afin d'extraire un maximum d'information sur le comportement du modèle de simulation en un minimum de temps. Elle n'est donc pas exhaustive. En revanche, elle s'appuie sur un ensemble de suppositions émises lors de l'analyse univariée, corroboré par la littérature scientifique. La première partie de cette section déploie les suppositions formulées et les constats issus de l'analyse univariée sur lesquels elles reposent.

Dans un deuxième temps, la méthode utilisée, et certaines adaptations apportées, sont explicitées, notamment la suppression d'un paramètre de la suite de la réflexion.

Dans un troisième temps, la question de la possibilité de synthétiser des indicateurs pouvant être spatialisés, et donc comporter un grand nombre de résultats différents

pour une seule configuration paramétrique est abordée. Les considérations territoriales démographiques et urbanistiques que cela implique y sont discutées. L'objectif est alors d'améliorer la compréhension du comportement du modèle de simulation proposé, afin de pouvoir l'opérationnaliser.

3.1.1 Justification du croisement des paramètres

Compte tenu des informations disponibles à ce stade du processus d'analyse, plusieurs hypothèses sont émises afin d'étudier le comportement global de notre modèle.

- *L'augmentation de la population à évacuer combinée avec une courbe de départs moins étalée dans le temps peut favoriser une augmentation non linéaire du temps d'évacuation global et des temps de parcours individuels.*

Le principe du croisement de ces paramètres est d'augmenter la population à évacuer, puis de comprimer les départs dans le temps. L'objectif est de comprendre dans quelle mesure ces deux paramètres peuvent avoir un effet combiné sur l'opération d'évacuation, et contribuer à une évolution significative (ou non) du score des différents indicateurs de sortie du modèle.

- *L'utilisation d'itinéraires les plus dégagés lors de l'évacuation, combiné avec les deux paramètres précédemment mentionnés, peut contribuer à augmenter significativement la durée de l'évacuation et les temps de parcours individuels.*

Cette hypothèse est formulée à partir des observations issues du test du paramètre D1. L'utilisation par les populations d'itinéraires dégagés a contribué à l'augmentation significative de la densité d'évacués sur les grands axes du réseau. Conjointement testé avec les paramètres B2 et B3, il pourrait être possible d'obtenir des flux de piétons d'une taille critique.

- *Les itinéraires dégagés sont censés être plus longs que les itinéraires les plus courts. Les écarts observés peuvent être considérés comme faibles. Cela peut être un effet de la proximité des PRE avec la ZPI. Sur une courte distance, les possibilités d'itinéraires sont réduites, mais en augmentant la distance à parcourir, des écarts plus significatifs devraient apparaître entre les deux méthodes de calcul d'itinéraire.*

Il s'agit ici de comprendre dans quelle mesure la taille réduite de la zone à traverser et la forme du réseau dans cette dernière contribue à réduire les écarts entre les différents types d'itinéraires. Ainsi, si les évacués ont pour destination des points plus éloignés dans l'espace, la différence entre la longueur des itinéraires pourrait être plus importante. Si ce n'est pas le cas, ce n'est donc pas la longueur intrinsèque des itinéraires qui explique les différences observées entre ces derniers.

3.1.2 Méthode

L'analyse croisée doit permettre d'apporter de l'information sur le comportement du modèle de simulation, afin de le clarifier au regard des hypothèses formulés précédemment. La comparaison de l'ensemble des valeurs de chacun des paramètres de la simulation n'est pas envisagée ici. D'une part parce qu'il s'agit d'une démarche chronophage, dont l'apport d'information ne vaut en aucun cas le temps nécessaire pour l'obtenir. D'autre part parce qu'il est évident que le croisement de paramètres n'ayant pas ou peu de relation entre eux ne peut contribuer à une meilleure caractérisation du comportement de la simulation. Il s'agit donc ici de sélectionner les combinaisons de paramètres permettant de tester les hypothèses formulées à l'issue de la première section de ce chapitre.

Sur les six paramètres dont l'implémentation dans la simulation a été possible, seulement cinq vont être croisés dans cette section. Le paramètre B va, pour le moment, être mis de côté. Pour rappel, le paramètre B1 est relatif à la prise en compte, par la simulation, d'une proportion variable de personnes qui choisissent de ne pas évacuer. Ce paramètre résulte d'une réflexion qui, à l'origine, souhaite intégrer les initiatives individuelles au sein du modèle de simulation. Les refus d'évacuer, bien qu'ils représentent probablement l'initiative individuelle contribuant le plus à la mise en danger des personnes, n'ont pas suffisamment d'effet sur les mobilités lors de l'évacuation pour en devenir pertinent d'utilisation dans une analyse croisée.

Le test des paramètres a permis de formuler un certain nombre d'hypothèses autour du fonctionnement du modèle. La grande majorité de ces hypothèses incluent un possible effet négatif de la densité de personnes sur le comportement des paramètres du modèle. Le reste des hypothèses incluent majoritairement des croisements de paramètres pouvant contribuer à un maintien plus long des personnes au sein de la zone menacée de submersion.

III.3.2 Courbe de départs et nombre d'évacués

La variation du paramètre B2 dans la simulation (courbe des départs) entraîne un délai dans l'arrivée des personnes. Ce délai, à la vue des résultats obtenus pour les différentes valeurs de B2, est largement du fait de la forme de la courbe des départs. Assez logiquement donc, la relation peut être résumée par l'affirmation triviale suivante : plus les personnes partent tôt, plus elles arrivent tôt. Cependant, à la vue des courbes présentées en (Figure 46), il est évident que la relation entre les courbes de départs et les courbes d'arrivées ne peut pas être considérée comme linéaire. En réalité, lorsque les départs sont moins étalés dans le temps, un autre facteur intervient avec pour conséquence une augmentation du temps de parcours lorsque les départs sont moins échelonnés. En dépit de l'arrivée plus rapide des personnes à leurs destinations, elles ont besoin de plus de temps afin de s'y rendre.

Il s'agit donc maintenant d'identifier le facteur qui provoque cette augmentation des temps de parcours. D'après les résultats obtenus lors des tests précédents, la densité d'évacués semble jouer un rôle prépondérant dans la durée du parcours des personnes entre leur point de départ et leur point d'arrivée. Pour vérifier qu'il s'agit bien du

facteur recherché, il est donc pertinent de tester les effets d'une plus grande quantité d'évacués sur deux configurations du paramètre B2.

Deux valeurs de B2 sont testées :

- Tw : il s'agit de la courbe issue de (Tweedie *et al.*, 1986). C'est la valeur de B2 minimisant le temps de parcours des personnes. En effet, dans ce cas de figure, les départs sont réguliers jusqu'à la première heure de l'évacuation, ce qui évite l'apparition de fortes densités locales d'évacués en tout point du réseau.
- 5 minutes : Il s'agit d'une valeur choisie par défaut, les tests effectués avec la valeur « null » n'ayant pas pu fonctionner, du fait d'un trop grand nombre d'agents à exécuter en parallèle. La valeur « null » est alors remplacée par une valeur nommée « 5 minutes » qui représente, comme son nom l'indique, un départ total de la population menacée en 5 minutes. Il est important de préciser qu'à ce stade, si la valeur « 5 minutes » permettent de tester l'hypothèse de l'impact de la densité de population sur les temps de parcours avec succès, les résultats obtenus pourraient être légèrement différents de ceux obtenus avec la valeur « null ».

Afin de rationaliser le recueil de données d'analyse, seules les valeurs extrêmes de chacun des deux paramètres vont être suivies (Tableau 23).

Tableau 23 - Valeurs négatives et positives pour B2 et B3

	Valeur négative	Valeur positive
B2	Null	Tw
B3	100	0

La valeur négative d'un paramètre est ici acceptée comme celle qui donne les résultats les plus élevés dans les différents indicateurs proposés, et plus particulièrement celui concernant les temps de parcours.

Les paramètres B2 et B3 sont croisés de la manière suivante (Tableau 24) :

Tableau 24 - Protocole de croisement de B2 et B3

Jeu de simulation	Valeur de B2	Valeur de B3
1	Tw	0
2	Tw	0
3	5min	100
4	5min	100

3.2.1 Courbes de cumul

Le (Figure 46) présente les courbes cumulatives des arrivées pour l'analyse croisée des paramètres B2 et B3. Les courbes cumulatives obtenues mettent en évidence la forte influence du paramètre B2 sur le cumul d'évacués. Le paramètre B3 ne semble exercer qu'une influence marginale en comparaison de B2.

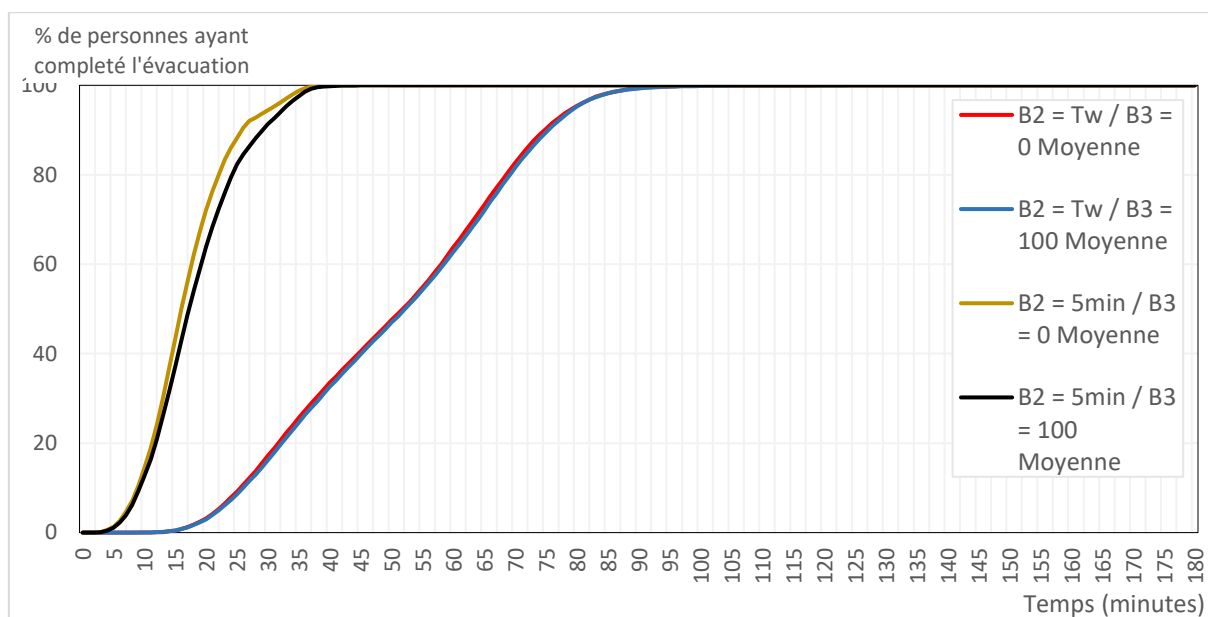


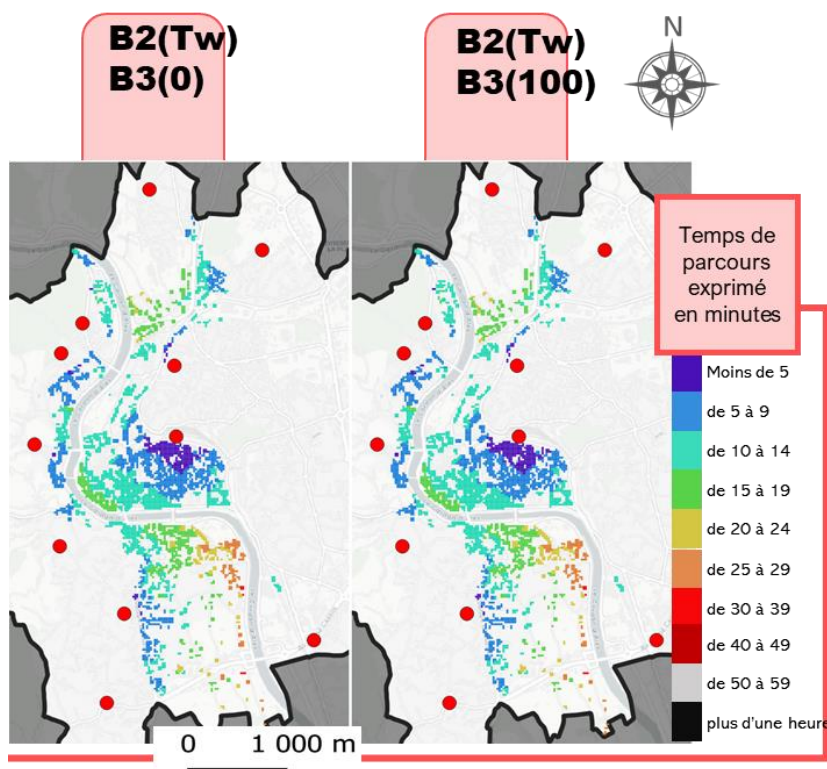
Figure 46 - Courbe des arrivées pour les croisements de B2 et B3

L'un des intérêts du croisement de B2 et B3 était de pouvoir observer un éventuel impact de la densité d'évacués qui expliquerait les résultats obtenus lors du test de B2. En dépit de l'influence majoritaire du paramètre B2 sur la forme des courbes, il est possible de noter un delta entre les courbes « B2(5) / B3(0) » et « B2(5) / B3(100) ». Ce delta ne s'observe pas lorsque B2 est égal à Tw. Cela signifie que lorsque les départs se déroulent sur une courte période, l'augmentation de la population à évacuer impacte le temps d'évacuation global. Cela est dû à l'importance des flux de piétons dans ces conditions, les départs s'effectuant sur un court laps de temps. Au contraire, lorsque B2(Tw), et que les départs sont étalés dans le temps, le nombre de personnes à évacuer n'influe pas sur le résultat global, sur notre commune test. L'étalement temporelle des départs permet de limiter les flux de piétons.

Cela signifie donc que des effets de densification de la population sur le réseau viennent retarder l'évacuation. Afin de pousser la compréhension de ce potentiel effet, il faut alors se tourner vers les temps de parcours individuels territorialisés. En effet, le paramètre B3 augmente pour rappeler le nombre de personnes à évacuer. Il ne s'agit pas d'une augmentation aléatoire mais localisée. En réalité, cette augmentation est localisée au niveau des zones densément peuplées, puisque c'est dans ces zones que se trouve une plus grande population habitant en hauteur.

3.2.2 Temps de parcours

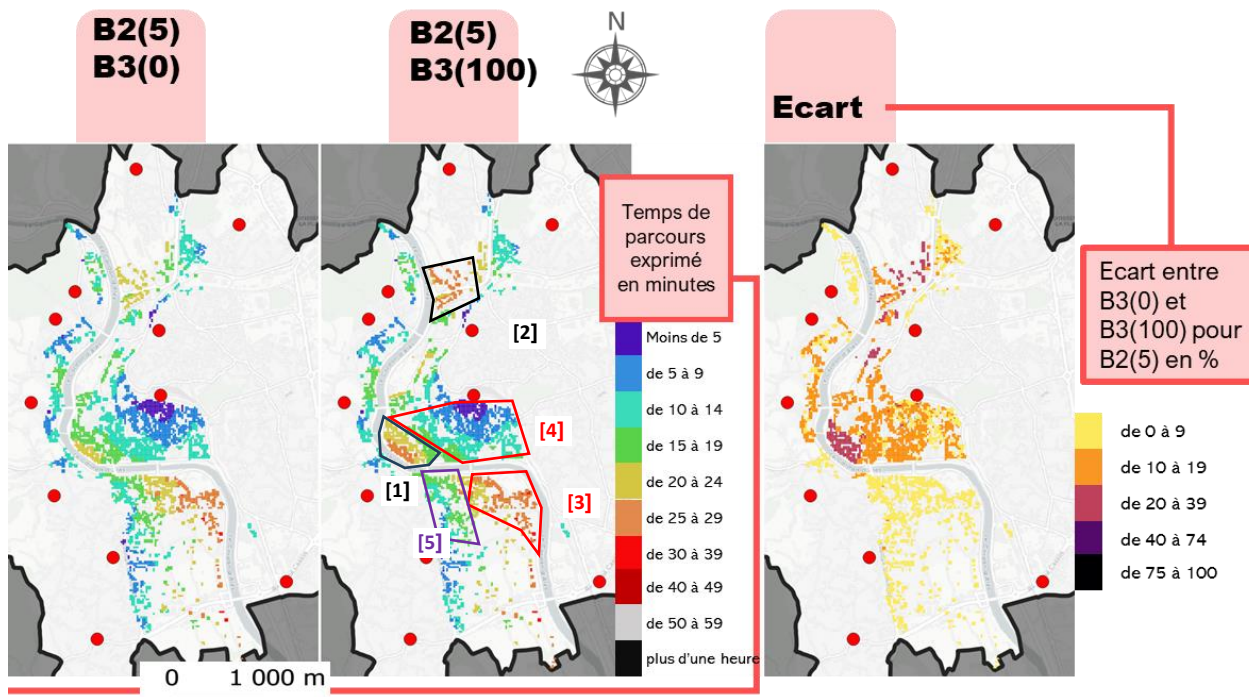
Les (Atlas 27) et (Atlas 28) permettent de constater la différence dans les effets locaux de l'augmentation de la population évacuée pour chacune des valeurs de B2. Lorsque la valeur de B2 est égale à « Tw », aucune différence n'est visible. Cela corrobore la similarité des courbes de la Figure 46, et confirme que lorsque le départ des personnes s'effectue sur une longue période, le nombre de personnes à évacuer n'a pas d'impact sur les temps de parcours.



Atlas 27 - Temps de parcours individuels moyennés comparés pour B2 = Tw

(Atlas 28) révèle des différences significatives et localisées dans les temps de parcours des personnes à évacuer en fonction de la variation de la population. Les différences semblent se situer au niveau de l'IRIS centre-ville (Atlas 28[1]), dans sa zone sud-ouest, et au niveau de l'IRIS des Cévennes (Atlas 28[2]). Ce sont deux zones de la commune test densément peuplées. D'autres IRIS, moins densément peuplés, ne semblent pas réagir lorsque le nombre de personnes à évacuer varie. Deux types d'espaces peuvent obéir à un tel comportement. En premier lieu, les espaces dont la population demeure insuffisante pour générer des effets de densité lors de l'évacuation des personnes. C'est le cas de l'IRIS Faubourg du Soleil-Brésis (Atlas 28[5]), qui est un quartier d'habitations pavillonnaires. En second lieu, il peut s'agir d'IRIS densément peuplés, mais dont l'essentiel de la population se trouve déjà contrainte d'évacuer lorsque le paramètre B3 est égal à 0. Ainsi, lorsque B3(100), l'ajout de population à évacuer est relativement faible voire inexistant, et les résultats obtenus sont similaires, peu importe la valeur de B3 sélectionnée. C'est le cas de la zone nord de l'IRIS Prairie-Promelles (Atlas 28[3]), et de la majeure partie de l'IRIS

Centre-ville (Atlas 28[4]). Il s'agit là principalement d'habitats collectifs, les immeubles dépassant rarement la hauteur de 5 mètres.



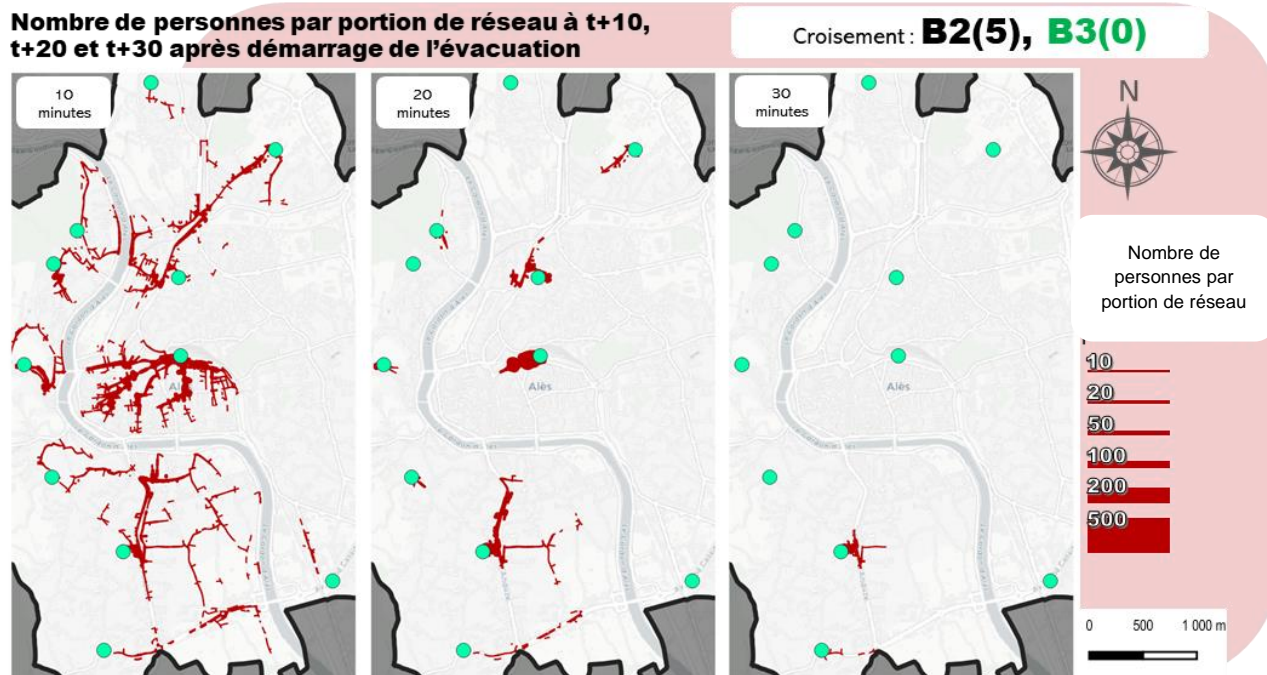
Atlas 28 - Temps de parcours individuels moyennés comparés pour B2 = 5min

Le paramètre B3 densifie la quantité de personnes à évacuer au sein de zones d'habitat collectif. Les résultats présentés précédemment démontrent un impact de cette densification localisées du nombre de personnes à évacuer. La section suivante doit alors vérifier la nature des flux pour B3(0) et B3(100).

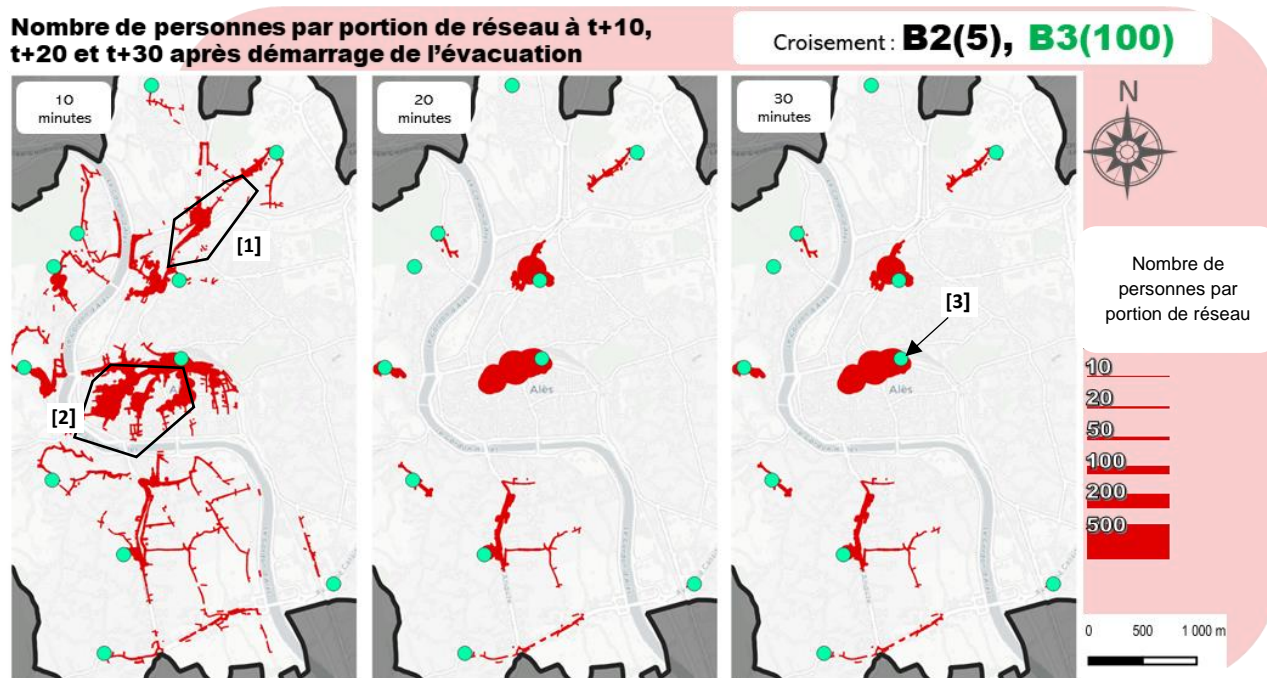
3.2.3 Fréquentation des axes

L'Atlas 29 compare la fréquentation des axes par tronçons de route lorsque l'évacuation a démarré depuis 20 minutes. Pour l'extremum négatif de B2, les deux valeurs de B3 sont testées. L'objectif est de pouvoir, à partir de cet atlas, identifier les portions du réseau sur lesquels le nombre de personnes augmente significativement lorsque B3 prend une valeur plus élevée.

Les zones d'habitats denses précédemment identifiées semblent également répondre plus sensiblement au changement de valeur du paramètre B3 comparativement au reste du territoire. Deux zones en particulier voient les flux de personnes qu'elles émettent augmenter pour atteindre des valeurs extrêmes, l'IRIS Centre-ville (Atlas 29[2]) et l'IRIS Tamaris (Atlas 29[1]). L'IRIS Tamaris est une zone de passage pour une partie des évacués provenant des deux IRIS à proximité (Cévennes et Près Saint-Jean), ce sont deux IRIS dont l'habitat comprend un parc HLM important.



Atlas 29 - Comparaison de la fréquentation des axes B2(5) ; B3(0)



Atlas 30 - Comparaison de la fréquentation des axes B2(5) ; B2(30)

Concernant le centre-ville, il a été noté plus tôt dans ce chapitre la présence d'une zone d'habitats collectifs au sud-ouest de ce dernier. Ainsi, la surcharge de population observée entre les deux valeurs de B2 semble se localiser sur des tronçons de réseau pouvant être utilisés par la population dudit quartier, afin de rejoindre le PRE dont elles sont le plus proches, la gare ferroviaire (Atlas 30[3]).

3.2.4 Analyse des résultats

Les résultats présentés dans cette section démontrent donc un impact combiné de B2 et B3. Lorsque B2 prend sa valeur positive, donc que les départs sont moins rapides, l'écart entre les deux valeurs de B3 est nul. Cela signifie qu'une augmentation de la population n'a alors aucune incidence sur l'évacuation. Le fait que les personnes démarrent l'évacuation de manière plus progressive contribue à diminuer les effets de densité générés par l'augmentation de la population à évacuer. En revanche, quand B2 prend sa valeur négative, un écart se creuse entre les deux valeurs de B3. Donc, lorsque les personnes démarrent l'évacuation plus rapidement, l'augmentation de la population à évacuer a une plus grande incidence sur les résultats obtenus.

L'impact combiné de B2 et B3 est faible à l'échelle globale, en revanche, il peut être significatif voire très important à l'échelle locale. Les zones les plus sensibles sont les mêmes qui voient leur population d'évacués augmenter lorsque B3 prend une valeur supérieure. Ce sont des zones d'habitat collectif. Il y a donc une interaction entre les paramètres B2 et B3.

III.3.3 Itinéraire et densité de population

Le test du paramètre D1 a permis de mettre en évidence un allongement significatif du temps nécessaire afin d'atteindre un PRE pour une partie importante de la population. Pour rappel, le paramètre D1 contrôle les itinéraires utilisés par les personnes afin de se rendre vers leurs destinations. Trois logiques ont été proposées. Les chemins les plus courts, en termes de distance. Les chemins les plus simples, c'est-à-dire ceux qui limitent le nombre d'arcs du graphe à emprunter. Enfin, la dernière possibilité était l'utilisation d'itinéraires dégagés, il s'agit-là d'une prise en compte de l'importance et de la largeur des axes dans le calcul d'itinéraire des personnes. Cette valeur de paramètre doit donc rendre compte d'un comportement collectif qui tend à rassembler les personnes vers des axes structurants du territoire.

Les résultats obtenus lors du test des différentes valeurs de D1 ont permis de mettre en évidence une valeur tendant à diminuer le temps de parcours des personnes (chemins les plus courts), ainsi qu'une valeur qui tend à l'augmenter (chemins les plus dégagés). L'écart pouvant se creuser significativement localement. Deux hypothèses peuvent expliquer cet écart positif entre $D1 = PC$ et $D1 = PG$. La première hypothèse implique la construction même de l'itinéraire. La méthode de construction d'itinéraires lorsque D1 est égal à PG pourrait contribuer à rallonger la distance à parcourir. Deux éléments affaiblissent la pertinence de cette hypothèse. Le territoire d'étude peut être considéré comme relativement restreint. Les PRE sont situés à une distance suffisamment raisonnable de la zone menacée pour que la distance à parcourir par les personnes soit réduite. Dans ce contexte, à moins de différences fondamentales entre les deux types d'itinéraire, il est peu vraisemblable que la forme de ceux-ci soit l'unique cause des écarts.

La deuxième hypothèse considérée à la vue des résultats obtenus concerne une possible augmentation de la densité de population sur des axes spécifiques, lorsque $D1(PG)$. Le fonctionnement de l'algorithme lorsque $D1(PG)$ tend à rassembler les personnes sur des axes principaux, et notamment en fin de parcours. Cette

augmentation de la densité pourrait contribuer à augmenter le temps de parcours des personnes, qui se trouveraient alors ralenties sur une partie de leur transect.

Afin d'apporter de l'information sur la variance des résultats obtenus en fonction de D1 et de comprendre dans quelle mesure les deux hypothèses évoquées sont vraies, D1 est étudié au regard de B2 et B3. L'objectif est maintenant de comparer la variance des résultats issue de D1(PC, PG) pour différentes valeurs de B2 et B3 (Tableau 25).

Tableau 25 - Valeurs négatives et positives pour D1, B2 et B3)

	Valeur négative	Valeur positive
B2	5 minutes (l'ensemble de la population a démarré l'évacuation au bout de 5 minutes).	Tw : correspond à la courbe issue de (Tweedie 1986).
B3	0 : seules les personnes situées sous le seuil de 5 mètres sont évacuées	100 : L'ensemble de la population de la zone menacée évacue.
D1	PC (Chemins les plus courts)	PG (Chemin les plus dégagés)

Comme précédemment, l'objectif ici est de croiser les paramètres de manière à mettre en évidence un éventuel impact de la densité d'évacués sur la performance de l'évacuation au regard de la variation du paramètre D1.

Pour ce faire, les paramètres sont croisés comme suit (Tableau 26) :

Tableau 26 - Protocole de croisement des paramètres D1, B2 et B3

	Valeur de B2	Valeur de B3	Valeur de D1
1	Tw	0	PC
2	Tw	0	PG
3	5min	0	PC
4	5min	0	PG
5	5min	100	PC
6	5min	100	PG

Il s'agit, en résumé, de proposer pour chacune des deux valeurs de D1 retenues, trois configurations possibles. Une première, avec la valeur de population initiale, et une

courbe de départs étalés dans le temps. Une seconde, avec la valeur de population initiale, mais une courbe des départs qui est compactée dans le temps. Enfin, une troisième, avec une valeur de population maximale et une courbe des départs compacte dans le temps.

3.3.1 Courbes de cumul

L'objectif est ici d'augmenter graduellement la densité d'évacués sur le réseau à l'aide des paramètres B2 et B3, afin de vérifier dans quelle mesure les hypothèses faites à propos du paramètre D1 sont crédibles.

Si l'hypothèse de l'écart de distance à parcourir est vraie, la différence obtenue entre D1 = PC et D1 = PG devrait demeurer similaire, et ce en dépit des valeurs que prennent B2 et B3. Cela signifierait alors que les effets de densité supposément générés par la valeur de D1 = PG ne sont pas significatifs, et que l'écart entre PC et PG est explicable seulement par la forme des itinéraires. Si l'hypothèse de l'impact de la densité d'évacués est vraie, l'écart entre D1 = PG et D1 = PC devrait augmenter à mesure que les paramètres B2 et B3 favorisent de fortes densités de personnes sur le réseau.

La Figure 47 démontre une influence de la densité d'évacués sur les différences observées entre D1 = PC et D1 = PG. En effet, lorsque les paramètres B2 et B3 prennent une valeur positive, il est possible d'observer une différence marginale (les deux courbes en vert). Ce delta entre les deux courbes peut être la part de la différence (PG, PC) explicable par la forme des itinéraires. Lorsque la valeur de B2 prend sa valeur négative, un delta plus important entre PC et PG est observable. Enfin, lorsque B2 et B3 prennent leurs valeurs négatives (courbes bleues), le delta est plus important encore.

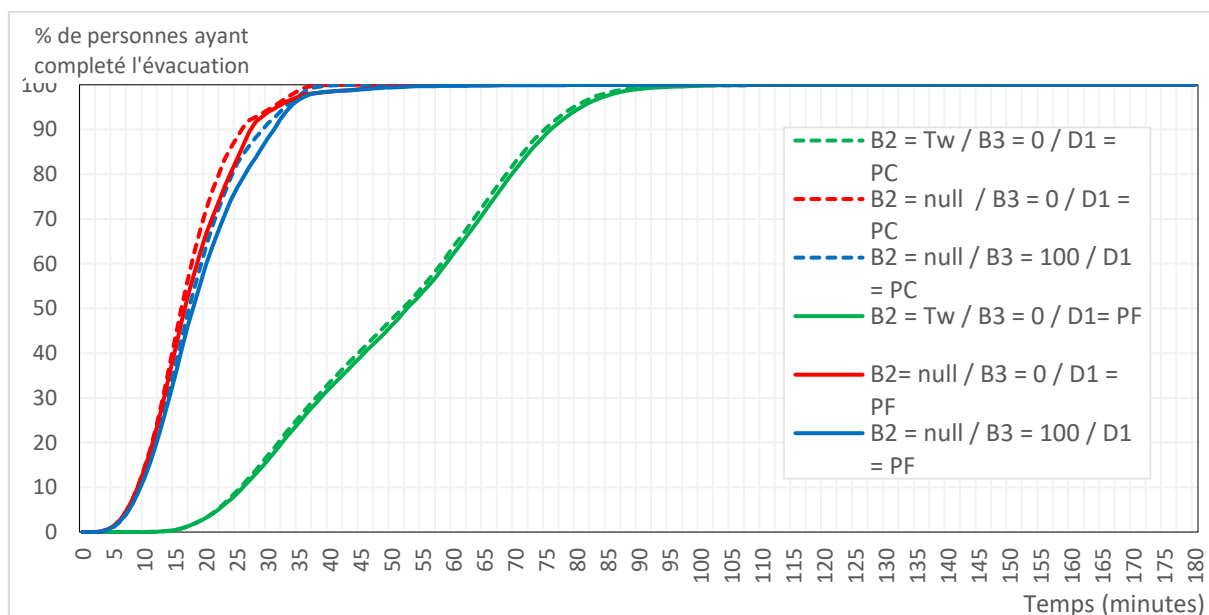


Figure 47 - Courbe cumulatives des arrivées pour le croisement de D1, B2 et B3

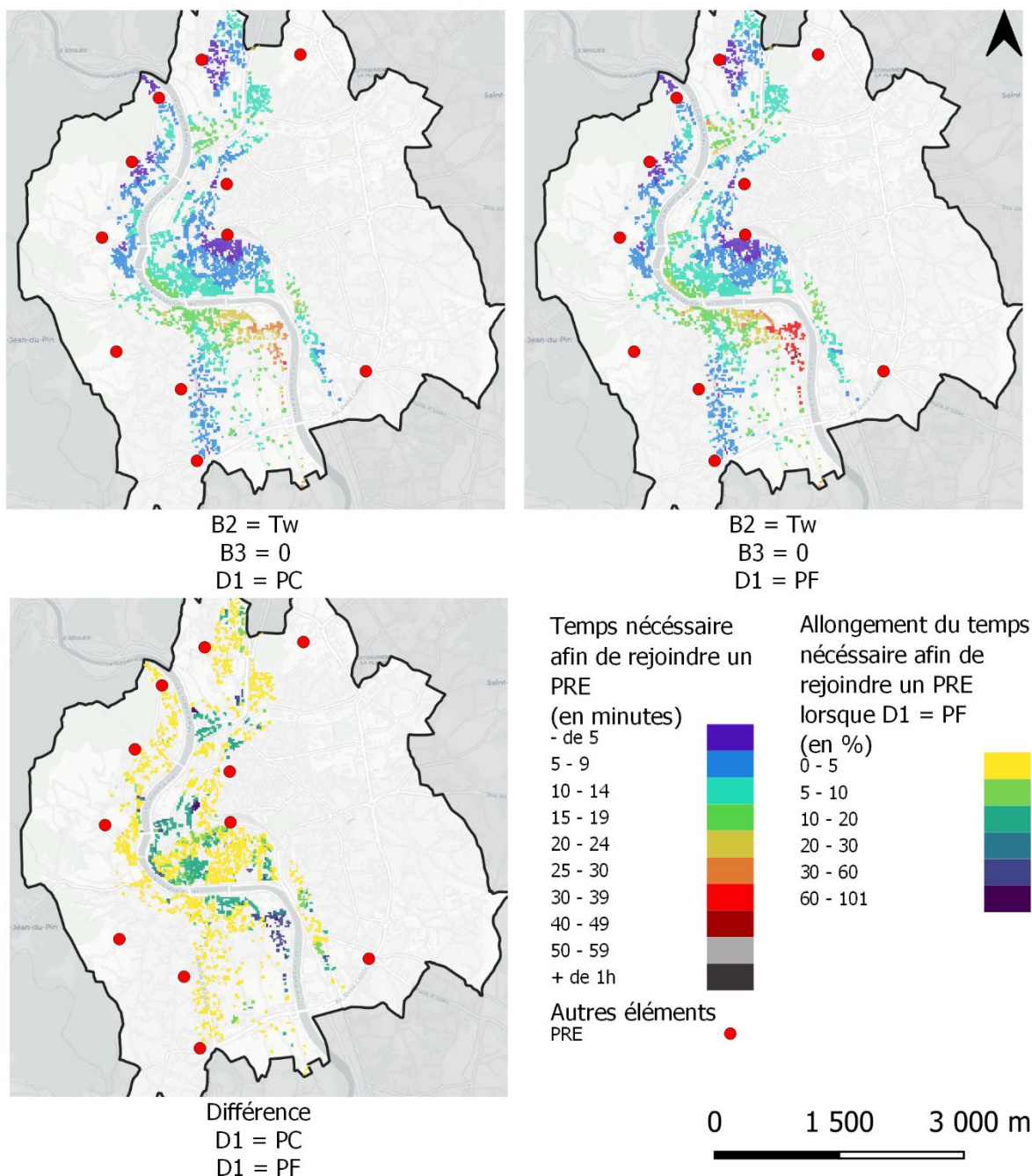
Le delta au niveau des deux courbes rouges ($B2 = 5\text{min}$ et $B3 = 0$) est moins important que le delta des deux courbes bleues ($B2 = 5\text{min}$ et $B3 = 100$), mais la différence est légère. La significativité de la différence entre les deltas de ces quatre courbes peut être questionnée. Des différences locales plus marquées peuvent cependant être observées, puisque le paramètre $B3$ ajoute une population localisée.

La (Figure 47) communique une autre information importante sur le comportement de la simulation, dont les tests effectués précédemment en avaient laissé deviner les contours. Dans le cas des courbes rouges et bleues, le delta semble augmenter en fonction du temps. Cela peut confirmer que la valeur PG de $D1$ tend à rassembler prématurément les évacués sur les mêmes axes, en comparaison de PC. Cela contribue à augmenter la taille des flux piétons, et donc à ralentir les personnes.

3.3.2 Temps de parcours

La (Atlas 31) montre un impact global des paramètres $B2$ et $B3$ sur le comportement du modèle de simulation au regard du paramètre $D1$. Cependant, il ne permet pas de mettre en évidence d'éventuels effets locaux. Théoriquement, les paramètres $B2$ et $B3$ devraient, chacun d'eux réagir plus sensiblement dans les zones les plus densément peuplées. $B2$ contrôlant le rythme auquel les évacués se mettent en route, il est possible d'imaginer que lorsque ce rythme est plus élevé, les espaces les plus densément peuplés génèrent plus de départ que les espaces moins densément peuplés. Le rapprochement des départs devrait alors ralentir plus sensiblement les personnes dont le point de départ se situe dans une zone densément peuplée. Le paramètre $B3$ contribuant à ajouter des personnes en priorité dans les espaces densément peuplés, il devrait être possible d'observer des écarts significatifs sur le territoire.

(Atlas 32) présente l'écart entre PC et PG (valeurs de $D1$) lorsque $B2$ et $B3$ prennent des valeurs positives. Compte tenu des valeurs de $B2$ et $B3$ utilisées dans ce cas de figure, les écarts peuvent être considérés du fait de la distance géodésique des itinéraires.

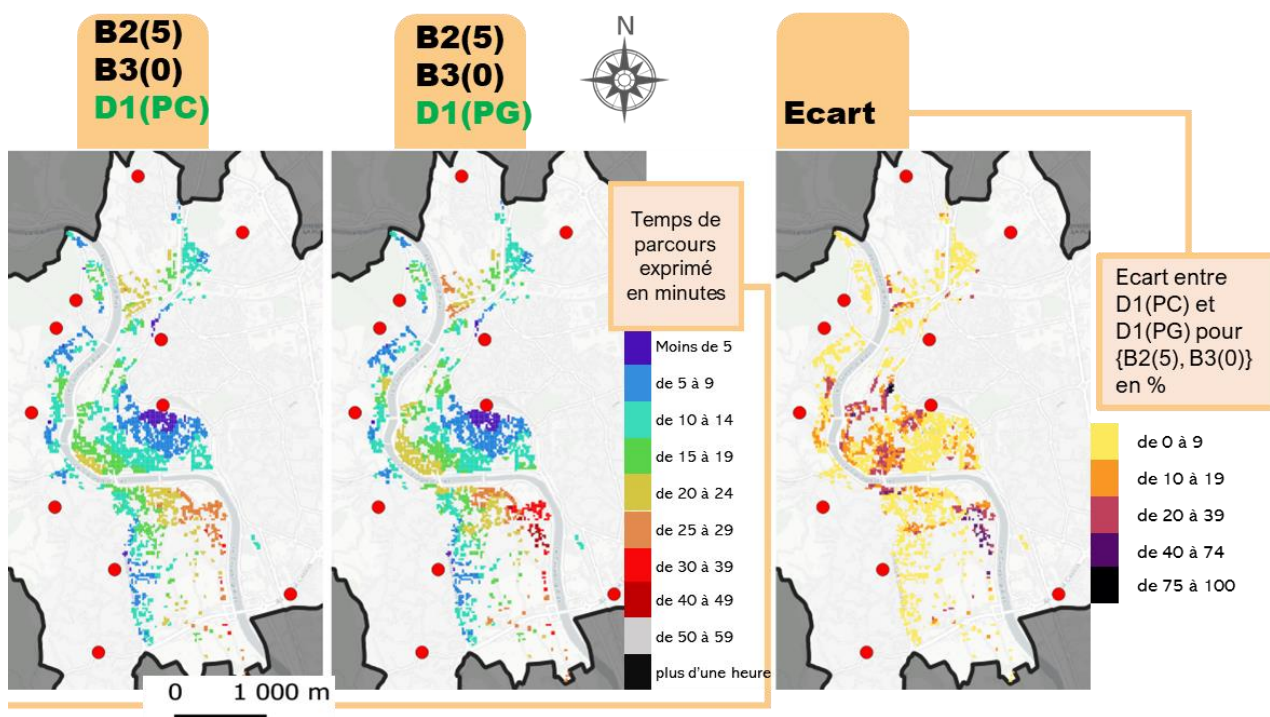


Atlas 31 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2(Tw) et B3(0)

Les écarts observés entre PC et PG sont faibles sur une large partie du territoire (inférieurs à 5%). Ils peuvent atteindre des valeurs supérieures à 60% localement, notamment dans la partie nord de l'IRIS Prairies-Promelles, ou au niveau de l'IRIS des Cévennes. Compte tenu des valeurs de B2 et B3, il est exclu que les temps de parcours plus longs soit du fait de l'augmentation de la densité des flux piétons. Cela indique donc une faible performance des itinéraires PG, ils sont simplement plus longs que les itinéraires générés pour PC.

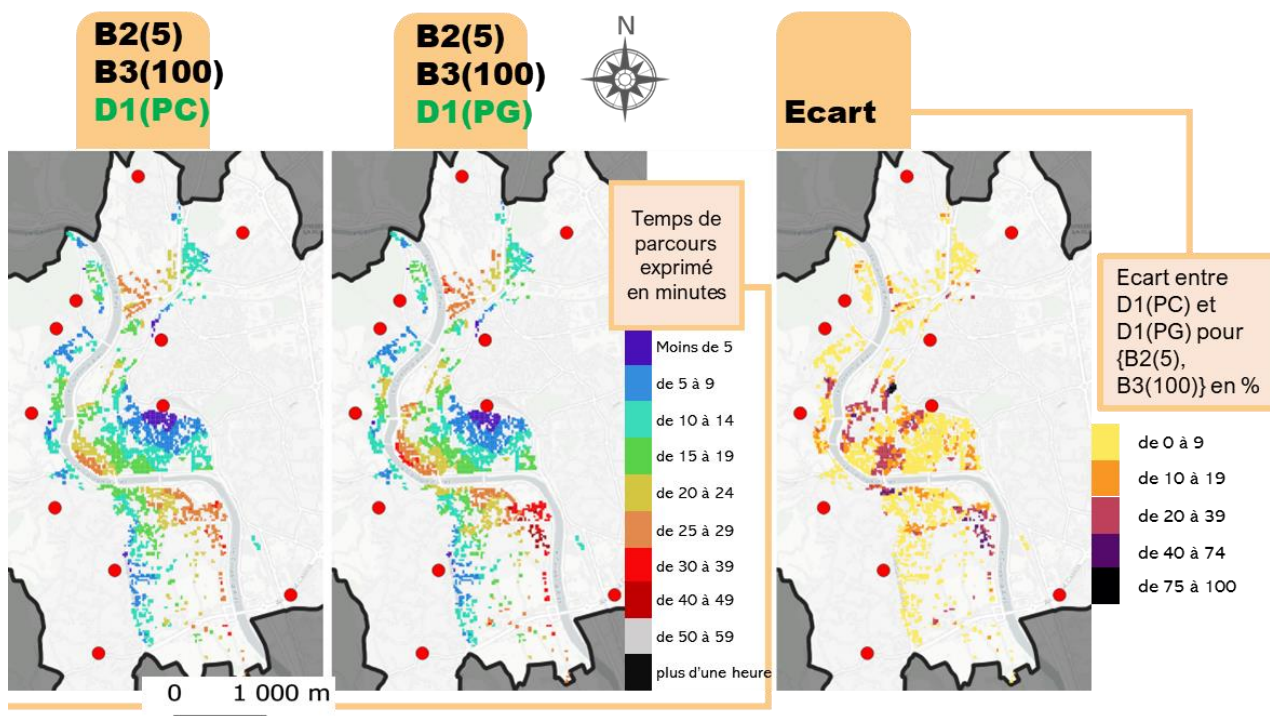
L'Atlas 32 présente la même comparaison que Atlas 31, mais lorsque la valeur de B2 est négative. Dans ce cas de figure, la totalité des personnes se met en route avant cinq minutes.

L'Atlas 32 présente les résultats du même calcul que pour l'Atlas 31. Les résultats obtenus démontrent une différence PC/PG relativement similaire sur une large partie du territoire, malgré l'utilisation de la valeur négative de B2. Cela n'est pas antagoniste avec les hypothèses formulées précédemment. Ce sont plutôt des différences locales qui sont, à ce stade, attendues notamment dans des zones densément peuplées. Il est possible d'observer un creusement de l'écart dans une zone relativement étendue, toujours localisée sur la partie sud-ouest de l'IRIS Centre-ville, ainsi qu'un creusement significatif de l'écart sur la partie nord du territoire, au niveau de l'IRIS Tamaris.



Atlas 32 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2(5min) et B3(0)

L'Atlas 33, comme les atlas précédents, compare les temps de parcours pour chaque valeur de D1 utilisées. L'enjeu est d'observer les écarts entre PC et PG et de les comparer avec ceux des deux atlas précédents. Ici, les écarts ne sont pas significativement supérieurs à ceux des atlas précédents.



Atlas 33 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour B2(Tw) et B3(100)

La similarité des écarts entre les deux valeurs de D1 pour les deux configurations en Atlas 32 et Atlas 33 est principalement due à l'augmentation des temps de parcours intrinsèquement induite par la modification de la valeur de B3. Autrement dit, l'écart entre [B2(5) ; B3(0) ; D1(PC)] et [B2(5) ; B3(0) ; D1(PG)].

3.3.3 Analyse des résultats

Il est difficile d'expliquer la faible augmentation des écarts PC/PG entre les différentes combinaisons paramétriques testées. La seule interprétation ne venant pas s'opposer aux constatations précédemment formulées concerne un problème de relativité des résultats. Pour chaque combinaison de paramètres B2 et B3, D1(PG) et D1(PC) ont été comparés. Le résultat est donc exprimé sous la forme d'un pourcentage. Il est donc possible que l'augmentation des valeurs de B2 et B3, ayant augmenté significativement les temps de parcours, réduise la part relative de D1(PG) par rapport à D1(PC). Par exemple, une augmentation relative de 50% du temps de parcours provoquée par PG, lorsque B2(Tw) et B3(0) correspondrait à une valeur absolue plus faible qu'une augmentation de 50% en configuration B2(5min) et B3(100).

Alors, il est possible de supposer que l'hypothèse d'un effet combinatoire entre D1 et (B2, B3) est vraie. Les écarts relatifs restant proches, D1(PG) est de nature à augmenter les effets de B2 et B3 de telle sorte que l'écart relatif qu'il génère par rapport à D1(PC) reste le même, dans des conditions de densité de population bien supérieures.

III.3.4 Distance à parcourir et type d'itinéraire

La section précédente a permis d'apporter de l'information sur l'impact du nombre d'évacués et du rythme avec lequel ils évacuent sur la différence observée entre D1(PC) et D1(PG). Les chemins les plus dégagés (PG) ont tendance à provoquer un rassemblement des personnes sur les grands axes, et ce, bien avant de s'approcher d'un PRE (les évacués pouvant même parfois effectuer un détour afin d'utiliser un axe jugé plus important). Au regard des résultats présentés précédemment, une partie de l'effet délétère du choix de PG en lieu et place de PC, et notamment sur les temps de parcours, a pu être imputé à des effets de densité dus à la nature de l'algorithme utilisé. Afin de vérifier l'incidence réelle du type d'itinéraire (D1) sur les différents indicateurs, il est possible de tester ce paramètre en modifiant D2. D2 fait référence à la destination choisie par les personnes lorsqu'elles évacuent. Ainsi, lorsque D2 prend la valeur O, les personnes vont se diriger vers le PRE le plus proche de leur position. Lorsque D2 prend la valeur A, les personnes vont se diriger vers un PRE aléatoirement choisi parmi se situant à moins de deux kilomètres de leur position.

Le croisement de D1 et D2 doit alors permettre une meilleure caractérisation de l'effet d'allongement des itinéraires provoqué par D1(PG). Une destination plus lointaine peut alors provoquer une augmentation de l'allongement du temps nécessaire afin d'évacuer lorsque D1(PG).

Il convient de rappeler, avant d'analyser les résultats issus du croisement des paramètres D1 et D2, que le paramètre D2, au contraire de D1, fait l'objet d'une répartition parmi la population. Lorsque D2 prend la valeur A, c'est en réalité 50% de la population qui va choisir son PRE de destination aléatoirement, les 50% restant se dirigeant toujours vers le PRE le plus proche.

Les valeurs négatives et positives sélectionnées pour D1 et D2 sont présentées en (Tableau 27). Le choix de la valeur négative pour D1 aurait également pu s'orienter vers PS (chemin les plus simples). Cependant, nous avons formulé précédemment l'hypothèse d'un impact de la densité de population sur l'allongement des temps de parcours. Ce faisant, la sélection de PG obéit ici à la volonté de déterminer la part de la longueur de ces itinéraires sur les temps d'évacuation, face à l'augmentation de densité qu'ils provoquent. Caractériser la part de chacune de ces deux causes sur les résultats de D1(PG) est donc ensuite possible.

Tableau 27 - Valeurs négatives et positives de D1 et D2

Paramètres	Valeurs négatives	Valeurs positives
D1	PG	PC
D2	A	O

Les paramètres vont être croisés comme indiqué en (Tableau 28). L'objectif est de mesurer les écarts entre D1(PC) et D1(PG) pour chacune des deux valeurs de D2, puis de comparer les deux écarts.

Tableau 28 - Croisements de D1 et D2

Run	Valeur de D1	Valeur de D2
1	PC	O
2	PG	O
3	PC	A
4	PG	A

Si les deux écarts sont proches, cela pourrait signifier que PG ne rallonge pas significativement la distance à parcourir, et qu'ainsi, les ralentissements qu'il provoque sont explicables par des effets de densité. Au contraire, si les deux écarts sont élevés, l'allongement de distance à parcourir serait le principal facteur explicatif des temps plus longs donnés par D1(PG).

3.4.1 Courbes de cumul

Si l'hypothèse à l'origine de ce croisement est vraie, D2 devrait contribuer à l'augmentation du delta entre D1(PC) et D1(PG) lorsqu'il prend sa valeur négative. La (Figure 48) présente les courbes issues des croisements effectués dans le cadre de cette hypothèse.

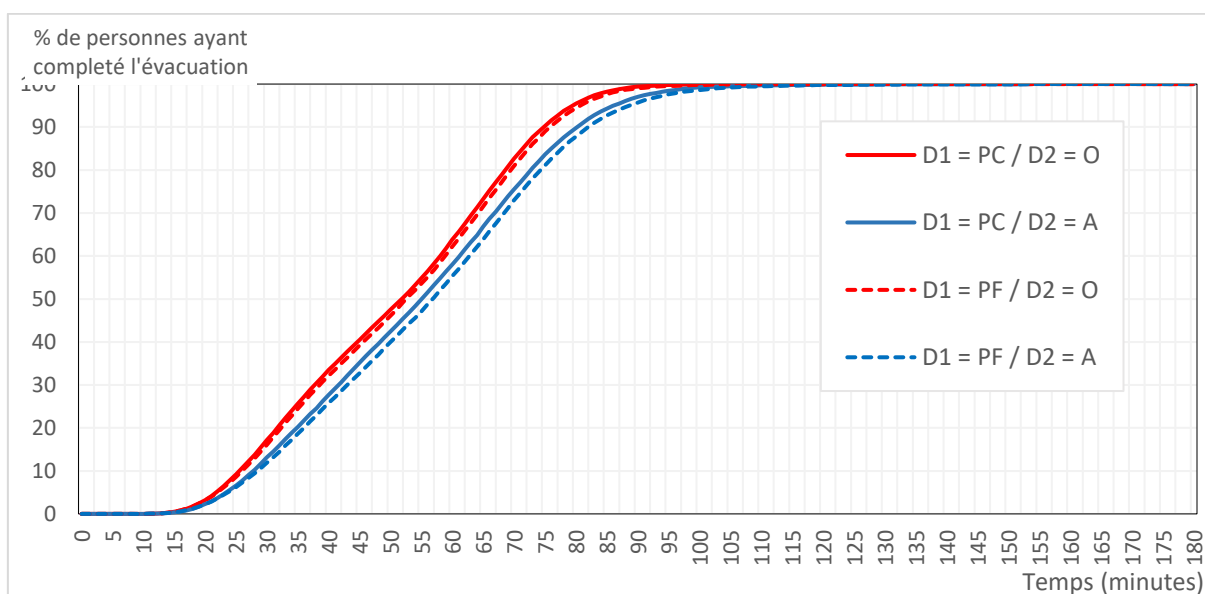
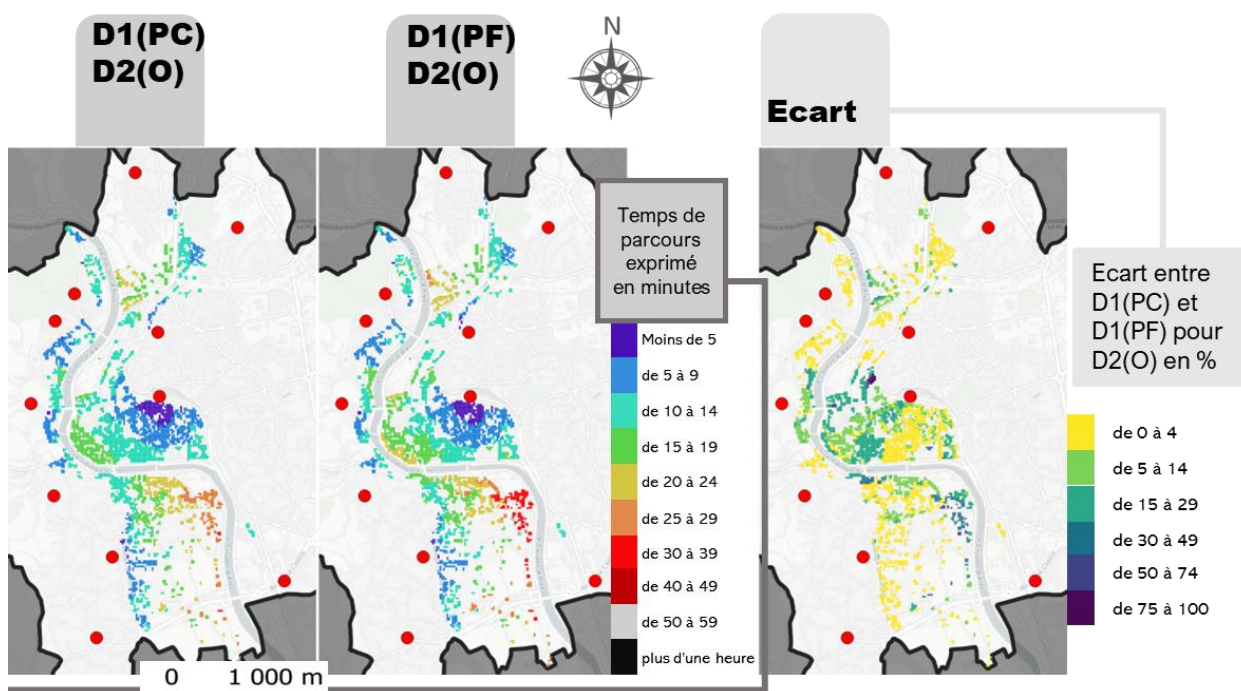


Figure 48 - Courbes cumulatives des arrivées pour D1 et D2 combinés

La (Figure 48) met en évidence un allongement relativement faible de la durée de l'évacuation entre les deux types d'itinéraires (paramètre D1) lorsque D2 varie. Cependant, du fait du principe de répartition inhérent à D2, la différence observable entre les deux deltas n'est pas vide de sens.

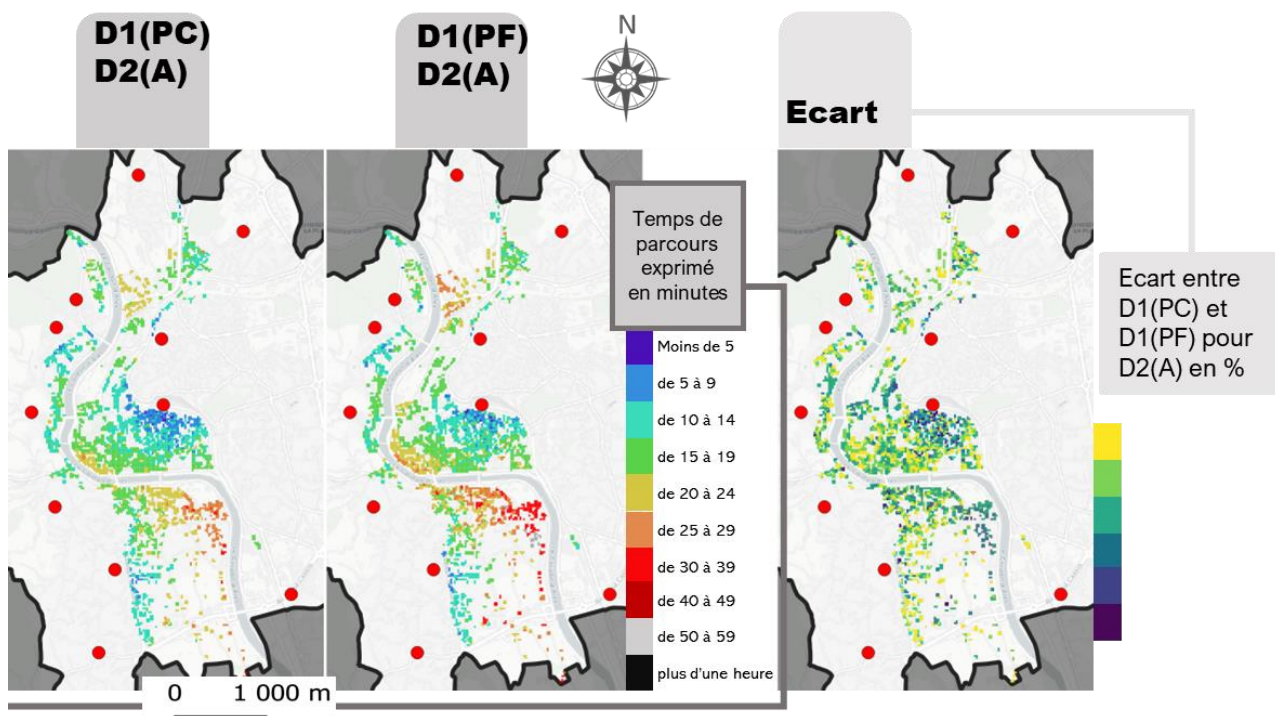
3.4.2 Temps de parcours

L'Atlas 34 compare les temps de parcours obtenus pour chacune des valeurs de D1 à la lumière de D2(O), l'Atlas 35 propose la même comparaison pour D2(A). L'objectif est de déterminer dans quelle mesure le changement de méthodologie d'itinéraire entraîne des temps de parcours plus longs lorsque les destinations sont plus éloignées.



Atlas 34 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour D2(O)

Les écarts visibles sur l'Atlas 34 sont la cause, d'une part, de faibles valeurs initiales (cela est notamment vrai dans les zones proches d'un PRE), d'autre part d'un réel allongement de la longueur des itinéraires. Cependant, lorsque D2(A), la différence entre D1(PC) et D1(PG) semble se réduire à mesure que l'on s'éloigne des PRE. Cela signifie donc que plus une personne est éloignée d'un PRE, plus la différence relative entre D1(PC) et D1(PG) diminue. Il est possible qu'en réalité l'allongement des itinéraires soit du même ordre de grandeur sur l'ensemble du territoire. Cela expliquerait que l'écart entre D1(PC) et D1(PG) faiblissent à mesure que l'on s'éloigne du PRE.



Atlas 35 - Comparaison des temps de parcours de D1 pour D2(A)

3.4.3 Analyse des résultats

Le croisement de D1 et D2 dans cette sous-section a permis de mettre en évidence la cause majoritaire qui explique l'écart entre D1(PC) et D1(PG). Les itinéraires PG générés sont plus longs que ceux générés par PC. Le test effectué a également permis de relativiser les effets de densité sur le ralentissement général de l'évacuation entraîné par D1(PG).

III.4 Conclusion intermédiaire

L'analyse univariée réalisée a permis de caractériser le comportement autour de deux grands axes de variation. La densité d'évacués est la variable qui exerce la plus forte influence sur les sorties du modèle de simulation. Cet aspect a été caractérisé à travers le test du paramètre B2. Le delta entre la courbe des départs et la courbe des arrivées est plus important que dans les autres cas et les temps de parcours sont plus longs, notamment dans les zones densément peuplées. Le paramètre B3 a permis de corroborer ce constat. Il est ici question de densité localisée et élevée, ce qui correspond à la littérature sur la question. Les principaux auteurs ayant travaillé sur la question évoquent une baisse de vitesse de marche lorsque les personnes ont moins de 2m² disponible autour d'elles, la baisse devenant réellement significative en dessous de 1m² (Fruin, 1971; Guy *et al.*, 2010).

L'autre facteur d'importance se situe dans la praticabilité du réseau. L'impact du paramètre V2 bien que localisé, s'est révélé important et il est possible d'imaginer

qu'un ensemble d'autres phénomènes, pourraient venir ralentir la progression des personnes sur le réseau de manière similaire.

Dans le cadre de l'analyse des paramètres de la simulation, des hypothèses ont ensuite été formulées, à partir de l'analyse univariée, sur le comportement de la simulation, et plus spécialement des effets synergiques entre paramètres.

- *L'augmentation de la population à évacuer combinée avec une courbe de départs moins étalée dans le temps est de nature à favoriser une augmentation non linéaire du temps d'évacuation global et des temps de parcours individuels.*

Cette hypothèse peut être considérée comme vraie. Une augmentation de la population à évacuer en combinaison d'une réduction des temps de préparation, génère des densités d'évacués supérieures sur le réseau. Il est regrettable de ne pas pu avoir tester la vraie valeur négative de B2 (départ simultané) dans le cadre du croisement de ces paramètres. L'effet de la densité sur les temps d'évacuation est logarithmique, il diminue rapidement si la densité n'est plus critique. La courbe stipulant un départ total des personnes situées dans la zone à T+5 minutes peut sembler proche d'une implémentation de départs simultanés, mais les effets de densité sont déjà largement diminués.

- *L'utilisation des itinéraires les plus dégagés lors de l'évacuation, combinée avec les deux paramètres précédemment mentionnés (B2 et B3), peut contribuer à augmenter significativement la durée de l'évacuation et les temps de parcours individuels.*

Cette hypothèse peut être considéré comme partiellement fausse. L'intuition formulée à partir des résultats du test de D1 indiquait que lorsque les personnes empruntent des itinéraires dégagés, elles se rassemblent sur des grands axes plutôt que de se disséminer sur l'ensemble du réseau. C'est un effet qui semble observable, cependant, il n'est pas suffisamment important pour générer des densités critiques ayant un impact direct sur les indicateurs. Il est indéniable que le territoire de test contribue à ce constat. En effet la forme du réseau topologique sur laquelle sont construits les itinéraires impacte directement les différences observables entre les différentes méthodes de construction de ces derniers. Dans le cas présent, c'est surtout la relative courte distance à parcourir (les PRE étant situés en contiguïté de la ZPI), qui contribue à la faiblesse des écarts.

- *Les itinéraires dégagés sont certes plus longs que les itinéraires les plus courts. Cependant, les différences observées ont été largement réduites par la faible distance à parcourir, du fait de la contiguïté des PRE avec la ZPI. Sur une courte distance, les possibilités d'itinéraires sont réduites, mais en augmentant la distance à parcourir, des écarts plus significatifs devraient apparaître entre les deux méthodes de calcul d'itinéraire.*

Cette hypothèse est vraie. Non seulement les itinéraires les plus dégagés sont plus longs, mais en plus de cela, ils le sont de manière homogène sur le territoire. Ces itinéraires peuvent générer près de 5 minutes d'écart sur un temps de parcours de 25 minutes. Ainsi, le choix par les personnes d'itinéraires soutenables en termes de distance est un enjeu important de l'évacuation. Les différents tests réalisés sur les itinéraires dégagés ont démontré que bien que plus longs, ils ne sont pas aberrants.

Les expériences menées sur les paramètres ont révélé deux catégories d'influences de ces derniers sur le processus d'évacuation. Certains paramètres, lorsqu'ils s'orientent vers des valeurs considérées comme négatives, ont tendance à significativement prolonger la durée totale de l'évacuation. Par exemple, le paramètre V2 ralentit simplement le déplacement des individus, tout comme le paramètre B2, qui crée un retard dans les départs, induisant ainsi un retard logique dans la réalisation de l'évacuation.

Cependant, malgré leur impact sur le processus, ces paramètres n'affectent pas fondamentalement la mobilité du système dans son ensemble. Ils ralentissent certes le déplacement des personnes, mais cela reste à l'échelle individuelle, sans mettre en évidence la formation de congestion ou d'encombres.

En revanche, d'autres paramètres ont montré leur capacité à influencer l'ensemble du système de mobilité. Par exemple, le paramètre D1, lorsqu'il est égal à PG, regroupe les individus sur un nombre limité d'axes, ce qui entraîne des retards dans les temps de trajet. De même, le paramètre B2, lorsqu'il tend vers des valeurs positives (ce qui signifie des temps de préparation plus courts pour les personnes), favorise l'augmentation du nombre de piétons, créant des encombrements et des ralentissements.

À tel point que dans certaines situations, le bénéfice d'un départ plus rapide des personnes est annulé par les difficultés qu'elles rencontrent pour atteindre leur destination. La mise en évidence de tels effets a orienté le choix du scénario d'application. L'objectif s'est alors recentré sur l'étude de l'augmentation potentielle de la population dans la zone à risque.

Le cas d'application doit donc s'organiser autour de l'enjeu de la taille des flux piétons, en proposant d'investiguer une augmentation potentielle de la population au sein de la ZPI.

CHAPITRE 4

METHODE D'APPLICATION DU MODELE DE SIMULATION

IV.1	Contextualisation géographique du modèle de simulation	198
IV.1.1	Position initiale des personnes	199
1.1.1	Populations régulières.....	199
1.1.2	Populations transitoires.....	207
1.1.3	Données d'entrée finales	211
IV.1.2	Les scénarios d'application	213
1.2.1	Les paramètres.....	213
1.2.2	La table des scénarios	213
IV.1.3	Références aux scénarios	215
IV.1.4	Rappel sur les indicateurs	215
IV.2	Résultats	218
IV.2.1	S1B	218
IV.2.2	S1P	221
IV.2.3	S1C	224
IV.2.4	S2B	227
IV.2.5	S2C	230
IV.2.6	S2P	233
IV.2.7	S3B	236
IV.2.8	S3C	239
IV.2.9	S3P	242
IV.3	Analyse des résultats.....	245
IV.3.1	Les facteurs propices au meilleur... ou au pire	245
IV.3.2	Impact de la fermeture (ou non) des ponts	251
IV.4	Conclusion intermédiaire	255

IV METHODE D'APPLICATION DU MODELE DE SIMULATION

Le chapitre précédent a permis d'analyser le comportement du modèle de simulation et de mettre en évidence l'influence de chacun des paramètres sur les sorties de modèle.

IV.1 Contextualisation géographique du modèle de simulation

Les paramètres du modèle de simulation proposé ont été testés dans le chapitre précédent. Le comportement du modèle de simulation a pu être caractérisé. La démarche de recherche vise à identifier les éléments essentiels pour élaborer un modèle de simulation d'évacuation préventive qui serait à la fois général et reproductible. La simulation a été appliquée dans un contexte d'évacuation préventive par suite de la menace de rupture de barrage au nord d'Alès (Gard).

L'objectif peut alors être de tester notre modèle sur des scénarios plus complexes. Dans le cadre de cette application, le modèle de simulation originalement proposé doit être adapté. Cette adaptation se fait au travers de deux aspects. Dans un premier temps, si le modèle de simulation présenté dans le chapitre précédent se révèle abstrait et général, l'objectif est de le relier à une réalité concrète. Ensuite, le chapitre précédent a permis de soulever plusieurs questions à l'issue du test des différents paramètres du modèle de simulation. Ces questions concernent plusieurs éléments :

A) La densité de population impacte significativement le temps de parcours des personnes. Cet impact est visible à une échelle très localisée (de quelques mètres). Il est expliqué en partie par la densité de population locale impliquée dans un processus d'évacuation.

La densité de population initiale semble donc jouer un rôle majeur dans le temps de parcours des personnes entre leurs lieux de départ et leurs lieux de mise en sécurité. Le temps de parcours est l'un des aspects déterminant dans la réussite globale de l'opération d'évacuation. Le modèle de simulation testé dans le troisième chapitre génère une population initiale basée sur les habitations. En d'autres termes, à chaque démarrage de simulation, les personnes se trouvent à leur domicile.

Pourtant, la probabilité d'occurrence d'une telle configuration spatiale lors d'un événement est relativement faible ; le cas pouvant s'y rapprocher le plus étant en pleine nuit. Si l'on peut penser que les outils de gestion de crise pouvant être activés en amont de l'évacuation, notamment les PCS, peuvent contribuer à réduire la dispersion des personnes au moment de l'évacuation, l'incertitude autour de la cinétique d'un tel événement ne permet pas de l'affirmer. Il est donc possible que les personnes ne se trouvent pas à leur domicile au moment de l'évacuation. Les activités étant généralement centralisatrices sur un territoire, il devient également très probable

d'observer de forts écarts entre lieux de résidence des personnes et positions au moment du déclenchement d'une évacuation.

B) La structuration spatiale de l'évacuation peut contribuer à augmenter à la fois la durée globale de l'opération d'évacuation ainsi que les temps de parcours des personnes.

Lors de l'évacuation, le déplacement des personnes est conditionné par la nature de la destination choisie par les personnes et la nature de l'itinéraire choisi pour s'y rendre. La modification de ces deux éléments peut avoir un impact notable sur les différents indicateurs relatifs à l'évacuation. Le choix de destinations par les personnes impacte la distance géographique à parcourir. Il impacte également la répartition des flux de piétons sur le réseau. De la même manière, la nature des itinéraires peut contribuer à un allongement de la distance à parcourir et générer des effets de densité sur certaines parties du réseau.

À ce stade, ces deux éléments ont été considérés comme à l'initiative des personnes. Autrement dit, les personnes choisissent individuellement le lieu et l'itinéraire afin de s'y rendre. En réalité, ces choix peuvent être influencés par une série de mesures du ressort des gestionnaires de la crise.

IV.1.1 Position initiale des personnes

Le chapitre précédent a mis en lumière l'impact des densités de population sur l'efficacité de l'évacuation. Lorsque les individus convergent simultanément vers des segments restreints du réseau, les temps de parcours s'accroissent significativement. Ceci pose naturellement la question du nombre d'individus présents dans la zone à risque lors de l'initiation de l'évacuation. Il est important de distinguer entre la population résidente de cette zone, qui a été notre principal point de référence, et celle qui, bien que non résidente, peut s'y trouver pour diverses raisons. Cette dernière sera qualifiée de population exogène dans ce chapitre. Nous distinguons deux catégories au sein de cette population exogène : une population régulière et une population transitoire.

1.1.1 Populations régulières

Les territoires évoluent tant spatialement que temporellement. Aucun espace géographique ne demeure constant à travers le temps, qu'il s'agisse de courtes ou de longues périodes. Sur des laps de temps plus brefs, les territoires s'organisent souvent autour des migrations pendulaires. Dans la configuration du cas d'application, une commune centrale offre un vaste bassin d'emplois, attirant ainsi les travailleurs des communes avoisinantes. Cela peut donc faire varier la population se trouvant dans la zone menacée en démarrage de simulation et contribuer à exacerber les effets de certains paramètres.

II.1.1.1.1 Les types de population régulière

Pour ce travail, les déplacements considérés comme réguliers englobent les migrations pendulaires d'actifs et les déplacements d'enfants scolarisés hors de leur commune de résidence. La prise en compte des migrations pendulaires d'actifs est pertinente à deux égards. Comme évoqué précédemment, Alès est une commune centre, au sens de l'INSEE. Elle est donc susceptible de recevoir d'importants flux de travailleurs en provenance d'autres communes. Ces flux pourraient donc faire gonfler la population présente au sein de la zone menacée.

Un autre facteur potentiel d'augmentation de la population en zone à risque concerne les établissements scolaires. Les établissements scolaires sont les seules infrastructures qui obéissent aux deux règles suivantes :

- Leur répartition territoriale obéit à une logique de concentration, notamment, les établissements d'enseignement supérieur qui rassemblent les étudiants des communes avoisinantes dans une commune centrale ;
- L'affluence y est régulière et prédictible.

II.1.1.1.2 Estimation

L'estimation de la population régulière au sein de la zone menacée se fait à partir de données généralisées concernant d'une part le nombre d'actifs par commune et d'autre part le nombre d'enfants scolarisés par commune. Ces données généralisées doivent donc ensuite être spatialisées selon une logique de répartition.

II.1.1.1.2.1 Les travailleurs

Pour estimer la population de travailleurs dans la zone à risque, nous avons besoin d'une base de données détaillant la nature et la distribution des catégories socioprofessionnelles. Il est possible de s'appuyer sur les informations fournies par l'INSEE, car elles sont exhaustives et accessibles pour toutes les communes de France.

La principale contrainte liée à l'utilisation des données de l'INSEE concerne la granularité des postes dans la nomenclature, comme illustré dans le Tableau 29. Bien que la nomenclature de l'INSEE offre quatre niveaux de détail pour les catégories socioprofessionnelles, uniquement le premier est accessible librement. De ce fait, notre analyse se base uniquement sur ce niveau.

Les postes de la nomenclature de l'INSEE, étant assez généraux et regroupant diverses fonctions, doivent être abordés avec précaution. Les estimations pouvant être calculées à partir de telles données peuvent manquer de précision. En dépit de cela, l'objectif est donc d'estimer la population de travailleurs sur le territoire d'étude, et de la situer à l'échelle du bâti. Pour le moment, aucun facteur temporel n'est inclus dans le processus d'estimation. En effet, il ne paraît pas possible de caractériser les postes INSEE utilisés par des horaires types. Le but de la démarche est donc d'estimer

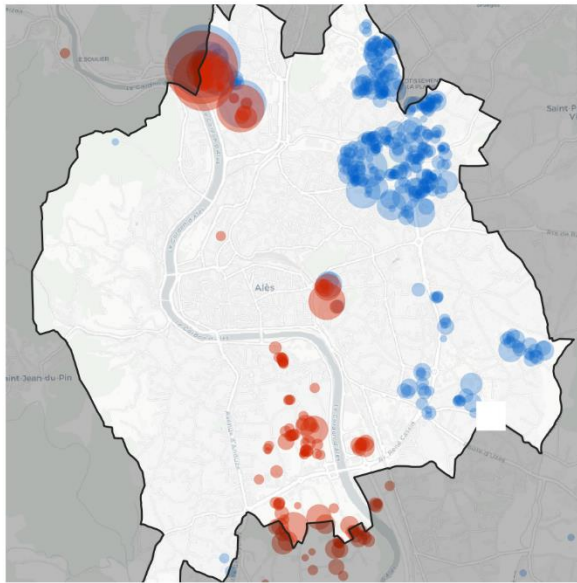
une population de travailleurs maximale par bâtiment. Pour ce faire, chacun des postes INSEE est associé à des bâtiments de référence sur le territoire d'application.

Poste INSEE	Part de la population totale en %
Agriculteur exploitants	1
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise	5,1
Cadres et professions intellectuelles supérieures	4,3
Professions intermédiaires	11,2
Employés	15
Ouvriers	11,2
Retraités	32,3
Sans activités	19,4

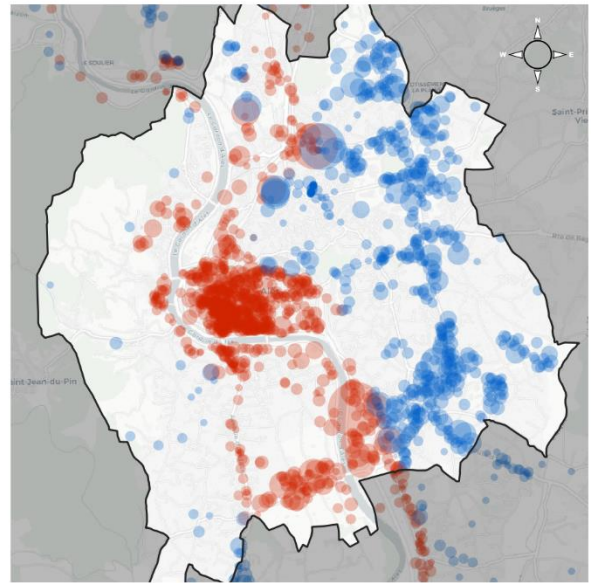
Tableau 29 – Répartition des classes socio-professionnelles selon la nomenclature de l'INSEE (niveau 1) pour la zone d'emploi Alès-Le Vigan

Pour exemple, la classe "ouvriers", telle que définie par l'INSEE, regroupe une variété de travailleurs centrée principalement autour des employés industriels. Ces derniers exercent majoritairement dans des unités de production. Les ouvriers ont donc été attribués aux bâtiments industriels. Cette attribution se base sur les informations de la Base de Données topographique et d'Open Street Map. Ainsi, les bâtiments qualifiés d'"Industriel" dans la BD topographique ont été principalement associés aux ouvriers. Si les données de la BD étaient incomplètes, nous avons complété avec les informations d'OSM. Le résultat est visible en Atlas 36.

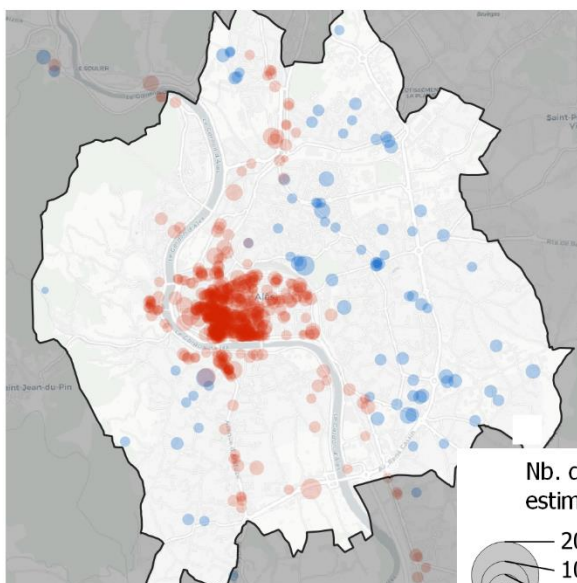
Poste INSEE :
Ouvriers



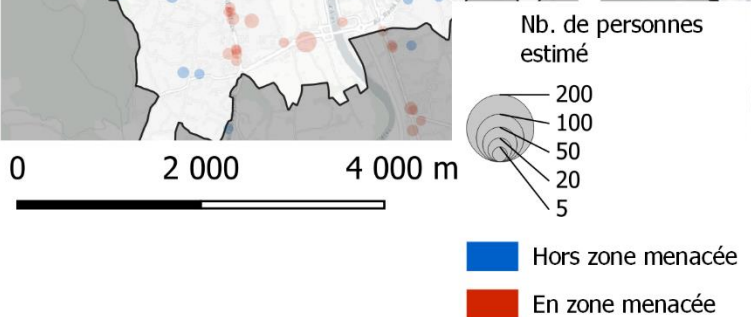
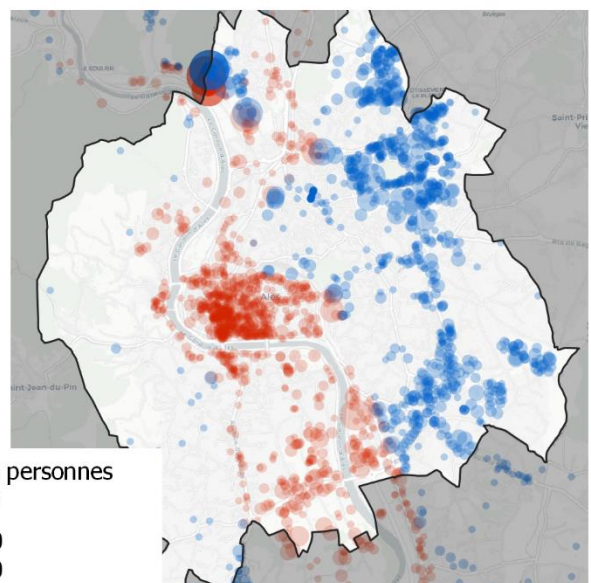
Poste INSEE :
Employés



Poste INSEE :
Artisans, commerçants, chefs d'entreprise



Poste INSEE :
Professions intermédiaires

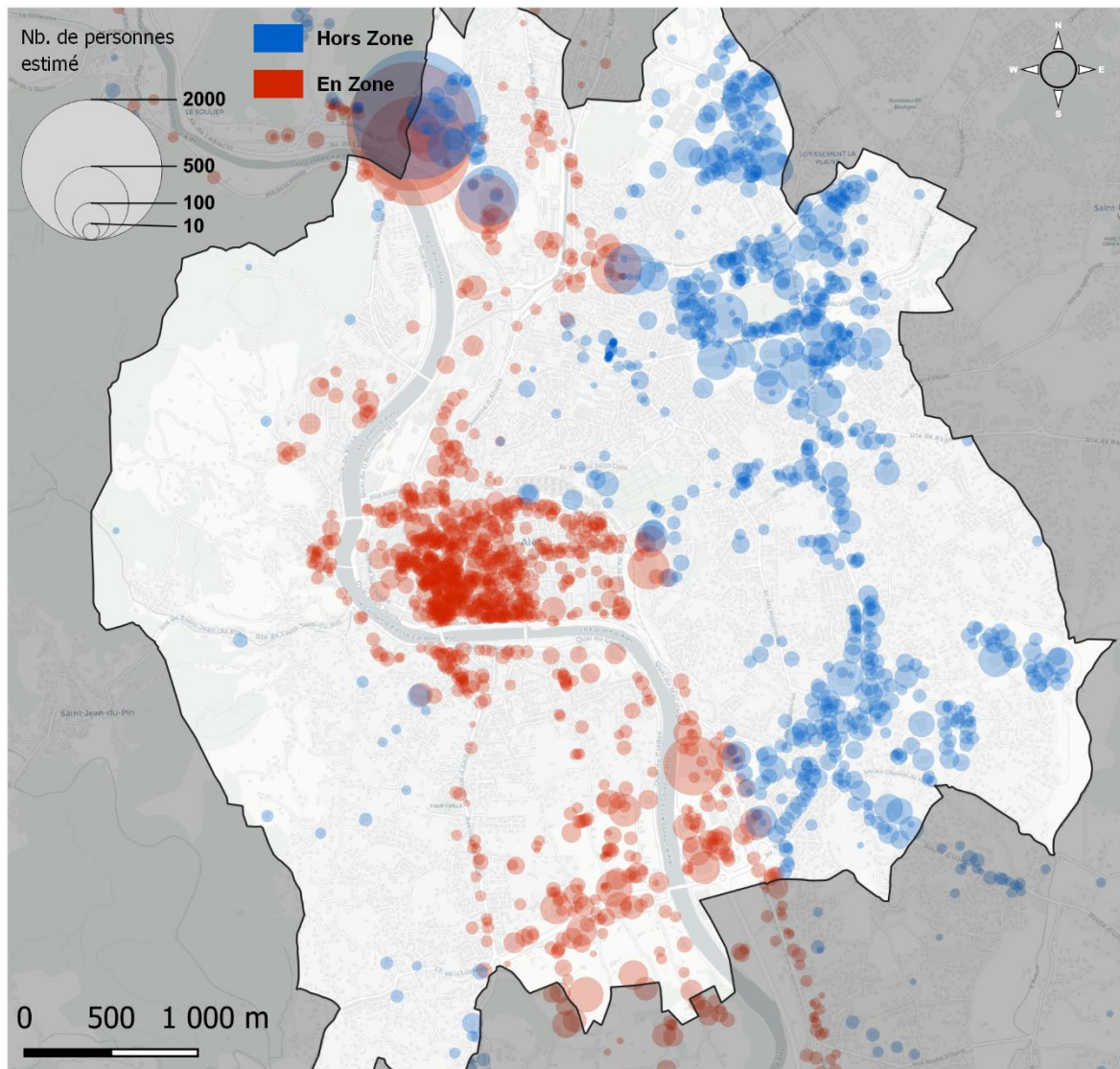


Atlas 36 – Résultats de la répartition de la population en fonction de la catégorie socio-professionnelle d'appartenance.

Les estimations obtenues en Atlas 36 doivent être considérées comme telles : l'écart entre ces estimations et la réalité doit donc être gardé à l'esprit dans la suite du travail. Cependant, le résultat obtenu semble satisfaisant, l'estimation correspond à la structure générale de la commune. La structure territoriale d'Alès est bien illustrée :

un cœur de ville centré sur le commerce de proximité et des ventes spécialisées, une périphérie dotée de grandes unités commerciales et, finalement, une zone nord de la ville qui se distingue par son caractère industriel.

L'ensemble des données estimatives obtenues sont ensuite assemblées (Carte 8). La carte correspond au nombre maximal de travailleurs estimé dans chaque bâtiment non résidentiel à l'échelle de la commune alésienne.



Carte 8 – Répartition des travailleurs sur la commune d'Alès

L'estimation de la localisation des travailleurs met en évidence une concentration de population importante au niveau du centre-ville Alésien. Des valeurs importantes sont également répertoriées autour de la rocade située à l'est de la ville. Cependant, la rocade ainsi que les activités qu'elle comporte n'est pas concernée par la ZPI.

II.1.1.1.2.2 Scolarisation

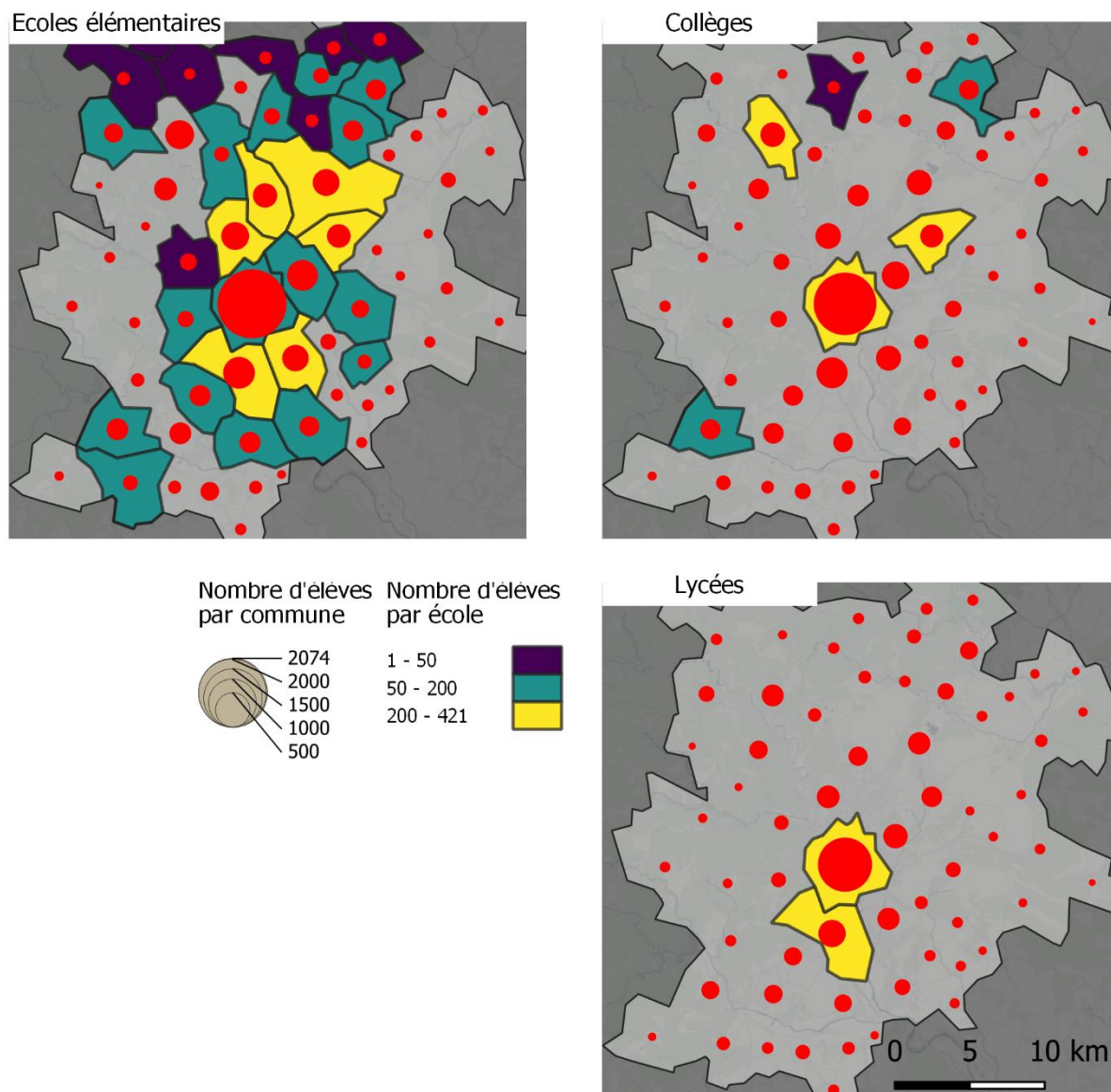
Après avoir estimé le nombre de travailleurs à l'échelle des bâtiments, l'objectif est désormais d'estimer l'autre grande catégorie de « réguliers » : les personnes scolarisées. Sur la zone d'étude, ces dernières soulèvent les mêmes questionnements opérationnels que les travailleurs. Les personnes scolarisées peuvent être situées au sein des établissements situés en zone à risque. Elles peuvent également provoquer des effets de densité, car le nombre d'élèves dans un établissement scolaire peut être considérable et fortement localisé.

D'autres questionnements liés à l'âge des individus peuvent également se poser. Cet âge pourrait influencer le comportement lors d'une évacuation. Cependant, cette préoccupation n'est pas encore prise en compte dans notre réflexion actuelle. L'objectif immédiat est d'obtenir une estimation fiable du nombre d'élèves scolarisés dans la zone à risque.

Le nombre d'actifs travaillant au sein de chaque commune est une donnée mise à disposition par l'INSEE. De ce fait, aucune estimation n'est à produire ; et la provenance des travailleurs ne fait pas partie de la réflexion. En revanche, lorsqu'il s'agit d'estimer la population scolarisée sur la zone d'étude, les deux questions se posent, en l'absence de données décrivant ce type de flux. Il faut donc, dans un premier temps, pouvoir estimer la population d'élèves scolarisés dans chaque établissement scolaire de la zone d'étude, et cette question sous-entend de pouvoir définir une zone au-delà de laquelle les enfants ne sont plus susceptibles d'être scolarisés au sein de la zone d'étude.

Établir une délimitation au-delà de laquelle les enfants ne seraient plus susceptibles de fréquenter une école dans la zone d'étude est une tâche complexe, notamment en l'absence de données sur ces flux. Le choix s'est donc porté vers les aires d'attractions définies par l'INSEE. Notre hypothèse se base sur le fait que les individus âgés de 6 à 18 ans, résidant au sein de l'aire d'attraction de la commune d'Alès, ont toutes les chances de fréquenter une école correspondant à leur tranche d'âge dans cette même aire d'attraction.

L'Atlas 37 met bien en évidence la centralisation des infrastructures sur la commune d'Alès au sein de son aire d'attraction. Si la moitié des communes de l'aire d'attraction Alésienne dispose d'au moins une école élémentaire, seules deux communes possèdent au moins un lycée. En réalité, la majorité des élèves de second cycle de l'aire d'attraction sont concentrés sur la commune d'Alès du fait de l'absence d'équipement correspondant sur l'ensemble de cette dernière. Cela entraîne donc une augmentation importante de la population présente dans la ZPI sur certaines périodes spécifiques de la semaine.



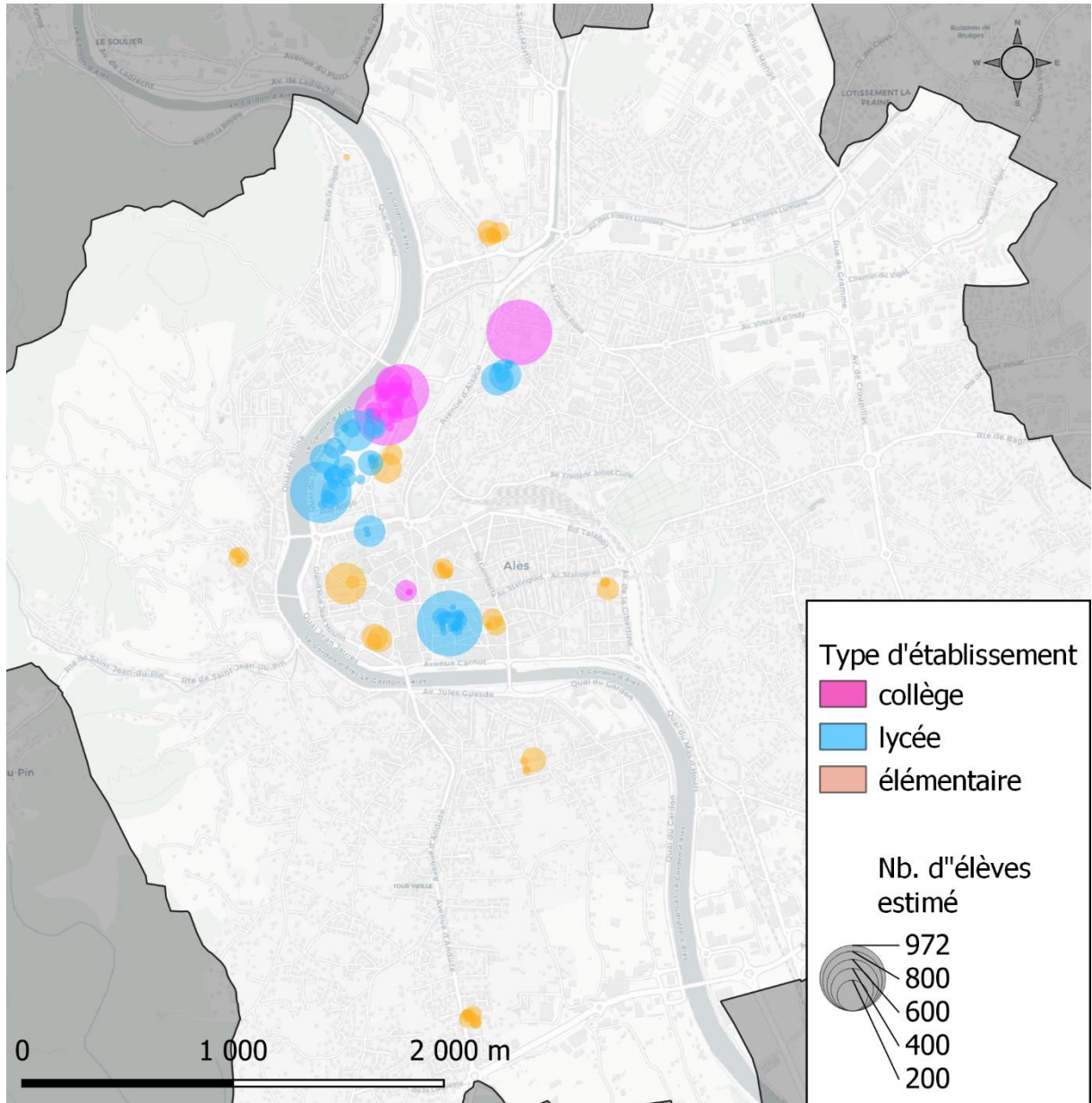
Atlas 37 – Nombre d'élèves par commune et par école dans l'aire d'attraction Alésienne.

Comme évoqué précédemment, le choix de la prise en compte des élèves scolarisés en zone menacée s'explique par l'aspect centralisé des établissements scolaires. Les établissements de cycle supérieur ont tendance à être moins nombreux, et donc localisés vers des centres économiques. Ceci est vrai pour l'aire d'attraction d'Alès. Atlas 37 met en évidence un déséquilibre important entre le nombre d'élèves en fonction des tranches d'âge et le nombre d'établissements scolaires susceptibles de pouvoir les accueillir.

La méthode employée pour estimer le nombre d'élèves par établissement scolaire reprend celle utilisée pour le nombre de travailleurs. Elle repose sur la répartition du potentiel d'élèves, basée sur un rapport de surface parmi les établissements d'une catégorie spécifique au sein de toute l'aire d'attraction. Ce rapport se base sur une "surface utile". Seuls les bâtiments entrent en compte, la "surface utile" équivalant à

la superficie d'un bâtiment multipliée par ses étages. Pour établir cette mesure, une combinaison des données OSM et IGN a été nécessaire. Cette méthode omet les espaces extérieurs dans le calcul de la Carte 9.

Carte 9 – Nombre d'élèves par établissement



II.1.1.1.2.3 Couche de donnée finalisée

L'objectif est ici de produire des configurations de répartition spatiale de la population à partir des données précédentes. Les données mobilisables à ce stade concernent :

- Le nombre d'habitants par bâtiment de type résidentiel ;
- Le potentiel maximal de fréquentation pour l'ensemble des ERP ;
- Le nombre de travailleurs par entreprise sur la zone d'étude ;
- Le nombre d'enfants scolarisés par école.

Afin de produire les couches de données qui seront ensuite intégrées dans la simulation, il faut répondre à deux questions. Logiquement, plusieurs configurations spatiales sont possibles. Si l'évacuation est déclenchée la nuit, il est fort à parier que les écoles seront vides. Si l'évacuation est déclenchée un samedi estival, la fréquentation des activités de loisirs est susceptible d'être plus élevée que pendant un lundi d'hiver. Il est donc judicieux d'identifier des répartitions caractéristiques d'une part, et intéressante d'un point de vue de la création de connaissances d'autre part.

Pour identifier ces configurations spatiales caractéristiques, il faut également tenir compte du fait qu'une même personne peut se trouver à différents endroits suivant la configuration considérée. Il a été évoqué, précédemment dans ce manuscrit, qu'une partie des personnes pouvant se trouver dans la ZPI lors du déclenchement d'une évacuation pourrait provenir de communes extérieures à la zone d'étude. Dans ce cas, ces personnes représentent une simple addition de population. Cette partie s'ajoute donc aux personnes présentes dans la ZPI dont le lieu de résidence se trouve dans une commune de la zone d'étude.

1.1.2 Populations transitoires

La concentration d'activités dans la zone à risque influence la variation de la population présente. La section précédente a examiné les populations qui contribuent au bon fonctionnement de ces activités et qui, par conséquent, travaillent et fréquentent régulièrement cette zone. Toutefois, l'économie locale repose aussi sur les ERP qui, outre leurs employés réguliers, accueillent également des clients ou des usagers. Cette clientèle présente des enjeux spécifiques car elle est éphémère, rendant ainsi sa fluctuation moins prédictible.

Les mouvements de population réguliers entre les communes sont, dans leurs grandes tendances, prévisibles. Bien qu'une partie de ces flux soit documentée (les migrations pendulaires par exemple), d'autres peuvent être estimés grâce aux données démographiques. Ainsi, il a été possible de chiffrer cette population. Et bien que la manière dont cette population est répartie dans l'espace puisse faire débat, les données fournies par l'INSEE ont au moins assuré une base fiable pour des estimations globales.

L'estimation d'une population transitoire rencontre deux principales difficultés. Tout d'abord, nous faisons face à un manque de données globales, en particulier concernant les mouvements inter-communaux. Pour un jour précis, il est difficile de quantifier ceux qui visitent les communes de la zone à risque pour des motifs non professionnels. C'est en grande partie dû au fait que ces déplacements, à la différence des trajets domicile/travail, ne sont pas systématiquement enregistrés. La seconde difficulté repose sur l'imprévisibilité inhérente aux migrations non-pendulaires.

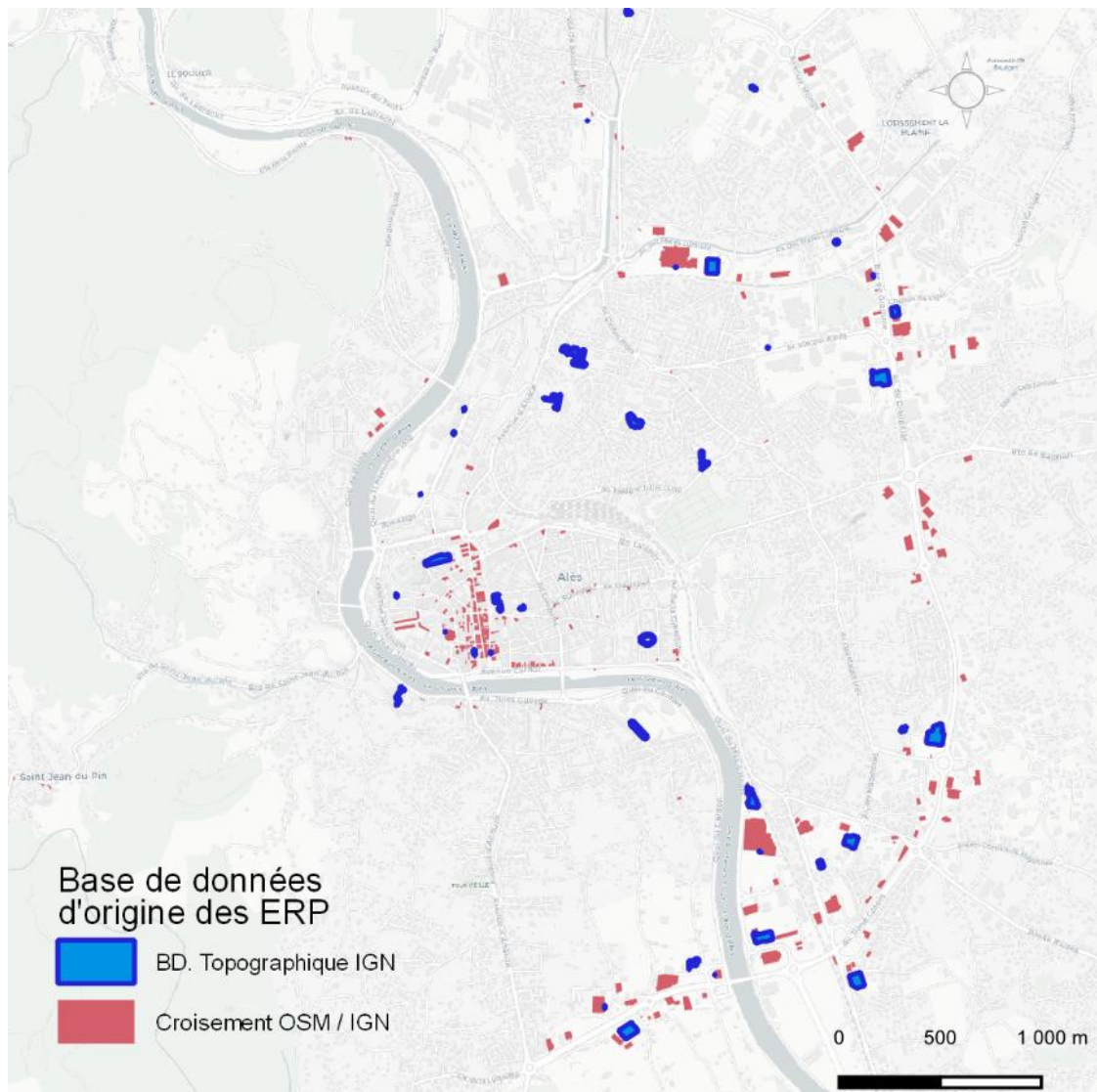
Étant donné cette spécificité, il convient d'aborder la question de la population transitoire d'une manière différente par rapport aux populations régulières. En l'absence de données quantitatives sur les mouvements de population, il est possible de s'appuyer sur les informations relatives à la capacité d'accueil des ERP.

II.1.1.1.1 Les espaces du transit

L'IGN propose, dans sa base de données topographique, une série de données concernant les ERP. Ces données recensent tous les ERP du département du Gard, ainsi que leur capacité maximale d'accueil simultané. La charge capacitaire maximale des ERP est encadrée par une législation stricte ; elle est généralement déterminée selon l'activité et la superficie du lieu. Les établissements sont classés en cinq catégories en fonction de leur charge capacitaire. Toutefois, cette classification n'inclut pas les activités dont la charge capacitaire maximale est inférieure à 300 personnes. Cette spécificité découle de l'objectif de ces données qui vise à faciliter l'évacuation en cas d'incidents tels que des incendies. Par conséquent seuls les établissements possédant une charge capacitaire importante sont mis en avant.

Lorsqu'on envisage une évacuation à grande échelle, cette approche semble insuffisante. En effet, bien que de nombreuses activités puissent accueillir individuellement moins de 300 personnes, elles demeurent cruciales dans le contexte présent. A titre d'exemple, le centre-ville d'Alès, situé au cœur de la zone à risque, rassemble une majorité des activités de toutes les communes de la zone d'étude.

Les données de la BD topographique IGN ont pu être croisées avec les données OSM. Il est important de préciser que les données d'OSM sont régulièrement mise à jour. Cela entraîne donc un décalage temporel entre la série de données concernant les activités mise à disposition par OSM sous une forme ponctuelle, et les données de la BD topographique, prenant la forme de bâtiments. Cependant, aucun producteur de donnée n'est susceptible de fournir une information aussi exhaustive qu'OSM, et ce à titre gratuit. Ce sont donc les données OSM qui sont retenues. Le croisement des données permet d'aboutir à un enrichissement de la base initiale (Carte 10). Au regard de la carte suivante, il est évident qu'un ensemble d'activités de petites tailles est concentré au sein du centre-ville. Cet ensemble d'activités est susceptible de générer des densités de population locales au moins aussi élevées, si ce n'est plus élevées, que les activités mise en évidence dans la BD topographique.

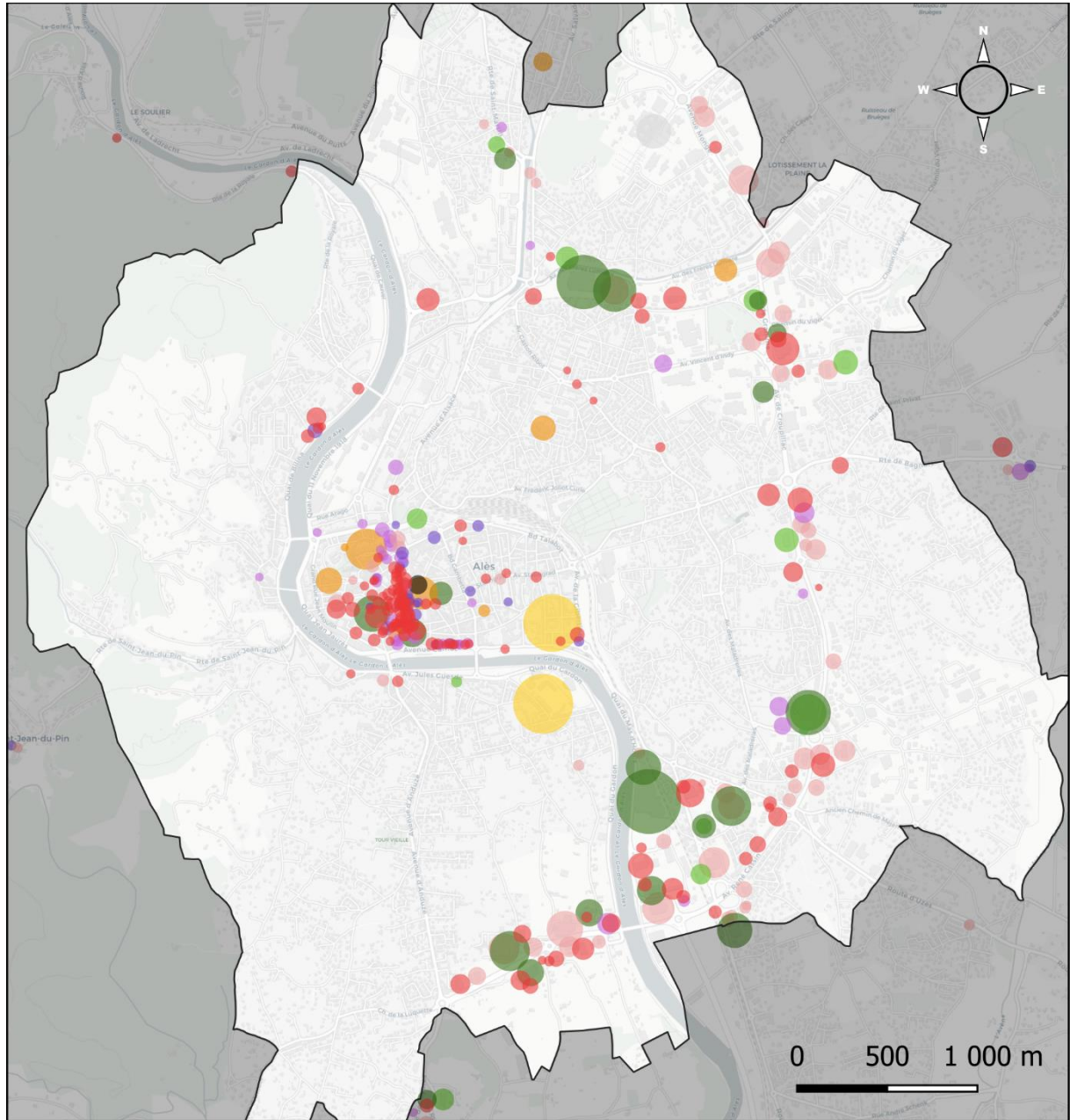


Carte 10 – Origine des données sur les ERP

II.1.1.1.2 Estimation de la capacité d'accueil

Une fois la localisation des activités terminée, il faut maintenant pouvoir en estimer la capacité. Les activités obtenues depuis la BD topographique comportent déjà cette information. En revanche, les activités provenant de la base de données OSM ne la possède pas. Le ratio surface utile / capacité d'accueil est généralement estimé autour de 2 personnes par m². Pour la plupart des établissements, une distinction est faite entre la surface totale et la surface de vente. Par exemple, selon les règles en vigueur, un restaurant ne peut pas accueillir plus de 1.5 personnes par m² au sein de sa surface de vente. La réglementation est cependant susceptible de varier selon la nature et la taille des établissements, rendant l'estimation d'une capacité d'accueil spécifique à chaque activité difficile. A partir des données déjà fournies par la BD topographique, et des informations relatives à la réglementation des types d'ERP les plus courants, la

capacité maximale d'accueil est fixée à 2 personnes par m² sur 50% de la surface utile d'un établissement. A l'aide de ce seuil, la Carte 11 ci-après a pu être produite.



Typologie

- Etablissement de restauration
- Débit de boissons
- Commerce généraliste de proximité
- Supermarché
- Centre commercial

- Commerce spécialisé fréquentation exceptionnelle
- Commerce spécialisé fréquentation régulière
- Salle de spectacle / Salle polyvalente
- Lieux d'accueil événements exceptionnels
- Lieu de culte
- Administration

■ Non-classé

- Capacité d'accueil (Nombre de personnes)**
- 5000
 - 2000
 - 500
 - 50

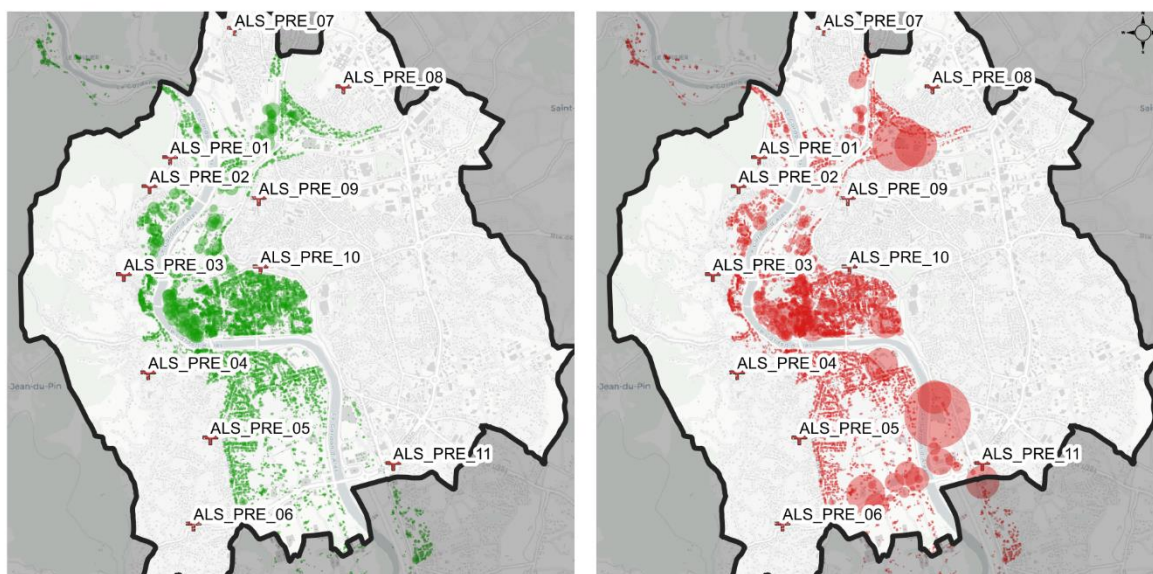
Carte 11 – Typologie d'ERP et capacité d'accueil estimée

L'estimation de la capacité d'accueil des ERP n'est pas utilisable en soit. Elle doit en effet servir à estimer une fréquentation, opération autrement plus complexe puisque la fréquentation d'un établissement ne peut être expliquée simplement par sa surface. Plusieurs éléments peuvent entrer en ligne de compte : le positionnement géographique, l'attractivité du lieu, le type d'activité, etc. Des données sur la fréquentation des différents établissements sont trouvables sur internet (GoogleMaps...). Malheureusement, une information cruciale n'apparaît pas sur ces dernières. La fréquentation des établissements y est indiquée à l'échelle horaire, en fonction des différents jours de la semaine.

Un exemple pratique pour bien saisir le problème posé ici, peut être celui de l'enseigne Cora. L'enseigne Cora dispose d'une surface de vente importante au sud de la commune d'Alès. La capacité maximale de l'établissement est issue des données de l'IGN, elle-même enrichit à partir d'une base de données du SDIS30. Elle est estimée aux alentours de 5000 personnes. Cela en fait l'ERP le plus important de la zone d'étude, devant les arènes et le stade Pierre Pibarot. Cependant, les données calculées par le SDIS30 ont pour but le dimensionnement d'une évacuation bâtementaire en cas d'incendie d'une part, et considère également la possibilité d'utiliser l'établissement comme un point de rassemblement d'urgence d'autre part. Il est donc ici évident que Cora ne rassemble jamais 5000 personnes. Empiriquement, le chiffre moyen se situe autour des 500 personnes. La moyenne de la fréquentation de Cora serait donc égale à 10% de la capacité maximale d'accueil précédemment calculée.

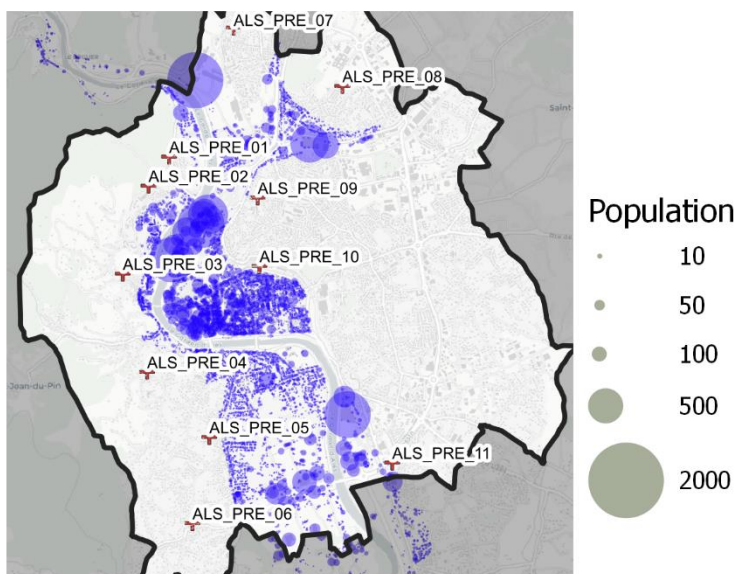
1.1.3 Données d'entrée finales

Les questions adressées autour du positionnement initial possible des personnes lors du déclenchement d'une évacuation ont pour objectif la mise en œuvre de différentes configurations de répartition spatiale de cette dernière. Ces configurations doivent être représentatives de situations caractéristiques de telle sorte qu'il soit possible d'identifier des variations territoriales importantes pour chacune des configurations. Chaque configuration prend la forme d'une couche de données de type shapefile qui vient remplacer la donnée utilisée initialement. Trois couches de données sont donc construites afin d'être utilisées en entrée de simulation **Atlas 38**.



Configuration 1

Configuration 2



Configuration 3

Atlas 38 – Les trois configurations de population utilisée comme données d'entrée de la simulation

La première configuration correspond à la totalité de la population de la ZPI située à son domicile. C'est donc la configuration correspondant au paramétrage B3(100) du chapitre précédent. Il s'agit d'une répartition spatiale de la population caractéristique d'un événement survenant au milieu de la nuit. Dans ce cas de figure 20506 personnes sont situées au sein de la ZPI et doivent être évacuées. La deuxième configuration correspond à une fréquentation importante des différentes activités de la zone d'étude. Cette répartition spatiale de la population pourrait être caractéristique d'une journée de fin de semaine. Dans ce cas de figure 23000 personnes doivent être évacuées. La troisième configuration correspond à une répartition spatiale de la

population caractéristique d'un jour ouvré. Les personnes actives sont donc considérées comme se trouvant sur leur lieu d'emploi. Cette configuration porte la population présente au sein de la ZPI à 26000 personnes.

IV.1.2 Les scénarios d'application

1.2.1 Les paramètres

Parmi les six paramètres retenus jusqu'à présent, le paramètre B1 (contrôlant les refus d'évacuer) n'est pas exploité. Comme évoqué précédemment, ce paramètre sélectionne une proportion de la population qui n'évacuera pas. Le paramètre B1 correspond à un phénomène pouvant être observé en situation réelle. Cependant, les personnes n'évacuant pas étant sélectionnées aléatoirement sur le territoire d'étude en début de simulation, il n'apporte pas ou peu d'information sur l'opération d'évacuation dans sa globalité. De plus, le chapitre précédemment a mis en évidence l'impact de la densité locale de population à évacuer sur le déplacement des personnes, et donc la performance de l'évacuation. Le paramètre B1, en plus de ne pas fournir d'informations valorisables, peut, lorsqu'il est plus élevé, contribuer à réduire l'effet d'autres paramètres, plus intéressants à observer.

En plus des paramètres, deux éléments de contexte peuvent varier. C1, correspondant aux différentes répartitions spatiales de la population discutées dans la section précédente. Et C2 qui correspond à l'ouverture des ponts à la circulation (ils sont fermés par défaut). L'élément C2 est à l'origine issu d'une erreur dans l'implémentation de la simulation qui a finalement mis en évidence, par les résultats qu'elle a produits, la pertinence de la question de l'ouverture des ponts. Aucun élément ne permet d'affirmer l'impossibilité systématique d'ouvrir les ponts aux passages lors de l'évacuation, il a donc été choisi de tester une telle possibilité.

1.2.2 La table des scénarios

Le Tableau 30 recense les scénarios testés à l'aide du modèle de simulation et qui présentent d'une part des caractéristiques intéressantes, et d'autre part un potentiel de comparaison avec un ou plusieurs autres. Les scénarios sont construits des trois configurations de répartition spatiale de la population discutées dans la section précédente.

Nom	Zone	B2	B3	D1	D2	V3	Ponts	Pop
S1B	Alès	15	0	PC	O	0	Non	1
Observations : Ce scénario décrit une évacuation nocturne où la majorité des individus se trouvent à leurs domiciles et font des choix d'évacuation théoriquement facilitants (en sachant que les ponts sont coupés comme le prévoit le PPI et qu'il n'y a pas de ruissellement) : les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.								
S1P	Alès	15	0	PC	O	0	Oui	1
Observations : Ce scénario décrit une évacuation nocturne où la majorité des individus se trouvent à leurs domiciles et font des choix d'évacuation théoriquement facilitants (en sachant que les ponts ne sont pas encore coupés et qu'il n'y a pas de ruissellement) : les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.								
S1C	Alès	5	0	PG	O	43	Non	1
Observations : Ce scénario décrit une évacuation nocturne où la majorité des individus se trouvent à leur domicile. Les départs se font sur une courte période, le réseau est donc encombré. Les personnes utilisent des itinéraires urbanistiquement dégagés.								
S2B	Alès	15	0	PC	O	0	Non	3
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu pendant un jour ouvré. Les personnes se trouvent majoritairement sur leurs lieux de travail. Les personnes actives sont réparties sur leur lieu d'emploi estimé, les inactifs sont à leur domicile. Elles font des choix d'évacuation théoriquement facilitants (en sachant que les ponts sont coupés comme le prévoit le PPI et qu'il n'y a pas de ruissellement) : les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.								
S2C	Alès	5	0	PG	O	43	Non	3
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu durant un jour ouvré. Les personnes actives sont réparties sur leur lieu d'emploi estimé, les inactifs sont à leur domicile. Les départs se font sur une courte période, le réseau est donc encombré. Les personnes utilisent des itinéraires urbanistiquement dégagés.								
S2P	Alès	15	0	PC	O	0	Oui	3
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu durant un jour ouvré. Les personnes se trouvent majoritairement sur leurs lieux de travail. Elles peuvent également se trouver à leurs domiciles et font des choix d'évacuation théoriquement facilitants (en sachant que les ponts ne sont pas encore coupés et qu'il n'y a pas de ruissellement) : les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.								
S3B	Alès	15	0	PC	O	0	Non	2
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu pendant un samedi. Les personnes se trouvent majoritairement dans des ERP, elles peuvent également se trouver à leurs domiciles ou sur leurs lieux de travail. Les paramètres sont ajustés pour équilibrer la performance globale de l'évacuation avec une mobilité plus fluide des personnes vers les PRE. Les ponts sont ouverts à la circulation.								
S3C	Alès	5	0	PG	O	43	Non	2
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu durant un samedi. Les personnes se trouvent majoritairement dans des ERP, elles peuvent également se trouver à leurs domiciles ou sur leurs lieux de travail. Les paramètres sont ajustés afin de rendre le déplacement des personnes difficile.								
S3P	Alès	15	0	PC	O	0	Oui	2
Observations : Ce scénario décrit une évacuation ayant lieu durant un samedi. Les personnes se trouvent majoritairement dans des ERP, elles peuvent également se trouver à leurs domiciles ou sur leurs lieux de travail. Les ponts sont ouverts à la circulation. Elles font des choix d'évacuation théoriquement facilitants (en sachant que les ponts ne sont pas encore coupés et qu'il n'y a pas de ruissellement) : les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.								

Tableau 30 – Scénarios présentés dans le manuscrit

IV.1.3 Références aux scénarios

Pour chaque scénario, une planche rassemble l'ensemble des indicateurs relatifs aux données récoltées. Chacun de ces neuf scénarios a fait l'objet de 5 runs de simulations. Les données présentées sont moyennées (avec mention des valeurs minimum et maximum lorsque cela est pertinent).

Les scénarios ont été construits et sélectionnés afin de pouvoir être comparés entre eux. Ainsi, chacun d'entre eux peut être mis en relation avec trois autres scénarios. Lorsque les scénarios sont comparés, chaque couple de courbe est mentionné sous une appellation englobante. Le Tableau 31 recense les appellations pouvant être utilisées.

SxB fait référence au couple de scénario [S1B, S2B, S3B], S1x fait référence au couple de scénario [S1B, S1P, S1C] et ainsi de suite.

	SxB	SxP	SxC
S1x	S1B	S1P	S1C
S2x	S2B	S2P	S2C
S3x	S3B	S3P	S3C

Tableau 31 – Dénomination des scénarios dans le texte

IV.1.4 Rappel sur les indicateurs

Le modèle de simulation permet d'alimenter trois indicateurs spatiaux :

- **Le nombre de personnes par portion de réseau** : durant les trente premières minutes de la simulation, les agents « Road » renvoient le nombre d'agents « People » en train de les parcourir. L'information est retournée avec une périodicité de 10 minutes. Cela donne donc trois valeurs, une à t+10 minutes, une deuxième à t+20 minutes et une dernière à t+30 minutes.
- **Surface disponible par personne** : sur le même modèle que l'indicateur précédent, le nombre de personnes par portion de réseau est rapporté aux données de formes de ladite portion. Le rapport entre la surface totale de la portion de réseau et le nombre de personnes situés sur cette dernière permet de mettre en évidence un indicateur d'espace disponible par personnes. La Figure 49 illustre les seuils de représentation choisis en termes d'espace disponible pour se déplacer : inférieur à 1m² ; compris entre 1 et 3m² ; compris entre 3 et 9m² ; supérieur à 9m².



Figure 49 – Illustration de l'espace disponible par personne (4 classes)

La donnée sur l'espace disponible par personne est issue des relevés effectués sur chaque portion de réseau au cours des trente premières minutes de l'évacuation. Ce relevé est effectué toutes les 10 minutes. Cela signifie que pour chaque portion de réseau trois valeurs sont répertoriées. L'indicateur ne donne que la densité la moins élevée. L'information sur la temporalité de relevé de la valeur de densité la moins élevée reste cependant importante. Ainsi, pour chaque portion de réseau, un aplat de couleur est ajouté afin d'indiquer quand cette valeur a été relevée (Figure 50).

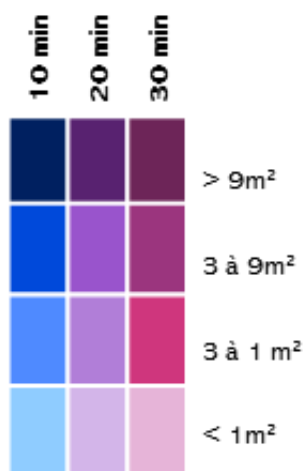


Figure 50 – Double légende utilisée pour l'indicateur « surface disponible par personne »

Ce type de légende permet d'assembler deux informations d'importance cruciale. L'espace disponible par personne permet d'apporter de l'information sur d'éventuelles difficultés de déplacement localisée. La temporalité de relevé permet d'enrichir cette information et d'y apporter une dimension temporelle, cruciale dans un tel contexte. Une diminution de l'espace disponible pour les personnes est plus problématique lorsqu'elle intervient plus tard dans l'évacuation.

Il est important d'ajouter que cet indicateur n'est pas exhaustif. Il s'agit de relevés ponctuels. Il ne permet pas d'exclure une augmentation significative du nombre de personnes sur une portion de réseau hors des relevés effectués. Cependant, la forme

des premiers résultats obtenus, et la relative régularité des courbes de cumul des arrivées permettent de supposer que les résultats proposés par cet indicateur ont une bonne valeur explicative.

- **Densité maximale de personnes par portion de réseau :**

La densité maximale par portion de réseau est en réalité la réciproque de l'indicateur précédents. Cet indicateur recense, pour chaque portion de réseau, la densité maximale mesurée par la simulation, en nombre de personnes par m².

La Figure 51 illustre les seuils de représentations définis pour cet indicateur. De gauche à droite :]0.05, 0.10] ;]0.10 ;0.20] ;]0.20, 0.50] ; ≥ 0.50

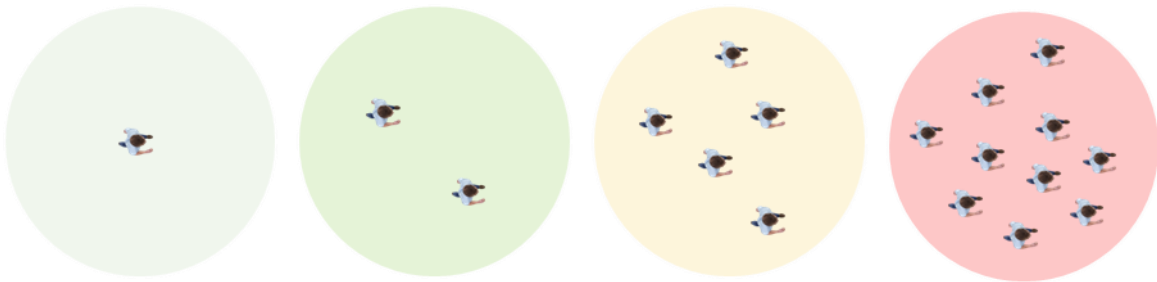


Figure 51 – Illustration des seuils de densité de personne par m²

Les cercles représentés sur la Figure 51 ont une surface de 9 m². La personne est large de 40 centimètres (épaule à épaule).

- **Temps de parcours moyens en fonction du lieu de départ :**

Les agents « People » retournent, en fin de simulation, le temps écoulé entre leurs départs et leurs arrivées, ainsi que l'agent « Building » duquel ils sont partis. Ces temps sont ensuite moyennés à l'aide d'un cadrillage, ce qui permet de les représenter cartographiquement.

- **Courbe cumulative du nombre d'évacuations complétées**

Un décompte des agents « people » ayant complété l'évacuation, en fonction du temps, est réalisé. Une évacuation est considérée comme complétée lorsque l'agent a atteint sa destination.

IV.2 Résultats

IV.2.1 S1B

Le Tableau 32 indique les valeurs d'initialisation des paramètres de la simulation dans le cadre du scénario S1B. Le scénario S1B est simulé sur la commune d'Alès. Ce scénario peut être considéré comme le plus standard parmi l'ensemble des scénarios testés dans ce travail. La valeur du paramètre B2 (temps de préparation) est fixé sur 30. Cela signifie que le débit d'évacués est régulier entre 0 et 30 minutes. Cette valeur est considérée comme la plus élevée possible pour le paramètre B2 dans l'ensemble des simulations. Elle se rapproche des courbes issues de la littérature mises en évidence dans le chapitre 2, et testée dans le chapitre 3. L'augmentation du paramètre B2 signifie inévitablement une évacuation plus longue. En revanche, les valeurs sont plus facilitantes pour l'ensemble des autres indicateurs. Les personnes choisissent l'itinéraire le plus court vers le PRE le plus proche et le réseau est peu encombré.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacue en 15 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	no	Il n'y a aucun phénomène de ruissellement.
C1 Contexte 1	Nt	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « nuit ».
C2 Contexte 2	Non	Les ponts ne sont pas ouverts à la circulation.

Tableau 32 - Initialisation des paramètres de la simulation S1B

La Synthèse 1.1 met en évidence un nombre de personnes par portion de réseau régulier sur l'ensemble du territoire, à l'exception des portions situées à proximité du PRE-10 (gare ferroviaire). Le nombre de personnes augmente progressivement sur les dernières portions de réseau situées à proximité de la gare ferroviaire. Les valeurs rapportées approchent les 300 personnes sur des portions de réseau de 50 mètres de long. Toutefois la Synthèse 1.2 démontre une absence de congestion des piétons sur l'ensemble du territoire et pendant toute la durée de l'évacuation. Le nombre important de personnes sur les portions de réseau à proximité de la gare est contrebalancé par la forme de ces portions. Finalement, malgré ces quelques portions très fréquentées, l'espace disponible pour une seule personne est supérieur à 2m² sur

l'ensemble du territoire. Ce constat est majoritairement imputable à l'augmentation du paramètre B2. Le départ des personnes s'effectue sur une période de 15 minutes. Cela permet d'éviter les effets de congestion. L'utilisation par les personnes des chemins les plus courts permet une meilleure répartition des flux sur le réseau. Contrairement à d'autres stratégies d'itinéraires, les chemins les plus courts limitent également les effets de congestion.

Le territoire semble cependant se diviser en deux sous-espaces. Le PRE correspondant à la gare ferroviaire d'Alès draine l'ensemble des personnes se trouvant en centre-ville. C'est une observation récurrente lorsque la simulation ne permet pas la traversée du Gardon et lorsque D2 (choix d'une destination) est égal à O (PRE les plus proches). Ainsi, le nombre de personnes se trouvant sur les tronçons de route à proximité du PRE de la gare ferroviaire tend à augmenter durant les 30 premières minutes. Sur le reste du territoire, les chiffres sont faibles. Il faut toutefois souligner que la surface disponible par personne peut être inférieure à 1m² au niveau du rond-point joignant le boulevard Louis Blanc et le quai Boissier Sauvage.

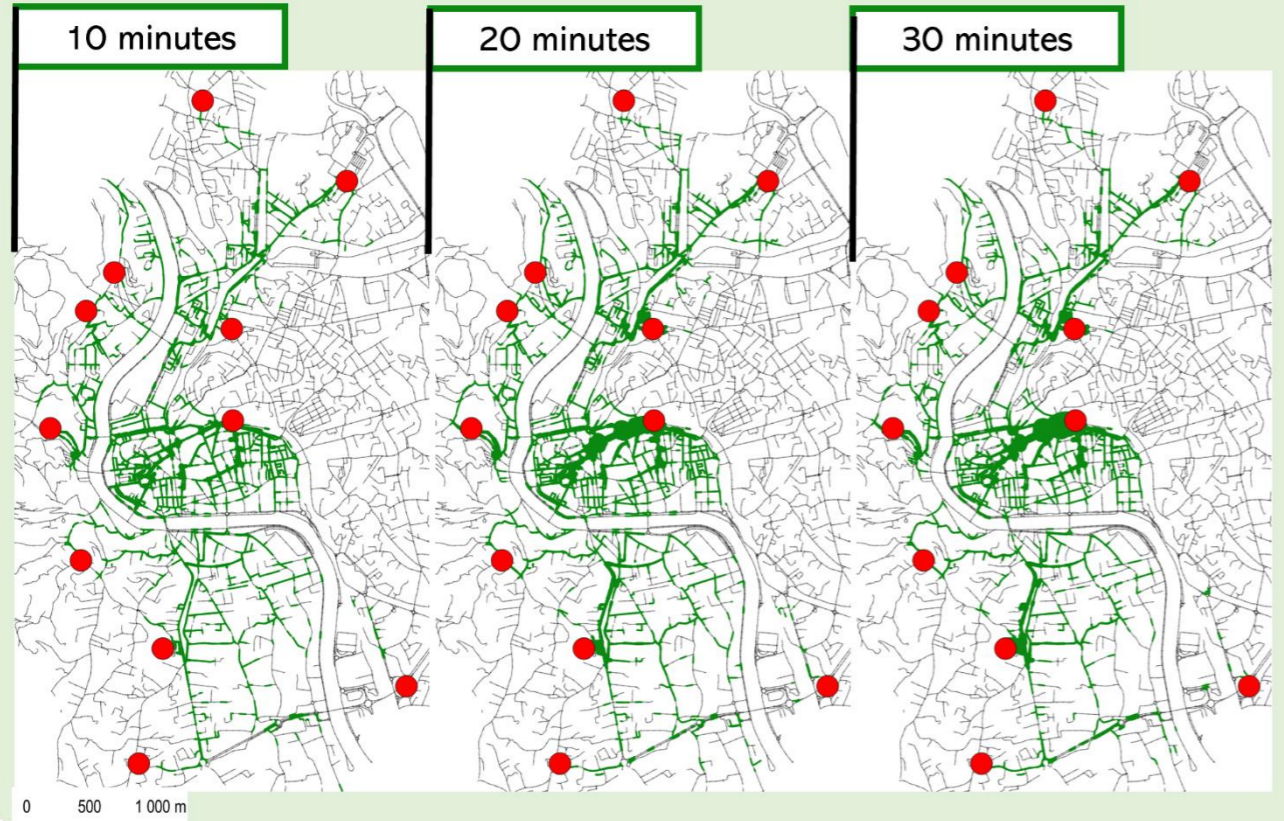
La Synthèse 1.3 présente la courbe de cumul des arrivées obtenues lors de la simulation du scénario S1B. Cinq runs de simulation ont été réalisés. La comparaison des cinq courbes met en évidence un faible écart entre les runs. L'écart moyen relatif à la série temporelle est toujours inférieur à 1% ce qui témoigne d'une faible variabilité de cet indicateur sur ce scénario. La courbe démontre également que le scénario S1B permet l'évacuation de l'ensemble des personnes concernées en moins d'une heure

Les temps de parcours moyen obtenus lors de la simulation donnent des valeurs ne dépassant pas 40 minutes. Le déplacement des personnes, est donc relativement rapide. Les résultats laissent apparaître des isochrones réguliers autour des PRE. Cela s'explique par le caractère standard du scénario : la valeur de B2 (15) limite la présence simultanée d'évacués sur le réseau, lesquels rejoignent le PRE le plus proche en utilisant le chemin le plus court. Le scénario S1B est centré sur la commune Alésienne. Le calibrage des paramètres est cependant équivalent au scénario précédent (S1).

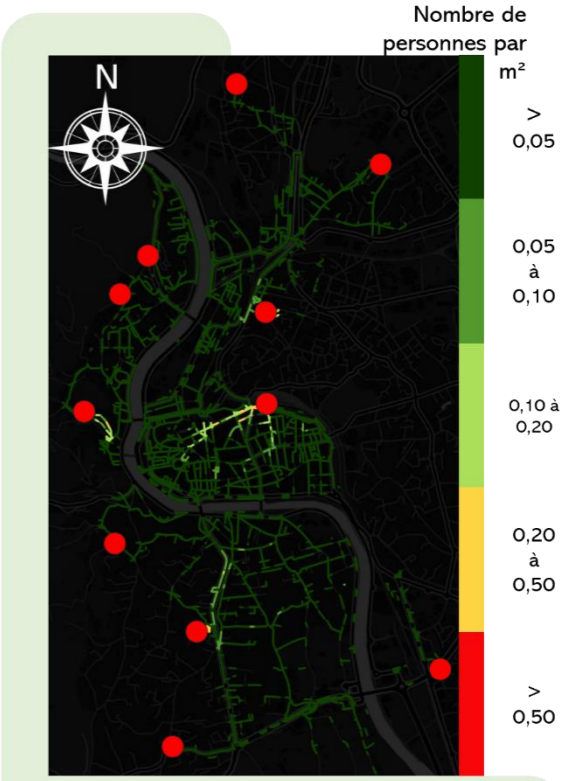
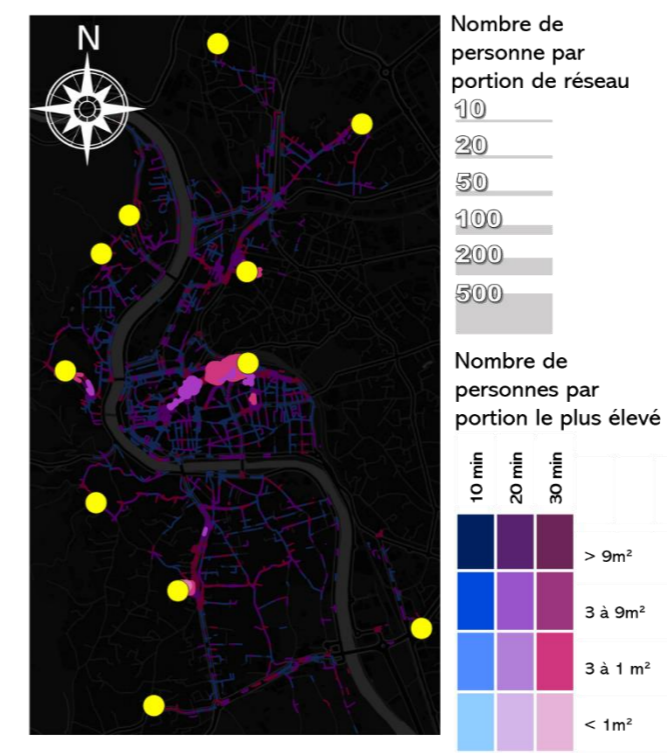
La spatialité des temps de parcours observables dans le cadre du scénario S1B correspond aux valeurs minimales généralement observées dans l'ensemble des configurations paramétriques testées dans ce chapitre et le précédent. Une certaine hétérogénéité est soulignée. L'est du quartier de la Prairie obtient les scores de temps de parcours maximaux. Toutefois, cette hétérogénéité semble induite par la distance aux PRE, aucun autre facteur n'interférant. C'est peu surprenant dans la mesure où la configuration du scénario S1B entraîne des déplacements peu contraints.

Les densités locales d'évacués entraînent des effets de ralentissement, et augmentent les temps de parcours. Dans sa configuration, le S1B limite supposément ce phénomène. B2 étant paramétré sur 15 minutes, les déplacements sont suffisamment étalés dans le temps. L'indicateur de fréquentation des axes corrobore cela. D'un point de vue global, et relativement aux observations pouvant être faites dans d'autres configurations paramétriques, les axes ne sont que peu chargés, bien que 15 minutes après le démarrage de l'évacuation l'ensemble des personnes concernées soient sur le réseau.

1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau

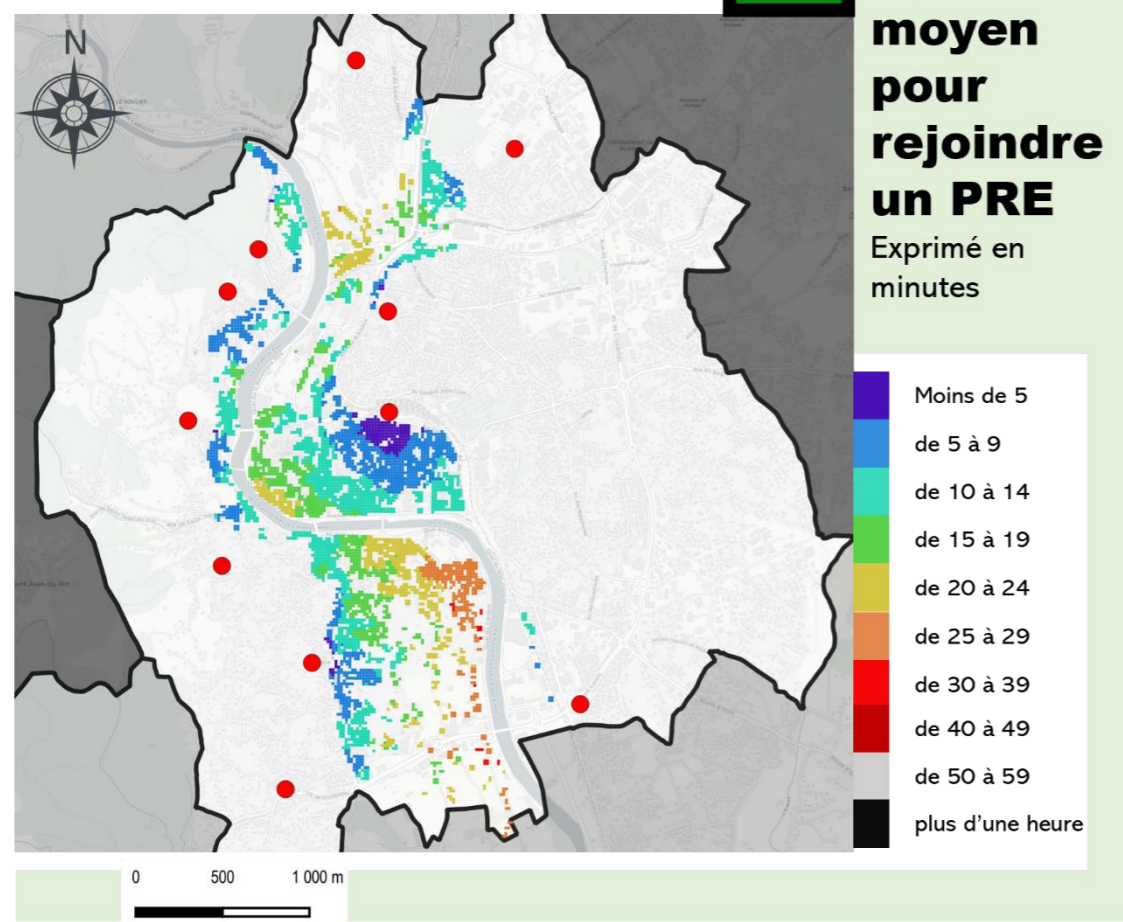


2 Surface disponible par personne

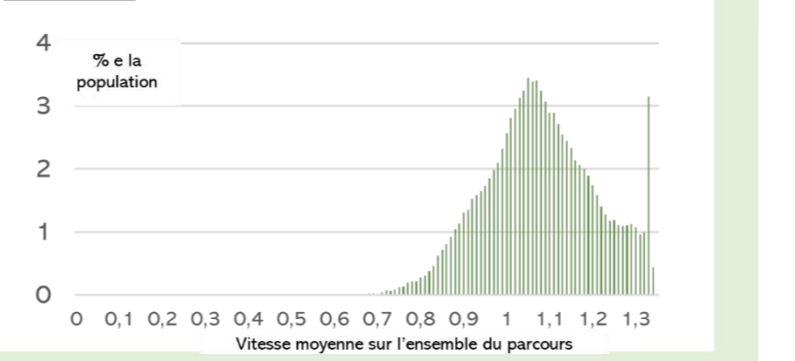


3 Densité de personnes

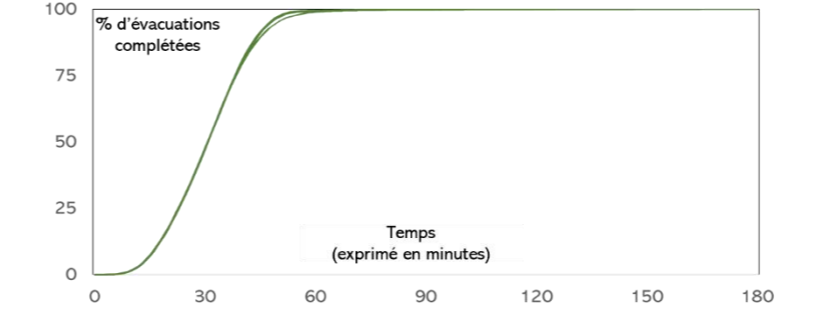
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE



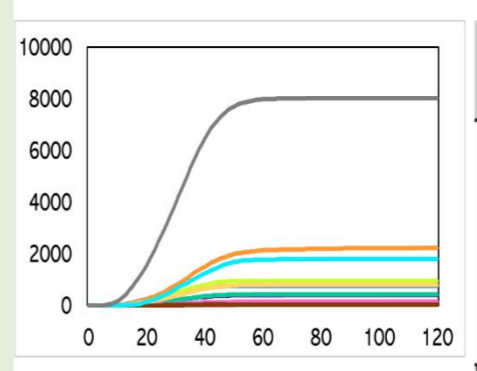
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



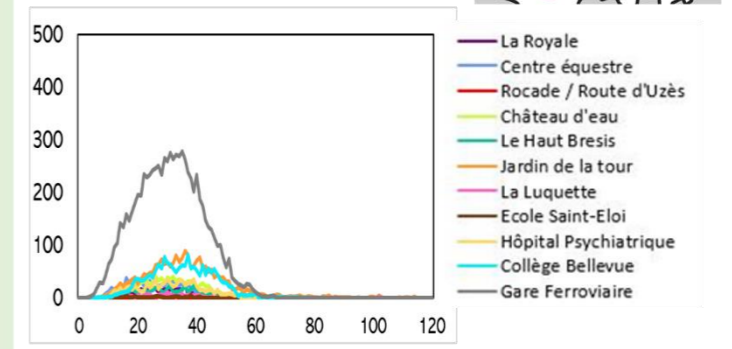
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



7 Suivi des arrivées par PRE

IV.2.2 S1P

Le Tableau 33 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S1P. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacuée en 15 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	no	Il n'y a aucun phénomène de ruissellement.
C1 Contexte 1	Nt	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « week-end ».
C2 Contexte 2	Oui	Les ponts sont ouverts à la circulation.

Tableau 33 - Initialisation des paramètres de la simulation S1P

Le scénario S1P est similaire au scénario S1B, la seule différence résidant dans la possibilité qu'ont les personnes de traverser le Gardon. Le scénario S1B a mis en évidence une forte demande vers le PRE numéro 10 (gare ferroviaire). Cette demande est en partie causée par l'impossibilité de traverser le Gardon. Pour une large frange de la population, le PRE le plus proche devient alors la gare ferroviaire. Le S1P permet donc de vérifier dans quelle mesure l'ouverture des ponts au passage permet de mieux équilibrer la demande entre les PRE.

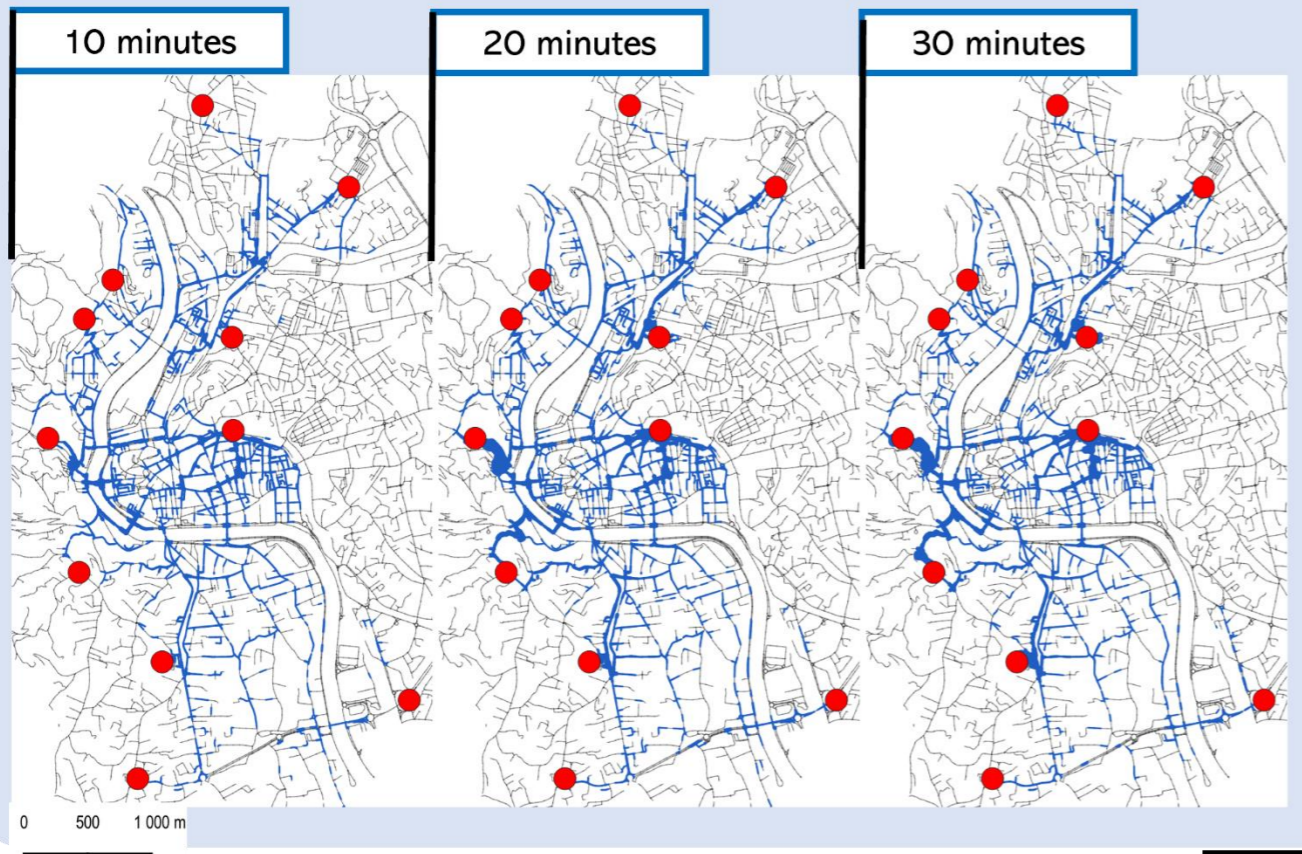
La Synthèse 2.1 permet de constater la redistribution des flux durant l'évacuation. Le nombre de personnes se dirigeant vers le PRE de la gare ferroviaire est moins important (Synthèse 2.5). En conséquence, la surface disponible par individu autour de la gare ferroviaire est plus élevée que dans S1B (Synthèse 2.2). Le rééquilibrage des flux entraîne une conséquence supplémentaire. Les personnes ne se dirigeant plus vers la gare ferroviaire sont redirigées vers les PRE 03 et 04, respectivement celui du château d'eau et celui du haut-bresis. Cela entraîne une augmentation substantielle du nombre de personnes sur les portions de réseau autour de ces axes (Synthèse 2.1). La

surface disponible par individus diminue alors largement, notamment au bout de 30 minutes d'évacuation (Synthèse 2.2).

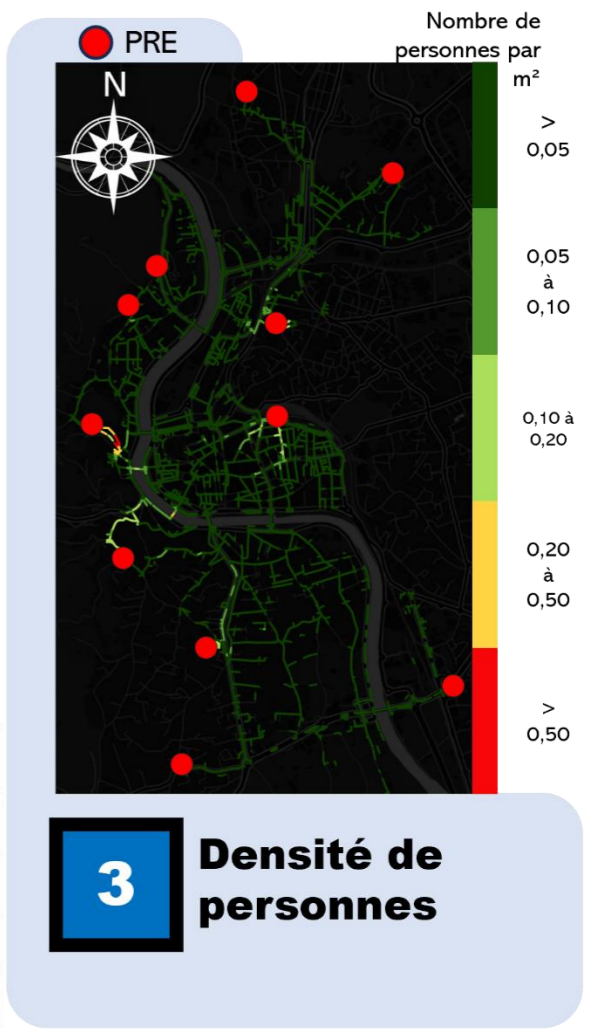
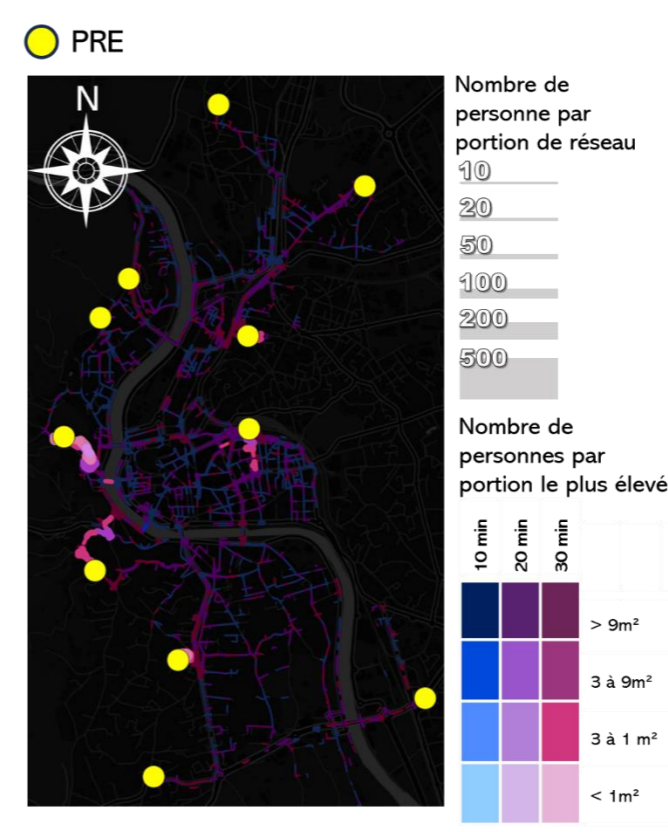
La Synthèse 2.4 affiche les temps de parcours moyens localisés dans le cadre de la simulation du scénario S1P. Les temps de parcours obtenus font partie des plus faibles observés parmi l'ensemble des scénarios simulés. L'indicateur de temps de parcours localisé (Synthèse 2.4) démontre des similarités importantes avec des scénarios proches de la configuration standard de la simulation telles que le S1B par exemple. Le scénario S1P est similaire au S1P dans la calibration des paramètres de la simulation. En revanche, dans le scénario S1P, les personnes peuvent traverser le Gardon. Cette possible traversée du Gardon semble améliorer les temps de parcours des personnes situées à l'est du quartier de la Prairie. Les valeurs maximales observées sont inférieures à 30 minutes, ce qui constitue un score faible pour ce quartier.

La Synthèse 2.5 présente la courbe de cumul des arrivées obtenue lors de la simulation du scénario S1P. Comme pour le scénario S1B, l'écart entre les cinq runs de simulation est négligeable. Dans chacun des runs, plus de 95% de la population peut être évacuée en moins d'une heure. En revanche, l'évacuation des cinq derniers pourcents de la population concernée peut prendre jusqu'à quatre-vingts minutes.

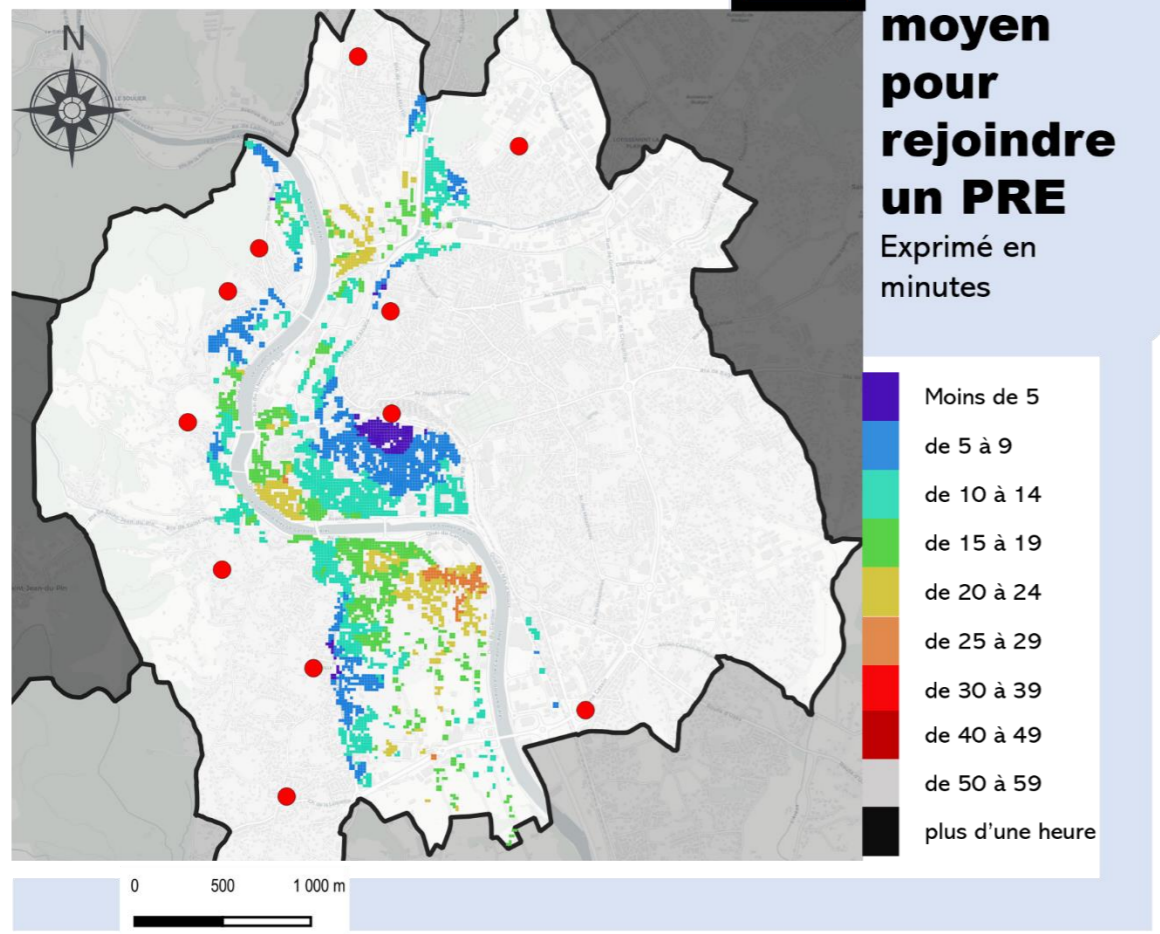
1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau



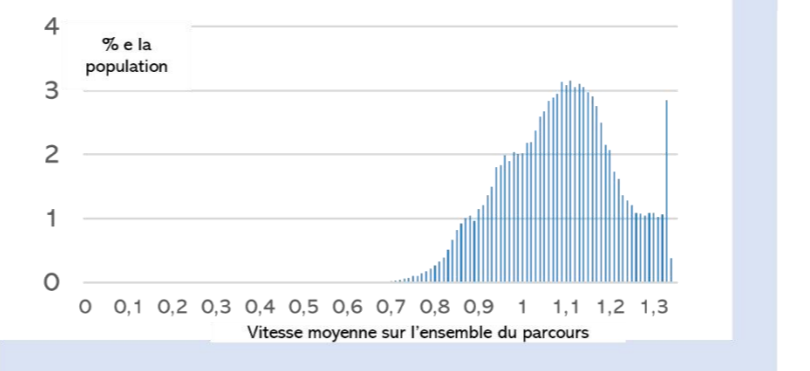
2 Surface disponible par personne



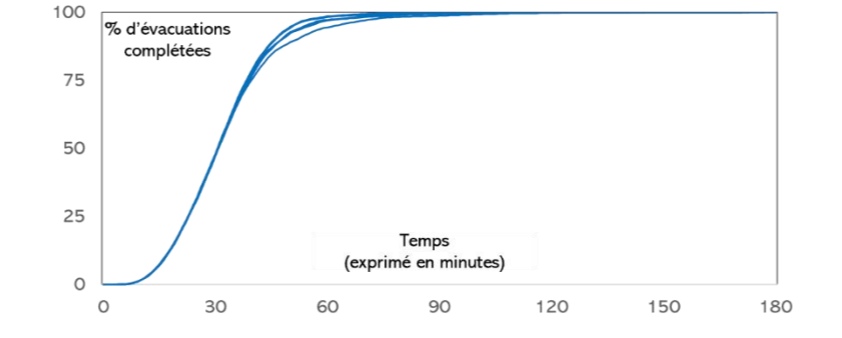
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE



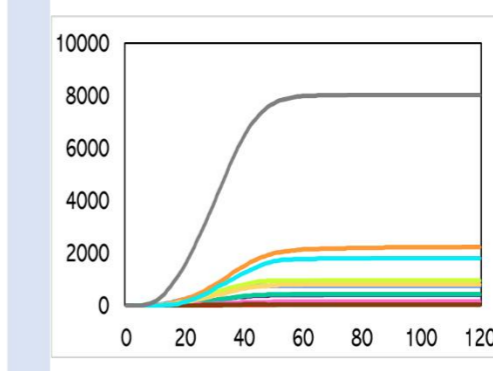
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



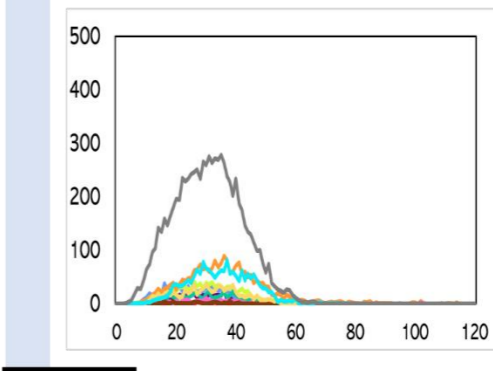
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



Localisation des PRE



- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bresis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

7 Suivi des arrivées par PRE

IV.2.3 S1C

Le Tableau 34 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S1P. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	5	L'ensemble de la population évacue en 30 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PG	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	43	Le ruissellement sur la zone concernée est de 43 centimètres
C1 Contexte 1	Nt	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « week-end ».
C2 Contexte 2	Non	Les ponts ne sont pas ouverts à la circulation.

Tableau 34 - Initialisation des simulations S1C

La configuration paramétrique du scénario S1C est la plus susceptible de provoquer, en théorie, des effets de densité locaux parmi l'ensemble des scénarios incluant une répartition de population nocturne. B2 est fixé à '5', les départs sont donc comprimés dans le temps. D1 est fixé sur 'PG', les personnes ont donc tendance à privilégier les axes principaux lors de leurs déplacements. En plus de cela, un ruissellement de 43 centimètres est ajouté.

Le paramétrage de D1 sur la valeur 'PF' entraîne une augmentation du nombre de personnes sur certains axes comme le met en évidence la Synthèse 4.1. Les flux sont beaucoup moins répartis, moins homogènes. Couplés avec les départs de personnes compactés dans le temps, certaines portions du réseau sont fréquentées par plus de 350 personnes. Cependant, en dépit de ces valeurs plus élevées que dans les scénarios précédents, l'espace disponible par personne n'atteint des valeurs passées que localement. La Synthèse 3.2 met en évidence une diminution locale de l'espace disponible par personne au niveau du PRE de la gare ferroviaire (numéro 10). Les valeurs tombent sous les 3m² disponibles par personne, au bout de 30 minutes

d'évacuation. Ces valeurs sont les plus basses observées jusqu'à présent, elles ne sont cependant pas suffisamment basses pour représenter une gêne significative au déplacement des personnes.

La Synthèse 4.3 met en évidence une densité de personnes comprise entre 0,10 et 0,50 personnes par m² au niveau de l'IRIS centre-ville. La densité est plus élevée sur une partie des portions de réseau menant au PRE de la gare ferroviaire (numéro 10).

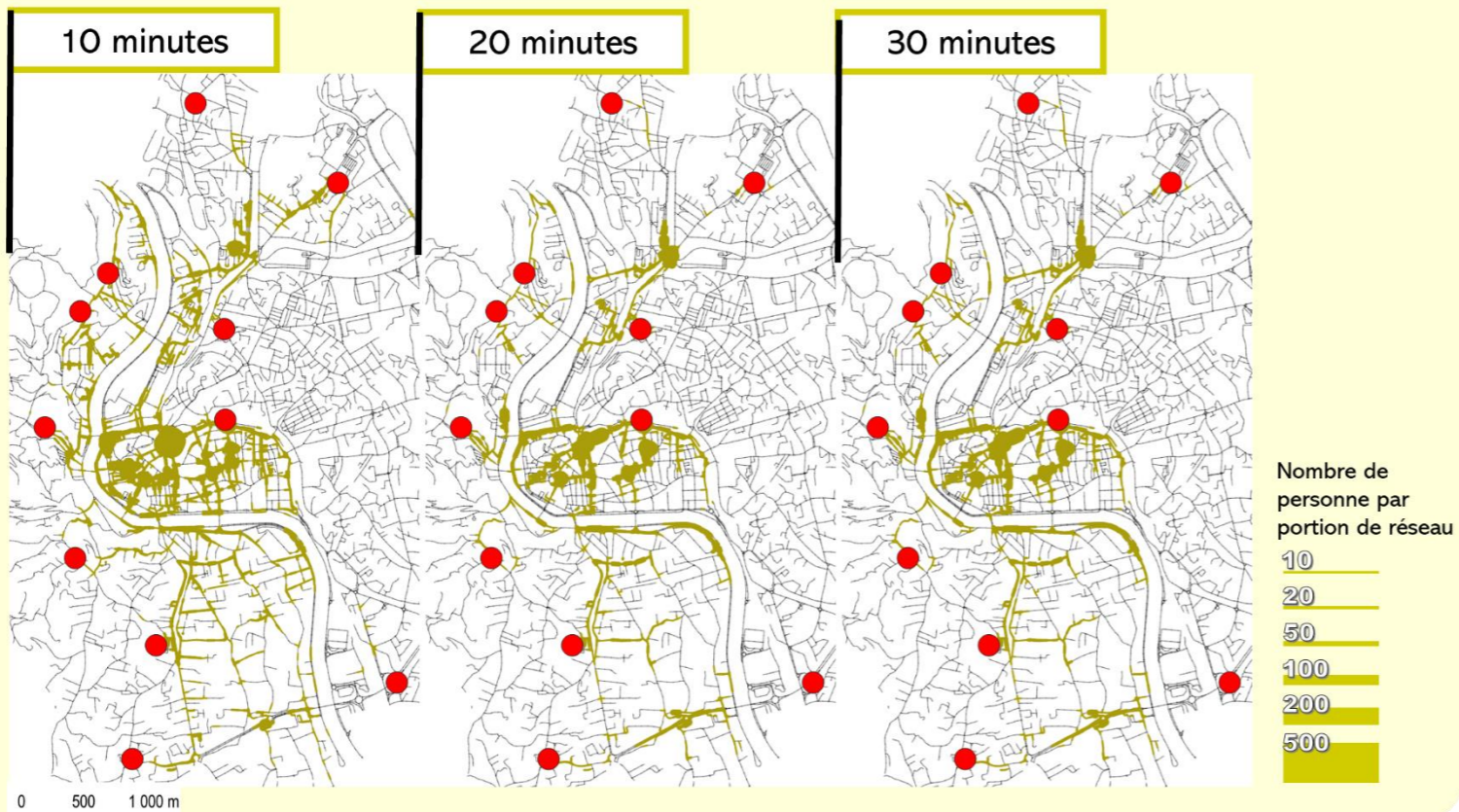
La Synthèse 4.4 met en évidence des temps de parcours obtenus lors de la simulation du scénario S1C significativement élevée que ceux des scénarios précédents. Certaines portions du territoire ont besoin de plus d'une heure afin de se rendre au PRE le plus proche. Ces valeurs peuvent être deux fois plus élevées que celles obtenues lors de la simulation du scénario S1B. Ces valeurs corroborent les courbes de cumul présentées en Synthèse 4.5.

La Synthèse 4.5 présente les courbes de cumul des arrivées obtenues lors de cinq runs de simulation du scénario S1C. On y remarque une forte variabilité des résultats obtenus entre les runs. Les courbes indiquent une évacuation possiblement complétée dans une période comprise entre 60 et 90 minutes.

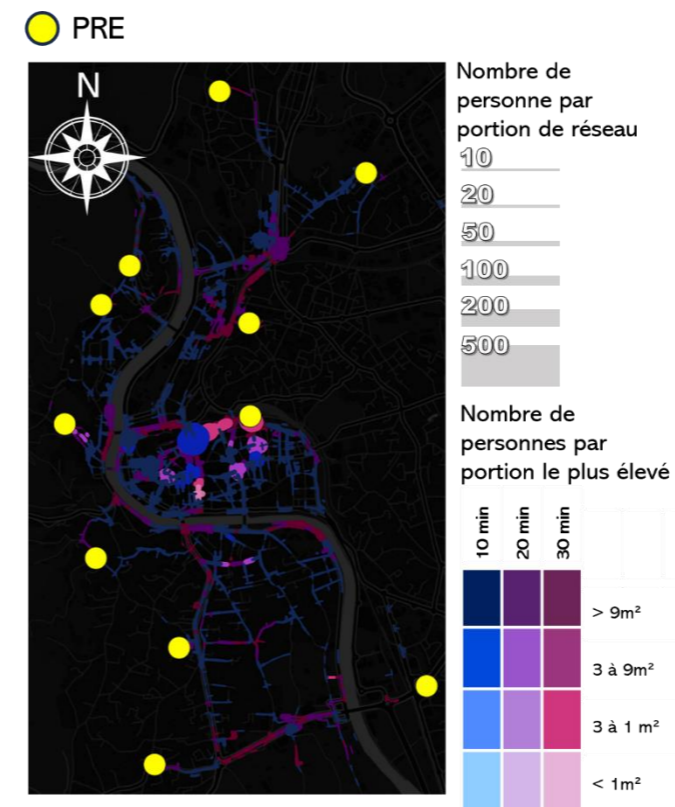
Cette variabilité des courbes est due à l'ajout du ruissellement. En effet, le départ des personnes est échelonné dans le temps, cela signifie qu'un certain nombre d'entre elles démarrent leur évacuation à chaque seconde. Le choix de ces personnes est aléatoire. Lorsqu'il n'y a pas de ruissellement, ce calcul aléatoire n'influe que peu sur les courbes d'arrivées puisqu'aucun déséquilibre territorial dans la praticabilité du réseau n'est observable. En revanche, lorsque le ruissellement est activé, la sélection aléatoire des personnes par le paramètre B2 est importante, dans la mesure où les personnes voient la praticabilité du réseau sur leur itinéraire réduite sur un transect plus ou moins long en fonction de leur position de départ. Une variabilité est donc observable, en revanche, elle n'est pas caractérisée.

Les résultats obtenus dans le cadre de la simulation du scénario S1C sont largement influencés par la présence de ruissellement. La vitesse de déplacement moyenne relevée pour l'ensemble des évacués fait état de valeurs pouvant être inférieures à 0,5 m/s (Synthèse 4.6), mais c'est une valeur trop faible pour être imputée au seul ruissellement. Par la nature de son paramétrage, le scénario S1C génère des effets de densité qui dégradent le processus global d'évacuation de par leur influence négative sur le déplacement des personnes.

1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau

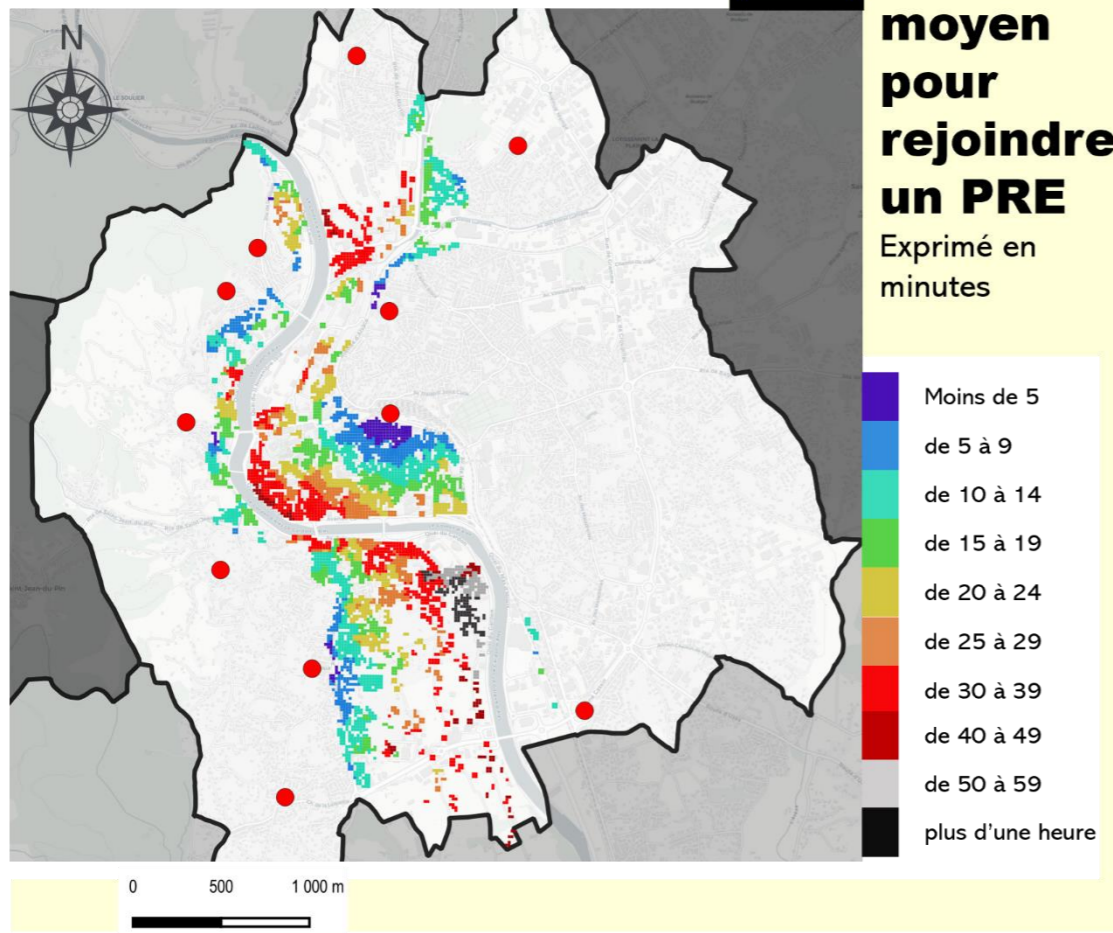


2 Surface disponible par personne

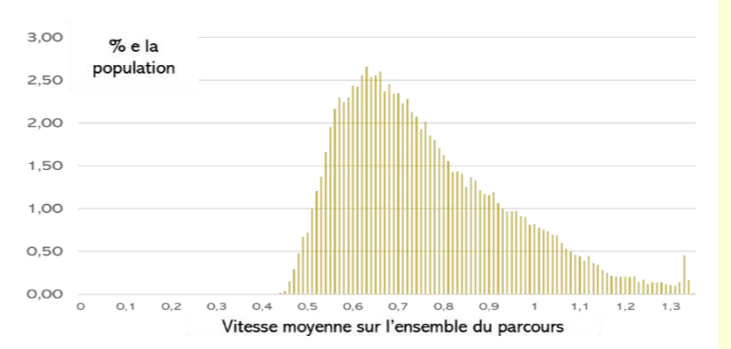


3 Densité de personnes

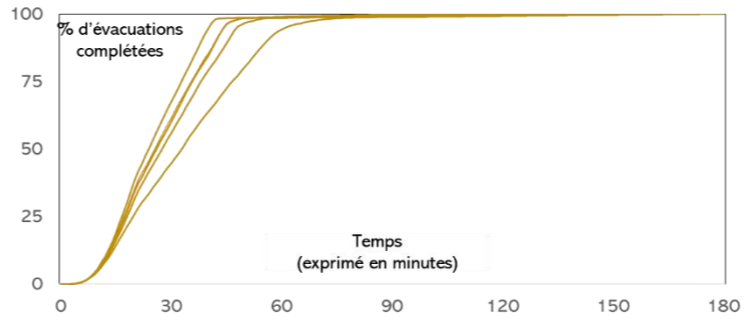
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE
Exprimé en minutes



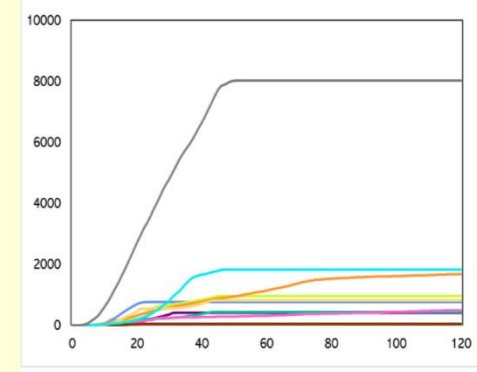
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



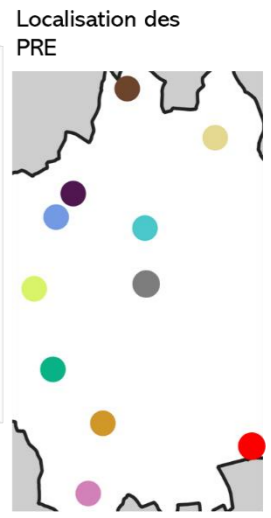
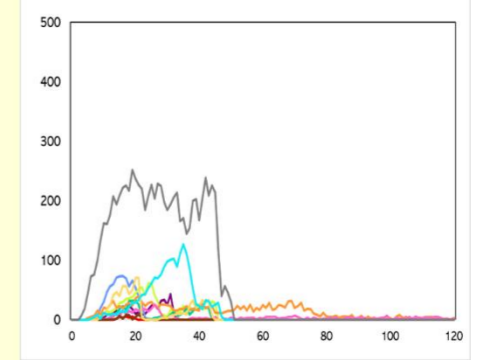
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



7 Suivi des arrivées par PRE

- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bresis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

IV.2.4 S2B

Le Tableau 35 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S2B. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacuée en 15 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	0	Il n'y a pas de ruissellement
C1 Contexte 1	3	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « semaine ».
C2 Contexte 2	Non	Les ponts ne sont pas ouverts à la circulation.

Tableau 35 - Initialisation des paramètres S2B

Le scénario S2B est similaire au scénario S1B, la seule différence réside dans l'utilisation d'une configuration de répartition spatiale de la population différente. La couche utilisée correspond à l'estimation produite concernant une journée ouvrée.

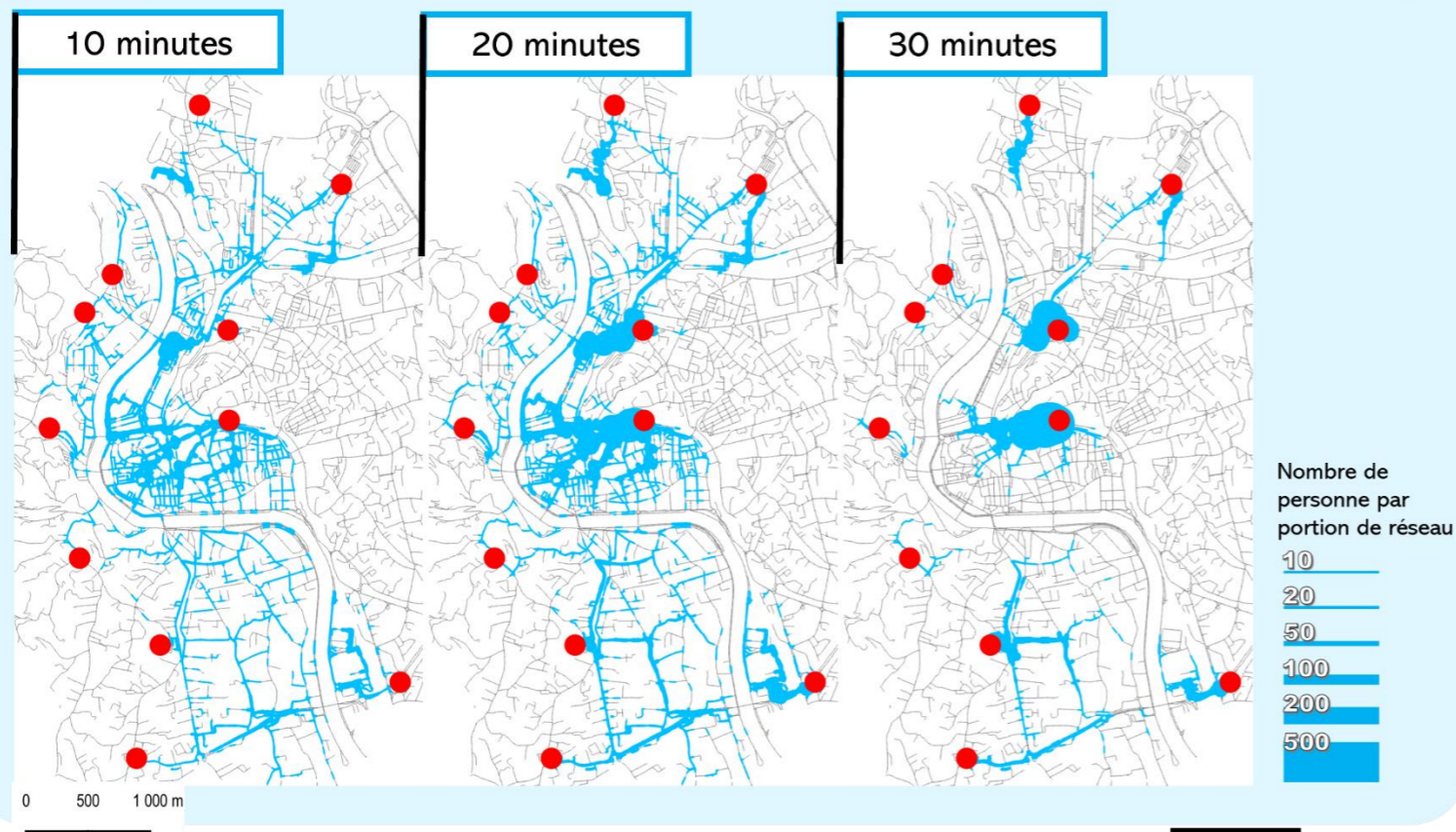
Le nombre de personnes par portion de route relevé dans le cadre de la simulation du scénario S2B démontre une répartition homogène de cette dernière sur le réseau (Synthèse 5.1). Le PRE numéro 10 draine, comme dans une majorité de scénarios, une large part de la population totale. Couplé avec le paramétrage de B2 sur '15' une légère accumulation de personnes est donc visible au bout de trente minutes d'évacuation.

La Synthèse 5.2 démontre cependant que malgré l'accumulation de personnes près du PRE numéro 10, les conditions de déplacement ne sont pas significativement altérées. En effet, les valeurs maximales relevées indiquent un espace disponible par personne ne descendant pas en dessous du seuil de 3m². Cela correspond à une avenue fréquentée, mais ne constitue pas une gêne pour le déplacement des personnes. Ainsi la densité de personnes ne dépasse jamais les 0,5 personnes par m² (Synthèse 5.3). Là encore, il s'agit de valeurs indiquant l'absence d'effets de densité pouvant ralentir les personnes.

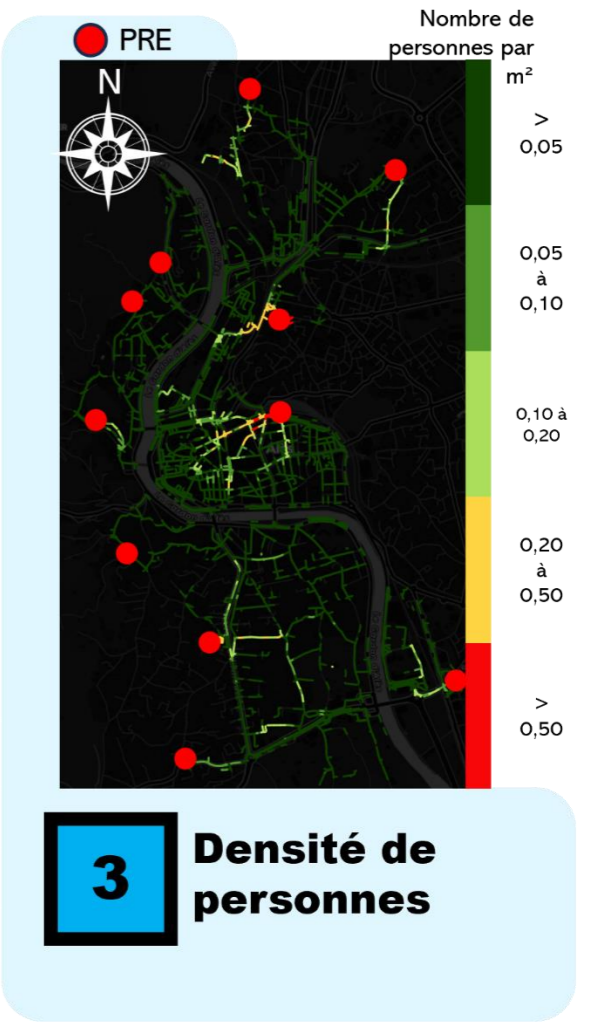
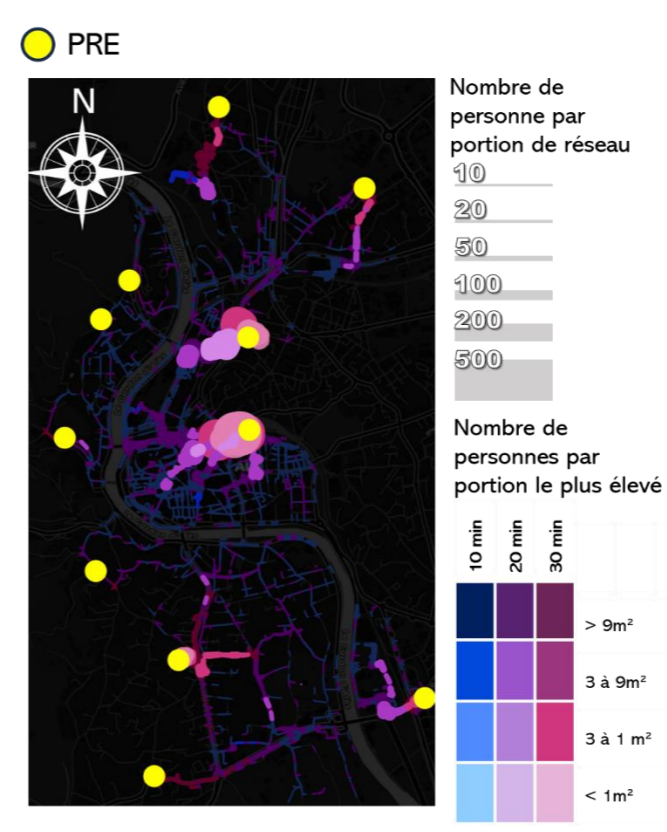
Le scénario S2B implique une augmentation de la population présente au sein de la ZPI, cette augmentation atteint près de 15%. La Synthèse 5.4 met en évidence un faible impact de cette augmentation de la population sur le temps de parcours des personnes. Un rallongement des temps de parcours est toutefois mis en évidence au niveau de la partie Est du quartier de la prairie. Plus encore, cet indicateur est moyenné, cela signifie que le temps de parcours à l'échelle d'un carreau est égal à la moyenne des temps de parcours de l'ensemble des personnes dont le départ s'est effectué au niveau de ce carreau. Quelques valeurs exceptionnelles ne sont pas exclues.

La Synthèse 5.5 démontre l'existence de ces exceptions. L'évacuation de l'ensemble de la population nécessite près de deux heures. Quand il faut entre 60 et 70 minutes pour évacuer 90% de la population, suivant les runs, l'évacuation des 10 derniers pourcents peut nécessiter 60 minutes supplémentaires. Si l'on en croit la Synthèse 5.7, deux PRE reçoivent encore des évacués entre 80 et 120 minutes après le démarrage de l'évacuation. Il s'agit des PRE numéro 5 et 6, respectivement les Jardins de la tour et la Luquette. Ce sont les deux PRE situés à proximité du quartier de la Prairie.

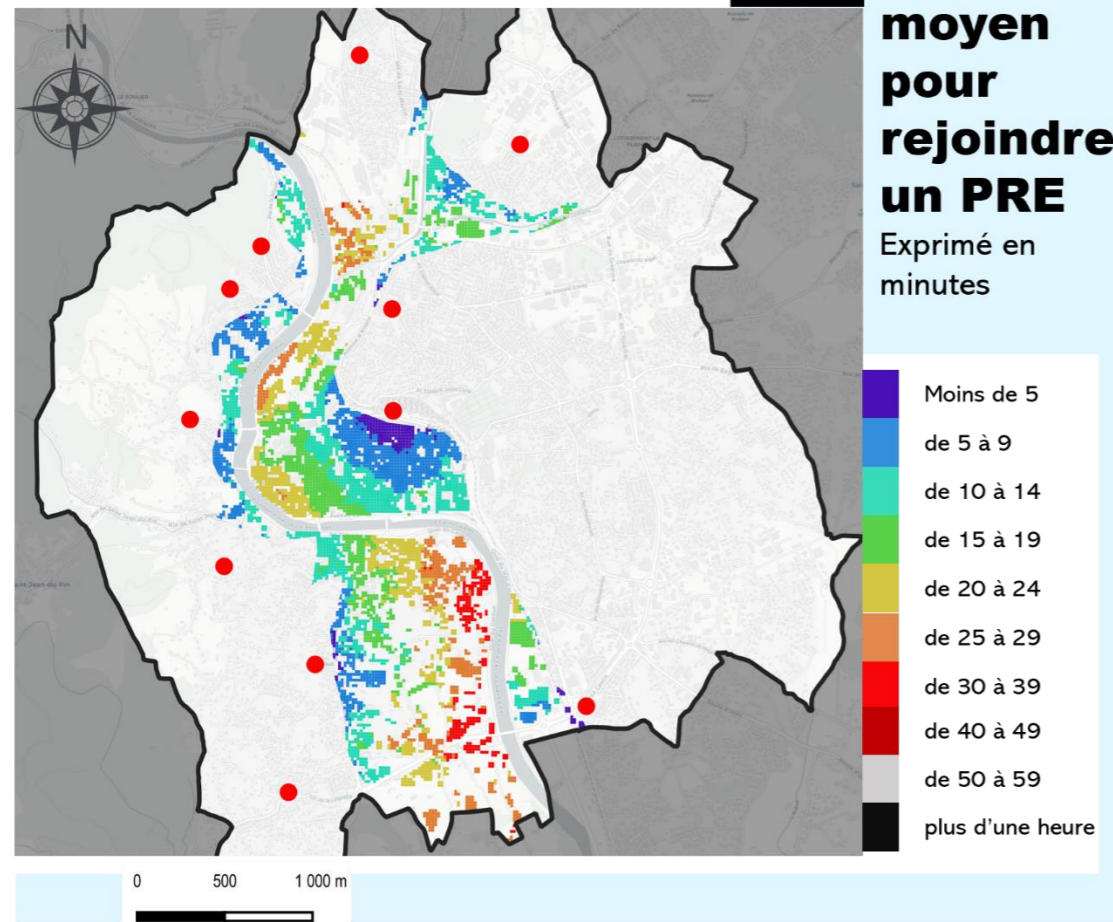
1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau



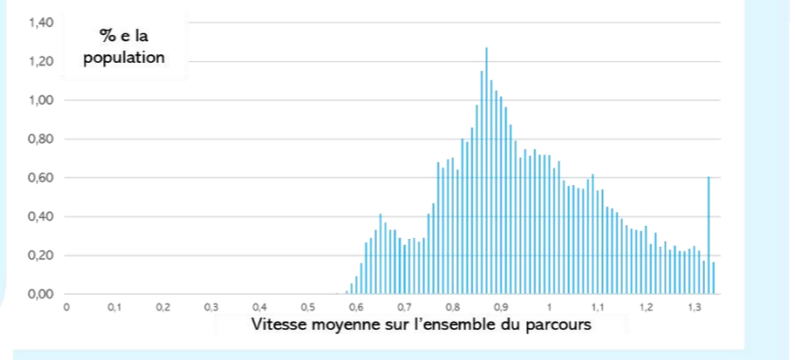
2 Surface disponible par personne



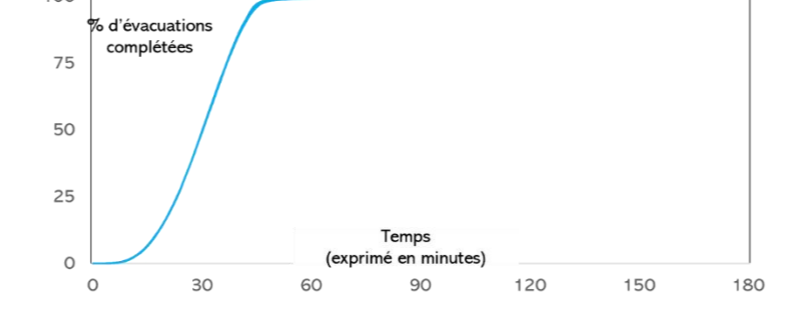
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE
Exprimé en minutes



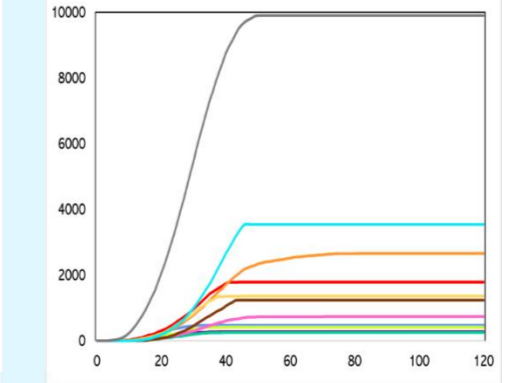
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



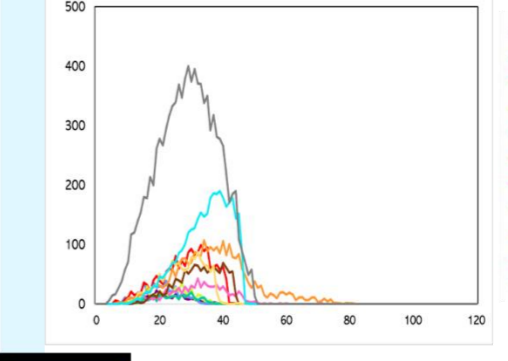
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



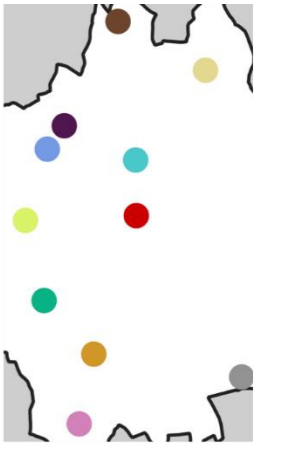
Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



Localisation des PRE



7 Suivi des arrivées par PRE

- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bresis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

IV.2.5 S2C

Le Tableau 36 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S2C. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	5	L'ensemble de la population évacuée en 30 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PG	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	43	Le ruissellement sur la zone concernée est de 43 centimètres.
C1 Contexte 1	3	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « semaine ».
C2 Contexte 2	Non	Les ponts sont fermés à la circulation.

Tableau 36 - Initialisation des paramètres S2C

Le scénario S2C est similaire au scénario S1C, seule la donnée d'entrée sur la distribution spatiale de la population est modifiée. Le scénario S1C a montré des résultats variant significativement de ceux issus du scénario S1B. Ces différences ont été observées à cause de l'augmentation des effets locaux de densité, dus au rythme des départs plus élevés. Les différences entre les scénarios S2B et S2C sont du même ordre. Toutefois, la population présente au sein de la zone d'étude est plus élevée dans les scénarios S2 par rapport aux scénarios S1. Les différences entre S2B et S1C devraient être plus marquées encore que celles entre S1B et S1C.

La Synthèse 6.1 met effectivement en évidence des portions de réseau dont les relevés de fréquentations s'approchent des 500 personnes. Ce sont les mêmes portions de réseau identifiées dans les scénarios précédents. Il s'agit des axes à proximité de la gare ferroviaire. Sur ces axes, la surface disponible par personne peut descendre en dessous du m^2 . La Synthèse 6.2 met en évidence un espace disponible par personne pouvant être inférieur à $1m^2$ au niveau de l'avenue du Général de Gaulle, cette valeur a été relevée à 10 minutes et 20 minutes après le démarrage de l'évacuation, il est

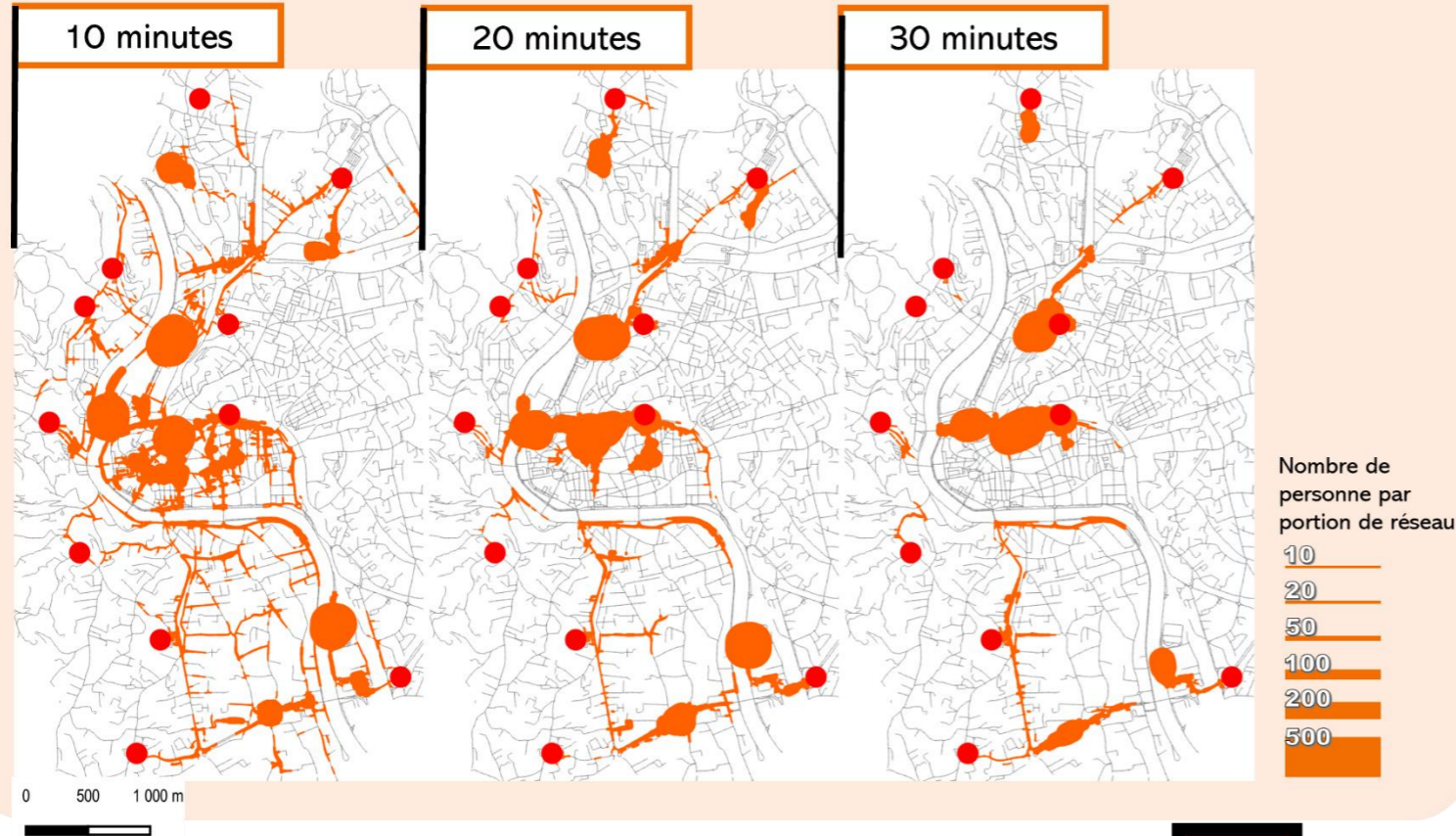
possible qu'une telle valeur ait été maintenue entre ces deux mesures. Cela correspond à une densité pouvant dépasser 0.5 personnes par m² (Synthèse 6.3).

Ces valeurs de densité sont engendrées par la répartition spatiale de la population utilisée en entrée de simulation ainsi que par la configuration paramétrique implémentée. Le scénario S2B, pour une répartition spatiale de la population équivalente, permettait l'observation de flux de piétons relativement fluides. Le scénario S2C, en revanche, contribue à faire augmenter rapidement la densité de personnes, notamment en centre-ville.

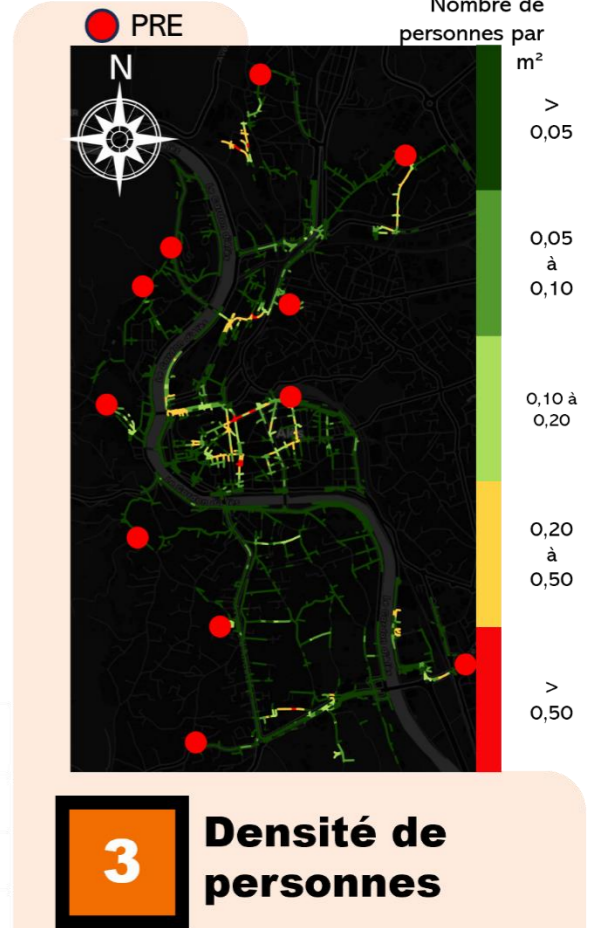
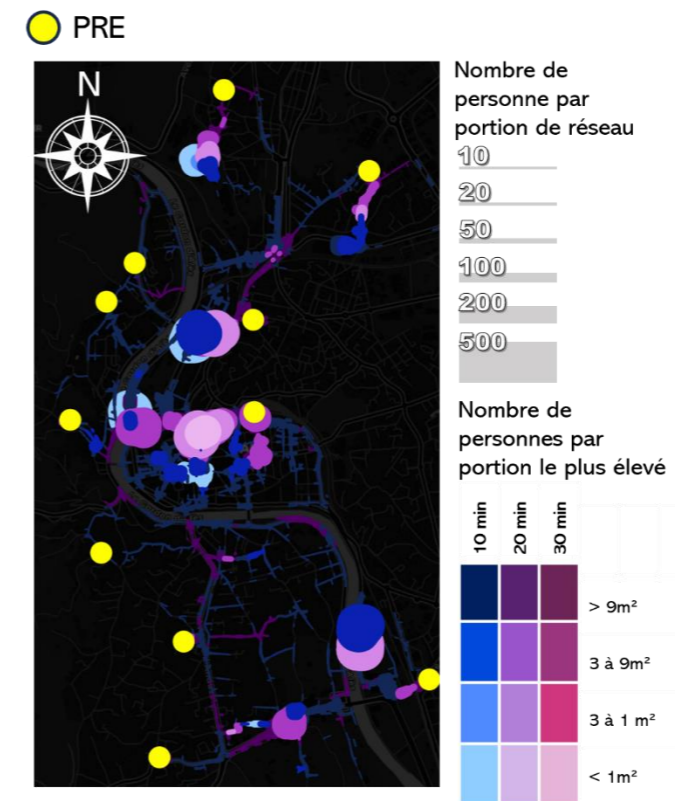
La Synthèse 6.4 met en évidence l'augmentation significative des temps de parcours moyens sur une large partie de la commune. Les zones concernées sont celles à proximité du Gardon, touchée par des effets de ruissellement. L'augmentation des temps de parcours dans ces zones n'est pas uniquement due au ruissellement : la courbe des départs y contribue également en augmentant la taille des flux de piétons, du fait du délai de départ plus faible. La Synthèse 6.5 met en évidence des vitesses de déplacement faibles, elles sont en deçà de celles observées dans l'ensemble des autres scénarios. De telles vitesses ne peuvent être uniquement du fait de la présence de ruissellement : ce dernier peut contribuer à réduire la vitesse des personnes jusqu'à 0.7 m/s, en deçà de cette valeur, d'autres facteurs sont à considérer. Le départ des personnes sur une courte période contribue également à augmenter les temps de parcours en augmentant la taille des flux piétons.

La Synthèse 6.7 apporte de l'information supplémentaire sur d'éventuels effets de densité locaux. Un déséquilibre important dans la répartition des évacués entre les PRE est observable. Le PRE de la gare ferroviaire draine près de 10 000 personnes, ce qui correspond à près de la moitié de la population générée en démarrage de simulation. Cela est imputable à la répartition spatiale de la population considérée dans ce cas de figure.

1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau

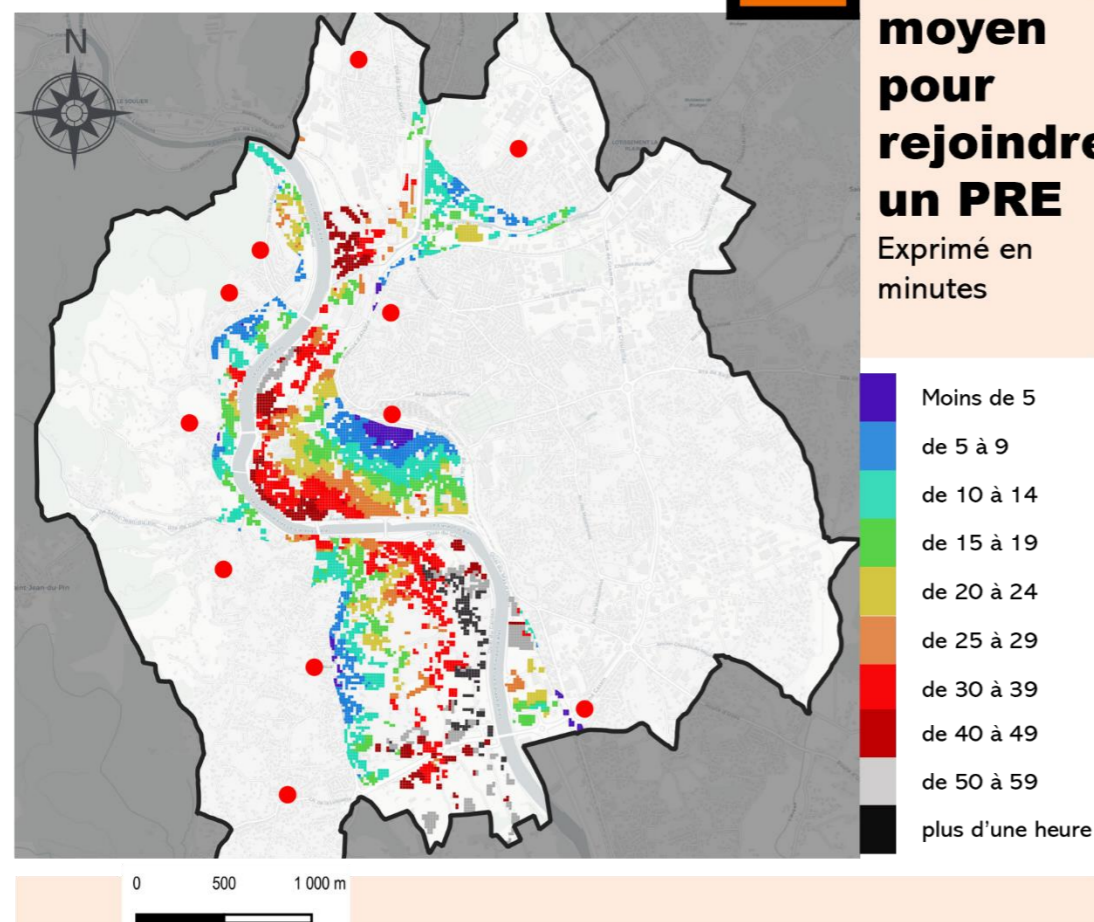


2 Surface disponible par personne

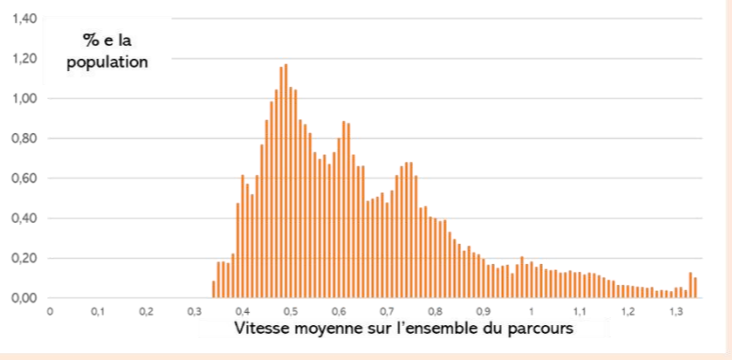


3 Densité de personnes

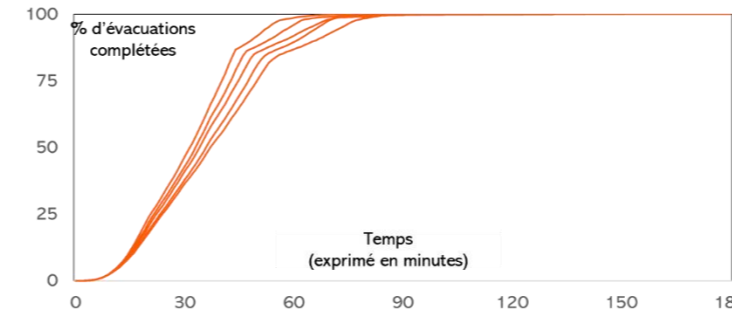
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE
Exprimé en minutes



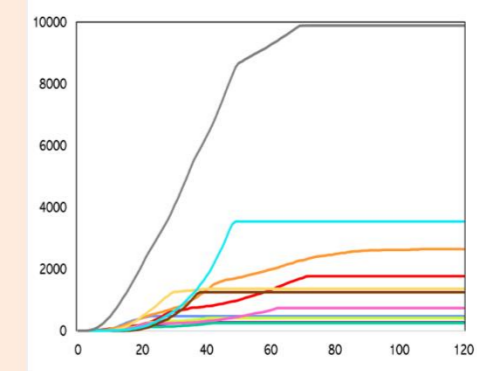
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



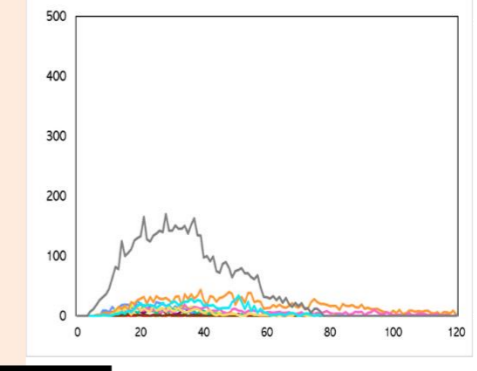
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



7 Suivi des arrivées par PRE

- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bresis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

IV.2.6 S2P

Le Tableau 37 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S2P. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacuée en 30 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Ruissellement	No	Il n'y a pas de ruissellement
C1 Contexte 1	3	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « semaine ».
C2 Contexte 2	Oui	Les ponts sont ouverts à la circulation.

Tableau 37 – Initialisation des paramètres S2P

Le scénario S2B correspond au scénario S2P à la différence que les ponts sont ouverts à la circulation.

L'ouverture des ponts tend à augmenter systématiquement les flux de piétons à l'ouest du Gardon. La répartition spatiale de la population utilisée dans le S2P augmente la population présente au sein de la ZPI. La Synthèse 7.1 met en évidence des flux piétons beaucoup plus importants en comparaison du scénario S2B, notamment en direction des PRE 4 et 5. Cela pose la question de la capacité qu'a le réseau viaire situé à l'ouest du Gardon à recevoir des flux de piétons importants. La Synthèse 7.2 souligne une diminution de la surface disponible par personne à l'ouest du Gardon, la Synthèse 6.3 confirme une densité élevée de personnes près du PRE 04. Cela montre qu'en cas d'ouverture des ponts, une partie des personnes qui se dirigent vers le PRE 10 (gare ferroviaire) lorsque les ponts sont fermés, se dirigent alors vers le PRE 04. Cependant, la nature du réseau viaire à l'ouest du Gardon, et notamment autour du PRE 04, n'est pas adaptée à un tel flux de personnes. Dans ces conditions, l'ouverture des ponts n'améliore pas l'évacuation de ces personnes. Bien que la possibilité de traverser le Gardon permette à une partie de la population du centre-

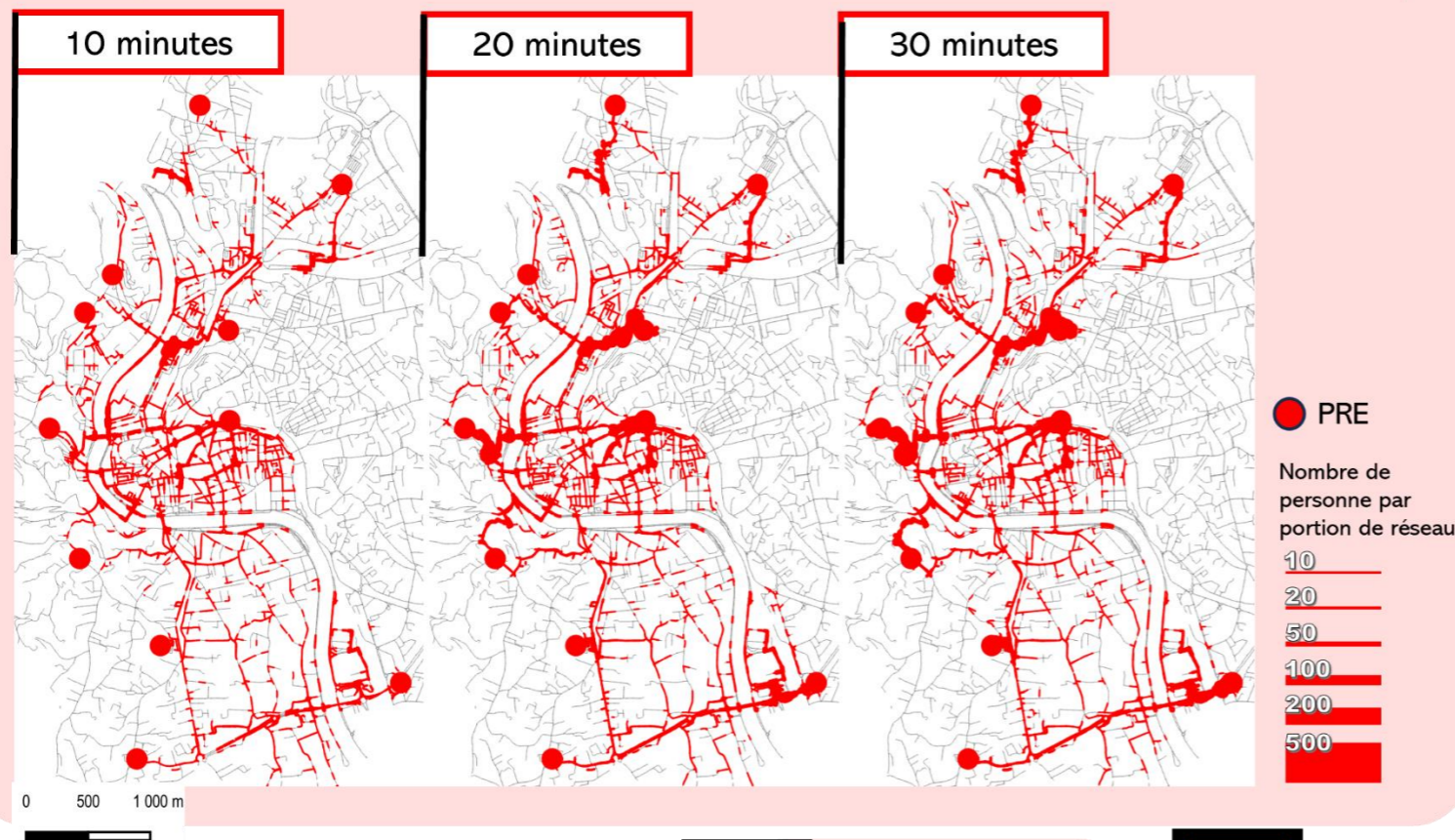
ville d'atteindre le PRE 04, au lieu du 10, plus proche, l'augmentation des flux crée de la congestion.

Les temps de parcours ne dépassent pas, dans ce scénario, les 40 minutes. Ils sont même situés, dans leur grande majorité, sous la barre de la demi-heure. Mieux encore seul les personnes dont le départ s'effectue depuis le quartier de la prairie semble avoir besoin de plus de vingt-cinq minutes afin de compléter leur évacuation. Cependant, dans ce scénario, les temps de parcours sont globalement plus longs que dans un scénario similaire ou les ponts seraient fermés. La modification du réseau et l'accessibilité de nouveau PRE entraîne une redistribution des mobilités vers des axes viaires incapables de les supporter.

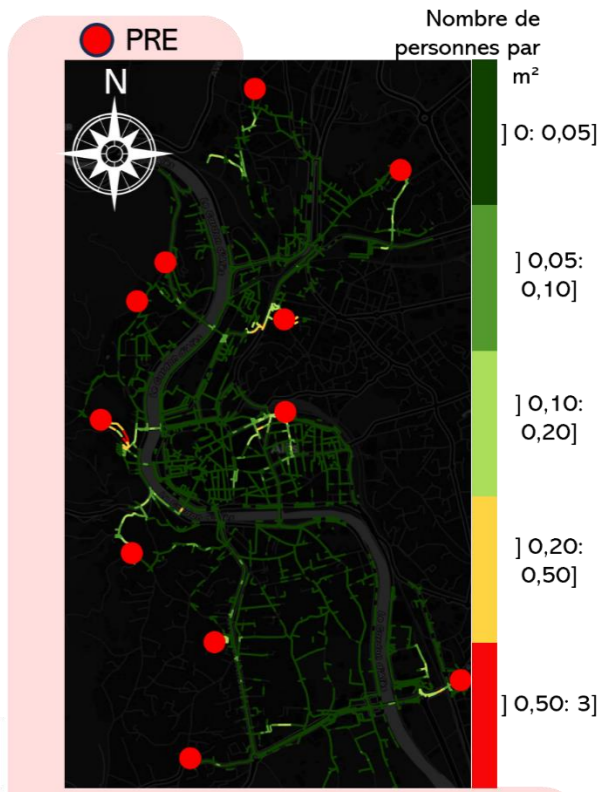
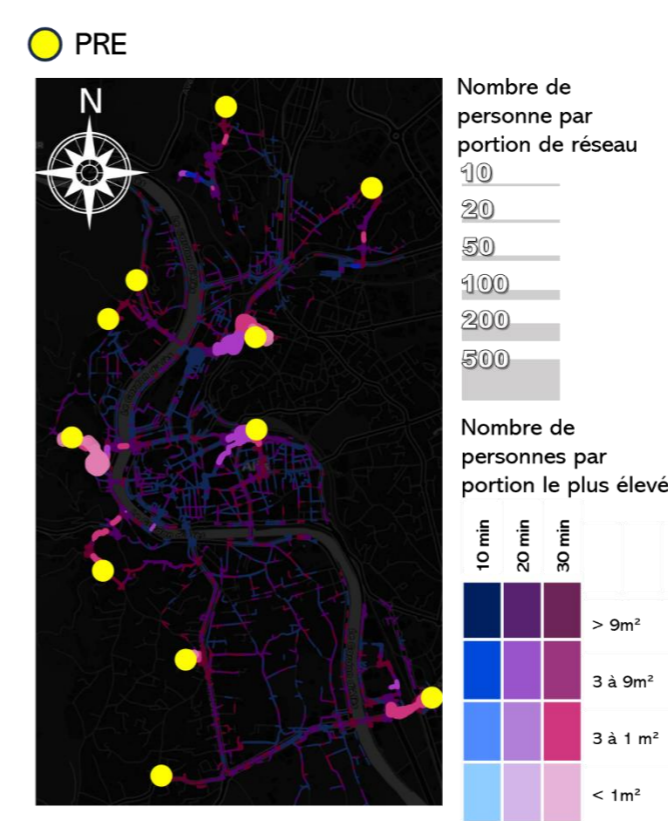
Cette efficacité moindre des déplacements se traduit sur la courbe de cumul des arrivées en Synthèse 7.5. Les courbes démontrent une évacuation complète possible en une heure dans le meilleur des cas, l'évacuation peut prendre un peu plus de temps pour une marge variable de la population, et durer près de 90 minutes. C'est plus élevé que dans le scénario S2B par exemple.

La Synthèse 7.6 démontre des vitesses de déplacement plus faibles que dans le scénario S2B, cela est une conséquence de la redistribution des mobilités discutés dans le paragraphe précédent. A ce propos, la Synthèse 7.7 met bien en avant une augmentation substantielle des arrivées au niveau du PRE 04. En définitive, dans cette configuration, l'ouverture des ponts ne présente aucun intérêt et risque même de déséquilibrer les mobilités sur le territoire.

1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau

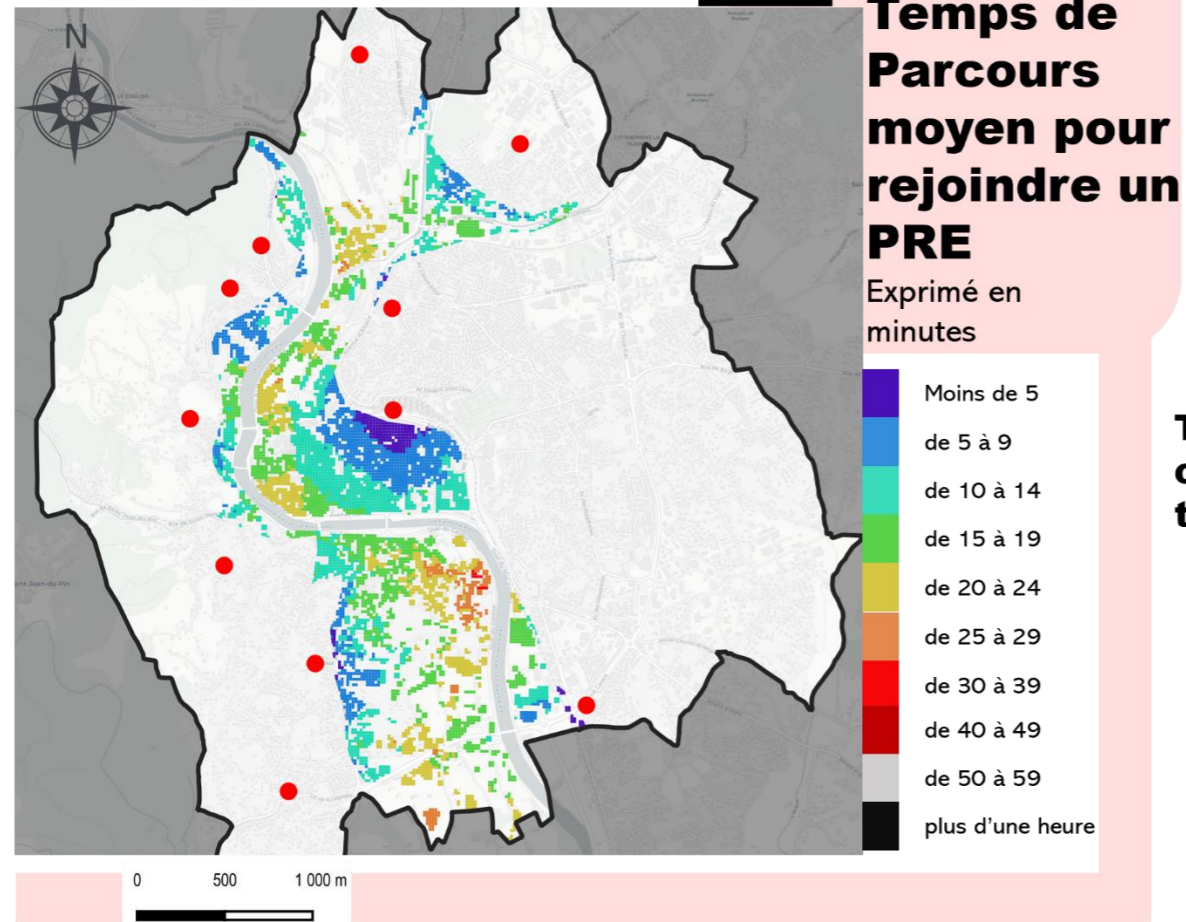


2 Surface disponible par personne

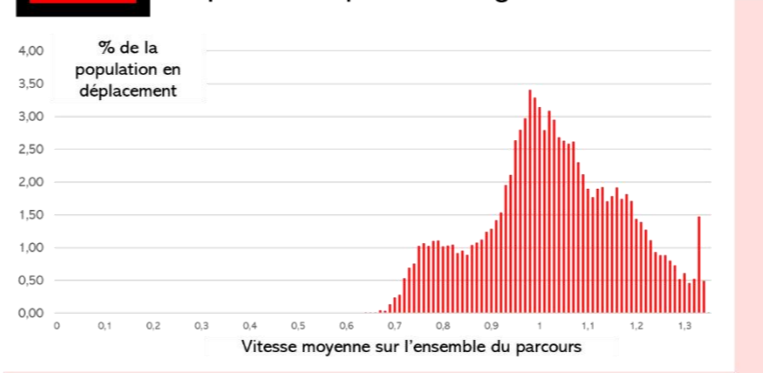


3 Densité de personnes

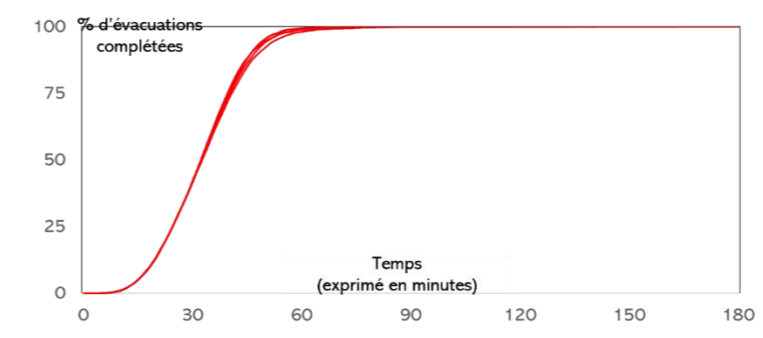
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE



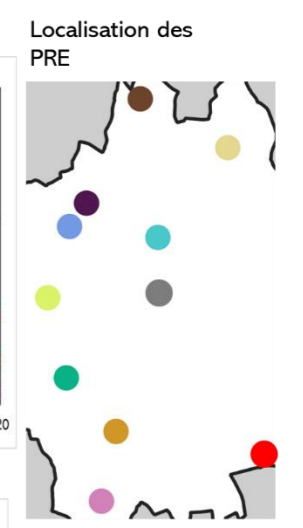
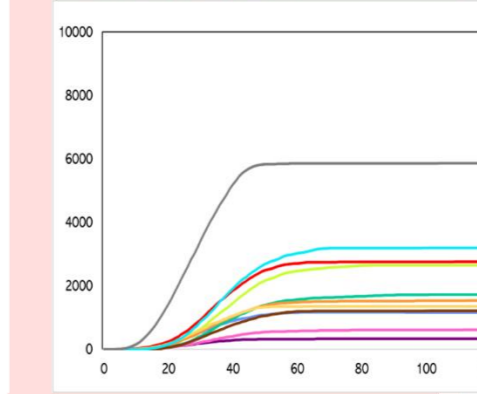
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



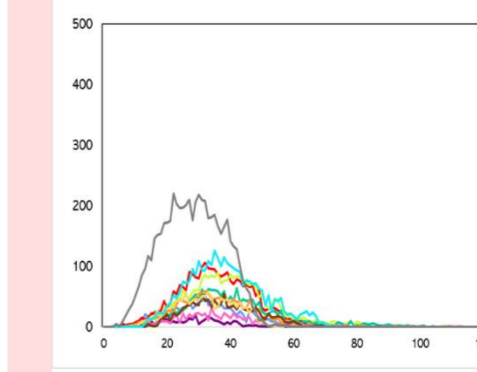
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bresis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

7 Suivi des arrivées par PRE

IV.2.7 S3B

Le Tableau 38 indique l'initialisation des différents paramètres de la simulation afin de simuler le scénario S3B.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacue en 15 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Ruissellement	0	Il n'y a pas de ruissellement
C1 Contexte 1	2	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « week-end ».
C2 Contexte 2	Oui	Les ponts sont fermés à la circulation.

Tableau 38 - Initialisation des paramètres S3B

Le scénario S3B implique une configuration paramétrique similaire aux scénarios S1B et S2B. La couche de répartition spatiale de la population implémentée est différente.

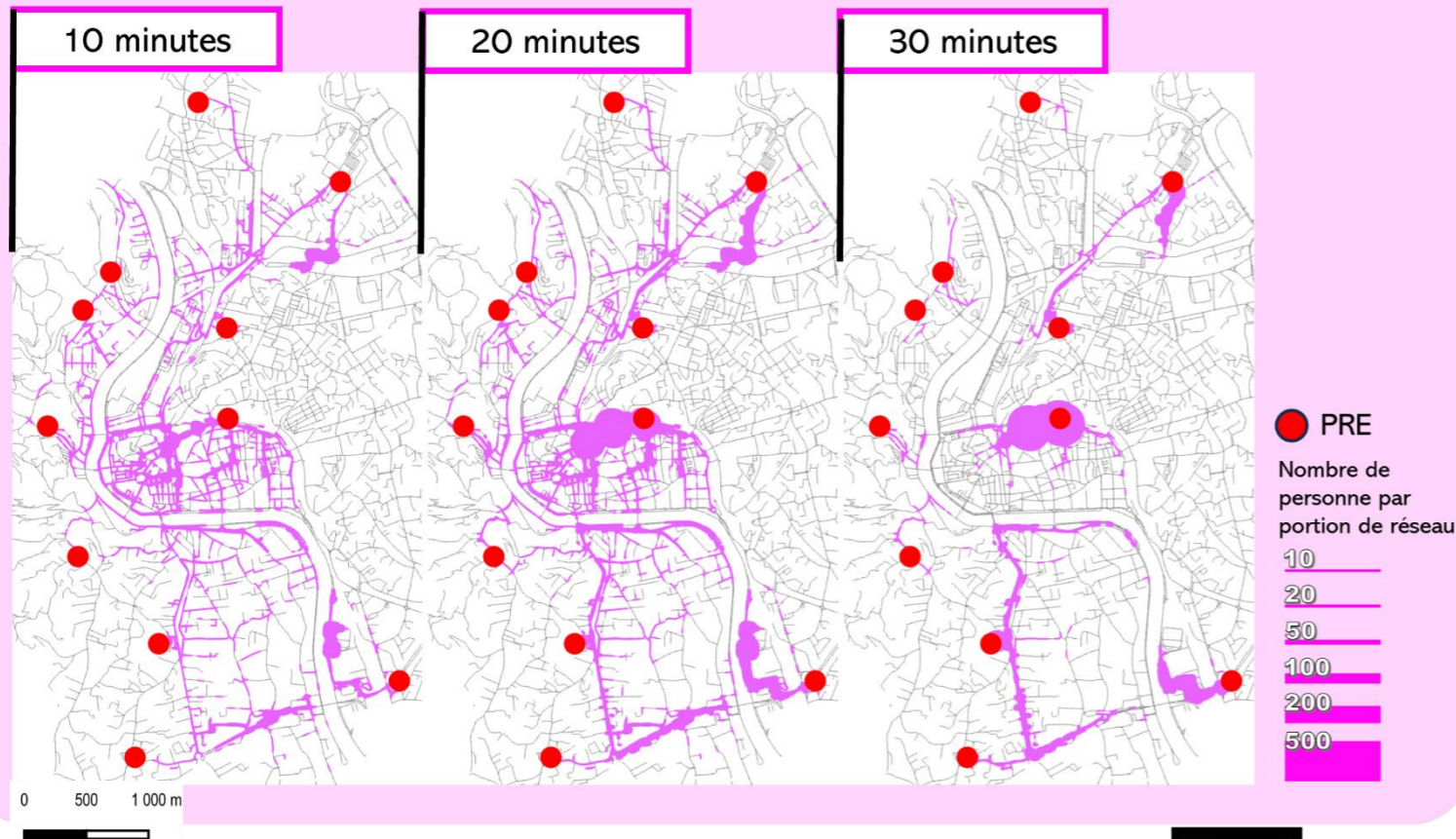
Le nombre de personnes par portion de réseau atteint rapidement des valeurs importantes (Synthèse 8.1). Des flux importants, pouvant atteindre et dépasser les 200 personnes, sont répertoriés à proximité du PRE numéro 11 (Rocade / Uzès). Cela entraîne une augmentation de la densité de personnes qui peut atteindre 0,50 personnes par m². Il s'agit en réalité des personnes se trouvant au sein de l'hypermarché de l'enseigne Cora. Il est également noté qu'en plus d'être rapidement important, le flux de personnes en partance de l'hypermarché semble régulier jusqu'à la trentième minute, cela signifie que l'évacuation du l'hypermarché Cora semble être périlleuse.

La Synthèse 8.1 met également en évidence un important flux de personnes près du PRE numéro 10 (gare ferroviaire). Le nombre de personnes par portion de route peut dépasser les 400. Il semble toutefois que la nature des axes sur lesquels sont répertoriées ces valeurs permettent de limiter la densité de personnes Synthèse 8.3. La surface disponible par personnes descend sous la barre des 1 m² sur deux portions à

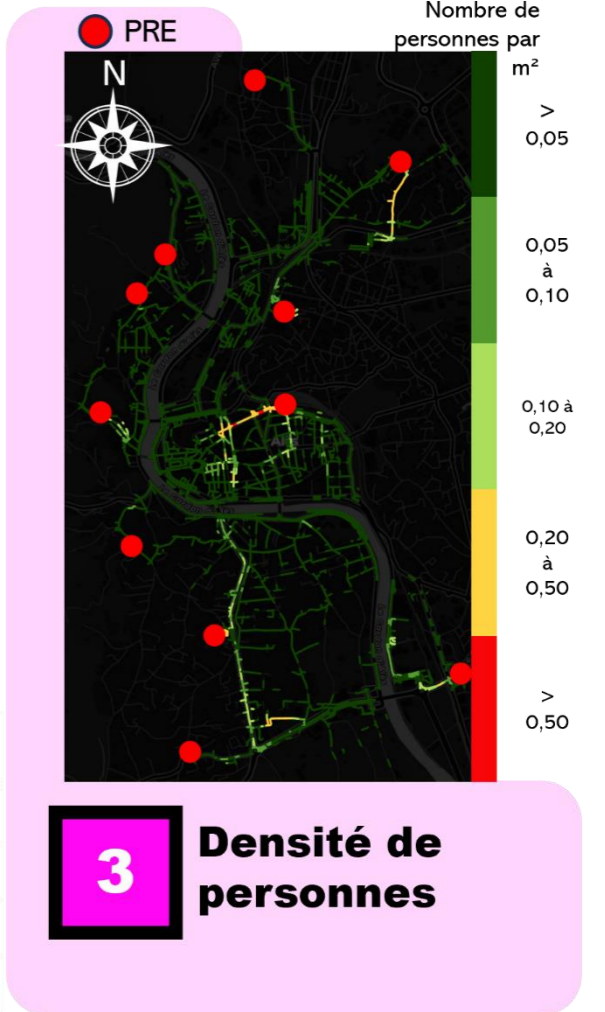
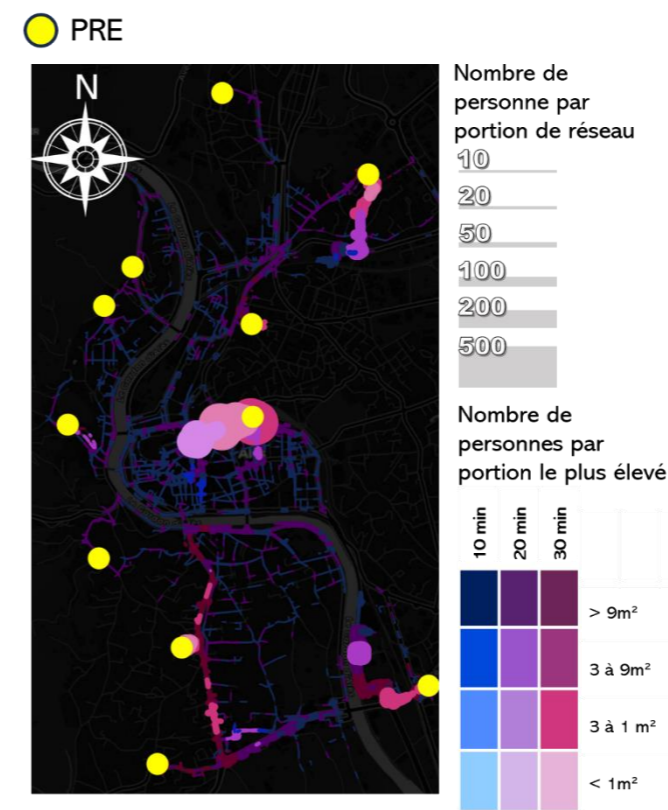
proximité du PRE numéro 10 (Synthèse 8.2) ce qui témoigne, à la lumière de l'indicateur de densité, qu'il s'agit ici de goulots d'étranglement

Les temps de parcours moyen (Synthèse 8.4) peuvent être considérés comme élevés compte tenu de la configuration paramétrique. En effet, lors des analyses menées dans le chapitre précédent, il a été mis en évidence que lorsque les départs sont plus étalés dans le temps, les temps de parcours ne dépassent jamais la demi-heure. Dans ce scénario, ils atteignent pourtant 45 minutes. Cela indique de probables effets de densités locaux, malgré la dispersion des personnes dans le temps.

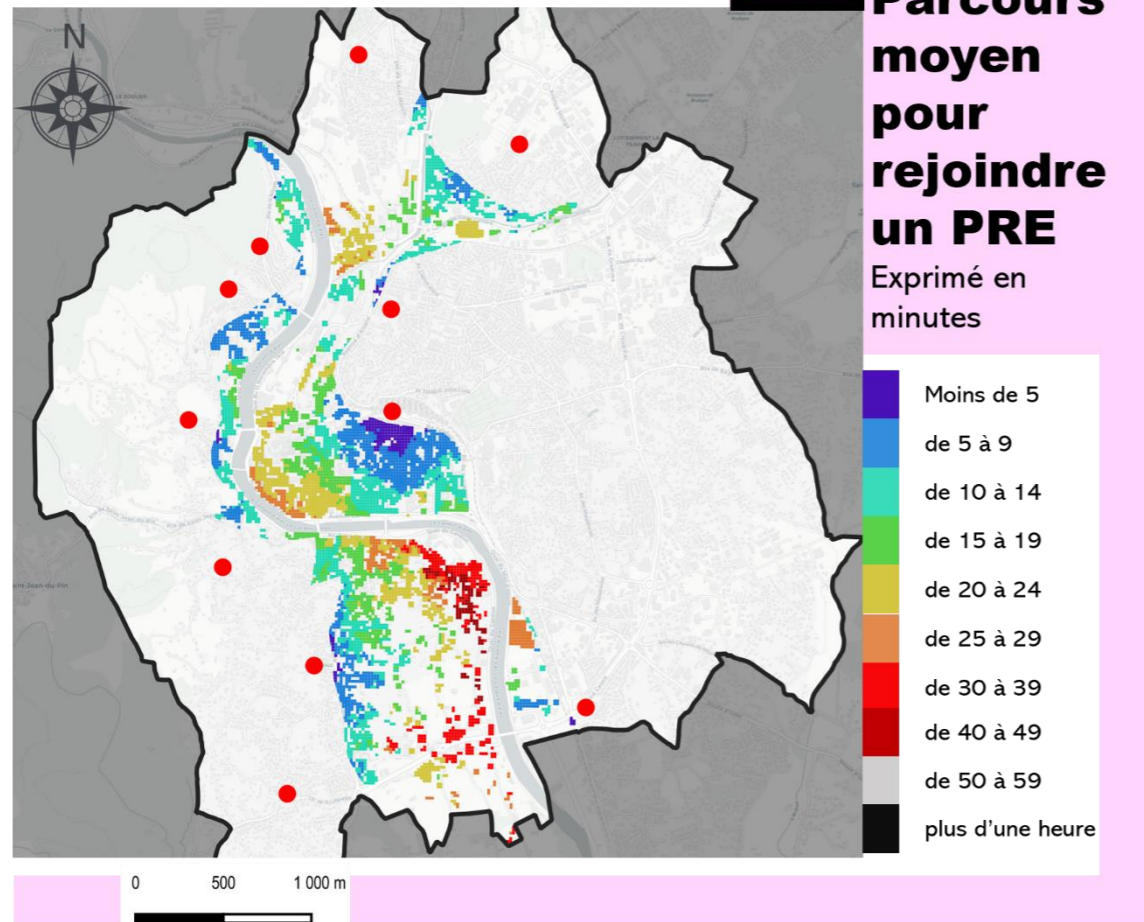
1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau



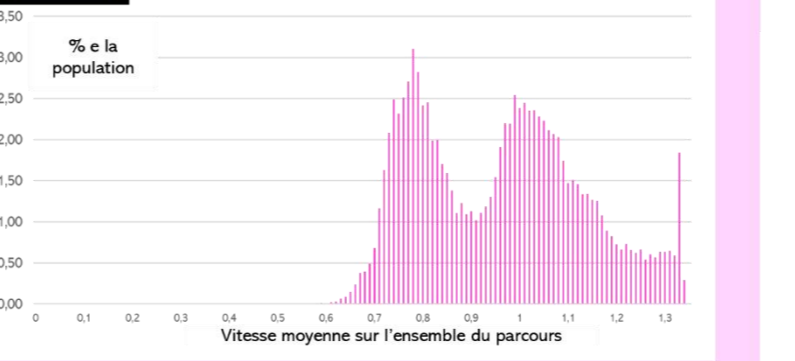
2 Surface disponible par personne



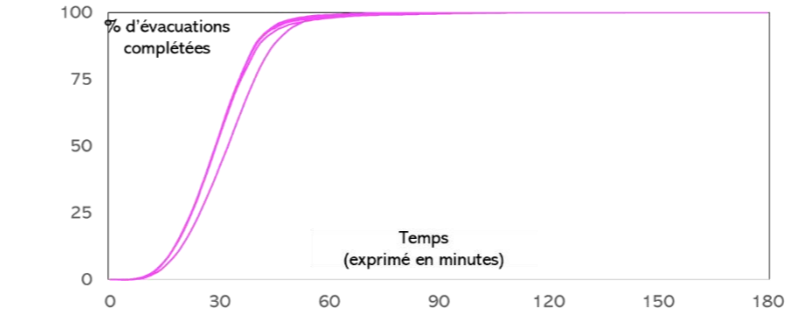
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE



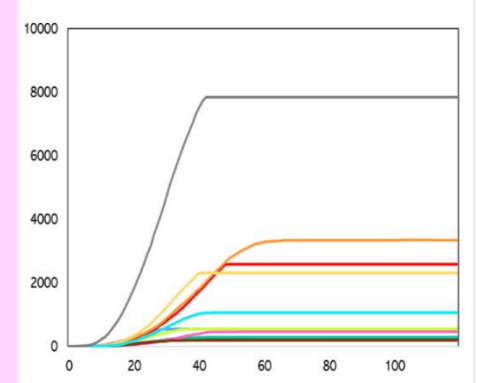
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



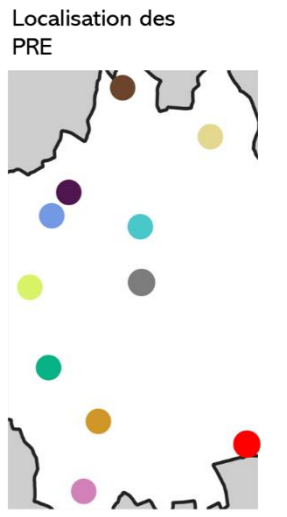
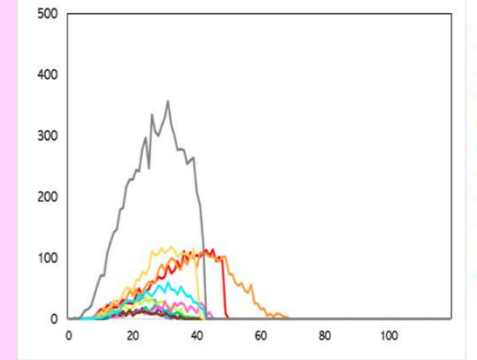
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



7 Suivi des arrivées par PRE

- La Royale
- Centre équestre
- Rocade / Route d'Uzès
- Château d'eau
- Le Haut Bressis
- Jardin de la tour
- La Luquette
- Ecole Saint-Eloi
- Hôpital Psychiatrique
- Collège Bellevue
- Gare Ferroviaire

IV.2.8 S3C

Le Tableau 39 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S2B. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	5	L'ensemble de la population évacuée en 5 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la cinquième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PG	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	90	Il n'y a pas de ruissellement
C1 Contexte 1	2	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « week-end ».
C2 Contexte 2	Oui	Les ponts sont ouverts à la circulation.

Tableau 39 – Initialisation des paramètres S3C

Le scénario S3C implique une configuration paramétrique similaire aux scénarios S1C et S2C. La couche de répartition spatiale de la population implémentée est différente.

Comme dans le scénario précédent, le scénario S3C implique la présence d'un nombre important de personnes au niveau de l'hypermarché Cora. La Synthèse 9.1 montre qu'un départ rapide des personnes situées dans cet hypermarché entraîne rapidement un flux de piéton important. C'est près de 500 personnes qui sont donc répertoriées au bout de 10 minutes d'évacuation. La simulation indique que ces personnes restent ralenties voire immobilisées, en effet le nombre ne décroît pas après 10 minutes.

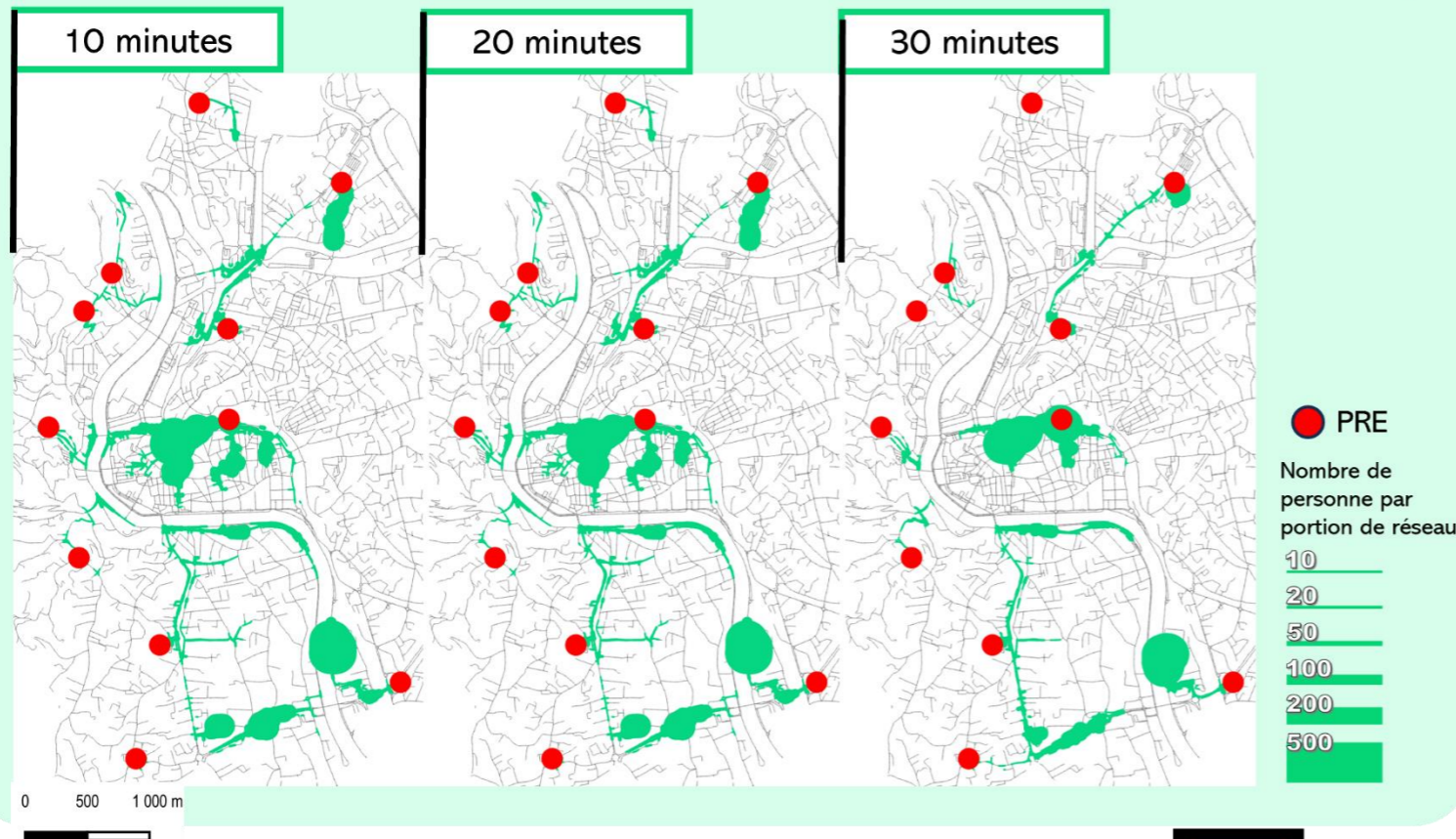
La Synthèse 9.1 met également en évidence un important flux de personnes près du PRE numéro 10 (gare ferroviaire). Le nombre de personnes par portion de route peut dépasser les 400 localement, notamment à proximité du PRE 10. Toutefois, la nature des axes sur lesquels ces flux sont observés, et notamment leur largeur, contribue à limiter la densité de personnes au m² (Synthèse 9.3). La surface disponible par personnes descend sous la barre des 1 m² sur deux portions à proximité du PRE numéro 10 (Synthèse 9.2) ce qui met là encore en évidence des goulots d'étranglements liés aux spécificités du réseau.

La Synthèse 9.4 montre également des temps de parcours pouvant dépasser l'heure. Ainsi, ce scénario est celui dans lequel le déplacement des personnes est le plus compliqué. Les deux zones concernées par cet allongement significatif des temps de parcours sont le quartier de la prairie et l'hypermarché Cora au sud-ouest de la ville. Concernant le quartier de la prairie, il s'agit du quartier géodésiquement le plus éloigné d'un PRE. Toutefois, lorsque le déplacement des personnes n'est pas contraint, les temps de parcours observés sont généralement proches de la demi-heure. Or, dans ce cas de figure, ils sont doublés. Cela est dû d'une part à la présence de ruissellement, et donc à une progression ralentie des personnes du fait de la présence d'eau. D'autre part, le quartier de la Prairie abrite des équipements de loisirs de tailles conséquentes, une piscine ainsi que le stade Pierre Pibarot. Le scénario S3C considère que ces espaces sont remplis à 50% de leur capacité maximale (cf. première partie de ce chapitre). En conséquence, la population sur cette partie du territoire augmente significativement. Le même phénomène est observé au Cora (sud-ouest de la commune). L'augmentation de sa fréquentation entraîne une augmentation des temps de parcours du fait de l'augmentation de la taille des flux de piétons.

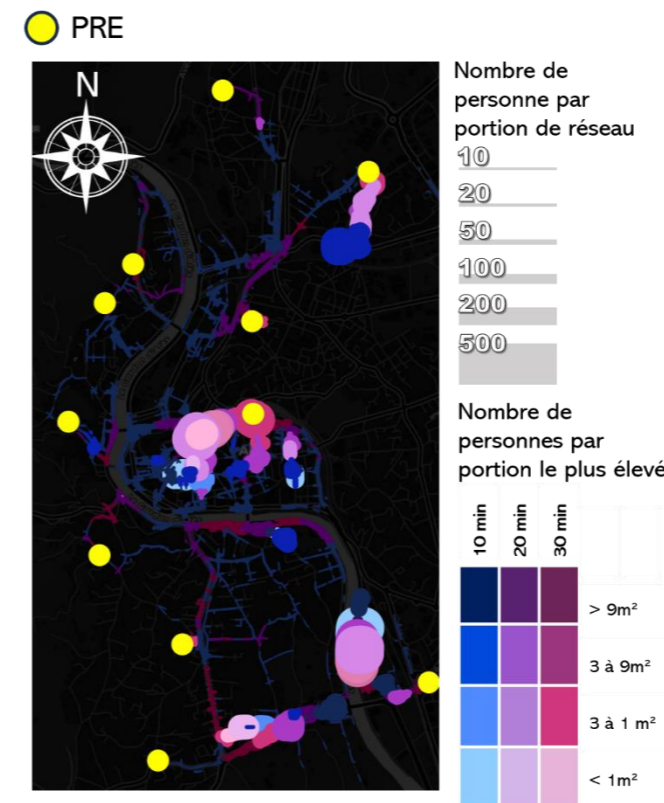
Il est une autre observation intéressante à propos de ce scénario. Comme mentionné précédemment, le délai de départ des personnes est relativement court. En toute logique cela devrait donc permettre une évacuation plus rapide que celle des scénarios où ce délai est plus long, comme le S1B. Pourtant, la Synthèse 9.5 met en évidence une évacuation généralement plus longue. Cela démontre que, dans ce cas de figure, les flux de piétons sont d'une taille telle qu'ils contribuent à faire perdre le bénéfice d'un départ des personnes moins tardifs. Il faut près de 2 heures et demie afin d'évacuer la totalité de la population.

Ce n'est donc pas surprenant d'observer en Synthèse 9.6 des valeurs de vitesse moyenne qui peuvent être inférieures à 0,3 m/s. Etant donné qu'une moyenne est une agrégation, cela suggère même l'existence d'effets de *stop and go*. Toutefois, la simulation telle qu'elle est construite ne permet pas d'affirmer leur existence avec certitude

1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau

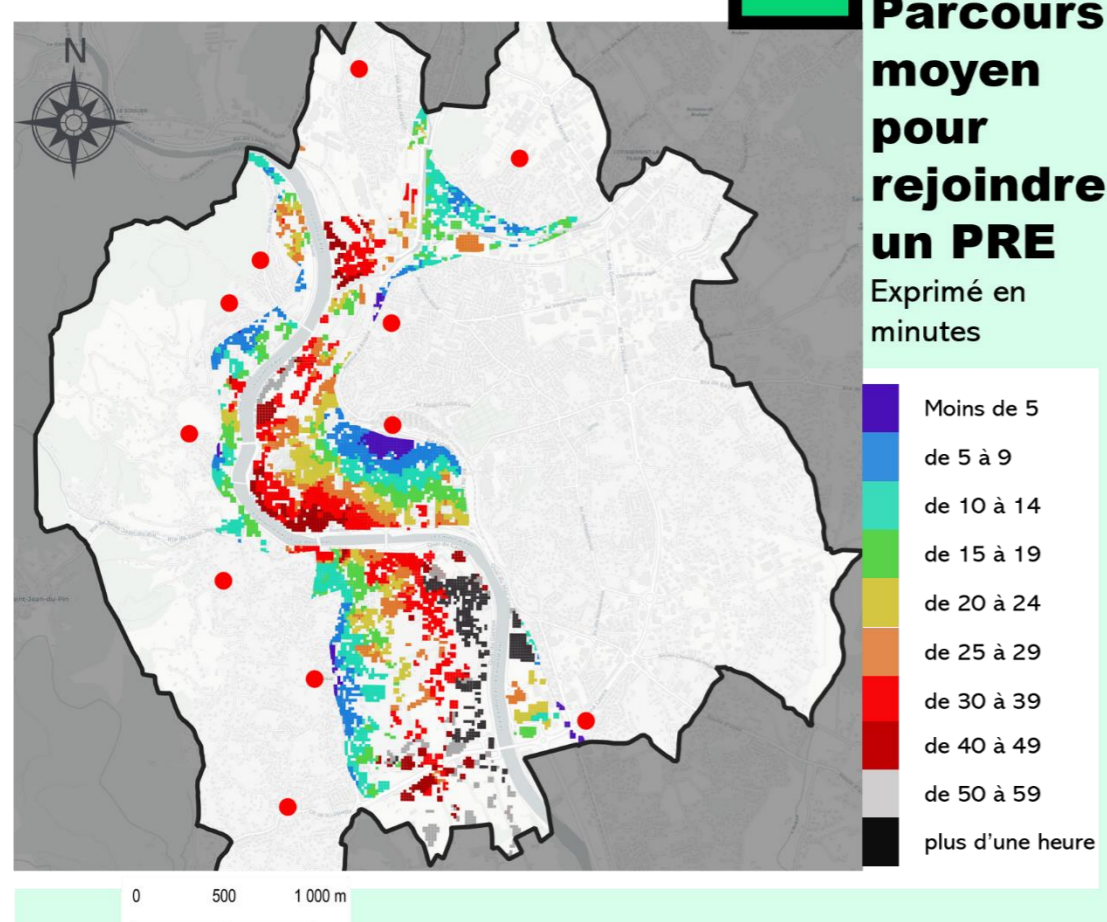


2 Surface disponible par personne



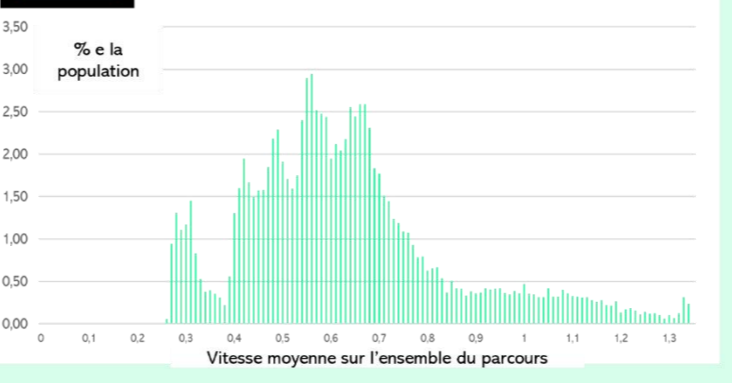
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE

Exprimé en minutes

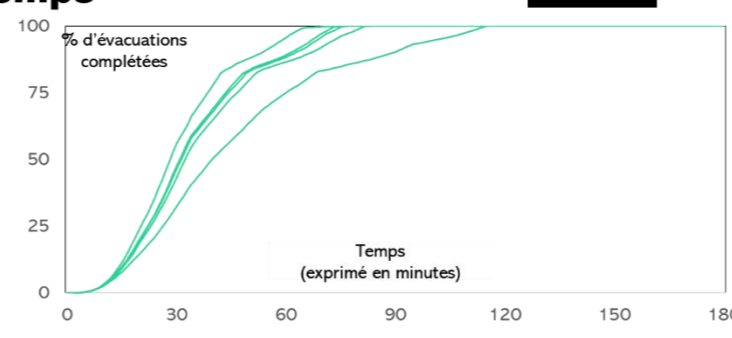


6 Vitesse de déplacement

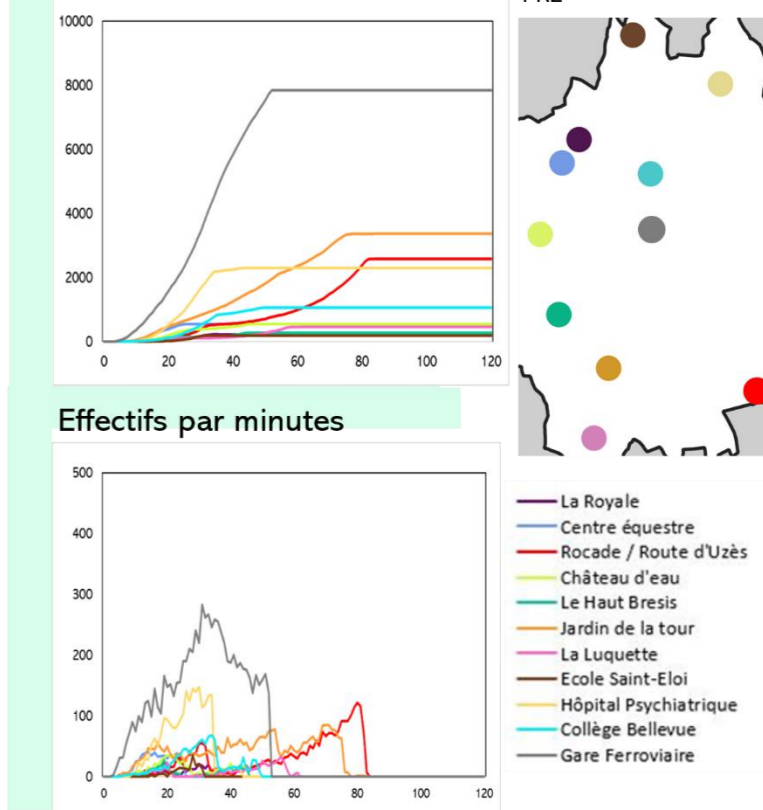
Exprimé en pourcentage



5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



7 Suivi des arrivées par PRE



IV.2.9 S3P

Le Tableau 40 présente les valeurs d'initialisation des paramètres pour le scénario S3P. Ce scénario est simulé sur la commune d'Alès.

Paramètre	Valeur	Description
B2 Temps de préparation	15	L'ensemble de la population évacue en 30 minutes. Le taux d'évacuation est régulier entre le début et la quinzième minute de la simulation.
D1 Méthode de cheminement	PC	Les évacués empruntent les itinéraires les plus courts.
D2 Choix d'une destination	O	Les évacués se dirigent vers le PRE le plus proche.
V2 Praticabilité du réseau	0	Il n'y a pas de ruissellement
C1 Contexte 1	2	La position des personnes sur le territoire en démarrage de simulation correspond à l'archétype « week-end ».
C2 Contexte 2	Oui	Les ponts sont ouverts à la circulation.

Tableau 40 - Initialisation des paramètres S3P

Le scénario S3P interroge les effets d'une ouverture des ponts lorsque la population est répartie selon la troisième configuration, correspondant à un samedi après-midi. Il a été vu lors de la simulation des scénarios précédents que l'ouverture des ponts n'accélère généralement pas l'évacuation des personnes, et contribue même à l'augmentation du temps de parcours moyens d'une partie de la population, principalement celle située en centre-ville. La troisième répartition de population est celle qui a mis en évidence les temps de parcours les plus longs. Globalement, l'augmentation significative de la population sur des portions de territoire bien définies (quartier de la Prairie, Cora) génère une augmentation significative des flux, contraignante pour les déplacements des personnes.

Dans le cadre du scénario S3P, il est possible d'observer une influence positive de l'ouverture des ponts sur l'opération d'évacuation de population, et notamment sur la répartition des flux piétons sur le territoire. La Synthèse 10.1 met en évidence une

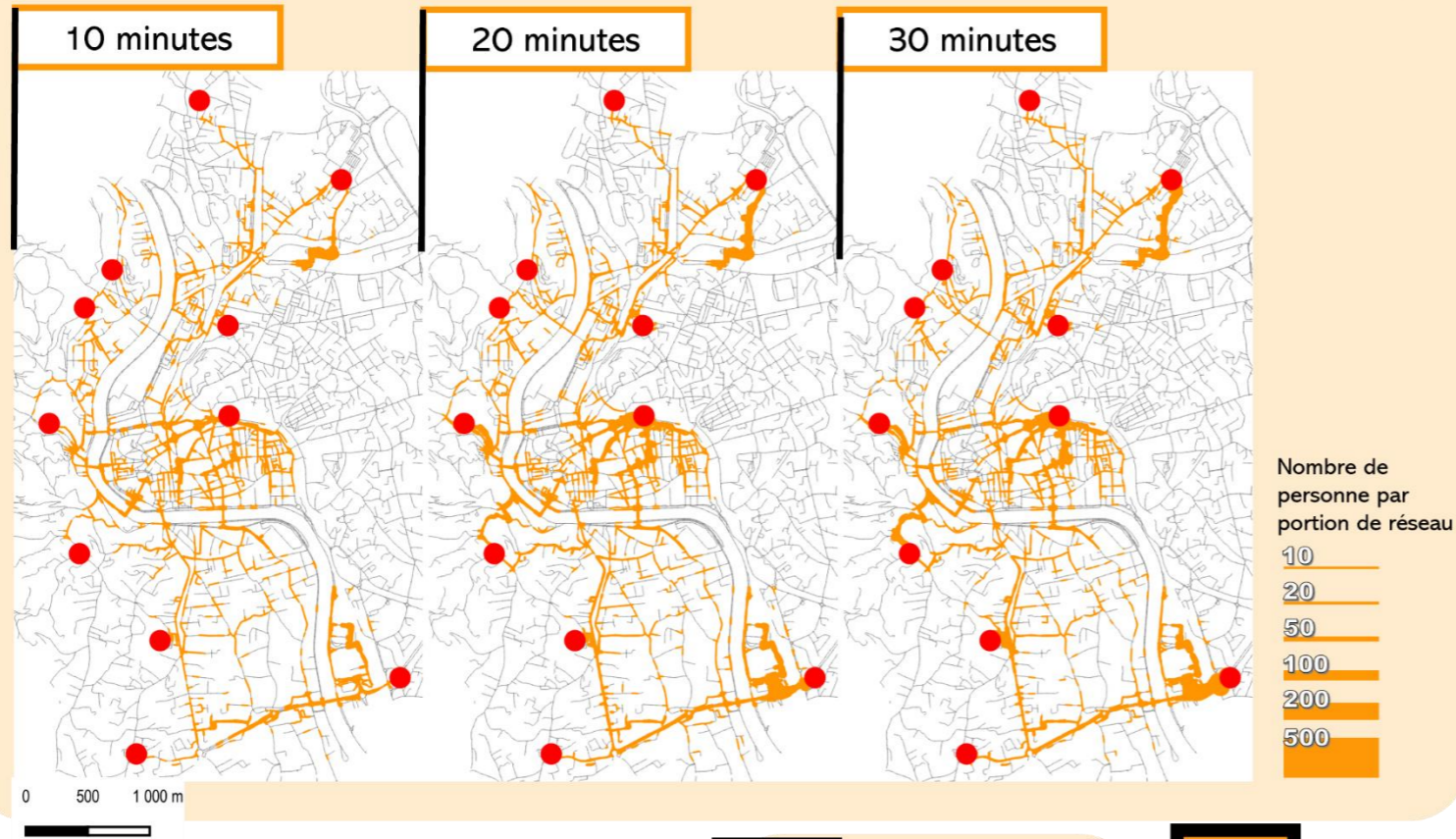
nette réduction des flux de piétons par rapport au scénario S3B, et notamment au niveau du centre-ville. Les flux vers le PRE 10 (la gare ferroviaire) sont significativement moins importants entre 10 et 30 minutes après le démarrage de l'évacuation. Les scénarios précédents impliquant une ouverture des ponts avaient mis en évidence le report de la population du centre-ville vers les PRE plus proches, mais inaccessibles sans traverser le Gardon, comme le PRE 4. C'est aussi le cas dans ce scénario : la Synthèse 10.7 met en évidence la réduction du nombre d'arrivées au PRE 10. Deux milles personnes qui choisissent en temps normal le PRE 10 sont réorientées vers un autre PRE. Ce rééquilibrage des flux avaient démontré générer des effets de congestion à proximité du PRE 4. En effet, dans les scénarios précédents intégrant l'ouverture des ponts au passage des personnes, les flux en provenance du centre-ville était redirigés principalement vers le PRE 4. Les axes autour de ce PRE n'étant pas calibrés pour recevoir un tel afflux de personnes, elles étaient systématiquement ralenties.

Le scénario S3P ne fait pas état de telles congestions. C'est en partie dû à la répartition spatiale de la population implémentée dans ce dernier. En effet, si l'on s'en réfère à l'Atlas 38, la configuration de répartition de population utilisée dans ce cas (la numéro 2) tend à minimiser le nombre de personnes présentes en centre-ville au moment de l'évacuation. Cette population est redistribuée vers des lieux de loisirs (Piscine municipale, Cora), une partie est également située au niveau de la zone industrielle située au nord de la commune.

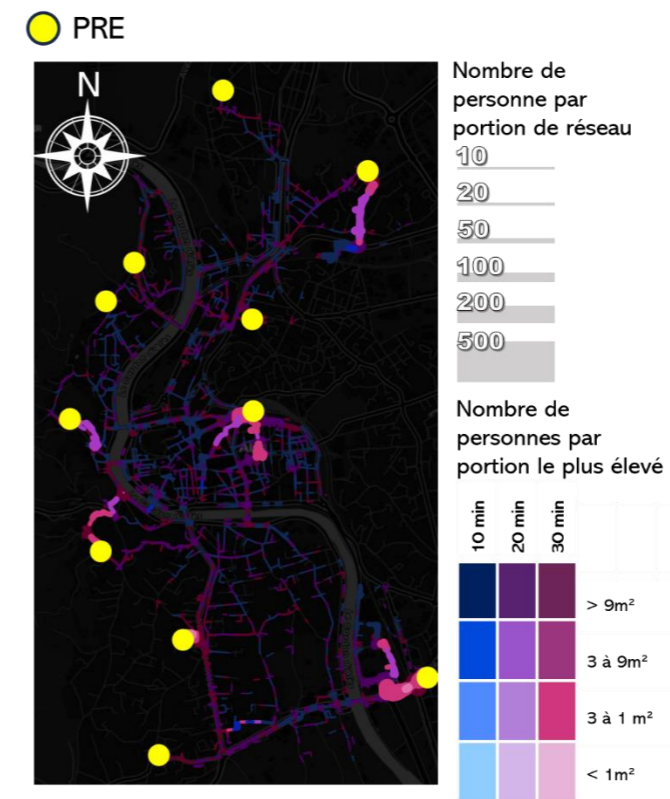
Dans ce cas de figure, l'ouverture des ponts améliore donc l'évacuation grâce à la disparition des effets de congestion près du PRE 04, phénomènes liés à une diminution de la population présente au niveau du centre-ville. Les Synthèse 10.2 et Synthèse 10.3 complètent ce constat : la densité de personnes sur le réseau reste faible sur l'ensemble du territoire, les personnes ont suffisamment d'espace pour progresser vers les PRE. Cela entraîne des vitesses de déplacement relativement hautes comme l'indique la Synthèse 10.5 (vitesses plus élevées que pour S3B) et des temps de parcours également inférieurs (cf. Synthèse 10.4).

Les résultats issus de ces scénarios contribuent à souligner la pertinence de l'utilisation de plusieurs configurations de répartition spatiale de la population. Ils soulèvent également des questions quant à la connaissance, par l'organisation en charge de la gestion de crise, de cette donnée lors du déclenchement d'une évacuation.

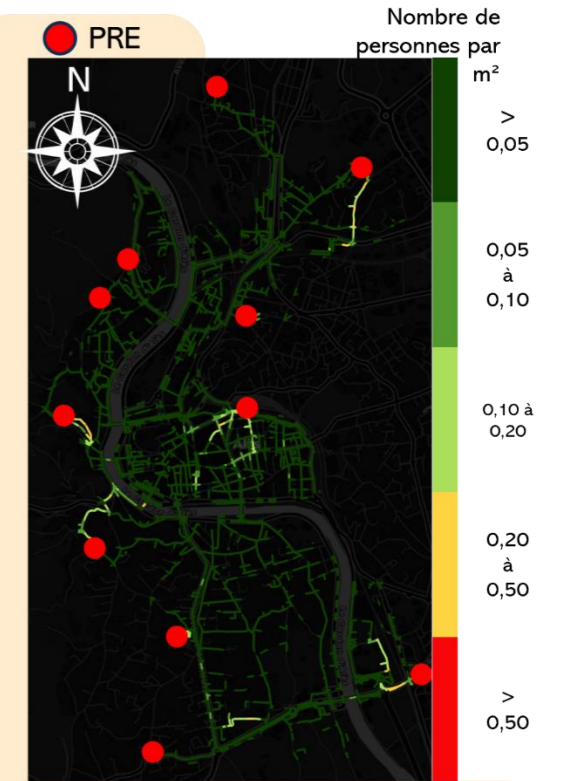
1 Evolution du nombre de personnes par portion de réseau



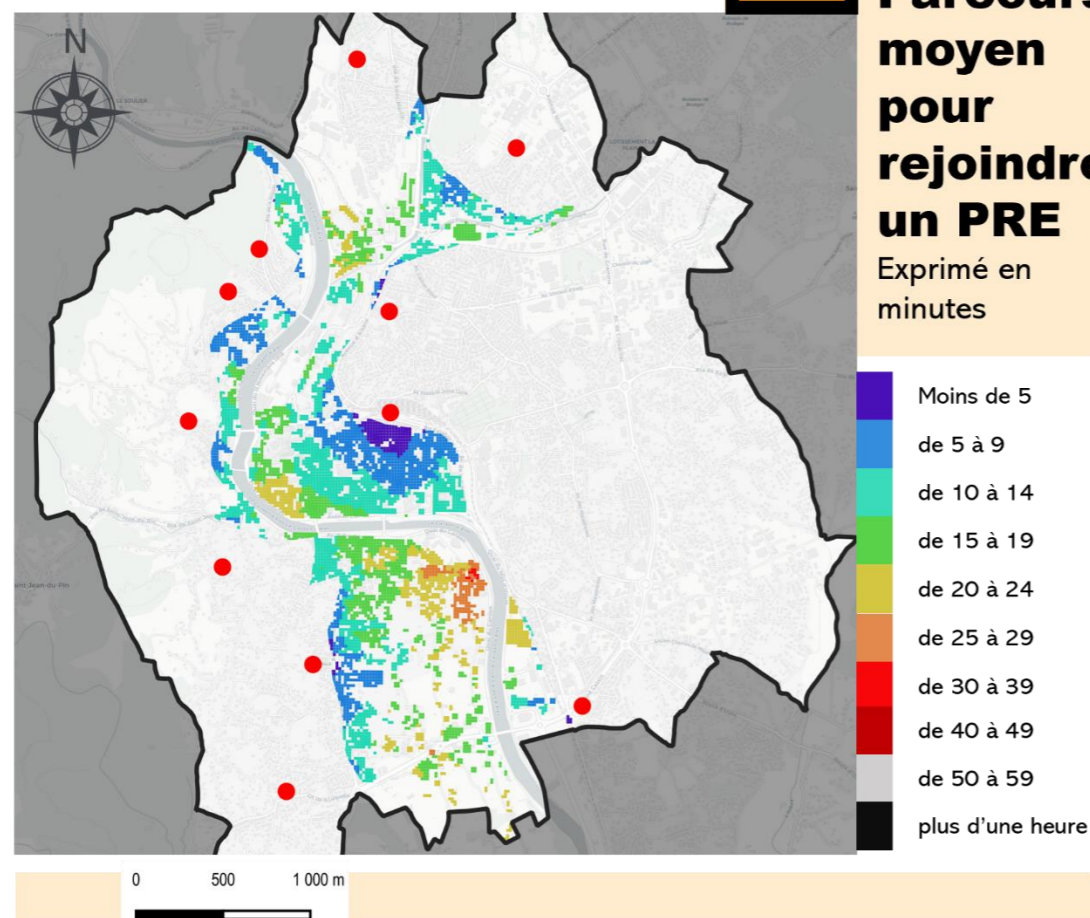
2 Surface disponible par personne



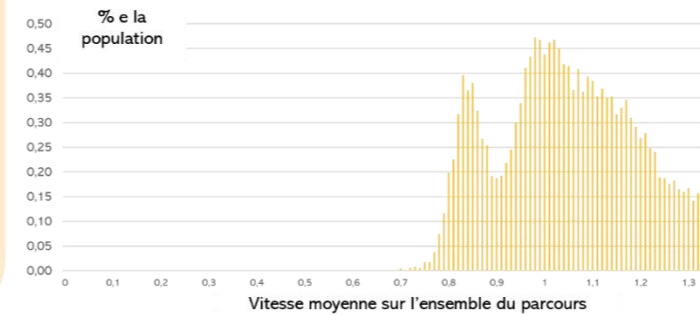
3 Densité de personnes



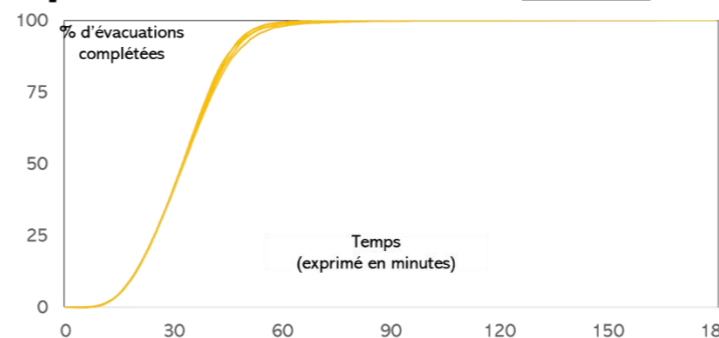
4 Temps de Parcours moyen pour rejoindre un PRE
Exprimé en minutes



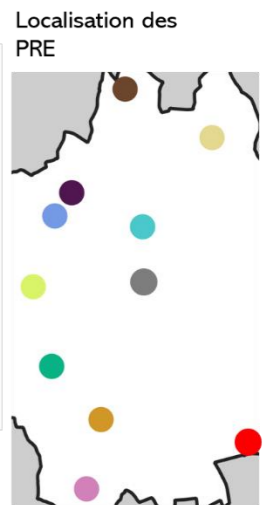
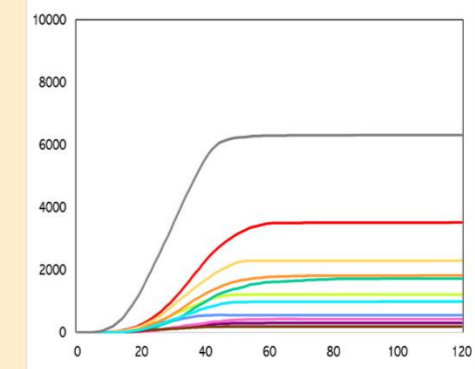
6 Vitesse de déplacement
Exprimé en pourcentage



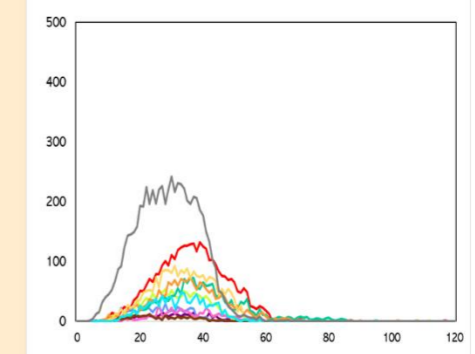
5 Taux d'évacuations complétées en fonction du temps



Effectifs cumulés



Effectifs par minutes



7 Suivi des arrivées par PRE



IV.3 Analyse des résultats

Dans la section précédente, une partie des scénarios simulés ont été présentés. Les différents indicateurs ont pu démontrer des différences significatives dans le déroulé d'une évacuation en fonction des scénarios simulés. L'analyse des résultats est faite selon deux axes de comparaison des scénarios entre eux.

Le premier axe analyse la performance de l'évacuation et met en lumière, au regard du territoire d'étude, les facteurs facilitateurs (propice au « meilleur ») et les facteurs dégradant le processus global d'évacuation préventive (propice au « pire »).

Le deuxième axe se concentre sur l'impact d'un non-respect éventuel d'une des mesures prévues au PPI du barrage de Sainte Cécile d'Andorge : le maintien des ponts ouverts à la circulation au lieu de leur fermeture.

IV.3.1 Les facteurs propices au meilleur... ou au pire

La simulation des différents scénarios a mis en évidence deux axes de variation pour l'ensemble d'entre eux. Une partie des scénarios contribue à réduire le temps global nécessaire afin d'évacuer la population (S1C et S2C). Une seconde partie des scénarios (S1B, S2B, S3B, auxquels nous ferons référence comme SxB) entraînent une réduction significative des temps de parcours. Enfin, un scénario augmente à la fois les temps de parcours et le temps nécessaire afin d'évacuer l'ensemble de la population. Dans le premier cas, l'évacuation de la totalité de la population concernée nécessite moins de temps, mais les temps de déplacement sont largement allongés, notamment du fait d'effets de densité provoqué par une concentration des départs dans les premières minutes de l'évacuation. Dans le second, l'évacuation nécessite plus de temps, mais les personnes se déplacent plus rapidement vers les PRE. Le dernier cas démontre une configuration de l'évacuation défavorable sous les deux aspects mentionnés.

Pour chaque répartition spatiale de la population, deux scénarios sont comparés. Trois scénarios, S1B, S2B et S3B, présentent une forme d'optimisation du processus global d'évacuation, en cela qu'ils aboutissent à une minimisation des temps de parcours des personnes. La configuration de l'ensemble des paramètres contribue à limiter l'observation des effets de densité. Le paramètre B2 est fixé sur la valeur '15'. A l'inverse, les scénarios S1C, S2C et S3C suscitent des effets de densité locaux, et permettent donc d'observer des difficultés dans le déplacement des personnes. Ils représentent chacun le scénario du pire appliqué aux trois répartitions spatiales de la population.

Autrement dit, les scénarios SxB améliorent la fluidité de l'évacuation, au prix d'un plus grand délai dans l'évacuation des personnes. Les scénarios SxC compressent le départ des personnes dans le temps, mais dans des conditions autrement plus défavorables. Les scénarios SxC incluent un ruissellement important (90 centimètres), ainsi qu'un choix d'itinéraire favorisant le regroupement des personnes (valeur 'PG').

Les trois courbes (Figure 52) permettent de comparer le nombre d'évacuations complétées en fonction du temps pour les deux types de scénarios pour l'ensemble

des configurations de répartition spatiale de la population sur les scénarios SxB et les scénarios SxC. L'intérêt de la comparaison des scénarios SxB et SxC réside dans la différence intrinsèque à leur construction. Les scénarios SxB sont censés, pour chaque configuration de répartition spatiale de la population, minimiser les temps de parcours en étalant les départs. En revanche, cet étalement des départs doit alors entraîner un ralentissement global du processus d'évacuation. A l'inverse, les scénarios SxC sont construits afin de tester un ralentissement maximal du déplacement des personnes. Toutefois, leurs départs se font en 5 minutes, contre 15 dans les scénarios SxB. Le délai inférieur de départ devrait permettre une évacuation plus rapide. Ce n'est cependant pas vrai dans l'ensemble des cas. Si $t(x)$ représente le temps nécessaire pour évacuer l'ensemble de la population, $t(SxB) < t(SxC)$ n'est vraie que dans le couple de scénarios S1x (Figure 52). Dans les couples S2x et S3x la relation prend la forme $t(SxC) < t(SxB)$. Cela signifie que pour S2x et S3x, le temps gagné grâce aux départs plus rapides des personnes est compensé.

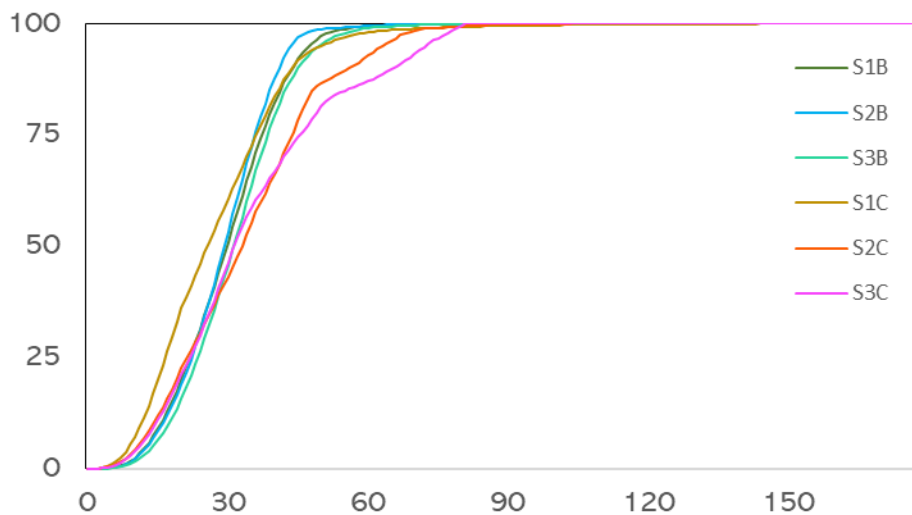


Figure 52 – Courbes cumulatives des arrivées comparées entre les scénarios S1B et S1C

Le temps gagné grâce au départ plus rapide des personnes permet, en théorie, d'obtenir une évacuation des personnes globalement plus rapide. Cela est confirmé lorsque la répartition spatiale de la population en entrée est paramétrée sur Nocturne.

En revanche, pour les deux autres couples de scénarios (S2B / S2C et S3B / S3C), le scénario SxB est toujours le plus performant. Si les scénarios S2C et S3C montrent une performance plus élevée durant les 30 premières minutes, ils sont rapidement rattrapés et dépassés par leurs scénarios SxB de référence (Figure 52). La Figure 53 confirme cette dynamique. Pour les deux couples de courbes précédemment cités, le scénario SxC est plus performant.

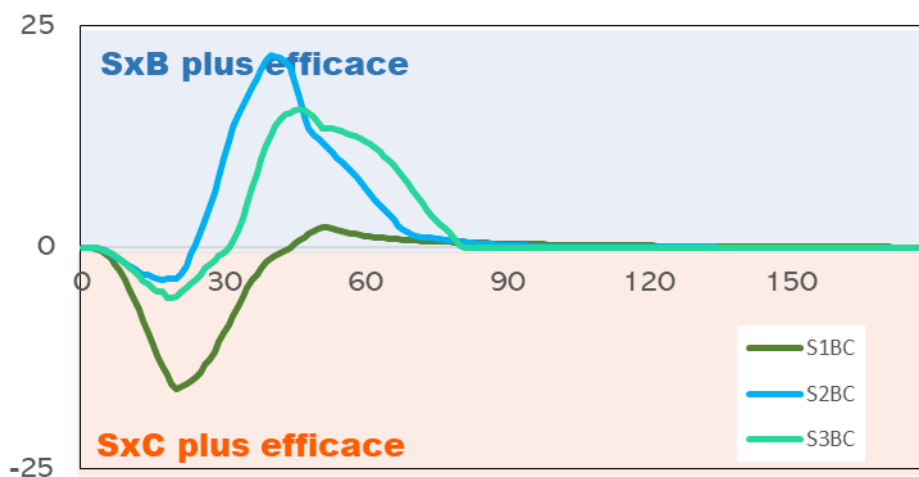


Figure 53 – Ecart dans le cumul des arrivées entre les scénarios SxB et SxC

Les résultats présentés en Figure 52 et Figure 53 s'expliquent notamment par l'implémentation d'une population plus élevée dans les couples S2x et S3x. Le ruissellement présent dans les scénarios SxC aurait également pu expliquer ces résultats. Cependant, le couple de scénario S1x met en évidence une évacuation plus rapide dans S1C par rapport à S1B. Il est néanmoins possible que la répartition spatiale de la population dans le couple S1x limite le nombre de personnes concernées par le ruissellement. Cependant, aucun élément ne permet de formaliser un tel constat.

Les graphiques suivants (Figure 54, Figure 55, Figure 56) présentent les vitesses moyennes relevées.

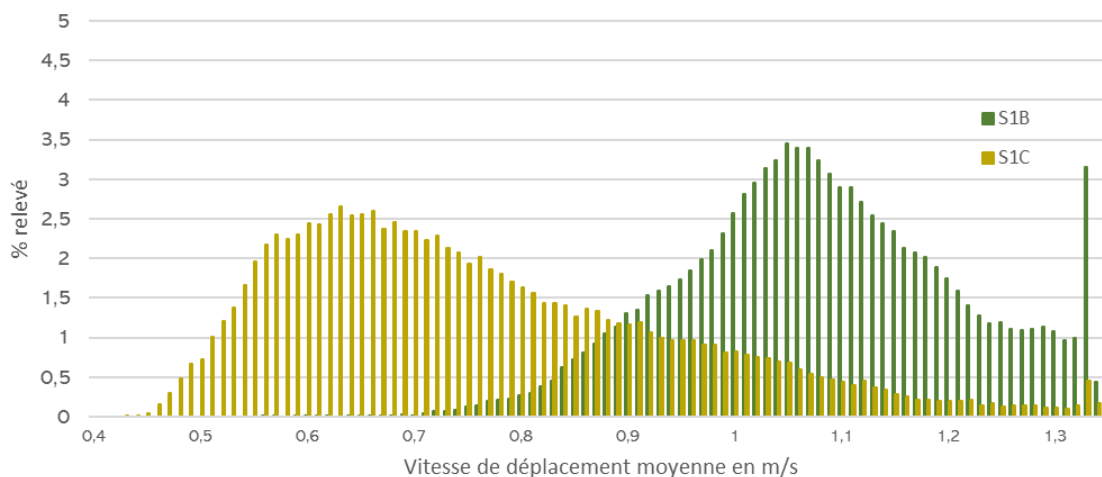


Figure 54 – Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S1B et S1C

La comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S1B et S1C fait apparaître une réduction significative de la vitesse de déplacement lors de la simulation de S1C. La proportion de personnes pouvant conserver une vitesse de confort sur l'ensemble de leur parcours atteint 3% dans le cas du scénario S1B. Cette proportion descend à 0,4 % dans le cadre du scénario S1C.

Les différences sont du même acabit si l'on compare le scénario S2B au scénario S2C (Figure 55). Toutefois, la différence dans la proportion de personnes pouvant conserver une vitesse de confort durant l'entièreté d'un trajet est largement inférieure dans le couple S2x en comparaison du couple S1x. Autrement dit, et même si cela n'est pas évident à interpréter sur la représentation graphique présentée, les écarts de vitesses moyennes entre S2B et S2C sont plus faibles que ceux du couple S1B /S1C. C'est en réalité le taux de personnes pouvant conserver une vitesse égale à 1,33 m/s qui génère ce constat.

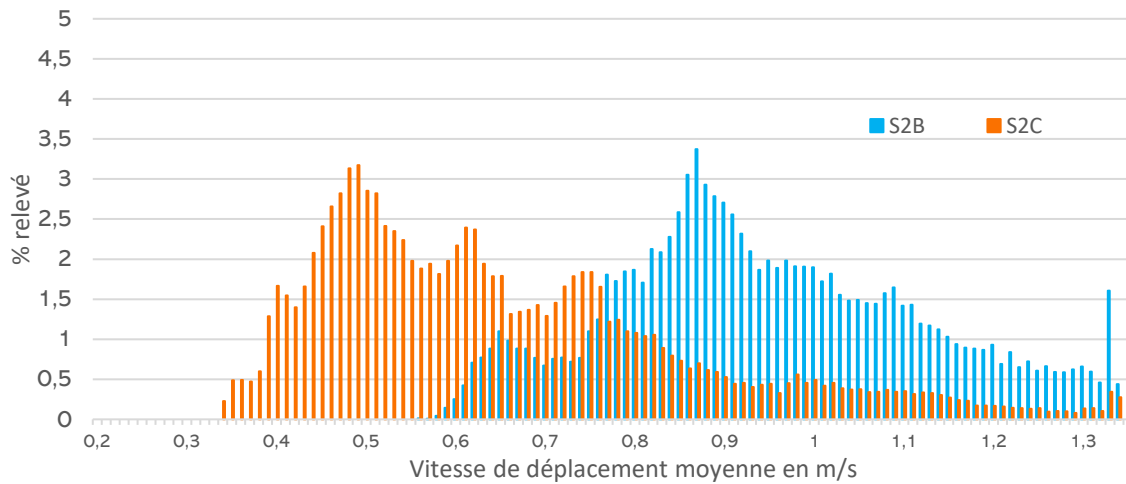


Figure 55 - Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S2B et S2C

En dépit de la réduction de la vitesse moyenne des personnes, le graphique en (Figure 55) montre une réduction de la vitesse des personnes significative entre S2B et S2C. Le nombre de personnes ayant pu maintenir une vitesse de confort égale à la vitesse d'initialisation est relativement faible dans S2B, qui est pourtant un scénario qui favorise la fluidité de l'évacuation. Cela implique une existence de contrainte inhérente à la répartition spatiale de la population utilisée dans S2B et S2C, qui est celle qui totalise le plus de personnes en ZPI (22400). Evidemment, dans ces conditions, un scénario qui maximise la contrainte sur les déplacements entraîne alors des ralentissements conséquents. Si l'on en croit la Figure 55, plus de la moitié des personnes se sont déplacées, en moyenne, à une vitesse deux fois inférieure à la vitesse de confort initialisée.

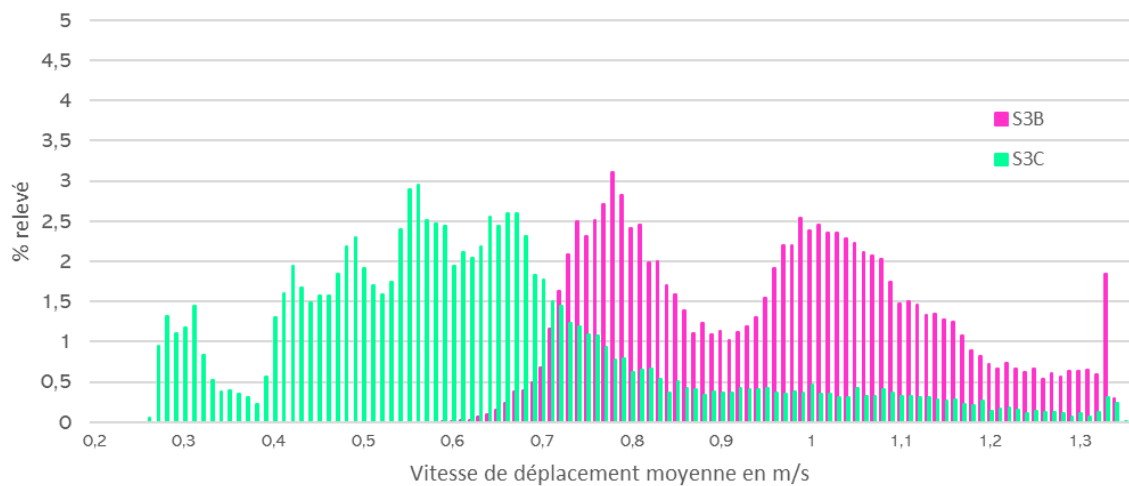


Figure 56 - Comparaison des vitesses moyennes relevées entre les scénarios S3B et S3C

Après avoir comparé les différences dans la performance globale de l'évacuation entre les scénarios SxB et SxC, il convient de comparer la fluidité de l'évacuation sur le territoire. Les Figure 57, Figure 58 et Figure 59 comparent les temps de parcours entre les scénarios SxB et SxC, pour chaque répartition spatiale de la population.

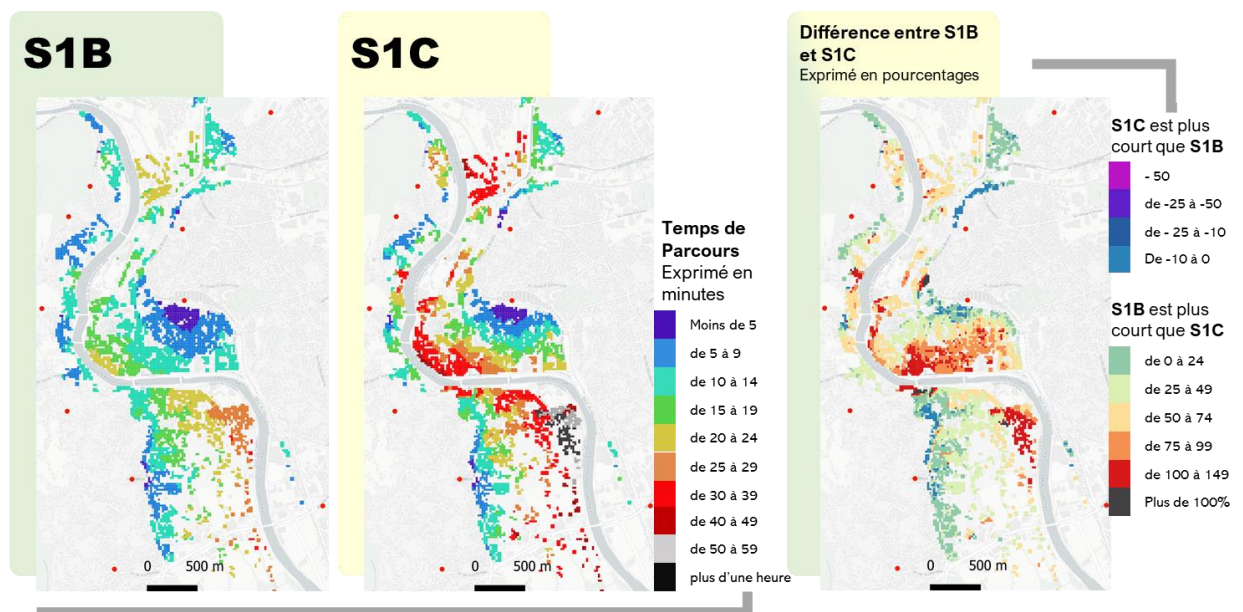


Figure 57 – Comparaison des temps de parcours S1B/S1C

La Figure 57 présente la carte des temps de parcours pour les scénarios S1B et S1P ainsi qu'une comparaison relative des deux. Les temps de parcours sont plus longs dans le scénario S1C. Ce délai est causé par les effets conjoints du ruissellement et des départs rapides des personnes. Ces deux éléments peuvent amener certains temps de parcours à doubler lorsque l'on s'approche du Gardon.

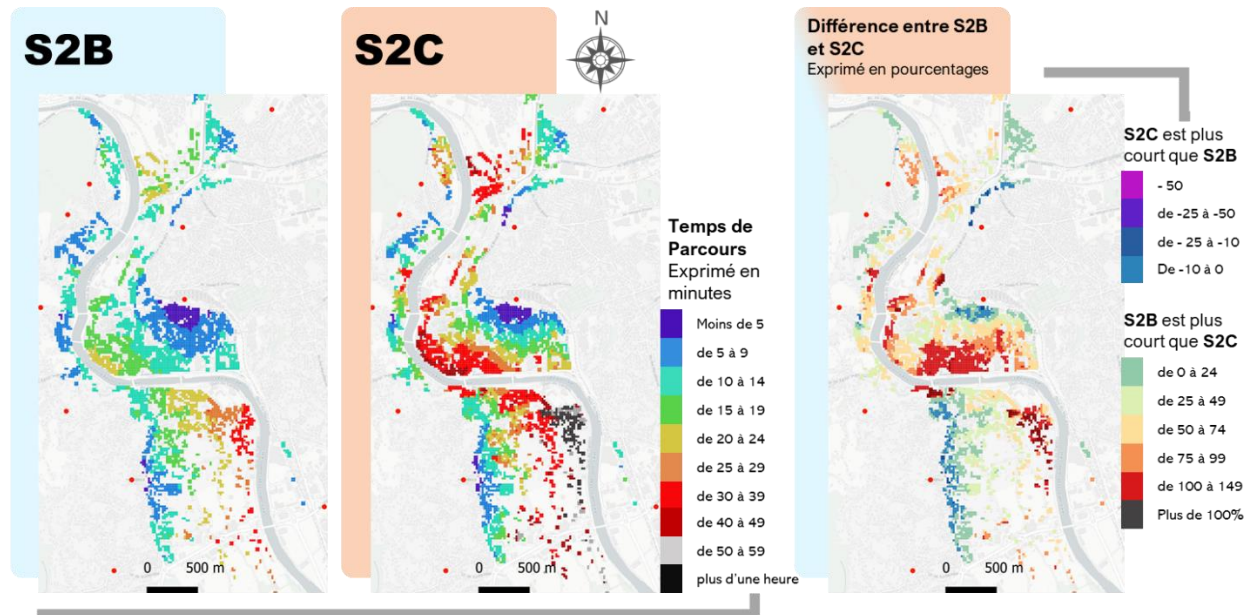


Figure 58 – Comparaison des temps de parcours S2B/S2C

La Figure 58 compare les temps de parcours des scénarios S2B et S2C, elle permet de compléter les constats issus de chacun de ces chapitres, mais également de mettre en évidence la géographie des temps de parcours dans chacun des scénarios, et ainsi les zones où ces derniers s'allongent.

Les différences les plus importantes entre les deux scénarios se situent dans les zones où du ruissellement a été ajouté. Cependant, ces différences ne sont pas homogènes. Le quartier de la prairie réagit moins bien au scénario S2C que le reste du territoire. Les temps de parcours s'y allongent significativement. Cela est dû à la distance que les personnes doivent parcourir, et au fait que l'accès au PRE oblige les personnes à se déplacer dans des zones concernées par du ruissellement.

Il est difficile, dans ce cas de figure, de séparer l'effet du ruissellement de l'effet de l'augmentation de la taille des flux piétons causée par l'augmentation de la taille des flux piétons, sur ces résultats.

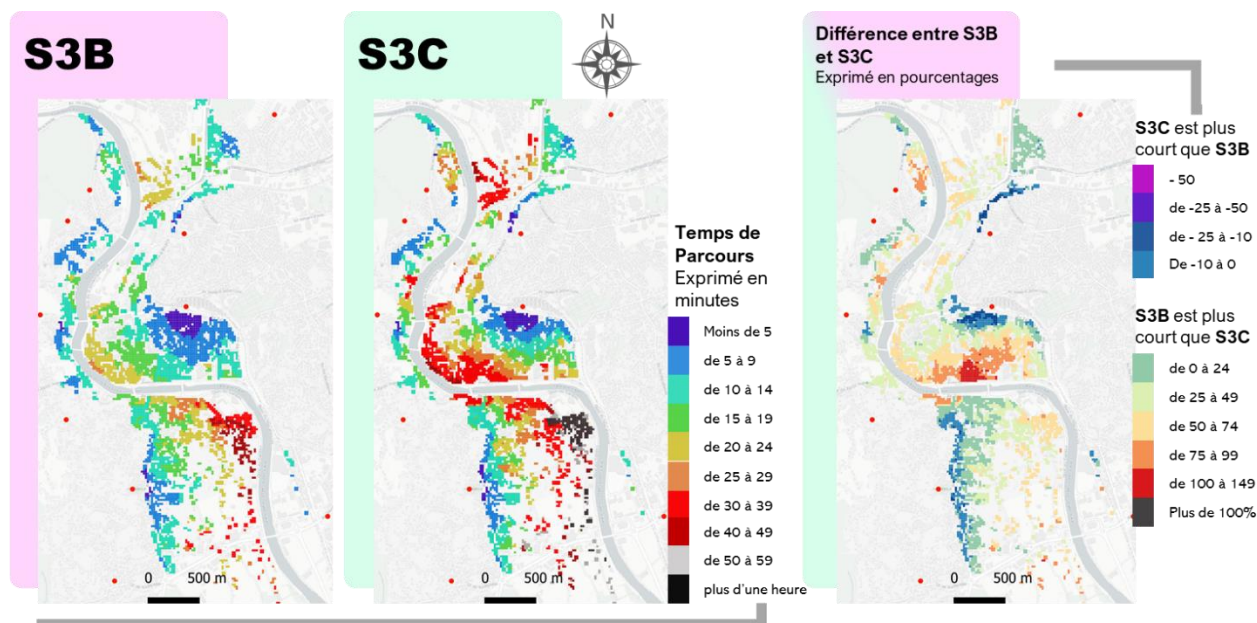


Figure 59 - Comparaison des temps de parcours S3B / S3C

IV.3.2 Impact de la fermeture (ou non) des ponts

Le territoire étudié est traversé de nord en sud par un fleuve, le Gardon d'Alès. L'aléa considéré dans ce contexte soulève inévitablement des questionnements autour d'une éventuelle montée des eaux, mais surtout, menace le territoire d'une onde de submersion, en cas de rupture du barrage situé en amont. De cette situation découle logiquement la décision de ne pas ouvrir les ponts à la circulation sur l'ensemble de la zone menacée.

Partout sur les communes concernées par ce risque, les personnes sont en effet invitées à évacuer dans la direction contraire au fleuve. Ce choix est compréhensible et fait sens lorsque l'on sait que l'onde de submersion mettrait moins de deux minutes à atteindre les premières zones habitées (sur les communes situées le plus au nord d'Alès, en direction du barrage).

Toutefois, l'évacuation est préventive, elle a donc lieu avant la rupture du barrage, en anticipation de cette dernière. De plus, si l'onde de submersion atteint rapidement les premières habitations, certaines communes situées plus en amont pourraient disposer de plus de temps avant la submersion. En réalité, cette consigne découle d'une logique de prudence maximale qu'il n'est aucunement question de remettre ici en question. Cependant, il a été jugé pertinent de tester plusieurs scénarios incluant une praticabilité des ponts sur la zone d'étude, et notamment sur la commune Alésienne.

La question de la praticabilité des ponts lors de l'évacuation mérite d'être posée pour deux raisons. La commune d'Alès est située très en aval du barrage de Sainte Cecile d'Andorge, l'onde de submersion n'y arriverait qu'au bout d'une heure. Les résultats précédents ont également montré une congestion possible des axes routiers situés près du PRE correspondant à la gare ferroviaire. Cela est causé par le grand nombre de personnes drainées par ce PRE, en configuration « chemins les plus courts ».

L'ensemble des personnes se trouvant au sein de l'IRIS « centre-ville » doivent rejoindre le PRE numéro 10. Pourtant, pour un certain nombre de ces personnes, il ne s'agit pas du PRE le plus proche, mais la traversée du Gardon étant interdite, il le devient *de facto*. L'objectif est alors d'analyser si l'ouverture des ponts permet d'accélérer suffisamment l'évacuation pour permettre de soulever cette question.

La Figure 60 présente les courbes de cumul des arrivées de six scénarios (S1B, S1P, S2B, S2P, S3B et S3P). L'objectif est de comparer la performance globale de l'évacuation lorsque les ponts sont ouverts à la circulation et lorsqu'ils ne le sont pas, et ce, pour chacune des trois configurations de répartition spatiale de la population.

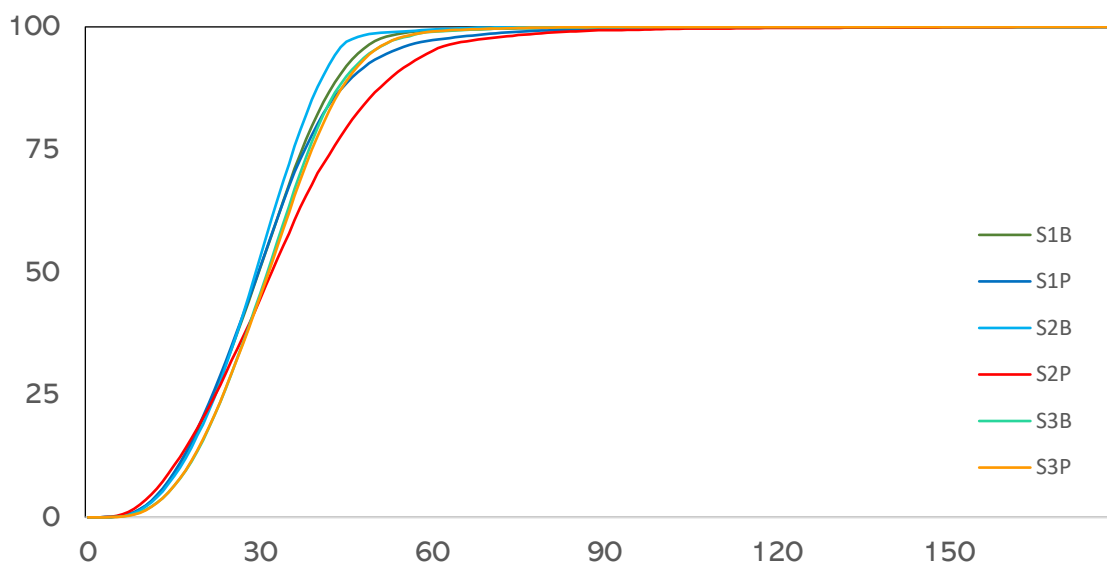


Figure 60 – Comparaison des scénarios avec et sans ouverture des ponts à la circulation

Les différences entre les scénarios de type SxB et SxP varient en fonction de la répartition spatiale de la population considérée. Les courbes S1B et S1P sont relativement proches l'une de l'autre. L'évacuation semble néanmoins ralentie dans S1P à partir de trente minutes. S1P accuse une baisse de près de 4% dans le cumul des évacuations complétées à partir de 50 minutes par rapport à S1B (Figure 61).

Dans le cas du couple de scénario S2B et S2P, l'évacuation lors de S2B est complétée beaucoup plus rapidement que dans S2P. Dans le couple S3B et S3P, les deux courbes de cumul des évacuations complétées sont en revanche relativement proches. La Figure 61 résume les écarts observés dans le cumul des évacués pour les différents couples de scénarios S1x, S2x et S3x.

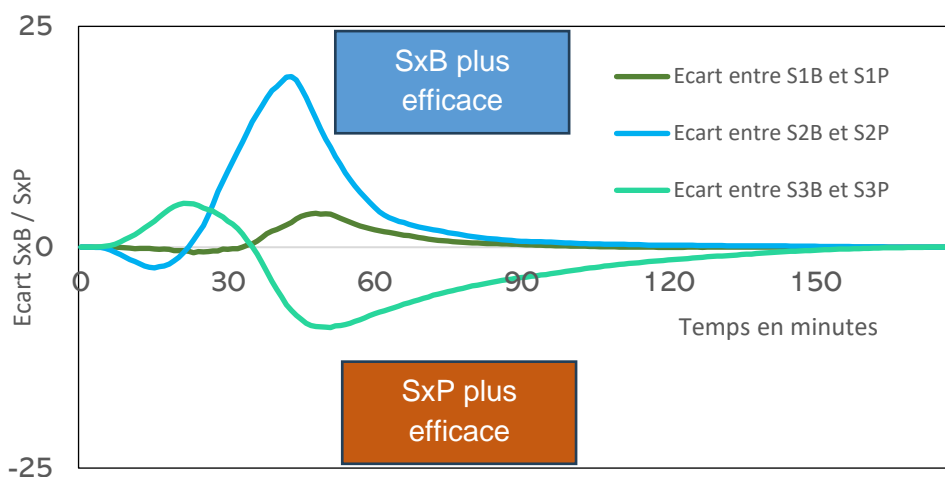


Figure 61 – Ecart en nombre d'évacuation complétées par minutes entre les scénarios SxB et SxP (l'écart est exprimé suivant la formule $\frac{\text{cumulRelatif.SxB}}{\text{cumulRelatif.SxP}}$)

Le graphique en Figure 61 met en évidence les écarts entre les scénarios SxB et SxP pour chaque couple de scénario (S1x, S2x et S3x). Plusieurs éléments d'analyse sont soulignés par les courbes présentées.

En premier lieu, l'ouverture des ponts tend à ralentir l'évacuation dans le couple de scénarios S1x. Les raisons de ce ralentissement de l'évacuation des personnes ont été soulevées dans la section précédente. Dans le couple de scénarios S3x, la relation est inversée. L'ouverture des ponts améliore l'évacuation. Cela suggère une influence de la répartition spatiale de la population au moment du déclenchement de l'évacuation. Enfin, un résultat plus difficile à interpréter, celui obtenu lors du couple de scénarios S2x. Lors de la présentation des résultats (section précédente), il avait été mis en évidence que les temps de parcours étaient plus longs dans S2B que dans S2P, pourtant, l'évacuation globale des personnes semble s'opérer plus rapidement. Ce résultat, erreur possible mise de côté, peut s'expliquer de plusieurs façons. Le scénarios S2B pourraient être le plus efficace pour une partie significative de la population, un reliquat de personnes pourrait alors avoir besoin d'un temps plus important pour évacuer, mais ce reliquat, bien que représentatif d'une zone, ne serait pas significatif en termes de proportion sur l'ensemble de la population de la zone. Autrement dit, la comparaison des temps de parcours entre S2B et S2P met surtout en évidence le quartier de la prairie, S2B y est plus long que S2P. Seulement, ce quartier est, dans le cas des scénarios S2x, quasiment vidé de ses habitants. Le reliquat de personnes qui y restent pourrait alors entraîner des temps de parcours plus long. D'autant plus qu'en cas de fermeture des ponts, les deux PRE le plus proche (03 et 04), sont plus éloignés que lorsque ces derniers sont ouverts, le PRE accessible le plus proche de cette zone devenant le numéro 10.

Les Figure 62 et Figure 63 présentent la cartographie des temps de parcours pour chaque couple SxB / SxP. La Figure 62 met en évidence un rallongement des temps de parcours pour une partie de la population située au niveau de la partie sud-ouest

de l'IRIS centre-ville. Il s'agit d'une portion de territoire densément peuplée. Lorsque les ponts sont ouverts et que le paramètre D1 est égal à 'PC', les personnes se trouvant dans ce quartier en démarrage de simulation se dirigent alors vers les PRE 03 et 04. Cela corrobore le constat mis en avant lors de la présentation des résultats. L'ouverture des ponts entraîne donc une redirection des personnes vers d'autres PRE, les axes d'accès n'étant pas suffisamment larges pour supporter les nouveaux flux, des encombrements sont générés. Cela entraîne donc une augmentation des temps de parcours, et rend le scénario S1P moins efficace que son équivalent sans ponts. Ce résultat est largement du fait de la forme du réseau. Si les axes étaient de largeur homogène, l'écart pourrait être différent.

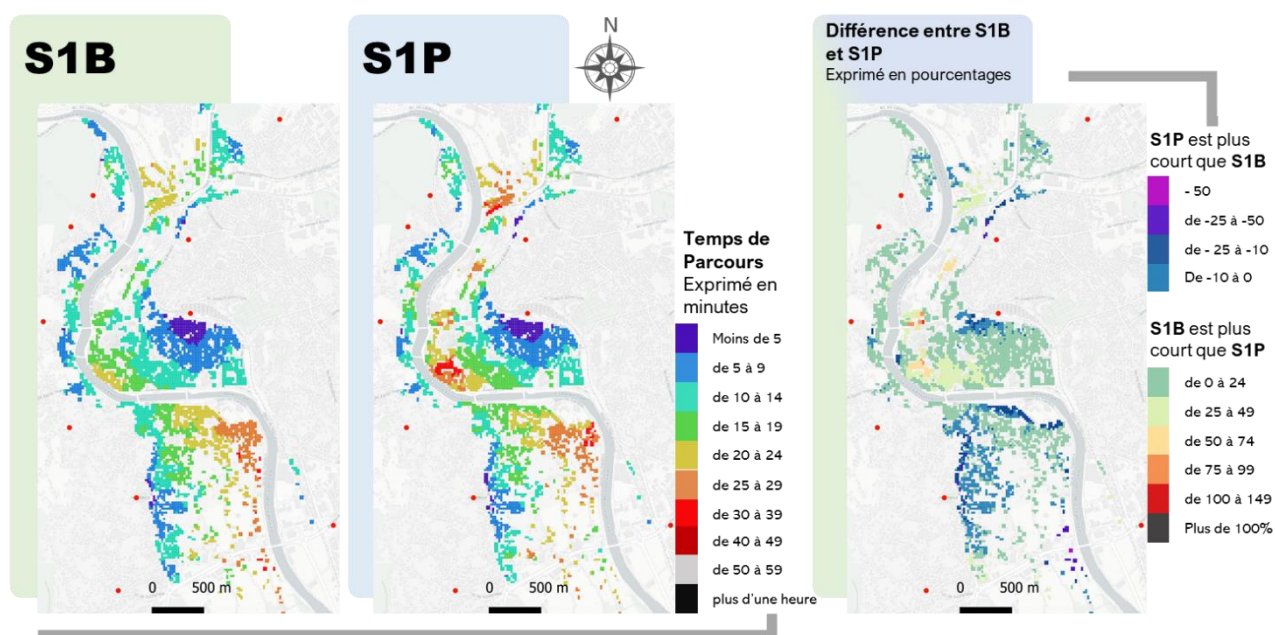


Figure 62 - Comparaison des temps de parcours S1B/S1P

La donne est inversée dans le cadre de la simulation du couple de scénario S3x. Dans ce cas de figure, l'ouverture des ponts permet de sensiblement diminuer le temps de parcours des personnes. Pour rappel, les scénarios S3x utilisent la deuxième répartition de population, présentée plus haut dans ce chapitre. Une zone en particulier semble profiter de l'ouverture des ponts, il s'agit du quartier de la prairie, et de l'IRIS correspondant, d'une manière plus générale. Cela s'explique bien, si l'on replace ce résultat dans son contexte.

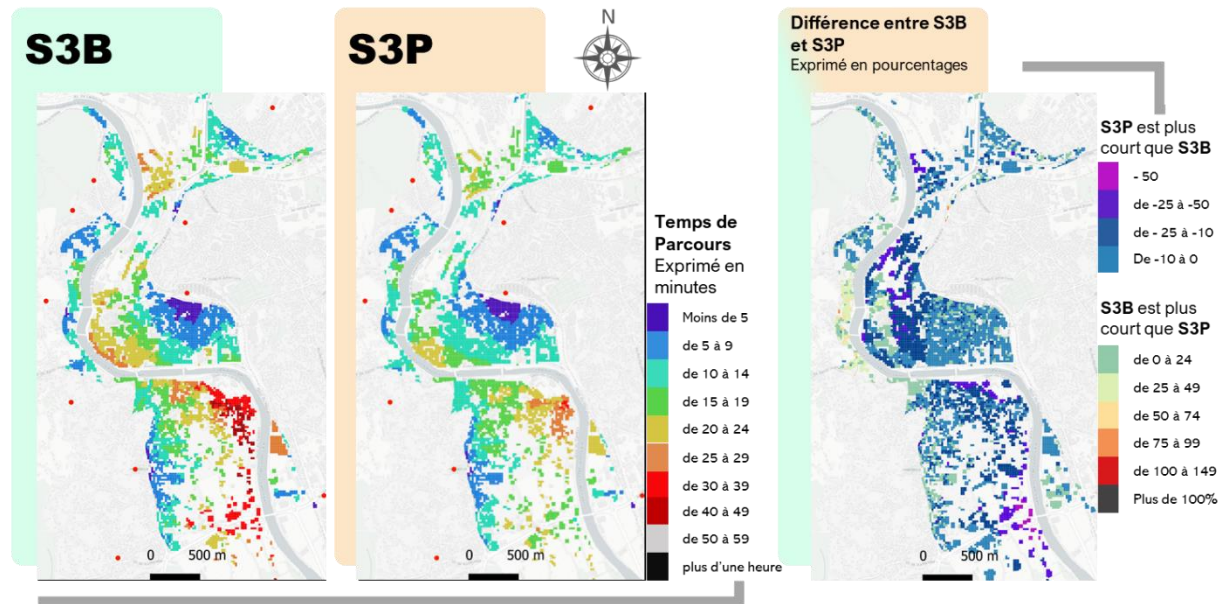


Figure 63 – Comparaison des temps de parcours S3B/S3P

Précédemment, il a été mis en évidence que les axes situés autour des PRE 03 et 04 n'admettaient pas de flux piétons au-delà d'une certaine taille, cela se traduisant par des encombrements, et donc des ralentissements. Dans le cadre des scénarios S1x, la répartition de population utilisée, la première, indique une forte densité de population au niveau du centre-ville. C'est une zone qui, lorsque les ponts sont ouverts, est redirigée vers les PRE 03 et 04. Or, dans le cadre des scénarios S3x, la répartition de population tend à densifier cette dernière au niveau des équipements collectifs situés dans le quartier de la prairie. Dès lors, l'ouverture des ponts génère une inversion du problème.

Les populations situées au niveau du quartier de la prairie peuvent se diriger, lorsque les ponts sont ouverts, vers le PRE 10. La nature des axes et surtout le maillage du réseau routier pour atteindre ce PRE suggère des déplacements sensiblement moins contraints. En revanche, lorsque les ponts sont fermés, cette population située au niveau du quartier de la prairie ne peut uniquement se diriger vers les PRE 03 et 04. Il s'agit du même problème que précédemment, mais l'ouverture des ponts entraîne ici un effet inverse.

L'analyse de l'effet d'une ouverture des ponts au passage des personnes, au-delà de ce qu'elle indique sur la prose d'une telle mesure, pose en question centrale la répartition de la population sur le territoire au moment du déclenchement de l'évacuation.

IV.4 Conclusion intermédiaire

Ce chapitre s'inscrit dans la continuité de l'analyse de sensibilité du modèle de simulation menée dans le troisième chapitre. L'objectif a été de contextualiser l'outil de simulation dans un contexte géographique particulier. Un travail a donc été mené sur le territoire d'étude afin de différencier différents contextes d'application du modèle de simulation. Le chapitre précédent a démontré l'importance des variables

démographiques sur les sorties du modèle de simulation. Il a été choisi, en conséquence, de construire ces contextes d'application autour de la quantité de personnes se trouvant dans la zone à évacuer, mais également leur répartition sur le territoire. Trois répartitions spatiales de la population ont été estimées. Plusieurs configurations de paramètres ont été appliquées sur ces trois contextes territoriaux.

Dans la continuité de l'analyse de sensibilité menée dans le chapitre précédent, les mêmes paramètres ont démontré avoir un impact fort sur les résultats du modèle. La densité locale de population génère des ralentissements significatifs dans les temps de parcours des personnes. Les scénarios ont pu proposer des configurations de répartition de la population menant à des valeurs extrêmes (près de 1000 personnes rassemblées sur des tronçons de tailles réduites). Si le modèle de simulation n'a, pour le moment, pas vocation à être déployé dans un but opérationnel, ce constat démontre la variance des résultats, entraînée par la répartition spatiale de la population au moment du déclenchement de l'évacuation. De plus, il convient de rappeler que la capacité d'accueil maximale estimée par le Service Départemental d'Incendie et de Secours du Gard (SDIS30) a été, pour des raisons de prudence, revue à la baisse lors de l'implémentation des données d'entrée dans la simulation. La fréquentation des différents ERP pourrait alors être plus importante que celle implémentée dans ce chapitre.

CONCLUSION GENERALE

Les enjeux de la simulation des mobilités lors d'évacuations préventives

Le risque et la crise sont les deux concepts centraux autour desquels s'articule ce travail de thèse. Le risque a été conceptualisé en premier lieu dans les sciences économiques. Il a été ensuite étendu aux autres disciplines. Aujourd'hui, le concept de risque est transversal, son acceptation peut légèrement varier au regard de la discipline ou de la thématique qui le mobilise. La crise est un élément qui vient perturber un système, d'une manière nouvelle, ce qui ne permet pas au système de s'en prémunir efficacement, et oblige donc à la mise en place de dispositifs de réponses exceptionnels. Au-devant de la multiplication des aléas naturels et industriels, et de l'instabilité croissante du climat, il est légitime de porter une réflexion sur la mise en place d'évacuations de populations sur de larges territoires. Opération hautement liée à la gestion de crise, impliquant divers champs de recherche, de la psychologie cognitive, aux sciences mécaniques, en passant par la géographie, les connaissances autour des évacuations de population doivent être enrichies.

La réalisation d'exercices peut constituer un bon moyen de développer les connaissances autour des évacuations de population. Toutefois, les populations concernées sont rarement impliquées. Les exercices de gestion de crise peuvent alors être considérés comme un outil d'amélioration des pratiques à destination des organisations gestionnaires. Leur utilité ne fait débat, ils sont primordiaux dans la gestion des crises. Cependant, il convient de s'interroger sur le développement des connaissances concernant les mobilités des personnes lors d'évacuations.

En supplément de l'exercice de gestion de crise, qui implique généralement une (ou plusieurs) cellule(s) de crise, les simulations numériques ont démontré pouvoir apporter de l'information sur les évacuations en se focalisant sur les mobilités des personnes.

Dans un premier temps, l'étude des processus d'évacuation a permis d'identifier les facteurs d'incertitudes inhérents au processus. Des incertitudes contextuelles, dérivant de la spatio-temporalité de l'événement déclencheur, et d'éléments externes tels que l'aléa en lui-même ou les conditions météorologiques. Des incertitudes organisationnelles, si l'on considère que la cellule de crise et les décisions qu'elle met en œuvre impactent le processus. Enfin, des incertitudes sur le comportement des individus, principaux acteurs du processus.

Cette contextualisation de la démarche de recherche a précédé la réalisation d'un état de l'art des simulations de mobilités en situation de crise. Les systèmes multi-agents peuvent être adaptés afin de simuler des mobilités. Ils permettent de modéliser et simuler un système au travers de ces entités élémentaires et de leurs interactions. Ils sont donc particulièrement indiqués pour la simulation d'évacuations de population. Ils permettent de distribuer l'intelligence afin d'observer des organisations spatiales

de rang supérieur. Ensuite, une confluence de questions de recherche a été identifiée. D'une part des simulations à l'échelle microscopique (bâtiments, pièces, corridors) soulevant des questions de partage physique de l'espace. D'autre part des simulations à l'échelle macroscopique (quartier, ville, région) questionnant le comportement des individus dans l'espace. Ces deux éléments ont alors été joints afin de développer une approche pluridisciplinaire des mobilités.

Le modèle a été conçu avec l'objectif de joindre ces deux aspects des mobilités. Il doit intégrer les principales réponses comportementales individuelles des personnes susceptibles d'influencer une opération d'évacuation. Il est également nécessaire que le modèle de simulation puisse être adapté afin d'intégrer de potentielles consignes émises par une cellule de crise. Il doit également intégrer la variabilité du contexte spatio-temporel dans lequel les évacuations s'opèrent. Il doit permettre de mesurer la performance globale de l'évacuation mais également de rendre compte de la forme spatiale des mobilités lors de cette dernière. Enfin, l'étude de cas précédents a orienté la démarche vers les évacuations impliquant une majorité de déplacements piétons.

Le modèle de simulation doit alors prendre en compte cet aspect, et notamment les questions qu'il soulève en matière de déplacement et de partage de l'espace. Cela a permis l'élaboration d'un modèle composé de 9 paramètres permettant de définir les règles de sortie des bâtiments (B), les variations de vitesse des individus (V) et les stratégies de choix d'un itinéraire (D).

Le modèle a ensuite été implémenté sous la forme d'une simulation à base d'agents. La simulation se compose de deux éléments. Une base, qui permet de simuler la mobilité des personnes lors d'une opération d'évacuation. Cette base est adaptée aux déplacements piétons. Elle repose sur une version simplifiée du Social Force Model, mis à disposition via un plug-in par l'équipe de développement de la plateforme GAMA. Une partie des paramètres du modèle a également ensuite été intégrée dans la simulation. Il s'agit des paramètres B1, concernant la proportion de refus d'évacuer ; B2, le temps de préparation ; B3 les sur-évacuations ; D1, la méthode de cheminement ; D2, le choix de destination ; V2, la praticabilité du réseau. Compte tenu des résultats préliminaires (Chapitre 3) et des évolutions conceptuelles apportées au modèle, le paramètre B1 n'a pas été conservé dans le cas d'application. La simulation prend la forme d'un outil, grâce auquel il est possible de tester différentes configurations de paramètres. Les paramètres possèdent chacun entre deux et quatre valeurs possibles, cela permet de simuler un nombre important de scénarios.

Afin d'utiliser l'outil de simulation, son comportement a été caractérisé. Pour ce faire, chaque paramètre a été testé indépendamment des autres paramètres. Puis, les paramètres ont été testés sur la base d'hypothèses de synergies. Les tests effectués sur les paramètres ont montré deux types d'impacts de ces paramètres sur l'opération d'évacuation simulée. Certains paramètres contribuent à allonger significativement le l'évacuation dans sa globalité. C'est par exemple le cas du paramètre V2, qui ralentit simplement les personnes lorsqu'elles se déplacent. C'est également le cas du paramètre B2, un délai dans les temps de préparation entraînant un logique délai dans la complétion de l'évacuation. En dépit de leurs impacts, ces paramètres ne questionnent pas le système de mobilité dans sa globalité. Ils contribuent à ralentir

L'évacuation des personnes, certes, mais ce ralentissement est individuel. Ils ne mettent pas en évidence l'émergence de structures spatiales telles que des encombrements.

D'autres paramètres ont, en revanche, démontré impacter le système de mobilité dans son ensemble. Le paramètre D1 lorsqu'il est égal à PG (chemin le plus dégagé), rassemble les personnes sur une petite quantité d'axes, et favorise un délai dans les temps de trajet. B2, lorsqu'il tend vers sa valeur positive (temps de préparation des personnes plus courts) tend à favoriser l'augmentation de la taille des flux de piétons, créant encombrements et ralentissements. A tel point que dans certaines situations, l'avantage d'un départ plus rapide des personnes est perdu par la difficulté qu'elles ont à atteindre leurs destinations. La mise en évidence de l'émergence de tels effets a orienté le choix d'un cas d'application. L'objectif s'est recentré autour de l'étude d'une augmentation potentielle de la population en zone menacée.

L'application du modèle de simulation sur plusieurs configurations territoriales différentes a permis de simuler des scénarios d'un niveau de complexité supérieur. Deux configurations territoriales ont été ajoutées. Elles contribuent à concentrer la population au sein de la zone menacée. Cette application du modèle de simulation a permis d'affiner la caractérisation du comportement du modèle de simulation, mais également de fournir de l'information sur un territoire particulier.

Le modèle de simulation proposé dans ce travail de thèse a démontré pouvoir fournir de l'information sur les mobilités lors d'une évacuation de population. Le nombre de paramètres intégrés permet de tester un nombre important de scénarios. Le nombre d'indicateurs de sortie permet de fournir un matériel d'analyse important afin de comparer les scénarios. Les résultats mettent en évidence la capacité du modèle de simulation à décrire le système de mobilité tel qu'il pourrait se matérialiser lors d'une évacuation préventive. Cependant, les évacuations de populations, qu'elles soient préventives ou curatives, sont des opérations dont la complexité dépasse largement un simple déplacement de population. Le modèle de simulation proposé dans ce travail de thèse ne peut être considéré comme un modèle complet de simulation d'une évacuation préventive.

Les limites du modèle de simulation

Un certain nombre de limites, à la fois du modèle, et de la simulation, sont à relever. Ces limites sont de deux ordres. D'une part conceptuelles, ce sont des limites inhérentes à la conception du modèle. Et d'autre part techniques, ces limites sont liées à l'instanciation et le paramétrage de la simulation.

Limites de la démarche scientifique

Avant d'aborder ces deux ensembles de limites, il faut également apporter un regard critique vis-à-vis de la démarche scientifique menée dans ce travail. La problématique initiale questionnait la possibilité de construire un modèle de simulation de mobilité en situation de crise dans le cadre d'une évacuation préventive de population.

Dans ce travail, la question des mobilités lors de situations crisogènes a été abordée par les processus d'évacuation en eux-mêmes. Rapidement, le cadrage du projet s'est donc construit à l'intérieur d'un framework réglementaire, celui de l'opération d'évacuation en tant qu'outil de gestion de risque. Cela a pu contribuer à limiter le matériel d'analyse, composé de retours d'expérience et de reconstitutions d'événements. D'une part le matériel d'analyse est relativement maigre, les ReTex étant principalement des outils à destination des organisations, ils ne s'attardent que peu sur les mobilités en elles-mêmes, quand bien même celles-ci pourraient être mesurées avec précision.

Ensuite, les mobilités en situation de crise, c'est bien plus que celles s'inscrivant dans le cadre d'évacuations de population conduites par une cellule de crise. C'est en confrontant ce corpus d'informations avec celui que l'on retrouve dans certains travaux traitant des foules et de leurs comportements en dehors du cadre de l'évacuation comme outil de gestion de crise, que le constat de l'incomplétude de ce corpus nous est apparu.

Le modèle résultant de ce travail d'analyse en devient alors très procédural, il ne prend pas en compte des phénomènes n'étant pas rapportés dans des ReTex ou n'étant pas questionnés sous un angle « gestion de crise ». Cela entraîne une absence de certains questionnements importants concernant les mobilités en situation de crise.

Limites du modèle

L'une des limites importantes du modèle présenté dans ce travail prend racine dans le positionnement scientifique adopté et probablement dans la construction de la problématique de recherche. Une simulation des mobilités en situation de crise ne peut pas s'abstenir d'afficher un positionnement clair concernant l'acceptation choisie du concept de crise.

Le concept peut à la fois renvoyer à un paradigme pluridisciplinaire qui gravite autour de l'effet délétère d'une perturbation sur un système. Il peut également renvoyer à un cadre juridique et institutionnel fort, proposant méthodes, outils et processus afin de limiter les effets d'une perturbation sur un système, souvent territorial. S'orienter vers la première acceptation c'est intégrer la crise au sein du modèle comme ayant un effet sur ses éléments. Cela n'est pas possible, à notre connaissance, sans l'utilisation d'agents cognitifs. S'orienter vers la seconde acceptation nécessite l'intégration des principaux acteurs de la gestion de crise dans le modèle. Un système multi-agents permet, en théorie, un tel travail. L'absence de choix clair entre ces deux approches de la crise ont pour résultat un modèle faible dont la portée explicative est probablement limitée.

Le modèle est également limité dans son état par son incapacité à faire émerger autre chose que des constats territoriaux. Cette limitation a deux origines : premièrement, un SMA performant va souvent de pair avec une approche d'implémentation simple. Une trop grande complexité de règles tend à favoriser l'inertie du modèle (Axelrod, 2000). L'un des exemples, qui résume l'une des faiblesses de notre démarche, se trouve dans l'implémentation du paramètre B2. Globalement, lorsque la courbe

utilisée dépasse les 15 minutes (l'ensemble de la population évacuée en plus de 15 minutes), plus aucun effet de densité n'est observable. Il s'agit donc d'une règle annihilant la capacité explicative du modèle.

La seconde, c'est l'absence de cognitivité des agents. Cela peut être un parti pris dans certaines disciplines. En sciences humaines, c'est une limite importante. Les agents n'existent que physiquement, ce qui limite grandement la possibilité d'émergence de structures spatiales cohérentes et durables, pourtant fortement probables dans un tel contexte.

Limites de l'implémentation du modèle dans la simulation

L'ensemble des paramètres conceptualisés à l'origine n'ont pas pu être portés jusqu'à l'étape d'implémentation au sein de la simulation. Certains d'entre eux sont pourtant primordiaux. Aucune évacuation à une telle échelle ne peut être considérée péremptoirement comme totalement monomodale, ce qui rend l'intégration de la multimodalité, à travers notamment l'utilisation de véhicules individuels, nécessaire à nos yeux. Également, le travail bibliographique réalisé en amont du développement du modèle de simulation a mis en évidence la formation de foules, ou du moins de groupes de personnes, durant les évacuations de population. Cet élément est parmi les plus intéressants à intégrer dans un modèle de simulation, puisque l'émergence de foules, ou de groupes de personnes, peut entraîner des conséquences imprédictibles sur l'opération d'évacuation. Malgré la mise en évidence de la possibilité d'émergence de telles structures, ont manqué seuils, chiffres et éléments précis de caractérisation. Ces manques ont entraîné une non-poursuite de cet aspect lors de l'implémentation de la simulation. Si l'utilisation d'hypothèses simplificatrices aurait pu permettre l'intégration de ces phénomènes, une telle orientation n'a pas été prise.

Parmi les paramètres ayant pu être portés jusqu'à l'étape de simulation, plusieurs limites conceptuelles sont recensées. Le paramètre B1, qui contrôle la proportion de refus d'évacuer, renvoie certes à une réalité concrète des opérations d'évacuations de population, mais ne s'avère ni utile ni pertinent au sein de la démarche globale adoptée dans ce travail. Réduire le nombre d'évacués n'a de sens que si l'on parvient à une caractérisation minimale de facteurs explicatifs de ces refus d'évacuer. Autrement, ce paramètre fait ressembler la simulation à une *sandbox* peu cohérente.

Le paramètre B2 qui contrôle le temps de préparation des personnes, apporte quant à lui une réelle contribution méthodologique à ce travail. Cependant, il a été calibré lors de notre démarche à l'aide des maigres courbes de cumul des départs ayant pu être identifiées dans la littérature. Ces courbes de cumul confèrent un étalement des départs sur une période d'une durée d'une heure, parfois deux heures, suivant les sources. De telles valeurs contribuent à espacer le départ des personnes dans le temps de telle sorte qu'il n'existe plus aucun effet lié à la densité des flux piétons. Autrement dit, les personnes ne sont plus contraintes par d'autres personnes durant leurs déplacements. Les résultats induits par le paramètre B2, dans ce cadre-là, peuvent alors relever d'une tautologie. S'il faut 1h afin que l'ensemble des personnes débutent

effectivement leur évacuation, il y a de fortes chances que l'évacuation prennent une heure de moins que si les personnes ont besoin de deux heures.

Le paramètre B3 a dû faire l'objet d'une modification afin de l'adapter au contexte d'application, ce qui représente un échec dans le déploiement général de la méthode. Pour rappel, elle était censée pouvoir s'adapter à différents contextes géographiques. B3 avait pour ambition de tester l'impact d'un phénomène de sur-évacuation. La sur-évacuation de personnes non concernées par le périmètre d'évacuation peut, dans un premier temps, porter atteinte à la sécurité directe des personnes, mais également ralentir significativement le processus d'évacuation en lui-même, en augmentant la prévalence des phénomènes de congestion par exemple. La sur-évacuation implique donc l'ajout d'une population non concernée par l'évacuation qui y prendrait quand même part. C'est une problématique centrale de l'évacuation de population en cas d'ouragan en Amérique du nord, par exemple (Zhang *et al.*, 2020).

Le paramètre devait donc, à l'origine, permettre d'implémenter une zone tampon, autour de la ZPI officielle, dans laquelle les personnes pourraient évacuer par effets de mimétisme ou par manque d'information. Elles se sentiraient ainsi concernées par l'évacuation alors qu'elles ne le sont pas. Ce type d'implémentation, bien que méthodologiquement pertinente, s'adapte mal à une évacuation préventive sur le territoire de la commune d'Alès ainsi qu'au neuf autres communes concernées par le PPI de Sainte-Cécile d'Andorge.

Le paramètre D1, qui contrôle la méthode de construction des itinéraires par les personnes a démontré un potentiel explicatif intéressant. Les itinéraires générés n'étant pas aberrants, ils en deviennent intéressants parce que capables de fournir des itinéraires alternatifs crédibles, ce qui reste assez complexe à implémenter. En revanche, un tel paramètre aurait gagné à voir ses valeurs possibles disséminées sur une population globale.

Le paramètre D2, qui contrôle le choix de destination, souffre de deux manques majeurs. D'abord, il ne permet pas de rendre compte de réels processus de décisions, qui pourraient varier fonction du contexte et de la valeur des autres paramètres par exemple. Ensuite, le territoire de test et d'application se prête mal à l'application des données issues de la littérature, ayant une valeur prédictive faible dans un tel contexte.

Enfin, le paramètre V2, en plus de limitations techniques, par exemple l'incapacité à intégrer l'anisotropie des écoulements d'eau, pose également la question de l'évitement du ruissellement par les personnes. Cela renvoie à plusieurs éléments mentionnés plus tôt, l'intégration d'une réelle prise de décision, la cognitivité des agents, pour ne citer que ces deux principales opportunités d'enrichir la mise en œuvre de ce paramètre.

Les principales perspectives envisagées

Plusieurs perspectives ont été évoquées au cours de ce manuscrit, dont les plus saillantes vont être évoquées. En particulier, le modèle de simulation proposé dans ce travail de thèse ouvre la réflexion autour, d'une part, des possibilités de

développement de son architecture, et d'autre part autour des contextes dans lesquels il pourrait être déployé.

Conceptualisation des mobilités en situation de crise

Le modèle de simulation développé dans cette thèse inclut un travail de recherche préalable sur la thématique des évacuations dans un contexte de gestion de crise « à la Française ». Les évacuations en France sont déclenchées et gérées par une organisation spécifique, dont la taille et les compétences intrinsèques peuvent varier en fonction de l'ampleur de l'évacuation à mettre en œuvre.

Ce type d'évacuation, comme souligné précédemment, ne suffit pas à décrire l'ensemble des mobilités en situation de crise. Tout comme le cas d'application de cette thèse ne suffit pas à tester un modèle de simulation des mobilités en situation de crise.

Une autre approche est donc possible et doit être envisagée.

Développement de l'architecture du modèle

L'architecture du modèle de simulation ici présentée élude un certain nombre d'éléments, dont la pertinence d'intégration est largement défendable. Ces éléments architecturaux peuvent être décomposés en plusieurs catégories. Certains sont relatifs aux éléments déjà préexistants dans le modèle de simulation, et pourraient donc permettre d'améliorer d'outre passer les limites identifiées dans la section précédente.

Dans (Bulumulla, 2022) l'approche utilisée est appelée « multi-level modeling », pour modélisation multi-niveaux. Elle implique trois niveaux : physique, cognitif et social.

En l'état, le niveau physique est implémenté sur la base des travaux de (Helbing and Molnár, 1995) à propos du « social force model » (SFM). Si le SFM fait encore l'objet de travaux permettant de l'améliorer, avec par exemple (Fu *et al.*, 2024) proposant d'intégrer une « zone de respect » autour des personnes, afin qu'elles puissent décélérer graduellement, afin d'anticiper la présence d'un obstacle, la version simplifiée implémentée grâce à la plateforme GAMA déployée dans ce modèle de simulation a montré satisfaction. De plus, dans un contexte d'évacuation en milieu urbain, une prise en compte détaillée des interactions physiques n'est pas nécessaire.

Parmi les éléments implémentés dans le modèle pouvant être améliorés, la perspective la plus saillante nous paraît être la gestion des comportements individuels. En outre, certains travaux proposent un niveau de détail important dans la prise en compte des comportements en situation de catastrophe. Dans (Provitolo *et al.*, 2015), les auteurs propose une modélisation conceptuelle et mathématique des comportements individuels en situation de catastrophe. Dans un premier temps, les comportements sont regroupés en « méta-comportements », puis, ces méta-comportements sont formalisés mathématiquement.

Cela correspond alors au niveau cognitif de l'architecture multi-niveaux proposée dans (Bulumulla, 2022). L'intégration des comportements individuels dans un modèle de simulation peut se faire suivant deux niveaux de complexité. Un premier niveau de complexité qui permet l'émergence de comportements originaux, non paramétrés

initialement : c'est la grande force des architectures BDI (*believes, desires, intentions*). La deuxième méthode, celle employée dans ce travail de thèse, consiste en l'application d'une typologie de comportements observés en situation réelle. Ces comportements n'émergent alors plus, ils sont implémentés et l'intérêt réside dans la mesure de leurs impacts sur un processus global. Dans ce cadre, les travaux de formalisation mathématique de l'apparition de comportements caractérisés se constitue, dans l'état actuel de la recherche, en méthode idoine. C'est une perspective d'évolution intéressante pour notre modèle de simulation.

L'hypothèse d'accolement d'un module BDI à nos agents « people » se constitue en opportunité d'une meilleure utilisation du framework SMA. En effet, l'une des caractéristiques fondatrices d'un SMA réside dans la capacité qu'ont les agents à acquérir, échanger et traiter de l'information afin d'y répondre en conséquence, parfois par une évolution de leurs états. Les travaux de (Lancel *et al.*, 2023) utilisent par exemple, dans des travaux récents, cet aspect afin d'étudier l'impact de la signalisation sur l'évacuation d'un magasin en cas d'attaque terroriste. Dans un modèle de simulation des mobilités en situation de crise cela se traduit donc par une évolution du comportement d'un agent « people » en fonction de l'information qu'il possède sur une situation donnée. L'utilisation d'architecture BDI dans un tel contexte a été impulsée, en France, par le LIG (Adam, Beck and Dugdale, 2015), ce qui témoigne d'une maturité de cette approche. Ces architectures permettent non seulement de conceptualiser l'information au sein du modèle de simulation, mais également de simuler des regroupements de personnes et de modéliser le tissu social entre les individus lors d'une évacuation.

C'est l'objet de la thèse de (Bañgate, 2020), travail qui a démontré pouvoir intégrer un haut niveau de complexité d'intégration du tissu social lors d'une évacuation de population. Des travaux plus récents étudient également cette possibilité consistant à modéliser des effets de diffusion (Bulumulla, 2022). Ce type d'approche pourrait notamment permettre de diffuser un niveau de panique, tel que conceptualisé par (De Iuliis *et al.*, 2023) par exemple, parmi la population ou encore d'appliquer le modèle de simulation dans des contextes de risques croisés, sur le modèle des travaux de (Daudé, Grancher and Lavigne, 2021). En réalité, toutes ces opportunités permettraient de « donner vie » au modèle de simulation présenté dans ce travail.

Ces perspectives peuvent être discutées à la lumière d'autres travaux qui permettent eux-aussi l'émergence de groupes lors d'évacuations sans utiliser de module BDI. Dans (Xie *et al.*, 2021) la gestion d'éventuels comportements sociaux est implémenté comme une extension du SFM. Dans (Huyen, Ha and Occello, 2023), l'aspect d'architecture multi-niveaux se retrouve. Des agents peuvent se rassembler afin de former des groupes mais ces rassemblements émergent par des mécanismes de proximité physique.

De notre point de vue, et au regard de la problématique que nous avons initialement formulée, la solution BDI semble, d'un point de vue des facteurs cognitifs qui peuvent contribuer à la formation de groupes, à privilégier.

En plus de l'évolution de l'architecture du modèle à travers l'évolution de ces éléments, d'autres facteurs peuvent être considérés comme pertinent à intégrer. C'est

par exemple le cas de la multimodalité. Considérée dans notre modèle, elle n'a pas pu être amenée jusqu'à l'étape d'implémentation dans la simulation. A ce premier axe d'amélioration s'en ajoute un autre : la multimodalité telle que décrite dans notre travail considère majoritairement l'utilisation par les personnes d'un véhicule individuel afin d'évacuer. Or, cet aspect soulève des questions importantes en termes de partage de l'espace et d'accessibilité du réseau routier pour les secours. Cependant, le caractère incertain de sa matérialisation lors d'un événement réel obligerait à faire des scénarios hautement interprétatifs sur l'apparition de tels comportements lors d'une évacuation.

Utilisation du modèle de simulation

Le développement d'un modèle de simulation pose la question du cadre de son utilisation. Le modèle de simulation développé dans ce travail de thèse a démontré pouvoir fournir de l'information sur les processus de mobilités en situation de crise dans un contexte particulier. Le territoire d'application a été décliné sous trois formes, le modèle de simulation a permis de simuler et comparer chacune de ces trois instanciations territoriales avec succès. Ces résultats posent deux perspectives d'utilisation du modèle de simulation.

La première concerne un diagnostic de territoire, au regard d'une possible évacuation de population. Le modèle de simulation permet de tester différents scénarios, et d'implémenter plusieurs zones géographiques. Il peut donc contribuer à identifier d'éventuels points bloquants lors d'une évacuation déclenchée sur un territoire. Toutefois, il ne peut pas faire plus qu'annoncer des tendances générales. Afin d'atteindre une capacité prédictive suffisante, les aspects mentionnés dans la section précédente doivent y être ajoutés.

Le modèle de simulation pourrait, sur le modèle des travaux de (Daudé and Tranouez, 2020), servir à éprouver des planifications d'évacuations existantes. Pour cela, il faudrait néanmoins plusieurs améliorations conceptuelles du modèle sous-jacent. La plus importante étant l'intégration de classes d'agents spécifiques aux moyens de réponses du territoire lors d'une évacuation. Cela permettrait un gain d'utilité important pour le modèle de simulation, il pourrait par exemple être utilisé dans le cadre d'exercices de gestion de crise.

La possibilité d'émettre une organisation de réponse territoriale virtuelle permettrait alors de tester les dispositifs au travers de l'élaboration de stratégies. Ces stratégies pourraient, au regard du développement des méthodes d'optimisation dans le domaine de l'intelligence artificielle, être largement bénéficiaire à certaines étapes du processus d'évacuation. D'éventuelles tournées de porte à porte seraient par exemple éprouvées afin de compléter les dispositifs d'alerte traditionnels. Des tournées de véhicules collectifs pourraient également être testées et validées.

Enfin, l'une des perspectives qui, bien que n'étant pas la plus pertinente d'un point de vue scientifique, constituerait une source de satisfaction personnelle, serait le développement d'une interface graphique accolée à la simulation afin de pouvoir la mobiliser dans le cadre d'exercices de gestion de crise. L'intégration d'une interface

graphique intuitive et la transformation du modèle de simulation en un outil applicatif pourrait également constituer le rapprocher d'un système d'aide à la décision.

Recherche disciplinée ou pluridisciplinaire ?

Ce travail est à l'origine une thèse en Géographie, qui, guidé par la thématique, a nécessité une ouverture disciplinaire importante. Il pose modestement la question de l'approche pluridisciplinaire dans les travaux de recherche, et particulièrement lorsque de telles approches sont menées par des chercheurs non expérimentés.

Une discipline est caractérisée par des concepts, des méthodes, des outils, dont la mise en œuvre permet à un travail de recherche de s'inscrire de manière plus sécurisée dans une continuité scientifique existante. Les approches pluridisciplinaires favorisent l'innovation par le croisement des concepts méthodes et outils. Cependant, le contrecoup parfois important se situe d'une part dans la mise en œuvre de démarches de recherche trop éloignées des standards disciplinaires, et d'autre part dans la mise en œuvre par les chercheurs de concepts méthodes et outils étrangers à leurs sensibilités disciplinaires.

C'est là tout l'enjeu, à mon sens, de la thématique de la simulation des mobilités. Les mobilités relèvent d'aspects physiques, psychologiques et sociaux, elles s'inscrivent dans une géographie, et enfin, les simuler demande parfois l'utilisation d'outils informatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Ackoff, R. L. (1981) 'On the Use of Models in Corporate Planning', *Strategic management journal*, 2(4), pp. 353–359.
- 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. *et al.* (2017) 'Modélisation multi-agent de la cohésion sociale en situation de crise', *Rapport de recherche*.
- 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.
- Adam, C. and Gaudou, B. (2016) 'BDI agents in social simulations: a survey', *Knowledge Engineering Review*, 31(3), pp. 207–238. doi: 10.1017/S0269888916000096.
- Aguilera, A., Madre, J. and Mignot, D. (2004) 'Métropolisation, formes urbaines et mobilité.', *les Cahiers Scientifique du transport*, 45, pp. 5–14.
- Aguirre, B. (1991) 'Evacuation in Cancun during hurricane Gilbert', *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 9(1), pp. 31–45.
- Ahuir, G. (2016) *Gestion de crise : l'appropriation territoriale à l'épreuve des faits*. Université Paris 1 - Pantheon Sorbonne.
- Alaeddine, H. *et al.* (2015) 'A spatiotemporal optimization model for the evacuation of the population exposed to flood hazard', *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), pp. 687–701. doi: 10.5194/nhess-15-687-2015.
- 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>.
- Anquetin, S. *et al.* (2018) 'High-impact Weather Events: Is a Socio-hydrometeorological Characterization Possible?', in *Mobilities Facing Hydrometeorological Extreme Events 1*. doi: 10.1016/b978-1-78548-289-2.50004-5.
- Araldi, A. and Fusco, G. (2017) 'Decomposing and Recomposing Urban Fabric: The City from the Pedestrian Point of View', *Computational Science and Its Applications*, 10407(Part IV), pp. 600–612. doi: 10.1007/978-3-319-62401-3.
- Arnaud, M., Adam, C. and Dugdale, J. (2017) 'Les limites du BDI pour rendre compte du comportement humain en situation de crise', *Rencontre des Jeunes Chercheurs en Intelligence Artificielle*.
- Astudillo Muñoz, G., Gil-Costa, V. and Marin, M. (2022) 'Efficient simulation of natural hazard evacuation for seacoast cities', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 81(September), p. 103300. doi: 10.1016/j.ijdr.2022.103300.
- Axelrod, R. (2000) 'Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences', in *Simulation Social Phénomènes*, pp. 21–40.

- Backlund, A. (2000) 'The definition of system', *Kybernetes*, 29(4), pp. 444–451. doi: 10.1108/03684920010322055.
- Baker, E. (1991) 'Hurricane evacuation behavior', *International journal of mass emergencies and disasters*.
- 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*.
- Bañgate, J. (2020) 'Multi-agent modelling of seismic crisis To cite this version : HAL Id : tel-02613082'.
- 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.
- Banos, A. (2015) 'Pour des pratiques de modélisation et de simulation libérées en géographie et shs'.
- Barkaoui, H. *et al.* (2017) 'Les plans de gestion de crises dans les pays francophones', '8ème édition de la conférence *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers, GISEH*, casablanca (du 11/07/2016 au 13/07/2016).
- Bayat, H. *et al.* (2020) 'Modeling of emergency evacuation in building fire', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B4), pp. 321–328. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2020-321-2020.
- Beaudet, G. and Wolff, P. (2012) 'La circulation, la ville et l'urbanisme : de la technicisation des transports au concept de mobilité.', *Vertigo*. doi: 10.4000/vertigo.11703.
- Benitez, F., Reghezza-Zitt, M. and Meschinet de Richemond, N. (2020) 'Culture du risque cyclonique et résilience individuelle en Guadeloupe et à Saint-Martin', *EchoGéo*, (51), pp. 0–24. doi: 10.4000/echogeo.18567.
- Beraud, H. (2013) 'Initier la résilience du service de gestion des déchets aux catastrophes naturelles - Le cas des territoires urbains et de l'inondation', p. 447.
- Bernardini, G. *et al.* (2017) 'A preliminary combined simulation tool for the risk assessment of pedestrians' flood-induced evacuation', *Environmental Modelling and Software*, 96, pp. 14–29. doi: 10.1016/j.envsoft.2017.06.007.
- Bertram, J. E. A. and Ruina, A. (2001) 'Multiple walking speed-frequency relations are predicted by constrained optimization', *Journal of Theoretical Biology*, 209(4), pp. 445–453. doi: 10.1006/jtbi.2001.2279.
- Betamio De Almeida, A. (2000) 'La gestion du risque barrage - vallee du Portugal', *Houille Blanche*. doi: 10.1051/lhb/2000072.
- Bian, R. *et al.* (2019) 'Modeling household-level hurricane evacuation mode and destination type joint choice using data from multiple post-storm behavioral surveys', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 99(March 2018), pp. 130–143. doi: 10.1016/j.trc.2019.01.009.

- Le Bon, G. (1895) *Psychologie des foules, Psychologie des foules*. doi: 10.3917/puf.bon.2013.01.
- Bonnefoy, J. L., Bousquet, F. and Rouchier, J. (2001) 'Modélisation d'une interaction individus, espace et société par les systèmes multi-agents: Pâturage en forêt virtuelle', *Espace Géographique*. doi: 10.3917/eg.301.0013.
- Bonnin, P. and Douady, S. (2013) 'Analyse et modélisation de la morphogenèse du réseau des rues', pp. 47–73.
- 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.
- Brulhardt, M.-C. and Bassand, M. (1981) 'La mobilité spatiale en tant que système', *Revue suisse d'économie politique et de statistique*, 3(5), p. 81.
- Bulle, N. (2007) 'Modèle et sciences humaines' To cite this version : HAL Id : halshs-00137192', pp. 781–784.
- Bulumulla, C. (2022) 'Integrating Social Network Diffusion Into BDI-based Simulations : Application Focus on Large-scale Evacuations'.
- Campanella, T. J. (2006) 'Urban resilience and the recovery of new orleans', *Journal of the American Planning Association*, 72(2), pp. 141–146. doi: 10.1080/01944360608976734.
- CEPRI (2014) 'L'évacuation massive des populations (Les territoires face à l'inondation)', *Le Guides de CEPRI*, p. 100.
- Chaib-draa, B. (2001) *Systèmes multi-agents: principes généraux et applications*. Edition He.
- Chalmet, L. G., Francis, R. L. and Saunders, P. B. (1982) 'Network models for building evacuation', *Management science*, 18(1), pp. 90–113. doi: 10.1007/BF02993491.
- Coaffee, J. (2013) 'Towards Next-Generation Urban Resilience in Planning Practice: From Securitization to Integrated Place Making', *Planning Practice and Research*, 28(3), pp. 323–339. doi: 10.1080/02697459.2013.787693.
- Colbeau-Justin, L. and Weiss, K. (2004) 'Stratégies de faire face dans le cas d'une inondation catastrophique : Analyse des paramètres psychosociaux dans les procédures de gestion de crise Ministère de l'Écologie et du Développement Durable Programme de recherche RIO2'.
- Cornes, F. E., Frank, G. A. and Dorso, C. O. (2021) 'Microscopic dynamics of the evacuation phenomena in the context of the Social Force Model', *Physica A*, 568, p. 125744. doi: 10.1016/j.physa.2021.125744.
- Czura, G. (2017) *Modélisation à base d'agents de l'évacuation automobile dans un contexte d'accident technologique Application à la ville de Rouen*. Université de Rouen.
- D'ercole, R. (2003) 'Les enjeux au coeur de la définition du risque Application à Quito (Equateur)', *Espace tropicaux et risques*, pp. 185–196.
- Dash, N. and Morrow, B. H. (2000) 'Return delays and evacuation order compliance: The case of hurricane georges and the florida keys', *Environmental*

- Hazards*, 2(3), pp. 119–128. doi: 10.3763/ehaz.2000.0217.
- Daudé, É. (2006) ‘Du complexe à la complexité : Le retour de l’individu dans les modèles géographiques’, *GéoPoint*, pp. 1–8.
- Daudé, É. *et al.* (2019) ‘ESCAPE: Exploring by simulation cities awareness on population evacuation’, *Proceedings of the International ISCRAM Conference*, 2019-May, pp. 76–93.
- Daudé, É., Grancher, D. and Lavigne, F. (2021) ‘Évacuation massive des populations en temps d’épidémie de COVID-19 : comment éviter la sur-crise ?’, *EchoGéo*, pp. 0–17. doi: 10.4000/echogeo.20961.
- Daudé, É. and Langlois, P. (2006) ‘Introduction à la modélisation multi-agents des systèmes complexes en géographie’.
- Daudé, E. and Tranouez, P. (2020) ‘Netcom ESCAPE – SG : un simulateur d ’ évacuation massive de population pour la formation des acteurs à la gestion de crise’, pp. 1–9.
- Dauphiné, A. (2001) *Risques et catastrophes observer, spatialiser, comprendre, gérer, Collection U. Géographie*.
- Dauphiné, A. and Provitolo, D. (2007) ‘Resilience: A concept for risk management’, *Annales de Géographie*, 116(654), pp. 115–125. doi: 10.3917/ag.654.0115.
- Dautun, C. *et al.* (2006) ‘Le traitement de l’incertitude en gestion de crise : Mise en place d’une veille stratégique du territoire’, *Colloque de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement ‘Risques et performances’*.
- Dautun, C. (2007) ‘Contribution à l ’ étude des crises de grande ampleur : connaissance et aide à la décision pour la sécurité civile To cite this version : HAL Id : tel-00803754 Spécialité : Science et Génie de l ’ Environnement’, in *Colloque de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement ”Risques et performances”*.
- Dias, C., Abd, N. and Zaiter, A. (2021) ‘Evacuation under flooded conditions : Experimental investigation of the influence of water depth on walking behaviors’, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58(November 2020), p. 102192. doi: 10.1016/j.ijdr.2021.102192.
- Dixit, V. and Wolshon, B. (2014) ‘Evacuation traffic dynamics’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 49, pp. 114–125. doi: 10.1016/j.trc.2014.10.014.
- Dong, S., Huang, P. and Wang, W. (2022) ‘An optimization method for evacuation guidance under limited visual field’, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 607, p. 128221. doi: 10.1016/j.physa.2022.128221.
- Douvinet, J. *et al.* (2023) ‘Évaluer la perception de notifications d ’ alerte scénarisées dans différents contextes en France : enjeux et perspectives To cite this version : HAL Id : hal-03760289 Évaluer la perception de notifications d ’ alerte scénarisées dans différents contextes’.
- Drogoul, A. (1993) *De la simulation Multi-Agent à la résolution collective de problèmes*. Université Paris 6.

- Dureau, F. and Hily, M.-A. (2010) *Les mondes de la mobilité*.
- Ercole, R. D. (1996) 'Représentations Cartographiques Des Facteurs De Vulnérabilité Des Populations Exposées À Une Menace Volcanique', *Bull. Inst. fr. études andines*, pp. 479–507. Available at: [http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/25\(3\)/479.pdf](http://www.ifeanet.org/publicaciones/boletines/25(3)/479.pdf).
- Escande, J. *et al.* (2014) 'Signaux faibles : un concept pertinent ? To cite this version : HAL Id : ineri-00973715', (October).
- Fangqin, T. and Aizhu, R. (2008) 'Agent-Based Evacuation Model Incorporating Fire Scene and Building Geometry', *Tsinghua Science and Technology*, 13(5), pp. 708–714. doi: 10.1016/S1007-0214(08)70115-9.
- Fathianpour, A. *et al.* (2023) 'Tsunami evacuation modelling via micro-simulation model', *Progress in Disaster Science*, 17(August 2022), p. 100277. doi: 10.1016/j.pdisas.2023.100277.
- Feng, K. and Lin, N. (2021) 'Reconstructing and analyzing the traffic flow during evacuation in Hurricane Irma (2017)', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 94(March), p. 102788. doi: 10.1016/j.trd.2021.102788.
- Ferrand, N. (2003) 'Modèles Multi-Agents pour l ' Aide à la Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire To cite this version : HAL Id : tel-00003562 Modèles Multi-Agents pour l ' Aide à la Décision et la Négociation en Aménagement du Territoire'.
- Fruin, J. (1971) 'Pedestrian and Planning Design', *Metropolitan Association of Urban Designers and Environmental Planners. 1971 Library of Congress catalogue number 70-159312 (Elevator World Inc. Educational Services Division. PO Box 6507, 354 Morgan Avenue, Mobile, Alabama 36606)*, 377, pp. 1–15. Available at: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1971/355/355-001.pdf>.
- Fu, L. *et al.* (2024) 'Application of the social force modelling method to evacuation dynamics involving pedestrians with disabilities', *Applied Mathematics and Computation*, 460(August 2023), p. 128297. doi: 10.1016/j.amc.2023.128297.
- Fu, Z. *et al.* (2019) 'Modeling fatigue of ascending stair evacuation with modified fine discrete floor field cellular automata', *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*. doi: 10.1016/j.physleta.2019.03.030.
- Fujiki, K. (2018) 'Etude prospective des impacts sociaux d ' une inondation majeure en région Ile-de-France . Disparités socio-spatiales dans la prise en charge des populations franciliennes en situation de crise et post-crise : une analyse cartographiée et quantifiée des b'.
- Fusco, G. (2016) 'Computers , Environment and Urban Systems Beyond the built-up form / mobility relationship : Spatial affordance and lifestyles', 60, pp. 50–66. doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2016.07.011.
- Garbolino, E. and Voiron-Canicio, C. (2020) *Ecosystem and Territorial Resilience: A Geoprospective Approach*.
- Gaultier-Gaillard, S. and Michel, C. (2009) 'La communication opérationnelle, ou

l'expertise des praticiens au service des acteurs publics'. Available at: <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00556643/en/>.

Gendreau, N. (2002) 'Risque d'inondation : une notion probabiliste complexe pour le citoyen', pp. 17–24.

Généreux, J. (2008) *Introduction à l'économie*.

Genre-grandpierre, C. *et al.* (2018) 'Vers de nouvelles dynamiques de localisation des ménages et des activités dans les territoires urbains pour découpler accessibilité et mobilité automobile To cite this version : HAL Id : halshs-01708490 Vers de nouvelles dynamiques de localisation des mén.'

Genre-Grandpierre, C. and Foltête, J. C. (2003) 'Morphologie urbaine et mobilité en marche à pied', in *Cybergeo: European Journal of Geography*.

van Gigch, J. P. (1991) *System design modeling and Metamodeling*.

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.

Golshani, N. *et al.* (2019) 'Analysis of evacuation destination and departure time choices for no-notice emergency events', *Transportmetrica A: Transport Science*, 15(2), pp. 896–914. doi: 10.1080/23249935.2018.1546778.

Goto, Y. *et al.* (2012) 'Tsunami Evacuation Simulation for Disaster Education and City Planning', 7(1).

Goutx, D. (2012) 'Rôle des individus dans la prévention du risque inondation et la gestion de crise', in *23èmes Journées Scientifiques de l'Environnement - Risques environnementaux : détecter, comprendre, s'adapter*.

Grothmann, T. and Reusswig, F. (2006) 'People at risk of flooding: Why some residents take precautionary action while others do not', *Natural Hazards*, 38(1–2), pp. 101–120. doi: 10.1007/s11069-005-8604-6.

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.

Hamilton, W. A. H. (2009) 'Resilience and the city: The water sector', *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Urban Design and Planning*, 162(3), pp. 109–121. doi: 10.1680/udap.2009.162.3.109.

Hamon, A. *et al.* (2021) 'Formation à la gestion de crise : une contribution à la formation à la prise de décisions stratégiques', *Lambda Mu 22*.

Helbing, D. *et al.* (2005) 'Self-Organized Pedestrian Crowd Dynamics: Experiments, Simulations, and Design Solutions No Title', *Transportation Science*, 39(1). doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.1040.0108>.

Helbing, D. and Molnár, P. (1995) 'Social force model for pedestrian dynamics', *Physical Review E*, 51(5), pp. 4282–4286. doi: 10.1103/PhysRevE.51.4282.

Houdremont, C. (1999) *Rumeur et Psychologie des Foules, Communication*.

- Huyen, D. T. H., Ha, H. T. T. and Occello, M. (2023) ‘Combining MAS-GiG Model and Related Problems to Optimization in Emergency Evacuation’, *Computers*, 12(6), pp. 1–19. doi: 10.3390/computers12060117.
- Ibrahim, N. *et al.* (2022) ‘Emergency Route Planning With the Shortest Path Methods: Static and Dynamic Obstacles’, *International Journal of Simulation Modelling*, 21(3), pp. 429–440. doi: 10.2507/IJSIMM21-3-608.
- Ito, E. *et al.* (2020) ‘Tsunami evacuation simulation considering road blockage by collapsed buildings evaluated from predicted strong ground motion’, *Natural Hazards*, 101(3), pp. 959–980. doi: 10.1007/s11069-020-03903-2.
- De Iuliis, M. *et al.* (2023) ‘Large scale simulation of pedestrian seismic evacuation including panic behavior’, *Sustainable Cities and Society*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104527>.
- Kady, R. A. and Davis, J. (2009) ‘The effect of occupant characteristics on crawling speed in evacuation’, *Fire Safety Journal*, 44(4), pp. 451–457. doi: 10.1016/j.firesaf.2008.09.010.
- Kang, Z., Zhang, L. and Li, K. (2019) ‘An improved social force model for pedestrian dynamics in shipwrecks’, *Applied Mathematics and Computation*, 348, pp. 355–362. doi: 10.1016/j.amc.2018.12.001.
- Kanmeugne, P. S. (2015) *Simulation crédible des déplacements de piétons en temps réel : modèle microscopique à influence macroscopique*.
- Katz, D. (1950) *The psychology of the crowd*.
- Katz, J. F. (1998) ‘Psychodynamique des foules’, in *Medecine de Catastrophe Urgences Collectives*. doi: 10.1016/S1279-8479(99)80013-5.
- Kermisch, C. (2012) ‘Vers une définition multidimensionnelle du risque’, *Vertigo*, (Volume 12 Numéro 2). doi: 10.4000/vertigo.12214.
- Kim, J. and Oh, S. S. (2015) ‘Confidence, knowledge, and compliance with emergency evacuation’, *Journal of Risk Research*, 18(1), pp. 111–126. doi: 10.1080/13669877.2014.880728.
- Kisko, T. M. and Francis, R. L. (1985) ‘EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans’, *Fire Safety Journal*, 9(2), pp. 211–220. doi: 10.1016/0379-7112(85)90009-8.
- Knoblauch, R. L. *et al.* (1996) ‘Field Studies of Pedestrian Walking Speed and Start-Up Time’, *Transportation research record*, 1538.
- Kurdi, H. *et al.* (2022) ‘Crowd Evacuation in Hajj Stoning Area: Planning through Modeling and Simulation’, *Sustainability (Switzerland)*, 14(4). doi: 10.3390/su14042278.
- Lagadec, P. (1998) ‘Communication de crise, communication en crise’, *Actes du Colloque Risque et Société*, pp. 197–206.
- Lagadec, P. (2003) ‘Apprendre a gerer les crises’, *Gestion*.
- Lagesse, C. *et al.* (2016) ‘Modelling and characterization of spatial networks. An

- application to the Paris Street Network’, *Flux*, 105(3), pp. 33–49. doi: 10.3917/flux.105.0033.
- Lämmel, G., Rieser, M. and Nagel, K. (2008) ‘Bottlenecks and Congestion in Evacuation Scenarios: A Microscopic Evacuation Simulation for Large-Scale Disasters’, *International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, (Aamas), p. 8.
- Lämmel, G., Rieser, M. and Nagel, K. (2010) ‘Large Scale Microscopic Simulation’, *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*, (2). doi: 10.1007/978-3-642-04504-2.
- Lancel, S. *et al.* (2023) ‘Emergency evacuation in a supermarket during a terrorist attack: towards a possible modelling of the influence of affordances on the evacuation behavior of agents in a complex virtual environment’, *Journal of Safety Science and Resilience*, 4(2), pp. 139–150. doi: 10.1016/j.jnlssr.2022.10.006.
- Lapostolle, F. *et al.* (1999) ‘Risque explosif en milieu urbain: Evacuation d’une ville. L’exemple de Dugny en Seine-Saint-Denis’, *Medecine de Catastrophe Urgences Collectives*, 2(1–2), pp. 48–50. doi: 10.1016/S1279-8479(99)80034-2.
- Laval, C. (2016) ‘Le destin de l’institution dans les sciences sociales’, *Revue du MAUSS*, 48(2), pp. 275–292. doi: 10.3917/rdm.048.0275.
- Lemercier, S. (2012) *Simulation du comportement de suivi dans une foule de piétons à travers l’analyse et la modélisation*.
- Leone, F. *et al.* (2018) ‘Accessibilité territoriale et gestion de crise volcanique aux Antilles Françaises (Guadeloupe & Martinique) : contribution à la planification des évacuations’, *Cybergeog: European Journal of Geography*, pp. 1–16.
- Leone, F. and Freddy, V. (2015) *Plans communaux de sauvegarde et outils de gestion de crise*. Available at: <http://www.pulm.fr/index.php/catalog/product/view/id/620/s/plans-communaux-de-sauvegarde-et-outils-de-gestion-de-crise/category/94/>.
- Leone, F. and Vinet, F. (2021) ‘Résilience et adaptation aux risques « naturels »’, *Géorisque*, 9(August).
- Li, F. *et al.* (2014) ‘Pedestrian Evacuation Modeling and Simulation on Metro Platforms Considering Panic Impacts’, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 138(0), pp. 314–322. doi: 10.1016/j.sbspro.2014.07.209.
- Li, L., Liu, H. and Han, Y. (2019) ‘Arch formation-based congestion alleviation for crowd evacuation’, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 100(January), pp. 88–106. doi: 10.1016/j.trc.2019.01.015.
- Lim, H. R., Lim, M. B. B. and Camposano, R. L. E. (2022) ‘Modeling evacuation behavior of households affected by the eruption of Taal volcano’, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 109(July), p. 103393. doi: 10.1016/j.trd.2022.103393.
- Lim, M. B. B., Lim, H. R. and Anabo, J. M. L. (2021) ‘Evacuation destination choice behavior of households in Eastern Samar, Philippines during the 2013 Typhoon Haiyan’, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 56(February), p. 102137. doi:

10.1016/j.ijdr.2021.102137.

Lindell, M. K. *et al.* (2012) 'Household Evacuation Decision Making in Response to Hurricane Ike', *Natural Hazards Review*, 13(4), pp. 283–296. doi: 10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000074.

Lindell, M. K. *et al.* (2020) 'Community response to hurricane threat: Estimates of household evacuation preparation time distributions', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 85(July), p. 102457. doi: 10.1016/j.trd.2020.102457.

Liu, H. *et al.* (2018) 'Crowd evacuation simulation approach based on navigation knowledge and two-layer control mechanism', *Information Sciences*, 436–437(88), pp. 247–267. doi: 10.1016/j.ins.2018.01.023.

Liu, Q. *et al.* (2022) 'Modeling the dynamics of pedestrian evacuation in a complex environment', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 585, p. 126426. doi: 10.1016/j.physa.2021.126426.

Low, D. J. and Cowan, D. (2000) 'Following the crowd Use your neighbour 's genes'.

Lutoff, C. *et al.* (2018) 'Mobility Exposure Scales of Analysis in the Face of Flash Floods', in *Mobilities Facing Hydrometeorological Extreme Events 1*. doi: 10.1016/b978-1-78548-289-2.50001-x.

Ma, J. *et al.* (2014) 'Method of bottleneck identification and evaluation during crowd evacuation process', *Procedia Engineering*, 71, pp. 454–461. doi: 10.1016/j.proeng.2014.04.065.

Mas, E., Adriano, B. and Koshimura, S. (2013) 'An integrated simulation of tsunami hazard and human evacuation in La Punta, Peru', *Journal of Disaster Research*, 8(2), pp. 285–295. doi: 10.20965/jdr.2013.p0285.

Mesa-Arango, R. *et al.* (2013) 'Household-Level Model for Hurricane Evacuation Destination Type Choice Using Hurricane Ivan Data', *Natural Hazards Review*, 14(1), pp. 11–20. doi: 10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000083.

Meschinet de Richemond, N. and Reghezza, M. (2010) 'La gestion du risque en France: Contre ou avec le territoire?', *Annales de Géographie*, 119(673), pp. 248–267. doi: 10.3917/ag.673.0248.

Metzger, P. *et al.* (2015) 'Enjeux territoriaux et vuln ´ erabilit ´ e : une approche rationnelle To cite this version ':

Mishra, S. and Suar, D. (2012) 'Effects of Anxiety, Disaster Education, and Resources on Disaster Preparedness Behavior', *Journal of Applied Social Psychology*, 42(5), pp. 1069–1087. doi: 10.1111/j.1559-1816.2011.00853.x.

Moussaïd, M. (2009) *Etude expérimentale et modélisation des déplacements collectifs de piétons*. Toulouse.

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.

- Nahon, M. and Michaloux, M. (2016) 'Organisation of civilian emergency services: The ORSEC plan', *Journal Européen des Urgences et de Réanimation*, 28(2–3), pp. 94–99. doi: 10.1016/j.jeurea.2016.06.002.
- Naser, M. and Birst, S. C. (2010) 'Mesoscopic Evacuation Modeling for Small- to Medium-Sized Metropolitan Areas', (August).
- Nguyen, V. Q. *et al.* (2019) 'A scalable approach for dynamic evacuation routing in large smart buildings', *Proceedings - 2019 IEEE International Conference on Smart Computing, SMARTCOMP 2019*, pp. 292–300. doi: 10.1109/SMARTCOMP.2019.00065.
- Oliveira, E., Fischer, K. and Stepankova, O. (1999) 'Multi-agent systems: Which research for which applications', *Robotics and Autonomous Systems*, 27(1), pp. 91–106. doi: 10.1016/S0921-8890(98)00085-2.
- Orengo, C., Tena-chollet, F. and Sauvagnargues, S. (2022) 'Numerical Simulation of a Preventative Evacuation using a Multi-Agent Framework', *Chemical Engineering Transactions*, 91, pp. 205–210. doi: 10.3303/CET2291035.
- Parisi, D. R. and Dorso, C. O. (2005) 'Microscopic dynamics of pedestrian evacuation', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 354(1–4), pp. 606–618. doi: 10.1016/j.physa.2005.02.040.
- Paul, B. K. and Dutt, S. (2010) 'Hazard warnings and responses to evacuation orders: The case of Bangladesh's cyclone Sidr', *Geographical Review*, 100(3), pp. 336–355. doi: 10.1111/j.1931-0846.2010.00040.x.
- Peacock, R. D., Averill, J. D. and Kuligowski, E. D. (2010) *Stairwell Evacuation from Buildings: What We Know We Don't Know, Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008*. doi: 10.1007/978-3-642-04504-2_4.
- 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'.
- Pesqueux, Y. (2020) 'Institution et organisation To cite this version : Institution et organisation'.
- de Pina-Cabral, J. (2011) 'Afterword: What is an institution?', *Social Anthropology*, 19(4), pp. 477–494. doi: 10.1111/j.1469-8676.2011.00173.x.
- Piombini, A. *et al.* (2017) 'Environnement bâti et mobilité piétonne: analyse morphométrique des espaces de visibilité et de choix d'itinéraires pédestres.', in *Colloque International Francophone Piéton COPIE 2013 - La ville sous nos pieds: connaissances et pratiques favorables aux mobilités piétonnes*.
- Plattard, O. (2017) *Repenser l'évacuation d' une population littorale dans un contexte multi-risque par la modélisation multi-agents*.
- Provitolo, D. *et al.* (2015) 'Les comportements humains en situation de catastrophe: De l'observation à la modélisation conceptuelle et mathématique', *CyberGeo*, 2015, pp. 1–21. doi: 10.4000/cybergegeo.27150.
- Qiu, F. and Hu, X. (2010) 'Modeling group structures in pedestrian crowd simulation', *Simulation modeling practice and theory*, 2, p. 18.

Quarantelli, E. L. (2005) *What is a disaster?: A dozen perspectives on the question, What is a Disaster?: A Dozen Perspectives on the Question*. doi: 10.4324/9780203984833.

Razafimanitsony, L. *et al.* (2021) 'Résilience organisationnelle et continuité d'activités des universités dans un contexte de pandémie - Cas de l'Université Senghor (Alexandrie) To cite this version : HAL Id : hal-03433448 Résilience organisationnelle et continuité d'activités des'.

Reininger, B. M. *et al.* (2013) 'Social capital and disaster preparedness among low income Mexican Americans in a disaster prone area', *Social Science and Medicine*, 83, pp. 50–60. doi: 10.1016/j.socscimed.2013.01.037.

Remy, J. (2016) 'Spatialité du social et transactions', *SociologieS*.

Rode, S. (2012) 'Le chêne ou le roseau : quelles stratégies de gestion du risque inondation en France?', *Cybergeo: European Journal of Geography*.

Rouquier, J. (2009) 'Robustesse et émergence dans les systèmes complexes : le modèle des automates cellulaires'.

Rui, Y., Tang, T. and Zhang, J. (2021) 'An Improved Social Force Model for Bicycle Flow in Groups', *Journal of advanced transportation*, 2021.

Ruin, I. (2007) 'Conduite {à} contre-courant. Les pratiques de mobilit{é} dans le Gard : facteur de vuln{é}rabilit{é} aux crues rapides'. Available at: <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00258018/fr/>.

Ruin, I. and Lutoff, C. (2004) 'Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des populations en temps de crise', *Houille Blanche*. doi: 10.1051/lhb:200406016.

Sanders, L. (2001) 'Mod`eles en analyse spatiale : introduction To cite this version : Les modèles en analyse spatiale', pp. 17–29.

Sénécal, G. (2012) 'Conflits de proximité et coopération', *Cahiers de géographie du Québec*. doi: 10.7202/012557ar.

Sensevy, G. *et al.* (2015) 'Modélisation : une approche épistémologique To cite this version : HAL Id : halshs-00856541 Modélisation : une approche épistémologique', pp. 163–188.

Sheffi, Y., Mahmassani, H. and Powell, W. B. (1982) 'A transportation network evacuation model', *Transportation Research Part A: General*, 16(3), pp. 209–218. doi: 10.1016/0191-2607(82)90022-X.

Simo Kanmeugne, P., Beynier, A. and Donnart, J.-Y. (2013) 'Modèle microscopique à influence macroscopique pour la simulation des déplacements de piétons autonomes en temps réel', *JFSMA, Cepadues Editions*.

Singh, D., Padgham, L. and Logan, B. (2016) 'Integrating BDI Agents with Agent-Based Simulation Platforms', *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 30(6), pp. 1050–1071. doi: 10.1007/s10458-016-9332-x.

Sugiman, T. and Misumi, J. (1988) 'Development of a New Evacuation Method for Emergencies: Control of Collective Behavior by Emergent Small Groups', *Journal of Applied Psychology*, 73(1), pp. 3–10. doi: 10.1037/0021-9010.73.1.3.

- Swamy, R. *et al.* (2017) 'Hurricane evacuation planning using public transportation', *Socio-Economic Planning Sciences*, 59, pp. 43–55. doi: 10.1016/j.seps.2016.10.009.
- Taillandier, P. *et al.* (2017) 'A BDI Agent Architecture for the GAMA Modeling and Simulation Platform', 1, pp. 3–23. doi: 10.1007/978-3-319-67477-3.
- Taillandier, P. *et al.* (2019) 'Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform', *GeoInformatica*, 23(2), pp. 299–322. doi: 10.1007/s10707-018-00339-6.
- Theos, C. (1994) 'Modélisation du mouvement des personnes lors de l'évacuation d'un bâtiment à la suite d'un sinistre'.
- 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.
- Toubin, M. *et al.* (2012) 'La Résilience urbaine : un nouveau concept opérationnel vecteur de durabilité urbaine ?', *Développement durable et territoires*, 3(Vol. 3, n° 1), pp. 0–18. doi: 10.4000/developpementdurable.9208.
- Truptil, S. (2011) 'Etude de l'approche de l'interopérabilité par médiation dans le cadre d'une dynamique de collaboration appliquée à la gestion de crise'.
- 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 Kashiwayama, 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.
- Urry, J. (2005) 'Les systèmes de la mobilité', *Cahiers Internationaux de Sociologie*, 118(1), pp. 23–35. doi: 10.3917/cis.118.0023.
- Valentin, J. (2013) *Simulation du comportement humain en situation d'évacuation de bâtiment en feu*.
- Varas, A. *et al.* (2007) 'Cellular automaton model for evacuation process with obstacles', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 382(2), pp. 631–642. doi: 10.1016/j.physa.2007.04.006.
- Verdel, T. *et al.* (2010) 'iCrisis™ : Un dispositif original de simulation de gestion de crise', pp. 1–7.
- Veyret, Y. and Reghezza, M. (2005) 'Aléas et risques dans l'analyse géographique', *Annales des mines*, pp. 1–8. Available at: <http://www.annales.com/re/2005/re40/veyret.pdf>.
- Wang, H. *et al.* (2016) 'An agent-based model of a multimodal near-field tsunami evacuation: Decision-making and life safety', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 64, pp. 86–100. doi: 10.1016/j.trc.2015.11.010.
- Wang, Y. and Taylor, J. E. (2017) 'Tracking urban resilience to disasters: A mobility network-based approach', in *Proceedings of the International ISCRAM Conference*.

- Wang, Z. and Jia, G. (2021) 'A novel agent - based model for tsunami evacuation simulation and risk assessment', *Natural Hazards*, 105(2), pp. 2045–2071. doi: 10.1007/s11069-020-04389-8.
- Weiss, K., Girandola, F. and Colbeau-Justin, L. (2011) 'Les comportements de protection face au risque naturel : de la résistance à l'engagement', *Pratiques Psychologiques*, 17(3), pp. 251–262. doi: 10.1016/j.prps.2010.02.002.
- Wong, S. K. *et al.* (2017) 'Optimized evacuation route based on crowd simulation', *Computational Visual Media*, 3(3), pp. 243–261. doi: 10.1007/s41095-017-0081-9.
- Xie, W. *et al.* (2021) 'A study of group effects in pedestrian crowd evacuation: Experiments, modelling and simulation', *Safety Science*, 133(September 2020), p. 105029. doi: 10.1016/j.ssci.2020.105029.
- Yuan, W. F. and Tan, K. H. (2007) 'An evacuation model using cellular automata', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 384(2), pp. 549–566. doi: 10.1016/j.physa.2007.05.055.
- Yue, H. *et al.* (2021) 'Simulation of the influence of spatial obstacles on evacuation pedestrian flow in walking facilities', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 571, p. 125844. doi: 10.1016/j.physa.2021.125844.
- Yun, N. Y. and Hamada, M. (2015) 'Evacuation behavior and fatality rate during the 2011 Tohoku-oki earthquake and tsunami', *Earthquake Spectra*, 31(3), pp. 1237–1265. doi: 10.1193/082013EQS234M.
- Zhang, X., Coates, G. and Ni, X. (2017) 'Agent-based modelling and simulation for lecture theatre emergency evacuation', in *Proceedings of the International ISCRAM Conference*.
- Zhang, Z. *et al.* (2020) 'Effects of shadow evacuation on megaregion evacuations', (xxxx). doi: 10.1016/j.trd.2020.102295.
- Zipf, G. K. (1949) *Human behavior and the principle of least effort: an introduction to human ecology*. Addison-Welsey Press.

RESUME

Cette thèse se propose de comprendre dans quelle mesure il est possible de construire une simulation numérique reproductible et adaptable des mobilités dans un contexte d'évacuation préventive de population. En effet, l'évacuation de population est une mesure de gestion de crise qui implique un nombre important d'acteurs humains et responsabilise directement la population dans sa propre mise en sécurité. Tester ce processus est complexe et coûteux : la réalisation d'exercices, par exemple, n'implique pas toujours la population, principale concernée. Aujourd'hui, des outils numériques permettent de simuler de telles opérations. Ces simulations, bien qu'elles ne puissent se substituer à une mise en œuvre réelle, constituent un moyen d'analyse voire d'aide à la décision. Lors du déclenchement d'une évacuation, une série de facteurs incertains influent sur le déroulement de l'opération. Ces facteurs peuvent être : contextuels, ceux sur lesquels les acteurs humains n'ont aucune prise (type d'aléa, météorologie au moment de l'événement, temporalité du ou des phénomènes impliqués) ; organisationnels, faisant principalement référence à la gestion de l'événement par l'organisation gestionnaire de crise ; individuels, concernant le comportement des personnes.

Le parti-pris de la thèse est de construire un modèle d'évacuation préventive de population, centrée sur les processus piétons, dont les éléments soient simulables à l'aide d'un système multi-agents. L'objectif est d'élaborer un outil adaptable et transposable permettant de simuler une grande variété de scénarios d'événements, pouvant notamment être décrits par un plan d'urgence, à des fins d'analyse et de diagnostic du territoire concerné, et proposer *in fine* d'éventuelles recommandations opérationnelles.

Les facteurs identifiés dans l'état de l'art sont formalisés sous forme de neuf paramètres, dont six sont implémentés dans une simulation (plateforme GAMA). Ces paramètres tiennent compte des incertitudes liées à l'application des consignes d'évacuation par les personnes, des choix de mobilité et des variations dues au contexte de la crise. La base physique du déplacement des piétons intègre les notions d'évitement d'obstacles et de partage de l'espace. Autour de cette base, les autres paramètres influents sont intégrés.

Les paramètres sont ensuite testés afin de caractériser leur impact sur le comportement général de la simulation. Puis, des scénarios d'applications plus complexes, incluant des variations types de la répartition spatiale de la population du territoire cible, sont construits et appliqués. L'objectif est d'alimenter des indicateurs de sortie incluant un travail d'analyse cartographique. Ces indicateurs ont deux fonctions : ils permettent à la fois d'évaluer la performance globale de l'opération et de mettre en évidence des déséquilibres territoriaux au travers de scénarios crédibles ou possibles.

Le modèle de simulation montre au final pouvoir alimenter un nombre important d'indicateurs et fournir de l'information valorisable sur le déroulement d'une évacuation préventive de population. Les limites conceptuelles identifiées sont enfin discutées, notamment sous l'angle de la capacité descriptive et explicative de la simulation proposée.

SUMMARY

The aim of this thesis is to understand the extent to which it is possible to build a reproducible and adaptable digital simulation of mobilities in a preventive population evacuation context. The evacuation of a population is a crisis management measure that involves a large number of human actors and makes the population directly responsible for their own safety. Testing this process is complex and costly: conducting drills, for example, does not always involve the population, who are the main people concerned. Today, digital tools can be used to simulate such operations. Although these simulations are no substitute for actual operations, they do provide a means of analysis and decision-making. When an evacuation is triggered, a series of uncertain factors influence the course of the operation. These factors can be: Contextual, those over which human actors have no control (type of hazard, meteorology at the time of the event, temporality of the phenomenon or phenomena involved); Organizational, referring mainly to the management of the event by the crisis management organization; Individual, concerning the behavior of people.

The aim of the thesis is to build a preventive population evacuation model, centered on pedestrian processes, the elements of which can be simulated using a multi-agent system. The aim is to develop a tool that can be adapted and transposed to simulate a wide variety of event scenarios, including those that could be described by an emergency plan, for the purposes of analyzing and diagnosing the area concerned, and ultimately proposing any operational recommendations.

The factors identified in the state of the art are formalized in the form of nine parameters, six of which are implemented in a simulation (GAMA platform). These parameters take into account the uncertainties associated with the application of evacuation instructions by individuals, mobility choices and variations due to the context of the crisis. The physical basis of pedestrian movement incorporates the concepts of obstacle avoidance and space sharing. The other influential parameters are integrated around this base.

The parameters are then tested to characterize their impact on the general behavior of the simulation. More complex application scenarios, including typical variations in the spatial distribution of the target population, are then constructed, and applied. The aim is to provide output indicators, including a cartographic analysis. These indicators have two functions: they can be used to assess the overall performance of the operation and to highlight territorial imbalances through credible or possible scenarios.

In the end, the simulation model shows that it can feed many indicators and providing valuable information on the progress of a preventive evacuation of the population. Finally, the conceptual limitations identified are discussed, particularly in terms of the descriptive and explanatory capacity of the proposed simulation.